



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ
ΓΝΩΣΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ευγενίας Φωτίου Αδαμοπούλου

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιανουάριος 2009



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ευγενίας Φ. Αδαμοπούλου

ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΓΝΩΣΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Συμβουλευτική Επιτροπή:

Μ. Θεολόγου, Καθηγητής ΕΜΠ

Ε. Συκάς, Καθηγητής ΕΜΠ

Μ. Αναγνώστου, Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την επταμελή Εξεταστική Επιτροπή την Ιανουαρίου 2009,

.....
Μ. Θεολόγου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ε. Συκάς
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Μ. Αναγνώστου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Γ. Στασινόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Φ. Κωνσταντίνου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ν. Μήτρου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Θ. Αποστολόπουλος
Καθηγητής Οικ. Παν. Αθηνών

.....
Ευγενία Φ. Αδαμοπούλου

Διδάκτωρ Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

Copyright © Ευγενία Φ. Αδαμοπούλου, 2009.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τη συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τη συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Τα γνωστικά δίκτυα προβάλλουν ως μια καινοτόμα, πολλά υποσχόμενη προσέγγιση του B3G οράματος. Προκρίνοντας το διαμοιρασμό του φάσματος και, συγκεκριμένα, την ευκαιριακή χρήση ζωνών συχνοτήτων που παραμένουν ακρησιμοποίητες στο χώρο και στο χρόνο, τα γνωστικά δίκτυα επιχειρούν να ανοίξουν το δρόμο στην ανάπτυξη νέων υπηρεσιών, στη βελτίωση της εμπειρίας του χρήστη, στην κατασκευή εξελιγμένων τερματικών συσκευών, καθώς και στην υιοθέτηση νέων, προηγμένων μεθόδων διαχείρισης.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής τα γνωστικά δίκτυα ορίζονται ως «Δίκτυα που μπορούν να «αισθάνονται» το περιβάλλον τους και να αντιδρούν, προληπτικά ή διορθωτικά, σε εξωτερικά ερεθίσματα, αλλάζοντας τις παραμέτρους λειτουργίας τους με στόχο τη βέλτιστη προσαρμογή στις συνθήκες του περιβάλλοντός τους. Λαμβάνουν τις τελικές αποφάσεις διάρθρωσης, αυτόνομα, βασιζόμενα σε γνώση και εμπειρία που έχουν συγκεντρώσει κατά τη λειτουργία τους».

Για την εκπλήρωση, λοιπόν, των απαιτήσεων εύρυθμης και αποδοτικής λειτουργίας ενός γνωστικού δικτύου, η παρούσα διατριβή προτείνει ένα μοντέλο αναφοράς, το οποίο περιλαμβάνει τις τρεις θεμελιώδεις και στενά συνδεδεμένες λειτουργικές φάσεις ενός τέτοιου δικτύου; τη λειτουργική φάση της επαίσθησης, τη λειτουργική φάση της συλλογιστικής και τη λειτουργική φάση της λήψης αποφάσεων. Η λειτουργική φάση της επαίσθησης επικεντρώνεται στην ανάλυση του ραδιοπεριβάλλοντος μιας κυψέλης, ειδικά δε, στη διαδικασία λήψης και συλλογής μετρήσεων που αντανακλούν τις συνθήκες και τα επίπεδα θορύβου και παρεμβολών εντός των αξιοποιήσιμων ζωνών συχνοτήτων. Η λειτουργία της συλλογιστικής εστιάζεται στην ανακάλυψη των δυνατοτήτων των υποψήφιων εναλλακτικών διαρθρώσεων, δηλαδή των δυνητικών επιδόσεών τους ως προς συγκεκριμένα κριτήρια, σε περίπτωση εφαρμογής τους. Τέλος, η λειτουργία λήψης αποφάσεων έχει ως κύριο αντικείμενο τη λήψη απόφασης για τη βέλτιστη κατανομή διαρθρώσεων λαμβάνοντας υπόψη πλήθος παραμέτρων όπως είναι οι εκτιμήσεις για τις δυνατότητες των διαρθρώσεων, η χωρική κατανομή των τερματικών, ο βαθμός κινητικότητάς τους, το φορτίο κίνησης, το είδος των αιτούμενων υπηρεσιών, το κόστος αναδιάρθρωσης και οι πολιτικές των παρόχων.

Η διατριβή εστιάζεται στις δύο πρώτες λειτουργικές φάσεις και συγκεκριμένα, στη φάση της επαίσθησης και στη φάση της συλλογιστικής. Στη φάση της συλλογιστικής η διατριβή προτείνει τη χρήση των κινητών τερματικών ως ένα εκτεταμένο δίκτυο αισθητήρων, που πραγματοποιεί μετρήσεις επαίσθησης, προτείνει μια λειτουργική αρχιτεκτονική τόσο για την πλευρά του γνωστικού δικτύου όσο και για την πλευρά του γνωστικού τερματικού και ορίζει το ρόλο κάθε λειτουργικής μονάδας καθώς και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των επιμέρους μονάδων. Επιπλέον, ορίζει κατάλληλο πρωτόκολλο για την επικοινωνία μεταξύ γνωστικού σταθμού βάσης και γνωστικού τερματικού και αξιολογεί τα συγκριτικά πλεονεκτήματα κάθε μέτρου ποιότητας καναλιού για τους σκοπούς της επαίσθησης.

Στη φάση της συλλογιστικής, η παρούσα διατριβή συνάγει τις δυνατότητες μιας πιθανής διάρθρωσης βάσει των συλλεχθέντων δεδομένων της διαδικασίας επαίσθησης, κάνει χρήση κατάλληλων τεχνικών μηχανικής μάθησης με στόχο το συγκερασμό της παρελθούσας εμπειρίας με πρόσφατα δεδομένα επαίσθησης προκειμένου να επιτευχθεί μια βελτιωμένη εκτίμηση των δυνατοτήτων των υποψήφιων διαρθρώσεων και εισάγει τη χρήση πιθανοτικών μοντέλων για την αξιόπιστη εκτίμηση των δυνατοτήτων των υποψήφιων διαρθρώσεων και την αντιμετώπιση της στοχαστικής φύσης των χαρακτηριστικών του ραδιοπεριβάλλοντος. Τέλος συγκρίνει τα αποτελέσματα των επιμέρους τεχνικών μάθησης και εξάγει χρήσιμα συμπεράσματα.

Λέξεις κλειδιά: γνωστικά δίκτυα, διαμοιρασμός φάσματος, αναδιάρθρωση, δυνατότητες διαρθρώσεων, ασύρματες επικοινωνίες πέραν της τρίτης γενιάς, λογισμικώς καθορισμένα συστήματα ασύρματων επικοινωνιών, επαίσθηση, συλλογιστική, αξιόπιστη εκτίμηση, μοντέλα μηχανικής μάθησης, πιθανολογικά μοντέλα, δέντρα αποφάσεων, νευρωνικά δίκτυα, μπεϋζιανά δίκτυα.

Abstract

Cognitive networks appear as an innovative, highly promising approach of the B3G vision. By proposing spectrum sharing and, specifically, the opportunistic use of frequency bands that remain unused in time and space, cognitive networks pave the way for the deployment of new services, the improvement of user experience, the development of enhanced terminal devices as well as the adoption of new, advanced management schemes.

In the framework of the present thesis, cognitive networks are defined as *“Networks that are able to sense their environment and act, proactively or reactively, to external stimuli by modifying their operational parameters with a view to optimally adjusting to environmental conditions. They reach the final configuration decisions, autonomously, based on knowledge and experience established during their operation”*.

Thus, in order to fulfill the requirements for the efficient operation of a cognitive network, the present thesis proposes a reference cognitive model, comprising of the three main and tightly interconnected operational phases of such a network; namely the sensing, the reasoning and the decision making operational phase. The sensing phase focuses on the radio scene analysis, and specifically, in the process of executing and collecting measurements, reflecting the conditions as well as noise and interference levels, regarding the exploitable frequency bands. The reasoning phase concentrates on the discovery of the capabilities of candidate, alternate configurations, or, in other words, their potential performance in terms of specific criteria, in case these configurations are applied. Finally, the decision making process focuses on reaching a decision regarding the optimal configuration combination by taking into account a number of different parameters, including the estimations of the configurations' capabilities, the spatial distribution of mobile terminals, their mobility degree, the traffic load, the requested services, the reconfiguration cost and the operators' policies.

The present thesis focuses on the first two operational phases; namely the sensing and the reasoning phase. Concerning the sensing phase, the thesis proposes the use of mobile terminals as a widely distributed network of sensing instruments, proposes a functional architecture for both cognitive base stations and cognitive terminal and

defines the role of every functional unit as well as their interactions. Furthermore, the thesis defines an efficient protocol for the communication of the actors involved in the sensing process and finally, compares and exploits the advantages of different channel quality measures for sensing purposes.

Regarding the reasoning phase, the thesis reaches estimations for the anticipated capabilities of candidate alternate configurations, proposes the use of machine learning techniques, with a view to introducing a certain degree of robustness and presents suitable probabilistic models for reaching robust estimations of the capabilities of alternate configurations and tackling the stochastic nature of the radio environment. Finally, the efficiency of the abovementioned machine learning techniques is compared through representative scenarios and useful conclusions are reached.

Keywords: cognitive networks, spectrum sharing, reconfiguration, configuration capabilities, beyond third generation wireless communications, software defined radio, sensing, reasoning, robust estimation, machine learning models, probabilistic models, decision trees, neural networks, Bayesian networks.

Πρόλογος

Η διατριβή είναι προϊόν της τριετούς ερευνητικής μου εργασίας στο εργαστήριο Δικτύων Υπολογιστών της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, και εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Μιχαήλ Θεολόγου. Νιώθω ειλικρινά τυχερή που κατά τη διάρκεια της παρουσίας μου στο Μετσόβιο Πολυτεχνείο έλαβα καθοδήγηση από ένα λαμπρό επιστήμονα και έναν εξαιρετο άνθρωπο. Η βοήθεια και οι συμβουλές του υπήρξαν καταλυτικές για την εκπόνηση της έρευνάς μου. Τον ευχαριστώ, από τα βάθη της καρδιάς μου, για την καθοδήγηση, την υποστήριξη και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε.

Σημαντική ήταν, επίσης, η βοήθεια που έλαβα κατά τη διάρκεια της ερευνητικής μου εργασίας από τους Καθηγητές κ. Ευστάθιο Συκά και κ. Μιλτιάδη Αναγνώστου, οι οποίοι μαζί με τον κ. Θεολόγου συγκροτούν την τριμελή συμβουλευτική επιτροπή για τη διατριβή αυτή. Θα ήθελα να τους ευχαριστήσω θερμά για τις πολύτιμες συμβουλές και τα εποικοδομητικά τους σχόλια, τα οποία στάθηκαν εξαιρετικά χρήσιμα για την περαίωση της διατριβής μου. Οι υποδείξεις του λειτούργησαν ως πυξίδα προς την κατεύθυνση της ολοκληρωμένης, συνεπούς και ηθικής επιστημονικής έρευνας.

Θα ήθελα, ακόμα, να ευχαριστήσω τους Καθηγητές κ. Γεώργιο Στασινόπουλο, κ. Φίλιππο Κωνσταντίνου και κ. Νικόλαο Μήτρου, μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής της διατριβής μου, για τη βοήθειά τους κατά τη διάρκεια της παρουσίας μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, τόσο σε προπτυχιακό όσο και μεταπτυχιακό επίπεδο. Ήταν τιμή μου να μαθητεύσω δίπλα σε τόσο αξιόλογους επιστήμονες. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του Οικονομικού Πανεπιστημίου Αθηνών κ. Θεόδωρο Αποστολόπουλο για την τιμή που μου έκανε να είναι μέλος της εξεταστικής επιτροπής της διατριβής.

Ευχαριστώ θερμά όλους τους φίλους, το Μιχάλη, την Όλγα, τους Δημήτρηδες, και όλους τους συνεργάτες για τη συμπαράσταση και τις ωραίες στιγμές που περάσαμε στο εργαστήριο. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Άρτεμη για τη σημαντική βοήθεια της, οποιαδήποτε στιγμή τη χρειάστηκα.

Θα ήθελα, ακόμα, να ευχαριστήσω τους γονείς μου και την αδερφή μου, Έλενα, γιατί ήταν πάντα δίπλα μου. Με στήριζαν και με στηρίζουν ανιδιοτελώς σε κάθε προσπάθειά μου, συμμεριζόμενοι κάθε φόβο και αγωνία.

Δε θα μπορούσα να αφιερώσω τη διατριβή σε κανέναν άλλο, παρά μόνο στον Κώστα, για κάθε χαμόγελο, κάθε δάκρυ, κάθε στιγμή που περάσαμε μαζί...

Σας ευχαριστώ!

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	25
1.1	Σημερινό τοπίο των ασύρματων επικοινωνιών	25
1.2	Περιβάλλον πέραν της 3 ^{ης} γενιάς	26
1.3	Συνεργατικά δίκτυα	27
1.4	Γνωστικά δίκτυα	28
1.4.1	Ορισμοί	29
1.4.2	Διαμοιρασμός φάσματος	32
1.4.3	Κατηγοριοποίηση βάσει των αξιοποιούμενων συχνοτήτων	34
1.4.4	Οφέλη γνωστικών δικτύων	35
1.4.4.1	Οφέλη για τους τελικούς χρήστες	35
1.4.4.2	Οφέλη για τον κατασκευαστή	37
1.4.4.3	Οφέλη για τους παρόχους υπηρεσιών	37
1.4.4.4	Οφέλη για τους παρόχους δικτύου	38
1.4.4.5	Οφέλη για τις ρυθμιστικές αρχές	40
1.4.4.6	Σύνοψη – Πλεονεκτήματα και Προκλήσεις	41
1.4.4.7	Λογισμικώς Καθορισμένα Συστήματα Επικοινωνιών	43
1.4.4.8	Γνωστικός κύκλος	50
1.5	Αντικείμενο της διατριβής	58
1.5.1	Γνωστικό μοντέλο αναφοράς	58
1.6	Σχετικές εργασίες	60
1.7	Διάρθρωση έκθεσης προόδου	64
1.8	Παραπομπές	66
2	Συλλογή Πρωτογενών Δεδομένων	73
2.1	Τοπολογία του υπό εξέταση γνωστικού δικτύου	73
2.1.1	Γνωστικός σταθμός βάσης	73
2.1.2	Αναδιάρθρωση γνωστικού σταθμού βάσης	74
2.1.3	Αυτονομία γνωστικού σταθμού βάσης	76
2.1.4	Σύνοψη τοπολογίας γνωστικού δικτύου	78
2.2	Μέτρα και μέθοδοι εκτίμησης ποιότητας καναλιού για τη γνωστική λειτουργία της επαίσθησης	79
2.2.1	Η έννοια της παρεμβολής και τα μέτρα ποιότητας καναλιού	79
2.2.2	Λόγος σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο (SINR)	80
2.2.2.1	Γενικά	80
2.2.2.2	Το SINR ως μέτρο ποιότητας καναλιού	81
2.2.2.3	Το πρόβλημα της εκτίμησης του SINR	82
2.2.2.4	Βασικό μοντέλο εκτίμησης του SINR	85
2.2.2.5	Η εκτίμηση του SINR σε συστήματα TDMA	86
2.2.2.6	Η εκτίμηση του SINR σε συστήματα CDMA	87
2.2.2.7	Η εκτίμηση του SINR σε συστήματα OFDM και OFDMA	89
2.2.3	Θερμοκρασία παρεμβολών	91

2.3	Αρχιτεκτονική και πρωτόκολλα επαίσθησης	93
2.3.1	<i>Διαδικασίες και σχήματα επαίσθησης.....</i>	<i>93</i>
2.3.1.1	Απαιτήσεις για την υποστήριξη της λειτουργίας της επαίσθησης.....	93
2.3.1.2	Αξιοποίηση των κινητών τερματικών στη λειτουργία της επαίσθησης	94
2.3.1.3	Καθορισμός σχημάτων επαίσθησης και διατύπωση σεναρίων λειτουργίας	95
2.3.1.4	Ανάθεση πόρων για τη λειτουργία της επαίσθησης.....	100
2.3.1.5	Αυτόνομη και μη αυτόνομη επαίσθηση	103
2.3.2	<i>Αρχιτεκτονική επαίσθησης.....</i>	<i>104</i>
2.3.2.1	Προτεινόμενη λειτουργική αρχιτεκτονική επαίσθησης του σταθμού βάσης	106
2.3.2.2	Προτεινόμενη λειτουργική αρχιτεκτονική επαίσθησης του τερματικού	107
2.3.3	<i>Πρωτόκολλο επικοινωνίας του στρώματος επαίσθησης</i>	<i>109</i>
2.3.3.1	Εισαγωγή στο προτεινόμενο πρωτόκολλο επαίσθησης	109
2.3.3.2	Δομή των μηνυμάτων αίτησης επαίσθησης.....	109
2.3.3.3	Δομή των μηνυμάτων αναφοράς επαίσθησης.....	127
2.3.3.4	Σχήματα καθορισμού των προδιαγραφών των μηνυμάτων επαίσθησης	138
2.3.4	<i>Ροή πληροφορίας</i>	<i>157</i>
2.3.4.1	Γενικά.....	157
2.3.4.2	Ροή πληροφορίας στη διαδικασία αποστολής αίτησης επαίσθησης	157
2.3.4.3	Ροή πληροφορίας στη διαδικασία επαίσθησης σε κανάλι καθόδου	158
2.3.4.4	Ροή πληροφορίας στη διαδικασία επαίσθησης σε κανάλι ανόδου .	160
2.3.5	<i>Ειδικά θέματα υλοποίησης.....</i>	<i>163</i>
2.4	Παραπομπές.....	168
3	Βασική Συλλογιστική επί των Πρωτογενών Δεδομένων	179
3.1	Η γνωστική λειτουργία της βασικής συλλογιστικής	179
3.1.1	<i>Ο ρόλος της βασικής συλλογιστικής.....</i>	<i>179</i>
3.1.2	<i>Μέτρα των προσδοκώμενων δυνατοτήτων των υποψήφιων διαρθρώσεων.....</i>	<i>183</i>
3.2	Χωρητικότητα μετάδοσης.....	183
3.2.1	<i>Διαδικασία εκτίμησης της χωρητικότητας μετάδοσης.....</i>	<i>183</i>
3.2.2	<i>Εκτίμηση της επιμέρους χωρητικότητας μετάδοσης.....</i>	<i>184</i>
3.2.2.1	Μέθοδος Α΄: Θεώρημα Shannon-Hartley.....	185
3.2.2.2	Μέθοδος Β΄: Εφικτός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων	187
3.2.2.3	Μέθοδος Γ΄: Μέθοδος έμμεσης αξιοποίησης της πιθανότητας λάθους δυαδικού ψηφίου.....	188
3.2.2.4	Μέθοδος Δ΄: Μέθοδος απευθείας αξιοποίησης της πιθανότητας λάθους δυαδικού ψηφίου.....	191
3.2.2.5	Μέθοδος Ε΄: Μετατροπή εξαρτώμενη από τον τύπο ραδιοδιεπαφής	194
3.2.3	<i>Εκτίμηση της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης</i>	<i>196</i>
3.3	Ακτίνα κάλυψης	199

3.3.1	<i>Η ενεργός ακτίνα κάλυψης</i>	199
3.3.2	<i>Γενική διαδικασία εκτίμησης της ενεργού ακτίνας κάλυψης</i>	199
3.3.3	<i>Μέθοδοι εκτίμησης της ενεργού ακτίνας κάλυψης</i>	201
3.3.3.1	Μέθοδος Α΄: Γενική μέθοδος	201
3.3.3.2	Μέθοδος Β΄: Συνδυασμένη αξιοποίηση SINR και IT μετρήσεων	204
3.3.3.3	Μέθοδος Γ΄: Σταθμισμένη εκτίμηση των συντελεστών διάδοσης	205
3.3.3.4	Μέθοδος Δ΄: Γενικευμένη εκτίμηση των συντελεστών διάδοσης	207
3.3.3.5	Μέθοδος Ε΄: Αποκλειστική αξιοποίηση IT μετρήσεων	208
3.4	Παραπομπές	209
4	Προηγμένη Συλλογιστική	213
4.1	Η ανάγκη για αξιοπιστία	213
4.2	Τεχνικές μηχανικής μάθησης	213
4.2.1	<i>Γενικά</i>	213
4.2.2	<i>Μάθηση δέντρων αποφάσεων</i>	215
4.2.2.1	Γενικά	215
4.2.2.2	Αναπαράσταση δέντρων αποφάσεων	215
4.2.2.3	Κατάλληλα προβλήματα για μάθηση δέντρων αποφάσεων	217
4.2.2.4	Ο βασικός αλγόριθμος μάθησης δέντρων αποφάσεων	218
4.2.2.5	Εντροπία – Κέρδος πληροφορίας	220
4.2.2.6	Αναζήτηση χώρου υποθέσεων στη μάθηση δέντρων αποφάσεων	226
4.2.2.7	Υπερβολική προσαρμογή στα δεδομένα	228
4.2.2.8	Εναλλακτικά μέτρα για την επιλογή γνωρισμάτων	229
4.2.3	<i>Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα</i>	231
4.2.3.1	Γενικά	231
4.2.3.2	Βιολογική προέλευση	232
4.2.3.3	Αναπαράσταση νευρωνικών δικτύων	232
4.2.3.4	Κατάλληλα προβλήματα για τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα	234
4.2.3.5	Αισθητήρες	235
4.2.3.6	Πολυστρωματικά τεχνητά νευρωνικά δίκτυα	239
4.2.3.7	Σιγμοειδής μονάδα	240
4.2.3.8	Ο αλγόριθμος Backpropagation	241
4.2.3.9	Μάθηση σε αυθαίρετα ακυκλικά δίκτυα	244
4.2.3.10	Σύνοψη χαρακτηριστικών μάθησης νευρωνικών δικτύων	246
4.2.4	<i>Μπεϋζιανά δίκτυα</i>	247
4.2.4.1	Γενικά	247
4.2.4.2	Θεώρημα Bayes	248
4.2.4.3	Μπεϋζιανά δίκτυα	253
4.2.4.4	Μάθηση μπεϋζιανών δικτύων	259
4.3	Εφαρμογή τεχνικών μάθησης στο πρόβλημα της προηγμένης συλλογιστικής	260
4.3.1	<i>Μοντελοποίηση του προβλήματος</i>	260
4.3.2	<i>Εφαρμογή μάθησης δέντρων αποφάσεων</i>	262
4.3.2.1	Μοντελοποίηση βάσει δέντρων αποφάσεων	262
4.3.2.2	Πολυπλοκότητα	264
4.3.3	<i>Εφαρμογή μάθησης τεχνητών νευρωνικών δικτύων</i>	265
4.3.3.1	Μοντελοποίηση βάσει τεχνητών νευρωνικών δικτύων	265
4.3.3.2	Προσθήκη αναδρομής	267

4.3.3.3	Πολυπλοκότητα	269
4.3.4	Εφαρμογή μάθησης μπεϋζιανών δικτύων	270
4.3.4.1	Μοντελοποίηση βάσει μπεϋζιανών δικτύων	270
4.3.4.2	Λεπτομερής συγκρότηση μπεϋζιανού δικτύου	272
4.4	Παραπομπές	277
5	Αποτελέσματα προτεινόμενων μεθόδων μηχανικής μάθησης	287
5.1	Εισαγωγή	287
5.2	Δεδομένα εκπαίδευσης	288
5.3	Σενάρια εκτέλεσης	290
5.3.1	Σενάριο A	290
5.3.2	Σενάριο B	292
5.3.3	Σενάριο C	293
5.4	Δέντρα αποφάσεων	294
5.4.1	Παράμετροι μοντέλου	294
5.4.2	Αποτελέσματα	302
5.4.3	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	312
5.5	Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα	315
5.5.1	Παράμετροι μοντέλου	315
5.5.2	Αποτελέσματα	316
5.5.3	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	327
5.6	Μπεϋζιανά δίκτυα	329
5.6.1	Παράμετροι μοντέλου	329
5.6.2	Αποτελέσματα	330
5.6.3	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	347
5.7	Σύγκριση αποτελεσμάτων των τριών μεθόδων μάθησης	349
5.7.1	Ταχύτητα σύγκλισης	349
5.7.2	Ταχύτητα ανάκαμψης	351
5.7.3	Σύγκριση τεχνικών μάθησης	352
5.8	Αποτελεσματικότητα τεχνικών μηχανικής μάθησης	353
6	Ανακεφαλαίωση – Μελλοντικές Επεκτάσεις	359
6.1	Ανακεφαλαίωση	359
6.2	Μελλοντικές Επεκτάσεις	362
6.3	Δημοσιεύσεις	363
6.3.1	Δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά	363
6.3.2	Δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά βιβλία	364
6.3.3	Δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά συνέδρια	365

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1-1. Χρησιμοποίηση φάσματος, ανά ζώνη συχνοτήτων, μεσοσταθμισμένη για 6 περιοχές των ΗΠΑ.....	38
Σχήμα 1-2. Ποσοστό χρησιμοποίησης φάσματος σε 6 περιοχές των ΗΠΑ	38
Σχήμα 1-3. Διαμοιρασμός φάσματος ανάμεσα σε δίκτυο κινητής τηλεφωνίας και σε σύστημα επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης	39
Σχήμα 1-4. Παράδειγμα επικοινωνίας στην περίπτωση μεσιτείας φάσματος	40
Σχήμα 1-5. Στρώματα του μοντέλου αναφοράς OSI στα οποία εφαρμόζονται τα SDR συστήματα.....	44
Σχήμα 1-6. Βασική αρχιτεκτονική υλικού ενός SDR συστήματος.....	45
Σχήμα 1-7. Βασική αρχιτεκτονική λογισμικού ενός SDR συστήματος	46
Σχήμα 1-8. Βασική αρχιτεκτονική λογισμικού ενός SDR τερματικού.....	47
Σχήμα 1-9. Χρονικό πλάνο υλοποίησης μελλοντικών SDR εφαρμογών	49
Σχήμα 1-10. Πρόβλεψη τεχνολογικών εξελίξεων στον τομέα των SDR συστημάτων.....	50
Σχήμα 1-11. Ο γνωστικός κύκλος.....	51
Σχήμα 1-12. Γνωστικό μοντέλο αναφοράς.....	59
Σχήμα 2-1. Τοπολογία γνωστικού δικτύου.....	74
Σχήμα 2-2. Παράδειγμα κατανομής διαρθρώσεων γνωστικού σταθμού βάσης σε διαδοχικές χρονικές περιόδους	76
Σχήμα 2-3. Βασικό μοντέλο για την εκτίμηση του SINR.....	86
Σχήμα 2-4. Λειτουργία σχημάτων επαίσθησης στις ζεύξεις καθόδου και ανόδου....	100
Σχήμα 2-5. Προσεγγίσεις ανάθεσης πόρων του γνωστικού σταθμού βάσης για τη λειτουργία της επαίσθησης	102
Σχήμα 2-6. Λειτουργική αρχιτεκτονική αναφοράς γνωστικού σταθμού βάσης.....	105
Σχήμα 2-7. Λειτουργική αρχιτεκτονική αναφοράς γνωστικού τερματικού	106
Σχήμα 2-8. Χαρακτηριστικό δείγμα μηνύματος αίτησης επαίσθησης	116
Σχήμα 2-9. Χαρακτηριστικό παράδειγμα μηνύματος αναφοράς επαίσθησης.....	132
Σχήμα 2-10. XML σχήμα προδιαγραφών των μηνυμάτων αίτησης επαίσθησης.....	149
Σχήμα 2-11. XML σχήμα προδιαγραφών των μηνυμάτων αναφοράς επαίσθησης... ..	156
Σχήμα 2-12. Διάγραμμα ακολουθίας της διαδικασίας προετοιμασίας, μετάδοσης και λήψης της αίτησης επαίσθησης	161

Σχήμα 2-13. Διάγραμμα ακολουθίας της διαδικασίας επαίσθησης σε κανάλι καθόδου	162
Σχήμα 2-14. Διάγραμμα ακολουθίας της διαδικασίας επαίσθησης σε κανάλι ανόδου	162
Σχήμα 3-1. Λειτουργία βασικής συλλογιστικής.....	182
Σχήμα 3-2. Διαδικασία εκτίμησης της χωρητικότητας μετάδοσης.....	184
Σχήμα 3-3. Συνάρτηση της πιθανότητας P_b ως προς το λόγο E_b/N_0 , για σήματα διαμορφωμένα κατά M-αδική FSK, PSK ή QAM.....	190
Σχήμα 3-4. Αλγόριθμος μεταβολής του ρυθμού μετάδοσης.....	193
Σχήμα 3-5. Μέθοδος εκτίμησης της επιμέρους χωρητικότητας μετάδοσης εξαρτώμενη από τον τύπο ραδιοεπαφής.....	195
Σχήμα 3-6. Μέθοδος προσδιορισμού της ενεργού ακτίνας κάλυψης.....	201
Σχήμα 4-1. Τυπικό δέντρο αποφάσεων μάθησης.....	216
Σχήμα 4-2. Επιμέρους εντροπίες και κέρδη πληροφορίας.....	224
Σχήμα 4-3. Προκύπτων δέντρο μετά την πρώτη εκτέλεση του αλγορίθμου ID3.....	225
Σχήμα 4-4. Αναπαράσταση νευρωνικού δικτύου συστήματος ALVINN.....	234
Σχήμα 4-5. Το perceptron.....	236
Σχήμα 4-6. Παράδειγμα πολυστρωματικού νευρωνικού δικτύου.....	240
Σχήμα 4-7. Η σιγμοειδής μονάδα.....	241
Σχήμα 4-8. Γράφος μπεϋζιανού δικτύου.....	256
Σχήμα 4-9. Παράδειγμα μπεϋζιανού δικτύου και πίνακες δεσμευμένων πιθανοτήτων αυτού.....	257
Σχήμα 4-10. Δείγμα συνόλου παραδειγμάτων εκπαίδευσης, στα πλαίσια της προηγμένης συλλογιστικής.....	261
Σχήμα 4-11. Δέντρο αποφάσεων για την αξιόπιστη εκτίμηση της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης.....	263
Σχήμα 4-12. Τεχνητό νευρωνικό δίκτυο για την αξιόπιστη εκτίμηση της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης.....	266
Σχήμα 4-13. Κωδικοποίηση εξόδου του τεχνητού νευρωνικού δικτύου.....	267
Σχήμα 4-14. Αναδρομικό τεχνητό νευρωνικό δίκτυο για την αξιόπιστη εκτίμηση της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης.....	269
Σχήμα 4-15. Μπεϋζιανό δίκτυο για την αξιόπιστη εκτίμηση της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης.....	271

Σχήμα 4-16. Διαδικασία ενημέρωσης των τιμών των πινάκων δεσμευμένων πιθανοτήτων.....	272
Σχήμα 4-17. Μπεϋζιανό δίκτυο και αντίστοιχοι πίνακες δεσμευμένων πιθανοτήτων	273
Σχήμα 4-18. Στρατηγική ενημέρωσης τιμών πινάκων δεσμευμένων πιθανοτήτων ..	275
Σχήμα 5-1. Παράδειγμα κόμβου δέντρου αποφάσεων	295
Σχήμα 5-2. Δέντρο αποφάσεων για προσδιορισμό της μεταβλητής t_1	296
Σχήμα 5-3. Δέντρο αποφάσεων για προσδιορισμό της μεταβλητής t_2	297
Σχήμα 5-4. Δέντρο αποφάσεων για προσδιορισμό της μεταβλητής t_3	298
Σχήμα 5-5. Δέντρο αποφάσεων για προσδιορισμό της μεταβλητής t_4	299
Σχήμα 5-6. Δέντρο αποφάσεων για προσδιορισμό της μεταβλητής t_5	300
Σχήμα 5-7. Δέντρο αποφάσεων για προσδιορισμό της μεταβλητής t_6	301
Σχήμα 5-8. Χρονική εξέλιξη των τιμών των μεταβλητών ιεράρχησης μέσω του μοντέλου δέντρων αποφάσεων στην (a) υποπερίπτωση A1; (b) υποπερίπτωση A2; (c) υποπερίπτωση A3; και (d) υποπερίπτωση A4.....	308
Σχήμα 5-9. Χρονική εξέλιξη των τιμών των μεταβλητών ιεράρχησης μέσω του μοντέλου δέντρων αποφάσεων στην (a) υποπερίπτωση B1; (b) υποπερίπτωση B2; (c) υποπερίπτωση B3; και (d) υποπερίπτωση B4	310
Σχήμα 5-10. Χρονική εξέλιξη των τιμών των μεταβλητών ιεράρχησης μέσω του μοντέλου δέντρων αποφάσεων στην (a) υποπερίπτωση C1; (b) υποπερίπτωση C2; (c) υποπερίπτωση C3; και (d) υποπερίπτωση C4	312
Σχήμα 5-11. Χρονική εξέλιξη των τιμών των μεταβλητών ιεράρχησης μέσω του μοντέλου νευρωνικού δικτύου στην (a) υποπερίπτωση A1; (b) υποπερίπτωση A2; (c) υποπερίπτωση A3; και (d) υποπερίπτωση A4.....	322
Σχήμα 5-12. Χρονική εξέλιξη των τιμών των μεταβλητών ιεράρχησης μέσω του μοντέλου νευρωνικού δικτύου στην (a) υποπερίπτωση B1; (b) υποπερίπτωση B2; (c) υποπερίπτωση B3; και (d) υποπερίπτωση B4	324
Σχήμα 5-13. Χρονική εξέλιξη των τιμών των μεταβλητών ιεράρχησης μέσω του μοντέλου νευρωνικού δικτύου στην (a) υποπερίπτωση C1; (b) υποπερίπτωση C2; (c) υποπερίπτωση C3; και (d) υποπερίπτωση C4	326
Σχήμα 5-14. Χρονική εξέλιξη των τιμών των μεταβλητών ιεράρχησης μέσω του μοντέλου μπεϋζιανού δικτύου στην (a) υποπερίπτωση A1; (b) υποπερίπτωση A2; (c) υποπερίπτωση A3; και (d) υποπερίπτωση A4.....	336

Σχήμα 5-15. Χρονική εξέλιξη της κατανομής πιθανότητας στην (a) υποπερίπτωση A1; (b) υποπερίπτωση A2; (c) υποπερίπτωση A3; και (d) υποπερίπτωση A4...	338
Σχήμα 5-16. Χρονική εξέλιξη των τιμών των μεταβλητών ιεράρχησης μέσω του μοντέλου μπεϋζιανού δικτύου στην (a) υποπερίπτωση B1; (b) υποπερίπτωση B2; (c) υποπερίπτωση B3; και (d) υποπερίπτωση B4	340
Σχήμα 5-17. Χρονική εξέλιξη της κατανομής πιθανότητας στην (a) υποπερίπτωση B1; (b) υποπερίπτωση B2; (c) υποπερίπτωση B3; και (d) υποπερίπτωση B4...	342
Σχήμα 5-18. Χρονική εξέλιξη των τιμών των μεταβλητών ιεράρχησης μέσω του μοντέλου μπεϋζιανού δικτύου στην (a) υποπερίπτωση C1; (b) υποπερίπτωση C2; (c) υποπερίπτωση C3; και (d) υποπερίπτωση C4	344
Σχήμα 5-19. Χρονική εξέλιξη της κατανομής πιθανότητας στην (a) υποπερίπτωση C1; (b) υποπερίπτωση C2; (c) υποπερίπτωση C3; και (d) υποπερίπτωση C4...	346
Σχήμα 5-20. Αριθμός χρονικών περιόδων που απαιτούνται για τη μετάβαση του μοντέλου σε κατάσταση σύγκλισης.....	350
Σχήμα 5-21. Αριθμός χρονικών περιόδων που απαιτούνται για τη μετάβαση κάθε μοντέλου στην πρότερη κατάσταση	351
Σχήμα 5-22. Αντιπαραβολή της στιγμιαίας εκτίμησης με τις αξιόπιστες εκτιμήσεις κάθε μοντέλου μάθησης στην υποπερίπτωση B1	354
Σχήμα 5-23. Αντιπαραβολή της στιγμιαίας εκτίμησης με τις αξιόπιστες εκτιμήσεις κάθε μοντέλου μάθησης στην υποπερίπτωση B4	355
Σχήμα 5-24. Αντιπαραβολή της στιγμιαίας εκτίμησης με τις αξιόπιστες εκτιμήσεις κάθε μοντέλου μάθησης στην υποπερίπτωση C1	355
Σχήμα 5-25. Αντιπαραβολή της στιγμιαίας εκτίμησης με τις αξιόπιστες εκτιμήσεις κάθε μοντέλου μάθησης στην υποπερίπτωση C3	356
Σχήμα 5-26. Αντιπαραβολή της στιγμιαίας εκτίμησης με τις αξιόπιστες εκτιμήσεις κάθε μοντέλου μάθησης στην υποπερίπτωση C4	356

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1-1. Χαρακτηριστικά που αποδίδονται στα γνωστικά δίκτυα.....	31
Πίνακας 2-1. Σύνοψη χαρακτηριστικών γνωρισμάτων της θεωρούμενης δικτυακής τοπολογίας	79
Πίνακας 2-2. Σύνοψη των αντιστοιχιών μεταξύ διαδεδομένων τεχνολογιών ραδιοπρόσβασης και σχημάτων πολλαπλής πρόσβασης.....	84
Πίνακας 2-3. Υποστήριξη τύπων μετρήσεων από τα σχήματα επαίσθησης	97
Πίνακας 3-1. Σύνοψη της ορολογίας της λειτουργίας της βασικής συλλογιστικής ..	181
Πίνακας 3-2. Σύστημα IEEE 802.11b: Αντιστοίχιση ρυθμών μετάδοσης φυσικού στρώματος με κατώφλια SINR ή IT	195
Πίνακας 3-3. Σύστημα IEEE 802.11a: Αντιστοίχιση ρυθμών μετάδοσης φυσικού στρώματος με κατώφλια SINR ή IT	195
Πίνακας 4-1. Σύνολο παραδειγμάτων εκπαίδευσης	223
Πίνακας 4-2. Βασικοί κανόνες υπολογισμού πιθανοτήτων.....	251
Πίνακας 4-3. Δοθείσες πιθανότητες του προβλήματος ιατρικής διάγνωσης.....	252
Πίνακας 4-4. Λίστα μεταβλητών παραδείγματος μπεϋζιανού δικτύου	256
Πίνακας 4-5. Πίνακας από κοινού συνάρτησης πιθανότητας.....	257
Πίνακας 4-6. Πίνακας δεσμευμένων πιθανοτήτων για τη μεταβλητή t_1	271
Πίνακας 5-1. Σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης.....	289
Πίνακας 5-2. Χρονική αλληλουχία των στιγμιαίων εκτιμήσεων της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης στις υποπεριπτώσεις του σεναρίου A.....	291
Πίνακας 5-3. Χρονική αλληλουχία των στιγμιαίων εκτιμήσεων της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης στις υποπεριπτώσεις του σεναρίου B.....	292
Πίνακας 5-4. Χρονική αλληλουχία των στιγμιαίων εκτιμήσεων της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης στις υποπεριπτώσεις του σεναρίου C.....	293
Πίνακας 5-5. Παράμετροι κατασκευής μοντέλου δέντρων αποφάσεων	294
Πίνακας 5-6. Έξοδος του μοντέλου δέντρων αποφάσεων σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης A1.....	302
Πίνακας 5-7. Έξοδος του μοντέλου δέντρων αποφάσεων σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης A2.....	302
Πίνακας 5-8. Έξοδος του μοντέλου δέντρων αποφάσεων σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης A3.....	303

Πίνακας 5-9. Έξοδος του μοντέλου δέντρων αποφάσεων σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης A4.....	303
Πίνακας 5-10. Έξοδος του μοντέλου δέντρων αποφάσεων σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης B1	303
Πίνακας 5-11. Έξοδος του μοντέλου δέντρων αποφάσεων σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης B2	304
Πίνακας 5-12. Έξοδος του μοντέλου δέντρων αποφάσεων σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης B3	304
Πίνακας 5-13. Έξοδος του μοντέλου δέντρων αποφάσεων σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης B4	304
Πίνακας 5-14. Έξοδος του μοντέλου δέντρων αποφάσεων σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης C1	305
Πίνακας 5-15. Έξοδος του μοντέλου δέντρων αποφάσεων σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης C2	305
Πίνακας 5-16. Έξοδος του μοντέλου δέντρων αποφάσεων σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης C3	305
Πίνακας 5-17. Έξοδος του μοντέλου δέντρων αποφάσεων σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης C4	306
Πίνακας 5-18. Παράμετροι κατασκευής μοντέλου νευρωνικού δικτύου	315
Πίνακας 5-19. Χαρακτηριστικά μοντέλου νευρωνικού δικτύου	316
Πίνακας 5-20. Έξοδος του μοντέλου νευρωνικού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης A1	317
Πίνακας 5-21. Έξοδος του μοντέλου νευρωνικού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης A2	317
Πίνακας 5-22. Έξοδος του μοντέλου νευρωνικού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης A3	317
Πίνακας 5-23. Έξοδος του μοντέλου νευρωνικού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης A4	318
Πίνακας 5-24. Έξοδος του μοντέλου νευρωνικού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης B1	318
Πίνακας 5-25. Έξοδος του μοντέλου νευρωνικού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης B2	318
Πίνακας 5-26. Έξοδος του μοντέλου νευρωνικού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης B3	319

Πίνακας 5-27. Έξοδος του μοντέλου νευρωνικού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης B4	319
Πίνακας 5-28. Έξοδος του μοντέλου νευρωνικού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης C1	319
Πίνακας 5-29. Έξοδος του μοντέλου νευρωνικού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης C2	320
Πίνακας 5-30. Έξοδος του μοντέλου νευρωνικού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης C3	320
Πίνακας 5-31. Έξοδος του μοντέλου νευρωνικού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης C4	320
Πίνακας 5-32. Παράμετροι κατασκευής μοντέλου μπεϋζιανού δικτύου.....	329
Πίνακας 5-33. Έξοδος του μοντέλου μπεϋζιανού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης A1	330
Πίνακας 5-34. Έξοδος του μοντέλου μπεϋζιανού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης A2	331
Πίνακας 5-35. Έξοδος του μοντέλου μπεϋζιανού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης A3	331
Πίνακας 5-36. Έξοδος του μοντέλου μπεϋζιανού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης A4	331
Πίνακας 5-37. Έξοδος του μοντέλου μπεϋζιανού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης B1	332
Πίνακας 5-38. Έξοδος του μοντέλου μπεϋζιανού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης B2	332
Πίνακας 5-39. Έξοδος του μοντέλου μπεϋζιανού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης B3	332
Πίνακας 5-40. Έξοδος του μοντέλου μπεϋζιανού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης B4	333
Πίνακας 5-41. Έξοδος του μοντέλου μπεϋζιανού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης C1	333
Πίνακας 5-42. Έξοδος του μοντέλου μπεϋζιανού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης C2	333
Πίνακας 5-43. Έξοδος του μοντέλου μπεϋζιανού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης C3	334

Πίνακας 5-44. Έξοδος του μοντέλου μπεϋζιανού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης
του σεναρίου της υποπερίπτωσης C4334

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1 Εισαγωγή

1.1 Σημερινό τοπίο των ασύρματων επικοινωνιών

Το σημερινό τοπίο των ασύρματων επικοινωνιών χαρακτηρίζεται από έντονη ετερογένεια, περιλαμβάνοντας πλήθος διαφορετικών τεχνολογιών ραδιοπρόσβασης (Radio Access Technology – RAT). Έτσι, στις μέρες μας συνυπάρχουν:

- **Κυψελωτά συστήματα 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς**

Η περιορισμένη δυνατότητα υποστήριξης υπηρεσιών δεδομένων των κυψελωτών συστημάτων 2^{ης} γενιάς (Global System for Mobile Communications – GSM) [1]-[2], οδήγησε στη λεγόμενη «2.5 γενιά» (General Packet Radio Service – GPRS) [3]-[4], η οποία, επιτυγχάνοντας υψηλότερη εκμετάλλευση των δικτυακών πόρων, βελτίωσε και διευκόλυνε την ασύρματη πρόσβαση σε δίκτυα πακέτων δεδομένων όπως το Internet. Τα τελευταία χρόνια, κυρίαρχο ρόλο διαδραματίζουν τα δίκτυα 3^{ης} γενιάς (Universal Mobile Telecommunications System – UMTS) [5]-[6], ικανά να προσφέρουν ρυθμούς δεδομένων μέχρι 2 Mbps, καθιστώντας με αυτόν τον τρόπο δυνατή την παροχή υπηρεσιών με αυξημένες απαιτήσεις σε ρυθμούς μετάδοσης, όπως, π.χ., υπηρεσία μετάδοσης βίντεο. Σχετικά πρόσφατα, προτυποποιήθηκε ένα ακόμα πρωτόκολλο του UMTS, το High-Speed Downlink Packet Access (HSDPA) [7], το οποίο, κάνοντας χρήση ενός υψηλής ταχύτητας διαμοιραζόμενου διαύλου ζεύξης καθόδου (High-Speed Downlink Shared Channel – HS-DSCH), επιτυγχάνει ταχύτητες που φτάνουν τα 14.4 Mbps στην προαναφερθείσα ζεύξη.

- **Ασύρματα τοπικά/μητροπολιτικά/προσωπικά δίκτυα**

Στην κατηγορία αυτή, κυριαρχούν τα τοπικά ασύρματα δίκτυα (Wireless Local Area Networks – WLANs), που αναπτύσσονται ευρέως σε οικιακό και εργασιακό περιβάλλον, σε ξενοδοχεία, συνεδριακούς χώρους, πανεπιστήμια κτλ. Ανήκουν στην οικογένεια πρωτοκόλλων 802.11x [8] και είναι ικανά να παρέχουν ρυθμούς μετάδοσης που αγγίζουν τα 54 Mbps, με σχετικά περιορισμένες, ωστόσο, ακτίνες κάλυψης που δεν ξεπερνούν τα 250 μέτρα. Την αδυναμία αυτή έρχονται να καλύψουν τα ασύρματα μητροπολιτικά

δίκτυα (Wireless Metropolitan Area Networks – WMANs), που περιγράφονται από την οικογένεια προτυποποιήσεων IEEE 802.16, αν και τόσο στη βιομηχανία όσο και στη βιβλιογραφία έχει επικρατήσει να αναφέρονται ως WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) δίκτυα.

- **Συστήματα ψηφιακής εκπομπής**

Το πλέον διαδεδομένο πρότυπο αυτής της κατηγορίας είναι το ευρωπαϊκό Digital Video Broadcasting – DVB [9], ένα παγκόσμιο πρότυπο για δορυφορική, καλωδιακή και επίγεια μετάδοση, κυρίως χαρακτηριστικά του οποίου είναι οι υψηλοί ρυθμοί δεδομένων, η άρτια υποστήριξη υπηρεσιών μετάδοσης βίντεο και ήχου, όπως, για παράδειγμα, η ψηφιακή τηλεόραση, καθώς και η ικανοποιητική υποστήριξη κινητικότητας των χρηστών.

Το σημερινό τοπίο ασύρματων τηλεπικοινωνιών χαρακτηρίζεται, όμως, πέρα από το πλήθος των διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης, και από ένα πλήθος ετερογενών υπηρεσιών χρήστη. Οι συνηθισμένες υπηρεσίες φωνής, σύντομων μηνυμάτων κειμένου και ηλεκτρονικού ταχυδρομείου (e-mail) συμπληρώνονται από υπηρεσίες εντοπισμού θέσης, υπηρεσίες παροχής προσωποποιημένων πληροφοριών, υπηρεσίες πολυμεσικών δεδομένων, υπηρεσίες άμεσης επικοινωνίας κτλ. [10]. Κοινό χαρακτηριστικό όλων αυτών των υπηρεσιών είναι η ολοένα και αυξανόμενη απαίτηση για υψηλούς ρυθμούς δεδομένων και αδιάλειπτη στο χώρο και στο χρόνο παροχή. Επιπρόσθετα, αυτό που ενδιαφέρει τον τελικό χρήστη-καταναλωτή αυτών των υπηρεσιών δεν είναι οι τεχνικές λεπτομέρειες της υποκείμενης τεχνολογίας πρόσβασης, αλλά η δυνατότητα παροχής της υπηρεσίας στην καλύτερη δυνατή ποιότητα και με το χαμηλότερο δυνατό κόστος.

1.2 Περιβάλλον πέραν της 3^{ης} γενιάς

Κάθε μία από τις προαναφερθείσες τεχνολογίες πρόσβασης, είναι καταλληλότερη για να εξυπηρετεί ορισμένες, αλλά όχι όλες, τις αιτήσεις παροχής υπηρεσιών, όσον αφορά την κάλυψη, τους προσφερόμενους ρυθμούς δεδομένων, την κινητικότητα και το κόστος. Με άλλα λόγια, ένας πάροχος δικτύου θα πρέπει να βασιστεί σε

περισσότερες από μια τεχνολογίες πρόσβασης, προκειμένου να είναι ανταγωνιστικός και να διατηρεί την ικανοποίηση των πελατών του σε υψηλά επίπεδα.

Η εξέλιξη των ασύρματων συστημάτων επικοινωνιών τα τελευταία χρόνια παρουσιάζει μια ξεκάθαρη τάση προς την ενοποίηση των διαθέσιμων τεχνολογιών πρόσβασης και την εκμετάλλευσή τους εντός αρχιτεκτονικών που θα υποστηρίζουν πολλαπλές τεχνολογίες, καθώς και πολυτροπικές (multimode) κινητές τερματικές συσκευές, ικανές να λειτουργήσουν εναλλακτικά σε μία ή περισσότερες από τις ετερογενείς διεπαφές διαθέσιμες στην δικτυακή υποδομή. Η τάση αυτή, που αναφέρεται συχνά ως «συστήματα επικοινωνιών πέραν της 3^{ης} γενιάς» (*Beyond 3G – B3G*), έχει προσελκύσει το έντονο ενδιαφέρον της διεθνούς ερευνητικής και επιστημονικής κοινότητας, ενώ αποτελεί το αντικείμενο έρευνας πολλών προγραμμάτων χρηματοδοτούμενων από την Ευρωπαϊκή Κοινότητα [11]-[12]. Η βασική της ιδέα έγκειται στο ότι ένας πάροχος δικτύου μπορεί να βασιστεί σε πολλαπλές τεχνολογίες πρόσβασης, προκειμένου να επιτύχει την επιθυμητή ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service – QoS) και, συγκεκριμένα, την επιθυμητή απόδοση με κριτήρια το ρυθμό δεδομένων, την καθυστέρηση, τον τρόπο φάσης (jitter) κτλ., διαθεσιμότητα (πιθανότητα άρνησης πρόσβασης – blocking probability), αξιοπιστία (π.χ., πιθανότητα άρνησης διαπομπής), καθώς και ασφάλεια, με τρόπο αποδοτικό όσον αφορά το κόστος. Σε ένα τέτοιο πλαίσιο, οι διαθέσιμες τεχνολογίες πρόσβασης δεν ανταγωνίζονται αλλά συνεργάζονται, με απώτερο στόχο την βέλτιστη εξυπηρέτηση του τελικού χρήστη.

1.3 Συνεργατικά δίκτυα

Μια προσέγγιση υλοποίησης της προαναφερθείσας ενοποίησης δικτύων, αποτελούν τα «συνεργατικά δίκτυα» (cooperative networks) [13]. Η βασική αρχή λειτουργίας αυτών των δικτύων είναι, όπως προαναφέρθηκε, η χρήση πολλαπλών τεχνολογιών πρόσβασης προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή ποιότητα υπηρεσίας. Η απαιτούμενη υποδομή υποστήριξης των διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης δεν ανήκει απαραίτητα σε ένα και μόνο πάροχο δικτύου, αλλά μπορεί να χρησιμοποιούνται από κοινού υποδομές διαφορετικών παρόχων, κατόπιν σύναψης εμπορικών συμφωνιών μεταξύ τους.

Η συνεργασία των δικτύων υλοποιείται πρωταρχικά μέσω του διαμοιρασμού της κίνησης. Σε αυτό το πνεύμα, ένα κινητό τερματικό, ικανό να υποστηρίξει ετερογενείς δικτυακές διεπαφές, είναι δυνατό να μεταβεί σε δίκτυο άλλης τεχνολογίας και πιθανώς άλλου παρόχου, αν κριθεί απαραίτητο ότι η μετάβαση αυτή μπορεί να αποτρέψει επιδείνωση της ποιότητας υπηρεσίας που λαμβάνει ή να προσφέρει σημαντική βελτίωσή της. Η ανάπτυξη κατάλληλων μηχανισμών για τη διαχείριση των συνεργατικών δικτύων έχει μελετηθεί εκτενώς στη διεθνή βιβλιογραφία. Οι προτεινόμενες λύσεις εστιάζονται, κυρίως, στη βελτιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης η οποία, λαμβάνοντας υπόψη διάφορες παραμέτρους, όπως είναι οι διαθέσιμοι δικτυακοί πόροι, η προσφερόμενη κίνηση, οι δυνατότητες των κινητών τερματικών, οι προτιμήσεις του χρήστη και οι συμφωνίες των παρόχων, υποδεικνύει το βέλτιστο για τη δεδομένη στιγμή δίκτυο πρόσβασης [14]-[16]. Παρόλα αυτά, η λειτουργία των συνεργατικών δικτύων αντιμετωπίζει κάποιες εγγενείς δυσκολίες που εστιάζονται κυρίως:

- στην ανάγκη ανάπτυξης σύνθετων πλαισίων διαχείρισης των διαθέσιμων δικτύων
- στην αδυναμία συμφωνίας μεταξύ των παρόχων, λόγω ανταγωνιστικότητας
- στην έλλειψη ευελιξίας των παρεχόμενων λύσεων, λόγω στατικών, προσυμφωνημένων κανόνων
- στην αδυναμία επεκτασιμότητας και κλιμακωσιμότητας των υποστηριζόμενων δομών
- στην ανάγκη ύπαρξης διαφορετικής δικτυακής υποδομής για κάθε υποστηριζόμενη τεχνολογία ραδιοπρόσβασης

1.4 Γνωστικά δίκτυα

Τις αδυναμίες αυτές έρχεται να καλύψει μια νέα προσέγγιση υλοποίησης του B3G οράματος, τα «γνωστικά δίκτυα» (Cognitive Networks). Το πεδίο των γνωστικών δικτύων έχει προσελκύσει τα τελευταία χρόνια το εντονότατο ενδιαφέρον τόσο της διεθνούς επιστημονικής και ερευνητικής κοινότητας όσο και της παγκόσμιας βιομηχανίας, με αποτέλεσμα την αφιέρωση εκατοντάδων σελίδων στη βιβλιογραφία και την εντατική προσπάθεια προτυποποίησής του από τους αρμόδιους οργανισμούς.

1.4.1 Ορισμοί

Πριν παρουσιαστούν αναλυτικά οι βασικές αρχές λειτουργίας και τα κύρια χαρακτηριστικά των γνωστικών δικτύων, θα ήταν χρήσιμη μια επισκόπηση των ορισμών που έχουν δοθεί μέχρι τώρα στα γνωστικά δίκτυα, ορισμών που κατ' επέκταση αντανακλούν τον τρόπο που αυτά γίνονται αντιληπτά από διάφορες επιστημονικές κοινότητες ανά τον κόσμο.

- Ταυτολογικά, ένα γνωστικό σύστημα θα μπορούσε να οριστεί ως «ένα σύστημα που γνωρίζει», ή παραφράζοντας τον Καρτέσιο, "Cogitat, ergo est cognitive system", δηλαδή «σκέφτεται, επομένως είναι γνωστικό σύστημα».
- Στη διδακτορική διατριβή του, ο Joseph Mitola [17], «πατέρας» και θεμελιωτής των γνωστικών δικτύων, καθορίζει ένα γνωστικό σύστημα επικοινωνιών ως «ένα σύστημα επικοινωνιών που χρησιμοποιεί λογικές βασισμένες σε πρότυπα για να επιτύχει ένα διευκρινισμένο επίπεδο ικανότητας στις ραδιο-σχετικές περιοχές».
- Ο Simon Haykin καθορίζει ένα γνωστικό σύστημα επικοινωνιών ως: «Ένα ευφύες ασύρματο σύστημα επικοινωνιών που γνωρίζει το περιβάλλον του (δηλαδή, τον εξωτερικό κόσμο), χρησιμοποιεί τη μεθοδολογία που μαθαίνει από το περιβάλλον (understanding-by-building) και προσαρμόζει τις παραμέτρους του στις στατιστικές αλλαγές στα εισερχόμενα ερεθίσματα RF (π.χ., ισχύς εκπομπής, συχνότητα του φέροντος και σχήμα διαμόρφωσης) σε πραγματικό χρόνο, με δύο αρχικούς στόχους: ιδιαίτερα αξιόπιστες επικοινωνίες όποτε και οπουδήποτε χρειάζονται και αποδοτική χρησιμοποίηση του ραδιοφάσματος» [18].
- Ο C. Ramming οραματίζεται τα γνωστικά δίκτυα ως δίκτυα που διαθέτουν αυτό-επίγνωση, και μπορούν να λάβουν αποφάσεις εφαρμογής μιας συγκεκριμένης διάρθρωσης σε δεδομένο περιβάλλον και με συγκεκριμένο στόχο [19]. Υποστηρίζει ότι τα δίκτυα που διαχειρίζονται τον εαυτό τους, απαιτούν ένα νέο είδος τεχνολογίας, ένα είδος «γνωστικής τεχνολογίας». Υποστηρίζει, επίσης, ότι το δίκτυο πρέπει να έχει επίγνωση του στόχου που προσπαθεί να υλοποιήσει, γεγονός που θα του επιτρέψει την ανάπτυξη νέων

δυνατοτήτων, μαθαίνοντας τις απαιτήσεις των υπηρεσιών και δυναμικά επιλέγοντας το πρωτόκολλο που θα τις ικανοποιήσει.

- Ο Μανώλης Σηφαλάκης αποδίδει τον όρο «γνωστικό» σε ένα δίκτυο που διαθέτει τη δυνατότητα να προσαρμόζει τον εαυτό του, ως απάντηση σε καταστάσεις και γεγονότα, βασιζόμενο σε συλλογιστική ικανότητα και αποκτηθείσα γνώση [20].
- Ο Dragan Bosconic ορίζει ένα γνωστικό δίκτυο ως ένα δίκτυο που μπορεί να τροποποιεί δυναμικά την τοπολογία και τις παραμέτρους λειτουργίας του ως απάντηση στις ανάγκες ενός χρήστη, εφαρμόζοντας παράλληλα λειτουργικές και ρυθμιστικές πολιτικές και βελτιστοποιώντας τη συνολική απόδοση του δικτύου [21]. Προτείνει την ενσωμάτωση της δυνατότητας αυτο-διάρθρωσης στα γνωστικά δίκτυα και τη δυναμική προσαρμογή τους σε κάθε αλλαγή λειτουργίας ή πλαισίου χρήσης. Τέλος, τάσσεται υπέρ μιας κατανεμημένης λειτουργικότητας διαχείρισης, σύμφωνα με τις αρχές της αυτόνομης υπολογιστικής (autonomic computing).
- Ο R. Thomas και οι συνεργάτες του [22] δηλώνουν ότι ένα γνωστικό δίκτυο διαθέτει μια γνωστική διαδικασία που του επιτρέπει να αντιλαμβάνεται τις τρέχουσες συνθήκες δικτύου και να σχεδιάζει, να αποφασίζει και να δρα βάσει αυτών των συνθηκών. Το δίκτυο μαθαίνει από αυτές τις προσαρμογές και μπορεί να λαμβάνει μελλοντικές αποφάσεις, έχοντας πάντα υπόψη τον τελικό στόχο.
- Η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών (Federal Communication Commission – FCC) της Αμερικής ορίζει ένα γνωστικό σύστημα επικοινωνιών ως ένα σύστημα που μπορεί να αλλάξει τις παραμέτρους εκπομπής με βάση την αλληλεπίδραση με το περιβάλλον του [23].
- Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunications Union – ITU) παραθέτει τον εξής ορισμό για ένα γνωστικό σύστημα: «ένα σύστημα που αισθάνεται το περιβάλλον του και αντιδρά αυτόνομα και δυναμικά στις αλλαγές του» [24].
- Το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE) [25] αναφέρεται στο γνωστικό σύστημα επικοινωνιών ως έναν πομπό ή δέκτη που σχεδιάζεται έτσι ώστε να εντοπίζει έξυπνα εάν ένα συγκεκριμένο τμήμα του ραδιοφάσματος είναι

αυτήν την περίοδο σε χρήση, και να χρησιμοποιεί το προσωρινά αχρησιμοποίητο φάσμα πολύ γρήγορα, χωρίς παρεμπόδιση στις μεταδόσεις άλλων εξουσιοδοτημένων χρηστών.

- Τέλος, το Φόρουμ των Λογισμικώς Καθορισμένων Συστημάτων Ασύρματων Επικοινωνιών (Software Defined Radio – SDR) το καθορίζει ως ένα προσαρμοστικό, ενήμερο και αυτόνομο σύστημα που μαθαίνει από την εμπειρία του και σκέφτεται, σχεδιάζει και αποφασίζει τις μελλοντικές ενέργειες ώστε να ικανοποιηθούν οι ανάγκες των χρηστών [26].

Όλοι οι παραπάνω ορισμοί, συνεπώς, προσδίδουν στα γνωστικά δίκτυα τη δυνατότητα να σκέφτονται, να μαθαίνουν, να θυμούνται και να προσαρμόζονται στις τρέχουσες συνθήκες. Ο Πίνακας 1-1, που ακολουθεί, συνοψίζει τα χαρακτηριστικά που αποδίδουν στα γνωστικά δίκτυα οι προαναφερθέντες ορισμοί.

Πίνακας 1-1. Χαρακτηριστικά που αποδίδονται στα γνωστικά δίκτυα

Εισηγητής	(Ευφυής) Προσαρμοστικότητα	Αυτονομία	«Αισθάνεται» το περιβάλλον	Επίγνωση περιβάλλοντος	Δραστηριοποίηση βάσει στόχου	Αλλαγή παραμέτρων λειτουργίας	Μηδενική παρεμβολή
J. Mittola	•	•	•	•	•	•	
S. Haykin	•	•	•		•	•	
C. Rammig	•	•	•	•	•	•	
M. Σηφάλακης	•	•	•	•	•	•	
D. Boscovic	•	•		•	•	•	
R. Thomas	•	•	•	•	•	•	
FCC	•		•	•		•	
ITU	•	•	•	•		•	
IEEE	•	•	•	•	•	•	•
SDR Forum	•	•	•	•	•	•	

Η παρούσα διδακτορική διατριβή ορίζει τα γνωστικά δίκτυα επικοινωνιών ως « Δίκτυα που μπορούν να «αισθάνονται» το περιβάλλον τους και να αντιδρούν, προληπτικά ή διορθωτικά, σε εξωτερικά ερεθίσματα, αλλάζοντας τις παραμέτρους λειτουργίας τους με στόχο τη βέλτιστη προσαρμογή στις συνθήκες του περιβάλλοντός τους. Λαμβάνουν τις τελικές αποφάσεις διάρθρωσης, αυτόνομα, βασιζόμενα σε γνώση και εμπειρία που έχουν συγκεντρώσει κατά τη λειτουργία τους ».

1.4.2 Διαμοιρασμός φάσματος

Το τμήμα που ακολουθεί περιγράφει μια από τις θεμελιώδεις αρχές λειτουργίας των γνωστικών δικτύων, αυτήν του διαμοιρασμού του φάσματος.

Παρά την αλματώδη άνθηση των ασύρματων συστημάτων επικοινωνιών και την ανάπτυξη προηγμένων, ετερογενών υπηρεσιών, ο φυσικός πόρος πάνω στον οποίο βασίζεται κάθε τηλεπικοινωνιακή εφαρμογή, το φάσμα συχνοτήτων, είναι από τη φύση του περιορισμένος. Παρόλα αυτά, πραγματικές μετρήσεις και μελέτες ρυθμιστικών οργανισμών [27]-[28], σχετικά με την ανάθεση και χρησιμοποίηση των ραδιοσυχνοτήτων καταδεικνύουν ότι η έλλειψη ηλεκτρομαγνητικού φάσματος δεν είναι αποτέλεσμα υψηλής χρήσης του, αλλά, αντίθετα, πηγάζει από την ανεπάρκεια του συστήματος ανάθεσης συχνοτήτων που ακολουθούν οι ρυθμιστικές αρχές. Είναι χαρακτηριστικό ότι, σύμφωνα με μελέτη για τη ζώνη κάτω των 3 GHz, μια τυπική τιμή της χρησιμοποίησης του φάσματος συχνοτήτων δεν ξεπερνά το 5% [29].

Στην πλειοψηφία των χωρών, παγκοσμίως, η ευθύνη για την ανάθεση συχνοτήτων και τη χορήγηση των απαραίτητων αδειών ανήκει σε αρμόδιους για θέματα επικοινωνιών κρατικούς φορείς. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι συχνά επίπονη, χρονοβόρα, με ιδιαίτερα αυξημένο κόστος, καταλήγοντας στην εξουσιοδότηση του αιτούντος χρήστη για αποκλειστική χρήση ενός ρητά καθορισμένου, στατικού τμήματος ραδιοσυχνοτήτων. Βασικό κριτήριο αποτελεί η ελαχιστοποίηση των παρεμβολών ανάμεσα στους χρήστες. Ο τρόπος αυτός ανάθεσης καταλήγει, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, σε υπερχρησιμοποίηση ορισμένων συχνοτήτων τη στιγμή που άλλες παραμένουν σε μεγάλο βαθμό υπο-χρησιμοποιημένες στο χώρο και στο χρόνο. Πιο συγκεκριμένα, υπό το ισχύον σύστημα αναθέσεως συχνοτήτων, παρατηρούνται τα εξής φαινόμενα:

- Ένας χρήστης, με άδεια χρήσης μιας συγκεκριμένης ζώνης συχνοτήτων, χρησιμοποιεί αυτές τις συχνότητες μόνο σε μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή, με αποτέλεσμα το τμήμα αυτό του φάσματος να παραμένει σε μεγάλο βαθμό ανεκμετάλλευτο στις υπόλοιπες περιοχές μια χώρας.
- Ένας πάροχος «αγοράζει» τμήμα φάσματος πολύ μεγαλύτερο από τις τρέχουσες ανάγκες του, χωρίς να το χρησιμοποιεί, προκειμένου να εξασφαλίσει την επάρκεια αυτού όταν ζητηθεί από μελλοντικές υπηρεσίες.
- Οι πάροχοι είναι υποχρεωμένοι να ορίσουν τις ανάγκες τους σε φάσμα, με βάση το φορτίο του δικτύου σε ώρα αιχμής. Ως αποτέλεσμα, σημαντικά

τμήματα πολύτιμου φάσματος δεν χρησιμοποιούνται μεγάλο χρονικό διάστημα της ημέρας.

Μια ζώνη συχνοτήτων που έχει ανατεθεί σε έναν πρωτεύοντα χρήστη, αλλά σε συγκεκριμένο χρόνο και συγκεκριμένη γεωγραφική θέση δε χρησιμοποιείται από αυτόν το χρήστη, χαρακτηρίζεται ως «οπή φάσματος» (“spectrum hole”). Στην προσπάθεια εύρεσης ενός πιο αποτελεσματικού τρόπου χρησιμοποίησης του φάσματος, οι ρυθμιστικοί και ερευνητικοί οργανισμοί άρχισαν να μελετούν την προσέγγιση της «οπορτουνιστικής» («ευκαιριακής») χρήσης των ραδιοσυχνοτήτων, μια προσέγγιση που αποτελεί και το θεμέλιο λίθο των γνωστικών συστημάτων επικοινωνιών. Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή, ένα σύστημα επικοινωνιών που ανιχνεύει μια οπή φάσματος μπορεί να πραγματοποιήσει εκπομπή σε αυτήν τη ζώνη συχνοτήτων, με την προϋπόθεση να μην προκαλεί σημαντική παρεμβολή στους νόμιμους χρήστες.

Δημιουργούνται με αυτόν τον τρόπο δύο κατηγορίες χρηστών: i) οι πρωτεύοντες χρήστες, που είναι εξουσιοδοτημένοι από τους αρμόδιους φορείς να χρησιμοποιούν μια ζώνη συχνοτήτων και ii) οι δευτερεύοντες χρήστες, οι οποίοι, ανιχνεύοντας μια οπή φάσματος, εμπέμπουν οπορτουνιστικά σε αυτήν. Έχοντας την προαναφερθείσα κατηγοριοποίηση υπόψη, το φάσμα συχνοτήτων μπορεί να διακριθεί σε τρεις διαφορετικούς «χώρους» [18]:

- «Μαύρους χώρους», που καταλαμβάνονται από υψηλής ισχύος τοπικούς παρεμβολείς ορισμένες στιγμές
- «Γκρι χώρους», που καταλαμβάνονται μερικώς από χαμηλής ισχύος παρεμβολείς
- «Λευκούς χώρους», που είναι απαλλαγμένοι από παρεμβολείς, με εξαίρεση την παρουσία θορύβου εξαιτίας φυσικών ή τεχνητών αιτιών, όπως:
 - ευρυζωνικός θερμικός θόρυβος, παραγόμενος από φυσικά φαινόμενα όπως η ηλιακή ακτινοβολία
 - μεταβατικές αντανάκλασεις από αστραπές, φώτα φθορίου και αεροσκάφη
 - παλμικό θόρυβο παραγόμενο από αναφλέξεις, μεταγωγείς και συσκευές μικροκυμάτων
 - θερμικό θόρυβο εξαιτίας εσωτερικών, ακαριαίων διακυμάνσεων ηλεκτρονίων στο μετωπιαίο άκρο (front-end) των εκάστοτε δεκτών

Προφανώς, οι «λευκοί χώροι» με βεβαιότητα και οι «γκρι χώροι» ως ένα βαθμό είναι άριστοι υποψήφιοι για χρήση από τους δευτερεύοντες χρήστες, ενώ αντίθετα οι «μαύροι χώροι» θα πρέπει να αποφεύγονται.

Οραματιζόμενοι μια καθολική απελευθέρωση του φάσματος, ορισμένοι επιστήμονες καταργούν το διαχωρισμό μεταξύ πρωτευόντων και δευτερευόντων χρηστών [30]-[31]. Σύμφωνα με αυτήν την ιδέα, κανένας χρήστης δεν απολαμβάνει αποκλειστικής χρήσης μιας ζώνης συχνοτήτων, αλλά αντίθετα όλοι οι χρήστες εκμεταλλεύονται ευκαιριακά τις ελεύθερες συχνότητες, με στόχο την αποδοτικότερη χρησιμοποίησή τους.

1.4.3 Κατηγοριοποίηση βάσει των αξιοποιούμενων συχνοτήτων

Τα γνωστικά δίκτυα, λοιπόν, μέσω μιας διαδικασίας συστηματικής παρακολούθησης του περιβάλλοντός τους, η οποία ονομάζεται «επαίσθηση» (sensing), εξετάζουν το φάσμα, και, μόλις ανιχνεύσουν ένα «λευκό» ή «γκρι» χώρο, αξιολογούν τις δυνατότητες του και, μέσω ενός κύκλου λήψης αποφάσεων, ο οποίος θα εξεταστεί αναλυτικά στη συνέχεια, αποφασίζουν εκπομπή ή όχι σε αυτήν τη συχνότητα.

Μια δημοφιλής κατηγοριοποίηση των γνωστικών δικτύων, βάσει των χρησιμοποιούμενων συχνοτήτων, είναι η εξής:

- **Πλήρως γνωστικά συστήματα.** Στα δίκτυα αυτά, που συχνά αναφέρονται και ως δίκτυα Mitola, κάθε δυνατή παράμετρος που παρατηρείται από το δίκτυο λαμβάνεται υπόψη στη λήψη απόφασης σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας.
- **Γνωστικά συστήματα επαίσθησης φάσματος.** Στα δίκτυα αυτά, μόνο το φάσμα συχνοτήτων παρατηρείται και λαμβάνεται υπόψη στη λήψη των αποφάσεων.
- **Γνωστικά συστήματα αδειοδοτημένων συχνοτήτων.** Εδώ η τερματική συσκευή καθώς και οι σταθμοί βάσης μπορούν να χρησιμοποιούν τόσο αδειοδοτημένες όσο και ελεύθερες συχνότητες.
- **Γνωστικά συστήματα ελεύθερων συχνοτήτων.** Στα δίκτυα αυτά, οι σταθμοί βάσης και τα κινητά τερματικά μπορούν να κάνουν χρήση αποκλειστικά και μόνο ελεύθερων συχνοτήτων.

1.4.4 Οφέλη γνωστικών δικτύων

Η ευελιξία και η αποδοτικότερη χρήση του φάσματος που εγγυώνται τα γνωστικά δίκτυα, αποδεικνύονται ωφέλιμα για όλους τους εμπλεκόμενους στον κόσμο των ασύρματων επικοινωνιών παράγοντες, όπως είναι οι τελικοί χρήστες, οι πάροχοι υπηρεσιών, οι κατασκευαστές υλικού, οι πάροχοι δικτύου και οι ρυθμιστικές αρχές. Στο τμήμα που ακολουθεί, περιγράφονται αναλυτικά τα οφέλη για καθέναν από τους προαναφερόμενους παράγοντες, ξεκινώντας από τους τελικούς χρήστες, καθώς η βελτίωση της δικής τους εμπειρίας αποτελεί σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις τον κινητήριο μοχλό κάθε ερευνητικής προσπάθειας.

1.4.4.1 Οφέλη για τους τελικούς χρήστες

Για έναν ατομικό χρήστη, το σπουδαιότερο όφελος από την ανάπτυξη των γνωστικών δικτύων αποτελεί η βελτιωμένη ποιότητα υπηρεσίας σε σχέση με τη χρήση αποκλειστικά ενός διαύλου. Η ποιότητα υπηρεσίας μεταφράζεται σε ποικίλους παράγοντες, όπως είναι ο ρυθμός δεδομένων, η καθυστέρηση, η διαθεσιμότητα, το κόστος κτλ. Το συγκεκριμένο βάρος της κάθε παραμέτρου εξαρτάται από τις ανάγκες του χρήστη, γι' αυτό το λόγο η καταλληλότητα κάθε διάρθρωσης αποτελεί ένα καθολικά επιθυμητό χαρακτηριστικό. Η δυναμική φύση ενός δικτύου που διαρκώς αναζητά το βέλτιστο, οδηγεί στην αναζήτηση της διάρθρωσης εκείνης που παρέχει την καταλληλότερη απόδοση για το χρήστη. Παραδείγματος χάριν, για ένα χρήστη που επιθυμεί να παρακολουθήσει υψηλής ποιότητας συρμό βίντεο σε πραγματικό χρόνο (video stream), η επιλογή μιας σύνδεσης υψηλής καθυστέρησης και χαμηλού ρυθμού δεδομένων αποδεικνύεται ακατάλληλη. Αντίθετα, αν ο χρήστης αυτός δεν ενδιαφέρεται να παρακολουθήσει τη μετάδοση σε πραγματικό χρόνο αλλά σκοπεύει να την παρακολουθήσει αργότερα, τότε δεν υπάρχει ανάγκη χρήσης σύνδεσης υψηλού ρυθμού δεδομένων. Βέβαια, μπορεί ο συγκεκριμένος χρήστης να μην άρει εξ αρχής την απαίτηση για υψηλούς ρυθμούς, είναι σχεδόν σίγουρο, όμως, ότι θα το κάνει όταν αντιληφθεί το κόστος που αυτή συνεπάγεται.

Το χαρακτηριστικό της «καταλληλότητας» ενσωματώνει τις περισσότερες από τις «παραδοσιακές» παραμέτρους του επιπέδου ποιότητας, υπάρχουν, όμως, και άλλες, όπως η αξιοπιστία. Ένα γνωστικό σύστημα διατηρεί δυναμικά την αξιοπιστία των

παρεχόμενων υπηρεσιών, παρακολουθώντας διαρκώς για λάθη μετάδοσης και επιχειρώντας να μειώσει το ρυθμό τους μέσω κατάλληλης προσαρμογής του.

Η διαθεσιμότητα αποτελεί το τρίτο σημαντικό όφελος των χρηστών από τα γνωστικά δίκτυα. Ένα γνωστικό σύστημα αποτελεί στην ουσία πολλά συστήματα ενσωματωμένα σε ένα, παρέχοντας πολλές υπηρεσίες που μέσω των παραδοσιακών συστημάτων θα απαιτούσαν ξεχωριστούς μηχανισμούς. Η δυνατότητα αυτή, όχι μόνο επιτρέπει στο χρήστη να επιλέξει από μια πληθώρα υπηρεσιών, όπως είναι οι κλήσεις φωνής σε GSM, η ψηφιακή τηλεόραση, η πλοήγηση στο διαδίκτυο κτλ., αλλά το γνωστικό σύστημα από μόνο του, μπορεί να διαλέξει αυτόνομα τη βέλτιστη διαθέσιμη λύση, αρραγώς μεταβαίνοντας από το ένα πρωτόκολλο σε άλλο, χωρίς να το αντιλαμβάνεται ο τελικός χρήστης. Μια εφαρμογή όπου η βελτιωμένη διαθεσιμότητα μπορεί να αποδειχτεί κάτι παραπάνω από ωφέλιμη είναι η υπηρεσία επικοινωνιών σε έκτακτα συμβάντα. Η κοινή δραστηριοποίηση των αρμόδιων φορέων σε έκτακτες περιπτώσεις μπορεί να συνδέσει την αστυνομία, την πυροσβεστική, τα ασθενοφόρα και τα νοσοκομεία σε ένα σύστημα όπου κάθε χρήστης θα ανιχνεύει το φάσμα που χρησιμοποιείται από τους άλλους φορείς και θα αναδιαρθρώνει τον εαυτό του.

Η χρήση, όμως, της πλέον κατάλληλης, αξιόπιστης, αποδοτικής και διαθέσιμης λύσης δεν είναι πάντα δυνατή, καθώς στον πραγματικό κόσμο ενδέχεται να υπάρξουν εξωτερικοί παράγοντες τους οποίους το γνωστικό σύστημα δεν μπορεί να ελέγξει. Σε τέτοιες περιπτώσεις, μπορεί μεν να μην είναι πάντα δυνατή η παροχή της υπηρεσίας με τον απόλυτα βέλτιστο τρόπο, αλλά η διαδικασία βελτιστοποίησης και η ικανότητα προσαρμογής εγγυώνται ότι η επόμενη καλύτερη λύση θα επιλεγεί. Η συμπεριφορά αυτή είναι σαφώς πιο επιθυμητή από την ξαφνική και καθολική διακοπή μιας υπηρεσίας. Για παράδειγμα, ένα UMTS σύστημα με πολύ χαμηλή λαμβανόμενη ισχύ σε μια περιοχή μπορεί να μην είναι σε θέση να στείλει βίντεο ή να προσφέρει πλοήγηση στο διαδίκτυο. Σε αυτήν την περίπτωση, όμως, είναι προτιμότερη έστω η παροχή των απλών υπηρεσιών κλήσης φωνής και σύντομων μηνυμάτων κειμένου παρά η παντελής έλλειψη υπηρεσιών.

Η ευέλικτη φύση των γνωστικών δικτύων, επιπροσθέτως, εγγυάται, ως ένα βαθμό, ότι το σύστημα θα μπορεί να ενσωματώσει κάποια μελλοντική αλλαγή σε υπηρεσίες, πρωτόκολλα, διαμόρφωση και φάσμα, χωρίς την ανάγκη απόκτησης μια καινούριας τερματικής συσκευής.

1.4.4.2 Οφέλη για τον κατασκευαστή

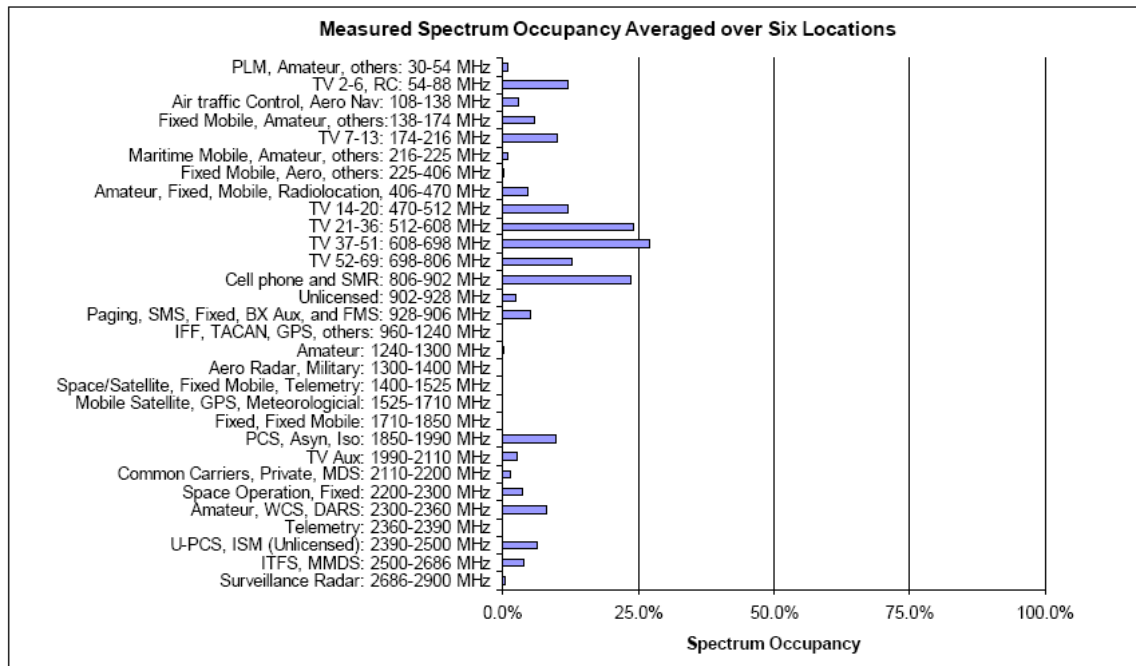
Η ευελιξία των γνωστικών συστημάτων επικοινωνιών προσδίδει σε αυτά τη δυνατότητα υποστήριξης διάφορων καθεστώτων χρήσης φάσματος και ενσωμάτωσης μελλοντικών αλλαγών στους κανονισμούς, πιο γρήγορα σε σχέση με ένα μη-γνωστικό σύστημα. Από την άλλη πλευρά, τα γνωστικά συστήματα είναι περισσότερο πολύπλοκα από τα συμβατικά συστήματα, όσον αφορά το κόστος και το χρόνο ανάπτυξης. Επιπλέον, η πιστοποίηση τέτοιων ευέλικτων συστημάτων είναι πιθανώς πιο πολύπλοκη. Τέλος, η δυνατότητα υποστήριξης νέων προτύπων ίσως επιμηκύνει το χρόνο διατήρησης των συσκευών από τους τελικούς χρήστες. Οι παραπάνω παράγοντες, οδηγούν στη μείωση του περιθωρίου κέρδους των κατασκευαστών, αν και υπάρχουν τρόποι να εξομαλυνθεί η επίδρασή τους, όπως είναι, για παράδειγμα, η ενθάρρυνση των χρηστών προς αντικατάσταση των παλιών συσκευών τους με νέες που προσφέρουν μικρή, οριακή ή και μηδαμινή βελτίωση υπηρεσιών, όπως, εξάλλου, συμβαίνει και σήμερα.

1.4.4.3 Οφέλη για τους παρόχους υπηρεσιών

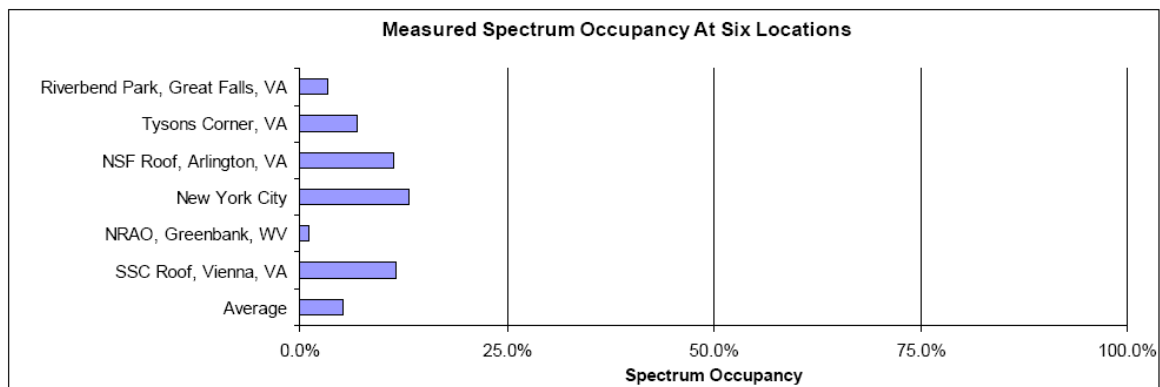
Για τους παρόχους υπηρεσιών, αποδοτική χρήση του φάσματος συνεπάγεται ανταπόκριση στη διαρκή ζήτηση για φάσμα, είτε με τη μορφή περισσότερων χρηστών στην αγορά, είτε με την αύξηση του ρυθμού δεδομένων στους υπάρχοντες χρήστες, είτε με συνδυασμό και των δύο. Οι πάροχοι υπηρεσιών μπορούν να επωφεληθούν σημαντικά από τα γνωστικά δίκτυα, αποκτώντας πρόσβαση σε φάσμα συχνοτήτων που είναι σήμερα υπό έλλειψη. Το πρόσφατο ενδιαφέρον στη ζώνη φρούρησης (guard band) GSM-DECT [32], για την οποία η δημοπρασία των δύο ζωνών εύρους 3.3 MHz η καθεμία συγκέντρωσε 3.8 εκατομμύρια βρετανικές λίρες και δημιούργησε 11 νέους παρόχους, καταδεικνύει τη ζήτηση για νέο φάσμα.

Μια δημοσιευμένη έρευνα εταιρίας [28] (Σχήμα 1-1 και Σχήμα 1-2) με λεπτομερείς μετρήσεις σε 6 περιοχές των Ηνωμένων Πολιτειών δείχνει ότι η χρησιμοποίηση του φάσματος κυμαίνεται από 1% σε απομονωμένες περιοχές στην ύπαιθρο έως 13% στην κεντρική περιοχή της Νέας Υόρκης. Αν αυτό το μη χρησιμοποιούμενο φάσμα χρησιμοποιηθεί από τα γνωστικά συστήματα, τότε η ποσότητα διαθέσιμων συχνοτήτων αυξάνει δραματικά. Στα οφέλη, επίσης, για τους παρόχους υπηρεσιών συγκαταλέγονται η γρήγορη ανάπτυξη νέων υπηρεσιών και η εξάλειψη της ανάγκης εναρμόνισης των συσκευών, χάρη στην εύκολη προσαρμογή

στο χώρο και στο χρόνο σε αλλαγές στο του ρυθμιστικό περιβάλλοντος. Παρόλα αυτά, ταυτόχρονα εγείρονται νέες προκλήσεις, όπως οι αυξημένες απαιτήσεις ασφαλείας, η πολυπλοκότητα διαχείρισης των υπηρεσιών και ο αυξημένος ανταγωνισμός.



Σχήμα 1-1. Χρησιμοποίηση φάσματος, ανά ζώνη συχνοτήτων, μεσοσταθμισμένη για 6 περιοχές των ΗΠΑ

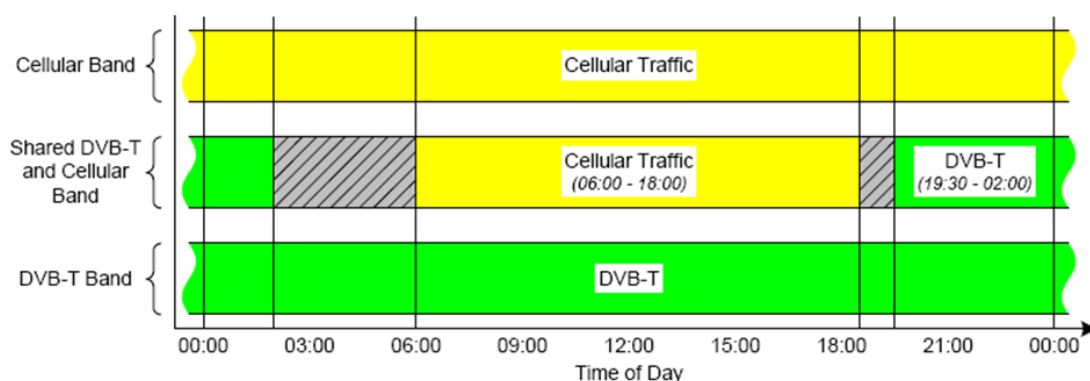


Σχήμα 1-2. Ποσοστό χρησιμοποίησης φάσματος σε 6 περιοχές των ΗΠΑ

1.4.4.4 Οφέλη για τους παρόχους δικτύου

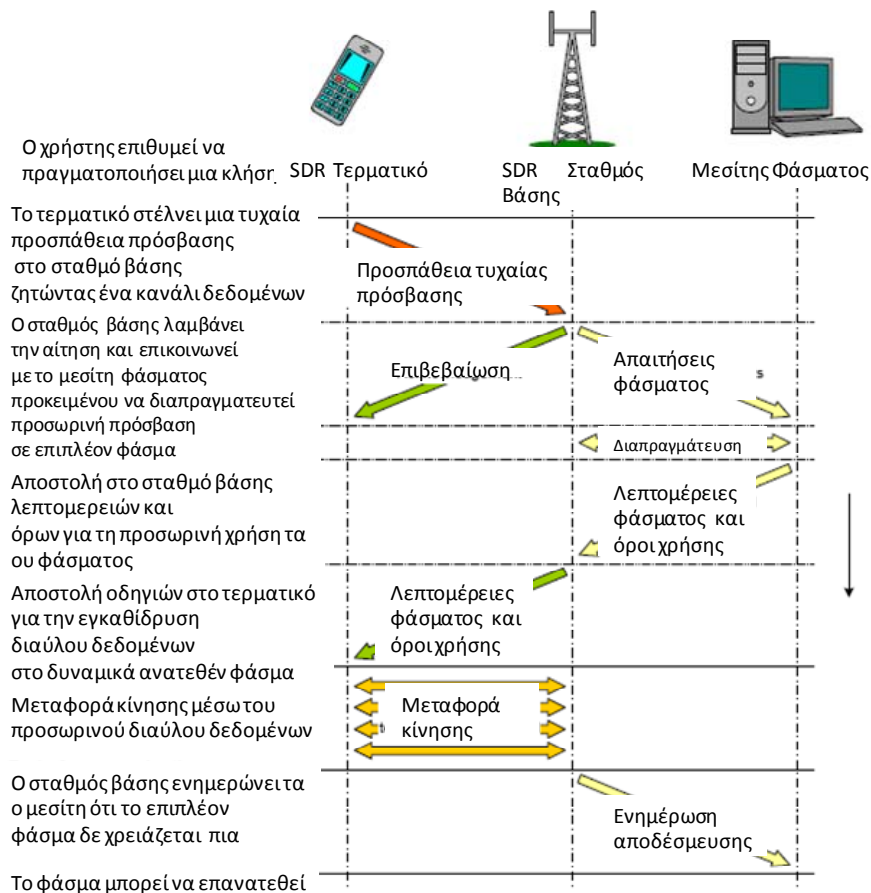
Τα γνωστικά δίκτυα ενδέχεται να ανοίξουν το δρόμο στο «εμπόριο φάσματος», όπου οι αδειοδοτημένοι πάροχοι θα μπορούν να νοικιάζουν τμήμα του φάσματός τους σε τρίτους παράγοντες σε χωρική, χρονική ή άλλη βάση. Έτσι, ένας πάροχος 3G

μπορεί να αποσβέσει κάποιο από το κόστος απόκτησης της αδείας του για μετάδοση επί 24ωρης βάσης, μέσω ενοικίασης τμήματος του φάσματός του, για παράδειγμα στην επίγεια ψηφιακή τηλεόραση τις νυχτερινές ώρες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-3. Ο πάροχος τηλεόρασης επωφελείται, επίσης, από αυτήν τη συμφωνία, καθώς δε χρειάζεται να αποκτήσει πλήρη άδεια.



Σχήμα 1-3. Διαμοιρασμός φάσματος ανάμεσα σε δίκτυο κινητής τηλεφωνίας και σε σύστημα επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης

Αντί απλώς να αποσβέσει κάποια από τα έξοδα απόκτησης της αδείας, αν ενεργήσει προσεκτικά ένας πάροχος δικτύου μπορεί ακόμα και να αποκτήσει κέρδος από αυτό το «εμπόριο φάσματος». Στην παραπομπή [33], συζητείται η ιδέα της μεσιτούμενης αποκεντρωμένης πρόσβασης φάσματος, σύμφωνα με την οποία ένας κεντρικός πράκτορας ελέγχει την προσωρινή ανάθεση φάσματος, ενεργώντας ως μεσολαβητής ανάμεσα στον αδειοδοτημένο πάροχο και έναν τρίτο παράγοντα που επιθυμεί προσωρινή χρήση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-4. Λαμβάνοντας προμήθεια επί της χρέωσης του τρίτου παράγοντα, ο μεσίτης αυτός μπορεί να αποκομίσει κέρδος.



Σχήμα 1-4. Παράδειγμα επικοινωνίας στην περίπτωση μεσιτείας φάσματος

Άλλα οφέλη για τους παρόχους δικτύου περιλαμβάνουν την βελτιστοποίηση των δικτύων τους μέσω των μετρήσεων φάσματος που πραγματοποιούν τα τερματικά, την αύξηση του κέρδους τους μέσω της δυνατότητας εισαγωγής νέων υπηρεσιών προστιθέμενης αξίας και, τέλος, τη μείωση των εξόδων κεφαλαίου τους (Capital Expenditures – CAPEX).

1.4.4.5 Οφέλη για τις ρυθμιστικές αρχές

Τα γνωστικά δίκτυα, όπως προαναφέρθηκε, έχουν τη δυνατότητα να οδηγήσουν σε πιο αποτελεσματική χρήση του διαθέσιμου φάσματος. Το γεγονός αυτό μπορεί να λειτουργήσει ως κίνητρο για «εμπόριο φάσματος», ενισχύοντας κατ' επέκταση το ρόλο των ρυθμιστικών αρχών, καθώς η δυνατότητα χρήσης πολλαπλών συχνοτήτων εμπίπτει στα όρια δικαιοδοσίας των οργανισμών αυτών. Η ευελιξία που παρέχουν τα γνωστικά δίκτυα δίνει τη δυνατότητα στις ρυθμιστικές αρχές να δοκιμάσουν αλλαγές στους ισχύοντες κανόνες, για παράδειγμα στους περιορισμούς μέγιστης ισχύος

εκπομπής, επιστρέφοντας εύκολα στην πρότερη κατάσταση αν τα αποτελέσματα κριθούν μη ικανοποιητικά.

Το εμπόριο φάσματος εμφανίζεται ως μια προοπτική επικερδής για όλες τις πλευρές. Από τη μία πλευρά, η κυβέρνηση και οι αρμόδιοι φορείς κερδίζουν πουλώντας άδειες. Από την άλλη πλευρά, οι αδειοδοτημένοι πάροχοι μπορούν να αποσβέσουν μέρος του κόστους απόκτησης της άδειας, νοικιάζοντας ένα τμήμα συχνοτήτων σε τρίτους παράγοντες, είτε απευθείας είτε μέσω μεσιτών φάσματος επί συγκεκριμένης προμήθειας. Τρίτοι παράγοντες θα πληρώνουν με αυτόν τον τρόπο μόνο για το φάσμα που πραγματικά χρησιμοποιείται για τις εφαρμογές τους. Πρακτικά, όμως, η υλοποίηση των παραπάνω μπορεί να αποδειχθεί δύσκολο να επιτευχθεί. Εξάλλου, οι περιοριστικοί κανόνες για τη χρήση του φάσματος δε δημιουργήθηκαν ούτε εφαρμόζονται χωρίς λόγο. Τα γνωστικά δίκτυα, όμως, προσφέρουν πράγματι μια ισχυρή εναλλακτική στους αυστηρούς αυτούς κανονισμούς, στους οποίους οφείλεται, σε μεγάλο βαθμό, η μη αποδοτική χρήση του φάσματος που παρατηρείται σήμερα.

Τα γνωστικά δίκτυα μπορούν, επίσης, να επιτρέψουν, σε ορισμένες περιπτώσεις, χαλάρωση των προϋποθέσεων αδειοδότησης ή των περιορισμών παρεμβολών. Βήματα προς αυτήν την κατεύθυνση έχουν ήδη σημειωθεί, όπως εξηγείται στην παραπομπή [34], για την μπάντα C των 5 GHz (5725-5850 MHz). Οι περιορισμοί παρεμβολών ορίζουν ότι ο εξοπλισμός που λειτουργεί σε αυτήν την μπάντα πρέπει να υλοποιεί ένα μηχανισμό τυχαίας πρόσβασης διαύλου, προκειμένου να αποτρέψει την ομοδιαυλική παρεμβολή παρουσία σημάτων ραντάρ. Ο μηχανισμός αυτός είναι γνωστός ως «δυναμική επιλογή συχνότητας» (Dynamic Frequency Selection – DFS) [35]. Ενδιαφέρον, όμως, είναι το γεγονός ότι η «ισοδύναμη ισοτροπικά εκπεμπόμενη ισχύς» (Equivalent Isotropically Radiated Power – EIRP) καθορίζεται από το κατώφλι ανίχνευσης DFS. Με άλλα λόγια, ένα γνωστικό δίκτυο μπορεί να εκπέμψει μεγαλύτερη ισχύ.

1.4.4.6 Σύνοψη – Πλεονεκτήματα και Προκλήσεις

Ένα γνωστικό δίκτυο προσφέρει βέλτιστη συμπεριφορά σε ένα ετερογενές περιβάλλον με το να προσαρμόζεται στις τρέχουσες συνθήκες και απαιτήσεις. Το γεγονός αυτό προσφέρει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- **Αποδοτική χρήση του φάσματος.** Συνδυάζοντας έξυπνη εκμετάλλευση των παρατηρούμενων «οπών φάσματος», πραγματοποιείται βέλτιστη χρήση του διαθέσιμου φάσματος κάθε δεδομένη στιγμή. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να αντιμετωπιστεί κάθε μελλοντική ζήτηση φάσματος.
- **Βελτιωμένη ποιότητα υπηρεσίας.** Η καταλληλότητα, η διαθεσιμότητα και η αξιοπιστία των ασύρματων δικτύων, από την προοπτική του τελικού χρήστη, θα βελτιωθούν. Σε περίπτωση μη ιδανικών συνθηκών, η ολοκληρωτική διακοπή παροχής της υπηρεσίας δίνει τη θέση της σε μια αποδεκτή επιδείνωσή της.
- **Προσαρμοστικότητα σε μελλοντικές τεχνολογικές εξελίξεις.** Ένα γνωστικό δίκτυο μπορεί να τροποποιεί τις υπηρεσίες, τα πρωτόκολλα, τις τεχνολογίες πρόσβασης, χωρίς να καθιστά αναγκαία την απόκτηση μια νέας συσκευής.
- **Ενοποίηση των τεχνικών υλοποιήσεων.** Οι κατασκευαστές πραγματοποιούν οικονομίες κλίμακος, καθώς δεν απαιτείται, πλέον, η κατασκευή διαφορετικών τμημάτων υλικού, αλλά η δημιουργία μιας ενιαίας κοινής πλατφόρμας, ικανής να υποστηρίξει ένα εύρος εφαρμογών λογισμικού. Η παραπάνω ενιαία πλατφόρμα επιτρέπει, επίσης, την ταχύτατη ανάπτυξη νέων εφαρμογών.
- **Εμπορική εκμετάλλευση.** Τα γνωστικά δίκτυα προωθούν την ιδέα «απελευθέρωσης» του φάσματος και ανοίγουν το δρόμο για ανταλλαγή του μεταξύ των χρηστών. Ένας νέος εμπορικός ρόλος, αυτός του «μεσίτη φάσματος», που θα αναλαμβάνει τη διαμεσολάβηση μεταξύ των χρηστών που ζητούν και των χρηστών που προσφέρουν φάσμα, μπορεί να δημιουργηθεί.

Πέρα, όμως, από τα προαναφερόμενα οφέλη, η εισαγωγή των γνωστικών δικτύων στον κόσμο των ασύρματων επικοινωνιών είναι λογικό να επιφέρει και κάποιες δυσκολίες, ή μάλλον να εγείρει νέες προκλήσεις. Οι προκλήσεις αυτές, σε μεγάλο βαθμό, εστιάζονται στα παρακάτω:

- **Αποτελεσματική αποφυγή παρεμβολών.** Σε ένα περιβάλλον όπου κάθε χρήστης μπορεί να εκπέμψει σε συχνότητα της επιλογής του, με βάση, φυσικά, συγκεκριμένα κριτήρια, είναι πολύ πιθανό, να προκαλούνται παρεμβολές σε ορισμένους χρήστες. Στόχος των γνωστικών συστημάτων είναι, πρωταρχικά, η αποφυγή χρήσης συχνότητας στην οποία ήδη υπάρχει

κίνηση και, δευτερευόντως, η κατάλληλη προσαρμογή σε περίπτωση που ανιχνευθεί παρεμβολή ενώ έχει ήδη επιλεγεί μια ζώνη συχνοτήτων.

- **Ανάπτυξη κατάλληλου και αποδοτικού σχήματος διαχείρισης.** Η διαχείριση ενός μεγάλου πλήθους τερματικών συσκευών και η διερεύνηση μιας πληθώρας πιθανών διαφορετικών διαρθρώσεων επιβάλλει την ανάγκη εφαρμογής ενός αποτελεσματικού σχήματος διαχείρισης που, διατηρώντας την αυτονομία του, θα προσδιορίζει την καταλληλότερη από τις υποψήφιες διαρθρώσεις, λαμβάνοντας υπόψη τις τρέχουσες συνθήκες και ανάγκες.
- **Εξασφάλιση της ασφάλειας και της ιδιωτικότητας των χρηστών.** Η προστασία τόσο των χρηστών, όσο και των τερματικών συσκευών, από κακόβουλες πράξεις ή λογισμικό που μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση ολόκληρου του δικτύου, επιβάλλει την ανάπτυξη ενός σύνθετου περιβάλλοντος ασφαλείας. Παραδείγματος χάριν, οι πληροφορίες επαίσθησης του περιβάλλοντος, που συγκεντρώνονται από τα κινητά τερματικά, μπορούν, κακοπροαίρετα, να επηρεαστούν ή να τροποποιηθούν δημιουργώντας μια εντελώς εσφαλμένη εικόνα του δικτύου.

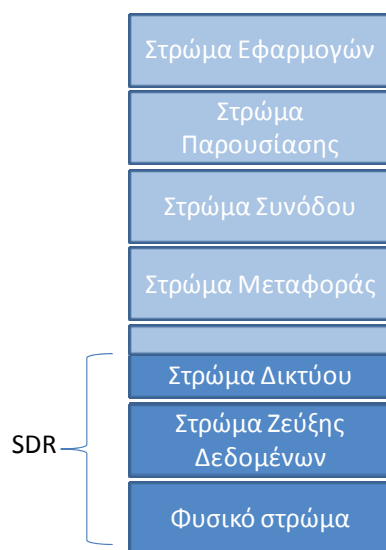
1.4.4.7 Λογισμικώς Καθορισμένα Συστήματα Επικοινωνιών

Η βασική αρχή λειτουργίας των γνωστικών δικτύων είναι, λοιπόν, η εξής: Ένα γνωστικό σύστημα «αισθάνεται» το περιβάλλον του και προσαρμόζει κατάλληλα τις παραμέτρους λειτουργίας του, προκειμένου να προσαρμοστεί στις τρέχουσες συνθήκες και ανάγκες. Στις λειτουργικές παραμέτρους που προσαρμόζονται κατάλληλα, συνθέτοντας μια νέα διάρθρωση, συγκαταλέγονται η ζώνη συχνοτήτων, η τεχνολογία πρόσβασης, το σχήμα διαμόρφωσης, η ισχύς εκπομπής κτλ. Το ερώτημα, όμως, που, φυσιολογικά, εγείρεται είναι το ακόλουθο: Ποιο είναι το τεχνολογικό υπόβαθρο που μπορεί να υποστηρίξει ένα τόσο ευέλικτο σύστημα εκπομπής και λήψης;

Τα γνωστικά δίκτυα, λοιπόν, στηρίζουν την τεχνική υλοποίησή τους στα Λογισμικώς Καθορισμένα Συστήματα Ασύρματων Επικοινωνιών (SDR). Η αμερικάνικη επιτροπή FCC ορίζει ένα SDR σύστημα ως «ένα σύστημα που περιλαμβάνει έναν πομπό, οι λειτουργικές παράμετροι του οποίου, όπως το εύρος συχνοτήτων, το σχήμα διαμόρφωσης και η μέγιστη ισχύς εξόδου, μπορούν να

τροποποιηθούν μέσω κατάλληλων αλλαγών στο λογισμικό, χωρίς να είναι απαραίτητη η μετατροπή τμημάτων υλικού που επηρεάζουν την ραδιοεκπομπή» [23].

Σε αυτό το σημείο είναι σκόπιμο να γίνει ο εξής διαχωρισμός: Ένα SDR σύστημα δεν αναφέρεται στο σύνολο του λογισμικού που, ενδεχομένως, είναι παρόν σε ένα σύστημα επικοινωνιών, π.χ. λογισμικό εφαρμογών. Αντίθετα, ένα SDR σύστημα αναφέρεται αποκλειστικά στο φυσικό στρώμα, το στρώμα ζεύξης δεδομένων και πιθανώς μέρος του στρώματος δικτύου του μοντέλου αναφοράς OSI όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1-5.



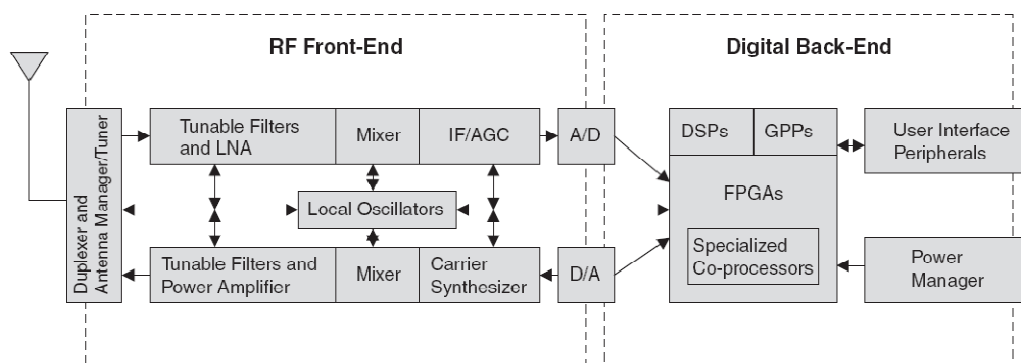
Σχήμα 1-5. Στρώματα του μοντέλου αναφοράς OSI στα οποία εφαρμόζονται τα SDR συστήματα

Η τεχνολογία SDR, επομένως, επιτρέπει τη δημιουργία και λειτουργία κινητών τερματικών και σταθμών βάσης, που τη μια χρονική στιγμή λειτουργούν σε συγκεκριμένη τεχνολογία πρόσβασης, ζώνη συχνοτήτων και με συγκεκριμένη ισχύς εκπομπής και την αμέσως επόμενη στιγμή λειτουργούν σε διαφορετική τεχνολογία, διαφορετικό εύρος συχνοτήτων και γενικά υπό διαφορετικές λειτουργικές παραμέτρους. Με άλλα λόγια, ο δικτυακός εξοπλισμός είναι αναδιαρθρώσιμος (reconfigurable), υποστηρίζοντας πολλές ζώνες συχνοτήτων (multi-band) και διαφορετικές τεχνολογίες πρόσβασης (multihoming).

Από τεχνικής απόψεως, για να υποστηρίζεται μια τέτοια γρήγορη αναδιάρθρωση, τα RF (radio frequency) τμήματα του υλικού, θα πρέπει να είναι αρκετά εύκαμπτα ώστε να υποστηρίζουν εύκολη αλλαγή συχνότητας (με τη νέα συχνότητα πιθανώς να απέχει αρκετά από την παλιά) και γρήγορη αλλαγή του τρόπου μετάδοσης της

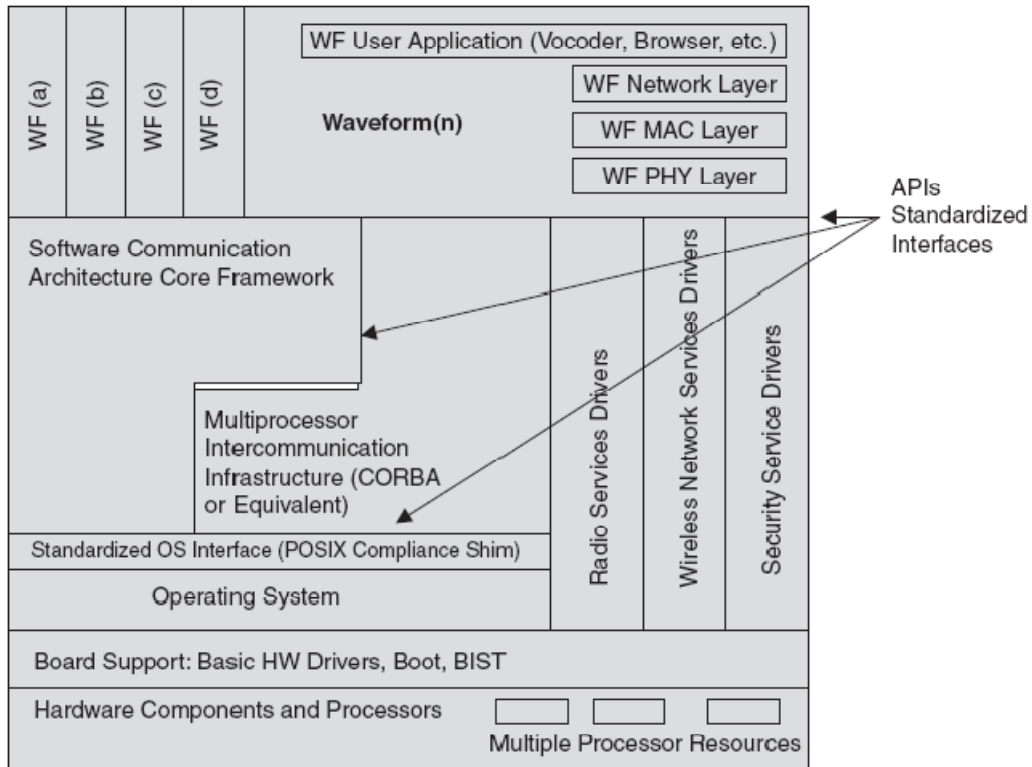
πληροφορίας. Αυτό σημαίνει ότι για να επιτευχθεί η επιθυμητή απόδοση είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός πολύ ευέλικτου μετωπιαίου άκρου. Η παραδοσιακή τεχνολογία μετωπιαίου άκρου δεν είναι σε θέση να χειριστεί τέτοιες απαιτήσεις, καθώς είναι, συνήθως, περιορισμένη ως προς το σχήμα διαμόρφωσης και τη ζώνη συχνοτήτων που χρησιμοποιεί. Γίνεται, συνεπώς, εμφανές ότι οι επιθυμητές αποδόσεις μπορούν να επιτευχθούν μόνο με μετατροπή του σήματος όσο το δυνατόν πιο κοντά γίνεται στην κεραία. Με αυτόν τον τρόπο, δε χρειάζεται να πραγματοποιείται αναλογική επεξεργασία του σήματος αλλά μόνο ψηφιακή. Οι μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (Digital to Analogue Converters – DACs), καθώς και οι μετατροπείς ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (Analogue to Digital Converters – ADCs) που θα χρησιμοποιηθούν, πρέπει να υποστηρίζουν ένα μεγάλο και δυναμικό εύρος συχνοτήτων, ως και μερικά GHz, και θα πρέπει να είναι σε θέση να χειρίζονται μεγάλα επίπεδα ισχύος που πιθανώς θα χρησιμοποιηθούν.

Μια βασική αρχιτεκτονική υλικού εικονίζεται στο Σχήμα 1-6, που ακολουθεί. Το υλικό αυτό διαθέτει όλους τους απαραίτητους πόρους ώστε να καθορίζονται η συχνότητα φέροντος, το εύρος ζώνης, το σχήμα διαμόρφωσης, μια -ίσως απαραίτητη- μέθοδος κρυπτογραφίας και η κωδικοποίηση πηγής μέσω λογισμικού. Περιλαμβάνει μια ποικιλία από επεξεργαστές γενικής χρήσης (General Purpose Processors – GPPs), επεξεργαστές ψηφιακού σήματος (Digital Signal Processors – DSPs), μήτρες προγραμματιζόμενων πυλών πεδίου (Field Programmable Gate Arrays – FPGAs) και άλλους υπολογιστικούς πόρους, ικανούς να υποστηρίξουν ένα μεγάλο εύρος σχημάτων διαμόρφωσης.



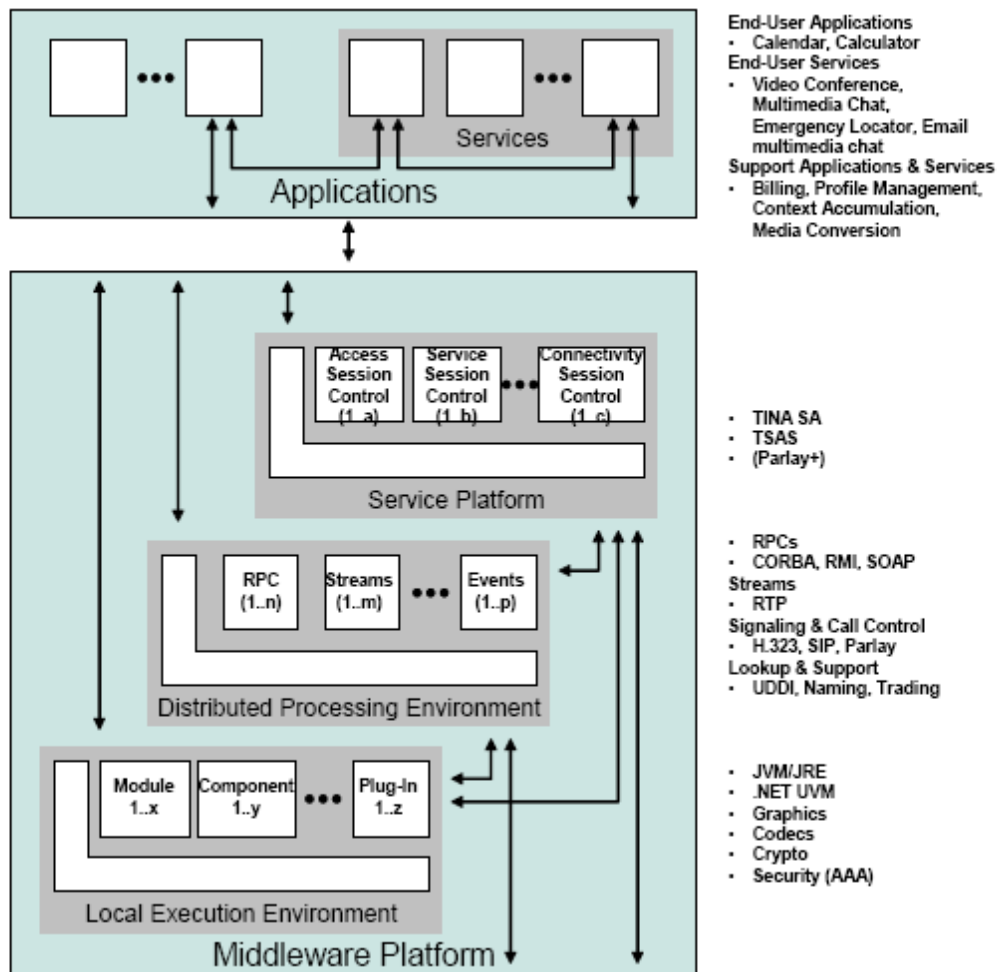
Σχήμα 1-6. Βασική αρχιτεκτονική υλικού ενός SDR συστήματος

Μια βασική αρχιτεκτονική λογισμικού ενός τυπικού SDR συστήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 1-7, που ακολουθεί. Προτυποποιημένες διεπαφές προγραμματισμού εφαρμογών (Application Programming Interfaces – APIs) ορίζονται για τις κυριότερες λειτουργικές διεπαφές του συστήματος, προκειμένου να εξασφαλιστεί η φορητότητα του λογισμικού σε διαφορετικές υλοποιήσεις της πλατφόρμας υλικού.



Σχήμα 1-7. Βασική αρχιτεκτονική λογισμικού ενός SDR συστήματος

Ειδικά για τις κινητές τερματικές συσκευές, η αρχιτεκτονική και οι διεπαφές μπορούν να δοθούν με τη μορφή που απεικονίζεται στο Σχήμα 1-8.



Σχήμα 1-8. Βασική αρχιτεκτονική λογισμικού ενός SDR τερματικού

Περισσότερες πληροφορίες για τα επιμέρους τμήματα υλικού ενός SDR συστήματος, όπως π.χ. οι «έξυπνες» κεραίες, αναφέρονται στις παραπομπές [36]-[37]. Όπως γίνεται προφανές, τόσο η αρχιτεκτονική υλικού όσο και η αρχιτεκτονική λογισμικού είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να υποστηρίζουν τις γενικές και κοινές αρχές εκπομπής και λήψης, ανεξαρτήτως τεχνολογίας πρόσβασης. Πέραν τούτου, όμως, είναι άκρως παραμετροποιήσιμες με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε τεχνολογίας, όπως τα πρωτόκολλα κάθε στρώματος, να ενσωματώνονται σε αυτές μέσω κατάλληλου λογισμικού οδήγησης (drivers). Το λογισμικό αυτό μεταφέρεται και εγκαθίσταται στο κινητό τερματικό μέσω της ασύρματης διεπαφής. Προκειμένου να μειωθεί ο όγκος των δεδομένων που πρέπει να μεταφερθεί και να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος που απαιτείται για την εφαρμογή μιας νέας διάρθρωσης, προτείνεται ένας διαχωρισμός του λογισμικού σε «μόνιμα εδρεύον λογισμικό» (permanent resident code) και σε «μεταφερόμενα επιπρόσθετα τμήματα» (downloadable add-on modules).

Με αυτόν τον τρόπο, το μόνιμα εδρεύον λογισμικό πρέπει να είναι όσο το δυνατόν γενικότερο (generic protocol stack). Χρησιμοποιώντας τους κοινούς πόρους, ο γενικός αυτός σκελετός μπορεί να προσφέρει την επιθυμητή αποδοτικότητα αλλά και την απαραίτητη ευελιξία συγχρόνως. Υποθέτοντας ότι οι συσκευές είναι εξοπλισμένες με ένα γενικό πυρήνα, η απαραίτητη αναδιαμόρφωση του λογισμικού μπορεί να εγκατασταθεί «έξυπνα», δεδομένου ότι μόνο η συγκεκριμένη λειτουργία πρέπει να συμπεριληφθεί.

Πλαίσιο ασφάλειας. Σε ένα περιβάλλον, όμως, όπου καίρια, για τη λειτουργία της συσκευής αλλά και ολόκληρου του δικτύου, τμήματα λογισμικού μεταφέρονται μέσω της ασύρματης διεπαφής, προβάλλει επιτακτική η ανάγκη δημιουργίας ενός πλαισίου ασφάλειας, ικανού να ανιχνεύσει και να αποτρέψει κάθε κακόβουλη ενέργεια. Το πλαίσιο αυτό οφείλει να εξασφαλίζει:

- **Εμπιστευτικότητα** (confidentiality). Τα δεδομένα αποκαλύπτονται μόνο στο προοριζόμενο τερματικό.
- **Ακεραιότητα** (integrity). Τα δεδομένα δεν μπορούν να τροποποιηθούν από μη επικυρωμένη και εξουσιοδοτημένη οντότητα.
- **Πιστοποίηση** (authentication). Μια οντότητα έχει στην πραγματικότητα την ταυτότητα που υποστηρίζει ότι έχει.
- **Έλεγχος πρόσβασης** (access control). Συγκεκριμένες ενέργειες μπορούν να εκτελεστούν μόνο από εξουσιοδοτημένους χρήστες.
- **Ανωνυμία** (anonymity). Η ταυτότητα και οι προσωπικές πληροφορίες του χρήστη δε γνωστοποιούνται.

Χωρίς κατάλληλους μηχανισμούς προστασίας, η ευελιξία και η αυξανόμενη λειτουργία του αναδιαρθρώσιμου εξοπλισμού θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν με λάθος τρόπο. Είναι, επομένως, ουσιαστικό να εξασφαλιστεί ότι ο αναδιαρθρώσιμος εξοπλισμός μπορεί να διαμορφωθεί μόνο με ασφαλείς και εξουσιοδοτημένους τρόπους, όπου οι προτιμήσεις και οι προσδοκίες των οντοτήτων που συμμετέχουν γίνονται σεβαστές.

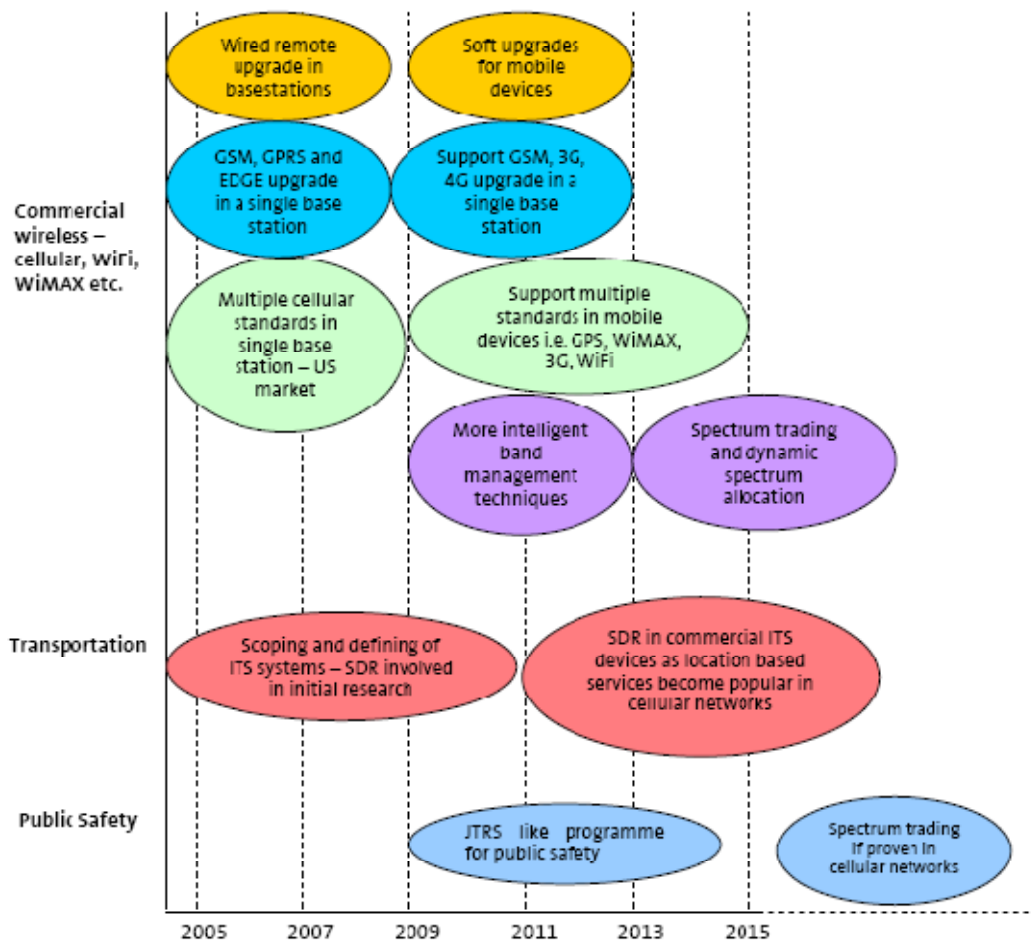
Για να αποτραπεί η ζημιά από το ενδεχομένως κακόβουλο λογισμικό, δύο βασικές μέθοδοι μπορούν να υιοθετηθούν:

- **Μέθοδος Sandbox.** Σε αυτήν τη μέθοδο, το λογισμικό που μεταφέρθηκε εκτελείται σε ένα περιορισμένο και ελεγχόμενο περιβάλλον εκτέλεσης

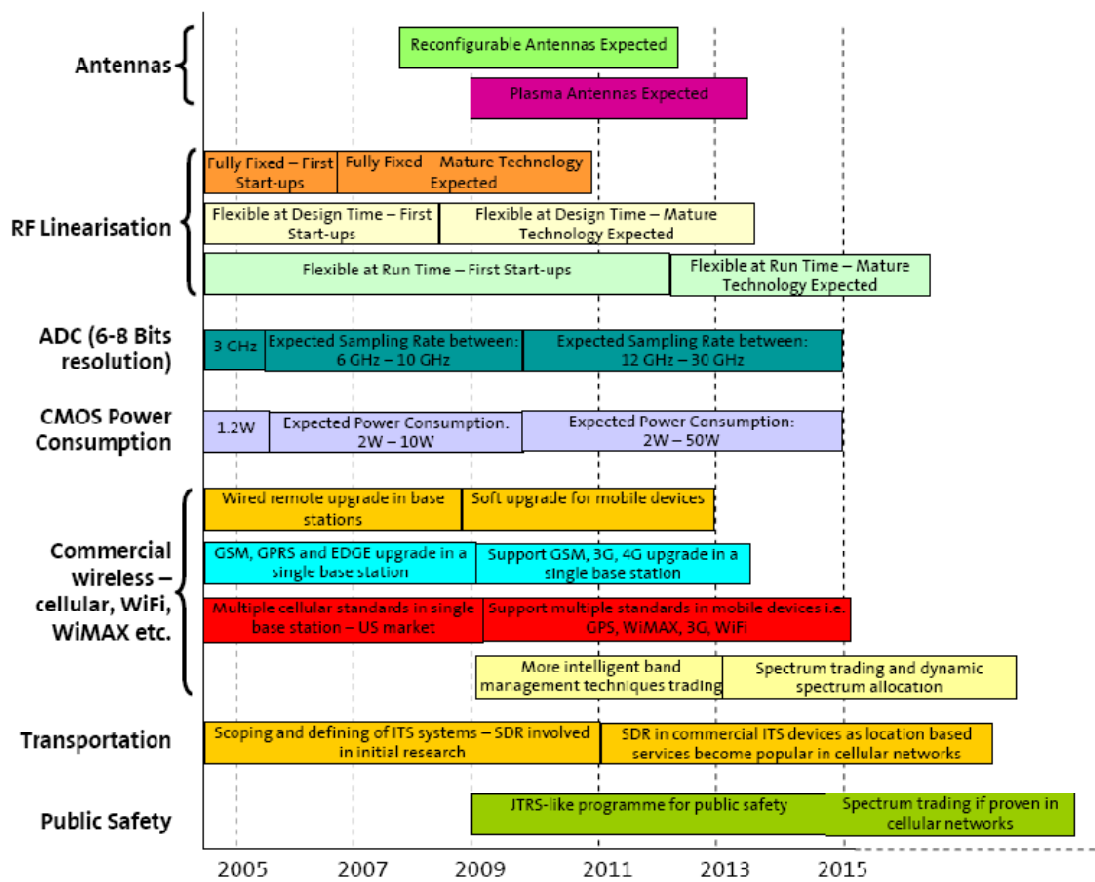
(sandbox). Η εκτέλεση του λογισμικού στο sandbox μπορεί να έχει πρόσβαση μόνο στη λειτουργία που θεωρείται ασφαλής με αποτέλεσμα ένα πρόγραμμα κακόβουλης συμπεριφοράς να μην μπορεί να προκαλέσει ζημιά.

- **Μέθοδος Trust-based.** Μόνο το λογισμικό από τους εμπιστευμένους προμηθευτές γίνεται αποδεκτό, όπου ο προμηθευτής υπογράφει ένα πακέτο λογισμικού χρησιμοποιώντας μια ψηφιακή υπογραφή (π.χ. RSA/PKCS#1 ή DSA) στον υπογεγραμμένο κώδικα. Ο υπογεγραμμένος κώδικας επιτρέπει στο δέκτη για να επιβεβαιώσει τον προμηθευτή και την ακεραιότητα του λαμβανόμενου πακέτου λογισμικού.

Χρονική εξέλιξη των SDR συστημάτων. Στο τμήμα που ακολουθεί, παρουσιάζονται με εποπτικό τρόπο, στο Σχήμα 1-9 και στο Σχήμα 1-10, εκτιμήσεις για τη χρονική εξέλιξη των SDR συστημάτων, τόσο σε επίπεδο εφαρμογών όσο και σε επίπεδο τεχνικών επιτευγμάτων.



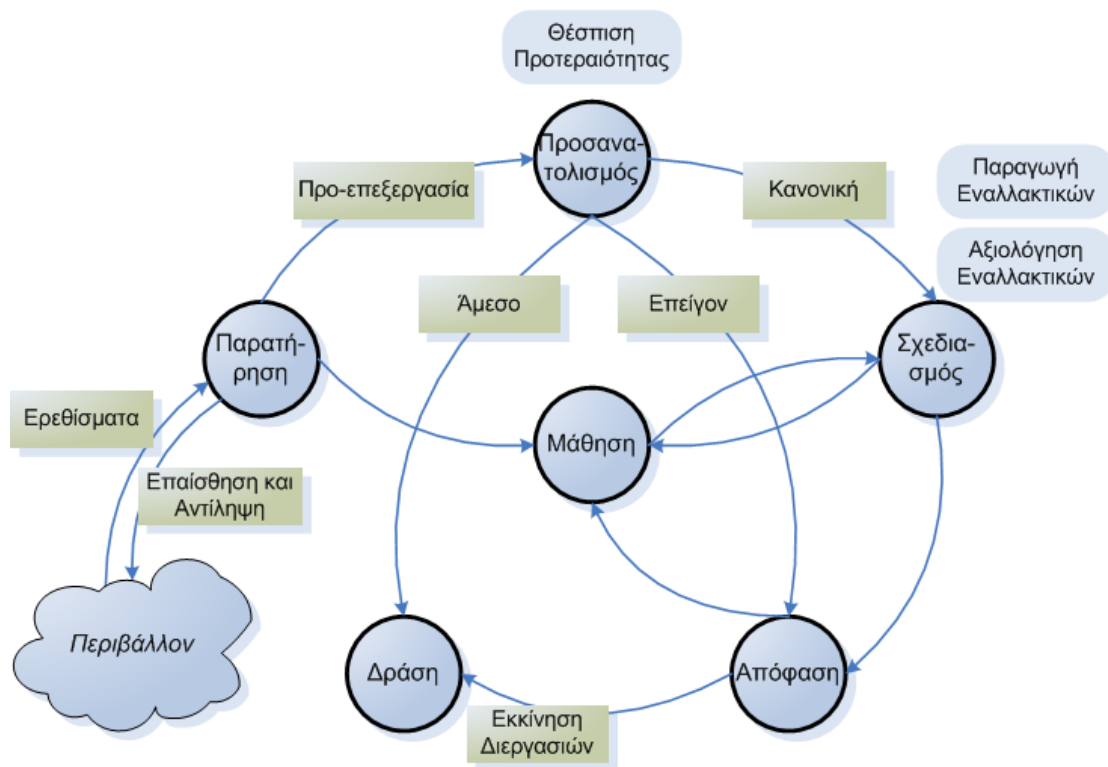
Σχήμα 1-9. Χρονικό πλάνο υλοποίησης μελλοντικών SDR εφαρμογών



Σχήμα 1-10. Πρόβλεψη τεχνολογικών εξελίξεων στον τομέα των SDR συστημάτων

1.4.4.8 Γνωστικός κύκλος

Παρά την ευελιξία και την προσαρμοστικότητα του, όμως, ένα SDR σύστημα δε θα πρέπει να συγχέεται με ένα γνωστικό σύστημα. Τα γνωστικά συστήματα βασίζονται μεν στην τεχνολογία SDR για την υλοποίησή τους, διακρίνονται, όμως, από αυτά από το γεγονός ότι διαθέτουν ένα είδος νοημοσύνης, που τους επιτρέπει να παρατηρούν, να μαθαίνουν και να θυμούνται. Οι παραπάνω δυνατότητες των γνωστικών συστημάτων υλοποιούνται σε μια αλληλουχία φάσεων, γνωστή ως «γνωστικός κύκλος». Ο γνωστικός κύκλος, που αναπτύχθηκε από τον Joseph Mitola [38], εμπνευστή, όπως αναφέρθηκε, των γνωστικών δικτύων, απεικονίζεται στο Σχήμα 1-11.



Σχήμα 1-11. Ο γνωστικός κύκλος

Ερεθίσματα εισέρχονται στο γνωστικό σύστημα, ως έξοδοι αισθητήρων, και ακολουθούν τις φάσεις του κύκλου με στόχο μια τελική απόφαση. Ένα τέτοιο σύστημα διαρκώς παρακολουθεί (αισθάνεται και αντιλαμβάνεται) το περιβάλλον του, προσανατολίζει τον εαυτό του, καταστρώνει σχέδια, λαμβάνει αποφάσεις και στη συνέχεια ενεργεί. Σε ένα σύστημα εξαγωγής συμπερασμάτων με μονή επεξεργασία, η ροή έλεγχου του γνωστικού συστήματος μεταβαίνει από τη φάση παρατήρησης στη φάση δράσης του κύκλου. Σε ένα σύστημα πολλαπλής επεξεργασίας, προσωρινές δομές επαίσθησης, προεπεξεργασίας, συλλογιστικής και δράσης μπορεί να είναι παράλληλες και σύνθετες. Ειδικοί μηχανισμοί συγχρονίζουν τις διαδικασίες εξαγωγής συμπερασμάτων κάθε φάσης. Ο χρόνος λειτουργίας ενός γνωστικού συστήματος μπορεί να διακριθεί στις παρακάτω τρεις κατηγορίες:

- Τα «ενεργά διαστήματα» ή «διαστήματα αφύπνισης» (wake epochs), κατά τη διάρκεια των οποίων οι πρωταρχικές συλλογιστικές δραστηριότητες αντιδρούν στα ερεθίσματα του περιβάλλοντος.
- Τα «ανενεργά διαστήματα» ή «διαστήματα λήθαργου» (sleep epochs), κατά τη διάρκεια των οποίων το σύστημα πραγματοποιεί εσωτερική συλλογιστική.

- Τα «διαστήματα προσευχής» (pray epochs), όπου το σύστημα ζητά βοήθεια από κάποια ανώτερη αρχή.

Η ύπαρξη των δύο τελευταίων τύπων διαστημάτων αποτελεί σχεδιαστική επιλογή και μπορεί να παρακαμφθεί σε αρκετά συστήματα. Κατά τη διάρκεια των διαστημάτων ανίχνευσης, που καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, η αποδοχή ενός καινούριου ερεθίσματος ή η ολοκλήρωση ενός προγενέστερου γνωστικού κύκλου, εκκινεί ένα νέο πρωταρχικό γνωστικό κύκλο. Το γνωστικό σύστημα παρακολουθεί το περιβάλλον του και διαχωρίζει τις πληροφορίες που φτάνουν σε αυτό. Οποιοσδήποτε ασύρματες εκπομπές μικρής κάλυψης ή τοπικών δικτύων που παρέχουν πληροφορίες επίγνωσης περιβάλλοντος επεξεργάζονται επίσης. Στη φάση παρατήρησης, ένα γνωστικό σύστημα μπορεί, επίσης, να καταγράφει τη θέση, τη θερμοκρασία ή λοιπές ενδείξεις αισθητήρων, προκειμένου να εξαγάγει συμπεράσματα για το πλαίσιο χρήσης (context) του χρήστη.

Παρατήρηση (Επαίσθηση και Αντίληψη). Ένα γνωστικό σύστημα αισθάνεται και αντιλαμβάνεται το περιβάλλον του, δεχόμενο πολλαπλά ερεθίσματα σε πολλές διαστάσεις ταυτόχρονα, και συνδέοντας αυτά τα ερεθίσματα, είτε όλα μαζί είτε, συνήθως, σε υποσύνολα, με πρότερη εμπειρία ώστε να μπορεί στη συνέχεια να ανιχνεύσει ευαίσθητα στο χρόνο ερεθίσματα, με απώτερο σκοπό την παραγωγή σχεδίου δράσης.

Συνεπώς, ένα γνωστικό σύστημα διαρκώς συγκεντρώνει εμπειρία, συγκρίνοντας στη συνέχεια αυτήν την εμπειρία με την τρέχουσα κατάσταση. Η συγκέντρωση αυτή της εμπειρίας μπορεί να επιτευχθεί με την απομνημόνευση όλων των δεδομένων. Η λύση αυτή, προφανώς, δε φαίνεται και πολύ αποδοτική καθώς απαιτεί την ύπαρξη μνήμης μεγάλης χωρητικότητας. Επομένως, μια υπολογιστική αρχιτεκτονική που επιτρέπει την απομνημόνευση και το γρήγορο συσχετισμό της τρέχουσας κατάστασης με κάθε προηγούμενη εμπειρία αποτελεί ένα θεμελιώδες χαρακτηριστικό ενός γνωστικού συστήματος. Ένας «ανιχνευτής πρωτοτυπίας» (novelty detector) αναγνωρίζει νέα ερεθίσματα, χρησιμοποιώντας νέες πτυχές μερικών γνωστών ερεθισμάτων με στόχο τη βελτιωμένη μάθηση.

Προσανατολισμός. Η φάση προσανατολισμού καθορίζει τη βαρύτητα μιας παρατήρησης, συνδέοντάς την με ένα εκ των προτέρων γνωστό σύνολο ερεθισμάτων.

Η φάση αυτή περιλαμβάνει τις εσωτερικές δομές δεδομένων που συγκροτούν το ισοδύναμο της «βραχυπρόθεσμης μνήμης» που χρησιμοποιούν οι άνθρωποι όταν πραγματοποιούν διάλογο, χωρίς απαραίτητα να θυμούνται κάθε λεπτομέρεια με τον ίδιο βαθμό «μακροπρόθεσμης μνήμης». Τυπικά, οι άνθρωποι χρειάζονται επανάληψη προκειμένου να μεταφέρουν πληροφορίες στη μακροπρόθεσμη μνήμη τους. Το φυσικό περιβάλλον παρέχει το πλεόνασμα πληροφοριών που απαιτείται προκειμένου να ξεκινήσει η μεταφορά από τη βραχυπρόθεσμη στη μακροπρόθεσμη μνήμη. Σε ένα γνωστικό σύστημα, η προαναφερθείσα μεταφορά διευκολύνεται από τα «διαστήματα λήθαργου», κατά τη διάρκεια των οποίων τα περιεχόμενα της μακροπρόθεσμης μνήμης που συγκεντρώθηκαν μετά το προηγούμενο «διάστημα λήθαργου» αναλύονται τόσο εσωτερικά όσο και σε συνάρτηση με την τρέχουσα μακροπρόθεσμη μνήμη.

Ο συγκεκριασμός του τρέχοντος ερεθίσματος με την αποθηκευμένη εμπειρία μπορεί να επιτευχθεί μέσω αναγνώρισης ερεθίσματος ή συνδυασμού ερεθισμάτων. Η φάση του προσανατολισμού είναι η πρώτη φάση στην οποία πραγματοποιείται συλλογή πληροφοριών.

Αναγνώριση ερεθισμάτων. Η αναγνώριση ερεθισμάτων λαμβάνει χώρα όταν υπάρχει ακριβής ταύτιση μεταξύ του τρέχοντος ερεθίσματος και της προγενέστερης εμπειρίας. Τυπικά, η απάντηση σε ένα δεδομένο ερέθισμα είναι απλά η επανάληψη του στο επόμενο στάδιο της διαδικασίας εξαγωγής συμπερασμάτων με στόχο την ενσωμάτωσή του. Αν, όμως, το σύστημα έχει εκπαιδευτεί έτσι, ώστε να απαντά σε μια κατάσταση του περιβάλλοντος, σε μια τοποθεσία κτλ., τότε μπορεί να αντιδράσει άμεσα ή να σχεδιάζει μια ενέργεια ως απάντηση στο ανιχνευθέν ερέθισμα. Αν αυτή η αντίδραση αποδειχθεί εσφαλμένη, τότε μπορεί να εκπαιδευτεί να αγνοεί το δοθέν ερέθισμα, δεδομένου ενός ευρύτερου πλαισίου χρήσης που περιλαμβάνει όλα τα ερεθίσματα και τις αντίστοιχες εσωτερικές καταστάσεις, συμπεριλαμβανομένου του χρόνου.

Ορισμένες φορές, η φάση προσανατολισμού προκαλεί την άμεση πραγματοποίηση μιας ενέργειας ως μια διορθωτική συμπεριφορά τύπου «ερέθισμα-απάντηση». Παραδείγματος χάριν, μια διακοπή της τροφοδοσίας μπορεί να προκαλέσει απευθείας μια ενέργεια προστασίας των δεδομένων (η απευθείας διαδρομή στη φάση δράσης που εικονίζεται στο σχήμα). Μια μη αναστρέψιμη απώλεια σήματος σε ένα δίκτυο μπορεί να εκκινήσει τη διαδικασία επανάθεσης των πόρων, με αναζήτηση, για

παράδειγμα, εναλλακτικών διαύλων. Η διαδικασία αυτή μπορεί να επιτευχθεί μέσω της διαδρομής με την ετικέτα «Επείγον» στο σχήμα.

Συνδυασμός ερεθισμάτων. Ο συνδυασμός ερεθισμάτων λαμβάνει χώρα όταν υπάρχει σχεδόν ταύτιση ανάμεσα στο τρέχον ερέθισμα και την προγενέστερη εμπειρία και εφαρμόζονται πολύ γενικά κριτήρια εφαρμογής αυτής της εμπειρίας στο τρέχον ερέθισμα. Ένα τέτοιο κριτήριο είναι ο αριθμός των μη ταυτώσεων χαρακτηριστικών του τρέχοντος ερεθίσματος. Αν ένα μόνο χαρακτηριστικό δεν είναι ταυτόσημο και το ερέθισμα ανήκει σε υψηλό επίπεδο, τότε ο συνδυασμός είναι το πρώτο βήμα μιας διαδικασίας παραγωγής σχεδίου με στόχο παρόμοια συμπεριφορά σε μια κατάσταση παρόμοια με αυτήν που συνέβη το ερέθισμα. Εκτός από τον αριθμό των χαρακτηριστικών που ταυτίζονται απόλυτα, κάτι που μοιάζει με κώδικα Hamming [39], και η «βασισμένη σε στιγμιότυπα» μάθηση (Instance-Based Learning) υποστηρίζει μη απόλυτη ταύτιση και συνδυασμό. Καλύτερος συνδυασμός προσδίδει μεγαλύτερη βαρύτητα στην αυτόνομη μάθηση, ενώ λιγότερο αποτελεσματικός συνδυασμός προσδίδει μικρότερη βαρύτητα στο αρχικό σχέδιο.

Σχεδιασμός. Ένα εισερχόμενο μήνυμα δικτύου συνήθως αντιμετωπίζεται με την παραγωγή κατάλληλου σχεδίου (η «κανονική» διαδρομή στη φάση δράσης). Σε ισχυρά γνωστικά συστήματα, που απαντώνται στη βιομηχανία και στους ερευνητικούς κόλπους, στα εργαλεία σχεδίασης ενσωματώνονται, επίσης, τυπικά μοντέλα αιτιακής σχέσης. Η φάση σχεδιασμού πρέπει να περιλαμβάνει, ακόμα, μια συλλογιστική διαδικασία επί του χρόνου. Συνήθως, οι απαντήσεις αντίδρασης (reactive responses) είναι προγραμματισμένες εκ των προτέρων ή ορίζονται από το διαχειριστή του δικτύου, ενώ άλλες συμπεριφορές μπορεί, επίσης, να σχεδιαστούν. Ένα ερέθισμα είναι δυνατό να σχετίζεται με ένα απλό σχέδιο, ως συνάρτηση παραμέτρων σχεδίασης σε ένα απλό σύστημα. Εργαλεία σχεδίασης «ανοιχτού λογισμικού» επιτρέπουν την ενσωμάτωση αυτών των υποσυστημάτων σε ένα γνωστικό σύστημα, ενισχύοντας τη συνιστώσα σχεδιασμού του. Τέτοιου τύπου εργαλεία επιτρέπουν τη σύνθεση συμπεριφορών πρόσβασης σε πληροφορίες ή φάσμα συχνοτήτων, με τρόπο προσανατολισμένο στον τελικό στόχο, βάσει ερεθισμάτων από το περιβάλλον, καθώς, επίσης, βάσει κανόνων και πρότερης μάθησης των προτιμήσεων του χρήστη.

Απόφαση. Η φάση απόφασης επιλέγει τη βέλτιστη διάρθρωση, ανάμεσα στις υποψήφιες διαρθρώσεις. Η διαδικασία αυτή μπορεί να είναι από πολύ απλή έως ιδιαίτερα σύνθετη, ανάλογα με το βαθμό προσαρμοστικότητας και βελτιστοποίησης που επιθυμεί το δίκτυο να επιτύχει. Παράμετροι εισόδου αυτής της φάσης μπορεί να είναι, πέρα από τις εξόδους των προηγούμενων φάσεων, οι προτιμήσεις του χρήστη, η τρέχουσα κίνηση, οι επιλογές του διαχειριστή, οι ρυθμιστικοί κανόνες κτλ.

Δράση. Η διαδικασία δράσης εκκινεί τις διαδικασίες εφαρμογής της ειλημμένης απόφασης, ενεργοποιώντας τις αντίστοιχες συνιστώσες λογισμικού. Οι συνιστώσες αυτές μπορεί να επηρεάσουν είτε το εξωτερικό περιβάλλον είτε τις εσωτερικές καταστάσεις του συστήματος. Η επίδραση στο εξωτερικό περιβάλλον αφορά, κυρίως, την εκπομπή μηνυμάτων στο τοπικό περιβάλλον, σε άλλα δίκτυα και συστήματα, χρησιμοποιώντας γλώσσα RXML (Radio Extensible Markup Language) [40], ή κάποιο άλλο πρότυπο ανταλλαγής πληροφορίας.

Επίδραση σε εσωτερικές καταστάσεις. Οι ενέργειες επί εσωτερικών καταστάσεων περιλαμβάνουν, κυρίως, αυτοματοποιημένο έλεγχο πόρων, όπως, για παράδειγμα, το φάσμα συχνοτήτων. Σε αυτήν την κατηγορία, ανήκει και το σύνολο των ενεργειών που είναι απαραίτητες προκειμένου να ενεργοποιηθεί μια νέα διάρθρωση. Το γνωστικό σύστημα μπορεί, επίσης, να επηρεάσει τα περιεχόμενα ενός ήδη υπάρχοντος γνωστικού μοντέλου, προσθέτοντας, για παράδειγμα, μια νέα κατάσταση.

Μάθηση. Η φάση μάθησης είναι μια συνάρτηση αντίληψης, παρατηρήσεων, αποφάσεων και ενεργειών. Η αρχική μάθηση επιτυγχάνεται μέσω της φάσης παρατήρησης, στην οποία κάθε εισερχόμενο ερέθισμα συγκρίνεται με τα ήδη υπάρχοντα, με στόχο την απόκτηση εμπειρίας. Μάθηση, επίσης, επιτυγχάνεται μέσω της εισαγωγής νέων μοντέλων στα τρέχοντα μοντέλα και τις τεχνικές συνδυασμού. Καθεμία από τις προαναφερθείσες φάσεις του γνωστικού κύκλου προσφέρει πολλαπλές ευκαιρίες για εφαρμογή τεχνικών μηχανικής μάθησης (machine learning). Μια κατάλληλη ακολουθία λειτουργιών μάθησης παρουσιάζεται στο επόμενο τμήμα.

1. Ανάλυση του «χώρου προβλήματος» (problem space), η οποία περιλαμβάνει:
 - a. την αναγνώριση του «χώρου προβλήματος», ως υποσύνολο του «χώρου χρηστών», του χρόνου και του ραδιοπεριβάλλοντος

- b. την αυτόνομη αντίχνευση των αντικειμένων ενδιαφέροντος του «χώρου προβλήματος», με στόχο την αντιστοίχιση εσωτερικών δομών με εξωτερικά πρωτόκολλα και οντότητες
2. Προσαρμογή του αλγορίθμου μάθησης στο συγκεκριμένο πρόβλημα.
3. Ενέργειες για απόκτηση γνώσης μέσω εμπειρίας. Αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν:
 - a. αρχική εκπαίδευση, ακολουθούμενη από χρήση
 - b. μάθηση σε πραγματικό χρόνο για την απόκτηση επιπλέον γνώσης
 - c. πληροφορίες ανάδρασης, θετικές ή αρνητικές από το περιβάλλον
4. Ενθυλάκωση των δεδομένων, γνώσης και διαδικασιών, σε κατάλληλες εσωτερικές δομές.
5. Επιθεώρηση και ενίσχυση των εσωτερικών δομών σε πραγματικό χρόνο, όπως έλεγχος εγκυρότητας και εφαρμογή περιορισμών.
6. Επεξεργασία της συγκεντρωθείσας γνώσης σε μη πραγματικό χρόνο με στόχο την αξιοποίησή της σε μελλοντικές καταστάσεις.

Ανασκόπηση. Καθώς η συγκέντρωση γνώσης μέσω τεχνικών μηχανικής μάθησης μπορεί να είναι υπολογιστικά απαιτητική, τα γνωστικά δίκτυα μπορεί να έχουν, όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα, «διαστήματα λήθαργου» και «διαστήματα προσευχής», που διευκολύνουν την εφαρμογή τέτοιων τεχνικών. Ένα διάστημα λήθαργου είναι ένα σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα (παραδείγματος χάριν, από μερικά λεπτά έως μερικές ώρες), κατά τη διάρκεια του οποίου το σύστημα δεν είναι σε χρήση αλλά διαθέτει αρκετή επεξεργαστική ισχύ. Σε αυτό το διάστημα, λοιπόν, το σύστημα μπορεί να εφαρμόσει τεχνικές μάθησης χωρίς να είναι ανάγκη να αποσπάται από την εξυπηρέτηση των χρηστών. Μέσω των τεχνικών μηχανικής μάθησης, συσσωρεύεται γνώση, με το συνδυασμό στατιστικών παραμέτρων. Το διάστημα λήθαργου μπορεί να είναι λιγότερο ανθρωπομορφικό, χρησιμοποιώντας γενετικούς αλγορίθμους προς εξερεύνηση των διαθέσιμων λύσεων, με απώτερο στόχο την βελτίωση των παραμέτρων απόφασης μέσω της πρόσφατης εμπειρίας. Όσα θέματα μάθησης δεν καθίσταται δυνατόν να επιλυθούν κατά τη διάρκεια των διαστημάτων λήθαργου, τίθενται υπόψη του χρήστη, του παρόχου δικτύου ή του διαχειριστή κατά τη διάρκεια ενός διαστήματος προσευχής, εφόσον, βέβαια, αυτό υπάρχει.

Διάρκεια γνωστικού κύκλου. Καθεμία από τις προαναφερθείσες φάσεις του κύκλου πρέπει να διαθέτει υπολογιστικές διαδικασίες, ο χρόνος εκτέλεσης των οποίων μπορεί να καθοριστεί εκ των προτέρων. Επιπρόσθετα, κάθε φάση πρέπει να περιορίζει τους υπολογισμούς, έτσι ώστε να μην υπερβαίνει το προκαθορισμένο ανώτατο όριο ανατιθέμενων πόρων. Συνεπώς, μια αρχιτεκτονική γνωστικών δικτύων έχει συγκεκριμένους περιορισμούς και απαιτήσεις, προκειμένου να αποκτήσει ένα συγκεκριμένο βαθμό σταθερότητας συμπεριφοράς ως ένα αυτόνομο και αυτο-τροποποιούμενο σύστημα.

Σε ορισμένες μεθόδους συλλογιστικής, όμως, είναι αδύνατη η εκ των προτέρων γνώση του χρόνου εκτέλεσης των επιμέρους διεργασιών. Ενδεχομένως να υπάρχουν βρόχοι υπολογισμού που επιμηκύνουν ακόμα περισσότερο τον χρόνο εκτέλεσης. Ακόμα και με ανίχνευση βρόχων, ο χρόνος αποτίμησης μιας έκφρασης μπορεί να προσδιοριστεί μόνο προσεγγιστικά ως εκθετική έκφραση ορισμένων παραμέτρων, όπως είναι ο αριθμός των δηλώσεων στη βάση δεδομένων κτλ.

Γι' αυτό το λόγο, απαγορεύεται η χρήση απεριόριστων βρόχων επαναλήψεων. Στη θέση αυτών, χρησιμοποιούνται περιορισμένες επαναλήψεις, ο χρόνος εκτέλεσης των οποίων υπολογίζεται ανεξάρτητα από τους επιμέρους υπολογισμούς του βρόχου. Ο υπολογισμός αυτός καθίσταται εφικτός μέσω των μεταγλωττιστών επόμενης γενιάς. Σήμερα, αυτο-τροποποιούμενα τμήματα λογισμικού με αυτο-αναφορές δε χρησιμοποιούνται ευρέως. Η αυτο-ρυθμιστική φύση των γνωστικών δικτύων, όμως, ίσως ανοίξει το δρόμο για την ανάπτυξη και ευρεία διάδοση τέτοιων εργαλείων.

Τέλος, ο ίδιος ο γνωστικός κύκλος δεν μπορεί να περιέχει εσωτερικούς βρόχους. Κάθε εκτέλεση του κύκλου, πρέπει, τυπικά, να ακολουθήσει όλες τις φάσεις και να διαρκέσει ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. Καθώς οι υπολογιστικές πλατφόρμες των γνωστικών δικτύων συνεχίζουν να αναπτύσσονται, το υπολογιστικό φορτίο του γνωστικού κύκλου θα αυξάνεται επίσης. Σε καμία περίπτωση, όμως, δε θα επιτραπεί η εισαγωγή βρόχων που θα επιμηκύνουν τη διάρκεια του κύκλου πέρα από το προκαθορισμένο όριο.

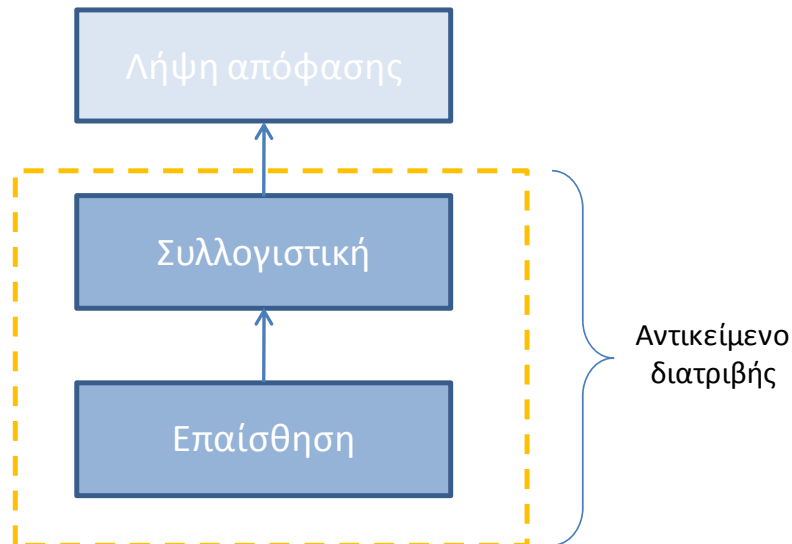
1.5 Αντικείμενο της διατριβής

1.5.1 Γνωστικό μοντέλο αναφοράς

Με βάση τον ορισθέντα κατά Mitola γνωστικό κύκλο (Ενότητα 1.4.4.8, Σχήμα 1-11), μπορεί να καθοριστεί ένα περισσότερο απλοποιημένο γνωστικό μοντέλο, το οποίο θα περιλαμβάνει τις παρακάτω τρεις θεμελιώδεις και στενά συνδεδεμένες λειτουργίες, όπως εικονίζεται στο Σχήμα 1-12:

- *Λειτουργία επαίσθησης (Sensing)*: Ένα γνωστικό σύστημα οφείλει να παρακολουθεί και να αισθάνεται το περιβάλλον του, ώστε να καθιστά δυνατή την αντίδραση και προσαρμογή σε αυτό. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, η λειτουργία αυτή επικεντρώνεται στην ανάλυση του ραδιοπεριβάλλοντος μιας κυψέλης, ειδικά δε, στη διαδικασία λήψης και συλλογής μετρήσεων που αντανακλούν τις συνθήκες και τα επίπεδα θορύβου και παρεμβολών εντός των αξιοποιήσιμων ζωνών συχνότητας.
- *Λειτουργία συλλογιστικής (Reasoning)*: Ένα γνωστικό σύστημα οφείλει, επίσης, να επεξεργάζεται καθώς και να «στοχάζεται» επί των πρωτογενών δεδομένων που συλλέγονται μέσω της διαδικασίας της επαίσθησης. Στο επίκεντρο της έρευνας της παρούσας διατριβής βρίσκεται η ανακάλυψη των δυνατοτήτων των υποψήφιων εναλλακτικών διαρθρώσεων, δηλαδή των δυνητικών επιδόσεών τους ως προς συγκεκριμένα κριτήρια, σε περίπτωση εφαρμογής τους. Τέτοιου είδους κριτήρια είναι η χωρητικότητα μετάδοσης και η ακτίνα κάλυψης που μπορούν να επιτευχθούν. Μια αξιόπιστη λειτουργία συλλογιστικής θα πρέπει να είναι σε θέση να ερμηνεύει «σωστά» τα συλλεγόμενα κατά καιρούς δεδομένα, απαλείφοντας τυχούσες στιγμιαίες και τυχαίες διακυμάνσεις που δεν αντικατοπτρίζουν τις πραγματικές συνθήκες του ραδιοπεριβάλλοντος.
- *Λειτουργία λήψης απόφασης (Decision making)*: Η λειτουργία αυτή βασίζεται στα αποτελέσματα της συλλογιστικής διαδικασίας που προηγείται και σε συνδυασμό με τις τρέχουσες ανάγκες και απαιτήσεις του δικτύου καταλήγει σε μια απόφαση σχετικά με τη διάρθρωση που πρέπει να επιλεγεί. Οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαδικασία λήψης αυτής της απόφασης είναι οι εκτιμήσεις για τις δυνατότητες των διαρθρώσεων, η χωρική

κατανομή των τερματικών, ο βαθμός κινητικότητάς τους, το φορτίο κίνησης, το είδος των αιτούμενων υπηρεσιών, το κόστος αναδιάρθρωσης και οι πολιτικές των παρόχων.



Σχήμα 1-12. Γνωστικό μοντέλο αναφοράς

Η παρούσα διατριβή εστιάζεται στις δυο πρώτες λειτουργικές φάσεις του γνωστικού μοντέλου του παραπάνω σχήματος, δηλαδή στις φάσεις επαίσθησης και συλλογιστικής.

Συγκεκριμένα, στη φάση της επαίσθησης, η παρούσα διατριβή

- Προτείνει τη χρήση των κινητών τερματικών ως ένα εκτεταμένο δίκτυο αισθητήρων, που πραγματοποιεί μετρήσεις επαίσθησης.
- Προτείνει μια λειτουργική αρχιτεκτονική τόσο για την πλευρά του γνωστικού δικτύου όσο και για την πλευρά του γνωστικού τερματικού. Ορίζει το ρόλο κάθε λειτουργικής μονάδας καθώς και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των επιμέρους μονάδων.
- Ορίζει κατάλληλο πρωτόκολλο για την επικοινωνία μεταξύ γνωστικού σταθμού βάσης και γνωστικού τερματικού.
- Αξιοποιεί τα συγκριτικά πλεονεκτήματα κάθε μέτρου ποιότητας καναλιού για τους σκοπούς της επαίσθησης.

Στη φάση της συλλογιστικής, η παρούσα διατριβή

- Συνάγει τις δυνατότητες μιας πιθανής διάρθρωσης βάσει των συλλεχθέντων δεδομένων της διαδικασίας επαίσθησης.
- Κάνει χρήση κατάλληλων τεχνικών μηχανικής μάθησης με στόχο το συγκερασμό της παρελθούσας εμπειρίας με πρόσφατα δεδομένα επαίσθησης προκειμένου να επιτευχθεί μια βελτιωμένη εκτίμηση των δυνατοτήτων των υποψήφιων διαρθρώσεων.
- Εισάγει τη χρήση πιθανοτικών μοντέλων για την αξιόπιστη εκτίμηση των δυνατοτήτων των υποψήφιων διαρθρώσεων και την αντιμετώπιση της στοχαστικής φύσης των χαρακτηριστικών του ραδιοπεριβάλλοντος.
- Συγκρίνει τα αποτελέσματα των επιμέρους τεχνικών μάθησης και εξάγει χρήσιμα συμπεράσματα.

1.6 Σχετικές εργασίες

Το ενδιαφέρον της παγκόσμιας κοινότητας για τα γνωστικά δίκτυα αντικατοπτρίζεται στο μεγάλο πλήθος προγραμμάτων, συχνά επιχορηγούμενων από διεθνείς οργανισμούς, με στόχο τη μελέτη και την περαιτέρω ανάπτυξη τους. Παρόλα αυτά, οι εργασίες που έχουν πραγματοποιηθεί στα πεδία της επαίσθησης και της συλλογιστικής, που αποτελούν τον πυρήνα της παρούσας διατριβής, παραμένουν ακόμα σε πρώιμο στάδιο. Στις παραγράφους που ακολουθούν, παρουσιάζονται και αναλύονται οι σχετικές ερευνητικές προσπάθειες που έχουν διεκπεραιωθεί ή βρίσκονται σε εξέλιξη.

Το ευρωπαϊκό πρόγραμμα SPORT VIEWS (Spectrum Policies and Radio Technologies Viable In Emerging Wireless Societies) μελετά, κυρίως, τα αποτελέσματα τεσσάρων ευρωπαϊκών προγραμμάτων στον τομέα της δυναμικής χρήσης φάσματος. Συγκεκριμένα, τα προγράμματα που εξετάζονται είναι τα E²R, WINNER, ORACLE και PULSERS. Οι κύριοι στόχοι των προαναφερθέντων προγραμμάτων, πλην του τελευταίου, που ασχολείται με υπερευρυζωνικά συστήματα και είναι εκτός πεδίου άμεσου ενδιαφέροντος, παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Το E²R (End-to-End Reconfigurability) [41] ήταν ένα πρόγραμμα επιδοτούμενο από την Ευρωπαϊκή Ένωση που στόχευσε στην εκμετάλλευση των διαφορετικών

τεχνολογιών, προς όφελος της κινητής και ασύρματης βιομηχανίας. Το κύριο αντικείμενό του ήταν η ανάπτυξη και ο δοκιμαστικός έλεγχος μιας αρχιτεκτονικής αναδιαρθρώσιμων συσκευών, με στόχο την παροχή περισσότερων επιλογών στους χρήστες και στους παρόχους δικτύων και υπηρεσιών. Ένα από τα 6 κύρια επιστημονικά πεδία του επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη μεθόδων δυναμικής ανάθεσης φάσματος. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν η τεχνολογία διαρθρώσεων, τα γνωστικά δίκτυα, ο ευέλικτος σχεδιασμός δικτύου, καθώς και μέθοδοι πιο αποτελεσματικής χρήσης του φάσματος. Το πρόγραμμα αυτό συνεχίστηκε σε δεύτερη και τρίτη φάση ως E²R2 [42] και E3 [43], αντίστοιχα. Το E²R και οι συνέχειες του στόχευαν στον προσδιορισμό μιας αρχιτεκτονικής που θα ήταν σε θέση να υποστηρίξει γνωστικά δίκτυα. Ωστόσο, το αποτέλεσμα αυτής της προσπάθειας, όπως αυτό αντανακλάται μέσα από τις μέχρι τώρα δημοσιευμένες εργασίες [44]-[45], περιορίζεται, σε πολλές περιπτώσεις, σε μια γενική περιγραφή οντοτήτων και αρχών λειτουργίας και όχι σε έναν ενδελεχή ορισμό των αλγορίθμων υλοποίησης των εν λόγω λειτουργιών. Επιπλέον, στην επίδειξη των αποτελεσμάτων του προγράμματος, έμφαση δίδεται στα ανώτερα επίπεδα της OSI ιεραρχίας, π.χ. «αναδιάρθρωση» μεγέθους TCP παραθύρου και «αναδιάρθρωση» υλοποίησης FTP πρωτοκόλλου. Επιπρόσθετα, μέχρι στιγμής, οι αποφάσεις αναδιάρθρωσης λαμβάνονται μέσω κανόνων και πολιτικών που ορίζονται από το διαχειριστή του δικτύου και δεν αξιοποιείται πρότερη εμπειρία του συστήματος.

Το WINNER (Wireless World Initiative New Radio) είναι μια σύμπραξη περισσότερων των 40 οργανισμών [48]-[50] που δουλεύουν από κοινού με στόχο να καταστήσουν τα κινητά συστήματα επικοινωνιών περισσότερο προσαρμόσιμα στις ανάγκες των χρηστών. Αν και παραλείπει να χρησιμοποιήσει τον όρο γνωστικά συστήματα, ένας από τους πρωταρχικούς στόχους του προγράμματος είναι η ανάπτυξη μεθόδων για αποτελεσματική και ευέλικτη χρήση του φάσματος, καθώς, επίσης, και για διαμοιρασμό αυτού. Το πρόγραμμα επικεντρώνεται στο διαμοιρασμό φάσματος σε συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων και συγκεκριμένα, σε αυτές που χρησιμοποιούνται από τα δορυφορικά συστήματα επικοινωνιών, π.χ. περιοχή των 4GHz, δηλαδή στην ταυτόχρονη αξιοποίηση των συχνοτήτων αυτών τόσο από τους αδειοδοτημένους χρήστες όσο και από τα WINNER τερματικά.

Το ευρωπαϊκό πρόγραμμα ORACLE (Opportunistic Radio Communications in Unlicensed Environments) [47], χρηματοδοτούμενο από το 6^ο Κοινοτικό Πλαίσιο Έρευνας και Τεχνολογίας, είχε ως στόχο τη διερεύνηση, ανάπτυξη και επικύρωση

μεθόδων και ιδεών για γνωστικά δίκτυα και τερματικά. Σκοπός του ήταν, επίσης, η ανάδειξη των κοινωνικο-οικονομικών πλεονεκτημάτων της ευκαιριακής χρήσης φάσματος. Σύμφωνα με τους υπεύθυνους του προγράμματος, έγινε προσπάθεια για διερεύνηση των τεχνικών επαίσθησης, προκειμένου να ανακτηθούν πληροφορίες περιβάλλοντος, ορίστηκαν διαδικασίες λήψης αποφάσεων που επιτρέπουν την επιλογή κυματομορφών με βάση το διαθέσιμο φάσμα, σχεδιάστηκαν πρωτόκολλα και αλγόριθμοι για την ευκαιριακή εκμετάλλευση του αδιάθετου, στο χώρο, φάσματος και, τέλος, προτυποποιήθηκε μια πλατφόρμα υλικού με γνωστικά χαρακτηριστικά. Παρόλα αυτά, οι τεχνικές επαίσθησης που μελετήθηκαν δεν ενισχύθηκαν περαιτέρω, έτσι ώστε να καταστούν ανθεκτικές σε σφάλματα μέτρησης και σε τυχαίες, στοχαστικές και προσωρινές διακυμάνσεις των συνθηκών του ραδιοπεριβάλλοντος. Τέλος, σε μεγάλο βαθμό, το πρόγραμμα επικεντρώθηκε σε τεχνικές δυναμικής ανάθεσης φάσματος και όχι σε μια συνολική προσέγγιση αξιολόγησης και επιλογής μια υποψήφιας διάρθρωσης.

Το ευρωπαϊκό πρόγραμμα SURFACE (Self Configurable Air Interface) [51]-[53], χρηματοδοτούμενο από το 6^ο Κοινοτικό Πλαίσιο Έρευνας και Τεχνολογίας είχε στόχο τη μελέτη και την εκτίμηση μιας καινοτόμας, γενικευμένης ασύρματης διεπαφής, ικανής να προβαίνει σε αυτο-αναδιάρθρωση, προκειμένου να ικανοποιήσει καθολικές απαιτήσεις επιπέδου ποιότητας, βάσει γνώσης των συνθηκών του διαύλου και του φορτίου κίνησης. Το πρόγραμμα θεώρησε τεχνολογίες Πολλαπλής Εισόδου Πολλαπλής Εξόδου (Multiple Input Multiple Output – MIMO) και πρότεινε ένα γενικό πλαίσιο με στόχο την ανάπτυξη ενός φυσικού στρώματος ικανού να μεταβάλλει την τεχνολογία μετάδοσης, την τεχνική πολυπλεξίας και τη σύνθεση κυματομορφών. Δεν ασχολήθηκε, όμως, με τη διαδικασία της επαίσθησης σε εναλλακτικές ζώνες συχνότητων, ούτε με την εφαρμογή τεχνικών μάθησης για τη βελτίωση της διαδικασίας αναπροσαρμογής των παραμέτρων επικοινωνίας.

Σε παρόμοιο πνεύμα, κινήθηκε και το ευρωπαϊκό πρόγραμμα PHOENIX (Jointly optimising multimedia transmissions in IP based wireless networks) [54]-[56] στοχεύοντας στην ανάπτυξη ενός βελτιστοποιημένου απ' άκρο εις άκρο ασύρματου διαύλου επικοινωνίας. Η βελτιστοποίηση συνίσταται στη χρήση ευέλικτων μεθόδων κωδικοποίησης διαύλου και διαμόρφωσης σήματος.

Το αμερικανικό DARPA (Defence Advanced Research Projects Agency) στοχεύει σε αυτό που ονομάζει επόμενη γενιά (neXt Generation – XG) επικοινωνιών [46]. Στόχος του είναι η ανάπτυξη τεχνολογιών και μηχανισμών που θα επιτρέψουν τη

δυναμική ανακατανομή του φάσματος συχνοτήτων, με πρωταρχικό στόχο τη διευκόλυνση των αμερικανικών στρατιωτικών δυνάμεων ανά τον κόσμο. Το πρόγραμμα XG προσεγγίζει τη λεγόμενη «ευκαιριακή πρόσβαση φάσματος» με δύο τρόπους: i) με την ανάπτυξη τεχνολογιών που θα επιλύσουν τα προβλήματα της επαίσθησης περιβάλλοντος, ανακάλυψης των οπών φάσματος και εκμετάλλευσης αυτών, και ii) με την ανάπτυξη ενός πλαισίου διαχείρισης των γνωστικών δικτύων μέσω πολιτικών. Λόγω του στρατιωτικού προσανατολισμού του συγκεκριμένου προγράμματος, τα αποτελέσματα του δεν είναι διαθέσιμα στο ευρύ κοινό, η έμφαση του δε, έγκειται στην ασφάλεια και την αξιοπιστία μετάδοσης και όχι στη βελτίωση της εμπειρίας του κοινού χρήστη.

Πέραν των δραστηριοτήτων σε επίπεδο ερευνητικών προγραμμάτων, ειδική αναφορά πρέπει να γίνει και σε συγκεκριμένες εργασίες ανεξάρτητων ερευνητών. Στη σημερινή επιστημονική βιβλιογραφία, η λειτουργικότητα της μάθησης των γνωστικών δικτύων παραμένει υποτιμημένη. Ως εκ τούτου, η τρέχουσα τάση είναι η απόδοση μεγάλου βάρους των ερευνητικών προσπαθειών στα βασισμένα σε πολιτικές (policy-based) γνωστικά δίκτυα. Πρόκειται για δίκτυα των οποίων η λειτουργία καθοδηγείται από μια διαδικασία η οποία αντιστοιχεί τη τρέχουσα κατάσταση του περιβάλλοντος σε μια συγκεκριμένη πολιτική λειτουργίας [57]. Ένα παράδειγμα τέτοιου συστήματος είναι ο IEEE 802.11 ελεγκτής διαμόρφωσης, ο οποίος εναλλάσσει από διαμόρφωση 16-QAM σε QPSK και σε BPSK καθώς ο λόγος σήματος προς θόρυβο ελαττώνεται [57]-[58]. Τα βασισμένα σε μάθηση γνωστικά δίκτυα αποτελούν μια σχετικά ανεξερεύνητη επιστημονική περιοχή. Οι τρέχουσες ερευνητικές δραστηριότητες περιλαμβάνουν την εφαρμογή γενετικών αλγορίθμων [59], για την εξέλιξη ενός ραδιοδιαύλου αναπαριστάμενου σαν ένα χρωμόσωμα, με στόχο τη βελτιστοποίηση της απόδοσης [60]-[61]. Ειδικότερα, τα γονίδια του χρωμοσώματος αναπαριστούν τις προσαρμόσιμες παραμέτρους ενός συγκεκριμένου ραδιοδιαύλου και, μέσω της γενετικής εξέλιξης των χρωμοσωμάτων, ο γενετικός αλγόριθμος είναι σε θέση να εντοπίσει ένα σύνολο παραμέτρων που βελτιστοποιούν το ραδιοδιάυλο, για τις τρέχουσες ανάγκες του χρήστη.

Επιπρόσθετα αυτών των προσπαθειών, ο Clancy και οι συνεργάτες του [57] εξετάζουν τις θεμελιώδεις αρχές τόσο των προσεγγίσεων βασισμένων στη μάθηση όσο και των προσεγγίσεων βασισμένων σε πολιτικές και προτείνουν μια αρχιτεκτονική για την από κοινού χρησιμοποίησή τους. Το προκύπτον πλαίσιο εφαρμόζεται, εν συνεχεία, για την αντιμετώπιση δύο σημαντικών προβλημάτων των

γνωστικών δικτύων, αυτό της μεγιστοποίησης χωρητικότητας και αυτό της δυναμικής ανάθεσης φάσματος. Η παρούσα διατριβή προσφέρει μια σημαντική επέκταση στον τομέα των βασισμένων στη μάθηση γνωστικών δικτύων, καθώς εισάγει την ιδέα της αξιοποίησης των τεχνικών μάθησης στο επίπεδο της συλλογιστικής επί των δεδομένων επαίσθησης, δηλαδή σε στάδιο αρκετά προγενέστερο αυτού της διαδικασίας λήψης της τελικής απόφασης.

1.7 Διάρθρωση έκθεσης προόδου

Το υπόλοιπο της παρούσας έκθεσης προόδου οργανώνεται ως εξής:

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται οι διαδικασίες της συλλογής πρωτογενών δεδομένων στα πλαίσια της λειτουργικής φάσης της επαίσθησης. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η προτεινόμενη τοπολογία δικτύου καθώς και οι έννοιες της αναδιάρθρωσης και της αυτονομίας των γνωστικών σταθμών βάσης. Εξετάζονται κατάλληλα μέτρα ποιότητας καναλιού με έμφαση σε αυτά του λόγου σήματος προς θόρυβο και παρεμβολές και της θερμοκρασίας παρεμβολών. Επιπρόσθετα, συζητούνται οι απαιτήσεις υποστήριξης της λειτουργίας επαίσθησης και προτείνεται η αξιοποίηση των κινητών τερματικών ως ένα εκτεταμένο δίκτυο επαισθητικών οργάνων. Εν συνεχεία, παρουσιάζονται τα δύο βασικά σχήματα επαίσθησης και εξετάζονται κατάλληλα σχήματα ανάθεσης των απαιτούμενων πόρων. Κατόπιν, παρουσιάζεται η προτεινόμενη λειτουργική αρχιτεκτονική για τη λειτουργία επαίσθησης τόσο στην πλευρά του γνωστικού σταθμού βάσης όσο και στην πλευρά των αναδιαρθρώσιμων κινητών τερματικών. Προτείνεται κατάλληλο πρωτόκολλο επικοινωνίας των δύο πλευρών και ορίζεται η δομή των μηνυμάτων αίτησης επαίσθησης και αναφοράς επαίσθησης. Το κεφάλαιο κλείνει με την παρουσίαση της ροής πληροφορίας μεταξύ των εμπλεκόμενων μονάδων στη διαδικασία επαίσθησης τόσο σε κανάλι καθόδου όσο και σε κανάλι ανόδου καθώς και με συζήτηση περί ειδικών θεμάτων υλοποίησης.

Το τρίτο κεφάλαιο πραγματεύεται τη βασική συλλογιστική επί των πρωτογενών δεδομένων που συγκεντρώθηκαν μέσω της διαδικασίας επαίσθησης. Αρχικά επεξηγείται ο ρόλος της διαδικασίας της βασικής συλλογιστικής και παρουσιάζονται κατάλληλα μέτρα των προσδοκώμενων δυνατοτήτων των υποψηφίων διαρθρώσεων. Εν συνεχεία, διαχωρίζονται οι όροι της επιμέρους χωρητικότητας μετάδοσης και της

ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης και παρουσιάζεται εποπτικά η διαδικασία της βασικής συλλογιστικής στο σύνολο της. Κατόπιν, παρουσιάζονται διάφοροι μέθοδοι για την εκτίμηση της επιμέρους χωρητικότητας μετάδοσης και αναλύεται η διαδικασία υπολογισμού της αντίστοιχης ενεργού χωρητικότητας. Τέλος, παρουσιάζονται κατάλληλες μέθοδοι για την εκτίμηση της ενεργού ακτίνας κάλυψης.

Το τέταρτο κεφάλαιο έχει ως αντικείμενο την διαδικασία προηγμένης συλλογιστικής με στόχο την εξαγωγή αξιόπιστων εκτιμήσεων. Αρχικά, συζητείται η ανάγκη ύπαρξης σταδίου προηγμένης συλλογιστικής και αναλύεται ο διττός στόχος αυτού. Εν συνεχεία, προτείνεται η εφαρμογή κατάλληλων τεχνικών μηχανικής μάθησης με στόχο την ενσωμάτωση γνώσης και εμπειρίας στο προτεινόμενο γνωστικό σύστημα. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τρεις τεχνικές μηχανικής μάθησης κατάλληλες για τη λειτουργία της προηγμένης συλλογιστικής; η μάθηση δέντρων αποφάσεων, η μάθηση τεχνητών νευρωνικών δικτύων και η μάθηση μπεϋζιανών δικτύων. Κατόπιν, παρουσιάζεται μια αρχική, γενική μοντελοποίηση του υπό εξέταση προβλήματος. Εν συνεχεία, παρουσιάζεται μια προσαρμοσμένη μοντελοποίηση του σύμφωνα με τις αρχές κάθε ξεχωριστής τεχνικής. Τέλος, αναλύονται οι παράμετροι μοντελοποίησης και παρουσιάζεται η αντίστοιχη πολυπλοκότητα του προβλήματος.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται με λεπτομέρεια η υλοποίηση κάθε προτεινόμενου μοντέλου μηχανικής μάθησης για την επίλυση του προβλήματος απόκτησης αξιόπιστων εκτιμήσεων των δυνατοτήτων μιας υποψήφιας διάρθρωσης. Η συμπεριφορά των προτεινόμενων μοντέλων εξετάζεται υπό το πρίσμα τριών επιλεγμένων σεναρίων. Η επιλογή των σεναρίων γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να διαφανεί η συμπεριφορά των μοντέλων όταν λαμβάνουν χώρα τόσο ραγδαίες, παροδικές μεταβολές της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης που προκύπτει από το στάδιο της βασικής συλλογιστικής όσο και μόνιμες μεταβολές στην εκτιμώμενη τιμή αυτής. Στόχος είναι η μελέτη της ταχύτητας σύγκλισης των μοντέλων σε μια νέα, μόνιμη κατάσταση καθώς και η δυνατότητα εξομάλυνσης μιας απότομης, μη αντιπροσωπευτικής καταγραφής της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης.

Το έκτο κεφάλαιο ανακεφαλαιώνει τους βασικούς άξονες της παρούσας διατριβής. Συζητούνται επίσης μελλοντικές κατευθύνση για τη συνέχιση και επέκταση της παρούσας εργασίας.

1.8 Παραπομπές

- [1] M. Mouly and M.-B. Pautet, *The GSM system for mobile communications*, Telecom Publishing, 1992.
- [2] S. Redl, M. Weber, and M. Oliphant, *An introduction to GSM*, Artech House Publishers, 1995.
- [3] H. Granbohm, J. Wiklund, “GPRS – General packet radio service”, *Ericsson Review*, vol. 6, no. 1, 1999.
- [4] R. Kalden, I. Meirick, and M. Meyer, “Wireless Internet access based on GPRS”, *IEEE Personal Communications*, vol. 7, no. 2, April 2000.
- [5] “Third generation mobile systems in Europe”, Special issue in *IEEE Personal Communications*, vol. 5, no. 2, April 1998.
- [6] “Wideband CDMA”, Feature topic in *IEEE Communications Magazine*, vol. 36, no. 9, Sept. 1998.
- [7] “High Speed Downlink Packet Access”, TS 25.308, v. 8.2.0, 3GPP, May 2008.
- [8] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 802 LAN/MAN Standards Committee Web site, <http://www.ieee802.org>, 2005.
- [9] Digital Video Broadcasting Web site, <http://www.dvb.org>, June 2005.
- [10] K. Demestichas, E. Adamopoulou, J. Markoulidakis, and M. Theologou, “Towards Anonymous Mobile Community services”, *Journal of Network and Computer Applications*, available online: doi:10.1016/j.jnca.2008.04.002.
- [11] IST project DAIDALOS (Designing Advanced Network Interfaces for the Delivery and Administration of Location Independent, Optimized Personal Services), <http://www.ist-daidalos.org>.
- [12] IST project AN (Ambient Networks), <http://www.ambient-networks.org>.
- [13] “Wireless Cooperative Networks”, Special issue in *EURASIP Journal on Advances in Signal processing*, May 2008.
- [14] K. Demestichas, A. Koutsorodi, E. Adamopoulou, and M. Theologou, “Modelling user preferences and configuring services in B3G devices”, *Wireless Networks*, vol. 14, no. 5, pp. 699-713, Oct. 2008.
- [15] A. Koutsorodi, E. Adamopoulou, K. Demestichas, and M. Theologou, “Service configuration and user profiling in 4G terminals”, *Wireless Personal Communications*, vol. 43, no. 4, pp. 1303-1321, Dec. 2007.

- [16] O. Ormond, G. Miro-Muntean, and J. Murphy, "Evaluation of an Intelligent Utility-Based Strategy for Dynamic Wireless Network Selection", *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 4267, pp. 158-170, Oct. 2006.
- [17] J. Mitola, "Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio", Doctor of Technology, Royal Inst. Technol. (KTH), Stockholm, Sweden, 2000.
- [18] S. Haykin, "Cognitive radio: brain-empowered wireless communications", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 2, pp. 201-220, Feb. 2005.
- [19] C. Ramming, "Cognitive networks", *Proceedings of the DARPATech Symposium*, Anaheim, CA, USA, Mar. 2004.
- [20] M. Sifalakis, M. Mavrikis, and G. Maistros, "Adding reasoning and cognition to the Internet", *Proceedings of the 3rd Hellenic Conference on Artificial Intelligence*, Samos, Greece, May 2004.
- [21] D. Boscovic, "Cognitive networks", Motorola Technology Position Paper, 2005.
- [22] R. W. Thomas, L. A. DaSilva, and A. B. MacKenzie, "Cognitive networks", *Proceedings of the IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, Baltimore, MD, USA, Nov. 2005.
- [23] "Cognitive Radio Technologies and Software Defined Radios", ET Docket No. 03-108, FCC 07-66, vol. 72, no. 108, pp. 31190-31192, June 2007.
- [24] "Software Defined Radio in the Land Mobile Service", ITU-R WP8A Working document towards a PDN Report, document 8A/228-E, Sept. 2005.
- [25] IEEE Standards Coordinating Committee 41 (Dynamic Spectrum Access Networks), <http://www.scc41.org/>.
- [26] "SDRF Cognitive Radio Definitions", Working Document SDRF-06-R-0011-V1.0.0, Nov. 2007.
- [27] F. Jondral, "Software-Defined Radio-Basics and Evolution to Cognitive radio", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 5, no. 3, pp. 275-283. Aug. 2005.
- [28] M. A. McHenry, "National Science Spectrum Occupancy Measurements Project Summary", Shared Spectrum Company report, Aug. 2005.
- [29] B. Fette (Ed.), *Cognitive radio technology*, Newnes, Aug. 2006.

- [30] “Topic: Driving forward the implementation of spectrum trading and liberalisation in Europe”, *Proceedings of the European Spectrum Management Conference 2006*, March 2006.
- [31] K.-J. Friederichs and E. Mohyeldin, “Cognitive Radio impacts on Spectrum Management - Liberalisation vs. Harmonisation”, *Proceeding of the Software Defined Radio (SDR) / Cognitive Radio (CR) Workshop*, Sophia Antipolis, Feb. 2007.
- [32] 1781 award – Publication under regulation 30 of the Wireless Telegraphy (Licence Award), Regulations 2006, OFCOM, 2006.
- [33] M. Necovee, “Dynamic spectrum access – concepts and future architectures”, *BT Technology Journal*, vol. 24, no. 2, pp. 111-116, Apr. 2006.
- [34] “Fixed Broadband Services operating in the frequency range 5725-5850 MHz”, OFCOM report, 2007.
- [35] “Spectrum Sharing in the 5 GHz Band DFS Best Practices”, Wi-Fi Alliance Spectrum & Regulatory Committee report, Oct. 2007.
- [36] W. Tuttlebee (Ed.), *Software Defined Radio-Enabling Technologies*, England: John Wiley & Sons, 2002.
- [37] T. Sturman, “An Evaluation of Software Defined Radio – An Overview”, QinetiQ, Defence and Technology Systems report, Mar. 2006.
- [38] J. Mitola, “Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications”, *Mobile Networks and Applications*, vol. 6, no. 5, pp. 435-441, Sept. 2001.
- [39] T. K. Moon, *Error Correction Coding*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- [40] J. Mitola, *Cognitive Radio Architecture: The Engineering Foundations of Radio XML*, John Wiley & Sons, Oct. 2006.
- [41] IST project E²R (End-to-End Reconfigurability), <http://e2r.motlabs.com/>.
- [42] IST project E²R2 (End-to-End Reconfigurability Phase II), <http://e2r2.motlabs.com/>.
- [43] IST project E3 (End-to-End Efficiency), <https://ict-e3.eu/>.
- [44] E. Patouni, N. Alonistioti, and P. Magdalinos, “A Framework for Protocol Reconfiguration”, *Proceedings of the 7th IFIP International Conference on Mobile and Wireless Communication Networks*, Marrakech, Morocco, Sept. 2005.

- [45] E. Patouni and N. Alonistioti,, “A Towards Self-Configuring Protocols for Reconfigurable Systems”, Proceedings of the 13th ICT Conference, Madeira, Portugal, May 2006.
- [46] Defence Advanced Research Projects Agency (DARPA) – next Generation project, <http://www.darpa.mil/sto/smallunitops/xg.html>.
- [47] IST project Oracle (Opportunistic Radio Communications in Unlicensed Environments), <http://www.ist-oracle.org/>.
- [48] IST project Winner (Wireless World Initiative New Radio), <http://www.ist-winner.org/>.
- [49] C. Lam, D. Falconer and F. Danilo-Lemoine, “Iterative Frequency Domain Channel Estimation for DFT-Precoded OFDM Systems Using In-Band Pilots”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 26, no. 2, Feb. 2008.
- [50] E. Tragos, A. Mihovska, E. Mino-Diaz, P. Karamolegkos, P. Vlacheas, and J. Luo, “Access selection and mobility management in a beyond 3G RAN: the winner approach”, *Proceedings of the 5th ACM international workshop on Mobility management and wireless access*, Chania, Greece, Oct. 2007.
- [51] IST project Surface (Self Configurable Air Interface), <http://www.ist-surface.org>.
- [52] L. Ordóñez, D. Palomar, A. Zamora, and J. Fonollosa, “High SNR Analytical Performance of Spatial Multiplexing MIMO Systems with CSI”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 55, no. 11, pp. 5447-5463, Nov. 2007.
- [53] Z. Lin, T. Sørensen, P. Mogensen, “Downlink SINR distribution of linearly precoded multiuser MIMO systems”, *IEEE Communications Letters*, vol. 11, no. 11, pp. 850-852, Nov. 2007.
- [54] IST project Phoenix (Jointly optimising multimedia transmissions in IP based wireless networks), <http://www.ist-phoenix.org>.
- [55] Project Phoenix - Deliverable D3.2c : Final Specification of transport and network layer protocols and mechanism, IP mobility module, and simulation results.
- [56] M. Martini, M. Mazzotti, C. Bergot, J. Huusko, and P. Amon, “Content adaptive network aware joint optimization of wireless video transmission”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, no.1, Jan. 2007.
- [57] T. Clancy, J. Hecker, E. Stuntebeck, and T. O’Shea, “Applications of machine learning to cognitive radio networks”, *IEEE Wireless Communications Magazine*, vol. 14, no. 4, pp. 47-52, Aug. 2007.

- [58] IEEE 802.11, “Working group on wireless local area networks”, <http://www.ieee802.org/11/>.
- [59] D. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison Wesley, 1989.
- [60] C. Rieser, “Biologically Inspired Cognitive Radio Engine Model Utilizing Distributed Genetic Algorithms for Secure and Robust Wireless Communications and Networking”, Ph.D. thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Aug. 2004.
- [61] T. Rondeau, C. Rieser, B. Le, and C. Bostian, “Cognitive radios with genetic algorithms: Intelligent control of software defined radios”, *SDR Forum Conference 2004*, Phoenix, pp. C-3 – C-8, 2004.

Κεφάλαιο 2
Συλλογή Πρωτογενών
Δεδομένων

2 Συλλογή Πρωτογενών Δεδομένων

2.1 Τοπολογία του υπό εξέταση γνωστικού δικτύου

2.1.1 Γνωστικός σταθμός βάσης

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, θεωρούμε μια τοπολογία δικτύου αποτελούμενη από γνωστικούς σταθμούς βάσης. Πρόκειται για ένα κυψελωτό σύστημα ασύρματων επικοινωνιών, όπως αυτό που εικονίζεται στο Σχήμα 2-1, κάθε σταθμός βάσης του οποίου είναι υπεύθυνος για την παροχή κάλυψης σε μια συγκεκριμένη περιοχή (service area). Κάθε γνωστικός σταθμός βάσης είναι εξοπλισμένος με έναν ή περισσότερους πομποδέκτες (transceivers). Οι πομποδέκτες που διαθέτει ένας γνωστικός σταθμός βάσης είναι αναδιαρθρώσιμοι (reconfigurable), μπορούν, δηλαδή, να μεταβάλλουν παραμέτρους λειτουργίας τους, κατ' εντολή του σταθμού βάσης στον οποίο ανήκουν, ώστε να επιτυγχάνουν τη βέλτιστη ποιότητα ραδιοπρόσβασης για τους χρήστες που εξυπηρετούν.

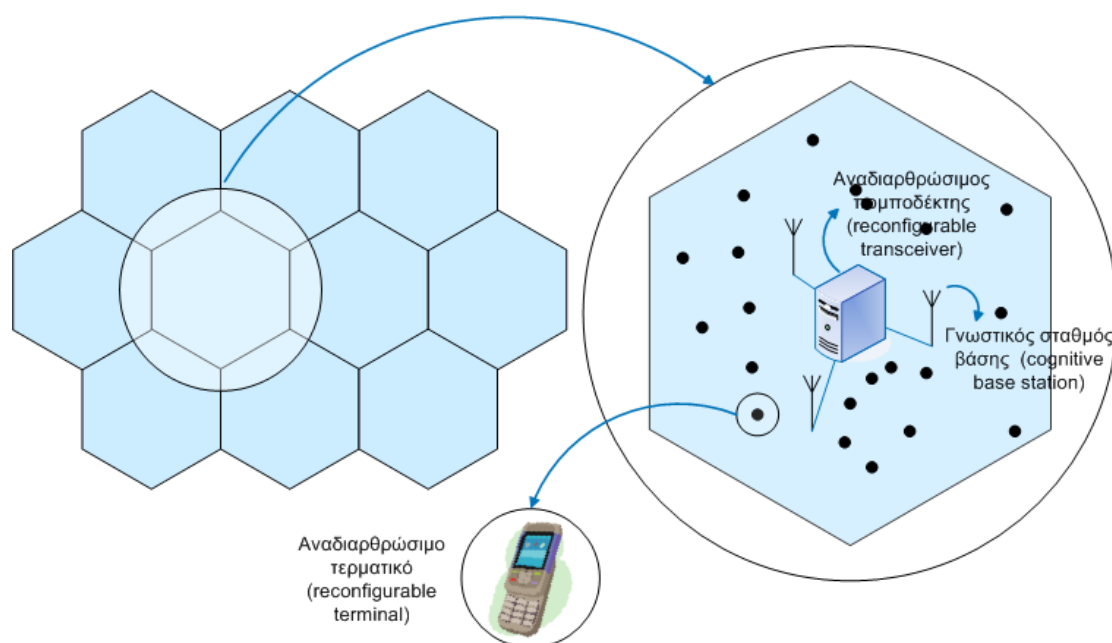
Όταν αναφερόμαστε στη διάρθρωση (configuration) ενός πομποδέκτη, εννοούμε ένα συνδυασμό παραμέτρων λειτουργίας που μπορεί να περιλαμβάνει τα εξής στοιχεία:

- φάσμα συχνοτήτων
- μέγιστη ισχύ εκπομπής
- σχήμα διαίρεσης αμφίδρομης επικοινωνίας
- σχήμα πολλαπλής πρόσβασης
- τύπο διαμόρφωσης
- τύπο κωδικοποίησης διαύλου
- τύπο κωδικοποίησης ελέγχου λαθών

Συνοπτικότερα, ο όρος διάρθρωση μάς παραπέμπει σε ένα συνδυασμό φάσματος συχνοτήτων και τύπου ραδιοδιεπαφής (ή, γενικότερα, τεχνολογίας ραδιοπρόσβασης) που μπορεί να υιοθετηθεί από τον πομποδέκτη. Η εύρεση του καταλληλότερου συνδυασμού για τις δύο αυτές παραμέτρους λειτουργίας αποτελεί και το αντικείμενο της διαδικασίας βελτιστοποίησης της λειτουργίας του πομποδέκτη. Η δε εύρεση του καταλληλότερου συνδυασμού διαρθρώσεων για το σύνολο των πομποδεκτών ενός

γνωστικού σταθμού βάσης αποτελεί το αντικείμενο της διαδικασίας βελτιστοποίησης της λειτουργίας του εν λόγω σταθμού βάσης.

Τα τερματικά που λειτουργούν εντός του γνωστικού δικτύου είναι και αυτά αναδιαρθρώσιμα, υπό την έννοια ότι διαθέτουν μία ή περισσότερες αναδιαρθρώσιμες δικτυακές διεπαφές (network interfaces). Οι διαρθρώσεις και αναδιαρθρώσεις των δικτυακών διεπαφών των τερματικών ακολουθούν αυτές των πομποδεκτών του γνωστικού σταθμού βάσης στον οποίο ανήκουν. Με άλλα λόγια, κάθε δικτυακή διεπαφή ενός τερματικού έχει διάρθρωση αντίστοιχη με εκείνη του πομποδέκτη του σταθμού βάσης στον οποίο είναι συνδεδεμένη. Τα τερματικά που είναι εξοπλισμένα με περισσότερες από μια δικτυακές διεπαφές θεωρείται ότι είναι πολυτροπικά (multi-modal), δηλαδή ότι οι διεπαφές τους μπορούν να είναι ταυτόχρονα ενεργές.



Σχήμα 2-1. Τοπολογία γνωστικού δικτύου

2.1.2 Αναδιάρθρωση γνωστικού σταθμού βάσης

Η αναδιάρθρωση συνίσταται στη διαδικασία τροποποίησης των διαρθρώσεων ενός ή περισσότερων εκ των πομποδεκτών ενός σταθμού βάσης, με στόχο την παροχή καλύτερης ποιότητας υπηρεσίας προς τους χρήστες της περιοχής κάλυψης. Σε ένα γνωστικό δίκτυο, οι αναδιαρθρώσεις των σταθμών βάσεων καθορίζονται από το λογισμικό (software defined), που σημαίνει ότι επιτυγχάνονται με την ενεργοποίηση

του κατάλληλου λογισμικού ελέγχου του πομποδέκτη, κατά τα πρότυπα των όσων αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 1.

Η διαδικασία λήψης μιας απόφασης αναδιάρθρωσης ενός σταθμού βάσης έχει ως στόχο την εύρεση της βέλτιστης κατανομής διαρθρώσεων, μέσα από ένα σύνολο δυνατών κατανομών, σύμφωνα με τα ακόλουθα κριτήρια βελτιστοποίησης:

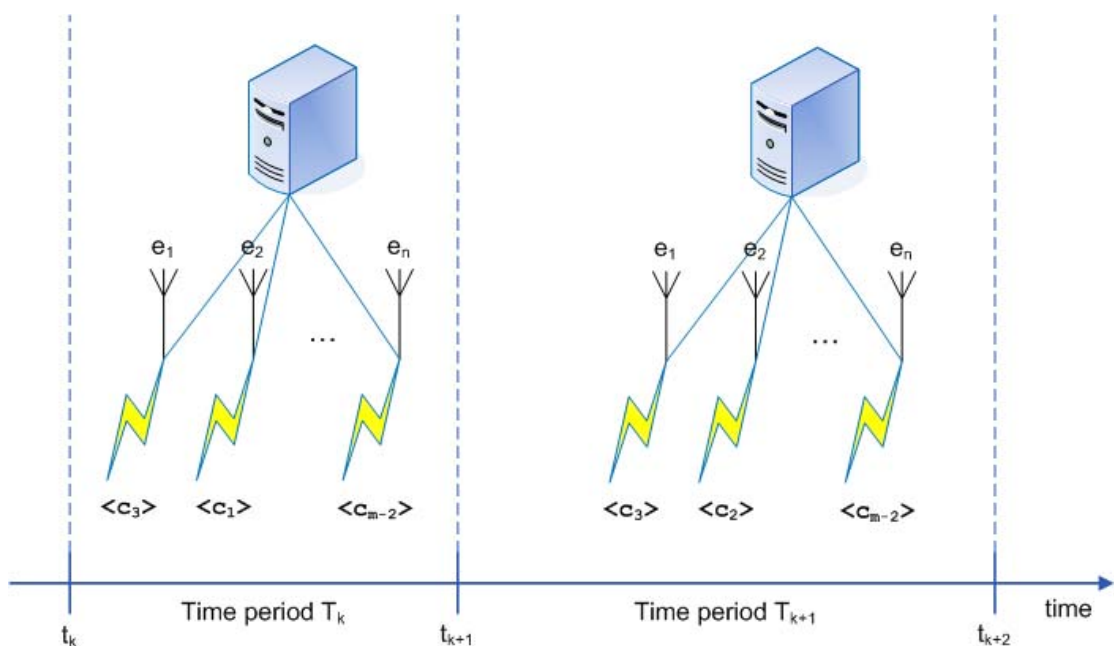
- χωρητικότητα μετάδοσης
- χωρητικότητα συστήματος
- εμβέλεια κάλυψης
- υποστήριξη κινητικότητας χρηστών
- ικανοποίηση (των αναγκών και των προσδοκιών) των χρηστών
- δημιουργία παρεμβολών σε γειτονικά συστήματα
- αξιοπιστία και σταθερότητα στην παροχή των υπηρεσιών
- ασφάλεια
- κόστος αναδιάρθρωσης

Το κόστος αναδιάρθρωσης μπορεί να σχετίζεται με διάφορους παράγοντες, όπως είναι:

- το κόστος ενοικίασης ενός φάσματος συχνοτήτων
- η άδεια που απαιτείται για τη χρήση συγκεκριμένων ζωνών συχνοτήτων
- το εύρος του χρονικού διαστήματος που απαιτείται για την εκπλήρωση της υπό εξέταση διαδικασίας αναδιάρθρωσης
- η τυχόν απαιτούμενη αύξηση της ισχύος εκπομπής των πομποδεκτών
- το οικονομικό όφελος που θα προκύψει από την παροχή υπηρεσιών αυξημένης ποιότητας στους χρήστες

Ως παράδειγμα κατανόησης της έννοιας μιας αναδιάρθρωσης, ας θεωρήσουμε ότι ένας γνωστικός σταθμός βάσης διαθέτει n πομποδέκτες, e_1, e_2, \dots, e_n , καθένας εκ των οποίων έχει τη δυνατότητα να λειτουργήσει υπό οποιαδήποτε από m διαρθρώσεις, c_1, c_2, \dots, c_m . Στα συνηθέστερα προβλήματα, ισχύει $m > n$, δηλαδή το πλήθος των δυνατών διαρθρώσεων είναι μεγαλύτερο από το πλήθος των πομποδεκτών ενός σταθμού βάσης. Έστω ότι, την παρούσα χρονική περίοδο (T_k), η βέλτιστη κατανομή διαρθρώσεων για το συγκεκριμένο σταθμό βάσης, βάσει των κριτηρίων που παρουσιάστηκαν παραπάνω, είναι η $C(T_k) = (c_3, c_1, \dots, c_{m-2})$, όπου το σύνολο $C(T_k)$ διαθέτει n ακριβώς στοιχεία, ένα για κάθε πομποδέκτη. Ωστόσο, οι ανάγκες και απαιτήσεις των χρηστών, καθώς και οι συνθήκες στο ραδιοπεριβάλλον του σταθμού

βάσης, μεταβάλλονται διαρκώς, κάτι που σημαίνει πως ενίοτε προκύπτει η ανάγκη αναδιάρθρωσεων. Ως εκ τούτου, στην επόμενη χρονική περίοδο (T_{k+1}), η βέλτιστη κατανομή διαρθρώσεων, σύμφωνα με τα προαναφερθέντα κριτήρια, μπορεί να είναι η $C(T_{k+1}) = (c_3, c_2, \dots, c_{m-2})$. Στο υποθετικό αυτό παράδειγμα, το οποίο απεικονίζεται και στο Σχήμα 2-2, ο πομποδέκτης e_2 αναδιάρθρωθηκε ώστε να λειτουργεί υπό τη διάρθρωση c_2 αντί της c_1 , ενώ όλοι οι υπόλοιποι πομποδέκτες διατήρησαν την προηγούμενη διάρθρωσή τους.



Σχήμα 2-2. Παράδειγμα κατανομής διαρθρώσεων γνωστικού σταθμού βάσης σε διαδοχικές χρονικές περιόδους

2.1.3 Αυτονομία γνωστικού σταθμού βάσης

Το θεωρούμενο γνωστικό δίκτυο που εικονίζεται στο Σχήμα 2-1 μπορεί να περιλαμβάνει έναν απεριόριστο αριθμό από γνωστικούς σταθμούς βάσης. Αυτό έχει ως άμεσο αντίκτυπο την αυξημένη πολυπλοκότητα διαχείρισης των αποφάσεων αναδιάρθρωσης των σταθμών του δικτύου. Κάθε τέτοια απόφαση αναδιάρθρωσης που αφορά ένα συγκεκριμένο γνωστικό σταθμό βάσης θα πρέπει να συμμορφώνεται με τις εξής δύο αρχές:

- τη διασφάλιση των συμφερόντων του εν λόγω σταθμού βάσης, μέσω της βελτιστοποίησης της διάρθρωσής του

- το συντονισμό, την επίλυση συγκρούσεων και την ομαλή συμβίωση μεταξύ των παραπλήσιων γνωστικών σταθμών βάσης, οι οποίοι μπορεί να ανταγωνίζονται για τους ίδιους πόρους ή να θίγονται από την καινούρια διάρθρωση που επελέγη

Για την επίτευξη των στόχων αυτών, υπάρχουν τρία σχήματα διαχείρισης ενός γνωστικού δικτύου που μπορούν να υιοθετηθούν:

- *Κεντρικό σύστημα διαχείρισης:* Στο σχήμα αυτό, όλοι οι σταθμοί βάσης μιας ευρείας γεωγραφικής περιοχής διαχειρίζονται από ένα κεντρικό σύστημα με υψηλό βαθμό πολυπλοκότητας και ευφυΐας. Το σύστημα είναι υπεύθυνο για την εύρεση της βέλτιστης κατανομής διαρθρώσεων του συνόλου των σταθμών βάσης, με τρόπο που να μην αδικεί κανέναν από αυτούς (άρα και καμία περιοχή κάλυψης). Η εξαιρετικά υψηλή πολυπλοκότητα του προβλήματος βελτιστοποίησης το οποίο καλείται να επιλύσει το κεντρικό σύστημα διαχείρισης συνεπάγεται ένα υψηλότατο υπολογιστικό φορτίο, το οποίο με τη σειρά του οδηγεί σε περιορισμένη ικανότητα δράσης του συστήματος (σπάνιες και με μακροπρόθεσμο ορίζοντα αναδιαρθρώσεις).
- *Ομαδοποίηση σταθμών βάσης:* Στο σχήμα αυτό, οι σταθμοί βάσης ομαδοποιούνται σε ολιγομελείς ομάδες, βάσει της γεωγραφικής εγγύτητάς τους, και, κατόπιν, η διαχείριση κάθε ομάδας ανατίθεται και σε ένα διαφορετικό σύστημα διαχείρισης. Για παράδειγμα, μπορεί να γίνει εγκατάσταση ενός συστήματος διαχείρισης σε κάθε ελεγκτή σταθμού βάσης του δικτύου. Η λύση αυτή προσφέρει μεγαλύτερη διασπορά στην κατανομή του απαιτούμενου υπολογιστικού φορτίου. Φυσικά, για την περίπτωση ελεγκτών που διαχειρίζονται μεγάλο αριθμό σταθμών βάσης, το υπολογιστικό φορτίο είναι και πάλι σημαντικό. Απαιτείται, επιπλέον, και ένα πρωτόκολλο συνεννόησης και συνεργασίας μεταξύ των διαφόρων οντοτήτων διαχείρισης του δικτύου, για την αποφυγή συγκρούσεων σε γειτνιάζουσες ομάδες σταθμών.
- *Αυτόνομη διαχείριση σταθμών βάσης:* Το σχήμα αυτό ακολουθεί τις αρχές της αυτόνομης υπολογιστικής, στόχος της οποίας είναι η ανάπτυξη υπολογιστικών συστημάτων ικανών να διαχειρίζονται τα ίδια τους εαυτούς τους (αυτοδιαχείριση – self-management), προκειμένου να αντιμετωπισθεί η ραγδαίως αυξανόμενη πολυπλοκότητα διαχείρισης των υπολογιστικών

συστημάτων, καθώς και να αρθούν τα εμπόδια που αυτή η πολυπλοκότητα θέτει στην περαιτέρω ανάπτυξη των συστημάτων. Ακολουθώντας το υπόδειγμα αυτό, μπορούμε να οραματιστούμε γνωστικούς σταθμούς βάσης που έχουν την ικανότητα της αυτοδιαχείρισης. Σε ένα τέτοιο σχήμα, κάθε γνωστικός σταθμός βάσης του δικτύου είναι ικανός να προσαρμόζεται από μόνος του στο περιβάλλον του, δίχως να έχει την ανάγκη να λάβει εντολή ή οδηγίες από μια κεντρικότερη διαχειριστική οντότητα με υψηλότερη νοημοσύνη. Η αρχή αυτή λειτουργίας, η οποία ακολουθεί το υπόδειγμα της αυτόνομης υπολογιστικής, προσφέρει σημαντική μείωση της πολυπλοκότητας διαχείρισης του όλου δικτύου, καθώς δεν απαιτεί την ύπαρξη μιας συγκεντρωτικής αρχής διαχείρισης που να έχει εποπτεία ολόκληρου του δικτύου. Ένα επιπλέον σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι, στο σχήμα αυτό, η προσθήκη νέων σταθμών βάσης δεν αυξάνει την πολυπλοκότητα διαχείρισης του δικτύου.

Στην τοπολογία γνωστικού δικτύου που μελετάμε, υιοθετούμε το τελευταίο σχήμα διαχείρισης που αναφέρθηκε, δηλαδή αυτό της αυτόνομης διαχείρισης των σταθμών βάσης.

2.1.4 Σύνοψη τοπολογίας γνωστικού δικτύου

Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 2-1), συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα της τοπολογίας του γνωστικού δικτύου που μελετάμε στα πλαίσια της συγκεκριμένης διατριβής. Συγκεντρωτικά, το κυψελωτό γνωστικό δίκτυό μας αποτελείται από έναν απεριόριστο αριθμό αυτόνομων, αναδιαρθρώσιμων, γνωστικών σταθμών βάσης, καθένας εκ των οποίων διαθέτει έναν ή περισσότερους αναδιαρθρώσιμους πομποδέκτες.

Πίνακας 2-1. Σύνοψη χαρακτηριστικών γνωρισμάτων της θεωρούμενης δικτυακής τοπολογίας

Οντότητα	Χαρακτηριστικό Γνώρισμα	Επεξήγηση
<i>δίκτυο</i>	γνωστικό	απαρτίζεται από γνωστικούς σταθμούς βάσης
	κυψελωτό	το δίκτυο έχει τη μορφή μιας κυψέλης, με κάθε σταθμό βάσης να είναι υπεύθυνος για την κάλυψη σε ένα ορισμένο κελί
<i>σταθμός βάσης</i>	γνωστικός	έχει τη δυνατότητα παρακολούθησης των συνθηκών που επικρατούν στο ραδιο-περιβάλλον του και προσαρμογής σε αυτές
	αναδιαρθρώσιμος	είναι εξοπλισμένος με έναν ή περισσότερους αναδιαρθρώσιμους πομποδέκτες
	αυτόνομος	έχει την ικανότητα της αυτοδιαχείρισης
<i>πομποδέκτης δικτύου</i>	αναδιαρθρώσιμος	μπορεί να μεταβάλλει τις παραμέτρους λειτουργίας του, με στόχο τη βελτίωση της προσφερόμενης ποιότητας υπηρεσιών
<i>δικτυακή διεπαφή τερματικού</i>	αναδιαρθρώσιμη	μπορεί να μεταβάλλει τις παραμέτρους λειτουργίας της, ακολουθώντας τις διαρθρωτικές αλλαγές των πομποδεκτών του δικτύου
<i>τερματικό</i>	αναδιαρθρώσιμο	είναι εξοπλισμό με μία ή περισσότερες αναδιαρθρώσιμες δικτυακές διεπαφές

2.2 Μέτρα και μέθοδοι εκτίμησης ποιότητας καναλιού για τη γνωστική λειτουργία της επαίσθησης

2.2.1 Η έννοια της παρεμβολής και τα μέτρα ποιότητας καναλιού

Ένας από τους πιο περιοριστικούς παράγοντες για τα συστήματα ασύρματων επικοινωνιών είναι οι παρεμβολές και το ίδιο ακριβώς ισχύει και για τα γνωστικά συστήματα. Με τον όρο παρεμβολή, εννοούμε κάθε ανεπιθύμητο σήμα που

λαμβάνεται από το δέκτη [8]. Μπορεί να οφείλεται είτε σε κάποιο φυσικό αίτιο, όπως, για παράδειγμα, στην περίπτωση του θερμικού θορύβου μιας κεραίας, είτε στην εκπομπή κάποιου συστήματος επικοινωνίας. Στην τελευταία περίπτωση, έχουμε εκπομπή ενέργειας από τρίτους χρήστες στη ζώνη συχνοτήτων στην οποία έχει συντονιστεί ο δέκτης.

Η ποιότητα ενός καναλιού επικοινωνίας επηρεάζεται, λοιπόν, κατά κύριο λόγο, από την παρουσία παρεμβολών. Η λειτουργία της επαίσθησης ενός γνωστικού συστήματος αποσκοπεί ακριβώς στην ποσοτικοποίηση των συνεπειών των παρεμβολών αυτών στο λαμβανόμενο σήμα. Διάφορα μέτρα της ποιότητας καναλιού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό. Αυτά είναι:

- ο λόγος σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο (signal-to-interference-plus-noise-ratio, SINR)
- η πιθανότητα λάθους δυαδικού ψηφίου (bit error probability, BEP)
- ο ρυθμός λάθους δυαδικού ψηφίου (bit error rate, BER)
- η πιθανότητα λάθους συμβόλου (symbol error probability, SEP)
- ο ρυθμός λάθους συμβόλου (symbol error rate, SER)
- ο ρυθμός λάθους πλαισίου (frame error rate, FER) και
- η θερμοκρασία παρεμβολών (interference temperature, IT)

2.2.2 Λόγος σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο (SINR)

2.2.2.1 Γενικά

Η ηλεκτρομαγνητική ισχύς των παρεμβολών δε συνιστά από μόνη της μέτρο ικανό να περιγράψει τον αντίκτυπο των παρεμβολών στη μετάδοση σημάτων. Και αυτό, γιατί η ισχύς του επιθυμητού σήματος πρέπει να ληφθεί επίσης υπόψη. Συνεπώς, ένα καταλληλότερο μέτρο της ποιότητας του λαμβανόμενου σήματος [8] είναι ο λόγος της ισχύος του επιθυμητού λαμβανόμενου σήματος προς το ολικό άθροισμα των ισχύων παρεμβολής, όπως φαίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{S}{I} = \frac{S}{\left(\sum_n I_n + N\right)} \quad (2-1)$$

όπου το S δηλώνει την ισχύ του επιθυμητού σήματος, το I_n την ισχύ παρεμβολής που προέρχεται από τον παρεμβολέα n , και το N το θερμικό θόρυβο. Ο λόγος της παραπάνω εξίσωσης αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως λόγος σήματος προς

παρεμβολή και θόρυβο (signal-to-noise-plus-interference ratio - SINR) ή, μερικές φορές, προς απλούστευση, ως λόγος σήματος προς παρεμβολή (signal-to-interference ratio - SIR).

Για την ισχύ S , μια τυπική τιμή σε συστήματα GSM είναι, για μια μέση περίπτωση κάλυψης, -78 dBm ή 1.5×10^{-8} mW. Το παράδειγμα αυτό υποδεικνύει ότι η λαμβανόμενη ισχύς σήματος στα κινητά δίκτυα δεύτερης και τρίτης γενιάς είναι πολύ χαμηλή και ότι οι δέκτες οφείλουν να έχουν μεγάλη ευαισθησία.

Ο όρος I , στον παρονομαστή της εξίσωσης (2-1), αναπαριστά τη συνολική παρεμβολή που λαμβάνεται στο δέκτη από άλλους σταθμούς. Αναλυτικότερα, σε ένα GSM σύστημα, οι πηγές παρεμβολών στη ζεύξη ανόδου είναι ενεργοί, ομοδιαυλικοί κινητοί σταθμοί που βρίσκονται σε άλλα κελιά και εκπέμπουν από αυτά. Τα ραδιοσήματα που εκπέμπονται από τους σταθμούς αυτούς δρουν ως παρεμβολές για τους σταθμούς βάσης των άλλων κελιών. Στη ζεύξη καθόδου, οι πηγές παρεμβολών είναι άλλοι σταθμοί βάσης οι οποίοι εκπέμπουν στην ίδια συχνότητα και τα ραδιοσήματα των οποίων λαμβάνονται από τον υπόψη κινητό σταθμό. Συνεπώς, ο λόγος SINR για τη ζεύξη ανόδου μιας σύνδεσης μπορεί να είναι διαφορετικός από εκείνον για τη ζεύξη καθόδου.

Όσον αφορά ένα UMTS σύστημα, η παρεμβολή δεν είναι μόνο διακυψελικής αλλά και ενδοκυψελικής φύσεως, καθώς σε δίκτυα τύπου CDMA (Code Division Multiple Access - Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Κώδικα) οι χρήστες χρησιμοποιούν το ίδιο φάσμα συχνοτήτων. Αναφορικά με τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (τεχνολογίες WLAN), οι συνήθεις αιτίες παρεμβολών είναι η λειτουργία άλλων ασύρματων τοπικών δικτύων στην ίδια περιοχή, καθώς και η παρουσία ενεργών υπερευρυζωνικών (Ultra Wide Band - UWB) ή συσκευών Bluetooth.

2.2.2.2 Το SINR ως μέτρο ποιότητας καναλιού

Η εκτίμηση του SINR είναι εξαιρετικής σημασίας για τα ασύρματα συστήματα πρόσβασης, στα οποία οι πόροι μοιράζονται δυναμικά μεταξύ των χρηστών. Οι εφαρμογές της διαδικασίας εκτίμησης του SINR είναι:

- έλεγχος ισχύος σε συστήματα CDMA
- προσαρμογή ρυθμού δεδομένων
- λήψη αποφάσεων διαπομπών
- δυναμική ανάθεση καναλιών

- διαδικασία διαφορισμού (diversity)

Στο πλαίσιο των γνωστικών δικτύων, η ανάγκη εκτίμησης του SINR είναι εξίσου σημαντική, καθώς το SINR είναι η βάση αφενός για τον εντοπισμό αχρησιμοποίητων ή υπο-χρησιμοποιούμενων ζωνών συχνοτήτων, αφετέρου για την εκτίμηση των δυνατοτήτων μιας διάρθρωσης (χωρητικότητα μετάδοσης, εμβέλεια κάλυψης). Συγκεκριμένα, ένα υψηλό SINR επιτρέπει μικρότερο πλεονασμό κατά την κωδικοποίηση (π.χ., μικρότερο πλήθος συμβόλων ισοτιμίας για τον εντοπισμό και τη διόρθωση σφαλμάτων μετάδοσης) και αποδοτικότερα σχήματα διαμόρφωσης, με αποτέλεσμα την αύξηση των δυνατοτήτων των ασύρματων συστημάτων από πλευράς χωρητικότητας μετάδοσης.

Πέραν τούτου, ένα συγκεκριμένο επίπεδο SINR πρέπει να διατηρείται κατ' ελάχιστο στο δέκτη, προκειμένου να εξασφαλίζεται ένα επαρκές επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας. Η εμβέλεια κάλυψης, δηλαδή η μέγιστη επιτευκτική απόσταση μεταξύ σταθμού βάσης και κινητού σταθμού, εξαρτάται από τη μέγιστη ισχύ του πομπού. Η ισχύς του πομπού πρέπει να είναι επαρκής, ώστε να διασφαλίζεται το απαιτούμενο επίπεδο SINR στο δέκτη, παρά την εξασθένηση που συμβαίνει στο σήμα κατά τη διάδοση. Εντούτοις, όσο υψηλότερη είναι η ισχύς των παρεμβολών στο δέκτη, τόσο μικρότερο περιθώριο έχει το σήμα να εξασθενήσει κατά τη διάδοσή του, χρησιμοποιώντας την ίδια ισχύ εκπομπής. Κατά συνέπεια, μια αύξηση της ισχύος παρεμβολής συνεπάγεται μείωση της μέγιστης εμβέλειας κάλυψης. Επιπλέον, ειδικά για συστήματα UMTS, μια αύξηση της δικτυακής κίνησης αυτόματα οδηγεί και σε αύξηση της ισχύος παρεμβολής. Αυτή η εξάρτηση της εμβέλειας κάλυψης από το φορτίο κίνησης είναι γνωστή ως «αναπνοή κελιού» (“cell breathing”).

2.2.2.3 Το πρόβλημα της εκτίμησης του SINR

Πολλές μέθοδοι εκτίμησης του SINR έχουν, κατά καιρούς, προταθεί για τα διάφορα σχήματα πολλαπλής πρόσβασης που υπάρχουν σήμερα. Ο Πίνακας 2-2 υποδεικνύει το σχήμα πολλαπλής πρόσβασης που χρησιμοποιείται από καθεμιά από τις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης. Τα σχήματα πολλαπλής πρόσβασης που εξετάζονται είναι τα εξής:

- Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Χρόνου (Time Division Multiple Access - TDMA)

- Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Κώδικα (Code Division Multiple Access - CDMA)
- Ορθογωνική Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing - OFDM), σε συνδυασμό με Πολλαπλή Πρόσβασης Διαίρεσης Χρόνου (TDMA)
- Ορθογωνική Πολλαπλή Πρόσβασης Διαίρεσης Συχνότητας (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access, OFDMA)

Το σχήμα πολλαπλής πρόσβασης OFDMA αποτελεί μια εκδοχή του σχήματος ψηφιακής διαμόρφωσης OFDM, προσαρμοσμένη για πολλαπλούς χρήστες. Πιο συγκεκριμένα, σε ένα OFDM σύστημα επιτρέπεται η ύπαρξη ενός μόνο χρήστη σε ένα κανάλι, ανά πάσα στιγμή. Για να ενσωματωθούν περισσότεροι χρήστες σε ένα κανάλι, ένα αυστηρώς OFDM σύστημα πρέπει να συνδυάσει και την Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Χρόνου (TDMA) (χρήση διακριτών χρονοσχημάτων) ή, εναλλακτικά, ένα σχήμα Πολλαπλής Πρόσβασης Διαίρεσης Συχνότητας (Frequency Division Multiple Access, FDMA) (χρήση διακριτών συχνοτήτων). Ο Πίνακας 2-2 κατασκευάστηκε ώστε συμπεριλαμβάνει το στοιχείο αυτό. Από την άλλη, όμως, ένα σύστημα OFDMA είναι ένα σύστημα πολλαπλών χρηστών βασισμένο σε OFDM, το οποίο εγγενώς επιτρέπει πολλαπλή πρόσβαση στο ίδιο κανάλι (με κάθε κανάλι να είναι μια ομάδα από ομοιόμορφα τοποθετημένα υπο-φέροντα). Το σχήμα OFDMA κατανέμει τα υπο-φέροντα μεταξύ των χρηστών έτσι, ώστε όλοι οι χρήστες να μπορούν να εκπέμψουν και να λάβουν δεδομένα την ίδια χρονική στιγμή, εντός του ίδιου καναλιού, πάνω στα λεγόμενα υπο-κανάλια.

Κατά την εκτίμηση του SINR, σφάλματα και ανακρίβειες μπορούν να επέλθουν εξαιτίας των παρακάτω λόγων:

- η παρεμβολή είναι προσθετική σε σχέση με το επιθυμητό σήμα και δεν μπορεί (εύκολα) να διαχωριστεί
- το παράθυρο παρατήρησης για τις εκτιμήσεις είναι αρκετά μικρό, ειδικά για εφαρμογές ελέγχου ισχύος και
- η παρουσία σχήματος διαμόρφωσης θέτει εμπόδια στην απευθείας εκτίμηση του SINR από τα σύμβολα δεδομένων

Κατά καιρούς, το πρόβλημα της εκτίμησης του SINR έχει συζητηθεί στην επιστημονική βιβλιογραφία, σε σημαντικό βάθος (π.χ., [11]-[16]). Έχει μελετηθεί τόσο για αναλογικά συστήματα επικοινωνιών (π.χ., Advanced Mobile Phone System

– AMPS) [17]-[18] όσο και, πιο πρόσφατα, για ψηφιακά συστήματα βασισμένα σε TDMA, CDMA, OFDM και OFDMA.

Πίνακας 2-2. Σύνοψη των αντιστοιχιών μεταξύ διαδεδομένων τεχνολογιών ραδιοπρόσβασης και σχημάτων πολλαπλής πρόσβασης

	TDMA	CDMA	OFDM + TDMA	OFDMA
GSM/GPRS	•			
UMTS		•		
CDMA2000		•		
IEEE 802.11a			•	
IEEE 802.11b		•		
IEEE 802.11g			•	
IEEE 802.16d			•	
IEEE 802.16e				•
DAB			•	
DVB			•	

Εν γένει, δύο στρατηγικές μπορούν να υιοθετηθούν για την επίτευξη SINR εκτιμήσεων. Η πρώτη βασίζεται στη μετάδοση πιλοτικών συμβόλων (ακολουθιών κατάρτισης), ενώ η δεύτερη προσπαθεί να συμπεράνει τα χαρακτηριστικά του καναλιού απευθείας από τα σύμβολα δεδομένων, δηλαδή από το λαμβανόμενο σήμα, χωρίς τη χρήση ακολουθιών κατάρτισης. Οι δύο στρατηγικές αναφέρονται συχνά στη βιβλιογραφία ως «φανερή» (non-blind) και «αφανής» (blind), αντίστοιχα. Στην φανερή μέθοδο εκτίμησης, επειδή η ακολουθία κατάρτισης είναι γνωστή εκ των προτέρων στο δέκτη, το έργο του υπολογισμού του SINR καθίσταται πιο εύκολο, καθώς ο δέκτης γνωρίζει ποια σύμβολα υποτίθεται ότι πρέπει να λάβει. Έτσι, η χρήση πιλοτικών συμβόλων επιτρέπει, γενικά, μεγαλύτερη ακρίβεια κατά τη διαδικασία εκτίμησης, επιπλέον, όμως, εισάγει ένα σημαντικό πλεονασμό κατά τη μετάδοση, που θα μπορούσε να αντικατασταθεί από πρόσθετες ακολουθίες (χρήσιμων) δεδομένων [24].

Στο πλαίσιο των γνωστικών δικτύων, ωστόσο, η εκτίμηση των παρεμβολών, για το σκοπό της εξεύρεσης αξιοποιήσιμων ζωνών συχνοτήτων, είναι δυνατό να στηριχτεί αποκλειστικά στη μετάδοση πιλοτικού σήματος, αφού μια αυτή καθαυτή μετάδοση

(χρήσιμων) δεδομένων δεν μπορεί να λάβει χώρα προτού αποφασιστεί αν η υπό εξέταση ζώνη συχνοτήτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ή όχι για την παροχή υπηρεσιών. Από την άλλη, βέβαια, η εκτίμηση των παρεμβολών εντός της χρησιμοποιούμενης ζώνης συχνοτήτων μπορεί να ακλουθήσει οποιαδήποτε από τις δύο στρατηγικές.

Στις παραγράφους που ακολουθούν, παρέχεται μια επισκόπηση των μεθόδων εκτίμησης του SINR για τις περιπτώσεις των συστημάτων TDMA, CDMA, OFDM και OFDMA.

2.2.2.4 Βασικό μοντέλο εκτίμησης του SINR

Στην παράγραφο αυτή, επεξηγείται μια από τις πλέον διαδεδομένες μεθόδους φανεράς εκτίμησης του SINR, γνωστής ως μέθοδος Ελαχίστου Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (Minimum Mean Square-Error - MMSE) [25]. Έστω $\mathbf{a} = \{a_1, a_2, \dots, a_L\}$ μια ακολουθία κατάρτισης, αποτελούμενη από L σύμβολα, και $\mathbf{y} = \{y_1, y_2, \dots, y_L\}$ το διάνυσμα των λαμβανόμενων συμβόλων, όπως εικονίζεται στο Σχήμα 2-3. Το διάνυσμα \mathbf{y} μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\mathbf{y} = f\mathbf{a} + \mathbf{w} \quad (2-2)$$

όπου το f συμβολίζει τον παράγοντα εξασθένησης, που υποτίθεται σταθερός για τη διάρκεια της ακολουθίας κατάρτισης, και $\mathbf{w} = \{w_1, w_2, \dots, w_L\}$ είναι το Γκαουσιανό διάνυσμα θορύβου. Συνεπώς, το SINR δίδεται από την ακόλουθη έκφραση:

$$SINR = \frac{|f\mathbf{a}|^2}{|\mathbf{w}|^2} = \frac{|f\mathbf{a}|^2}{|\mathbf{y} - f\mathbf{a}|^2} \quad (2-3)$$

Από την (2-3), είναι εμφανές ότι απαιτείται μια εκτίμηση για τον παράγοντα εξασθένησης. Σύμφωνα με τη μέθοδο MMSE, το σφάλμα εκτίμησης και η εκτίμηση είναι ορθογωνικά, ως ακολούθως:

$$(\mathbf{y} - \hat{f}\mathbf{a})(\hat{f}\mathbf{a})^H = 0 \Rightarrow \hat{f} = \frac{\mathbf{y}\mathbf{a}^H}{|\mathbf{a}|^2} \quad (2-4)$$

όπου ο εκθέτης H αναπαριστά τη συζυγή εναλλαγή. Λόγω των (2-3) και (2-4), μια εκτίμηση για το SINR δίδεται από:

$$\hat{SINR} = \frac{|\mathbf{y}\mathbf{a}^H|^2}{|\mathbf{a}|^2 |\mathbf{y}|^2 - |\mathbf{y}\mathbf{a}^H|^2} \quad (2-5)$$



Σχήμα 2-3. Βασικό μοντέλο για την εκτίμηση του SINR

2.2.2.5 Η εκτίμηση του SINR σε συστήματα TDMA

Διάφορες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για την παραγωγή εκτιμήσεων του SINR, σε πραγματικό χρόνο, για κυψελωτά συστήματα TDMA [19]. Η μέθοδος της «προβολής παρεμβολής» (interference projection - IP) κάνει χρήση των ακολουθιών κατάρτισης ή/και των ακολουθιών χρωματικών κωδικών που εγγενώς υπάρχουν εντός των TDMA χρονοσχισμών, με στόχο την απόκτηση μιας αντικειμενικής εκτίμησης για το SINR [20]. Μια άλλη μέθοδος χρησιμοποιεί την ακολουθία αυτοσυσχέτισης των δειγμάτων του λαμβανόμενου σήματος, σε μια μικρή χρονική κλίμακα, θεωρώντας ότι το επιθυμητό σήμα έχει σταθερή περιβάλλουσα [21]-[22]. Η «βασισμένη σε υποχώρους» μέθοδος (subspace-based - SB) επιτυγχάνει εκτίμηση του SINR από τις ιδιοτιμές της μήτρας συνδιακύμανσης της λαμβανομένης ακολουθίας σήματος [23]. Η «προβολή σήματος» (signal projection - SP) είναι μια άλλη αποτελεσματική τεχνική εκτίμησης για κυψελωτά συστήματα TDMA, η οποία αποσκοπεί στην επίτευξη αφενός μεν υπολογιστικής πολυπλοκότητας συγκρίσιμης με εκείνη της μεθόδου IP, αφετέρου δε μέσου απόλυτου σφάλματος πρόβλεψης του SINR συγκρίσιμου με εκείνο της μεθόδου SB [19].

Στην παραπομπή [24], παρατίθεται ένα σύνολο αφανών αλγορίθμων εκτίμησης καναλιού, βασισμένων σε Στατιστικά Στοιχεία Δευτέρας Τάξεως (Second Order Statistics - SOS) και σε Στατιστικά Στοιχεία Υψηλότερης Τάξεως (Higher Order Statistics - HOS). Τα αποτελέσματα των σχετικών προσομοιώσεων δείχνουν ότι οι αλγόριθμοι αποδίδουν σχεδόν το ίδιο καλά με τις φανερές μεθόδους εκτίμησης. Στην παραπομπή [9], εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο συνδυασμός φανερών και αφανών εκτιμήσεων μπορεί να οδηγήσει σε αξιοσημείωτη βελτίωση της ακρίβειας εκτίμησης του SINR. Στην παραπομπή [10], γίνεται ανάλυση μιας τεχνικής βασισμένης στην ανάδραση από δοκιμαστικές αποφάσεις επί των συμβόλων δεδομένων, η οποία επιτυγχάνει σημαντικά μικρό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Mean Squared Error - MSE).

Στην παραπομπή [26], προτείνεται η χρήση βραχυπρόθεσμων βημάτων αύξησης του μέτρου ενός αποκωδικοποιητή Viterbi, υπολογιζόμενου εντός ενός κυλιόμενου παραθύρου, ως ενδείκτη της ποιότητας καναλιού, με στόχο την ταχεία προσαρμογή του ρυθμού δεδομένων. Εκείνο που, επίσης, προτείνεται στην παραπομπή [26] είναι η χρήση της διαφοράς μεταξύ των αυξητικών μέτρων του αποκωδικοποιητή Viterbi, για την αξιοποίηση του βέλτιστου μονοπατιού trellis, καθώς και του δεύτερου βέλτιστου μονοπατιού, ως εναλλακτικού ενδείκτη της ποιότητας καναλιού για την προσαρμογή του ρυθμού δεδομένων. Τα μέτρα αυτά παρέχουν βραχυπρόθεσμες ενδείξεις για την τιμή του SINR [27]. Στην παραπομπή [27], προτείνεται η χρήση του μέτρου της Ευκλείδειας Απόστασης (Euclidean Distance - ED), επί της αποκωδικοποιημένης ακολουθίας πληροφοριών ή μιας κατάλληλης σχετικής τροποποίησης, ως ενδείκτη της ποιότητας καναλιού. Η μέση κλιμακοθετημένη Ευκλείδεια Απόσταση μπορεί να αντιστοιχισθεί στο SINR ανά σύμβολο. Στην παραπομπή [28], υιοθετείται μια νέα προσέγγιση βασισμένη σε φίλτρο Kalman, για την εκτίμηση παρεμβολών σε ασύρματα δίκτυα μεταγωγής πακέτων, όπως στα 2.75G συστήματα τύπου EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution).

2.2.2.6 Η εκτίμηση του SINR σε συστήματα CDMA

Ο υπολογισμός του SINR είναι πρωταρχικής σημασίας για τα συστήματα CDMA, ειδικά λόγω της απαίτησής τους για έλεγχο ισχύος. Σύμφωνα με τη συμβατική προσέγγιση που ακολουθείται και περιγράφεται στις εργασίες [29]-[31], οι διαδικασίες εκτίμησης του SINR ανακατασκευάζουν τα σήματα-φορείς της πληροφορίας, μέσω εκτιμήσεων του κέρδους του καναλιού, καθώς και αποφάσεων επί των λαμβανόμενων συμβόλων δεδομένων ή των λαμβανόμενων πιλοτικών ακολουθιών, και μετέπειτα προβαίνουν σε εκτίμηση της ισχύος των παρεμβολών, υπολογίζοντας τη διαφορά ισχύος μεταξύ των λαμβανόμενων και των ανακατασκευασμένων σημάτων.

Στην εργασία [32], η μέθοδος εκτίμησης SB για τα συστήματα TDMA [23] επεκτείνεται σε κυψελωτά συστήματα τύπου CDMA, αξιοποιώντας τη μήτρα συνδιακύμανσης των δειγμάτων του λαμβανόμενου σήματος. Στην εργασία [33], προτείνεται μια μέθοδος για τον υπολογισμό του SINR σε κανάλι πολλαπλής διαδρομής επίπεδης διάλειψης, χωρίς να απαιτείται η γνώση ακολουθιών κατάρτισης ούτε ο υπολογισμός ιδιοτιμών. Στην εργασία [34], προτείνονται πρόσθετες τεχνικές

εκτίμησης του SINR για συστήματα CDMA, αυτήν τη φορά για ένα κανάλι πολλαπλής διαδρομής με διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα. Στην εργασία [35], περιγράφεται μια διαδικασία εκτίμησης του SINR που υποθέτει ένα σχήμα διαμόρφωσης σταθερής περιβάλλουσας. Η τεχνική αυτή εκτιμά την ισχύ του επιθυμητού σήματος-φορέα της πληροφορίας με μεσοτίμηση της απόλυτης τιμής του λαμβανόμενου σήματος, και κατόπιν υπολογίζει την ισχύ παρεμβολής με αφαίρεση από το ολικό λαμβανόμενο σήμα.

Στην εργασία [36], παρουσιάζονται και συγκρίνονται δύο τεχνικές εκτίμησης του SINR που βασίζονται στον αλγόριθμο της παραπομπής [35] και είναι σε θέση να βελτιστοποιήσουν τον έλεγχο ισχύος κλειστού βρόχου (Closed-Loop Power Control - CLPC) στα συστήματα W-CDMA (Wideband-CDMA). Η πρώτη εκ των δύο τεχνικών πραγματοποιεί τον υπολογισμό του SINR πριν τον κτενοειδή συνδυασμό (RAKE combining) του σήματος, ενώ η δεύτερη μετά από αυτόν. Στην εργασία [37], ερευνώνται οι απαιτήσεις της εκτίμησης του SINR, όταν αυτή χρησιμοποιείται για τον ταχύ έλεγχο ισχύος, και εξάγεται ένας καινούριος αλγόριθμος εκτίμησης, ο οποίος λαμβάνει υπόψη του τα αποστελλόμενα δυαδικά ψηφία του ελέγχου ισχύος μετάδοσης (transmit power control - TPC), με στόχο τη βελτίωση της ακρίβειας.

Στην εργασία [38], συγκρίνονται δύο τεχνικές εκτίμησης της πληροφορίας κατάστασης καναλιού (channel state information - CSI), για τον αποκωδικοποιητή turbo (στροβίλο-αποκωδικοποιητή) επί της ευθείας CDMA ζεύξης χωροχρονικού διαφορισμού εκπομπής (space time transmit diversity - STTD). Οι δύο αυτές τεχνικές δεν απαιτούν την ενσωμάτωση πιλοτικών συμβόλων στο εκπεμπόμενο σήμα δεδομένων. Η πρώτη εξ αυτών συνιστά μια συμβατική προσέγγιση στην εκτίμηση του CSI και εξυπηρετεί ως σημείο αναφοράς. Κάνει την παραδοχή ότι το σύνολο της CDMA παρεμβολής και του θορύβου μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν Αθροιστικός Λευκός Γκαουσιανός Θόρυβος (Additive White Gaussian Noise - AWGN). Η δεύτερη αποτελεί μια καινοτόμο μέθοδο η οποία λαμβάνει υπόψη της τα μοναδικά χαρακτηριστικά της ενδοκυβελικής παρεμβολής μιας STTD CDMA ευθείας ζεύξης.

Στην εργασία [39], εντοπίζεται ένα σημαντικό πρόβλημα αναφορικά με τη διαδικασία εκτίμησης του SINR. Οι περισσότερες μέθοδοι εκτίμησης του SINR είναι τεχνικές που βασίζονται σε μετρήσεις επί των συμβόλων. Δηλαδή, το SINR εκτιμάται βάσει των συμβόλων που σειριακά ανιχνεύονται στο δέκτη. Τέτοιου είδους αλγόριθμοι εκτίμησης του SINR απαιτούν αρκετά πλαίσια προκειμένου να συγκλίνουν, με κάθε πλαίσιο να απαρτίζεται από αρκετές εκατοντάδες σύμβολα, σε

συνάρτηση και με το ρυθμό δεδομένων. Συνεπώς, οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι έχουν μια εγγενή δυσκολία στην επίτευξη εκτιμήσεων του SINR σε πραγματικό χρόνο. Προς επίλυση αυτού του προβλήματος, εισάγεται η ιδέα της εκτίμησης του SINR στα συστήματα CDMA βάσει των μικροστοιχείων (chips) και όχι των συμβόλων, παρουσιάζονται δε δύο τεχνικές εκτίμησης σε επίπεδο chip, η Προβολή Παρεμβολής Βασισμένη σε Διανύσματα (Vector-Based Interference Projection - VBIP) και η Προβολή Παρεμβολής Πλήρης Τάξης (Full-Rank Interference Projection).

2.2.2.7 Η εκτίμηση του SINR σε συστήματα OFDM και OFDMA

Η εκτίμηση του SINR σε συστήματα OFDM και OFDMA (η διαδικασία εκτίμησης του SINR σε συστήματα OFDMA ακολουθεί τα πρότυπα εκείνης των OFDM συστημάτων) είναι ένα σχετικά καινούριο πεδίο έρευνας, τουλάχιστον σε σύγκριση με τα πεδία του TDMA και του CDMA. Πράγματι, όπως φάνηκε και από τις προηγούμενες παραγράφους, ένας σημαντικός αριθμός δημοσιεύσεων ασχολείται εις βάθος με το πρόβλημα της εκτίμησης του SINR τόσο για συστήματα TDMA όσο και για OFDMA.

Εντούτοις, αυτές οι μέθοδοι εκτίμησης είναι, κατά κύριο λόγο, προσαρμοσμένες σε εκπομπές τύπου TDMA ή CDMA. Για παράδειγμα, η μέθοδος που σκιαγραφείται στην εργασία [35] υποθέτει ένα σχήμα διαμόρφωσης με σταθερή περιβάλλουσα. Αν και λειτουργική για ένα σύστημα τύπου CDMA, η μέθοδος αυτή δεν μπορεί να εφαρμοστεί απευθείας σε ένα σχήμα διαμόρφωσης πολλαπλών πλατών, όπως είναι αυτό που τυπικά χρησιμοποιείται στα προσαρμοστικά OFDM συστήματα. Επιπλέον, καθώς η εκτίμηση του κέρδους του καναλιού γίνεται διαθέσιμη μόνο έπειτα από την εκτίμηση του καναλιού (η εκτίμηση καναλιού για συστήματα OFDM καλύπτεται από τις μελέτες [40]-[45]), οι μέθοδοι που περιγράφονται στις εργασίες [29]-[31] δεν είναι κατάλληλες για την επίτευξη εκτιμήσεων SINR σε πραγματικό χρόνο, λόγω της σημαντικής καθυστέρησης του σταδίου της επεξεργασίας.

Προς επίλυση αυτών των προβλημάτων, η εργασία [46] προτείνει μια σχεδόν πραγματικού χρόνου τεχνική εκτίμησης ποιότητας καναλιού για προσαρμοστικά συστήματα OFDM, επεκτείνοντας τις μεθόδους SB εκτίμησης SINR των παραπομπών [19] και [39] στα συστήματα OFDM, κάνοντας χρήση null space διανυσμάτων της μήτρας του Ταχύ Μετασχηματισμού Φουριέ (Fast Fourier Transformation - FFT), σε συνδυασμό με μια πιλοτική μήτρα. Στην εργασία [47], μία

νέα, διαφορεική δομή ανίχνευσης, η οποία κάνει χρήση νευρωνικών δικτύων, προτείνεται για την OFDM αποδιαμόρφωση. Ο εν λόγω αλγόριθμος, ο οποίος καλείται Αυτο-Οργανούμενος Χάρτης (Self-Organizing Map - SOM), μπορεί, επίσης, να βρει εφαρμογή και στο πεδίο της εκτίμησης παρεμβολών.

Αναφορικά τώρα με τη λειτουργία των OFDM συστημάτων σε πολυ-κυψελικά περιβάλλοντα, δεν υπάρχουν διαθέσιμα αρκετά ερευνητικά αποτελέσματα για την επίδραση της διακυψελικής παρεμβολής [48]. Για το λόγο αυτό, άλλωστε, η επιτροπή “OFDM Study Item” του οργανισμού προτυποποίησης 3GPP/RAN1 έχει επικεντρωθεί στη μελέτη της πολυ-κυψελικής παρεμβολής σε συστήματα OFDM.

Σε μια πρώτη προσέγγιση του θέματος, οι εργασίες [50]-[51] παραθέτουν αποτελέσματα προσομοιώσεων (μετρήσεις των ρυθμών λάθους δυαδικού ψηφίου και πλαισίου) κατά την εκτέλεση των οποίων έχει θεωρηθεί ότι υπάρχει ένα και μοναδικό κελί που παρεμβάλλει, ωστόσο δεν αποπειρώνται κάποια εκτίμηση αυτής καθαυτής της παρεμβολής. Το βασικό πρόβλημα είναι ότι η παρεμβολή που υφίσταται ένα OFDM σύστημα είναι πολύ διαφορετική από εκείνη ενός συστήματος CDMA. Όταν χρήστες από διαφορετικά κελιά είναι παρόντες στο ίδιο υπο-φέρον, κατά τη διάρκεια ενός OFDM συμβόλου, το προκύπτον αποτέλεσμα είναι μια άμεση επαλληλία σημάτων διαμορφωμένων κατά QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying) ή QAM (Quadrature Amplitude Modulation) με άγνωστα κέρδη διάλειασης. Ως εκ τούτου, οι μέθοδοι που παρουσιάζονται, επί παραδείγματι, στις εργασίες [9] και [52] έχουν μεν ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών, δεν έχουν, όμως, πρακτική χρησιμότητα σε ένα OFDM σενάριο. Πράγματι, όχι μόνο δεν είναι γνωστά τα σύμβολα και τα κέρδη διάλειασης των χρηστών που παρεμβάλλουν, αλλά, επιπλέον, υπάρχει και μια αβεβαιότητα ως προς το σε ποιες χρονικές στιγμές και συχνότητες είναι παρόντες οι χρήστες που παρεμβάλλουν.

Με στόχο την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, στην εργασία [48] θεμελιώνεται ότι, εξαιτίας της ετερογενούς φύσεως των παρεμβολών, ο συνδυασμός της εκτίμησης παρεμβολής με soft-input αποκωδικοποιητές καναλιού μπορεί να οδηγήσει σε βελτιωμένη επίδοση του συστήματος. Γίνεται σύγκριση της βελτίωσης επίδοσης που επιτυγχάνεται από διάφορες τεχνικές εκτίμησης παρεμβολών και, μέσω ρεαλιστικών προσομοιώσεων, αποδεικνύεται ότι ένας χαμηλής πολυπλοκότητας αλγόριθμος μπορεί να επιτύχει κέρδη μέχρι και 2 dB.

2.2.3 Θερμοκρασία παρεμβολών

Σχετικά πρόσφατα, ο οργανισμός Federal Communications Commission (FCC) εισήγαγε την έννοια της «θερμοκρασίας παρεμβολών» ή «θερμοκρασίας παρεμβολής» (interference temperature - IT), με στόχο την «ποσοτικοποίηση και διαχείριση των παρεμβολών» (“quantifying and managing interference”) [53]-[55]. Κεντρική ιδέα αποτελεί η προσπάθεια ρύθμισης της λαμβανόμενης ισχύος, αντί της εκπεμπόμενης [54], επιχειρώντας έτσι μια απομάκρυνση από το ισχύον μοντέλο, το οποίο επικεντρώνεται στον πομπό (“transmitter-centric”) και σύμφωνα με το οποίο η εκπεμπόμενη ισχύς ρυθμίζεται έτσι ώστε να προσεγγίσει ένα δεδομένο επίπεδο θορύβου σε μια συγκεκριμένη απόσταση από τον πομπό [7].

Σύμφωνα με το νέο μοντέλο της FCC, για μια δεδομένη ζώνη συχνοτήτων σε μια δεδομένη γεωγραφική περιοχή, καθορίζεται ένα «όριο θερμοκρασίας παρεμβολών» (interference temperature limit, IT limit) από μια αρμόδια αρχή. Κάθε πομπός θα πρέπει κατόπιν να διασφαλίζει ότι, με την εκπομπή του, δεν αυξάνει το τρέχον IT πάνω από το IT όριο.

Ο ορισμός της θερμοκρασίας παρεμβολών πηγάζει από εκείνον της θερμοκρασίας θορύβου, σύμφωνα με τον οποίο: Η θερμοκρασία θορύβου ενός απλού αντιστάτη συμπίπτει με την πραγματική του θερμοκρασία και μετριέται σε βαθμούς Kelvin. Η ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου ενός κυκλώματος ή δικτύου που παράγει θόρυβο είναι η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin ενός αντιστάτη που παράγει την ίδια διαθέσιμη ισχύ θορύβου ανά μονάδα εύρους ζώνης, στην ίδια ζώνη συχνοτήτων.

Για μια κεραία, δεδομένων του εύρους ζώνης B σε Hertz, της ισχύος θορύβου N σε Watt και της σταθεράς Boltzmann $k = 1.38 \times 10^{-23}$ Joule ανά βαθμό Kelvin, η θερμοκρασία θορύβου T_N σε βαθμούς Kelvin ορίζεται ως εξής:

$$T_N = \frac{N}{kB} \quad (2-6)$$

Ομοίως, δεδομένης της ισχύος παρεμβολών I σε Watt, η θερμοκρασία παρεμβολών T_I ορίζεται ως:

$$T_I = \frac{I}{kB} \quad (2-7)$$

Έστω T_L το όριο IT στην υπό εξέταση γεωγραφική περιοχή και ζώνη συχνοτήτων. Η διαφορά $T_L - T_I$ εξυπηρετεί ως περιθώριο που υποδεικνύει την επιπλέον ενέργεια που θα μπορούσε να εισαχθεί στη συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων. Συνεπώς, προτού γίνει εκπομπή εντός μιας ζώνης συχνοτήτων, πρέπει να εξασφαλιστεί ότι οι

επιλεγείς τιμές της ισχύος εκπομπής P_S και του εύρους ζώνης B δε θα αυξήσουν το τρέχον IT πέραν του ορίου IT, δηλαδή πρέπει:

$$P_S / kB + T_I \leq T_L \quad (2-8)$$

Ένα σημαντικό ζήτημα που σχετίζεται με την εκτίμηση του τρέχοντος IT είναι ότι μια μέτρηση IT που έχει ληφθεί στην πλευρά του πομπού ενδέχεται να διαφέρει από μια τέτοια μέτρηση στην πλευρά του δέκτη. Συνεπώς, στη χειρότερη περίπτωση, το τρέχον IT στη θέση του δέκτη ενδέχεται να είναι κοντά στο όριο IT, ενώ το τρέχον IT στη θέση του πομπού μπορεί να είναι σημαντικά χαμηλότερο, οδηγώντας τον πομπό στη λανθασμένη απόφαση να θεωρήσει τη συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων ως χρησιμοποιήσιμη. Παρόλο που αυτή η μη εσκεμμένη πρόκληση παρεμβολής είναι συνήθως αρκετά σπάνια και μικρής κλίμακας, ωστόσο μελλοντικές ερευνητικές εργασίες θα κληθούν πιθανότατα να την ποσοτικοποιήσουν [54].

Όπως μπορεί να συναχθεί από τα παραπάνω, η εκτίμηση του τρέχοντος IT μπορεί να αποδειχθεί δύσκολο έργο. Μια πιο συστηματική προσέγγιση εκτίμησης σκιαγραφείται στην παραπομπή [7], σύμφωνα με την οποία μια αξιόπιστη εκτίμηση του IT μπορεί να επιτευχθεί με:

- (i) χρήση της «πολυκωνικής» (“multitaper”) διαδικασίας εκτίμησης φάσματος, με στόχο την εκτίμηση της φασματικής ισχύος της θερμοκρασίας παρεμβολών
- (ii) χρήση ενός μεγάλου αριθμού αισθητήρων, οι οποίοι θα λαμβάνουν μετρήσεις από το ραδιοπεριβάλλον

Η μέθοδος που σκιαγραφήθηκε στην υποπαράγραφο (i) βασίζεται στη συστηματική χρήση πολλαπλών ορθογωνικών παραθύρων (“tapers”), για την οποία περισσότερες λεπτομέρειες μπορούν να βρεθούν στις παραπομπές [56]-[59]. Αναφορικά με την υποπαράγραφο (ii), η χρήση πολλαπλών αισθητήρων είναι εφικτή σε ένα κτιριακό περιβάλλον, θα πρέπει, όμως, ενδεχομένως, να περιοριστεί στη χρησιμοποίηση ελάχιστων αισθητήρων σε εξωτερικά περιβάλλοντα. Για την αντιμετώπιση αυτής της δυσκολίας, στο πλαίσιο των γνωστικών δικτύων, τα ίδια τα κινητά τερματικά των χρηστών θα μπορούσαν να αναλάβουν το έργο της λήψης μετρήσεων από το ραδιοπεριβάλλον και της αποστολής τους στους γνωστικούς σταθμούς βάσης. Το θέμα αυτό θα καλυφθεί εκτενώς στις παραγράφους που ακολουθούν.

2.3 Αρχιτεκτονική και πρωτόκολλα επαίσθησης

2.3.1 Διαδικασίες και σχήματα επαίσθησης

2.3.1.1 Απαιτήσεις για την υποστήριξη της λειτουργίας της επαίσθησης

Η λειτουργία της επαίσθησης ενός γνωστικού σταθμού βάσης αναφέρεται στη μέτρηση των επιπέδων παρεμβολής που επικρατούν σε διάφορες υποψήφιες προς χρήση ζώνες συχνοτήτων, εντός των ορίων της γεωγραφικής περιοχής που καλύπτει ο σταθμός. Αυτές οι ζώνες συχνοτήτων δε χρησιμοποιούνται την παρούσα χρονική περίοδο από το σταθμό, αλλά ενδεχομένως να μπορούσαν να αξιοποιηθούν σε κάποια μελλοντική χρονική περίοδο, μέσω αντίστοιχης αναδιάρθρωσης, γι' αυτόν το λόγο πρέπει και να παρακολουθούνται συστηματικά. Η συστηματική αυτή παρακολούθηση προϋποθέτει, ωστόσο:

- (i) τη χρήση κατάλληλων μέτρων αξιολόγησης της ποιότητας των ραδιοκαναλιών
- (ii) τη χρήση κατάλληλων αισθητήρων υπολογισμού των μέτρων αυτών
- (iii) τη χωρική διασπορά των αισθητήρων, ώστε να υπάρχει δειγματοληψία από πολλαπλά, διαφορετικά σημεία της γεωγραφικής περιοχής κάλυψης του σταθμού
- (iv) την ύπαρξη κατάλληλης λειτουργικής αρχιτεκτονικής για τον προγραμματισμό, την εκτέλεση και τη διαχείριση των επαισθητικών μετρήσεων, τόσο από την πλευρά του σταθμού βάσης όσο και από την πλευρά των αισθητήρων
- (v) τον καθορισμό συγκεκριμένων πρωτοκόλλων επικοινωνίας μεταξύ του σταθμού βάσης και των αισθητήρων

Στην παράγραφο 2.2.1 καθορίστηκαν τα μέτρα ποιότητας καναλιού που μπορούν να αξιοποιηθούν από ένα γνωστικό σύστημα για τη λειτουργία της επαίσθησης (απαίτηση (i)). Η κάλυψη των απαιτήσεων (iv) και (v) θα εξετασθεί αναλυτικά σε επόμενες παραγράφους. Αναφορικά με τις απαιτήσεις (ii) και (iii), οι περισσότεροι ερευνητές προτείνουν τη χρήση ενός καταναμημένου δικτύου αισθητήρων (sensor network) εξειδικευμένου στη μέτρηση των τρεχόντων επιπέδων παρεμβολής συναρτήσεως του φάσματος. Εναλλακτικά, ειδικά σε περιοχές όπου η εγκατάσταση της συγκεκριμένης υποδομής είναι αδύνατη, λόγω εδαφικής μορφολογίας, υψηλού κόστους ή περιορισμένου μεγέθους ακίνητης περιουσίας, τη λειτουργία της

επαίσθησης προτείνεται να την επιτελεί αποκλειστικά ο σταθμός βάσης, μέσω ενός τουλάχιστον εκ των πομποδεκτών του. Η λύση αυτή, αν και σαφώς πιο οικονομική, δεν ικανοποιεί την απαίτηση (iii) που παρατέθηκε στα προηγούμενα, με συνέπεια τη σημαντική υστέρησή της από πλευράς ποιότητας και πληρότητας των συλλεγέντων μετρήσεων. Αυτή η διαπίστωση αποτελεί εφιαλτήριο για την αναζήτηση μιας άλλης, πιο αποτελεσματικής προσέγγισης.

2.3.1.2 Αξιοποίηση των κινητών τερματικών στη λειτουργία της επαίσθησης

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, εισάγεται η ιδέα της αξιοποίησης των ίδιων των κινητών τερματικών των χρηστών ως κατανεμημένων επαισθητικών οργάνων ανίχνευσης του ραδιοπεριβάλλοντος και παραγωγής συναφών αναφορών για λογαριασμό του σταθμού βάσης στον οποίο ανήκουν. Στην υιοθέτηση της ιδέας αυτής και την αναβάθμιση του ρόλου των κινητών τερματικών στα γνωστικά δίκτυα συνηγορούν τα εξής:

- οι διαρκώς αυξανόμενες δυνατότητες των σημερινών κινητών τερματικών, από πλευράς υπολογιστικής ισχύος, μνήμης, αποθηκευτικού χώρου, επιλογών συνδεσιμότητας και πολυμεσικών ικανοτήτων
- η υψηλή χωρική τους διασπορά
- η εγγενής υποστήριξη των λειτουργιών της παρακολούθησης καναλιού και της εκτίμησης ποιότητας καναλιού
- η αποφυγή του κόστους αγοράς και εγκατάστασης νέου εξοπλισμού

Για τους λόγους αυτούς, η αξιοποίηση των κινητών τερματικών από τα γνωστικά δίκτυα, στο πλαίσιο της λειτουργίας της επαίσθησης, προβάλλει ως η πλέον ενδεδειγμένη λύση. Γενικότερα, η ιδέα της χρήσης των κινητών τερματικών για σκοπούς πέραν του προορισμού τους αυτού καθαυτού έχει γίνει, κατά καιρούς, αντικείμενο μελέτης, από την επιστημονική κοινότητα.

Ειδικότερα, στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος COSMOS [60]-[61], διερευνήθηκε η δυνατότητα παροχής στους χρήστες δικτυακών υπηρεσιών κοινοτήτων και κινητών λύσεων (Community Online Services and Mobile Solutions), καθώς και η κοινωνική αποδοχή αυτών. Σύμφωνα με την υλοποίηση του συγκεκριμένου προγράμματος, οι χρήστες οργανώνονταν σε εικονικές κοινότητες και μπορούσαν, υπό τις κατάλληλες συνθήκες, να επικοινωνήσουν μεταξύ τους ή να αλληλεπιδράσουν. Επιπρόσθετα, έγινε και μια πρώτη, επιφανειακή προσέγγιση στα

θέματα της δημιουργίας περιεχομένου (προς διαμοιρασμό) και της αξιοποίησης των διαθέσιμων στα τερματικά δεδομένων.

Η δημιουργία υπηρεσιών για κινητές κοινότητες τερματικών έχει γίνει, επίσης, αντικείμενο μελέτης του ερευνητικού προγράμματος DBGlobe [62]-[63]. Ο σκοπός του προγράμματος DBGlobe ήταν η ανάπτυξη ενός συστήματος διαχείρισης δεδομένων με στόχο τη μοντελοποίηση, τη δεικτοδότηση και την αναζήτηση δεδομένων φιλοξενούμενων από κατανεμημένους, αυτόνομους, κινητούς ομότιμους κόμβους, εφαρμόζοντας μια υπηρεσιοστρεφή (service-oriented) προσέγγιση.

Τέλος, σύμφωνα με το ερευνητικό πρόγραμμα MOTIVE [64]-[67], τα κινητά τερματικά εξελίσσονται σε μια πανταχού παρούσα υπολογιστική πλατφόρμα. Ωστόσο, οι ικανότητες τους για τη συλλογή και επεξεργασία πληροφοριών υποχρησιμοποιούνται, παρόλο που τα ίδια συνιστούν μιας πρώτης τάξεως υποψήφιοι για να επωμισθούν το έργο της παρακολούθησης δικτυακών δεδομένων. Στα πλαίσια του MOTIVE, τα κινητά τερματικά αξιοποιούνται για τη διαφανή αποθήκευση, προεπεξεργασία και αποστολή προς το δίκτυο (για περαιτέρω επεξεργασία) ιστορικών πληροφοριών που απορρέουν από τα δεδομένα παρακολούθησης. Στα πλαίσια των δραστηριοτήτων του, το συγκεκριμένο πρόγραμμα προσδιόρισε μια πολυστρωματική συστημική αρχιτεκτονική και λειτουργικότητα για την αντιμετώπιση των θεμάτων της πρώιμης επεξεργασίας των δεδομένων στην πλευρά των τερματικών, του ελέγχου του τρόπου και του χρόνου διαμοιρασμού των πληροφοριών, του ελέγχου της μεταφοράς των δεδομένων μέσω του δικτύου, της τελικής επεξεργασίας και αποθήκευσης των δεδομένων στην πλευρά του δικτύου και της συλλογής δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

Οι στόχοι των παραπάνω προγραμμάτων και οι ερευνητικές δραστηριότητες που αναπτύχθηκαν στα πλαίσιά τους καταδεικνύουν με σαφή τρόπο ότι τα κινητά τερματικά θα αρχίσουν να αναλαμβάνουν, σταδιακά, ρόλους πέρα από εκείνους που έχουμε συνηθίσει ως καθιερωμένους, καθώς, επίσης, και να επιμερίζονται ευθύνες με τις οντότητες του δικτύου, όσον αφορά την υποστήριξη και παροχή υπηρεσιών και τις λειτουργίες διαχείρισης του δικτύου.

2.3.1.3 Καθορισμός σχημάτων επαίσθησης και διατύπωση σεναρίων λειτουργίας

Υπάρχουν δύο διαφορετικά σενάρια αξιοποίησης των κινητών τερματικών για τη λειτουργία της επαίσθησης. Αυτό συμβαίνει, επειδή, με εξαίρεση τη θερμοκρασία

παρεμβολών (IT), ο υπολογισμός των υπόλοιπων μέτρων απαιτεί τη μετάδοση ενός σήματος από τον πομπό και την επεξεργασία του σήματος αυτού από το δέκτη. Κατά συνέπεια, η διαδικασία υπολογισμού των μεγεθών SINR, BER, BEP, SER, SEP και FER (παράγραφος 2.2.1) προϋποθέτει κατάλληλη συνεργασία ανάμεσα στο σταθμό βάσης και τα κινητά τερματικά. Σε αδρές γραμμές, η εν λόγω διαδικασία περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

- αποστολή εντολής από το σταθμό βάσης στα κινητά τερματικά της περιοχής ή σε μέρος αυτών να συντονιστούν προσωρινά σε μια ζώνη συχνοτήτων
- εκτέλεση μετρήσεων από τα τερματικά (π.χ., υπολογισμός SINR, BER, κ.λπ.), επί τη βάσει πιλοτικών σημάτων που ο σταθμός βάσης εκπέμπει σε αυτήν τη ζώνη συχνοτήτων
- επανασυντονισμός στην αρχική ζώνη συχνοτήτων και ενημέρωση του σταθμού βάσης για τα αποτελέσματα των μετρήσεων

Από την άλλη πλευρά, η διαδικασία υπολογισμού της θερμοκρασίας παρεμβολών είναι συγκριτικά πολύ απλούστερη, καθώς δεν υπάρχει ανάγκη χρήσης πιλοτικών σημάτων ούτε ανάγκη συντονισμένης μετάδοσης μεταξύ του σταθμού βάσης και των τερματικών. Η διαδικασία περιλαμβάνει μόνο το συντονισμό του τερματικού σε μια υπό εξέταση ζώνη συχνοτήτων και τον υπολογισμό της λαμβανόμενης ισχύος στη ζώνη αυτή. Η λαμβανόμενη αυτή ισχύς αντιπροσωπεύει και την αντιληπτή ισχύ παρεμβολών, εντός της συγκεκριμένης ζώνης, στη θέση του τερματικού, καθώς προέρχεται μόνο από ανεπιθύμητα σήματα.

Κατά συνέπεια, η διαδικασία επαίσθησης της θερμοκρασίας παρεμβολών μπορεί να εκκινείται με πρωτοβουλία των ίδιων των κινητών τερματικών, επί παραδείγματι στις περιόδους αδράνειάς τους. Σε ένα τέτοιο σχήμα επαίσθησης, ένα τερματικό εκτελεί τις ακόλουθες ενέργειες:

- επιλογή, κατά τυχαίο τρόπο, μιας εναλλακτικής ζώνης συχνοτήτων και προσωρινός συντονισμός σε αυτήν
- πραγματοποίηση μετρήσεων για την επικρατούσα θερμοκρασία παρεμβολών
- επανασυντονισμός στην αρχική ζώνη συχνοτήτων και ενημέρωση του σταθμού βάσης για τα αποτελέσματα των μετρήσεων

Από τα παραπάνω συνάγεται ότι μπορούν να καθοριστούν δύο διαφορετικά σχήματα επαίσθησης, με βάση το ποιος εκκινεί τη διαδικασία επαίσθησης. Τα δύο αυτά σχήματα είναι:

- *Σχήμα επαίσθησης ελεγχόμενης από το σταθμό βάσης:* Στο σχήμα αυτό, ο σταθμός βάσης είναι αυτός που δίνει στα κινητά τερματικά την εντολή εκκίνησης της πραγματοποίησης μετρήσεων. Επίσης, γνωστοποιεί όλες τις απαραίτητες παραμέτρους της διαδικασίας (π.χ., πότε και σε ποια ζώνη συχνοτήτων θα γίνουν οι μετρήσεις). Το σχήμα αυτό είναι απαραίτητο να ακολουθείται όταν απαιτείται η χρήση πιλοτικών σημάτων για την πραγματοποίηση των μετρήσεων (π.χ., περιπτώσεις υπολογισμού μέτρων όπως το SINR, το BER, κ.λπ.). Είναι προαιρετική η χρησιμοποίησή του όταν δε γίνεται χρήση πιλοτικών σημάτων κατά τη διενέργεια μετρήσεων (π.χ., περίπτωση μέτρησης του IT).
- *Σχήμα αυτόνομης επαίσθησης:* Στο σχήμα αυτό, η ίδια η οντότητα που πραγματοποιεί τις μετρήσεις, αποφασίζει και το πότε και το τι θα μετρήσει. Η χρησιμοποίηση του σχήματος αυτού είναι δυνατή μόνο για διαδικασίες μέτρησης που δεν κάνουν χρήση πιλοτικών σημάτων (π.χ., περίπτωση μέτρησης του IT).

Η καταλληλότητα των δύο σχημάτων ως προς τον τύπο μετρήσεων που μπορούν να υποστηρίξουν απεικονίζεται συγκεντρωτικά στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 2-3).

Πίνακας 2-3. Υποστήριξη τύπων μετρήσεων από τα σχήματα επαίσθησης

	<i>Σχήμα επαίσθησης ελεγχόμενης από το σταθμό βάσης</i>	<i>Σχήμα αυτόνομης επαίσθησης</i>
Μετρήσεις με χρήση πιλοτικών σημάτων	•	
Μετρήσεις χωρίς τη χρήση πιλοτικών σημάτων	•	•

Ως γνωστόν, οι μετρήσεις ποιότητας καναλιού πρέπει να πραγματοποιούνται στην πλευρά του δέκτη. Αυτό σημαίνει, με άλλα λόγια, ότι σε ραδιοσυχνότητες που προορίζονται για τη φιλοξενία καναλιών καθόδου οι μετρήσεις πρέπει να διενεργούνται από τα τερματικά της περιοχής, όπως έγινε κατανοητό και από τα προηγούμενα. Αντιθέτως, σε ραδιοσυχνότητες που προορίζονται για τη φιλοξενία

καναλιών ανόδου οι μετρήσεις πρέπει να διενεργούνται από τον ίδιο το σταθμό βάσης. Και για την περίπτωση αυτή, όμως, τα σχήματα επαίσθησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι τα ίδια που παρουσιάστηκαν και παραπάνω.

Συγκεκριμένα, για την περίπτωση της ζεύξης ανόδου, σύμφωνα με το σχήμα επαίσθησης ελεγχόμενης από το σταθμό βάσης, ακολουθούνται τα εξής βήματα:

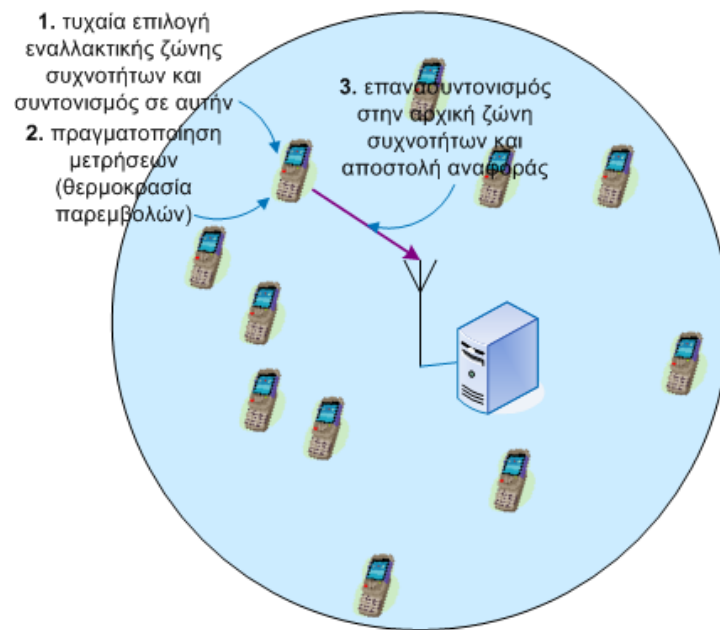
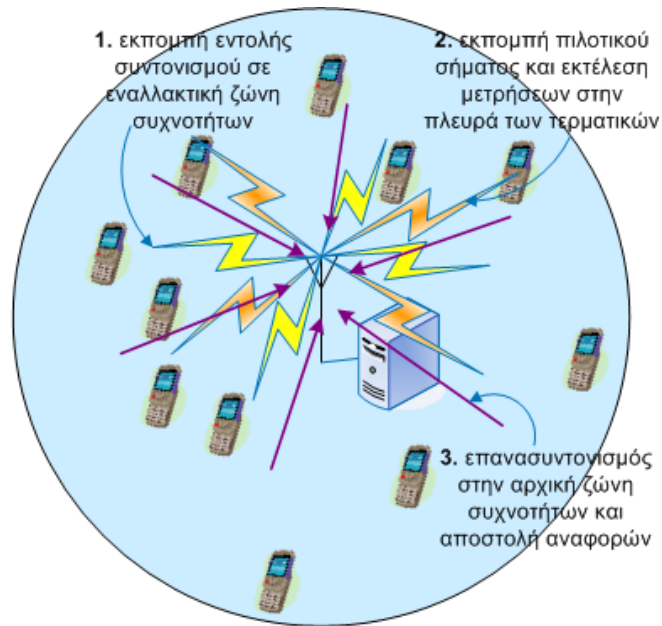
- ο σταθμός βάσης επιλέγει ένα τερματικό της περιοχής του και του δίνει εντολή να συντονιστεί προσωρινά σε μια συγκεκριμένη υποψήφια ζώνη συχνοτήτων, για το σκοπό της πραγματοποίησης μετρήσεων ζεύξης ανόδου
- αφού ολοκληρώσει το συντονισμό του, το τερματικό αναλαμβάνει την εκπομπή πιλοτικού σήματος προς το σταθμό βάσης
- με την ολοκλήρωση της εκπομπής, τόσο το τερματικό όσο και ο σταθμός βάσης επιστρέφουν στην αρχική ζώνη συχνοτήτων

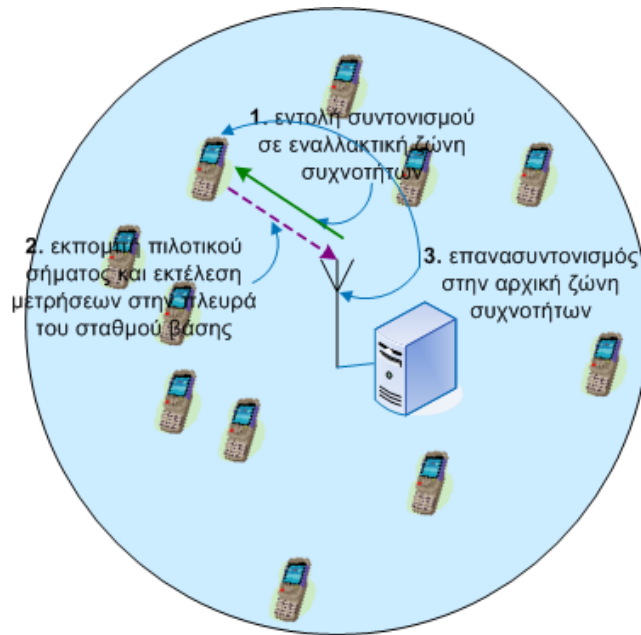
Όπως εύκολα μπορεί κανείς να παρατηρήσει, λοιπόν, ο σταθμός βάσης επιλέγει ένα τερματικό ούτως ώστε το τελευταίο να λειτουργήσει ως πομπός της πιλοτικής ακολουθίας και ο ίδιος ως δέκτης της. Ο λόγος που επιλέγεται ένα και μόνο τερματικό για να επιτελέσει τη λειτουργία του πομπού είναι προφανής: αν διαταχτούν παραπάνω από ένα κινητά να λειτουργήσουν ως πομποί της ακολουθίας, θα πρέπει η εκπομπή τους να ρυθμιστεί με βάση ένα σχήμα πολλαπλής πρόσβασης (π.χ., TDMA), κάτι που αυξάνει την πολυπλοκότητα της διαδικασίας επαίσθησης, χωρίς να προσδίδει επιπλέον όφελος.

Το σενάριο λειτουργίας του αυτόνομου σχήματος επαίσθησης είναι απλούστερο και για την περίπτωση της ζεύξης ανόδου. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με το σχήμα αυτό, ακολουθούνται τα εξής βήματα:

- ο σταθμός βάσης επιλέγει κατά τυχαίο τρόπο μια εναλλακτική ζώνη συχνοτήτων και συντονίζεται προσωρινά σε αυτήν
- πραγματοποιεί μετρήσεις για την επικρατούσα θερμοκρασία παρεμβολών στη συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων
- με το πέρας των μετρήσεων, επανασυντονίζεται στην αρχική ζώνη συχνοτήτων

Το Σχήμα 2-4 αντιπαραβάλλει τα σενάρια λειτουργίας των δύο σχημάτων επαίσθησης, τόσο για την περίπτωση μετρήσεων στη ζεύξη καθόδου όσο και για εκείνη στη ζεύξη ανόδου.





Σχήμα 2-4. Λειτουργία σχημάτων επαίσθησης στις ζεύξεις καθόδου και ανόδου

2.3.1.4 Ανάθεση πόρων για τη λειτουργία της επαίσθησης

Η εκτέλεση της λειτουργίας της επαίσθησης προϋποθέτει το συντονισμό σε μια ζώνη συχνοτήτων άλλη από εκείνη ή εκείνες που χρησιμοποιούνται στο παρόν κελί για την παροχή υπηρεσιών. Για την περίπτωση των τερματικών, αυτό σημαίνει ότι, προκειμένου να συμμετάσχουν σε μια διαδικασία επαίσθησης, θα πρέπει να συντονίσουν μία από τις αναδιαρθρώσιμες δικτυακές διεπαφές τους στην υπό

εξέταση ζώνη συχνοτήτων. Σε περίπτωση που διαθέτουν μόνο μία δικτυακή διεπαφή, τότε μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτήν για να συμμετάσχουν στη διαδικασία, αρκεί προφανώς να βρίσκονται σε κατάσταση αδράνειας (idle mode).

Για την περίπτωση του σταθμού βάσης, υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις που μπορούν να υιοθετηθούν. Η πρώτη συνίσταται στην αποκλειστική χρήση ενός πομποδέκτη του σταθμού ως πομποδέκτη επαίσθησης. Αυτό προϋποθέτει, φυσικά, ότι ο σταθμός βάσης έχει στη διάθεσή του παραπάνω του ενός πομποδεκτών. Πράγματι, στην επιστημονική κοινότητα, πολλοί είναι εκείνοι οι ερευνητές που οραματίζονται την αρχιτεκτονική των γνωστικών συστημάτων με μία διεπαφή αφιερωμένη στη διαδικασία της επαίσθησης. Η ιδέα αυτή αντανακλάται σε μεγάλο βαθμό και στα SDR πρωτότυπα που έχουν σχεδιαστεί μέχρι σήμερα.

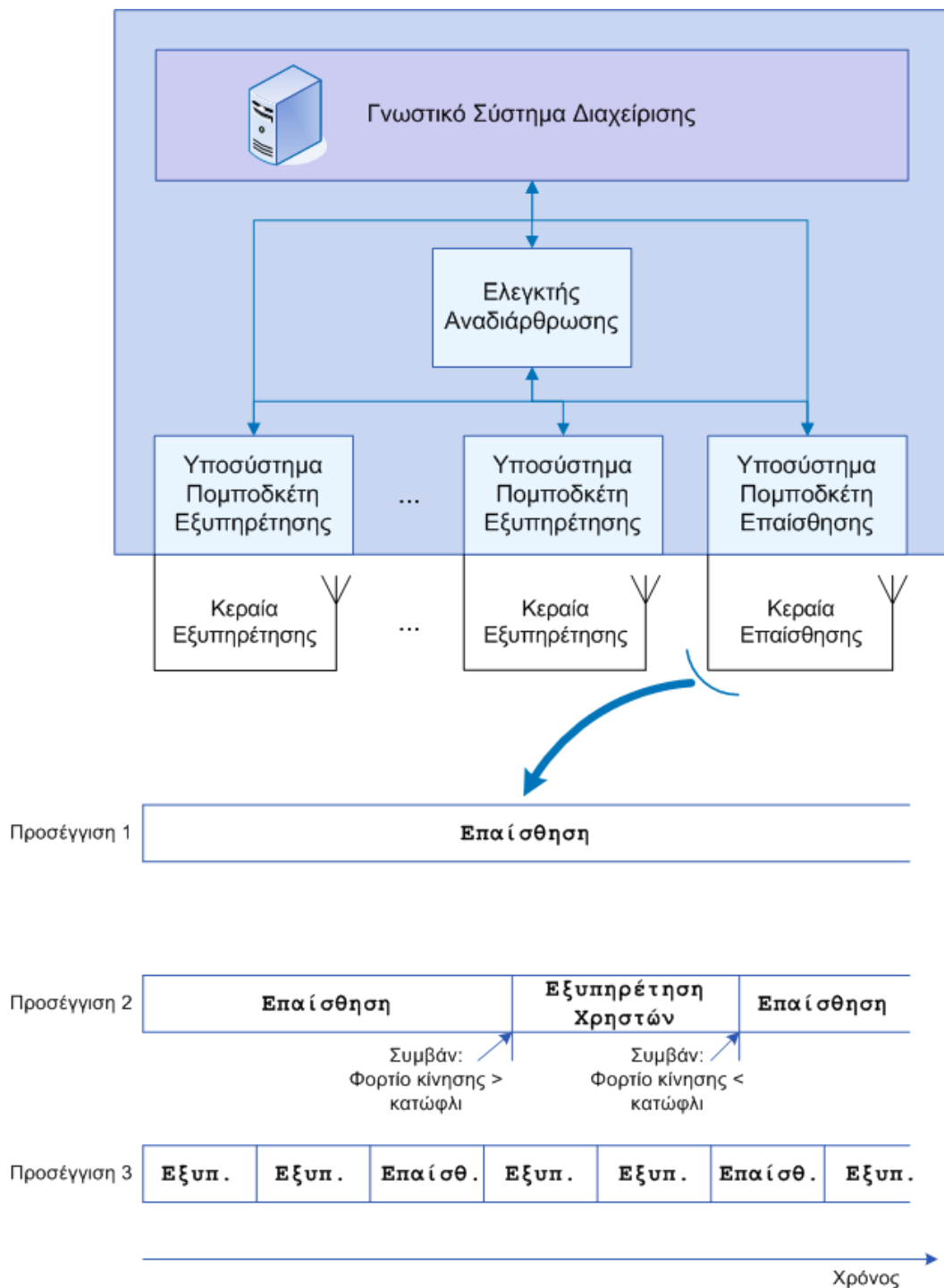
Μια βελτιωμένη προσέγγιση είναι η χρήση της διεπαφής επαίσθησης για την εξυπηρέτηση των χρηστών, αντί της παρακολούθησης του περιβάλλοντος του γνωστικού συστήματος, όταν οι περιστάσεις το επιβάλλουν. Σε έκτακτες, δηλαδή, περιπτώσεις, όποτε το φορτίο κίνησης που πρέπει να εξυπηρετηθεί είναι πολύ υψηλό, ο σταθμός βάσης θα πρέπει να κάνει διαθέσιμη για την παροχή υπηρεσιών και τη διεπαφή αυτή.

Η τρίτη προσέγγιση συνίσταται στην εκ περιτροπής χρήση μιας εκ των διεπαφών τόσο για τους σκοπούς της επαίσθησης όσο και για τους σκοπούς της εξυπηρέτησης των χρηστών. Η προσέγγιση αυτή δεσμεύει τον πομποδέκτη επαίσθησης να χρησιμοποιεί ένα σχήμα πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης χρόνου στο οποίο ένα υποσύνολο των χρονοσχισμών αξιοποιούνται για την επαίσθηση, ενώ οι υπόλοιπες αφιερώνονται στην εξυπηρέτηση των χρηστών. Πρόκειται, ωστόσο, για ένα λογικό συμβιβασμό μεταξύ των απαιτήσεων της επιτυχούς επιτέλεσης της λειτουργίας της επαίσθησης και της αξιόλογης συνεισφοράς στην εξυπηρέτηση της κίνησης.

Πέραν αυτών, είναι απαραίτητο να σημειωθεί ότι η χρήση του σχήματος της ελεγχόμενης από το σταθμό βάσης επαίσθησης (αντί του σχήματος αυτόνομης επαίσθησης) επιβαρύνει τον πομποδέκτη επαίσθησης με την ανάγκη συχνών αλλαγών συχνοτήτων, αφήνοντάς του λιγότερα περιθώρια εξυπηρέτησης μέρους του φορτίου κίνησης. Από την άλλη, η χρήση του σχήματος αυτόνομης επαίσθησης για τη ζεύξη καθόδου δεν απαιτεί το συντονισμό του σταθμού βάσης στις εναλλακτικές ζώνες συχνοτήτων και, ως εκ τούτου, εμφανίζει ένα σημαντικό συγκριτικό πλεονέκτημα, ιδιαίτερα σε περιστάσεις σχετικά υψηλού φορτίου κίνησης. Αυτό σημαίνει ότι, όποτε υπάρχει ανάγκη, ο σταθμός βάσης μπορεί να ευνοήσει τη χρήση του σχήματος

αυτόνομης επαίσθησης και να ελαττώσει αντίστοιχα τη χρήση του σχήματος της ελεγχόμενης από τον ίδιο επαίσθησης, προκειμένου να απελευθερώσει περισσότερους πόρους για την παροχή υπηρεσιών στους χρήστες.

Οι προσεγγίσεις που αναλύθηκαν στα προηγούμενα παρουσιάζονται εποπτικά στο Σχήμα 2-5.



Σχήμα 2-5. Προσεγγίσεις ανάθεσης πόρων του γνωστικού σταθμού βάσης για τη λειτουργία της επαίσθησης

2.3.1.5 Αυτόνομη και μη αυτόνομη επαίσθηση

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το σχήμα αυτόνομης επαίσθησης απαιτεί τη χρήση μέτρων που δε στηρίζονται σε πιλοτικές ακολουθίες για τον υπολογισμό τους. Το στοιχείο αυτό δίνει ένα σαφές προβάδισμα στο μέτρο της θερμοκρασίας παρεμβολών, έναντι των υπολοίπων μέτρων της παραγράφου 2.2.1 (SINR, BER, κ.λπ.), καθώς αυτά μπορούν να υποστηριχθούν μόνο από το σχήμα της ελεγχόμενης από το σταθμό βάσης επαίσθησης. Το τελευταίο, επίσης, αφήνει λιγότερους πόρους διαθέσιμους στο σταθμό βάσης για την εξυπηρέτηση χρηστών.

Επιχειρώντας, στα πλαίσια της γνωστικής λειτουργίας της επαίσθησης, μια πλήρη σύγκριση του SINR (που είναι το πιο αντιπροσωπευτικό και συχνά χρησιμοποιούμενο από τα βασιζόμενα σε πιλοτικές ακολουθίες μέτρα) με τη θερμοκρασία παρεμβολών (IT), καταλήγουμε στα εξής σημεία:

- *Πλεονεκτήματα της βασιζόμενης στο IT επαίσθησης*
 - δεν απαιτεί συγχρονισμένη εκπομπή και λήψη μεταξύ σταθμού βάσης και τερματικών
 - δεν απαιτεί τη χρήση πιλοτικών σημάτων
 - παρέχει τη δυνατότητα λήψης μετρήσεων με πρωτοβουλία των ίδιων των τερματικών (σχήμα αυτόνομης επαίσθησης)
 - δεν είναι αναγκαία η δέσμευση αποκλειστικών για την επαίσθηση ραδιοπόρων (π.χ., πομποδέκτης αφιερωμένος στην επαίσθηση, δέσμευση χρονοσχισμών για την επαίσθηση) στην πλευρά του σταθμού βάσης
 - έχει χαμηλότερη πολυπλοκότητα υπολογισμού
- *Πλεονεκτήματα της βασιζόμενης στο SINR επαίσθησης*
 - συνιστά μεν ένα μέγεθος πιο πολύπλοκο, αλλά και ταυτόχρονα πιο ισχυρό και αποτελεσματικό, καθώς αποτελεί μέτρο σύγκρισης του επιθυμητού σήματος με τα ανεπιθύμητα σήματα, επομένως περικλείει περισσότερη πληροφορία

Συμπερασματικά, χωρίς να είναι δυνατό να παραγκωνίσει πλήρως τη χρησιμοποίηση των άλλων μέτρων, η θερμοκρασία παρεμβολών παρέχει ένα απλό, εύελκτο και με ελάχιστη επιβάρυνση στο γνωστικό σύστημα εργαλείο επαίσθησης, συγκριτικό πλεονέκτημα που δεν έχει μέχρι στιγμής συνειδητοποιηθεί πλήρως από την επιστημονική κοινότητα.

Στο εξής, θα γίνεται αναφορά στην πρώτη από τις δύο παραπάνω κατηγορίες διαδικασιών επαίσθησης με τους εξής ταυτόσημους όρους:

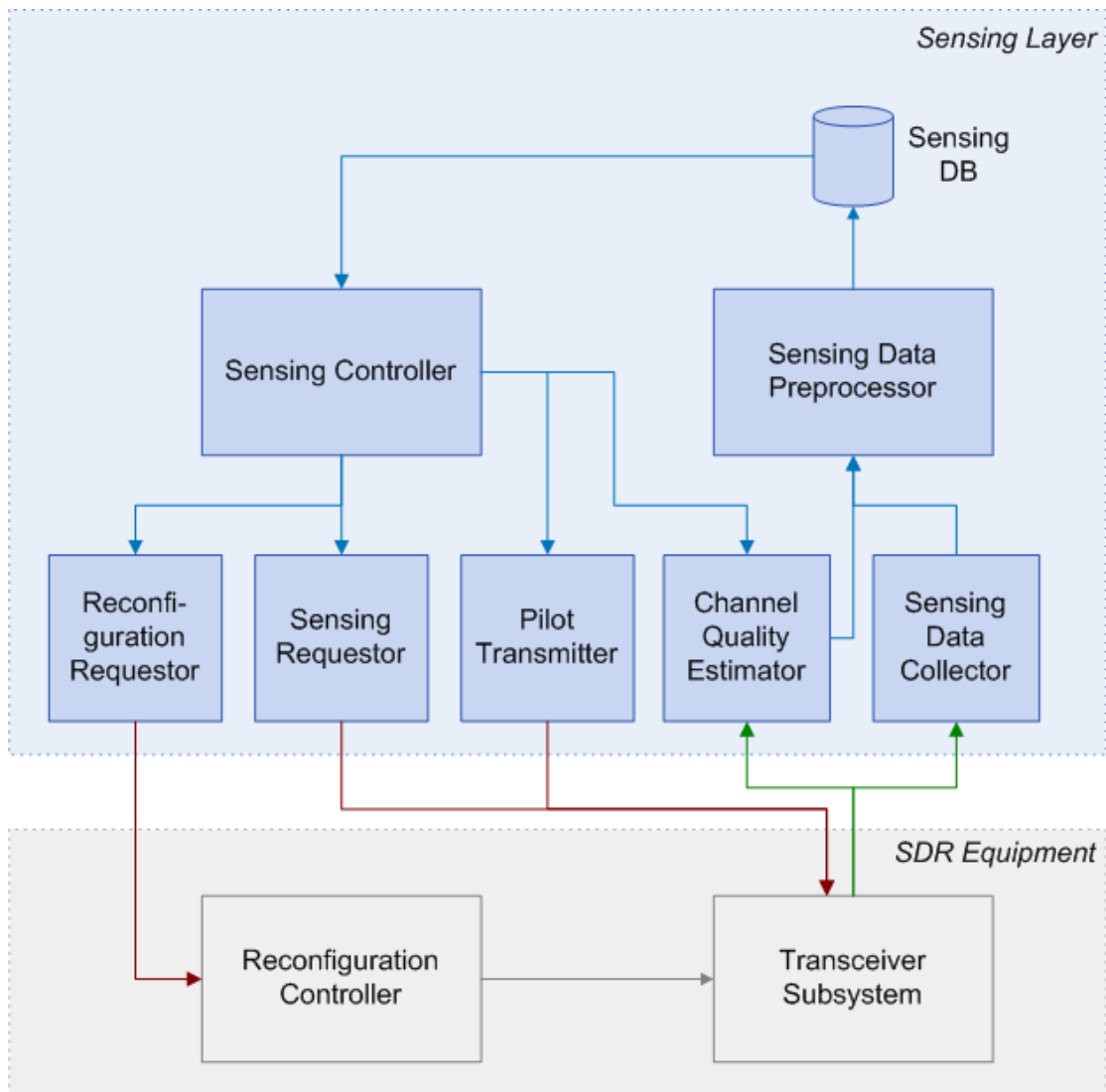
- *Επαίσθηση βασισόμενη στο IT (θερμοκρασία παρεμβολών)*
- *Επαίσθηση χωρίς τη χρήση πιλοτικών σημάτων*
- *Αυτόνομη επαίσθηση*

Στη δε δεύτερη από τις δύο παραπάνω κατηγορίες διαδικασιών επαίσθησης θα γίνεται αναφορά με τους εξής ταυτόσημους όρους:

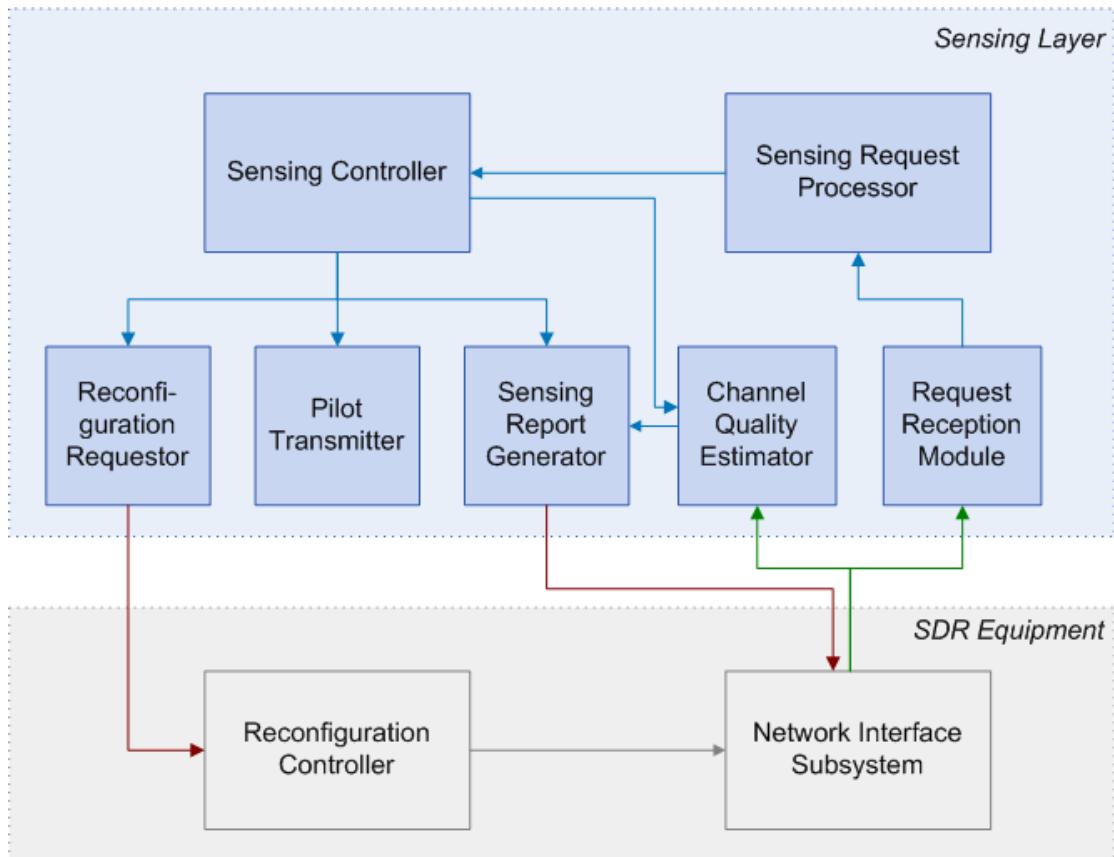
- *Επαίσθηση βασισόμενη στο SINR (λόγος σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο)*
- *Βασισόμενη σε πιλοτικά σήματα επαίσθηση*
- *Μη αυτόνομη επαίσθηση*

2.3.2 Αρχιτεκτονική επαίσθησης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η υποστήριξη της λειτουργίας της επαίσθησης απαιτεί την ύπαρξη κατάλληλης λειτουργικότητας τόσο στην πλευρά του σταθμού βάσης όσο και στην πλευρά των τερματικών. Το Σχήμα 2-6 παρουσιάζει την προτεινόμενη λειτουργική αρχιτεκτονική αναφοράς (reference functional architecture), στην πλευρά του σταθμού βάσης, ενώ το Σχήμα 2-7 την προτεινόμενη λειτουργική αρχιτεκτονική αναφοράς, στην πλευρά του τερματικού.



Σχήμα 2-6. Λειτουργική αρχιτεκτονική αναφοράς γνωστικού σταθμού βάσης



Σχήμα 2-7. Λειτουργική αρχιτεκτονική αναφοράς γνωστικού τερματικού

2.3.2.1 Προτεινόμενη λειτουργική αρχιτεκτονική επαίσθησης του σταθμού βάσης

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-6, η προτεινόμενη αρχιτεκτονική του σταθμού βάσης περιλαμβάνει τις ακόλουθες συνιστώσες:

- *Συλλέκτης Δεδομένων Επαίσθησης (Sensing Data Collector)*: Η συνιστώσα αυτή είναι επιφορτισμένη με τη λήψη και συγκέντρωση μετρήσεων που προέρχονται από τα κινητά τερματικά της περιοχής του σταθμού.
- *Εκτιμητής Ποιότητας Καναλιού (Channel Quality Estimator)*: Η μονάδα αυτή είναι υπεύθυνη για τον υπολογισμό των διαφόρων μέτρων ποιότητας καναλιού, οποτεδήποτε ο σταθμός βάσης χρησιμοποιεί κάποιον από τους πομποδέκτες του για τη λήψη μετρήσεων επαίσθησης.
- *Προ-επεξεργαστής Δεδομένων Επαίσθησης (Sensing Data Preprocessor)*: Η συγκεκριμένη συνιστώσα είναι υπεύθυνη για τη συλλογή των μετρήσεων που προέρχονται είτε από το Συλλέκτη Δεδομένων Επαίσθησης είτε από τον Εκτιμητή Ποιότητας Καναλιού και την αποθήκευσή τους στη *Βάση Δεδομένων (ΒΔ) Επαίσθησης (Sensing Database)*.

- *Ελεγκτής Επαίσθησης (Sensing Controller)*: Ο Ελεγκτής Επαίσθησης αποτελεί βασική συνιστώσα του συστήματος. Είναι υπεύθυνη για τον προγραμματισμό των μετρήσεων επαίσθησης και τον καθορισμό των παραμέτρων των διαδικασιών μέτρησης.
- *Αιτών Αναδιάρθρωσης (Reconfiguration Requestor)*: Η συνιστώσα αυτή αναλαμβάνει, κατ' εντολή του Ελεγκτή Επαίσθησης, να επικοινωνήσει με τον *Ελεγκτή Αναδιάρθρωσης του SDR Εξοπλισμού (SDR Equipment)*, προκειμένου να του ζητήσει τη διεκπεραίωση μιας συγκεκριμένης αναδιάρθρωσης (για τους σκοπούς της επαίσθησης).
- *Μεταδότης Πιλοτικού Σήματος (Pilot Transmitter)*: Η συγκεκριμένη μονάδα είναι υπεύθυνη για τη μετάδοση, κατ' εντολή του Ελεγκτή Επαίσθησης, των κατάλληλων πιλοτικών σημάτων στα κινητά τερματικά.
- *Αιτών Επαίσθησης (Sensing Requestor)*: Ρόλος της μονάδας αυτής είναι η αποστολή αιτήσεων προς τα κινητά τερματικά για τη λήψη επαισθητικών μετρήσεων. Τα μηνύματα αυτά περιλαμβάνουν και τις κατάλληλες οδηγίες για τη διεκπεραίωση της εκτέλεσης των μετρήσεων.

Οι παραπάνω συνιστώσες είναι οργανωμένες στο *Στρώμα Επαίσθησης (Sensing Layer)* της λειτουργικής αρχιτεκτονικής του γνωστικού σταθμού βάσης, το οποίο αλληλεπιδρά προς τα κάτω με το στρώμα του *SDR Εξοπλισμού (SDR Equipment)*, ενώ προς τα άνω με το *Στρώμα Συλλογιστικής (Reasoning Layer)*, όπως θα παρουσιαστεί σε επόμενο κεφάλαιο. Αν και στο Σχήμα 2-6 εικονίζεται μόνο ένα *Υποσύστημα Πομποδέκτη (Transceiver Subsystem)*, ο SDR Εξοπλισμός ενός σταθμού βάσης μπορεί, εν γένει, να περιλαμβάνει παραπάνω από έναν αναδιαρθρώσιμους πομποδέκτες.

2.3.2.2 Προτεινόμενη λειτουργική αρχιτεκτονική επαίσθησης του τερματικού

Κατ' αντιστοιχία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-7, η προτεινόμενη αρχιτεκτονική του τερματικού περιλαμβάνει τις ακόλουθες συνιστώσες:

- *Παραλήπτης Αιτήσεων (Request Reception Module)*: Η συνιστώσα αυτή είναι επιφορτισμένη με τη λήψη αιτήσεων που προέρχονται από το σταθμό βάσης και έχουν ως αντικείμενο την πραγματοποίηση μετρήσεων επαίσθησης.

- *Εκτιμητής Ποιότητας Καναλιού (Channel Quality Estimator)*: Η μονάδα αυτή είναι υπεύθυνη για τον υπολογισμό των διαφόρων μέτρων ποιότητας καναλιού, οποτεδήποτε το τερματικό χρησιμοποιεί κάποια από τις δικτυακές διεπαφές του για τη λήψη μετρήσεων επαίσθησης.
- *Επεξεργαστής Αιτήσεων Επαίσθησης (Sensing Request Processor)*: Η συγκεκριμένη συνιστώσα είναι υπεύθυνη για τη συντακτική ανάλυση των αιτήσεων που λαμβάνονται από τον Παραλήπτη Αιτήσεων του τερματικού.
- *Ελεγκτής Επαίσθησης (Sensing Controller)*: Ο Ελεγκτής Επαίσθησης αποτελεί βασική συνιστώσα του συστήματος. Είναι υπεύθυνη για τον προγραμματισμό των μετρήσεων επαίσθησης και τον καθορισμό των παραμέτρων των διαδικασιών μέτρησης.
- *Αιτών Αναδιάρθρωσης (Reconfiguration Requestor)*: Η συνιστώσα αυτή αναλαμβάνει, κατ' εντολή του Ελεγκτή Επαίσθησης, να επικοινωνήσει με τον *Ελεγκτή Αναδιάρθρωσης του SDR Εξοπλισμού (SDR Equipment)*, προκειμένου να του ζητήσει τη διεκπεραίωση μιας συγκεκριμένης αναδιάρθρωσης (για τους σκοπούς της επαίσθησης).
- *Μεταδότης Πιλοτικού Σήματος (Pilot Transmitter)*: Η συγκεκριμένη μονάδα είναι υπεύθυνη για την εκπομπή, κατ' εντολή του Ελεγκτή Επαίσθησης, των κατάλληλων πιλοτικών σημάτων προς το σταθμό βάσης.
- *Δημιουργός Αναφοράς Επαίσθησης (Sensing Report Generator)*: Ρόλος της συγκεκριμένης μονάδας είναι η ενθυλάκωση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων σε μια συγκεκριμένη δομή μηνυμάτων και η αποστολή των μηνυμάτων αυτών προς το σταθμό βάσης.

Οι παραπάνω συνιστώσες είναι οργανωμένες στο *Στρώμα Επαίσθησης (Sensing Layer)* της λειτουργικής αρχιτεκτονικής του τερματικού, το οποίο αλληλεπιδρά προς τα κάτω με το στρώμα του *SDR Εξοπλισμού (SDR Equipment)*. Αν και στο Σχήμα 2-7 εικονίζεται μόνο ένα *Υποσύστημα Δικτυακής Διεπαφής (Network Interface Subsystem)*, ο SDR Εξοπλισμός ενός τερματικού μπορεί να περιλαμβάνει και παραπάνω από μία αναδιαρθρώσιμες δικτυακές διεπαφές.

2.3.3 Πρωτόκολλο επικοινωνίας του στρώματος επαίσθησης

2.3.3.1 Εισαγωγή στο προτεινόμενο πρωτόκολλο επαίσθησης

Η συνεννόηση μεταξύ σταθμού βάσης και τερματικών, για την εκτέλεση της λειτουργίας της επαίσθησης, απαιτεί τον καθορισμό και τη χρησιμοποίηση συγκεκριμένου πρωτοκόλλου επικοινωνίας. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, το προτεινόμενο *Πρωτόκολλο Επικοινωνίας του Στρώματος Επαίσθησης (Sensing Layer Communication Protocol)* περιλαμβάνει δύο τύπους μηνυμάτων:

- τα μηνύματα αίτησης επαίσθησης (*sensing request messages*) και
- τα μηνύματα αναφοράς επαίσθησης (*sensing report messages*)

Για τους σκοπούς της διατριβής, επελέγη τα μηνύματα αυτά να κωδικοποιηθούν σε γλώσσα XML (Extensible Markup Language), η οποία αποτελεί σήμερα την πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενη γλώσσα σήμανσης για έγγραφα και μηνύματα που περιέχουν δομημένη πληροφορία. Βασικός σκοπός της XML είναι η διευκόλυνση του διαμοιρασμού δομημένης πληροφορίας μεταξύ διαφορετικών, απομακρυσμένων πληροφοριακών συστημάτων. Η XML είναι γλώσσα βασισμένη σε κείμενο και έχει σχεδιαστεί ώστε να είναι αναγνώσιμη και κατανοητή όχι μόνο από μηχανές αλλά και από τον άνθρωπο.

2.3.3.2 Δομή των μηνυμάτων αίτησης επαίσθησης

Γενική μορφή του μηνύματος αίτησης επαίσθησης

Στο Σχήμα 2-8 παρατίθεται ένα χαρακτηριστικό δείγμα μηνύματος αίτησης επαίσθησης. Ένα τέτοιο μήνυμα αποστέλλεται από το γνωστικό σταθμό βάσης προς τα κινητά τερματικά της περιοχής του και περιέχει οδηγίες για την πραγματοποίηση επαισθητικών μετρήσεων που ο σταθμός θεωρεί αναγκαίες. Η αποστολή των αιτήσεων από το σταθμό βάσης μπορεί να γίνει με έναν από τους εξής τρόπους:

- αποστολή προς όλα τα τερματικά της περιοχής κάλυψης, μέσω καναλιού ευρυεκπομπής (broadcast channel)
- αποστολή προς μέρος των τερματικών, με χρήση αποκλειστικών καναλιών σημείου-προς-σημείο (dedicated point-to-point channels)

Μια τυπική αίτηση επαίσθησης πρέπει να περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες πτυχές/παραμέτρους μιας διαδικασίας επαίσθησης, προκειμένου αυτή να είναι εφαρμόσιμη:

- πληροφορίες για τον αιτούντα σταθμό βάσης
- χρονική ένδειξη παραγωγής της αίτησης
- σήμανση για το επίπεδο κρισιμότητας της αίτησης
- εντολές για την υποχρεωτική ή μη συμμετοχή των τερματικών στη διαδικασία
- εντολές τροποποίησης ή και ακύρωσης προηγούμενων αιτήσεων επαίσθησης
- οδηγίες για τις μετρήσεις που θα πρέπει να πραγματοποιηθούν
- οδηγίες για τον τρόπο αποστολής των αποτελεσμάτων των μετρήσεων
- τυχόν επιπρόσθετες απαιτήσεις του σταθμού, σχετικά με την αποστολή συνοδευτικών στοιχείων

Οι πληροφορίες για τον αιτούντα σταθμό βάσης είναι απαραίτητες προκειμένου η αντίστοιχη αναφορά να μην παραδοθεί, κατά λάθος, από το τερματικό σε σταθμό άλλον από εκείνον που πραγματικά αφορά (π.χ., σε περίπτωση διαπομπής του τερματικού αφότου ολοκληρωθεί η σύνταξη της αναφοράς αλλά προτού ξεκινήσει η αποστολή της). Μάλιστα, μια κρίσιμη λεπτομέρεια είναι ότι, σε περίπτωση διαπομπής ενός τερματικού σε άλλο κελί, το σύστημα επαίσθησης του τερματικού διαγράφει τυχόν εκκρεμούσες εργασίες επαίσθησης και εγκαταλείπει την προσπάθεια παράδοσης τυχόν έτοιμων αναφορών επαίσθησης. Αυτή είναι μια λογική ενέργεια, αφού πλέον εξυπηρετείται από διαφορετικό (αυτόνομο) σταθμό βάσης.

Η χρονική ένδειξη παραγωγής της αίτησης βοηθά στην εκτίμηση της «παλαιότητας» του μηνύματος. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε περιπτώσεις καθυστερημένης παράδοσης του μηνύματος στον παραλήπτη του, κάτι όχι ασυνήθιστο κατά τη λειτουργία των συστημάτων κινητών επικοινωνιών. Η καθυστερημένη παράδοση μιας συγκεκριμένης αίτησης μπορεί να οδηγήσει σε παραλαβή μηνυμάτων (από το τερματικό) με σειρά διαφορετική από τη σειρά αποστολής τους (από το σταθμό βάσης). Ως εκ τούτου, σε περίπτωση «σύγκρουσης» των απαιτήσεων των δύο αιτήσεων (π.χ., χρονοπρογραμματισμός διαφορετικών διαδικασιών σε επικαλυπτόμενες χρονικές περιόδους), η χρονική ένδειξη παραγωγής εξακριβώνει ποια αίτηση είναι η νεότερη και άρα η εφαρμοστέα.

Η σήμανση για το επίπεδο κρισιμότητας της αίτησης υποδεικνύει στο τερματικό-παραλήπτη πόσο σημαντική θεωρείται από το σταθμό η αιτούμενη διαδικασία επαίσθησης. Το στοιχείο αυτό δίνει τη δυνατότητα στο τερματικό να ρυθμίσει τους πόρους που θα διαθέσει (π.χ., μνήμη και υπολογιστική ισχύ) για την επίτευξη της

συγκεκριμένης διαδικασίας επαίσθησης. Όσο υψηλότερο το επίπεδο κρισιμότητας, τόσο υψηλότερη προτεραιότητα θα αναθέσει το λειτουργικό σύστημα του τερματικού στη διεργασία της επαίσθησης, σε σύγκριση με την προτεραιότητα που θα αναθέσει στις διεργασίες που αντιστοιχούν στις υπόλοιπες τρέχουσες εφαρμογές του τερματικού (π.χ., εφαρμογή αναπαραγωγής μουσικής).

Οι εντολές για την υποχρεωτική ή μη συμμετοχή των τερματικών στη διαδικασία επαίσθησης καθορίζουν αν τα τερματικά-παραλήπτες απαιτείται οπωσδήποτε να συμμετάσχουν ή αν, αντίθετα, πρέπει να επιλέξουν, κατά τυχαίο τρόπο, τη συμμετοχή τους ή μη. Σκοπός της τυχαίας αυτής επιλογής είναι η με έντεχνο τρόπο ελάττωση του αριθμού των απαντήσεων που θα λάβει ο σταθμός βάσης και, συνεπώς, η μείωση της συμφόρησης στα κανάλια ανόδου. Η μέθοδος της τυχαίας επιλογής της συμμετοχής χρησιμοποιείται, κυρίως, όταν χρειάζεται να διατηρηθεί σε χαμηλά επίπεδα το φορτίο ανόδου που προκαλεί η λειτουργία της επαίσθησης, ή όταν το πλήθος των δεδομένων που απαιτείται να συγκεντρωθεί δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλο. Η μέθοδος αυτή βρίσκει εφαρμογή λόγω του ότι:

- η χρήση ευρυεκπομπής για την αποστολή μιας αίτησης επαίσθησης έχει την ελάχιστη δυνατή επιβάρυνση στη ζεύξη καθόδου, καθιστά, όμως, παραλήπτες το σύνολο των κινητών τερματικών του κελιού
- η χρήση πολλαπλών αποκλειστικών, σημείου-προς-σημείο, καναλιών καθόδου οδηγεί σε σημαντική αύξηση της επιβάρυνσης, έστω και βραχυπρόθεσμα, στη ζεύξη καθόδου, παρόλο που παρέχει το πλεονέκτημα της «στοχευμένης» αποστολής αιτήσεων

Ως εκ τούτου, η προαναφερθείσα μέθοδος συγκεντρώνει τα πλεονεκτήματα των δύο παραπάνω προσεγγίσεων και αποτελεί μια ενδεδειγμένη λύση. Σημειωτέον ότι η τυχαία επιλογή των τερματικών μπορεί να ρυθμιστεί, βάσει των πληροφοριών της αίτησης, ώστε να δίνει μικρότερη ή μεγαλύτερη βαρύτητα στο ενδεχόμενο της συμμετοχής (π.χ., 40% πιθανότητα στο ενδεχόμενο συμμετοχής και 60% στο ενδεχόμενο μη συμμετοχής). Ωστόσο, το μειονέκτημα εδώ είναι ότι, λόγω ακριβώς της τυχειότητας της διαδικασίας επιλογής, το πραγματικό ποσοστό των συμμετεχόντων μπορεί να υπερβαίνει ή να υπολείπεται του ποσοστού-στόχου.

Οι εντολές τροποποίησης ή ακύρωσης προηγούμενων διαδικασιών επαίσθησης χρησιμεύουν στις περιπτώσεις που ο σταθμός βάσης διαπιστώνει ότι συντρέχουν λόγοι αλλαγής της στρατηγικής επαίσθησης που έχει χαράξει. Τέτοιοι λόγοι είναι:

- η απρόσμενη παραλαβή επιπρόσθετων δεδομένων επαίσθησης από τα κινητά τερματικά, έπειτα από πρωτοβουλία των ίδιων των τερματικών, που καθιστά μη αναγκαίες τις προγραμματισμένες διαδικασίες επαίσθησης
- η ραγδαία αύξηση του φορτίου κίνησης, που αφήνει, βραχυπρόθεσμα, λιγότερα περιθώρια στο σταθμό βάσης για επαισθητικές λειτουργίες
- η αναπροσαρμογή των προτεραιοτήτων του σταθμού βάσης ως προς την ανίχνευση του φάσματος, που εγείρει την ανάγκη τροποποίησης της σειράς εκτέλεσης των διαδικασιών επαίσθησης
- η ανάγκη επίσπευσης της συλλογής των δεδομένων επαίσθησης ή αύξησης του επιπέδου κρισιμότητάς τους, που καθιστά απαραίτητη την τροποποίηση διαδικασιών που εκκρεμούν

Οι εντολές τροποποίησης ή ακύρωσης προηγούμενων διαδικασιών επαίσθησης μπορούν είτε να συνυπάρχουν, στο ίδιο μήνυμα, με τις οδηγίες για νέες διαδικασίες επαίσθησης, είτε να υπάρχουν μόνες τους. Το ίδιο ισχύει και για τις οδηγίες περί νέων διαδικασιών επαίσθησης.

Οι οδηγίες αυτές συνιστούν και το πιο σημαντικό κομμάτι ενός μηνύματος αίτησης επαίσθησης. Περιλαμβάνουν όλες τις απαραίτητες πληροφορίες που θα επιτρέψουν στο τερματικό-παραλήπτη να λάβει με επιτυχία μέρος στη διαδικασία μέτρησης, όπως είναι, για παράδειγμα, ο χρόνος έναρξης και λήξης της διαδικασίας μέτρησης, τα μέτρα που θα πρέπει να υπολογιστούν, η ζώνη συχνοτήτων στην οποία θα γίνουν οι μετρήσεις, κ.λπ. Στο ίδιο μήνυμα είναι δυνατό να περιέχονται οι παράμετροι πολλών διαφορετικών διαδικασιών μέτρησης (προγραμματισμένων για διαφορετικές, μη επικαλυπτόμενες χρονικές περιόδους).

Οι οδηγίες για τον τρόπο αποστολής των αποτελεσμάτων των μετρήσεων καθοδηγούν το τερματικό για το αν θα πρέπει να αποστέλλει μια αναφορά για κάθε διαδικασία μέτρησης που ολοκληρώνεται ή, εναλλακτικά, μια αναφορά για κάθε αίτηση που ικανοποιείται (ακόμα και αν περιλαμβάνει πολλαπλές διαδικασίες μέτρησης). Επίσης, το τμήμα αυτό της αίτησης δίνει στο τερματικό κατευθυντήριες γραμμές για το πότε θα πρέπει να εκκινήσει την αποστολή της αναφοράς του (π.χ., άμεσα, ύστερα από κάποιο χρονικό διάστημα, κ.λπ).

Τέλος, οι τυχόν επιπρόσθετες απαιτήσεις του σταθμού, σχετικά με την αποστολή συνοδευτικών στοιχείων, υποδεικνύουν στο τερματικό-παραλήπτη τις πληροφορίες που χρειάζεται ο σταθμός βάσης αναφορικά με τον τύπο, το μοντέλο και τα χαρακτηριστικά της τερματικής συσκευής. Οι πρόσθετες αυτές ζητούμενες

πληροφορίες θα πρέπει να ενσωματωθούν από το τερματικό στην αναφορά του και βοηθούν το σταθμό βάσης να διερευνήσει αν τα αποτελέσματα των μετρήσεων εξαρτώνται και από τον τύπο των τερματικών συσκευών που τις εκτελούν και, αν ναι, σε ποιο βαθμό συμβαίνει αυτό.

Ακολουθεί η λεπτομερής ανάλυση της δομής ενός μηνύματος αίτησης επαίσθησης.

```

<?xml version="1.0"?>
<sensing-request version="1.01"
xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
xsi:noNamespaceSchemaLocation="sensing-request.xsd">
  <bs-info>
    <bs-id>1128</bs-id>
  </bs-info>

  <timestamp>2008-01-24T13:01:02.12679</timestamp>
  <priority>normal</priority>

  <randomness>
    <randomization>yes</randomization>
    <reply-rate>80</reply-rate>
  </randomness>

  <commands>
    <command type="cancel" id="7849"/>
    <command type="cancel" id="7850"/>
    <command type="modify" id="7851" param="priority"
value="high"/>
    <command type="modify" id="7851" param="respond"
value="immediately"/>
  </commands>

  <measure>
    <measurement id="7856" type="downlink">

      <metrics>
        <metric type="SINR"/>
        <metric type="BEP"/>
        <metric type="BER"/>
      </metrics>

      <timing>
        <begin-ms>2008-01-24T13:02:02.00000</begin-ms>
        <end-ms>2008-01-24T13:02:03.00000</end-ms>
      </timing>

      <spectrum>
        <central-frequency>922500</central-frequency>
        <bandwidth>3000</bandwidth>
      </spectrum>

      <pilot>
        <sequence>3</sequence>
        <modulation-scheme>QPSK</modulation-scheme>
      </pilot>

      <location>
        <location-needed>yes</location-needed>
        <location-resolution>high</location-resolution>
        <path-needed>yes</path-needed>
        <path-resolution>normal</path-resolution>
        <velocity-needed>yes</velocity-needed>
      </location>

```

```

</measurement>

<measurement id="7857" type="downlink">

  <metrics>
    <metric type="IT">
      <metric-param name="variance"/>
    </metric>
  </metrics>

  <timing>
    <begin-ms>2008-01-24T13:03:02.00000</begin-ms>
    <end-ms>2008-01-24T13:03:04.00000</end-ms>
    <repeat>2</repeat>
    <periodicity>120</periodicity>
  </timing>

  <spectrum>
    <central-frequency>927500</central-frequency>
    <bandwidth>3500</bandwidth>
  </spectrum>

  <location>
    <location-needed>yes</location-needed>
    <path-needed>no</path-needed>
    <velocity-needed>no</velocity-needed>
  </location>
</measurement>

<measurement id="7860" type="uplink">

  <timing>
    <begin-ms>2008-01-24T13:04:02.00000</begin-ms>
    <end-ms>2008-01-24T13:04:02.50000</end-ms>
  </timing>

  <spectrum>
    <central-frequency>930500</central-frequency>
    <bandwidth>2500</bandwidth>
  </spectrum>

  <pilot>
    <sequence>4</sequence>
    <modulation-scheme>BPSK</modulation-scheme>
  </pilot>

  <location>
    <location-needed>yes</location-needed>
    <path-needed>no</path-needed>
    <velocity-needed>no</velocity-needed>
  </location>

  <transmission>
    <power min="26.0" max="30.0" step="1.0"/>
  </transmission>
</measurement>
</measure>

```

```
<report-scheduling>
  <report-method>aggregate</report-method>
  <respond>immediately</respond>
</report-scheduling>

<device-info>
  <device-param name="brand" />
  <device-param name="model" />
  <device-param name="fw-version" />
  <device-param name="os-version" />
</device-info>
</sensing-request>
```

Σχήμα 2-8. Χαρακτηριστικό δείγμα μηνύματος αίτησης επαίσθησης

Αναλυτική δομή του μηνύματος αίτησης επαίσθησης

Όπως φαίνεται και από το ενδεικτικό μήνυμα που παρατίθεται στο Σχήμα 2-8, η προτεινόμενη δομή ενός μηνύματος αίτησης επαίσθησης περιλαμβάνει τα παρακάτω στοιχεία:

- Στοιχείο *sensing-request* [αίτηση-επαίσθησης]: Πρόκειται για το στοιχείο-ρίζα του XML μηνύματος. Περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες παραμέτρους της αίτησης επαίσθησης του γνωστικού σταθμού προς τα τερματικά. Περικλείει στοιχεία τύπου *bs-info*, *timestamp*, *priority*, *randomness*, *commands*, *measure*, *report-scheduling* και *device-info*. Εμπεριέχει, επίσης, τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:
 - Χαρακτηριστικό *version* [έκδοση]: Προσδιορίζει την έκδοση της προδιαγραφής του πρωτοκόλλου αίτησης επαίσθησης με την οποία συμβαδίζει το συγκεκριμένο μήνυμα [τιμή «1.01» στο παράδειγμα].
- Στοιχείο *bs-info* [πληροφορίες-σταθμού-βάσης]: Περιλαμβάνει πληροφορίες για την ταυτότητα του αιτούντος σταθμού βάσης. Στην προτεινόμενη έκδοση, περικλείει ένα μόνο στοιχείο τύπου *bs-id*.
- Στοιχείο *bs-id* [ταυτότητα-σταθμού-βάσης]: Πρόκειται για την ταυτότητα (μοναδικό αναγνωριστικό) του αιτούντος σταθμού βάσης [τιμή «1128» στο παράδειγμα]. Το στοιχείο *bs-id* μπορεί να λάβει ακέραιες τιμές τύπου long, μη αρνητικές.
- Στοιχείο *timestamp* [χρονική-σφραγίδα]: Πρόκειται για μια χρονική σφραγίδα που υποδεικνύει τη χρονική στιγμή κατά την οποία ολοκληρώθηκε η παραγωγή του μηνύματος. Χρησιμεύει ως ένδειξη της «παλαιότητας» του μηνύματος, ειδικά σε περίπτωση καθυστερημένης παράδοσής του. Το στοιχείο *timestamp* μπορεί να λάβει τιμές τύπου dateTime, η μορφή των οποίων είναι σαν την ακόλουθη: «2008-01-24T13:01:02.12679». Δηλαδή, προτάσσεται η ημερομηνία (έτος-μήνας-ημέρα), ακολουθεί ο διαχωριστικός χαρακτήρας ‘T’ και έπεται η ώρα (ώρα-λεπτά-δευτερόλεπτα-κλάσματα δευτερολέπτου).
- Στοιχείο *priority* [προτεραιότητα]: Δηλώνει το επίπεδο προτεραιότητας που θα πρέπει να ανατεθεί στην αίτηση από το τερματικό που την έλαβε. Εφόσον η συγκεκριμένη δυνατότητα υποστηρίζεται από την υλοποίηση του τερματικού, η τιμή του επιπέδου προτεραιότητας υποδεικνύει το μέγεθος των πόρων (π.χ., μνήμη, επεξεργαστική ισχύ) που πρέπει να διαθέσει το

τερματικό για τη λειτουργία της επαίσθησης, σε σύγκριση με τους διατιθέμενους στις υπόλοιπες τρέχουσες εφαρμογές πόρους. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή αυτή, τόσο υψηλότερο επίπεδο πόρων προτείνεται να διατεθεί στη λειτουργία της επαίσθησης. Οι δυνατές τιμές του στοιχείου *priority* προέρχονται από τη λίστα {«critical», «high», «normal», «low», «very-low»}.

- Στοιχείο *randomness* [τυχαιότητα]: Καθορίζει εάν το τερματικό-παραλήπτης της αίτησης θα πρέπει οπωσδήποτε να λάβει μέρος στη συγκεκριμένη διαδικασία επαίσθησης ή εάν θα πρέπει να αποφασίσει κατά τυχαίο τρόπο για τη συμμετοχή του ή μη. Το στοιχείο αυτό προσφέρει στο σταθμό βάσης έναν απλό τρόπο για να περιορίσει το πλήθος των απαντήσεων που θα λάβει, ακόμα και αν μεταδώσει το μήνυμα της αίτησης στο σύνολο των τερματικών της περιοχής μέσω ευρυεκπομπής. Το στοιχείο *randomness* περικλείει (ένα ή κανένα) στοιχεία τύπου *randomization* και *reply-rate*.
- Στοιχείο *randomization* [ενεργοποίηση-τυχαιότητας]: Αν η τιμή που έχει τεθεί στο στοιχείο αυτό είναι «ναι» (“yes”), τότε το τερματικό πρέπει να αποφασίσει τυχαία αν θα λάβει μέρος ή όχι στη διαδικασία επαίσθησης που καθορίζεται από το συγκεκριμένο μήνυμα. Αν η ανατεθείσα τιμή είναι «όχι» (“no”), τότε το τερματικό πρέπει υποχρεωτικά να λάβει μέρος στη διαδικασία επαίσθησης. Δυνατές τιμές για το στοιχείο *randomization* είναι μόνο αυτές της λίστας {«yes», «no»}.
- Στοιχείο *reply-rate* [ποσοστό-απαντήσεων]: Υποδεικνύει την πιθανότητα ενός τερματικού-παραλήπτη της αίτησης να λάβει μέρος στη συγκεκριμένη διαδικασία επαίσθησης. Επί παραδείγματι, αν έχει τεθεί η τιμή «40», τότε το τερματικό θα αποφανθεί κατά τυχαίο τρόπο επί της συμμετοχής του ή μη, αποδίδοντας 40% στο ενδεχόμενο συμμετοχής και 60% στο ενδεχόμενο μη συμμετοχής. Το στοιχείο *reply-rate* μπορεί να λάβει ακέραιες τιμές τύπου integer, στο εύρος [0, 100]. Αν το στοιχείο *reply-rate* εκλείπει από το μήνυμα, τότε το τερματικό θεωρεί ότι η τιμή του είναι ίση με «100», οπότε αποφασίζει (με 100% πιθανότητα) τη συμμετοχή του στη διαδικασία.
- Στοιχείο *commands* [εντολές]: Περιλαμβάνει ένα σύνολο εντολών οι οποίες αναφέρονται σε αιτήσεις διαδικασιών επαίσθησης που έχουν αποσταλεί

από το σταθμό κατά το παρελθόν αλλά δεν έχουν ακόμα εκτελεστεί. Περικλείει έναν αυθαίρετο αριθμό στοιχείων τύπου *command*.

- Στοιχείο *command* [εντολή]: Αντιπροσωπεύει μία εντολή που σχετίζεται με μία διαδικασία επαίσθησης που εκκρεμεί. Οδηγίες επί της διαδικασίας αυτής είχαν αποσταλεί σε παρελθούσα χρονική στιγμή. Πρόκειται για ένα χρήσιμο στοιχείο, που παρέχει τη δυνατότητα ακύρωσης ή τροποποίησης μιας εκκρεμούσας διαδικασίας επαίσθησης. Το στοιχείο *command* εμπεριέχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:
 - Χαρακτηριστικό *type* [τύπος]: Αντιπροσωπεύει τον τύπο της εντολής που πρέπει να εκτελεστεί («ακύρωση» ή «τροποποίηση» διαδικασίας επαίσθησης). Λαμβάνει τιμές από τη λίστα {«cancel», «modify»}.
 - Χαρακτηριστικό *id* [ταυτότητα]: Δηλώνει την ταυτότητα (μοναδικό αναγνωριστικό) της διαδικασίας επαίσθησης την οποία αφορά η συγκεκριμένη εντολή. Λαμβάνει ακέραιες τιμές τύπου long.
 - Χαρακτηριστικό *param* [παράμετρος]: Σε περίπτωση τροποποιητικής εντολής, το προαιρετικό αυτό χαρακτηριστικό υποδεικνύει την παράμετρο (της διαδικασίας επαίσθησης που υποδηλώνει το χαρακτηριστικό *id*) η οποία θα πρέπει να τροποποιηθεί.
 - Χαρακτηριστικό *value* [τιμή]: Σε περίπτωση τροποποιητικής εντολής, το προαιρετικό αυτό χαρακτηριστικό εμπεριέχει την (καινούρια) τιμή που πρέπει να ανατεθεί στην παράμετρο *param*.
- Στοιχείο *measure* [μετρήστε]: Περιλαμβάνει τις προδιαγραφές/οδηγίες των διαδικασιών μέτρησης των οποίων ζητείται η εκτέλεση. Περικλείει ένα ή περισσότερα στοιχεία τύπου *measurement*.
- Στοιχείο *measurement* [μέτρηση]: Αντιπροσωπεύει ένα σύνολο οδηγιών για την εκτέλεση μιας διαδικασίας μέτρησης. Περικλείει στοιχεία τύπου *metrics* (ένα ή κανένα), *timing* (ακριβώς ένα), *spectrum* (ακριβώς ένα), *pilot* (ένα ή κανένα), *location* (ακριβώς ένα) και *transmission* (ένα ή κανένα). Εμπεριέχει, επίσης, τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:
 - Χαρακτηριστικό *id* [ταυτότητα]: Πρόκειται για ένα μοναδικό αναγνωριστικό της συγκεκριμένης διαδικασίας μέτρησης. Λαμβάνει ακέραιες τιμές τύπου long.

- ο Χαρακτηριστικό *type* [τύπος]: Υποδηλώνει τον τύπο της διαδικασίας μέτρησης, λαμβάνοντας την τιμή «downlink», αν πρόκειται για μέτρηση σε κανάλι καθόδου, ή «uplink», αν πρόκειται για μέτρηση σε κανάλι ανόδου. Επομένως, οι δυνατές τιμές του χαρακτηριστικού *type* εκφράζονται από τη λίστα {«downlink», «uplink»}.
- Στοιχείο *metrics* [μέτρα]: Σε περίπτωση μέτρησης σε κανάλι καθόδου (τύπος «downlink»), το προαιρετικό αυτό στοιχείο περιλαμβάνει ένα σύνολο μέτρων που αναμένεται, εκ μέρους του σταθμού βάσης, να υπολογιστούν από το τερματικό. Το στοιχείο *metrics* περικλείει ένα ή περισσότερα στοιχεία τύπου *metric*.
- Στοιχείο *metric* [μέτρο]: Δηλώνει το μέτρο του οποίου ο υπολογισμός απαιτείται να πραγματοποιηθεί. Περιλαμβάνει έναν αυθαίρετο αριθμό στοιχείων τύπου *metric-param*. Εμπεριέχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:
 - ο Χαρακτηριστικό *type* [τύπος]: Πρόκειται για το όνομα του μέτρου που απαιτείται να υπολογιστεί. Λαμβάνει τιμές από τη λίστα {«SINR», «BER», «BEP», «SER», «SEP», «FER», «IT»}. Πρόκειται, δηλαδή, για τα μέτρα ποιότητας καναλιού που έχουν καθοριστεί στην παράγραφο 2.2.1.
- Στοιχείο *metric-param* [παράμετρος-μέτρου]: Πρόκειται για μία παράμετρο, σχετιζόμενη με το τρέχον μέτρο (στοιχείο-γονέας τύπου *metric*), της οποίας επίσης απαιτείται ο υπολογισμός. Για παράδειγμα, στο μήνυμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-8, στη διαδικασία μέτρησης με αναγνωριστικό «7857», ζητείται ο υπολογισμός της θερμοκρασίας παρεμβολών («IT») και, επιπρόσθετα, ο προσδιορισμός της διασποράς («variance») της τιμής του IT, όπως ορίζει η οδηγία: `<metric-param name="variance"/>`. Το στοιχείο *metric-param* εμπεριέχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:
 - ο Χαρακτηριστικό *name* [όνομα]: Πρόκειται για το όνομα της παραμέτρου της οποίας απαιτείται ο υπολογισμός.
- Στοιχείο *timing* [συγχρονισμός]: Καθορίζει τις χρονικές παραμέτρους της συγκεκριμένης διαδικασίας μέτρησης, προδιαγράφοντας, για παράδειγμα, πότε θα ξεκινήσει η διαδικασία και αν θα επαναληφθεί. Περιλαμβάνει στοιχεία

τύπου *begin-ms*, *end-ms*, *repeat* (προαιρετικά) και *periodicity* (προαιρετικά).

- Στοιχείο *begin-ms* [έναρξη-μέτρησης]: Αντιπροσωπεύει τη χρονική σφραγίδα έναρξης της διαδικασίας μέτρησης. Λαμβάνει τιμές τύπου dateTime.
- Στοιχείο *end-ms* [λήξη-μέτρησης]: Αντιπροσωπεύει την αναμενόμενη χρονική σφραγίδα λήξης της διαδικασίας μέτρησης. Πέραν της χρονικής στιγμής που καθορίζει η χρονική αυτή σφραγίδα, το τερματικό παύει να είναι συντονισμένο στην εναλλακτική, υπό εξέταση ζώνη συχνοτήτων και γυρνάει στην αρχική του. Το στοιχείο *end-ms* λαμβάνει τιμές τύπου dateTime.
- Στοιχείο *repeat* [επανάληψη]: Το προαιρετικό αυτό στοιχείο καθορίζει πόσες φορές θα πρέπει να επαναληφθεί η συγκεκριμένη διαδικασία μέτρησης. Ο σταθμός βάσης κάνει προκράτηση αναγνωριστικών για τις επαναληπτικές διαδικασίες μέτρησης. Κάθε επανάληψη προσ αυξάνει τον αριθμό του αναγνωριστικού της διαδικασίας την οποία αναπαράγει κατά μία επιπλέον μονάδα. Έτσι, η πρώτη επανάληψη της διαδικασίας με αναγνωριστικό «7857» θα λάβει το αναγνωριστικό «7858», ενώ η δεύτερη θα λάβει το «7859». Το στοιχείο *repeat* λαμβάνει ακέραιες τιμές τύπου byte, μη αρνητικές.
- Στοιχείο *periodicity* [περιοδικότητα]: Σε περίπτωση κατά την οποία υπάρχει απαίτηση επανάληψης μιας διαδικασίας μέτρησης, η τιμή του συγκεκριμένου στοιχείου καθορίζει τη χρονική απόσταση [σε sec] μεταξύ δύο διαδοχικών εκτελέσεων. Λαμβάνει ακέραιες τιμές τύπου integer, μη αρνητικές.
- Στοιχείο *spectrum* [φάσμα]: Περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με το τμήμα του φάσματος συχνοτήτων που θα ανιχνευτεί. Περικλείει στοιχεία τύπου *central-frequency* και *bandwidth*.
- Στοιχείο *central-frequency* [κεντρική-συχνότητα]: Δηλώνει την κεντρική συχνότητα [σε KHz] της ζώνης συχνοτήτων που πρόκειται να εξεταστεί. Λαμβάνει ακέραιες τιμές τύπου long, μη αρνητικές.
- Στοιχείο *bandwidth* [εύρος-ζώνης]: Δηλώνει το εύρος [σε KHz] της ζώνης συχνοτήτων που θα εξεταστεί. Λαμβάνει ακέραιες τιμές τύπου integer, μη αρνητικές.

- Στοιχείο *pilot* [πυλοτικό-σήμα]: Εφόσον, κατά τη διαδικασία μέτρησης, χρησιμοποιηθεί κάποιο πυλοτικό σήμα, το προαιρετικό αυτό στοιχείο περιλαμβάνει τις απαραίτητες σχετικές πληροφορίες. Χρήση πυλοτικού σήματος γίνεται, για παράδειγμα, στην περίπτωση υπολογισμού του SINR, ενώ, αντίθετα, δε γίνεται στην περίπτωση υπολογισμού του IT. Το στοιχείο *pilot* περικλείει στοιχεία τύπου *sequence* και *modulation-scheme*.
- Στοιχείο *sequence* [ακολουθία]: Περιλαμβάνει το αναγνωριστικό της ακολουθίας κατάρτισης (πυλοτικής ακολουθίας) η οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Λαμβάνει ακέραιες τιμές τύπου byte, μη αρνητικές.
- Στοιχείο *modulation-scheme* [σχήμα-διαμόρφωσης]: Δηλώνει τον τύπο διαμόρφωσης (π.χ., «BPSK», «QPSK», κ.λπ.) του πυλοτικού σήματος, προς διευκόλυνση της διαδικασίας υπολογισμού των μέτρων ποιότητας καναλιού.
- Στοιχείο *location* [θέση]: Προσδιορίζει παραμέτρους αναφορικά με τις πληροφορίες θέσης του τερματικού που απαιτείται να περιληφθούν στην αναφορά του τελευταίου προς το σταθμό βάσης. Περικλείει στοιχεία τύπου *location-needed*, *location-resolution* (προαιρετικά), *path-needed*, *path-resolution* (προαιρετικά) και *velocity-needed*.
- Στοιχείο *location-needed* [απαίτηση-θέσης]: Καθορίζει αν το τερματικό θα πρέπει να αναφέρει τη θέση που κατείχε κατά την περίοδο της διαδικασίας μέτρησης. Λαμβάνει τιμές από τη λίστα {«yes», «no»}.
- Στοιχείο *location-resolution* [ευκρίνεια-θέσης]: Το προαιρετικό αυτό στοιχείο προσδιορίζει το πόσο ακριβής απαιτείται να είναι η πληροφορία της θέσης του τερματικού. Έτσι, ανάλογα με την τιμή του συγκεκριμένου στοιχείου, η υλοποίηση του τερματικού διαλέγει και την καταλληλότερη μέθοδο εκτίμησης θέσης που θα χρησιμοποιήσει, αφού κάθε μέθοδος διαφέρει ως προς την ακρίβεια και το σφάλμα θέσης που μπορεί να επιτύχει, με τις ακριβέστερες μεθόδους να είναι και οι πιο πολύπλοκες. Το στοιχείο *location-resolution* λαμβάνει τιμές από τη λίστα {«very-high», «high», «normal», «low», «very-low»}. Εφόσον το στοιχείο αυτό εκλείπει, θεωρείται ότι του έχει ανατεθεί η τιμή «normal».
- Στοιχείο *path-needed* [ευκρίνεια-θέσης]: Επειδή το τερματικό ενδέχεται να κινείται, αλλάζοντας θέσεις, κατά τη διαδικασία μέτρησης, το στοιχείο αυτό καθορίζει αν ο σταθμός βάσης αναμένει την ενσωμάτωση

πληροφοριών για τη διαδρομή/πορεία που το τερματικό ακολουθεί. Το στοιχείο *path-needed* λαμβάνει τιμές από τη λίστα {«yes», «no»}.

- Στοιχείο *path-resolution* [ευκρίνεια-διαδρομής]: Το προαιρετικό αυτό στοιχείο προσδιορίζει το πόσο ακριβείς απαιτείται να είναι οι πληροφορίες για τη διαδρομή του τερματικού. Έτσι, αναλόγως με την τιμή του συγκεκριμένου στοιχείου, η υλοποίηση του τερματικού διαλέγει και την ποσότητα/πυκνότητα των πληροφοριών διαδρομής που θα συμπεριλάβει στην αναφορά του. Το στοιχείο *location-resolution* λαμβάνει τιμές από τη λίστα {«very-high», «high», «normal», «low», «very-low»}. Εφόσον το στοιχείο αυτό εκλείπει, θεωρείται ότι του έχει ανατεθεί η τιμή «normal».
- Στοιχείο *velocity-needed* [απαίτηση-ταχύτητας]: Καθορίζει αν το τερματικό θα πρέπει να υπολογίσει και να αναφέρει τη μέση ταχύτητα που είχε κατά την περίοδο της διαδικασίας μέτρησης. Ταχέως κινούμενα τερματικά έχουν συνήθως χειρότερη εμπειρία περί της ποιότητας του καναλιού επικοινωνίας που χρησιμοποιούν, σε σύγκριση με τα βραδέως κινούμενα. Το στοιχείο *velocity-needed* λαμβάνει τιμές από τη λίστα {«yes», «no»}.
- Στοιχείο *transmission* [μετάδοση]: Σε περίπτωση μέτρησης σε κανάλι ανόδου, το προαιρετικό αυτό στοιχείο περιλαμβάνει επιπρόσθετες πληροφορίες σχετικά με το πιλοτικό σήμα που θα πρέπει να μεταδώσει το τερματικό. Στην προτεινόμενη έκδοση, περικλείει ένα ακριβώς στοιχείο τύπου *power*.
- Στοιχείο *power* [ισχύς]: Καθορίζει τα επίπεδα ισχύος που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν στην εκπομπή του πιλοτικού σήματος από το τερματικό προς το σταθμό βάσης (περίπτωση μέτρησης σε κανάλι ανόδου). Προκειμένου να σχηματισθεί μια σαφής εικόνα της ποιότητας του λαμβανόμενου σήματος, για διάφορες πιθανές τιμές της ισχύος εκπομπής, ο σταθμός βάσης έχει τη δυνατότητα να καθορίσει όχι μόνο ένα επίπεδο ισχύος, αλλά και ένα γενικότερο εύρος επιπέδων ισχύος που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν από το τερματικό. Έτσι, το στοιχείο *power* προσδιορίζει μια ελάχιστη και μια μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ εκπομπής, καθώς και ένα βήμα μεταβολής από την ελάχιστη προς τη μέγιστη. Το τερματικό είναι υποχρεωμένο να εκτελέσει διαδοχικές μεταδόσεις του συμφωνημένου πιλοτικού σήματος, αυξάνοντας σταδιακά την ισχύ εκπομπής από την

ελάχιστη μέχρι και τη μέγιστη τιμή που του έχει υποδειχθεί. Το στοιχείο *power* εμπεριέχει, λοιπόν, τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Χαρακτηριστικό *max* [μέγιστη]: Καθορίζει το μέγιστο επιτρεπόμενο επίπεδο ισχύος εκπομπής [σε dBm]. Το χαρακτηριστικό αυτό λαμβάνει τιμές τύπου float.
- Χαρακτηριστικό *min* [ελάχιστη]: Καθορίζει το ελάχιστο επίπεδο ισχύος εκπομπής [σε dBm]. Το χαρακτηριστικό αυτό λαμβάνει τιμές τύπου float.
- Χαρακτηριστικό *step* [βήμα-μεταβολής]: Προσδιορίζει το βήμα μεταβολής από το ελάχιστο μέχρι το μέγιστο καθορισμένο επίπεδο ισχύος [σε dB]. Το χαρακτηριστικό αυτό λαμβάνει τιμές τύπου float.
- Στοιχείο *report-scheduling* [προγραμματισμός-αναφοράς]: Περιλαμβάνει πληροφορίες για το χρονοπρογραμματισμό της αποστολής της αναφοράς του τερματικού στο σταθμό βάσης. Περικλείει στοιχεία τύπου *report-method*, *respond* και *max-wait-time* (προαιρετικά).
- Στοιχείο *report-method* [μέθοδος-αναφοράς]: Υποδεικνύει αν το τερματικό θα πρέπει να παράγει μια ξεχωριστή αναφορά για κάθε διαδικασία επαίσθησης που έχει καθοριστεί ή αν θα πρέπει να συντάξει μια συνολική αναφορά που να καλύπτει όλες τις μετρήσεις της αίτησης. Λαμβάνει τιμές από τη λίστα {«one-by-one», «aggregate»}.
- Στοιχείο *respond* [απαντήστε]: Καθορίζει αν το τερματικό θα πρέπει να ξεκινήσει την αποστολή της αναφοράς του αμέσως μετά την ολοκλήρωσή της (τιμή «immediately»), ή αν θα πρέπει να περιμένει για ένα τυχαίο χρονικό διάστημα -μέχρι ενός ορίου- (τιμή «wait») ή έως ότου περάσει η ώρα αιχμής (τιμή «background»). Λαμβάνει τιμές από τη λίστα {«immediately», «wait», «background»}. Στην τελευταία περίπτωση (τιμή «background»), το τερματικό εκκινεί την αποστολή μόλις αντιληφθεί ότι το φορτίο κίνησης στο κελί είναι χαμηλότερο από ένα κατώφλι.
- Στοιχείο *max-wait-time* [μέγιστος-χρόνος-αναμονής]: Σε περίπτωση που το στοιχείο *respond* έχει λάβει την τιμή «wait», το προαιρετικό στοιχείο *max-wait-time* υποδεικνύει το μέγιστο χρόνο [σε sec] που το τερματικό πρέπει να περιμένει προτού ξεκινήσει την αποστολή της αναφοράς. Πρέπει να τονιστεί ότι, στην πράξη, το τερματικό επιλέγει ένα τυχαίο χρονικό

διάστημα αναμονής, με μέγιστη δυνατή τιμή εκείνη του *max-wait-time*. Η τυχαία επιλογή γίνεται με χρήση ομοιόμορφης συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας. Το στοιχείο *max-wait-time* λαμβάνει ακέραιες τιμές τύπου integer, μη αρνητικές. Εφόσον το στοιχείο αυτό εκλείπει, θεωρείται ότι του έχει ανατεθεί η τιμή μηδέν.

- Στοιχείο *device-info* [πληροφορίες-συσκευής]: Προσδιορίζει ποιες πληροφορίες σχετικά με την τερματική συσκευή επιθυμεί ο σταθμός βάσης να αποσταλούν. Περικλείει έναν αυθαίρετο αριθμό στοιχείων τύπου *device-param*.
- Στοιχείο *device-param* [παράμετρος-συσκευής]: Το προαιρετικό αυτό στοιχείο αντιπροσωπεύει μια παράμετρο της τερματικής συσκευής της οποίας τη γνωστοποίηση επιθυμεί ο σταθμός βάσης (για παράδειγμα, τον κατασκευαστή και το μοντέλο της συσκευής). Εμπεριέχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:
 - ο Χαρακτηριστικό *name* [όνομα]: Πρόκειται για το όνομα της ζητούμενης παραμέτρου της τερματικής συσκευής. Λαμβάνει τιμές από τη λίστα {«brand», «model», «fw-version», «os-version»}, δηλαδή «μάρκα», «μοντέλο», «έκδοση σταθερισμικού» (firmware) και «έκδοση λειτουργικού συστήματος» του τερματικού, αντιστοίχως.

Συζήτηση επί του παραδείγματος

Το μήνυμα που παρατίθεται στο Σχήμα 2-8 συνιστά ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αίτησης επαίσθησης. Χάρη στη χρήση XML κωδικοποίησης, το περιεχόμενό του μπορεί να γίνει κατανοητό όχι μόνο από ένα υπολογιστικό σύστημα αλλά και από τον άνθρωπο.

Αναλυτικότερα, το εν λόγω μήνυμα είναι κατασκευασμένο σύμφωνα με την έκδοση «1.01» του πρωτοκόλλου επικοινωνίας του στρώματος επαίσθησης [`<sensing-request version="1.01"...`] και προέρχεται από το σταθμό βάσης με αναγνωριστικό «1128» [`<bs-id>1128</bs-id>`]. Το μήνυμα παρήχθη στις 24/01/2008 και ώρα 13:01:02.12679 [`<timestamp>2008-01-24T13:01:02.12679</timestamp>`] και του ανατέθηκε κανονικό επίπεδο προτεραιότητας [`<priority>normal</priority>`]. Ο σταθμός βάσης υποδεικνύει ότι επιθυμεί τα

τερματικά-παραλήπτες να επιλέξουν κατά τυχαίο τρόπο τη συμμετοχή τους ή μη στη διαδικασία επαίσθησης που περιγράφει η αίτηση, θεωρώντας ως πιθανότερο το ενδεχόμενο της συμμετοχής τους (πιθανότητα 80% έναντι 20%) [`<randomization>yes</randomization><reply-rate>80</reply-rate>`].

Το μήνυμα της αίτησης περιλαμβάνει τέσσερις (4) εντολές αναφορικά με προηγούμενες εκκρεμούσες διαδικασίες επαίσθησης, δύο ακυρωτικές [`<command type="cancel"...`] και δύο τροποποιητικές [`<command type="modify"...`]. Οι δύο πρώτες αφορούν την ακύρωση των διαδικασιών μέτρησης με αναγνωριστικά «7849» και «7850», ενώ οι δύο επόμενες υποδεικνύουν την αλλαγή της προτεραιότητας της διαδικασίας με αναγνωριστικό «7851» σε υψηλή («high») και τη μεταβολή του απαιτούμενου τρόπου παράδοσης των αναφορών.

Το μήνυμα της αίτησης περιλαμβάνει, επίσης, τις προδιαγραφές τριών (3) διαδικασιών μέτρησης, με αναγνωριστικά «7856», «7857» και «7860». Οι δύο πρώτες αφορούν τη διεξαγωγή μετρήσεων σε κανάλι καθόδου [`type="downlink"`], ενώ η τρίτη σε κανάλι ανόδου [`type="uplink"`]. Η δεύτερη διαδικασία δε στηρίζεται στη χρήση πιλοτικού σήματος, γι' αυτό και απουσιάζει το στοιχείο με ετικέτα `pilot`. Επιπλέον, εν αντιθέσει προς την πρώτη, δεν απαιτεί την ενσωμάτωση πληροφοριών για τη διαδρομή και την ταχύτητα του τερματικού [`<path-needed>no</path-needed><velocity-needed>no</velocity-needed>`], απαιτεί, ωστόσο, την επανάληψη της διαδικασίας δύο (2) φορές, με περίοδο επανάληψης ίση προς 120 δευτερόλεπτα [`<repeat>2</repeat><periodicity>120</periodicity>`]. Οι δύο αυτές επαναλήψεις της διαδικασίας θα λάβουν αναγνωριστικούς κωδικούς «7858» και «7859», οι οποίοι έχουν προ-κρατηθεί από το σταθμό βάσης ειδικά για αυτές. Ως εκ τούτου, η επόμενη διαδικασία μέτρησης έχει το αναγνωριστικό «7860» (και όχι «7858» όπως θα ανέμενε κανείς). Επίσης, επειδή η διαδικασία «7860» αφορά τη διεξαγωγή μετρήσεων σε κανάλι ανόδου, ο πομπός του πιλοτικού σήματος θα είναι το τερματικό και ο δέκτης ο σταθμός βάσης. Για το λόγο αυτό, οι προδιαγραφές της εν λόγω διαδικασίας καθορίζουν και τις παραμέτρους της εκπομπής αυτής (είδος πιλοτικού σήματος, είδος διαμόρφωσης, ζώνη συχνοτήτων, εύρος ισχύος εκπομπής). Σημειωτέον ότι, στην πράξη, υπό κανονικές συνθήκες, σε μια διαδικασία μέτρησης σε κανάλι ανόδου βάσει πιλοτικού σήματος, συμμετέχουν ο σταθμός βάσης και ένα μόνο τερματικό (όχι περισσότερα, ώστε να μην απαιτείται η χρήση κάποιου σχήματος πολλαπλής πρόσβασης).

Έπειτα από τις προδιαγραφές των διαδικασιών μέτρησης, ακολουθούν οι οδηγίες του σταθμού βάσης για τον τρόπο αποστολής της αναφοράς. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, ο σταθμός βάσης επιθυμεί τη σύνταξη μιας συγκεντρωτικής αναφοράς [`<report-method>aggregate</report-method>`], που να περιλαμβάνει τα αποτελέσματα από όλες τις διαδικασίες μέτρησης της αίτησης, καθώς και την άμεση αποστολή της αναφοράς, μόλις αυτή συνταχθεί [`<respond>immediately</respond>`]. Τέλος, απαιτείται η γνωστοποίηση τεσσάρων (4) παραμέτρων του εξοπλισμού της τερματικής συσκευής [ενότητα `<device-info>` του μηνύματος].

2.3.3.3 Δομή των μηνυμάτων αναφοράς επαίσθησης

Γενική μορφή του μηνύματος αναφοράς επαίσθησης

Στο Σχήμα 2-9 παρατίθεται ένα χαρακτηριστικό δείγμα μηνύματος αναφοράς επαίσθησης. Τέτοιου είδους μηνύματα αποστέλλονται από τα τερματικά προς το σταθμό βάσης της περιοχής τους και περιέχουν τα αποτελέσματα των επαισθητικών μετρήσεων που έχουν εκτελέσει. Αποστολή τέτοιων αναφορών μπορεί να γίνει είτε κατόπιν αντίστοιχης αίτησης επαίσθησης από το σταθμό βάσης (σχήμα επαίσθησης ελεγχόμενης από το σταθμό βάσης) είτε κατόπιν πρωτοβουλίας των ίδιων των τερματικών (σχήμα αυτόνομης επαίσθησης). Η αποστολή των αναφορών από τα κινητά τερματικά μπορεί να πραγματοποιηθεί με έναν από τους εξής τρόπους:

- μέσω διαμοιραζόμενου καναλιού ανόδου
- με βραχύβια χρήση αποκλειστικών καναλιών ανόδου σημείου-προς-σημείο

Μια τυπική αναφορά επαίσθησης περιλαμβάνει τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις του τερματικού, καθώς, επίσης, και τις επιπρόσθετες πληροφορίες που ζητήθηκαν από το σταθμό βάσης. Συγκεκριμένα, οφείλει να περικλείει:

- πληροφορίες για το σταθμό βάσης στον οποίο απευθύνεται η αναφορά
- χρονική ένδειξη παραγωγής της αναφοράς
- τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί
- επιπρόσθετα συνοδευτικά στοιχεία, σχετικά με τον τερματικό εξοπλισμό

Οι πληροφορίες για το σταθμό βάσης στον οποίο απευθύνεται η αναφορά αποτελούν μια επιπλέον ασφαλιστική δικλείδα, για την περίπτωση της λανθασμένης παράδοσης ενός μηνύματος αναφοράς σε έτερο σταθμό βάσης (π.χ., λόγω διαπομπής), ώστε ο τελευταίος να μην το λάβει υπόψη. Τονίζεται, ωστόσο, ότι, ούτως ή άλλως, υπό κανονικές συνθήκες, σε περίπτωση διαπομπής ενός τερματικού σε άλλο

κελί, το σύστημα επαίσθησης του τερματικού διαγράφει τυχόν εκκρεμούσες εργασίες επαίσθησης και εγκαταλείπει την προσπάθεια παράδοσης τυχόν έτοιμων αναφορών επαίσθησης.

Η χρονική ένδειξη παραγωγής της αναφοράς βοηθά στην εκτίμηση της «παλαιότητας» του μηνύματος. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε περιπτώσεις καθυστερημένης παράδοσης του μηνύματος στον παραλήπτη-σταθμό βάσης, κάτι όχι ασυνήθιστο κατά τη λειτουργία των συστημάτων κινητών επικοινωνιών. Μια υπερβολικά καθυστερημένη αναφορά επαίσθησης μπορεί να περιέχει παρωχημένα και άρα μη χρήσιμα δεδομένα, οπότε η χρονική ένδειξη παραγωγής βοηθά το σταθμό βάσης στη γρήγορη απόρριψη του μηνύματος.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν συνιστούν και το πιο σημαντικό κομμάτι ενός μηνύματος αναφοράς επαίσθησης. Οι πληροφορίες αυτές αυξάνουν τη γνώση του σταθμού βάσης για τις τρέχουσες συνθήκες του περιβάλλοντός του, βοηθώντας τον, συνεπώς, στην καλύτερη προσαρμογή του. Οι πληροφορίες αφορούν τις τιμές των μέτρων που υπολογίστηκαν, τη θέση, τη διαδρομή και την ταχύτητα του τερματικού κατά τη λήψη των μετρήσεων, τυχόν σφάλματα που προέκυψαν κατά τη διαδικασία, κ.λπ. Επιπλέον, στις περιπτώσεις αυτόνομης επαίσθησης, συμπεριλαμβάνονται και όλες οι απαραίτητες πτυχές/παράμετροι της διαδικασίας, όπως είναι ο χρόνος έναρξης και λήξης της διαδικασίας, η ζώνη συχνοτήτων η οποία εξετάστηκε, κ.λπ. Στο ίδιο μήνυμα είναι δυνατό να περιέχονται τα αποτελέσματα πολλών διαφορετικών διαδικασιών μέτρησης.

Τέλος, ενδέχεται στο μήνυμα να συμπεριλαμβάνονται και επιπρόσθετα συνοδευτικά στοιχεία, σχετικά με τον εξοπλισμό του τερματικού, όπως, για παράδειγμα, τον τύπο, το μοντέλο και τα χαρακτηριστικά της τερματικής συσκευής. Οι πρόσθετες αυτές ζητούμενες πληροφορίες που ενσωματώνει το τερματικό στην αναφορά του βοηθούν το σταθμό βάσης να διερευνήσει αν τα αποτελέσματα των μετρήσεων εξαρτώνται εν μέρει και από τον τύπο των τερματικών συσκευών που τις εκτελούν.

Ακολουθεί η λεπτομερής ανάλυση της δομής ενός μηνύματος αναφοράς επαίσθησης.

```
<?xml version="1.0"?>
<sensing-report version="1.01"
xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
xsi:noNamespaceSchemaLocation="sensing-report.xsd">
  <bs-info>
    <bs-id>1128</bs-id>
  </bs-info>

  <timestamp>2008-01-24T13:07:13.52327</timestamp>

  <measure>
    <measurement id="7856" type="downlink">

      <status>Success</status>

      <errors/>

      <metrics>
        <metric type="SINR">11.5</metric>
        <metric type="BEP">0.000013</metric>
        <metric type="BER">1.872</metric>
      </metrics>

      <location>
        <loc-init>
          <absolute>
            <lat>37° 58' 18.2064"</lat>
            <lon>23° 45' 5.3892"</lon>
          </absolute>
        </loc-init>
        <path timestamp="2008-01-24T13:02:02.25887">
          <absolute>
            <lat>37° 58' 17.2231"</lat>
            <lon>23° 45' 5.4788"</lon>
          </absolute>
        </path>
        <path timestamp="2008-01-24T13:02:02.51381">
          <absolute>
            <lat>37° 58' 17.6436"</lat>
            <lon>23° 45' 5.5591"</lon>
          </absolute>
        </path>
        <path timestamp="2008-01-24T13:02:02.75866">
          <absolute>
            <lat>37° 58' 17.6847"</lat>
            <lon>23° 45' 5.5589"</lon>
          </absolute>
        </path>
        <loc-final>
          <absolute>
            <lat>37° 58' 17.7204"</lat>
            <lon>23° 45' 5.7782"</lon>
          </absolute>
        </loc-final>
        <velocity>5.2</velocity>
      </location>
```

```

</measurement>

<measurement id="7857" type="downlink">

  <status>Success</status>

  <errors/>

  <metrics>
    <metric type="IT">625.2
      <metric-param name="variance">19.5</metric-param>
    </metric>
  </metrics>

  <location>
    <loc-init>
      <absolute>
        <lat>37° 58' 18.9954"</lat>
        <lon>23° 45' 5.7789"</lon>
      </absolute>
    </loc-init>
    <loc-final>
      <absolute>
        <lat>37° 58' 17.3322"</lat>
        <lon>23° 45' 5.6654"</lon>
      </absolute>
    </loc-final>
  </location>
</measurement>

<measurement id="7858" type="downlink">

  <status>Success</status>

  <errors/>

  <metrics>
    <metric type="IT">627.5
      <metric-param name="variance">18.4</metric-param>
    </metric>
  </metrics>

  <location>
    <loc-init>
      <absolute>
        <lat>37° 58' 18.9954"</lat>
        <lon>23° 45' 5.7789"</lon>
      </absolute>
    </loc-init>
    <loc-final>
      <absolute>
        <lat>37° 58' 17.3322"</lat>
        <lon>23° 45' 5.6654"</lon>
      </absolute>
    </loc-final>
  </location>
</measurement>

```

```

<measurement id="7859" type="downlink">

  <status>Success</status>

  <errors/>

  <metrics>
    <metric type="IT">621.2
      <metric-param name="variance">25.35</metric-
param>
    </metric>
  </metrics>

  <location>
    <loc-init>
      <absolute>
        <lat>37° 58' 18.9954"</lat>
        <lon>23° 45' 5.7789"</lon>
      </absolute>
    </loc-init>
    <loc-final>
      <absolute>
        <lat>37° 58' 17.3322"</lat>
        <lon>23° 45' 5.6654"</lon>
      </absolute>
    </loc-final>
  </location>
</measurement>

<measurement id="7860" type="uplink">

  <status>OK w/ errors</status>

  <errors>
    <error>Element loc-final could not be retrieved or
computed. Time exceeded.</error>
  </errors>

  <location>
    <loc-init>
      <absolute>
        <lat>37° 58' 18.7626"</lat>
        <lon>23° 45' 5.3328"</lon>
      </absolute>
    </loc-init>
  </location>
</measurement>

<measurement id="0" type="downlink">

  <status>Success</status>

  <errors/>

  <metrics>
    <metric type="IT">671.2
      <metric-param name="variance">23.28</metric-
param>

```

```

        </metric>
    </metrics>

    <timing>
        <begin-ms>2008-01-24T12:58:02.00000</begin-ms>
        <end-ms>2008-01-24T12:58:03.00000</end-ms>
    </timing>

    <spectrum>
        <central-frequency>830000</central-frequency>
        <bandwidth>500</bandwidth>
    </spectrum>

    <location>
        <loc-init>
            <absolute>
                <lat>37° 58' 18.1124"</lat>
                <lon>23° 45' 5.6037"</lon>
            </absolute>
        </loc-init>
        <loc-final>
            <absolute>
                <lat>37° 58' 17.1852"</lat>
                <lon>23° 45' 5.6235"</lon>
            </absolute>
        </loc-final>
    </location>
</measurement>
</measure>

<device-info>
    <device-param name="brand">Nokia</device-param>
    <device-param name="model">Nokia E61</device-param>
    <device-param name="fw-version">v2.0618.06.05</device-param>
    <device-param name="os-version">Symbian OS 9.1</device-param>
</device-info>
</sensing-report>

```

Σχήμα 2-9. Χαρακτηριστικό παράδειγμα μηνύματος αναφοράς επαίσθησης

Αναλυτική δομή του μηνύματος αίτησης επαίσθησης

Όπως φαίνεται και από το ενδεικτικό μήνυμα που παρατίθεται στο Σχήμα 2-9 , η προτεινόμενη δομή ενός μηνύματος αναφοράς επαίσθησης περιλαμβάνει τα παρακάτω στοιχεία:

- Στοιχείο *sensing-report* [αναφορά-επαίσθησης]: Πρόκειται για το στοιχείο-ρίζα του XML μηνύματος. Περιλαμβάνει τα αποτελέσματα μιας διαδικασίας επαίσθησης. Τα αποτελέσματα αυτά γνωστοποιούνται από τα κινητά τερματικά στο γνωστικό σταθμό βάσης από τον οποίο εξυπηρετούνται. Το στοιχείο *sensing-report* περικλείει στοιχεία τύπου *bs-info*, *timestamp*, *measure* και *device-info*. Εμπεριέχει, επίσης, τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:
 - Χαρακτηριστικό *version* [έκδοση]: Προσδιορίζει την έκδοση της προδιαγραφής του πρωτοκόλλου αναφοράς επαίσθησης με την οποία συμβαδίζει το συγκεκριμένο μήνυμα [τιμή «1.01» στο παράδειγμα].
- Στοιχείο *bs-info* [πληροφορίες-σταθμού-βάσης]: Περιλαμβάνει πληροφορίες για την ταυτότητα του γνωστικού σταθμού βάσης τον οποίο αφορά η συγκεκριμένη έκθεση. Στην προτεινόμενη έκδοση, περικλείει ένα μόνο στοιχείο τύπου *bs-id*.
- Στοιχείο *bs-id* [ταυτότητα-σταθμού-βάσης]: Πρόκειται για την ταυτότητα (μοναδικό αναγνωριστικό) του γνωστικού σταθμού βάσης τον οποίο αφορά η συγκεκριμένη έκθεση [τιμή «1128» στο παράδειγμα]. Το στοιχείο *bs-id* μπορεί να λάβει ακέραιες τιμές τύπου long, μη αρνητικές.
- Στοιχείο *timestamp* [χρονική-σφραγίδα]: Πρόκειται για μια χρονική σφραγίδα που υποδεικνύει τη χρονική στιγμή κατά την οποία ολοκληρώθηκε η παραγωγή του μηνύματος. Χρησιμοποιεί ως ένδειξη της «παλαιότητας» του μηνύματος, ειδικά σε περίπτωση καθυστερημένης παράδοσής του. Το στοιχείο *timestamp* μπορεί να λάβει τιμές τύπου dateTime, η μορφή των οποίων είναι σαν την ακόλουθη: «2008-01-24T13:01:02.12679». Δηλαδή, προτάσσεται η ημερομηνία (έτος-μήνας-ημέρα), ακολουθεί ο διαχωριστικός χαρακτήρας ‘T’ και έπεται η ώρα (ώρα-λεπτά-δευτερόλεπτα-κλάσματα δευτερολέπτου).

- Στοιχείο *measure* [μετρήστε]: Περιλαμβάνει τα αποτελέσματα των διαδικασιών μέτρησης που εκτελέστηκαν από το τερματικό. Περικλείει ένα ή περισσότερα στοιχεία τύπου *measurement*.
- Στοιχείο *measurement* [μέτρηση]: Αντιπροσωπεύει τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκτέλεση μιας συγκεκριμένης διαδικασίας μέτρησης. Περικλείει στοιχεία τύπου *status* (ακριβώς ένα), *errors* (ακριβώς ένα), *metrics* (ένα ή κανένα), *timing* (ένα ή κανένα), *spectrum* (ένα ή κανένα) και *location* (ακριβώς ένα). Εμπεριέχει, επίσης, τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:
 - Χαρακτηριστικό *id* [ταυτότητα]: Πρόκειται για ένα μοναδικό αναγνωριστικό της συγκεκριμένης διαδικασίας μέτρησης. Λαμβάνει ακέραιες τιμές τύπου long. Αυτόνομες διαδικασίες επαίσθησης (εκκινούμενες από το ίδιο το τερματικό) λαμβάνουν την τιμή μηδέν («0») στο χαρακτηριστικό *id*.
 - Χαρακτηριστικό *type* [τύπος]: Υποδηλώνει τον τύπο της διαδικασίας μέτρησης, λαμβάνοντας την τιμή «downlink», αν πρόκειται για μέτρηση σε κανάλι καθόδου, ή «uplink», αν πρόκειται για μέτρηση σε κανάλι ανόδου. Επομένως, οι δυνατές τιμές του χαρακτηριστικού *type* εκφράζονται από τη λίστα {«downlink», «uplink»}.
- Στοιχείο *status* [κατάσταση]: Δηλώνει αν η διαδικασία μέτρησης ήταν επιτυχής (τιμή «Success»), αποτυχημένη (τιμή «Failure») ή ολοκληρώθηκε μεν αλλά με λάθη (τιμή «OK w/errors»). Λαμβάνει τιμές από τη λίστα {«Success», «Failure», «OK w/ errors»}.
- Στοιχείο *errors* [σφάλματα]: Περιλαμβάνει πληροφορίες για τυχόν σφάλματα που προέκυψαν κατά τη διαδικασία μέτρησης. Περικλείει έναν αυθαίρετο αριθμό στοιχείων τύπου *error*.
- Στοιχείο *error* [σφάλμα]: Πρόκειται για ένα μήνυμα που περιγράφει επακριβώς το σφάλμα που προέκυψε κατά τη διαδικασία μέτρησης. Για παράδειγμα, στο μήνυμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-9, στη διαδικασία μέτρησης με αναγνωριστικό «7860» υπήρξε αδυναμία ανάκτησης της τελικής θέσης του κινητού (στοιχείο *loc-final*).
- Στοιχείο *metrics* [μέτρα]: Σε περίπτωση μέτρησης σε κανάλι καθόδου (τύπος «downlink»), το προαιρετικό αυτό στοιχείο περιλαμβάνει ένα

σύνολο μέτρων που υπολογίστηκαν από το τερματικό. Το στοιχείο *metrics* περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα στοιχεία τύπου *metric*.

- Στοιχείο *metric* [μέτρο]: Περιέχει την τιμή του μέτρου του οποίου πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός. Περιλαμβάνει έναν αυθαίρετο αριθμό στοιχείων τύπου *metric-param*. Εμπεριέχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:
 - Χαρακτηριστικό *type* [τύπος]: Πρόκειται για το όνομα του μέτρου του οποίου πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός. Λαμβάνει τιμές από τη λίστα {«SINR», «BER», «BEP», «SER», «SEP», «FER», «IT»}. Πρόκειται, δηλαδή, για τα μέτρα ποιότητας καναλιού που έχουν καθοριστεί στην παράγραφο 2.2.1.
- Στοιχείο *metric-param* [παράμετρος-μέτρου]: Πρόκειται για την τιμή μιας παραμέτρου, σχετιζόμενης με το τρέχον μέτρο (στοιχείο-γονέας τύπου *metric*), της οποίας επίσης πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός. Για παράδειγμα, στο μήνυμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-9, στη διαδικασία μέτρησης με αναγνωριστικό «7857», η τιμή που υπολογίστηκε για τη διασπορά («variance») της θερμοκρασίας παρεμβολών («IT») ήταν «19.5», όπως φαίνεται από την πληροφορία: `<metric-param name="variance">19.5</metric-param>`. Το στοιχείο *metric-param* εμπεριέχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:
 - Χαρακτηριστικό *name* [όνομα]: Πρόκειται για το όνομα της παραμέτρου της οποίας πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός.
- Στοιχείο *timing* [συγχρονισμός]: Στην περίπτωση της αυτόνομης επαίσθησης, το προαιρετικό αυτό στοιχείο καθορίζει τις χρονικές παραμέτρους της συγκεκριμένης αυτόνομης διαδικασίας μέτρησης, δηλώνοντας πότε ξεκίνησε και πότε έληξε η διαδικασία. Περιλαμβάνει στοιχεία τύπου *begin-ms* και *end-ms*.
- Στοιχείο *begin-ms* [έναρξη-μέτρησης]: Αντιπροσωπεύει τη χρονική σφραγίδα έναρξης της αυτόνομης διαδικασίας μέτρησης. Λαμβάνει τιμές τύπου dateTime.
- Στοιχείο *end-ms* [λήξη-μέτρησης]: Αντιπροσωπεύει τη χρονική σφραγίδα λήξης της αυτόνομης διαδικασίας μέτρησης. Λαμβάνει τιμές τύπου dateTime.
- Στοιχείο *spectrum* [φάσμα]: Στην περίπτωση της αυτόνομης επαίσθησης, το προαιρετικό αυτό στοιχείο περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με το

τμήμα του φάσματος συχνοτήτων που εξετάστηκε. Περιλαμβάνει στοιχεία τύπου *central-frequency* και *bandwidth*.

- Στοιχείο *central-frequency* [κεντρική-συχνότητα]: Δηλώνει την κεντρική συχνότητα [σε KHz] της ζώνης συχνοτήτων που εξετάστηκε, κατά την αυτόνομη διαδικασία επαίσθησης. Λαμβάνει ακέραιες τιμές τύπου long, μη αρνητικές.
- Στοιχείο *bandwidth* [εύρος-ζώνης]: Δηλώνει το εύρος [σε KHz] της ζώνης συχνοτήτων που εξετάστηκε, κατά την αυτόνομη διαδικασία επαίσθησης. Λαμβάνει ακέραιες τιμές τύπου integer, μη αρνητικές.
- Στοιχείο *location* [θέση]: Περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με τη θέση (ή τις θέσεις) του κινητού, κατά τη συγκεκριμένη διαδικασία επαίσθησης. Οι πληροφορίες θέσης που περιλαμβάνονται δεν είναι ακριβείς, αλλά πρόκειται για εκτιμήσεις του τερματικού, με τη χρήση κατάλληλων μεθόδων εντοπισμού θέσης. Το στοιχείο *location* περιλαμβάνει, προαιρετικά, στοιχεία τύπου *loc-init*, *path* (αυθαίρετο πλήθος), *loc-final* και *velocity*.
- Στοιχείο *loc-init* [αρχική-θέση]: Το προαιρετικό αυτό στοιχείο γνωστοποιεί στο σταθμό βάσης τη θέση του τερματικού κατά την έναρξη της διαδικασίας μέτρησης. Περιλαμβάνει ένα εκ στοιχείων *absolute* ή *relative*.
- Στοιχείο *path* [διαδρομή]: Το προαιρετικό αυτό στοιχείο πληροφορεί για τη θέση του τερματικού σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, στη διάρκεια της διαδικασίας μέτρησης. Περιλαμβάνει ένα εκ στοιχείων *absolute* ή *relative*. Εμπεριέχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:
 - Χαρακτηριστικό *timestamp* [χρονική-σφραγίδα]: Δηλώνει τη χρονική στιγμή της καταγραφής της θέσης του τερματικού. Λαμβάνει τιμές τύπου dateTime.
- Στοιχείο *loc-final* [τελική-θέση]: Το προαιρετικό αυτό στοιχείο γνωστοποιεί τη θέση του τερματικού κατά τη λήξη της διαδικασίας μέτρησης. Περιλαμβάνει ένα εκ στοιχείων *absolute* ή *relative*.
- Στοιχείο *absolute* [απόλυτη]: Περιλαμβάνει πληροφορίες για την απόλυτη θέση του τερματικού, εκφρασμένες σε μορφή συντεταγμένων GPS (Global Positioning System). Περιλαμβάνει στοιχεία τύπου *lat* και *lon*.
- Στοιχείο *lat* [γεωγραφικό-πλάτος]: Αντιπροσωπεύει το γεωγραφικό πλάτος της θέσης του τερματικού. Οι τιμές του έχουν μορφή σαν και την ακόλουθη: 37° 58' 18.2064". Ο πρώτος αριθμός αντιστοιχεί στις μοίρες, ο

δεύτερος στα λεπτά και ο τρίτος στα δευτέρα. Θετικό πρόσημο δηλώνει ότι η τοποθεσία βρίσκεται στο ανατολικό ημισφαίριο, ενώ αρνητικό ότι βρίσκεται στο δυτικό.

- Στοιχείο *lon* [γεωγραφικό-μήκος]: Αντιπροσωπεύει το γεωγραφικό μήκος της θέσης του τερματικού. Οι τιμές του έχουν μορφή σαν και την ακόλουθη: 23° 45' 5.3892". Ο πρώτος αριθμός αντιστοιχεί στις μοίρες, ο δεύτερος στα λεπτά και ο τρίτος στα δευτέρα. Θετικό πρόσημο δηλώνει ότι η τοποθεσία βρίσκεται στο βόρειο ημισφαίριο, ενώ αρνητικό ότι βρίσκεται στο νότιο.
- Στοιχείο *relative* [σχετική]: Σε περίπτωση που η ανάκτηση της απόλυτης θέσης του τερματικού δεν είναι δυνατή, δίνονται πληροφορίες για τη σχετική του θέση ως προς το σταθμό βάσης που το εξυπηρετεί. Το στοιχείο αυτό περιλαμβάνει στοιχεία τύπου *dist* και *angle*.
- Στοιχείο *dist* [απόσταση]: Περιέχει την εκτιμώμενη απόσταση του τερματικού [σε m] από το σταθμό βάσης. Λαμβάνει τιμές τύπου double, μη αρνητικές.
- Στοιχείο *angle* [γωνία]: Περιέχει την εκτιμώμενη γωνιακή θέση του τερματικού [σε μοίρες] ως προς το σταθμό βάσης. Λαμβάνει τιμές τύπου double, στο εύρος [0, 360].
- Στοιχείο *velocity* [ταχύτητα]: Το προαιρετικό αυτό στοιχείο πληροφορεί το σταθμό βάσης για τη μέση ταχύτητα του τερματικού [σε m/sec] κατά τη διάρκεια της διαδικασίας μέτρησης. Λαμβάνει τιμές τύπου double, μη αρνητικές.
- Στοιχείο *device-info* [πληροφορίες-συσσκευής]: Περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με την τερματική συσκευή. Περιλαμβάνει έναν αυθαίρετο αριθμό στοιχείων τύπου *device-param*.
- Στοιχείο *device-param* [παράμετρος-συσσκευής]: Το προαιρετικό αυτό στοιχείο γνωστοποιεί στο σταθμό βάσης την τιμή μιας παραμέτρου της τερματικής συσκευής (για παράδειγμα, τον κατασκευαστή ή το μοντέλο της συσκευής). Εμπεριέχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:
 - Χαρακτηριστικό *name* [όνομα]: Πρόκειται για το όνομα της εν λόγω παραμέτρου της τερματικής συσκευής. Λαμβάνει τιμές από τη λίστα {«brand», «model», «fw-version», «os-version»}, δηλαδή

«μάρκα», «μοντέλο», «έκδοση σταθερισμικού» (firmware) και «έκδοση λειτουργικού συστήματος» του τερματικού, αντιστοίχως.

Συζήτηση επί του παραδείγματος

Το μήνυμα που παρατίθεται στο Σχήμα 2-9 συνιστά ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αναφοράς επαίσθησης. Χάρη στη χρήση XML κωδικοποίησης, το περιεχόμενό του μπορεί να γίνει κατανοητό όχι μόνο από ένα υπολογιστικό σύστημα αλλά και από τον άνθρωπο. Το εν λόγω μήνυμα αποτελεί την αναφορά/απάντηση ενός τερματικού στην αίτηση η οποία παρατίθεται στο Σχήμα 2-8 και παρουσιάστηκε αναλυτικά στην παράγραφο 2.3.3.2.

Αναλυτικότερα, το εν λόγω μήνυμα είναι κατασκευασμένο σύμφωνα με την έκδοση «1.01» του πρωτοκόλλου επικοινωνίας του στρώματος επαίσθησης [`<sensing-report version="1.01"...`] και απευθύνεται στο σταθμό βάσης με αναγνωριστικό «1128» [`<bs-id>1128</bs-id>`]. Παρήχθη στις 24/01/2008 και ώρα 13:07:13.52327 [`<timestamp>2008-01-24T13:07:13.52327</timestamp>`].

Το μήνυμα περιλαμβάνει τα αποτελέσματα έξι (6) διαδικασιών μέτρησης, εκ των οποίων οι πέντε (5) πρώτες είναι εκείνες που καθορίστηκαν από το μήνυμα της αίτησης επαίσθησης της παραγράφου 2.3.3.2 (με αναγνωριστικά «7856» έως «7860»), ενώ η τελευταία προέρχεται από πρωτοβουλία του ίδιου του τερματικού (αυτόνομη επαίσθηση, γι' αυτό και έχει το αναγνωριστικό «0»). Από τις πέντε πρώτες, οι τρεις είναι εκείνες που ρητά προσδιορίζονται στο αντίστοιχο μήνυμα αίτησης επαίσθησης («7856», «7857» και «7860»), ενώ οι άλλες δύο («7858» και «7859») συνιστούν της ζητούμενες επαναλήψεις της διαδικασίας «7857». Για καθεμιά από τις διαδικασίες, αναφέρονται οι τιμές των υπολογισθέντων μέτρων, πληροφορίες για τη θέση του τερματικού, καθώς και τυχόν σφάλματα που προέκυψαν. Στο τέλος της αναφοράς, περιλαμβάνονται και τα στοιχεία που ζητήθηκαν όσον αφορά τον εξοπλισμό της τερματικής συσκευής (π.χ., το λειτουργικό σύστημα του τερματικού είναι τύπου «Symbian OS 9.1» [`<device-param name="os-version">Symbian OS 9.1</device-param>`]).

2.3.3.4 Σχήματα καθορισμού των προδιαγραφών των μηνυμάτων επαίσθησης

Για την ολοκλήρωση του καθορισμού του πρωτοκόλλου επικοινωνίας για τη λειτουργία της επαίσθησης, είναι απαραίτητη η περιγραφή των προδιαγραφών των

μηνυμάτων επαίσθησης σε μια επίσημη μορφή. Η καταλληλότερη μέθοδος καθορισμού των προδιαγραφών αυτών για μηνύματα τύπου XML είναι η γλώσσα XML Schema (XML Σχήμα). Η XML Schema είναι μια γλώσσα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή ενός «σχήματος», δηλαδή ενός συνόλου κανόνων με τους οποίους ένα XML έγγραφο πρέπει να συμβαδίζει απόλυτα, προκειμένου να θεωρείται έγκυρο. Έτσι, είναι δυνατό ένα XML έγγραφο να είναι μεν συντακτικά ορθό, χωρίς, όμως, να είναι έγκυρο, σύμφωνα με το σχήμα στο οποίο πρέπει να συμμορφώνεται. Ένα τέτοιο XML σχήμα καθορίζει τα ονόματα των στοιχείων και χαρακτηριστικών του εγγράφου, τον τρόπο δόμησής τους και τον τύπο των δεδομένων τους. Το αρχείο ενός XML σχήματος έχει συνήθως την κατάληξη ονόματος «.xsd», που προέρχεται από τον όρο «XML Schema Definition» (Ορισμός Σχήματος XML).

Στο Σχήμα 2-10 παρατίθεται το XML σχήμα που καθορίζει τις προδιαγραφές των μηνυμάτων αίτησης επαίσθησης. Στο Σχήμα 2-11 παρατίθεται το XML σχήμα που καθορίζει τις προδιαγραφές των μηνυμάτων αναφοράς επαίσθησης.

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<xs:schema xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"
elementFormDefault="qualified">
  <xs:element name="sensing-request">
    <xs:annotation>
      <xs:documentation>[Root Element] Provides the
specifications of a sensing request message, transmitted by a
cognitive base station towards one or more cognitive mobile terminals
within its service area.</xs:documentation>
      <xs:documentation>@version: The version of the protocol
specification that the message is compliant to.</xs:documentation>
    </xs:annotation>
    <xs:complexType>
      <xs:sequence>
        <xs:element ref="bs-info"/>
        <xs:element ref="timestamp"/>
        <xs:element ref="priority"/>
        <xs:element ref="randomness"/>
        <xs:element ref="commands"/>
        <xs:element ref="measure"/>
        <xs:element ref="report-scheduling"/>
        <xs:element ref="device-info"/>
      </xs:sequence>
      <xs:attribute name="version" use="required"
type="xs:string"/>
    </xs:complexType>
  </xs:element>
  <xs:element name="bs-info">
    <xs:annotation>
      <xs:documentation>Includes identification information
about the cognitive base station.</xs:documentation>
    </xs:annotation>
    <xs:complexType>
      <xs:sequence>
        <xs:element ref="bs-id"/>
      </xs:sequence>
    </xs:complexType>
  </xs:element>
  <xs:element name="bs-id">
    <xs:annotation>
      <xs:documentation>The base station's
id.</xs:documentation>
    </xs:annotation>
    <xs:simpleType>
      <xs:restriction base="xs:long">
        <xs:minInclusive value="0"/>
      </xs:restriction>
    </xs:simpleType>
  </xs:element>
  <xs:element name="timestamp" type="xs:dateTime">
    <xs:annotation>
      <xs:documentation>Indicates the time moment upon which
the packet generation was completed.</xs:documentation>
    </xs:annotation>
  </xs:element>
  <xs:element name="priority" type="my-priority">

```

```

    <xs:annotation>
      <xs:documentation>Indicates the priority level that
should be assigned by the terminal to the particular
request.</xs:documentation>
    </xs:annotation>
  </xs:element>
  <xs:element name="randomness">
    <xs:annotation>
      <xs:documentation>Defines whether the queried terminal
should definitely take part in the sensing process, or should instead
randomly select to participate or not.</xs:documentation>
    </xs:annotation>
    <xs:complexType>
      <xs:sequence>
        <xs:element ref="randomization"/>
        <xs:element ref="reply-rate" minOccurs="0"/>
      </xs:sequence>
    </xs:complexType>
  </xs:element>
  <xs:element name="randomization" type="yes-or-no">
    <xs:annotation>
      <xs:documentation>If the specified value is "yes", then
the terminal must randomly select whether to take part in this
sensing process or not. If the specified value is "no", then the
terminal should take part in the sensing process.</xs:documentation>
    </xs:annotation>
  </xs:element>
  <xs:element name="reply-rate" type="my-int-rate">
    <xs:annotation>
      <xs:documentation>Indicates the probability that a
terminal shall take part in the sensing process. For example, if the
specified value is "40", then the terminal shall randomly decide
whether to participate or not, with a 40% chance in favor of
participating (and a 60% chance against).</xs:documentation>
    </xs:annotation>
  </xs:element>
  <xs:element name="commands">
    <xs:annotation>
      <xs:documentation>Includes a set of commands associated
with prior measurement procedures.</xs:documentation>
    </xs:annotation>
    <xs:complexType>
      <xs:sequence>
        <xs:element maxOccurs="unbounded" ref="command"
minOccurs="0"/>
      </xs:sequence>
    </xs:complexType>
  </xs:element>
  <xs:element name="command">
    <xs:annotation>
      <xs:documentation>An instruction that must be carried
out, concerning a past measurement process (useful for modifying
measurement processes that have not been initiated
yet).</xs:documentation>
      <xs:documentation>@type: The type of command that must be
executed (cancel/modify).</xs:documentation>
      <xs:documentation>@id: The id of the measurement process
that the command is applicable to.</xs:documentation>
    </xs:annotation>
  </xs:element>

```

```

        <xs:documentation>@param: The name of a parameter that
must be modified.</xs:documentation>
        <xs:documentation>@value: The new, modified value of this
parameter.</xs:documentation>
    </xs:annotation>
    <xs:complexType>
        <xs:attribute name="type" use="required" type="my-
command-type"/>
        <xs:attribute name="id" use="required" type="xs:long"/>
        <xs:attribute name="param" type="xs:NCName"/>
        <xs:attribute name="value" type="xs:NCName"/>
    </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="measure">
    <xs:annotation>
        <xs:documentation>Includes the specifications for the
measurements that are expected to be performed.</xs:documentation>
    </xs:annotation>
    <xs:complexType>
        <xs:sequence>
            <xs:element minOccurs="0" maxOccurs="unbounded"
ref="measurement"/>
        </xs:sequence>
    </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="measurement">
    <xs:annotation>
        <xs:documentation>A set of instructions for the execution
of a measuring process.</xs:documentation>
        <xs:documentation>@id: A unique identifier for this
measurement.</xs:documentation>
        <xs:documentation>@type: uplink/downlink
measurement.</xs:documentation>
    </xs:annotation>
    <xs:complexType>
        <xs:sequence>
            <xs:element ref="metrics" minOccurs="0"/>
            <xs:element ref="timing"/>
            <xs:element ref="spectrum"/>
            <xs:element ref="pilot" minOccurs="0"/>
            <xs:element ref="location"/>
            <xs:element ref="transmission" minOccurs="0"/>
        </xs:sequence>
        <xs:attribute name="id" use="required" type="xs:long"/>
        <xs:attribute name="type" use="required" type="my-link-
type"/>
    </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="metrics">
    <xs:annotation>
        <xs:documentation>Includes the metrics that should be
computed (case of downlink measurement).</xs:documentation>
    </xs:annotation>
    <xs:complexType>
        <xs:sequence>
            <xs:element minOccurs="1" maxOccurs="unbounded"
ref="metric"/>
        </xs:sequence>

```

```

        </xs:complexType>
    </xs:element>
    <xs:element name="metric">
        <xs:annotation>
            <xs:documentation>Indicates the metric that must be
computed.</xs:documentation>
            <xs:documentation>@type: The name of the
metric.</xs:documentation>
        </xs:annotation>
        <xs:complexType>
            <xs:sequence>
                <xs:element minOccurs="0" maxOccurs="unbounded"
ref="metric-param" />
            </xs:sequence>
            <xs:attribute name="type" use="required" type="my-
metric" />
        </xs:complexType>
    </xs:element>
    <xs:element name="metric-param">
        <xs:annotation>
            <xs:documentation>An additional parameter associated to a
specific metric that must also be computed.</xs:documentation>
            <xs:documentation>@name: The name of the
parameter.</xs:documentation>
        </xs:annotation>
        <xs:complexType>
            <xs:attribute name="name" use="required"
type="xs:NCName" />
        </xs:complexType>
    </xs:element>
    <xs:element name="timing">
        <xs:annotation>
            <xs:documentation>Specifies the time parameters of the
measurement.</xs:documentation>
        </xs:annotation>
        <xs:complexType>
            <xs:sequence>
                <xs:element ref="begin-ms" />
                <xs:element ref="end-ms" />
                <xs:element ref="repeat" minOccurs="0" />
                <xs:element ref="periodicity" minOccurs="0" />
            </xs:sequence>
        </xs:complexType>
    </xs:element>
    <xs:element name="begin-ms" type="xs:dateTime">
        <xs:annotation>
            <xs:documentation>Timestamp for the beginning of the
measurement process.</xs:documentation>
        </xs:annotation>
    </xs:element>
    <xs:element name="end-ms" type="xs:dateTime">
        <xs:annotation>
            <xs:documentation>Timestamp for the end of the
measurement process.</xs:documentation>
        </xs:annotation>
    </xs:element>
    <xs:element name="repeat">
        <xs:annotation>

```

```

        <xs:documentation>Number of times that the measurement
process should be repeated.</xs:documentation>
    </xs:annotation>
    <xs:simpleType>
        <xs:restriction base="xs:byte">
            <xs:minInclusive value="0"/>
        </xs:restriction>
    </xs:simpleType>
</xs:element>
<xs:element name="periodicity">
    <xs:annotation>
        <xs:documentation>Time interval [in sec.] between two
successive repetitions of the measurement process.</xs:documentation>
    </xs:annotation>
    <xs:simpleType>
        <xs:restriction base="xs:integer">
            <xs:minInclusive value="0"/>
        </xs:restriction>
    </xs:simpleType>
</xs:element>
<xs:element name="spectrum">
    <xs:annotation>
        <xs:documentation>Information about the spectrum portion
that will be sensed.</xs:documentation>
    </xs:annotation>
    <xs:complexType>
        <xs:sequence>
            <xs:element ref="central-frequency"/>
            <xs:element ref="bandwidth"/>
        </xs:sequence>
    </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="central-frequency">
    <xs:annotation>
        <xs:documentation>Central frequency [in KHz] of the
spectrum portion that will be examined.</xs:documentation>
    </xs:annotation>
    <xs:simpleType>
        <xs:restriction base="xs:long">
            <xs:minInclusive value="0"/>
        </xs:restriction>
    </xs:simpleType>
</xs:element>
<xs:element name="bandwidth">
    <xs:annotation>
        <xs:documentation>The width [in KHz] of the frequency
band that will be examined.</xs:documentation>
    </xs:annotation>
    <xs:simpleType>
        <xs:restriction base="xs:integer">
            <xs:minInclusive value="0"/>
        </xs:restriction>
    </xs:simpleType>
</xs:element>
<xs:element name="pilot">
    <xs:annotation>
        <xs:documentation>Information about the pilot signal
(training sequence) that will be used during the measurement

```



```

process.</xs:documentation>
  </xs:annotation>
  <xs:complexType>
    <xs:sequence>
      <xs:element ref="sequence"/>
      <xs:element ref="modulation-scheme"/>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="sequence">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>The identifier of the training sequence
that will be used.</xs:documentation>
  </xs:annotation>
  <xs:simpleType>
    <xs:restriction base="xs:byte">
      <xs:minInclusive value="0"/>
    </xs:restriction>
  </xs:simpleType>
</xs:element>
<xs:element name="modulation-scheme" type="xs:NCName">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>The type of the modulation scheme that
will be applied on the pilot signal.</xs:documentation>
  </xs:annotation>
</xs:element>
<xs:element name="location">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>Indicates what sort of location
information should be reported.</xs:documentation>
  </xs:annotation>
  <xs:complexType>
    <xs:sequence>
      <xs:element ref="location-needed"/>
      <xs:element ref="location-resolution" minOccurs="0"/>
      <xs:element ref="path-needed"/>
      <xs:element ref="path-resolution" minOccurs="0"/>
      <xs:element ref="velocity-needed"/>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="location-needed" type="yes-or-no">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>Specifies whether the terminal must
report its location.</xs:documentation>
  </xs:annotation>
</xs:element>
<xs:element name="location-resolution" type="my-resolution">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>Specifies how exact the positioning
information is expected to be.</xs:documentation>
  </xs:annotation>
</xs:element>
<xs:element name="path-needed" type="yes-or-no">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>Specifies whether the terminal must
report the path traveled during the measurement
process.</xs:documentation>

```

```

        </xs:annotation>
    </xs:element>
    <xs:element name="path-resolution" type="my-resolution">
        <xs:annotation>
            <xs:documentation>Specifies how detailed the path
information should be.</xs:documentation>
        </xs:annotation>
    </xs:element>
    <xs:element name="velocity-needed" type="yes-or-no">
        <xs:annotation>
            <xs:documentation>Specifies whether the terminal must
compute and report its average velocity.</xs:documentation>
        </xs:annotation>
    </xs:element>
    <xs:element name="transmission">
        <xs:annotation>
            <xs:documentation>Includes information about the pilot
signal that shall be transmitted by the terminal (case of uplink
measurement).</xs:documentation>
        </xs:annotation>
        <xs:complexType>
            <xs:sequence>
                <xs:element ref="power"/>
            </xs:sequence>
        </xs:complexType>
    </xs:element>
    <xs:element name="power">
        <xs:annotation>
            <xs:documentation>Specifies the signal power levels
(ranging from a minimum to a maximum one, with a predefined change
step) [in dBm] that should be used during transmission (case of
uplink measurement).</xs:documentation>
            <xs:documentation>@max: Maximum allowed power level [in
dBm].</xs:documentation>
            <xs:documentation>@min: Minimum power level to be used
[in dBm].</xs:documentation>
            <xs:documentation>@step: Incremental change step [in
dB].</xs:documentation>
        </xs:annotation>
        <xs:complexType>
            <xs:attribute name="max" use="required" type="xs:float"/>
            <xs:attribute name="min" use="required" type="xs:float"/>
            <xs:attribute name="step" use="required"
type="xs:float"/>
        </xs:complexType>
    </xs:element>
    <xs:element name="report-scheduling">
        <xs:annotation>
            <xs:documentation>Schedules when the terminal's report
should be uploaded.</xs:documentation>
        </xs:annotation>
        <xs:complexType>
            <xs:sequence>
                <xs:element ref="report-method"/>
                <xs:element ref="respond"/>
                <xs:element ref="max-wait-time" minOccurs="0"/>
            </xs:sequence>
        </xs:complexType>
    </xs:element>

```

```

</xs:element>
<xs:element name="report-method">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>Specifies whether the terminal should
generate a separate report for each specified measurement, or an
aggregated report covering all the measurements.</xs:documentation>
  </xs:annotation>
  <xs:simpleType>
    <xs:restriction base="xs:NCName">
      <xs:enumeration value="one-by-one"/>
      <xs:enumeration value="aggregate"/>
    </xs:restriction>
  </xs:simpleType>
</xs:element>
<xs:element name="respond">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>Specifies whether the terminal should
begin uploading the report, immediately after its completion, or
should rather wait for a random amount of time (up to a maximum
limit) or for a non-rush hour to come.</xs:documentation>
  </xs:annotation>
  <xs:simpleType>
    <xs:restriction base="xs:NCName">
      <xs:enumeration value="immediately"/>
      <xs:enumeration value="wait"/>
      <xs:enumeration value="background"/>
    </xs:restriction>
  </xs:simpleType>
</xs:element>
<xs:element name="max-wait-time">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>The maximum time duration [in sec.]
that the terminal is expected to wait before beginning the report's
transmission.</xs:documentation>
  </xs:annotation>
  <xs:simpleType>
    <xs:restriction base="xs:integer">
      <xs:minInclusive value="0"/>
    </xs:restriction>
  </xs:simpleType>
</xs:element>
<xs:element name="device-info">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>Specifies the terminal device-related
information that is requested by the base station.</xs:documentation>
  </xs:annotation>
  <xs:complexType>
    <xs:sequence>
      <xs:element ref="device-param" minOccurs="0"
maxOccurs="unbounded"/>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="device-param">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>A terminal device parameter that is
requested to be reported.</xs:documentation>
  </xs:annotation>

```

```

        <xs:complexType>
            <xs:attribute name="name" use="required" type="device-
parameters" />
        </xs:complexType>
    </xs:element>
    <xs:simpleType name="my-priority">
        <xs:restriction base="xs:NCName">
            <xs:enumeration value="critical" />
            <xs:enumeration value="high" />
            <xs:enumeration value="normal" />
            <xs:enumeration value="low" />
            <xs:enumeration value="very-low" />
        </xs:restriction>
    </xs:simpleType>
    <xs:simpleType name="yes-or-no">
        <xs:restriction base="xs:NCName">
            <xs:enumeration value="yes" />
            <xs:enumeration value="no" />
        </xs:restriction>
    </xs:simpleType>
    <xs:simpleType name="my-int-rate">
        <xs:restriction base="xs:integer">
            <xs:minInclusive value="0" />
            <xs:maxInclusive value="100" />
        </xs:restriction>
    </xs:simpleType>
    <xs:simpleType name="my-command-type">
        <xs:restriction base="xs:NCName">
            <xs:enumeration value="cancel" />
            <xs:enumeration value="modify" />
        </xs:restriction>
    </xs:simpleType>
    <xs:simpleType name="my-link-type">
        <xs:restriction base="xs:NCName">
            <xs:enumeration value="uplink" />
            <xs:enumeration value="downlink" />
        </xs:restriction>
    </xs:simpleType>
    <xs:simpleType name="my-metric">
        <xs:restriction base="xs:NCName">
            <xs:enumeration value="SINR" />
            <xs:enumeration value="BER" />
            <xs:enumeration value="BEP" />
            <xs:enumeration value="SER" />
            <xs:enumeration value="SEP" />
            <xs:enumeration value="FER" />
            <xs:enumeration value="IT" />
        </xs:restriction>
    </xs:simpleType>
    <xs:simpleType name="my-resolution">
        <xs:restriction base="xs:NCName">
            <xs:enumeration value="very-high" />
            <xs:enumeration value="high" />
            <xs:enumeration value="normal" />
            <xs:enumeration value="low" />
            <xs:enumeration value="very-low" />
        </xs:restriction>
    </xs:simpleType>

```

```
<xs:simpleType name="device-parameters">
  <xs:restriction base="xs:NCName">
    <xs:enumeration value="brand"/>
    <xs:enumeration value="model"/>
    <xs:enumeration value="fw-version"/>
    <xs:enumeration value="os-version"/>
  </xs:restriction>
</xs:simpleType>
</xs:schema>
```

Σχήμα 2-10. XML σχήμα προδιαγραφών των μηνυμάτων αίτησης επαίσθησης

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<xs:schema xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"
elementFormDefault="qualified">
  <xs:element name="sensing-report">
    <xs:annotation>
      <xs:documentation>[Root Element] Provides the
specifications of a sensing report message, transmitted by a
cognitive mobile terminal towards the serving cognitive base
station.</xs:documentation>
      <xs:documentation>@version: The version of the protocol
specification that the message is compliant to.</xs:documentation>
    </xs:annotation>
    <xs:complexType>
      <xs:sequence>
        <xs:element ref="bs-info"/>
        <xs:element ref="timestamp"/>
        <xs:element ref="measure"/>
        <xs:element ref="device-info"/>
      </xs:sequence>
      <xs:attribute name="version" use="required"
type="xs:string"/>
    </xs:complexType>
  </xs:element>
  <xs:element name="bs-info">
    <xs:annotation>
      <xs:documentation>Includes identification information
about the cognitive base station.</xs:documentation>
    </xs:annotation>
    <xs:complexType>
      <xs:sequence>
        <xs:element ref="bs-id"/>
      </xs:sequence>
    </xs:complexType>
  </xs:element>
  <xs:element name="bs-id">
    <xs:annotation>
      <xs:documentation>The base station's
id.</xs:documentation>
    </xs:annotation>
    <xs:simpleType>
      <xs:restriction base="xs:long">
        <xs:minInclusive value="0"/>
      </xs:restriction>
    </xs:simpleType>
  </xs:element>
  <xs:element name="timestamp" type="xs:dateTime">
    <xs:annotation>
      <xs:documentation>Indicates the time moment upon which
the packet generation was completed.</xs:documentation>
    </xs:annotation>
  </xs:element>
  <xs:element name="measure">
    <xs:annotation>
      <xs:documentation>Includes the results of the measurement
processes that were performed.</xs:documentation>
    </xs:annotation>
  </xs:element>

```

```

        <xs:complexType>
            <xs:sequence>
                <xs:element maxOccurs="unbounded" ref="measurement" />
            </xs:sequence>
        </xs:complexType>
    </xs:element>
    <xs:element name="measurement">
        <xs:annotation>
            <xs:documentation>The result of a specific measuring
process.</xs:documentation>
            <xs:documentation>@id: A unique identifier for this
measurement.</xs:documentation>
            <xs:documentation>@type: uplink/downlink
measurement.</xs:documentation>
        </xs:annotation>
        <xs:complexType>
            <xs:sequence>
                <xs:element ref="status" />
                <xs:element ref="errors" />
                <xs:element minOccurs="0" ref="metrics" />
                <xs:element minOccurs="0" ref="timing" />
                <xs:element minOccurs="0" ref="spectrum" />
                <xs:element ref="location" />
            </xs:sequence>
            <xs:attribute name="id" use="required" type="xs:long" />
            <xs:attribute name="type" use="required" type="my-link-
type" />
        </xs:complexType>
    </xs:element>
    <xs:element name="status" type="my-status">
        <xs:annotation>
            <xs:documentation>Indicates whether the measurement
process was a success, a failure, or completed with
errors.</xs:documentation>
        </xs:annotation>
    </xs:element>
    <xs:element name="errors">
        <xs:annotation>
            <xs:documentation>Contains any errors that were
encountered during the measurement process.</xs:documentation>
        </xs:annotation>
        <xs:complexType>
            <xs:sequence>
                <xs:element minOccurs="0" ref="error"
maxOccurs="unbounded" />
            </xs:sequence>
        </xs:complexType>
    </xs:element>
    <xs:element name="error" type="xs:string">
        <xs:annotation>
            <xs:documentation>A message describing the error that was
encountered during the measurement process.</xs:documentation>
        </xs:annotation>
    </xs:element>
    <xs:element name="metrics">
        <xs:annotation>
            <xs:documentation>Includes the metrics that were computed
during the measurement process (case of downlink

```

```

measurement).</xs:documentation>
    </xs:annotation>
    <xs:complexType>
        <xs:sequence>
            <xs:element maxOccurs="unbounded" ref="metric"/>
        </xs:sequence>
    </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="metric" nillable="true">
    <xs:annotation>
        <xs:documentation>The value of the metric that was
computed.</xs:documentation>
        <xs:documentation>@type: The name of the
metric.</xs:documentation>
    </xs:annotation>
    <xs:complexType mixed="true">
        <xs:sequence>
            <xs:element minOccurs="0" maxOccurs="unbounded"
ref="metric-param"/>
        </xs:sequence>
        <xs:attribute name="type" use="required" type="my-
metric"/>
    </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="metric-param" nillable="true">
    <xs:annotation>
        <xs:documentation>The value of an additional metric-
specific parameter whose computation was
requested.</xs:documentation>
        <xs:documentation>@name: The name of the
parameter.</xs:documentation>
    </xs:annotation>
    <xs:complexType>
        <xs:simpleContent>
            <xs:extension base="xs:double">
                <xs:attribute name="name" use="required"
type="xs:NCName"/>
            </xs:extension>
        </xs:simpleContent>
    </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="timing">
    <xs:annotation>
        <xs:documentation>Specifies the time parameters of the
measurement (case of self-initiated measurement).</xs:documentation>
    </xs:annotation>
    <xs:complexType>
        <xs:sequence>
            <xs:element ref="begin-ms"/>
            <xs:element ref="end-ms"/>
        </xs:sequence>
    </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="begin-ms" type="xs:dateTime">
    <xs:annotation>
        <xs:documentation>Timestamp indicating the beginning of
the measurement process.</xs:documentation>
    </xs:annotation>

```



```

</xs:element>
<xs:element name="end-ms" type="xs:dateTime">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>Timestamp indicating the end of the
measurement process.</xs:documentation>
  </xs:annotation>
</xs:element>
<xs:element name="spectrum">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>Information about the spectrum portion
that was sensed (case of self-initiated
measurement).</xs:documentation>
  </xs:annotation>
  <xs:complexType>
    <xs:sequence>
      <xs:element ref="central-frequency"/>
      <xs:element ref="bandwidth"/>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="central-frequency">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>Central frequency [in KHz] of the
spectrum portion that was examined.</xs:documentation>
  </xs:annotation>
  <xs:simpleType>
    <xs:restriction base="xs:long">
      <xs:minInclusive value="0"/>
    </xs:restriction>
  </xs:simpleType>
</xs:element>
<xs:element name="bandwidth">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>The width [in KHz] of the frequency
band that was examined.</xs:documentation>
  </xs:annotation>
  <xs:simpleType>
    <xs:restriction base="xs:integer">
      <xs:minInclusive value="0"/>
    </xs:restriction>
  </xs:simpleType>
</xs:element>
<xs:element name="location">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>Holds the location information that was
requested to be reported. The location information reported by the
terminal is not exact, but rather an estimation of its true
position.</xs:documentation>
  </xs:annotation>
  <xs:complexType>
    <xs:sequence>
      <xs:element minOccurs="0" ref="loc-init"/>
      <xs:element minOccurs="0" maxOccurs="unbounded"
ref="path"/>
      <xs:element minOccurs="0" ref="loc-final"/>
      <xs:element minOccurs="0" ref="velocity"/>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>

```

```

</xs:element>
<xs:element name="loc-init">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>The terminal's location when the
measurement process was started.</xs:documentation>
  </xs:annotation>
  <xs:complexType>
    <xs:choice>
      <xs:element ref="absolute"/>
      <xs:element ref="relative"/>
    </xs:choice>
  </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="path">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>The terminal's location on a particular
time moment during the measurement process.</xs:documentation>
    <xs:documentation>@timestamp: Timestamp associated with
the terminal's recorded position.</xs:documentation>
  </xs:annotation>
  <xs:complexType>
    <xs:choice>
      <xs:element ref="absolute"/>
      <xs:element ref="relative"/>
    </xs:choice>
    <xs:attribute name="timestamp" use="required"
type="xs:dateTime"/>
  </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="loc-final">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>The terminal's location when the
measurement process just ended.</xs:documentation>
  </xs:annotation>
  <xs:complexType>
    <xs:choice>
      <xs:element ref="absolute"/>
      <xs:element ref="relative"/>
    </xs:choice>
  </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="absolute">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>The GPS coordinates of the terminal's
position.</xs:documentation>
  </xs:annotation>
  <xs:complexType>
    <xs:sequence>
      <xs:element ref="lat"/>
      <xs:element ref="lon"/>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="lat" type="xs:string" nillable="true">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>The latitude of the
location.</xs:documentation>
  </xs:annotation>

```

```

</xs:element>
<xs:element name="lon" type="xs:string" nillable="true">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>The longitude of the
location.</xs:documentation>
  </xs:annotation>
</xs:element>
<xs:element name="relative">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>The terminal's relative position
according to the base station's position.</xs:documentation>
  </xs:annotation>
  <xs:complexType>
    <xs:sequence>
      <xs:element ref="dist"/>
      <xs:element ref="angle"/>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="dist" nillable="true">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>The terminal's distance [in m] from the
base station.</xs:documentation>
  </xs:annotation>
  <xs:simpleType>
    <xs:restriction base="xs:double">
      <xs:minInclusive value="0"/>
    </xs:restriction>
  </xs:simpleType>
</xs:element>
<xs:element name="angle" nillable="true">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>The terminal's angular position [in
degrees] according to the base station's location.</xs:documentation>
  </xs:annotation>
  <xs:simpleType>
    <xs:restriction base="xs:double">
      <xs:minInclusive value="0"/>
      <xs:maxInclusive value="360"/>
    </xs:restriction>
  </xs:simpleType>
</xs:element>
<xs:element name="velocity" nillable="true">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>The terminal's average velocity during
the measurement process.</xs:documentation>
  </xs:annotation>
  <xs:simpleType>
    <xs:restriction base="xs:double">
      <xs:minInclusive value="0"/>
    </xs:restriction>
  </xs:simpleType>
</xs:element>
<xs:element name="device-info">
  <xs:annotation>
    <xs:documentation>Terminal device-related information
that was requested by the base station.</xs:documentation>
  </xs:annotation>

```

```

        <xs:complexType>
            <xs:sequence>
                <xs:element maxOccurs="unbounded" ref="device-param"
minOccurs="0" />
            </xs:sequence>
        </xs:complexType>
    </xs:element>
    <xs:element name="device-param" nillable="true">
        <xs:annotation>
            <xs:documentation>A terminal device parameter that was
requested to be reported.</xs:documentation>
        </xs:annotation>
        <xs:complexType mixed="true">
            <xs:attribute name="name" use="required" type="device-
parameters" />
        </xs:complexType>
    </xs:element>
    <xs:simpleType name="my-link-type">
        <xs:restriction base="xs:NCName">
            <xs:enumeration value="uplink" />
            <xs:enumeration value="downlink" />
        </xs:restriction>
    </xs:simpleType>
    <xs:simpleType name="my-status">
        <xs:restriction base="xs:string">
            <xs:enumeration value="Success" />
            <xs:enumeration value="Failure" />
            <xs:enumeration value="OK w/ errors" />
        </xs:restriction>
    </xs:simpleType>
    <xs:simpleType name="my-metric">
        <xs:restriction base="xs:NCName">
            <xs:enumeration value="SINR" />
            <xs:enumeration value="BER" />
            <xs:enumeration value="BEP" />
            <xs:enumeration value="SER" />
            <xs:enumeration value="SEP" />
            <xs:enumeration value="FER" />
            <xs:enumeration value="IT" />
        </xs:restriction>
    </xs:simpleType>
    <xs:simpleType name="device-parameters">
        <xs:restriction base="xs:NCName">
            <xs:enumeration value="brand" />
            <xs:enumeration value="model" />
            <xs:enumeration value="fw-version" />
            <xs:enumeration value="os-version" />
        </xs:restriction>
    </xs:simpleType>
</xs:schema>

```

Σχήμα 2-11. XML σχήμα προδιαγραφών των μηνυμάτων αναφοράς επαίσθησης

2.3.4 Ροή πληροφορίας

2.3.4.1 Γενικά

Στην παρούσα ενότητα, έχοντας παρουσιάσει την προτεινόμενη λειτουργική αρχιτεκτονική επαίσθησης τόσο του γνωστικού σταθμού βάσης όσο και του τερματικού, καθώς, επίσης, και το προτεινόμενο πρωτόκολλο επικοινωνίας του στρώματος επαίσθησης, θα αναλυθεί η ροή πληροφορίας μεταξύ των βασικών συνιστωσών της αρχιτεκτονικής. Για το σκοπό αυτό, υιοθετείται η χρήση διαγραμμάτων ακολουθίας (sequence diagrams), η κατασκευή των οποίων έγινε σύμφωνα με το πρότυπο UML (Unified/Universal Modeling Language) 2.0. Γενικά, ένα διάγραμμα ακολουθίας απεικονίζει τον τρόπο με τον οποίο ένα σύνολο διαδικασιών αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, καθώς και με ποια σειρά το πράττουν.

Στα επόμενα, γίνεται παρουσίαση της ροής πληροφορίας για τρεις διαφορετικές διαδικασίες της λειτουργίας της επαίσθησης:

- διαδικασία αποστολής αίτησης επαίσθησης
- διαδικασία επαίσθησης σε κανάλι καθόδου
- διαδικασία επαίσθησης σε κανάλι ανόδου

2.3.4.2 Ροή πληροφορίας στη διαδικασία αποστολής αίτησης επαίσθησης

Το Σχήμα 2-12 αποτελεί ένα διάγραμμα ακολουθίας της διαδικασίας προετοιμασίας, μετάδοσης και λήψης της αίτησης επαίσθησης. Σε πρώτη φάση, ο Ελεγκτής Επαίσθησης του σταθμού βάσης ανακτά και εξετάζει τα τρέχοντα δεδομένα επαίσθησης της ΒΔ Επαίσθησης, αναζητώντας τυχόν περιπτώσεις (ζώνες συχνοτήτων) για τις οποίες τα υπάρχοντα στοιχεία είναι ελλιπή (ή παρωχημένα). Αφού εντοπίσει και επιλέξει τις συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων, ο Ελεγκτής Επαίσθησης προχωρά στη συγκρότηση μιας κατάλληλης διαδικασίας επαίσθησης, καθορίζοντας τις διάφορες πτυχές/παραμέτρους της (όπως, για παράδειγμα (βλ. παράγραφο 2.3.3.2), την κατεύθυνση των υπό μέτρηση καναλιών (άνοδος/κάθοδος), τον τύπο των μέτρων ποιότητας καναλιού που θα χρησιμοποιηθούν, το ποσοστό των τερματικών που θα μετάσχουν, κ.λπ.). Έπεται ο χρονοπρογραμματισμός της εν λόγω διαδικασίας επαίσθησης και η διαβίβαση των παραμέτρων της στον Αιτούντα Επαίσθησης, ο οποίος, βάσει αυτών, συντάσσει το αντίστοιχο μήνυμα αίτησης

επαίσθησης (κατά τα πρότυπα όσων αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.3.3.2) και το αποστέλλει στα κινητά τερματικά της περιοχής.

Εν συνεχεία, στην πλευρά του τερματικού, ο Παραλήπτης Αιτήσεων υποδέχεται την αίτηση του σταθμού βάσης και την προωθεί στον Επεξεργαστή Αίτησης Επαίσθησης. Ο τελευταίος αναλύει συντακτικά το μήνυμα και, αφού αποφανθεί περί της εγκυρότητάς του, διαβιβάζει τις παραμέτρους της αιτούμενης διαδικασίας επαίσθησης στον Ελεγκτή Επαίσθησης του τερματικού, ο οποίος αναλαμβάνει το χρονοπρογραμματισμό της διαδικασίας.

2.3.4.3 Ροή πληροφορίας στη διαδικασία επαίσθησης σε κανάλι καθόδου

Το Σχήμα 2-13 αποτελεί ένα διάγραμμα ακολουθίας της διαδικασίας επαίσθησης σε κανάλι καθόδου (περίπτωση κατά την οποία οι μετρήσεις γίνονται στην πλευρά του τερματικού). Στη διαδικασία αυτή, διακρίνονται δύο διαφορετικές περιπτώσεις ροής πληροφορίας: μία για τη διεξαγωγή μετρήσεων βάσει πιλοτικού σήματος και μία για τη διεξαγωγή αυτόνομων μετρήσεων (χωρίς τη χρήση πιλοτικού σήματος). Το διάγραμμα που κατασκευάστηκε απεικονίζει τη ροή πληροφορίας και για τις δύο περιπτώσεις, κάνοντας χρήση ενός πλαισίου με ετικέτα «alt» (εναλλακτικές περιπτώσεις). Το πλαίσιο χωρίζεται, με διακεκομμένες γραμμές, σε περιοχές, καθεμιά από τις οποίες αντιστοιχεί και σε μία εναλλακτική περίπτωση, με άλλα λόγια και σε μια διαφορετική δυνατή τιμή μιας συγκεκριμένης συνθήκης. Στο παρόν διάγραμμα, η συνθήκη είναι ο τύπος των διεξαγόμενων μετρήσεων και, όπως ειπώθηκε, υπάρχουν δύο δυνατές τιμές, συνεπώς δύο διαφορετικές περιοχές.

Κατά τη διαδικασία επαίσθησης βάσει πιλοτικού σήματος, η ροή πληροφορίας ξεκινά με τον Ελεγκτή Επαίσθησης του σταθμού βάσης, από τη μια, και του τερματικού, από την άλλη, να δίνουν εντολή αναδιάρθρωσης στον Αιτούντα Αναδιάρθρωσης. Η εντολή αυτή εκδίδεται ως συνέπεια του χρονοπρογραμματισμού τον οποίο έχει επιλέξει ο σταθμός βάσης και για τον οποίο έχει ενημερώσει το τερματικό μέσω αντίστοιχης αίτησης επαίσθησης (περίπτωση σχήματος επαίσθησης ελεγχόμενης από το σταθμό βάσης, βλ. Σχήμα 2-12). Εν συνεχεία, ο Ελεγκτής Επαίσθησης του τερματικού διαβιβάζει στον Εκτιμητή Ποιότητας Καναλιού τις παραμέτρους της διαδικασίας μέτρησης που επίκειται (όπως, για παράδειγμα, το αναγνωριστικό της πιλοτικής ακολουθίας που πρόκειται να ληφθεί, το σχήμα διαμόρφωσής της, το είδος των μέτρων που απαιτείται να υπολογιστούν, κ.λπ.). Από

την άλλη, ο Μεταδότης Πιλοτικού Σήματος του σταθμού βάσης ξεκινά την εκπομπή της πιλοτικής ακολουθίας, μετά την ολοκλήρωση της οποίας ο σταθμός βάσης επανασυντονίζεται στην αρχική ζώνη συχνοτήτων (αναδιάρθρωση). Ο Εκτιμητής Ποιότητας Καναλιού του τερματικού λαμβάνει την πιλοτική ακολουθία και προχωρά στη μέτρηση της ποιότητας του καναλιού.

Κατά τη διαδικασία επαίσθησης χωρίς τη χρήση πιλοτικού σήματος, η ροή πληροφορίας ξεκινά με τον Ελεγκτή Επαίσθησης του τερματικού να δίνει εντολή αναδιάρθρωσης στον Αιτούντα Αναδιάρθρωσης. Η έκδοση της εντολή αυτής μπορεί να επέλθει είτε ως επακόλουθο μιας αίτησης επαίσθησης εκ μέρους του σταθμού βάσης (σχήμα επαίσθησης ελεγχόμενης από το σταθμό βάσης) είτε από πρωτοβουλία του ίδιου του Ελεγκτή Επαίσθησης του τερματικού (σχήμα αυτόνομης επαίσθησης). Εν συνεχεία, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, ο Ελεγκτής Επαίσθησης του τερματικού διαβιβάζει στον Εκτιμητή Ποιότητας Καναλιού τις παραμέτρους της διαδικασίας μέτρησης που επίκειται. Ο τελευταίος προχωρά στην εκτίμηση της ποιότητας του καναλιού βάσει των επιπέδων της ηλεκτρομαγνητικής ισχύος που λαμβάνει στην υπό εξέταση ζώνη συχνοτήτων.

Η συνέχεια της ροής πληροφορίας είναι ίδια και για τους δύο τύπους μετρήσεων. Τα αποτελέσματα της μέτρησης διαβιβάζονται στο Δημιουργό Αναφοράς Επαίσθησης, ενώ, παράλληλα, ο Ελεγκτής Επαίσθησης δίνει εντολή επιστροφής στην αρχική διάρθρωση. Ο Δημιουργός Αναφοράς Επαίσθησης συντάσσει ένα μήνυμα αναφοράς επαίσθησης (δομημένο σύμφωνα με τις προδιαγραφές που καθορίστηκαν στην παράγραφο 2.3.3.3), βάσει των αποτελεσμάτων της μέτρησης, το οποίο και αποστέλλει στο σταθμό βάσης. Σημειωτέον ότι, στην πράξη, Δημιουργός Αναφοράς Επαίσθησης μπορεί να ενσωματώσει τα αποτελέσματα πολλαπλών διαδικασιών μέτρησης στο ίδιο μήνυμα, καθώς και να προχωρήσει στην αποστολή του μηνύματος όχι άμεσα αλλά μετά την πάροδο ενός χρονικού διαστήματος. Στην πλευρά του σταθμού βάσης, ο Συλλέκτης Δεδομένων Επαίσθησης είναι υπεύθυνος για την παραλαβή του μηνύματος και τη διαβίβασή του στον Προ-επεξεργαστή Δεδομένων Επαίσθησης, ο οποίος προχωρά στη συντακτική του ανάλυση και στην αποθήκευση των πληροφοριών που περιέχει στη ΒΔ Επαίσθησης.

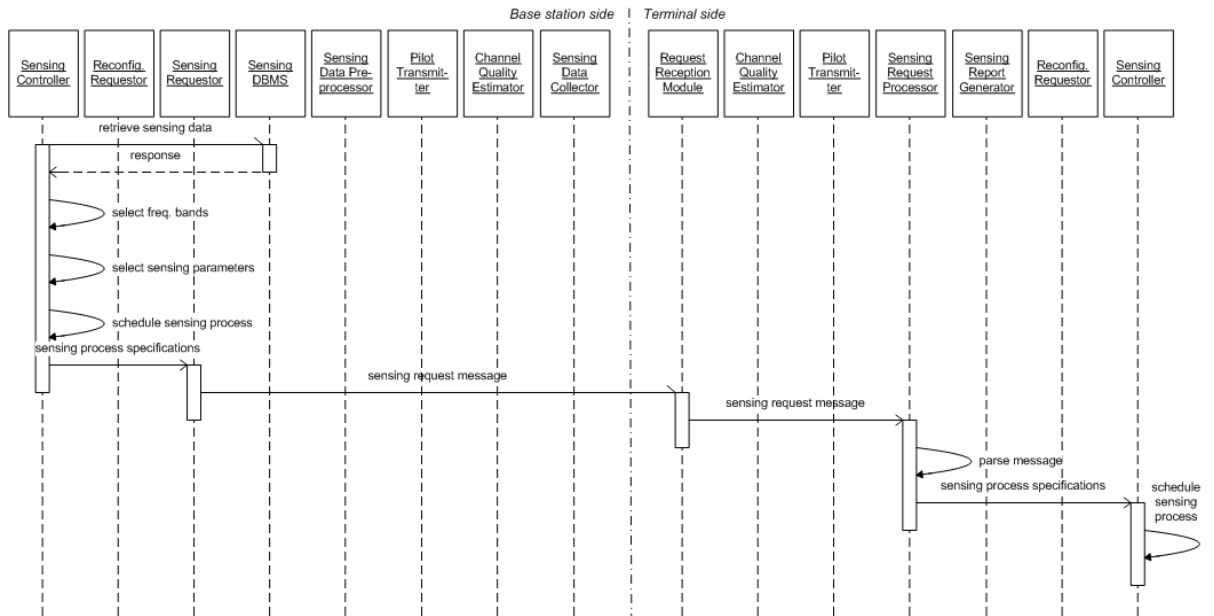
2.3.4.4 Ροή πληροφορίας στη διαδικασία επαίσθησης σε κανάλι ανόδου

Το Σχήμα 2-14 αποτελεί ένα διάγραμμα ακολουθίας της διαδικασίας επαίσθησης σε κανάλι ανόδου (περίπτωση κατά την οποία οι μετρήσεις γίνονται στην πλευρά του σταθμού βάσης). Όπως και στη διαδικασία επαίσθησης σε κανάλι καθόδου, διακρίνονται και εδώ δύο διαφορετικές περιπτώσεις ροής πληροφορίας: μία για τη διεξαγωγή μετρήσεων βάσει πιλοτικού σήματος και μία για τη διεξαγωγή αυτόνομων μετρήσεων (χωρίς τη χρήση πιλοτικού σήματος). Για το διαχωρισμό των δύο περιπτώσεων, γίνεται και πάλι χρήση ενός πλαισίου με ετικέτα «alt».

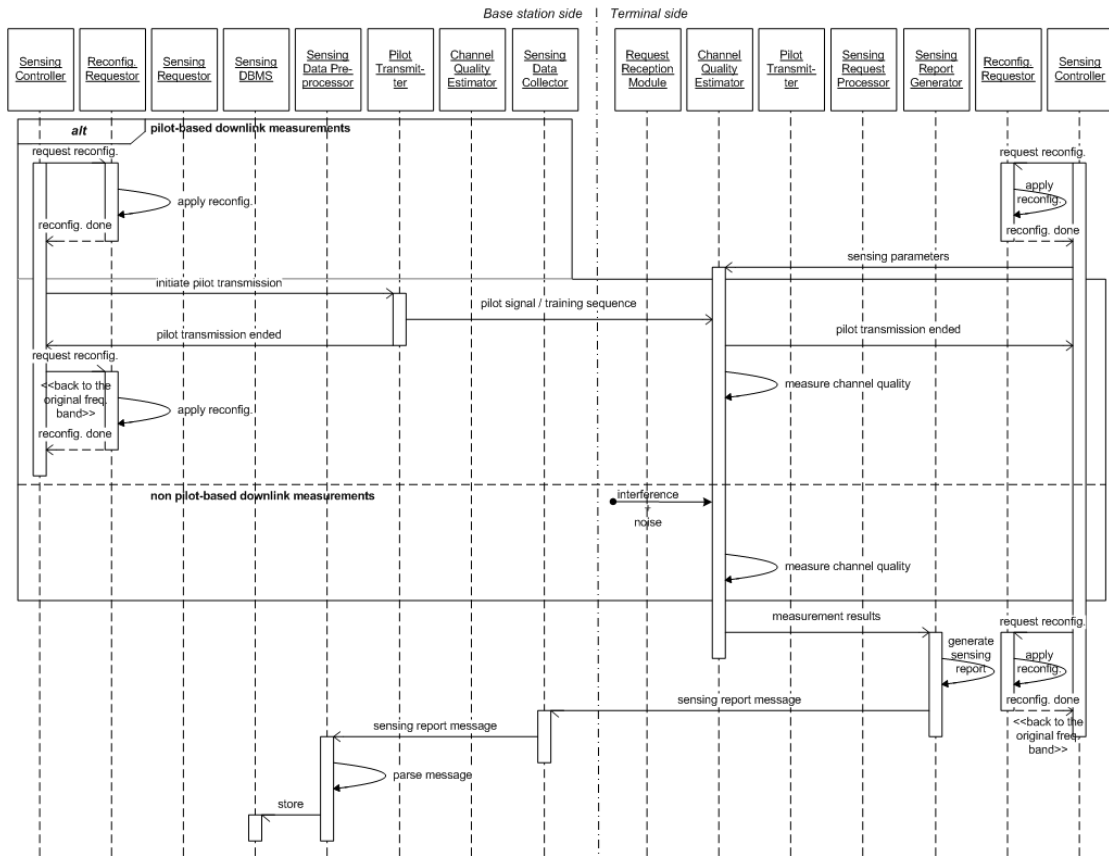
Κατά τη διαδικασία επαίσθησης βάσει πιλοτικού σήματος, η ροή πληροφορίας ξεκινά με τον Ελεγκτή Επαίσθησης του σταθμού βάσης, από τη μια, και του τερματικού, από την άλλη, να δίνουν εντολή αναδιάρθρωσης στον Αιτούντα Αναδιάρθρωσης. Η εντολή αυτή εκδίδεται ως συνέπεια του χρονοπρογραμματισμού τον οποίο έχει επιλέξει ο σταθμός βάσης και για τον οποίο έχει ενημερώσει το τερματικό μέσω αντίστοιχης αίτησης επαίσθησης (περίπτωση σχήματος επαίσθησης ελεγχόμενης από το σταθμό βάσης, βλ. Σχήμα 2-12). Εν συνεχεία, ο Ελεγκτής Επαίσθησης του σταθμού βάσης διαβιβάζει στον Εκτιμητή Ποιότητας Καναλιού τις παραμέτρους της διαδικασίας μέτρησης που επίκειται. Από την άλλη, ο Μεταδότης Πιλοτικού Σήματος του τερματικού ξεκινά την εκπομπή της πιλοτικής ακολουθίας, μετά την ολοκλήρωση της οποίας το τερματικό επανασυντονίζεται στην αρχική ζώνη συχνοτήτων (αναδιάρθρωση). Ο Εκτιμητής Ποιότητας Καναλιού του σταθμού βάσης λαμβάνει την πιλοτική ακολουθία και προχωρά στη μέτρηση της ποιότητας του καναλιού.

Κατά τη διαδικασία επαίσθησης χωρίς τη χρήση πιλοτικού σήματος, η ροή πληροφορίας ξεκινά με τον Ελεγκτή Επαίσθησης του σταθμού βάσης να δίνει εντολή αναδιάρθρωσης στον Αιτούντα Αναδιάρθρωσης. Η έκδοση της εντολής αυτής μπορεί να επέλθει με απόφαση του Ελεγκτή Επαίσθησης του σταθμού βάσης, ύστερα από εξέταση της επάρκειας των διαθέσιμων δεδομένων επαίσθησης. Εν συνεχεία, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, ο Ελεγκτής Επαίσθησης του σταθμού βάσης διαβιβάζει στον Εκτιμητή Ποιότητας Καναλιού τις παραμέτρους της διαδικασίας μέτρησης που επίκειται. Ο τελευταίος προχωρά στην εκτίμηση της ποιότητας του καναλιού βάσει των επιπέδων της ηλεκτρομαγνητικής ισχύος που λαμβάνει στην υπό εξέταση ζώνη συχνοτήτων.

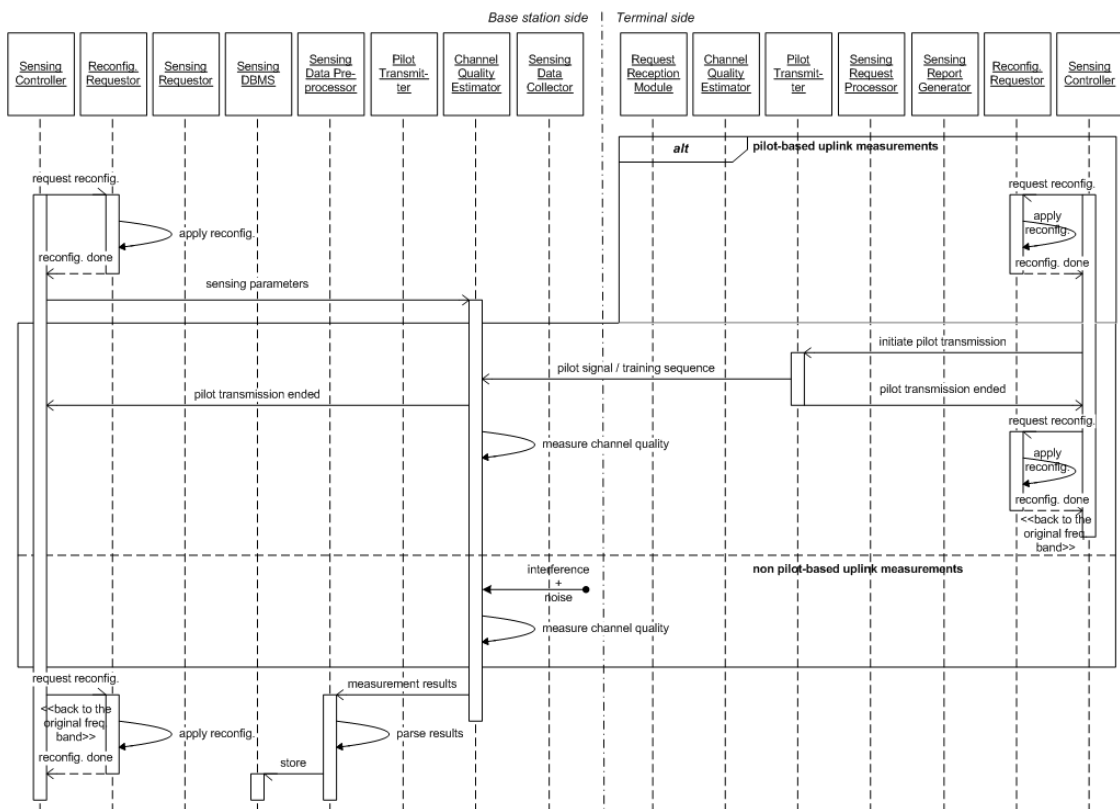
Η συνέχεια της ροής πληροφορίας είναι ίδια και για τους δύο τύπους μετρήσεων. Τα αποτελέσματα της μέτρησης διαβιβάζονται στον Προ-επεξεργαστή Δεδομένων Επαίσθησης, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την αποθήκευσή τους στη ΒΔ Επαίσθησης, ώστε να γίνουν διαθέσιμα για μελλοντική χρήση.



Σχήμα 2-12. Διάγραμμα ακολουθίας της διαδικασίας προετοιμασίας, μετάδοσης και λήψης της αίτησης επαίσθησης



Σχήμα 2-13. Διάγραμμα ακολουθίας της διαδικασίας επαίσθησης σε κανάλι καθόδου



Σχήμα 2-14. Διάγραμμα ακολουθίας της διαδικασίας επαίσθησης σε κανάλι ανόδου

2.3.5 Ειδικά θέματα υλοποίησης

Οι προδιαγραφές που προτείνονται και παρατίθενται μέσα από την ενότητα 2.3 του παρόντος κεφαλαίου συντείνουν στην πλήρη κάλυψη όλων των απαραίτητων απαιτήσεων για την υποστήριξη της λειτουργίας της επαίσθησης σε ένα γνωστικό δίκτυο. Η πλειοψηφία των θεμάτων υλοποίησης της λειτουργίας συζητήθηκαν εκτενώς στις προηγούμενες παραγράφους, ενώ αυτά που απομένουν αντιμετωπίζονται αμέσως πιο κάτω.

Η συνεννόηση του γνωστικού σταθμού βάσης με τα κινητά τερματικά γίνεται μέσω των μηνυμάτων αίτησης επαίσθησης του προτεινόμενου πρωτοκόλλου επικοινωνίας του στρώματος επαίσθησης. Στην περίπτωση που τα τερματικά είναι συνδεδεμένα σε ένα βασισμένο στο IP (Internet Protocol) δίκτυο, όπως, για παράδειγμα, σε ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο (WLAN), και έχουν, συνεπώς, IP συνδεσιμότητα, η λήψη των αιτήσεων επαίσθησης είναι σχετικά απλή υπόθεση και μπορεί να υλοποιηθεί μέσω του γνωστού μοντέλου πελάτη-εξυπηρετητή: το λογισμικό επαίσθησης του τερματικού έχει δεσμεύσει μία συγκεκριμένη, πασίγνωστη θύρα στο σύστημα του τερματικού και ακούει σε αυτήν. Ο σταθμός βάσης δεν έχει παρά να θέσει ως θύρα προορισμού της αίτησής του τη συγκεκριμένη θύρα και να αποστείλει το μήνυμα (είτε μέσω ευρυεκπομπής είτε με συνδέσεις σημείου προς σημείο).

Στην περίπτωση των κυψελωτών δικτύων, ωστόσο, κάτι τέτοιο δεν μπορεί να ισχύσει, τουλάχιστον με τις σημερινές υλοποιήσεις. Στα δίκτυα αυτά, τα κινητά τερματικά δεν έχουν IP συνδεσιμότητα ανά πάση στιγμή, παρά μόνο κατ' απαίτηση. Μόλις, επί παραδείγματι, ο χρήστης κλείσει την εφαρμογή του πλοηγού ιστού, η IP συνδεσιμότητα χάνεται και η IP διεύθυνση του τερματικού απολύεται. Συνεπώς, σε τέτοιου είδους δίκτυα, η παράδοση των αιτήσεων μπορεί να γίνει μόνο μέσω καναλιών ευρυεκπομπής ή μέσω αποκλειστικών σημείου-προς-σημείο καναλιών. Στο GSM, για παράδειγμα, η πρώτη περίπτωση αντιστοιχεί στη χρήση ενός μηνύματος CBS (Cell Broadcast Service) για τη μετάδοση της αίτησης, ενώ η δεύτερη στη χρήση πολλαπλών μηνυμάτων SMS (Short Message Service) ή WAP-push (Wireless Application Protocol). Όπως εύκολα συμπεραίνει κανείς, στην πρώτη περίπτωση επιφέρεται σαφώς μικρότερη επιβάρυνση στη συμφόρηση του δικτύου, ενώ στη δεύτερη υπάρχει η δυνατότητα της επιλεκτικής διανομής του μηνύματος. Ένας τρόπος συγκερασμού των πλεονεκτημάτων των δύο μεθόδων, μέσω της χρήσης

ευρυεκπομπής αλλά και της εφαρμογής μιας διαδικασίας τυχαίας επιλογής στην πλευρά του τερματικού, αναλύθηκε στην παράγραφο 2.3.3.2.

Αναφορικά με τη συμφόρηση που προκαλείται στη ζεύξη ανόδου από τις αναφορές των τερματικών, υπάρχουν αρκετοί τρόποι αντιμετώπισης:

- χρήση διαμοιραζόμενου καναλιού αντί διακριτών σημείου-προς-σημείο συνδέσεων
- σε ώρες αιχμής, αναβολή της αποστολής των αποτελεσμάτων
- μείωση του μεγέθους των αποσπελλόμενων μηνυμάτων

Προφανώς, οι παραπάνω λύσεις, με εξαίρεση την τελευταία, έρχονται υπό το κόστος της μεγαλύτερης καθυστέρησης στη συλλογή των αποτελεσμάτων από το σταθμό βάσης. Αναλόγως του πόσο επείγουσα είναι μια διαδικασία επαίσθησης, ο σταθμός βάσης μπορεί να βρει τη χρυσή τομή ανάμεσα στο χρόνο συλλογής και στην επιβάρυνση των ραδιοπόρων του δικτύου.

Όσον αφορά τη μείωση του μεγέθους των ανταλλασσόμενων μηνυμάτων επαίσθησης, αυτή μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση των ακόλουθων μεθόδων:

- *Απαλοιφή των λευκών κενών*: Πρόκειται για τους χαρακτήρες κενού, στηλοθέτη, αλλαγής γραμμής, κ.λπ., οι οποίοι δεν προσθέτουν καμία επιπλέον πληροφορία στο περιεχόμενο του μηνύματος, απλά το κάνουν πιο αναγνώσιμο (χωρίς να διευκολύνουν σε τίποτα την επεξεργασία του από μια μηχανή). Για παράδειγμα, στο μήνυμα αίτησης που παρατίθεται στο Σχήμα 2-8, η απαλοιφή των λευκών κενών επιφέρει μια μείωση μεγέθους άνω του 10%, ενώ στο μήνυμα αναφοράς που παρατίθεται στο Σχήμα 2-9, επιφέρει μια μείωση μεγέθους της τάξεως του 20%.
- *Ελάττωση του μεγέθους των ετικετών των μηνυμάτων*: Πρόκειται για τα ονόματα των στοιχείων και των χαρακτηριστικών που περιλαμβάνει κάθε μήνυμα. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, τα ονόματα που δόθηκαν στις ετικέτες των μηνυμάτων ήταν επίτηδες μεγάλα σε μέγεθος, ώστε να είναι περιγραφικά (ενδεικτικά της σημασίας τους). Στην πράξη, ωστόσο, κάτι τέτοιο δεν είναι απαραίτητο και μπορούν να επιλεγούν μικρότερα ονόματα. Δεδομένου ότι, μέσα στα μηνύματα, το πλήθος χαρακτήρων των ετικετών είναι σαφώς μεγαλύτερο από εκείνο των τιμών των στοιχείων, μια μείωση του μεγέθους των ετικετών κατά 80% μπορεί να επιφέρει μια συνολική μείωση μεγέθους σε ποσοστό συγκρίσιμο με το 80%. Εφόσον

συνδυαστεί και με την απαλοιφή λευκών κενών, η συγκεκριμένη μέθοδος οδηγεί σε ελάττωση μεγέθους που μπορεί να αγγίζει και το 80%.

- *Χρήση συμπίεσης:* Η συμπίεση των μηνυμάτων με χρήση κάποιου δημοφιλούς αλγορίθμου συμπίεσης, όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται από τα διαδεδομένα εργαλεία gzip [68]-[69] και rar [70], μπορεί να επιφέρει θεαματικά αποτελέσματα ελάττωσης του μεγέθους τους. Για παράδειγμα, στο μήνυμα αίτησης που παρατίθεται στο Σχήμα 2-8, η χρήση συμπίεσης επιφέρει μια μείωση μεγέθους στους 830 χαρακτήρες από 2900, ενώ στο μήνυμα αναφοράς που παρατίθεται στο Σχήμα 2-9, επιφέρει μια μείωση μεγέθους στους 930 χαρακτήρες από 4500. Μάλιστα, για μηνύματα μεγαλύτερου μεγέθους τα ποσοστά συμπίεσης είναι ακόμα υψηλότερα. Το μόνο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι η διαδικασία συμπίεσης/αποσυμπίεσης καταναλώνει χρόνο και επεξεργαστική ισχύ. Ωστόσο, οι υπολογιστικές ικανότητες των σημερινών τερματικών υπερκαλύπτουν τις απαιτήσεις της εν λόγω μεθόδου σε επεξεργαστική ισχύ.
- *Χρήση δυαδικής κωδικοποίησης:* Μια επιπλέον δυνατότητα είναι η χρήση δυαδικής XML κωδικοποίησης αντί της συμβατικής, βασισμένης σε κείμενο XML κωδικοποίησης [71]-[72]. Με τον όρο δυαδική XML (Binary XML), αναφερόμαστε σε οποιοδήποτε πρότυπο καθορίζει τη συμπαγή αναπαράσταση της XML σε μια δυαδική μορφή. Παρόλο που υπάρχουν αρκετά ανταγωνιζόμενα πρότυπα αυτήν τη στιγμή, κανένα από αυτά δεν έχει τύχει ευρείας αποδοχής είτε από κάποιον οργανισμό προτυποποίησης είτε από την ίδια την αγορά. Η χρήση της δυαδικής XML μειώνει την «αμετροέπεια» της συμβατικής XML, καθώς, επίσης και το κόστος (δηλαδή, τον απαιτούμενο χρόνο) της συντακτικής ανάλυσης και επεξεργασίας [74]-[76]. Μάλιστα, με τη χρήση δυαδικής XML, η ταχύτητα επεξεργασίας μπορεί να αυξηθεί από 4 έως 10 φορές. Τα σημαντικότερα πρότυπα που έχουν κάνει την εμφάνισή τους είναι το Fast Infoset [73] από το Διεθνή Οργανισμό Προτυποποίησης (International Organization for Standardization - ISO) και τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (and the International Telecommunications Union - ITU), το EXI (Efficient XML Interchange) [77]-[78] από την AgileDelta, Inc. [79] και το World Wide Web Consortium (W3C), το EBML (Extensible Binary Meta Language) [80]-[81] από τη Matroska, το BiM (Binary MPEG format for XML) [82]

από την ομάδα εργασίας του ISO για το MPEG, κ.ά. Μια εναλλακτική επιλογή, αντί του συντακτικού XML, αποτελεί και η χρήση του προτύπου ASN.1 (Abstract Syntax Notation One) [83]-[84] σε συνδυασμό με τους κανόνες κωδικοποίησης PER (Packed Encoding Rules) [85], οι οποίοι έχουν, εν γένει, ως αποτέλεσμα την παραγωγή μικρότερων και ευκολότερα μεταφέρσιμων δομών δεδομένων.

Όλες οι παραπάνω μέθοδοι αποτελούν έγκυρες λύσεις για τη μείωση του μεγέθους τόσο των μηνυμάτων αίτησης επαίσθησης όσο και των μηνυμάτων αναφοράς επαίσθησης, επομένως και του συνεπαγόμενου φορτίου κίνησης επαίσθησης (sensing traffic load) στην κάθοδο και την άνοδο.

Αναφορικά με την κατανάλωση μπαταρίας του συστήματος επαίσθησης στην πλευρά του τερματικού, μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι η προτεινόμενη αρχιτεκτονική αξιοποιεί τις υπάρχουσες δυνατότητες των τερματικών, τα οποία, ούτως ή άλλως, στα τωρινά δίκτυα κινητών επικοινωνιών επιτελούν μετρήσεις, σε τακτική βάση, τις οποίες είτε τις αξιοποιούν αυτόνομα είτε τις μοιράζονται, σε περιορισμένο βαθμό, υπό τη μορφή αναφορών δικτυακών μετρήσεων, με το δίκτυο στο οποίο είναι συνδεδεμένα. Φυσικά, οι παραπάνω μετρήσεις δεν αφορούν παρά την εμπειρία του τερματικού από το βαθμό ραδιοκάλυψης και την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών στην τρέχουσα διάρθρωσή του, δεν πρόκειται, δηλαδή, για διαδικασίες επαίσθησης.

Επιπρόσθετα, η κατανάλωση ενέργειας του συστήματος μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με την εφαρμογή συγκεκριμένων τεχνικών υλοποίησης. Μια τέτοια τεχνική είναι η χρήση ενός μηχανισμού που να επιτρέπει στο λογισμικό να εκτελείται αυτόματα, οποτεδήποτε πληρούνται κάποιες προϋποθέσεις, χωρίς, ωστόσο, η διεργασία της εφαρμογής να τρέχει στο παρασκήνιο, καταναλώνοντας πόρους και ενέργεια. Ένας τέτοιος κατάλληλος μηχανισμός είναι ο μηχανισμός Push Registry (Ωθηση Μητρώου) [86] του προφίλ MIDP 2.0 (Mobile Information Device Profile 2.0) της πλατφόρμας Java 2 Micro Edition (J2ME) [87]-[87], που είναι κατάλληλη για ανάπτυξη λογισμικού σε κινητά τερματικά. Η έννοια της «ώθησης» (“push”) είναι, γενικά, ένας πολύ ισχυρός μηχανισμός ο οποίος σχετίζεται με την ικανότητα μιας εφαρμογής να λαμβάνει ερεθίσματα και να δρα ασύγχρονα, αντί να χρησιμοποιεί τεχνικές σύγχρονης σταθμοσκόπησης (synchronous polling techniques), οι οποίες, ως γνωστόν, αυξάνουν τη χρήση του πόρων ή την καθυστέρηση. Ο μηχανισμός Push Registry επιτρέπει στις J2ME εφαρμογές να ρυθμίσουν τους εαυτούς τους ώστε να

εκκινούνται αυτόματα, χωρίς την παρέμβαση του χρήστη. Ο μηχανισμός προσφέρει υποστήριξη για δύο τύπους ενεργοποίησης:

- ενεργοποίηση εκκινούμενη από το δίκτυο (network-initiated)
- ενεργοποίηση εκκινούμενη από χρονόμετρο (timer-initiated)

Με άλλα λόγια, επιτρέπει σε μια εισερχόμενη σύνδεση δικτύου ή σε ένα συναγερμό ενός χρονόμετρου να ξυπνήσει την J2ME εφαρμογή. Προφανώς, ένας τέτοιου είδους μηχανισμός είναι εξαιρετικά χρήσιμος ως μέθοδος ενεργοποίησης του λογισμικού επαίσθησης, αφού, κατ' αυτόν τον τρόπο, το λογισμικό δεν είναι αναγκαίο να τρέχει συνέχεια, ούτε καν στο παρασκήνιο, εξοικονομώντας έτσι ενέργεια.

Ειδικά για την περίπτωση της εκκινούμενης από το δίκτυο ενεργοποίησης, είναι δυνατό η εν λόγω εφαρμογή να ρυθμιστεί έτσι, ώστε να εκτελείται οποτεδήποτε λαμβάνεται σε συγκεκριμένη θύρα/ες του συστήματος:

- ένα δεδομένογραμμα UDP (UDP datagram)
- μια αίτηση TCP πρόσδεσης
- ένα SMS μήνυμα
- ένα WAP-push μήνυμα
- ένα CBS μήνυμα, κ.ά.

Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, η J2ME εφαρμογή εγγράφεται στο μητρώο του Συστήματος Διαχείρισης Εφαρμογών (Application Management System - AMS) του τερματικού, ώστε να ενεργοποιείται μόνον όποτε ένα μήνυμα (π.χ., τύπου SMS) απευθύνεται σε συγκεκριμένη, πασίγνωστη θύρα (ή σε συγκεκριμένες θύρες), και όχι αδιακρίτως του αριθμού της θύρας προορισμού. Επιπλέον, τα μηνύματα SMS/CBS στη λήψη και διαχείριση των οποίων παρεμβάλλεται κάποια J2ME εφαρμογή δεν παραδίδονται στο γηγενές κουτί εισερχόμενων μηνυμάτων (native inbox), ενώ η πληροφορία σχετικά με τον αριθμό θύρας προορισμού κωδικοποιείται στην επικεφαλίδα των συγκεκριμένων μηνυμάτων.

Αν και η πλατφόρμα J2ME δεν προσφέρει, στην παρούσα τουλάχιστον έκδοση του προφίλ MIDP, δυνατότητες πρόσβασης σε λειτουργίες χαμηλών στρωμάτων, εντούτοις ένας γηγενής μηχανισμός σαν αυτόν που υποστηρίζει η J2ME μπορεί να φανεί χρήσιμος στην κατεύθυνση της τελειοποίησης της υλοποίησης του συστήματος επαίσθησης ενός τερματικού.

2.4 Παραπομπές

- [1] G. Staple and K. Werbach, “The end of spectrum scarcity”, *IEEE Spectrum*, vol. 41, no. 3, pp. 48–52, March 2004.
- [2] D. Cabric, S. M. Mishra, and R. W. Brodersen, “Implementation Issues in Spectrum Sensing for Cognitive Radios”, in *Conference Record of the 38th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, vol. 1, pp. 772-776, Nov. 2004.
- [3] J. Mitola and G. Maguire Jr., “Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal”, *IEEE Personal Communications Magazine*, vol. 6, no. 6, pp. 13-18, Aug. 1999.
- [4] J. Mitola, “Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio”, Doctor of Technology, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2000.
- [5] W. Tuttlebee, *Software Defined Radio: Origins, Drivers, and International Perspectives*. New York: John Wiley, 2002.
- [6] M. Dillinger, K. Madani, and N. Alonistioti, *Software Defined Radio: Architectures, Systems and Functions*. New York: John Wiley, 2003.
- [7] S. Haykin, “Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications”, *IEEE Journal on Selected Areas In Communications*, vol. 23, no. 2, pp. 201-220, Feb. 2005.
- [8] B. Walke, P. Seidenberg, and M. P. Althoff, *UMTS – The Fundamentals*. New York: John Wiley, 2003.
- [9] A. Sampath and D. R. Jeske, “Analysis of Signal-to-Interference Ratio Estimation Methods for Wireless Communication Systems”, in *IEEE International Conference on Communications*, Helsinki, Finland, vol. 8, pp. 2499-2503, June 2001.
- [10] D. R. Jeske and A. Sampath, “Signal-to-Interference Ratio Estimation Based on Decision Feedback”, in *IEEE VTS 53rd Vehicular Technology Conference*, Rhodes, Greece, vol. 4, pp. 2484-2488, Spring 2001.
- [11] C. E. Gilchrist, “Signal-to-noise Monitoring”, *JPL Space Programs Summary*, vol. IV, no. 32-37, pp. 169-184, June 1966.
- [12] J. W. Layland, “On S/N Estimation”, *JPL Space Programs Summary*, vol. III, no. 37-48, pp. 209-212, 1967.

- [13] C. M. Thomas, "Maximum Likelihood Estimation of Signal-to-Noise Ratio", Ph.D. Dissertation, University of Southern California, Los Angeles, 1967.
- [14] T. R. Benedict and T. T. Soong, "The joint estimation of signal and noise from the sum envelope", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. IT-13, no. 3, pp. 447-454, 1967.
- [15] B. Shah and S. Hinedi, "The split symbol moments SNR estimator in narrow-band channels", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 25, no. 5, pp. 737-747, 1990.
- [16] D. R. Pauluzzi and N. C. Beaulieu, "A Comparison of SNR Estimation Techniques in the AWGN Channel", in *Proc. of the IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing*, pp. 36-39, 1995.
- [17] S. Kozono, "Co-channel interference measurement method for mobile communication", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. VT-36, no. 1, pp. 7-13, 1987.
- [18] S. Yoshida, A. Hirai, G. L. Tan, H. Zhou, and T. Takeuchi, "In-service monitoring of multipath delay-spread and C/I for QPSK signal," in *Proc. of the IEEE 42nd Vehicular Technology Conference*, Denver, CO, pp. 592-595, April 1992.
- [19] M. Türkboylari and G. L. Stüber, "An Efficient Algorithm for Estimating the Signal-to-Interference Ratio in TDMA Cellular Systems", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 46, no. 6, pp. 728-731, June 1998.
- [20] M. D. Austin and G. L. Stüber, "In-service signal quality estimation for TDMA cellular systems", *Kluwer Wireless Personal Communications*, vol. 2, no. 3, pp. 245-254, Sept. 1995.
- [21] A. Brandão, L. Lopez, and D. McLernon, "Cochannel interference estimation for M-ary PSK modulated signals", *Wireless Personal Communications*, vol. 1, no. 1, pp. 23-32, 1994.
- [22] A. Brandão, L. Lopez, and D. McLernon, "Quality assessment for pre-detection diversity switching", in *Proc. of the IEEE PIMRC*, Toronto, Ontario, Canada, pp. 577-581, Sept. 1995.
- [23] M. Andersin, N. B. Mandayam, and R. D. Yates, "Subspace based estimation of the signal to interference ratio for TDMA cellular systems", in *IEEE Vehicular Technology Conference*, Atlanta, GA, pp. 1155-1159, April 1996.

- [24] T. Petennanny, D. Boss, and K. D. Kammeyer, "Blind GSM Channel Estimation under Channel Coding Conditions", in *Proc. of the 38th Conference on Decision and Control*, Phoenix, Arizona, USA, Dec. 1999.
- [25] D. Shin, W. Sung, and I. Kim, "Simple SNR Estimation Methods for QPSK Modulated Short Bursts", in *Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conference (GlobeCom 2001)*, vol. 6, pp 3644-3647, Nov. 2001.
- [26] J. M. Jacobsmeyer, "Adaptive data rate modem", U.S. Patent 5 541 955, July 1996.
- [27] K. Balachandran, S. R. Kadaba, and S. Nanda, "Channel Quality Estimation and Rate Adaptation for Cellular Mobile Radio", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 17, no. 7, pp. 1244-1256, July 1999.
- [28] K. K. Leung, J. H. Winters, and L. J. Cimini Jr., "Interference Estimation With Noisy Measurements in Broadband Wireless Packet Networks", in *IEEE VTS 54th Vehicular Technology Conference*, Atlantic City, NJ, USA, vol. 2, pp. 1125-1129, Fall 2001.
- [29] L. Hanzo, W. Webb, and T. Keller, *Single- and Multi-carrier Quadrature Amplitude Modulation*. New York: John Wiley, 1999.
- [30] L. Husson and A. Wautier, "Estimation of noise and interfering power for transmissions over Rayleigh fading channels", in *IEEE VTC'2001*, vol. 3, pp. 1548-1552, 2001.
- [31] K. Balachandran, S. R. Kadaba, and S. Nanda, "Channel Quality Estimation and rate adaptation for Cellular Mobile Radio", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 17, no. 7, July 1999.
- [32] D. Ramakrishna, N. B. Mandayam, and R. D. Yates, "Subspace-Based SIR Estimation for CDMA Cellular Systems", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 49, no. 5, pp. 1732-1742, Sept. 2000.
- [33] Yu T. Su and Ju-Ya Chen, "Carrier-to-Interference Ratio Measurement Using Moments or Histograms", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 48, no. 8, pp. 1338-1346, Aug. 2000.
- [34] C. W. Wang and L. C. Wang, "Signal-to-Interference Ratio Measurement Techniques for CDMA Cellular Systems in a Frequency-Selective Multipath Fading Channel", in *3rd IEEE Signal Processing Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC'01)*, pp. 34-37, March 2001.

- [35] S. Gunaratne, P. Taaghoul, and R. Tafazolli, "Signal quality estimation algorithm", *Electronics Letters*, vol. 36, no. 22, pp.1882-1884, Oct. 2000.
- [36] S. Gunaratne, T. G. Jeans, R. Tafazolli, and B. G. Evans, "Comparison of SIR Estimation Techniques for Closed-Loop Power Control in the W-CDMA System", in *European Wireless 2002*, Florence, Italy, pp. 911-915, Feb. 2002.
- [37] A. Fahrner, H. Dieterich, and T. Frey, "SIR Estimation for Fast Power Control for FDD-UMTS", in *IEEE 56th Vehicular Technology Conference*, vol. 2, pp. 1274-1278, Fall 2002.
- [38] G. G. Messier and W. A. Krzymień, "Performance of Turbo Coding with Improved Interference Estimation on the CDMA Space Time Transmit Diversity Forward Link", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 55, no. 3, pp. 1074-1079, June 2006.
- [39] L. C. Wang and C. W. Wang, "A Near Real-Time Signal to Interference Ratio Measurement Technique in A Frequency-Selective Multipath Fading Channel for the WCDMA System", in *IEEE VTS 54th Vehicular Technology Conference*, Atlantic City, NJ, USA, vol. 2, pp. 752-756, Fall 2001.
- [40] M. Morelli and U. Mengali, "A Comparison of Pilot-Aided Channel Estimation Methods for OFDM Systems", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 49, no. 12, pp. 3065-3073, Dec. 2001.
- [41] A. A. Hutter, R. Hasholzner, and J. S. Hammerschmidt, "Channel Estimation for Mobile OFDM Systems", in *IEEE VTS 50th Vehicular Technology Conference*, Amsterdam, Netherlands, vol. 1, pp. 305-309, Fall 1999.
- [42] S. Coleri, M. Ergen, A. Puri, and A. Bahai, "Channel Estimation Techniques Based on Pilot Arrangement in OFDM Systems", *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 48, no. 3, pp. 223-229, Sept. 2002.
- [43] S. Chen and T. Yao, "Intercarrier Interference Suppression and Channel Estimation for OFDM Systems in Time-varying Frequency-selective Fading Channels", *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 50, no. 2, pp. 429-435, May 2004.
- [44] M. Muck, M. de Courville, X. Miet, and P. Duhamel, "Iterative Interference Suppression for Pseudo Random Postfix OFDM based Channel Estimation", in *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Philadelphia, USA, vol. 3, pp. 765-768, March 2005.

- [45] Y. S. Choi, P. J. Voltz, and F. A. Cassara, "On Channel Estimation and Detection for Multicarrier Signals in Fast and Selective Rayleigh Fading Channels", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 49, no. 8, pp. 1375-1387, Aug. 2001.
- [46] W. Yang, K. Choi, and S. K. Shin, "An Improved Channel Quality Estimation Technique for OFDM System", in *5th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications*, pp. 1289-1292, Oct. 2002.
- [47] X. Li and L. Wu, "Differential Demodulation of OFDM Based on SOM", in *International Conference on Natural Computation*, Changsha, China, pp. 468-475, 2005.
- [48] J. Lainé, "Interference Estimation in a Multicellular OFDMA Environment", Master Thesis, Radio Communication Systems Laboratory, Department of Signals, Sensors and Systems, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, July 2004.
- [49] 3GPP, "Feasibility Study for OFDM for UTRAN Enhancement", 3GPP TSG RAN WG1, TR 25.892 (Release 6), June 2004.
- [50] Huawei, "Link-level OFDM performances under realistic inter-cell interference", 3GPP TSG RAN WG1, Tdoc R1-031171, Meeting #35, Lisbon, Portugal, Nov. 2003.
- [51] Huawei, "New results on realistic OFDM interference", 3GPP TSG RAN WG1, Tdoc R1-040189, Meeting #36, Malaga, Spain, Feb. 2004.
- [52] M. L. McCloud and L. L. Scharf, "Interference Estimation with Applications to Blind Multiple-Access Communications over Fading Channels", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 46, no. 3, May 2000.
- [53] Federal Communications Commission, "Establishment of interference temperature metric to quantify and manage interference and to expand available unlicensed operation in certain fixed mobile and satellite frequency bands", ET Docket 03-289, Notice of Inquiry and Proposed Rulemaking, 2003.
- [54] T. C. Clancy, "Dynamic Spectrum Access In Cognitive Radio Networks", Ph.D. Dissertation, Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park, 2006.
- [55] P. J. Kolodzy, "Interference temperature: a metric for dynamic spectrum utilization", *International Journal of Network Management*, vol. 16, no. 2, pp. 103-113, March 2006.

- [56] D. J. Thomson, "Spectrum estimation and harmonic analysis", in *Proc. IEEE*, vol. 20, no. 9, pp. 1055-1096, Sept. 1982.
- [57] D. J. Thomson, "Multitaper analysis of nonstationary and nonlinear time series data", in *Nonlinear and Nonstationary Signal Processing*, W. Fitzgerald, R. Smith, A. Walden, and P. Young, Eds. London, U.K.: Cambridge University Press, 2000.
- [58] P. Stoica and T. Sundin, "On nonparametric spectral estimation", *Circuits, Systems, and Signal Processing*, vol. 18, no. 2, pp. 169-181, March 1999.
- [59] M. E. Mann and J. Park, "Oscillatory spatiotemporal signal detection in climate studies: A multiple-taper spectral domain approach", in *Advances in Geophysics*, R. Dnowska and B. Saltzman, Eds. New York: Academic, Vol. 41, pp. 1-131, 1999.
- [60] COSMOS Project – UMTS Research Initiative of the Bavarian Government, <http://www.cosmos-community.org/> and <http://www.krebsgemeinschaft.de/>.
- [61] J. M. Leimeister, P. Sidiras, and H. Krcmar, "Success Factors of Virtual Communities from the Perspective of Members and Operators - an Empirical Study", in *Proc. of the Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS 37)*, Big Island, Hawaii, Jan. 2004.
- [62] DBGlobe IST-2001-32645 Project, <http://softsys.cs.uoi.gr/dbglobe/index1.html>.
- [63] C. Ververidis, S. Valavanis, M. Vazirgiannis, and G. C. Polyzos, "An Architecture for Sharing, Discovering and Accessing Mobile Data and Services: Location and Mobility Issues", in *LOBSTER Workshop*, Mykonos, Greece, Oct. 2002.
- [64] FP6-IST4 27659 MOTIVE Project, <http://www.cn.ntua.gr/ist-motive/>.
- [65] C. Desiniotis, J. Markoulidakis, D. Axiotis, D. Nikitopoulos, M. Caragiozidis, and B. Raul, "MOTIVE: MOBILE Terminal Information Value addED Functionality", in *15th IST Mobile and Wireless Summit*, Mykonos, Greece, June 2006.
- [66] M. Masikos, K. Demestichas, E. Adamopoulou, C. Desiniotis, "The MOTIVE Concept: Enabling Mobile Terminals to Act as Sensors", in *International Conference on Wireless Information Networks and Systems (WINSYS)*, Setubal, Portugal, Aug. 2006.
- [67] K. Demestichas, E. Adamopoulou, J. Markoulidakis, and M. Theologou, "Towards Anonymous Mobile Community services", *Journal of Network and*

- Computer Applications*, to be published. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnca.2008.04.002>.
- [68] The gzip homepage, <http://www.gzip.org/>.
- [69] Network Working Group, “GZIP file format specification version 4.3”, RFC 1952, May 1996.
- [70] Official RAR Site, <http://www.rarlab.com/>.
- [71] J. Zhang, “i-Technology Viewpoint: The Performance Woe of Binary XML”, *SOA World Magazine*, Aug. 5, 2008. [Online]. Available: <http://webservices.sys-con.com/read/250512.htm>.
- [72] K. G. Clark, “Binary XML, Again”, *xml.com*, Aug. 13, 2003. [Online]. Available: <http://www.xml.com/pub/a/2003/08/13/deviant.html>.
- [73] ITU, “Information technology - Generic applications of ASN.1: Fast infoset”, ITU-T Recommendation X.891, May 2005.
- [74] Sun Microsystems, Inc., “Fast Infoset performance reports”, *java.net*, Oct. 6, 2005. [Online]. Available: <https://fi.dev.java.net/performance.html>.
- [75] Sun Microsystems, Inc., “Japex Report: ParsingPerformance”, *java.net*, Jan. 10, 2005. [Online]. Available: <https://fi.dev.java.net/reports/parsing/report.html>.
- [76] Sun Microsystems, Inc., “Japex Report: SizePerformance”, *java.net*, Jan. 10, 2005. [Online]. Available: <https://fi.dev.java.net/reports/size/report.html>.
- [77] Efficient XML Interchange Working Group – Public Page, <http://www.w3.org/XML/EXI/>.
- [78] J. Schneider and T. Kamiya, Eds., “Efficient XML Interchange (EXI) Format 1.0”, W3C 4th Working Draft, July 28, 2008. [Online]. Available: <http://www.w3.org/TR/2008/WD-exi-20080728/>.
- [79] AgileDelta, Inc. – Efficient XML, http://www.agiledelta.com/product_efx.html.
- [80] SourceForge.net – EBML Homepage, <http://ebml.sourceforge.net/>.
- [81] M. Nilsson, “Extensible Binary Markup Language”, Draft Document: ebml-1.0.txt, March 15, 2004. [Online]. Available: <http://www.matroska.org/technical/specs/rfc/ebml-1.0.txt>.
- [82] P. Cuetos, C. Seyrat, and C. Thienot, Eds., “BiM white paper”, ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG 11 N7922 - Coding Of Moving Pictures And Audio, Bangkok, Thailand, Jan. 2006.
- [83] ASN.1 Consortium Official Site, <http://www.asn1.org/>.

- [84] Standards describing the ASN.1 notation and encoding rules (ITU-T Study Group 17 - Languages for Telecom. Systems), <http://www.itu.int/ITU-T/studygroups/com17/languages/>.
- [85] ITU, “Information technology – ASN.1 encoding rules: Specification of Packed Encoding Rules (PER)”, ITU-T Recommendation X.691, July 2002.
- [86] E. Ortiz, “The MIDP 2.0 Push Registry”, Jan. 2003. [Online]. Available: <http://developers.sun.com/techttopics/mobility/midp/articles/pushreg/>.
- [87] Java ME Technology APIs & Docs (Sun Developer Network, SDN), <https://java.sun.com/javame/reference/apis.jsp>.
- [88] Sun Microsystems, Inc. and Motorola, Inc., “Mobile Information Device Profile for Java 2 Micro Edition”, Version 2.1, JSR 118, May 26, 2006.

Κεφάλαιο 3

Βασική Συλλογιστική επί των Πρωτογενών Δεδομένων

3 Βασική Συλλογιστική επί των Πρωτογενών Δεδομένων

3.1 Η γνωστική λειτουργία της βασικής συλλογιστικής

3.1.1 Ο ρόλος της βασικής συλλογιστικής

Η λειτουργία της επαίσθησης, η οποία μελετήθηκε αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο, αποσκοπεί στη συγκέντρωση πρωτογενών δεδομένων στο γνωστικό σταθμό βάσης. Τα πρωτογενή αυτά δεδομένα είναι τα αποτελέσματα των διαδικασιών επαίσθησης που προέκυψαν είτε μέσω αυτόνομης είτε μέσω συνεργατικής διεξαγωγής μετρήσεων από το σταθμό βάσης και τα κινητά τερματικά της περιοχής του. Τα δεδομένα αυτά υπόκεινται, εν συνεχεία, σε περαιτέρω επεξεργασία στην πλευρά του σταθμού βάσης.

Συγκεκριμένα, ο γνωστικός σταθμός βάσης καλείται να αξιοποιήσει τα συλλεχθέντα πρωτογενή δεδομένα για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις προσδοκώμενες δυνατότητες κάθε υποψήφιου τύπου ραδιοδιεπαφής (τεχνολογίας ραδιοπρόσβασης), μεταξύ σταθμού και τερματικών, εντός της εξετασθείσας ζώνης συχνοτήτων. Όπως επεξηγήθηκε στο Κεφάλαιο 2, ένας τύπος ραδιοδιεπαφής συνίσταται σε ένα συγκεκριμένο συνδυασμό παραμέτρων, όπως είναι η μέγιστη ισχύς εκπομπής, το σχήμα διαίρεσης αμφίδρομης επικοινωνίας, το σχήμα πολλαπλής πρόσβασης, ο τύπος διαμόρφωσης, ο τύπος κωδικοποίησης διαύλου και ο τύπος κωδικοποίησης ελέγχου λαθών. Ένας υποψήφιος τύπος ραδιοδιεπαφής, σε συνδυασμό με μια υποψήφια ζώνη συχνοτήτων, συναποτελούν μια υποψήφια διάρθρωση. Προφανώς, ένας γνωστικός σταθμός βάσης έχει στη διάθεσή του πολλαπλές υποψήφιες διαρθρώσεις, τις οποίες μπορεί να εφαρμόζει στους πομποδέκτες του, κατά περίπτωση, ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες και συνθήκες.

Η λειτουργία της βασικής συλλογιστικής (basic reasoning) επί των πρωτογενών δεδομένων συνίσταται στην εκτίμηση των δυνατοτήτων όλων των υποψήφιων τύπων ραδιοδιεπαφής, εντός μιας συγκεκριμένης ζώνης συχνοτήτων, επί τη βάση των πρωτογενών δεδομένων που έχουν συγκεντρωθεί για τη ζώνη αυτή από τη λειτουργία της επαίσθησης. Τέτοιου είδους δυνατότητες (ή ικανότητες) είναι, για παράδειγμα, η επιτευκτική χωρητικότητα μετάδοσης (transmission capacity) και η επιτευκτική ακτίνα

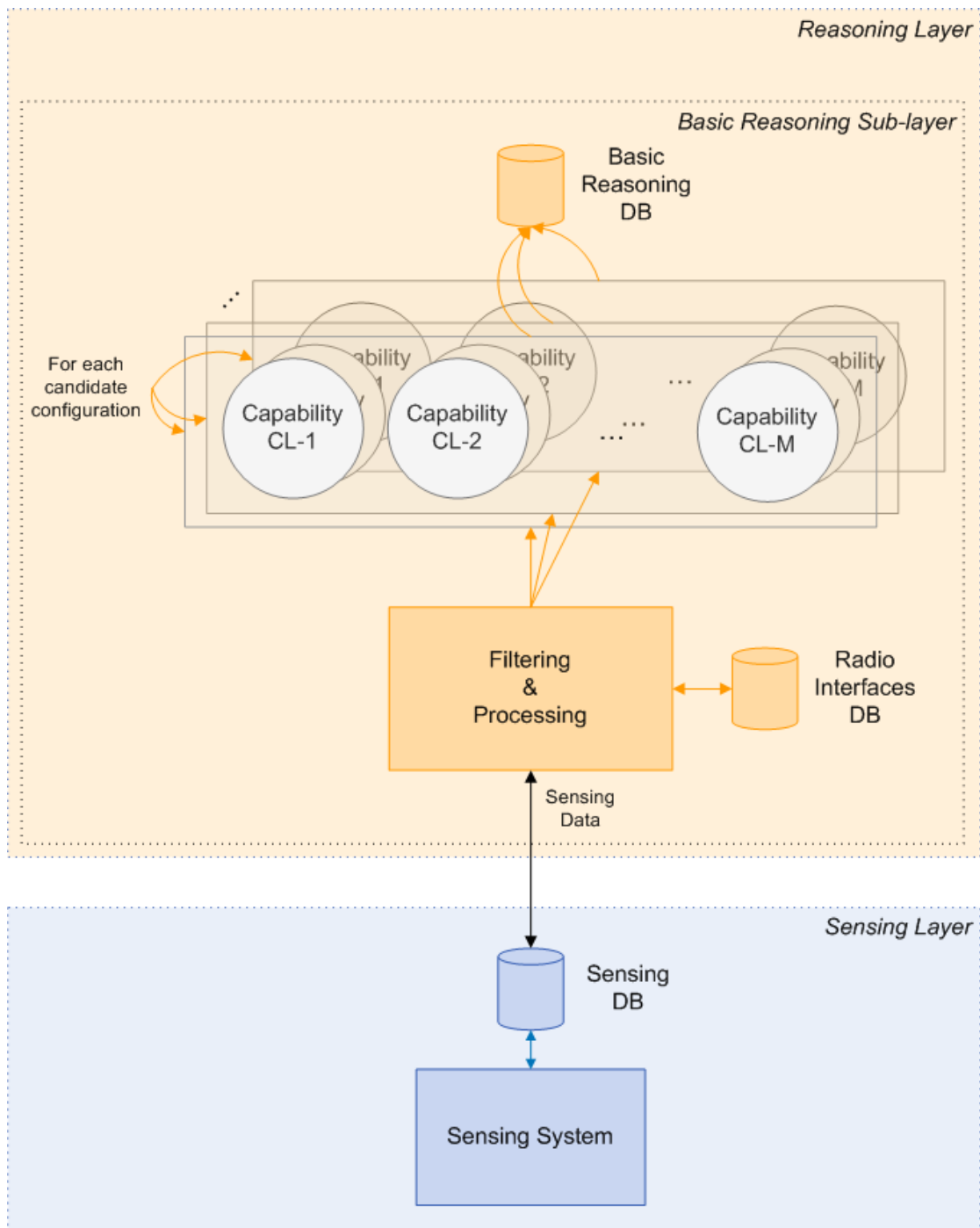
κάλυψης (coverage range). Πρόκειται, δηλαδή, για μέτρα που φανερώνουν τις επιδόσεις που αναμένεται να εμφανίσει μια υποψήφια διάρθρωση, εφόσον εφαρμοστεί. Πρόκειται, επίσης, για «προσδοκώμενες» ή «αναμενόμενες» δυνατότητες, δηλαδή γίνεται «πρόβλεψη» των τιμών τους, βάσει των στοιχείων της επαίσθησης. Η πρόβλεψη αυτή μπορεί, εν γένει, στην πράξη να αποδειχτεί επακριβής, μπορεί και όχι.

Επιπλέον, η συλλογιστική διαδικασία η οποία θα αναλυθεί χαρακτηρίζεται ως «βασική», επειδή κάνει χρήση μόνο των πρόσφατα συλλεχθέντων δεδομένων επαίσθησης, χωρίς να αξιοποιεί την πρότερη εμπειρία. Έτσι, λόγω της δυναμικής και στοχαστικής φύσεως των περιβαλλοντικών συνθηκών, τις εκτιμήσεις στις οποίες καταλήγει η λειτουργία της βασικής συλλογιστικής τις χαρακτηρίζουμε ως «βασικές», «στιγμιαίες» ή «πρωταρχικές», ώστε να τονιστεί η ανάγκη της περαιτέρω βελτίωσής τους, θέμα που θα εξεταστεί στο επόμενο κεφάλαιο.

Ο Πίνακας 3-1 συνοψίζει την ορολογία που χρησιμοποιείται στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, αναφορικά με τη λειτουργία της βασικής συλλογιστικής, ενώ το Σχήμα 3-1 απεικονίζει με εποπτικό τρόπο την εν λόγω λειτουργία.

Πίνακας 3-1. Σύνοψη της ορολογίας της λειτουργίας της βασικής συλλογιστικής

Έννοια	Γενική Περιγραφή	Χαρακτηριστικά Γνωρίσματα	Επεξήγηση
<i>υποψήφια διάρθρωση</i>	ένας συγκεκριμένος συνδυασμός υποψήφιου τύπου ραδιοδιεπαφής και υποψήφιας ζώνης συχνοτήτων	υποψήφιος τύπος ραδιοδιεπαφής	ένας από τους δυνατούς τύπους ραδιοδιεπαφής στους οποίους μπορεί να διαρθρωθεί ο πομποδέκτης δικτύου
		υποψήφια ζώνη συχνοτήτων	μία από τις εναλλακτικές ζώνες συχνοτήτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τον πομποδέκτη δικτύου
<i>λειτουργία της βασικής συλλογιστικής</i>	εκτίμηση των δυνατοτήτων των υποψήφιων διαρθρώσεων, βάσει των πρωτογενών δεδομένων	<i>βασική συλλογιστική</i>	δεν αξιοποιείται η πρότερη εμπειρία του συστήματος
		<i>βασικές/στιγμιαίες/πρωταρχικές εκτιμήσεις</i>	όχι πλήρως αξιόπιστες εκτιμήσεις, λόγω της δυναμικής και στοχαστικής φύσεως των περιβαλλοντικών συνθηκών και της μη αξιοποίησης της πρότερης εμπειρίας
<i>δυνατότητες υποψήφιας διάρθρωσης</i>	μέτρα που φανερώνουν τις αναμενόμενες επιδόσεις μιας υποψήφιας διάρθρωσης	<i>προσδοκώμενες/αναμενόμενες/προβλεπόμενες δυνατότητες</i>	πρόκειται για τις επιδόσεις που προβλέπεται να έχει η υποψήφια διάρθρωση εφόσον εφαρμοστεί



Σχήμα 3-1. Λειτουργία βασικής συλλογιστικής

3.1.2 Μέτρα των προσδοκώμενων δυνατοτήτων των υποψήφιας διάρθρωσεων

Τα μέτρα που αντιπροσωπεύουν τις προσδοκώμενες δυνατότητες μιας υποψήφιας διάρθρωσης (εντός ενός καναλιού) είναι τα ακόλουθα:

- χωρητικότητα μετάδοσης
- ακτίνα κάλυψης
- πιθανότητα διακοπής κάλυψης
- χωρητικότητα συστήματος
- ολίσθηση Doppler (φαινομενική ολίσθηση συχνότητας)
- χρόνος συνοχής
- ρυθμός υπέρβασης στάθμης
- μέση διάρκεια διαλείψεων

Η παρούσα διατριβή επικεντρώνεται, κυρίως, στα δύο πρώτα μέτρα, η αναλυτική μελέτη των οποίων ακολουθεί στις επόμενες παραγράφους.

3.2 Χωρητικότητα μετάδοσης

3.2.1 Διαδικασία εκτίμησης της χωρητικότητας μετάδοσης

Αντικείμενο της συγκεκριμένης ενότητας είναι η εκτίμηση της χωρητικότητας μετάδοσης (transmission capacity) μιας υποψήφιας διάρθρωσης, βάσει μιας σειράς πρωτογενών δεδομένων. Η έννοια της χωρητικότητας μετάδοσης αναφέρεται στο μέγιστο δυνατό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Στο σημείο αυτό, στα πλαίσια της ορολογίας της βασικής συλλογιστικής που χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή, είναι σκόπιμο να διακριθούν δύο «τύποι» χωρητικότητας μετάδοσης:

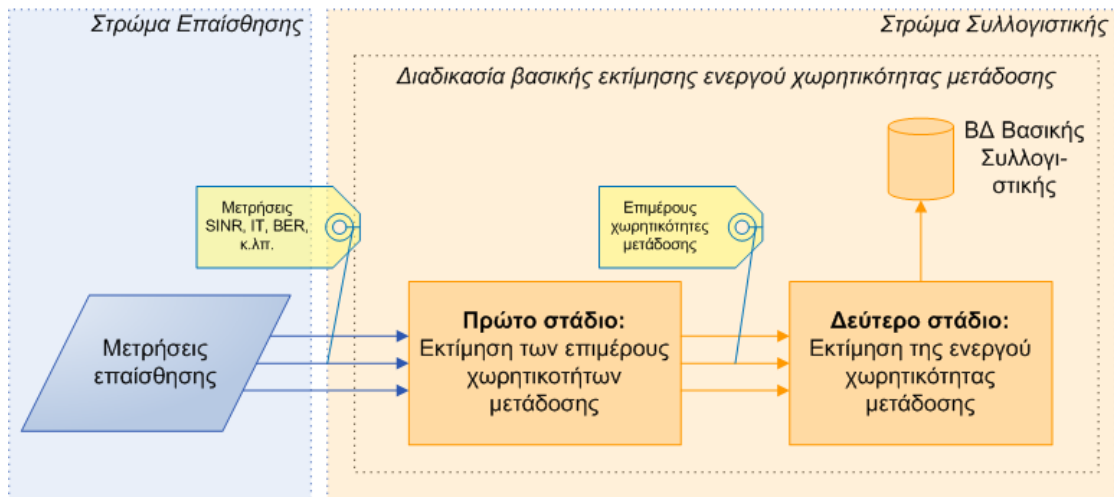
- η χωρητικότητα μετάδοσης καναλιού
- η χωρητικότητα μετάδοσης διάρθρωσης

Η πρώτη αναφέρεται στο μέγιστο δυνατό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων ενός καναλιού επικοινωνίας μεταξύ του γνωστικού σταθμού βάσης και ενός τερματικού, όπως αυτός προκύπτει βάσει του αποτελέσματος της επαίσθησης. Η δεύτερη αποτελεί ένα μέτρο της «μέσης» αναμενόμενης χωρητικότητας μετάδοσης καναλιού, με τον όρο «μέση» να παραπέμπει στη στατιστική επεξεργασία όλων των χωρητικοτήτων μετάδοσης καναλιού. Συνεπώς, η μεν πρώτη είναι χαρακτηριστική του καναλιού

επικοινωνίας (καθόδου ή ανόδου), η δε δεύτερη είναι χαρακτηριστική γενικά της διάρθρωσης, συνιστώντας μέτρο των αναμενόμενων επιδόσεων της. Στο εξής, θα αναφερόμαστε στη χωρητικότητα μετάδοσης καναλιού με τον όρο «επιμέρους χωρητικότητα μετάδοσης», ενώ στη χωρητικότητα μετάδοσης διάρθρωσης με τον όρο «ενεργός χωρητικότητα μετάδοσης» (effective transmission capacity). Έχουμε, επομένως, τις ακόλουθες αντιστοιχίες:

- *χωρητικότητα μετάδοσης καναλιού - επιμέρους χωρητικότητας μετάδοσης*
- *χωρητικότητα μετάδοσης διάρθρωσης - ενεργός χωρητικότητα μετάδοσης*

Συνοπτικά, η εκτίμηση των επιμέρους χωρητικοτήτων μετάδοσης αποτελεί το πρώτο στάδιο της εν λόγω διαδικασίας βασικής συλλογιστικής. Η εκτίμηση αυτή γίνεται επί τη βάσει των πρωτογενών δεδομένων. Ο υπολογισμός της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης συνιστά το δεύτερο στάδιο της διαδικασίας. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται επί τη βάσει των επιμέρους χωρητικοτήτων μετάδοσης. Η όλη διαδικασία απεικονίζεται στο Σχήμα 3-2. Στην ειδική περίπτωση που μόνο μία μέτρηση επαίσθησης, συνεπώς μόνο μία επιμέρους χωρητικότητα μετάδοσης, είναι διαθέσιμη, τότε η ενεργός χωρητικότητα μετάδοσης ταυτίζεται με την επιμέρους.



Σχήμα 3-2. Διαδικασία εκτίμησης της χωρητικότητας μετάδοσης

3.2.2 Εκτίμηση της επιμέρους χωρητικότητας μετάδοσης

Στο πρώτο στάδιο της διαδικασίας που απεικονίζεται στο Σχήμα 3-2, ως είσοδοι λογίζονται ένα ή περισσότερα πρωτογενή δεδομένα, όπως, π.χ., τιμές SINR (λόγου σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο), IT (θερμοκρασίας παρεμβολών), BER (ρυθμού λάθους δυαδικού ψηφίου), κτλ. Στις παραγράφους που ακολουθούν, θα διατυπωθούν και μελετηθούν αναλυτικά οι δυνατές μέθοδοι εκτίμησης της επιμέρους

χωρητικότητας μετάδοσης βάσει της αντίστοιχης μέτρησης. Εξ αυτών, η πρώτη στηρίζεται στη γνωστή μέθοδο Shannon-Hartley [1]-[3], η οποία επεκτείνεται και για την περίπτωση που ως δεδομένο εισόδου λαμβάνεται η θερμοκρασία παρεμβολής. Το ίδιο ισχύει και για τη δεύτερη μέθοδο, που επικεντρώνεται στην εύρεση του εφικτού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Οι υπόλοιπες μέθοδοι αποτελούν προτάσεις της παρούσας διατριβής, στο πλαίσιο της λειτουργίας των γνωστικών δικτύων.

3.2.2.1 Μέθοδος Α': Θεώρημα Shannon-Hartley

Η ευρέως γνωστή μέθοδος των Shannon-Hartley προσδιορίζει τα θεωρητικά όρια της χωρητικότητας μετάδοσης, για δεδομένους περιορισμούς εύρους ζώνης και ισχύος. Σύμφωνα με το δημοφιλές θεώρημα [1]-[3], δεδομένου του εύρους ζώνης B (σε Hz) και της μετρηθείσας τιμής του $SINR$, η χωρητικότητα μετάδοσης C (σε bit/sec) δίδεται από τη σχέση:

$$C = B \log_2(1 + SINR) \quad (3-1)$$

Εναλλακτικά, εάν δίδεται η τιμή T_I της θερμοκρασίας παρεμβολών, η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{I + N} \right) = B \log_2 \left(1 + \frac{\mathcal{L} P_t}{k B T_I} \right) \quad (3-2)$$

όπου $I \gg N$, k είναι η σταθερά του Boltzman ($k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K) και P_t είναι η ισχύς εκπομπής (σε W), η οποία συνδέεται με τη λαμβανόμενη στη θέση του δέκτη ισχύ S , μέσω της σχέσης:

$$S = \mathcal{L} P_t \quad (3-3)$$

όπου ο συντελεστής $\mathcal{L} \in (0,1)$ αντιπροσωπεύει την εξασθένιση του σήματος (απώλειες διαδρομής), λόγω απωλειών διάδοσης και σκίασης. Ισχύει:

$$\mathcal{L}_{[dB]} = 10n \log(d) + X_\sigma \quad (3-4a)$$

όπου οι απώλειες διαδρομής $\mathcal{L}_{[dB]}$ είναι εκφρασμένες σε dB, n είναι ο εκθέτης απωλειών διαδρομής (αδιάστατο μέγεθος), d είναι η απόσταση του τερματικού από το σταθμό βάσης (σε m) και X_σ είναι οι απώλειες λόγω σκίασης (σε dB). Θεωρητικά, ο όρος X_σ λογίζεται ως τυχαία μεταβλητή Gauss με μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση σ (εκφρασμένη επίσης σε dB). Ισοδύναμα, έχουμε:

$$\mathcal{L} = 10^{\frac{X_\sigma}{10}} d^{-n} \quad (3-4b)$$

με τις απώλειες διαδρομής \mathcal{L} να είναι εκφρασμένες ως αδιάστατο μέγεθος.

Η απόσταση d του τερματικού από το σταθμό βάσης μπορεί να εξαχθεί από τις πληροφορίες θέσης που ενσωματώνει ένα τυπικό μήνυμα αναφοράς επαίσθησης ενός τερματικού. Ο εκθέτης απωλειών διαδρομής και οι απώλειες σκίασης είναι προσεγγιστικά γνωστοί από το σχεδιασμό ραδιοκάλυψης (radio planning) ή μπορεί να γίνει χρήση εμπειρικών τιμών (τυπικές τιμές: $3.5 \leq n \leq 5$ και $5 \leq \sigma \leq 10$ dB, για συνήθεις αστικές περιοχές). Κατά συνέπεια, με αντικατάσταση της (3-4β) στην (3-2), προκύπτει:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{10^{\frac{\mathcal{L}}{10}} d^n P_t}{kBT_I} \right) \quad (3-5)$$

Η παραπάνω σχέση υπόκειται στον ακόλουθο περιορισμό αναφορικά με την ισχύ εκπομπής P_t :

$$\frac{\mathcal{L} P_t}{kB} + T_I \leq T_{lim} \quad (3-6a)$$

όπου T_{lim} είναι η τιμή του ορίου της θερμοκρασίας παρεμβολών στην περιοχή. Επιλύοντας ως προς P_t και με αντικατάσταση της (3-4β), λαμβάνεται:

$$P_t \leq \frac{kB(T_{lim} - T_I)}{10^{\frac{\mathcal{L}}{10}} d^n} \quad (3-6b)$$

Επιλέγοντας τη μέγιστη επιτρεπτή τιμή για την ισχύ εκπομπής P_t , όπως αυτή προκύπτει από τη σχέση (3-6b), και αντικαθιστώντας την στη σχέση (3-5), εξάγεται ότι:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{T_{lim} - T_I}{T_I} \right) \quad (3-7)$$

Η σπουδαιότητα της σχέσης (3-7) είναι καταφανής: Καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός της χωρητικότητας μετάδοσης, βάσει μόνο της επικρατούσας θερμοκρασίας παρεμβολών και του αντίστοιχου ορίου της. Έτσι, δεν είναι πλέον απαραίτητη η γνώση του εκθέτη απωλειών διαδρομής, της απόστασης του τερματικού από το σταθμό βάσης και των απωλειών σκίασης. Από τη σχέση (3-7) συνεπάγεται ότι η χωρητικότητα μετάδοσης C αποτελεί συνάρτηση (πέραν του εύρους ζώνης B)

του λόγου $\frac{T_{lim} - T_I}{T_I} = \frac{T_{lim}}{T_I} - 1$, ο οποίος θα αποκαλείται στο εξής «κανονικοποιημένο

περιθώριο θερμοκρασίας παρεμβολών» ή, συντομότερα, «κανονικοποιημένο

περιθώριο θερμοκρασίας». Όσο υψηλότερο είναι το περιθώριο, τόσο πιο ελκυστική φαντάζει η συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων για τη μετάδοση δεδομένων.

3.2.2.2 Μέθοδος Β': Εφικτός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων

Η μέθοδος αυτή προχωρά ένα βήμα παραπέρα, λαμβάνοντας υπόψη της τους περιορισμούς ενός πρακτικού συστήματος επικοινωνίας. Στην πράξη, ένα υλοποιήσιμο σύστημα κωδικοποίησης πρέπει να μεταδίδει δεδομένα με ρυθμό R (σε bit/sec) μικρότερο από το μέγιστο δυνατό ρυθμό C (όπως αυτός δίδεται από τις σχέσεις (3-1) και (3-5)-(3-7)), ώστε να είναι αξιόπιστο.

Έτσι, για κάθε υλοποιήσιμο σύστημα που λειτουργεί με επαρκώς μικρή πιθανότητα λάθους συμβόλου (SEP), έχει καθοριστεί ένα μέγεθος που αποκαλείται «περιθώριο σήματος προς θόρυβο» (signal-to-noise ratio gap) [2] ή απλά «περιθώριο» στα πλαίσια αυτής της παραγράφου. Το περιθώριο αυτό συμβολίζεται με Γ και αποτελεί μια συνάρτηση της αποδεκτής πιθανότητας λάθους συμβόλου P_e και του υπόψη συστήματος κωδικοποίησης. Παρέχει ένα μέτρο της αποτελεσματικότητας ενός συστήματος κωδικοποίησης, σε σχέση με το ιδεατό σύστημα μετάδοσης της εξίσωσης (3-1) ή (3-5)-(3-7). Το περιθώριο ορίζεται ως εξής:

$$\Gamma = \frac{2^{C/B} - 1}{2^{R/B} - 1} = \frac{SINR}{2^{R/B} - 1} \quad (3-8)$$

Συνεπώς, ισχύει ισοδύναμα:

$$R = B \log_2 \left(1 + \frac{SINR}{\Gamma} \right) \quad (3-9)$$

Με όρους θερμοκρασίας παρεμβολών, η παραπάνω σχέση μετατρέπεται σε:

$$R = B \log_2 \left(1 + \frac{10^{\frac{X_\sigma}{10}} d^n P_t}{kBT_I \Gamma} \right) \quad (3-10a)$$

υπό τον περιορισμό της σχέσης (3-6β), ο οποίος επαναλαμβάνεται στο σημείο αυτό για λόγους πληρότητας:

$$P_t \leq \frac{kB(T_{lim} - T_I)}{10^{\frac{X_\sigma}{10}} d^n} \quad (3-10b)$$

Επιλέγοντας τη μέγιστη επιτρεπτή τιμή για την ισχύ εκπομπής P_t και συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω σχέσεις, προκύπτει:

$$R = B \log_2 \left(1 + \frac{T_{lim} - T_I}{T_I \Gamma} \right) \quad (3-10\gamma)$$

Για διαμόρφωση τύπου PAM (Pulse Amplitude Modulation, Διαμόρφωση Εύρους Παλμού) ή QAM (Quadrature Amplitude Modulation, Εγκάρσια Διαμόρφωση Εύρους), με αποδεκτή πιθανότητα λάθους συμβόλου $P_e = 10^{-6}$, το περιθώριο Γ είναι ίσο προς 8.8 dB. Με τη χρήση κωδικοποίησης ελέγχου λαθών, ωστόσο, το περιθώριο Γ μπορεί να ελαττωθεί και να φτάσει μέχρι και στο 1 dB. Ωστόσο, με τη χρήση κωδικοποίησης (π.χ., τύπου trellis ή turbo), ο πραγματικός ρυθμός μετάδοσης R_I (σε bit/sec), δηλαδή ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων της πηγής πληροφοριών, είναι χαμηλότερος από αυτόν που δίδεται από τις σχέσεις (3-9)-(3-10), λόγω της παρουσίας πλεοναζόντων δυαδικών ψηφίων. Για έναν κώδικα που χρησιμοποιεί κωδικές λέξεις μήκους m bit, αποτελούμενες από k bit πληροφορίας και $(m-k)$ πλεονάζοντα bit, ο πραγματικός ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας, R_I , δίδεται από τη σχέση:

$$R_I = r \cdot R = \frac{k}{m} R \quad (3-11)$$

όπου ο λόγος $r = k/m$ είναι ένα αδιάστατο μέγεθος γνωστό ως «ρυθμός κώδικα» (code rate).

3.2.2.3 Μέθοδος Γ': Μέθοδος έμμεσης αξιοποίησης της πιθανότητας λάθους δυαδικού ψηφίου

Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει ως στόχο της να κατατάξει τα υποψήφια σχήματα ψηφιακής διαμόρφωσης ως προς την καταλληλότητά τους δεδομένων των συνθηκών (δηλαδή, των μετρήσεων επαίσθησης). Τούτο βοηθάει στην κατάταξη των υποψήφιων διαρθρώσεων ως προς τη δική τους καταλληλότητα.

Η μέθοδος που προτείνεται στα πλαίσια της παρούσας διατριβής απαρτίζεται από τέσσερα (4) βήματα:

Βήμα (i): Βάσει της μετρηθείσας τιμής SINR, προσδιορίζεται, για κάθε δυνατό σχήμα διαμόρφωσης, ο λόγος της ενέργειας ανά δυαδικό ψηφίο προς την πυκνότητα φασματικής ισχύος του θορύβου (ή αλλιώς ανηγμένος σηματοθορυβικός λόγος), ο οποίος συμβολίζεται με E_b/N_0 :

$$\frac{E_b}{N_0} = \begin{cases} \frac{1}{\log_2 M} SINR, & \text{M-ary PSK, M-ary QAM} \\ \frac{M}{\log_2 M} SINR, & \text{M-ary FSK} \end{cases} \quad (3-12)$$

Με όρους θερμοκρασίας παρεμβολών, η παραπάνω σχέση μετατρέπεται σε:

$$\frac{E_b}{N_0} = \begin{cases} \frac{1}{\log_2 M} \cdot \frac{10^{\frac{x_\sigma}{10}} d^n P_t}{kBT_l}, & \text{M-ary PSK, M-ary QAM} \\ \frac{M}{\log_2 M} \cdot \frac{10^{\frac{x_\sigma}{10}} d^n P_t}{kBT_l}, & \text{M-ary FSK} \end{cases} \quad (3-13\alpha)$$

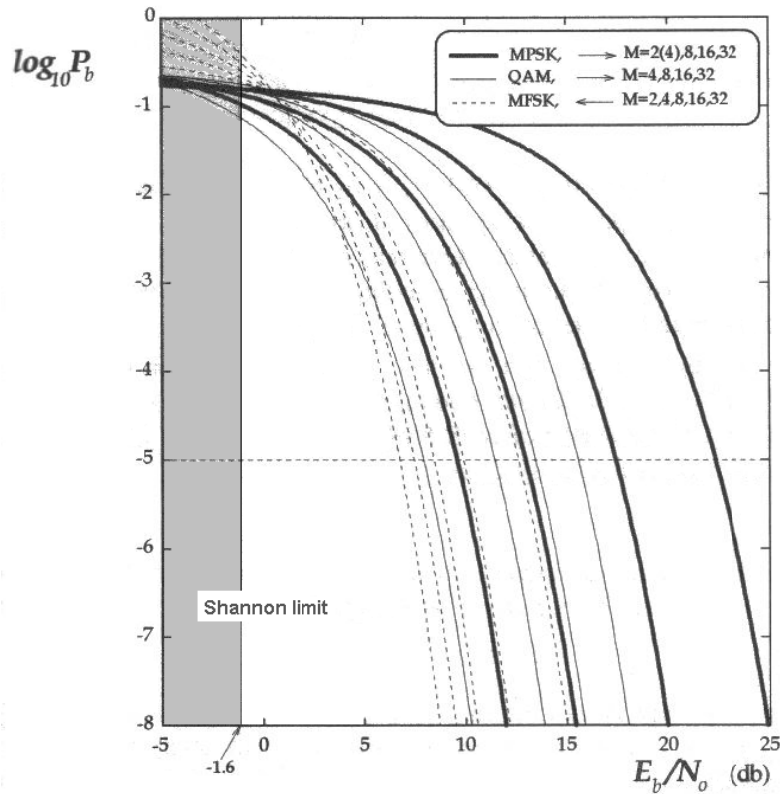
υπό το γνωστό περιορισμό:

$$P_t \leq \frac{kB(T_{lim} - T_l)}{10^{\frac{x_\sigma}{10}} d^n} \quad (3-13\beta)$$

Επιλέγοντας τη μέγιστη επιτρεπτή τιμή για την ισχύ εκπομπής P_t και συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω σχέσεις, προκύπτει:

$$\frac{E_b}{N_0} = \begin{cases} \frac{1}{\log_2 M} \cdot \frac{T_{lim} - T_l}{T_l}, & \text{M-ary PSK, M-ary QAM} \\ \frac{M}{\log_2 M} \cdot \frac{T_{lim} - T_l}{T_l}, & \text{M-ary FSK} \end{cases} \quad (3-13\gamma)$$

Βήμα (ii): Βάσει της υπολογισθείσας τιμής του λόγου E_b/N_0 , προσδιορίζεται η πιθανότητα λάθους δυαδικού ψηφίου P_b , για κάθε δυνατό σχήμα διαμόρφωσης. Το Σχήμα 3-3 αποτελεί τη γραφική παράσταση της πιθανότητας P_b ως προς το λόγο E_b/N_0 , για σήματα διαμορφωμένα κατά M-αδική FSK, PSK ή QAM, χωρίς χρήση κώδικα ελέγχου λαθών, για την περίπτωση της σύμφωνης αποδιαμόρφωσης [4]-[5]. Με γνωστό το λόγο E_b/N_0 , προσδιορίζεται η αντίστοιχη τιμή της πιθανότητας P_b .



Σχήμα 3-3. Συνάρτηση της πιθανότητας P_b ως προς το λόγο E_b/N_0 , για σήματα διαμορφωμένα κατά M-αδική FSK, PSK ή QAM

Βήμα (iii): Η πιθανότητα λάθους P_b του κάθε σχήματος διαμόρφωσης συγκρίνεται με τη μέγιστη αποδεκτή πιθανότητα λάθους $P_{b,lim}$ (π.χ., $P_{b,lim} = 10^{-5}$). Για τα σχήματα διαμόρφωσης για τα οποία ισχύει $P_b > P_{b,lim}$, ο επιτευκτός ρυθμός μετάδοσής τους, R , τίθεται ίσος με $R = 0$.

Βήμα (iv): Τα υπόλοιπα υποψήφια σχήματα διαμόρφωσης, τα οποία επιτυγχάνουν αποδεκτή πιθανότητα λάθους, κατατάσσονται κατά φθίνουσα σειρά επιτευκτού ρυθμού μετάδοσης R , ο οποίος, δοθέντος του εύρους ζώνης B (σε Hz), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R = \begin{cases} B \log_2 M, & \text{M-ary PSK, M-ary QAM} \\ B \frac{\log_2 M}{M}, & \text{M-ary FSK} \end{cases} \quad (3-14)$$

3.2.2.4 Μέθοδος Δ': Μέθοδος απευθείας αξιοποίησης της πιθανότητας λάθους δυαδικού ψηφίου

Η μέθοδος αυτή υποθέτει ότι τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι εκφρασμένα υπό τη μορφή πιθανοτήτων εσφαλμένου δυαδικού ψηφίου. Υπάρχουν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις που μπορούν να ακολουθηθούν, στα πλαίσια της συγκεκριμένης μεθόδου:

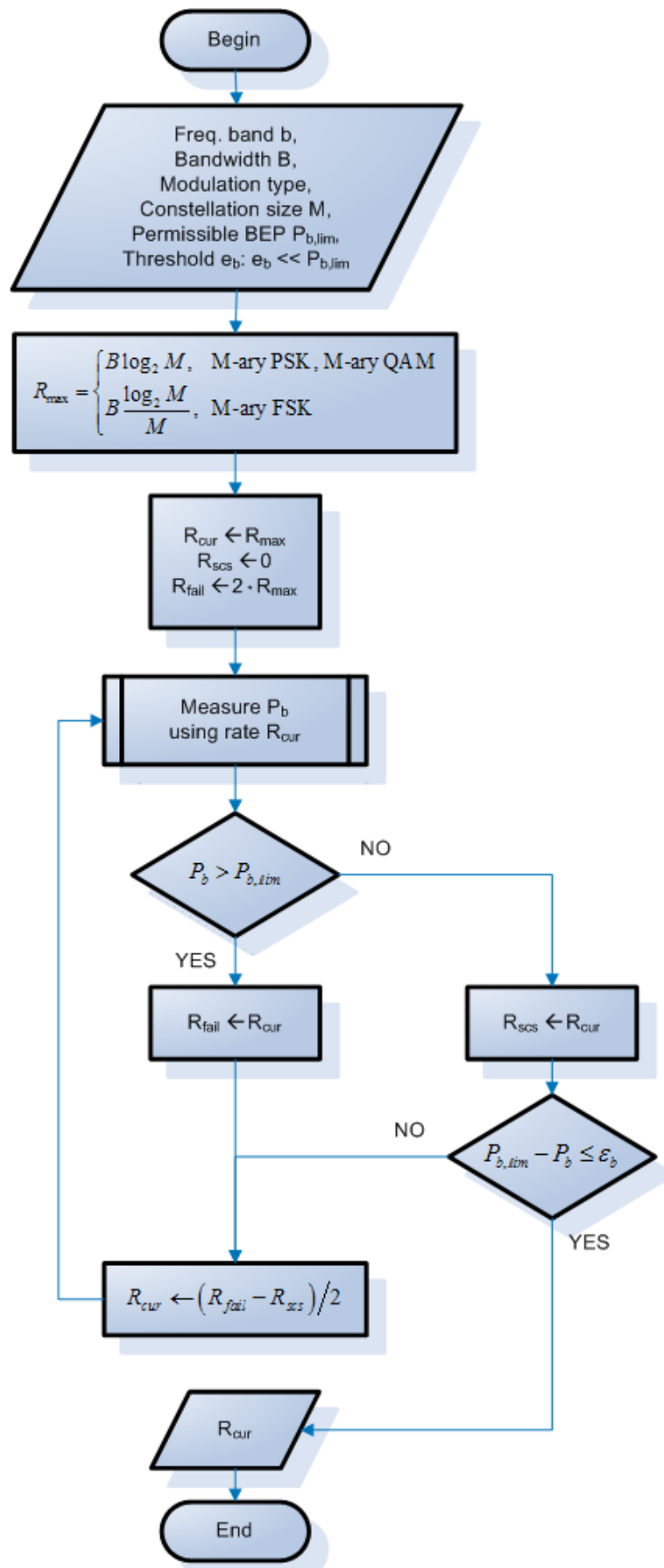
Προσέγγιση (i): Η μετρηθείσα πιθανότητα λάθους P_b συγκρίνεται με τη μέγιστη αποδεκτή πιθανότητα λάθους $P_{b,lim}$ (π.χ., $P_{b,lim} = 10^{-5}$). Εφόσον δεν υπερβαίνει το όριο αυτό, δηλαδή εφόσον $P_b \leq P_{b,lim}$, ο επιτευκτός ρυθμός μετάδοσης, R , μπορεί να υπολογιστεί μέσω της σχέσης (3-14), που έχει παρατεθεί.

Προσέγγιση (ii): Η προσέγγιση αυτή προϋποθέτει την εκτέλεση διαδοχικών μετρήσεων της πιθανότητας λάθους δυαδικού ψηφίου, κατά τη λειτουργία της επαίσθησης. Αφού πρώτα επιλεγεί ένα σχήμα διαμόρφωσης για το πιλοτικό σήμα, εν συνεχεία, σε κάθε διαδοχική εκτέλεση, ο ρυθμός μετάδοσης της πιλοτικής ακολουθίας αυξάνεται ή μειώνεται κατάλληλα, μέχρις ότου η μετρούμενη πιθανότητα λάθους να συγκλίνει στη μέγιστη αποδεκτή πιθανότητα $P_{b,lim}$.

Ο αλγόριθμος μεταβολής του ρυθμού μετάδοσης έχει ως εξής (Σχήμα 3-4):

- *Βήμα 1:* Για την πρώτη εκτέλεση, επιλέγεται ο μέγιστος δυνατός ρυθμός μετάδοσης, όπως αυτός προκύπτει από τη σχέση (3-14), δεδομένου του σχήματος διαμόρφωσης του πιλοτικού σήματος. Η τιμή της μεταβλητής R_{cur} , που αντιπροσωπεύει τον τρέχοντα ρυθμό μετάδοσης, τίθεται ίση με την τιμή που προκύπτει με εφαρμογή της σχέσης (3-14). Η μεταβλητή R_{scs} (που αντιπροσωπεύει τον πιο πρόσφατο αποδεκτό ρυθμό μετάδοσης) αρχικοποιείται στην τιμή μηδέν, $R_{scs} \leftarrow 0$. Η τιμή της μεταβλητής R_{fail} (που αντιπροσωπεύει τον πιο πρόσφατο μη αποδεκτό ρυθμό μετάδοσης) τίθεται ίση με το διπλάσιο της τιμής R_{cur} , δηλαδή $R_{fail} \leftarrow 2 \cdot R_{cur}$.
- *Βήμα 2:* Μέτρηση της πιθανότητας εσφαλμένου δυαδικού ψηφίου, P_b , χρησιμοποιώντας ρυθμό μετάδοσης της πιλοτικής ακολουθίας ίσο με R_{cur} .

- *Βήμα 3:* Εφόσον $P_b > P_{b,lim}$, τότε $R_{fail} \leftarrow R_{cur}$. Αλλιώς, $R_{scs} \leftarrow R_{cur}$ και, αν $P_{b,lim} - P_b \leq \varepsilon_b$, τότε μετάβαση στο *Βήμα 5*, όπου ε_b ένα επαρκώς μικρό κατώφλι, τέτοιο ώστε $\varepsilon_b \ll P_{b,lim}$.
- *Βήμα 4:* $R_{cur} \leftarrow (R_{fail} - R_{scs})/2$. Μετάβαση στο *Βήμα 2*.
- *Βήμα 5:* Τέλος. Η τιμή R_{cur} είναι η ζητούμενη.



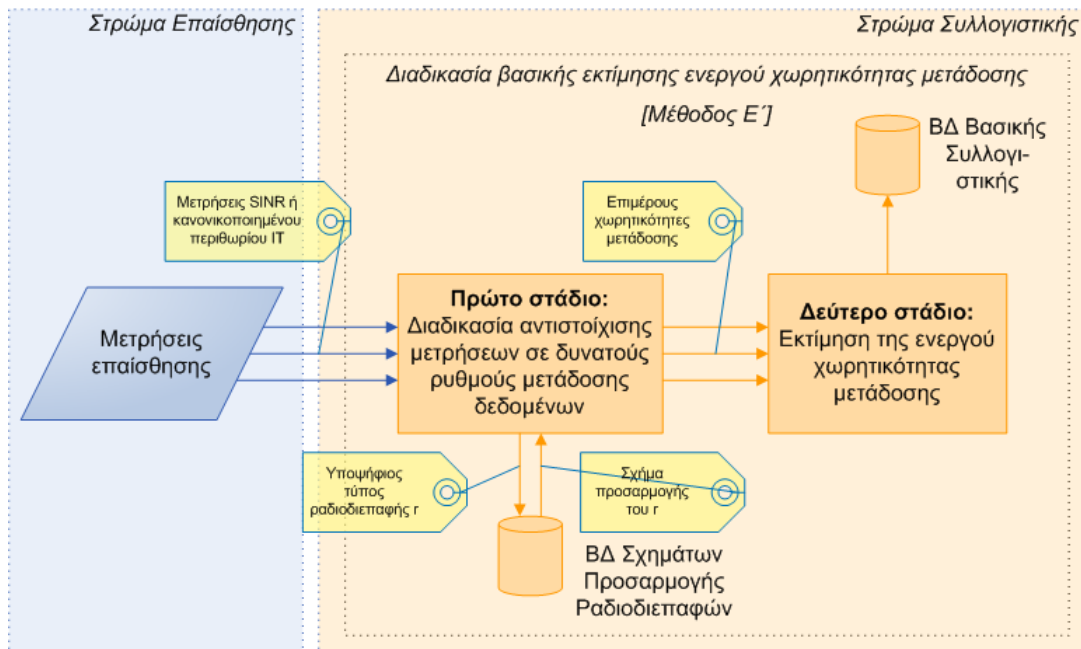
Σχήμα 3-4. Αλγόριθμος μεταβολής του ρυθμού μετάδοσης

3.2.2.5 Μέθοδος Ε': Μετατροπή εξαρτώμενη από τον τύπο ραδιοδιεπαφής

Ανάλογα με τον υπονήφιο τύπο ραδιοδιεπαφής, οι μετρούμενες τιμές του SINR ή του IT είναι δυνατό να αντιστοιχιστούν σε μέγιστους επιτευκτούς ρυθμούς δεδομένων, λαμβάνοντας υπόψη τα ειδικά χαρακτηριστικά (π.χ., υποστηριζόμενοι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων φυσικού στρώματος) της συγκεκριμένης ραδιοδιεπαφής. Η παρούσα μέθοδος στηρίζεται σε αυτήν ακριβώς την ιδέα, η οποία απεικονίζεται διαγραμματικά στο Σχήμα 3-5.

Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να αποσαφηνιστεί αν αναλογιστεί κανείς, σαν παράδειγμα, τη ραδιοδιεπαφή του ασύρματου συστήματος IEEE 802.11b [6]. Σε ένα τέτοιο σύστημα, τα τερματικά μπορούν να λειτουργήσουν σε ταχύτητες 11 Mb/s (χρησιμοποιώντας ψηφιακή διαμόρφωση QAM-64), αλλά θα υποχωρήσουν στα 5.5 Mb/s (QAM-16), 2 Mb/s (QPSK) ή 1 Mb/s (BPSK), εάν η ποιότητα του σήματος υποβαθμιστεί. Και αυτό γιατί, αφού οι χαμηλότεροι ρυθμοί δεδομένων χρησιμοποιούν λιγότερο πολύπλοκες και περισσότερο εύρωστες μεθόδους κωδικοποίησης δεδομένων, είναι και λιγότερο επιρρεπείς σε αλλοιώσεις λόγω εξασθένησης και παρεμβολών.

Για κάθε υπονήφιο τύπο ραδιοδιεπαφής, η μέθοδος αυτή κάνει χρήση ενός σχήματος προσαρμογής ως σημείου αναφοράς για την αντιστοίχιση κάθε τιμής SINR ή IT στην αναλογούσα τιμή ρυθμού μετάδοσης. Επί παραδείγματι, στην περίπτωση του IEEE 802.11b συστήματος, οι ρυθμοί μετάδοσης των 1, 2, 5.5 και 11 Mb/s αντιστοιχούν σε τιμές SINR ίσες με: < 4 dB, 4–7.5 dB, 7.5–11 dB και > 11 dB, αντίστοιχα [6]-[7]. Ο Πίνακας 3-2 συνοψίζει αυτήν την αντιστοίχιση για ένα ασύρματο σύστημα τύπου IEEE 802.11b, ενώ ο Πίνακας 3-3 παραθέτει την ανάλογη προσεγγιστική αντιστοίχιση για ένα ασύρματο σύστημα τύπου IEEE 802.11a [8]-[9]. Χρησιμοποιώντας την ορολογία της θερμοκρασίας παρεμβολών, οι τιμές των κατωφλίων SINR ισοδυναμούν με τιμές του κανονικοποιημένου περιθωρίου θερμοκρασίας, $\frac{T_{lim}}{T_I} - 1$.



Σχήμα 3-5. Μέθοδος εκτίμησης της επιμέρους χωρητικότητας μετάδοσης εξαρτώμενη από τον τύπο ραδιοεπαφής

Πίνακας 3-2. Σύστημα IEEE 802.11b: Αντιστοίχιση ρυθμών μετάδοσης φυσικού στρώματος με κατώφλια SINR ή IT

Ρυθμός μετάδοσης [Mb/s]	Κατώφλι SINR / Κατώφλι $T_{lim}/T_I - 1$ [dB]
1	0
2	4
5.5	7.5
11	11

Πίνακας 3-3. Σύστημα IEEE 802.11a: Αντιστοίχιση ρυθμών μετάδοσης φυσικού στρώματος με κατώφλια SINR ή IT

Ρυθμός μετάδοσης [Mb/s]	Κατώφλι SINR / Κατώφλι $T_{lim}/T_I - 1$ [dB]
6	9
9	10
12	11
18	12
24	13
36	15
48	19
54	23

3.2.3 Εκτίμηση της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης

Η ενεργός χωρητικότητα μετάδοσης αποτελεί ένα μέτρο της «μέσης» αναμενόμενης χωρητικότητας μετάδοσης καναλιού, με τον όρο «μέση» να παραπέμπει στη στατιστική επεξεργασία όλων των επιμέρους χωρητικοτήτων. Η επεξεργασία αυτή μπορεί να ποικίλει, εκτεινόμενη από μια απλή μεσοτίμηση μέχρι ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο φιλτράρισμα των υπολογισθέντων ρυθμών μετάδοσης. Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3-2, ο προσδιορισμός της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης αποτελεί το δεύτερο στάδιο της παρούσας διαδικασίας βασικής συλλογιστικής. Ο στόχος, στο στάδιο αυτό, είναι να ληφθεί υπόψη το σύνολο των αποτελεσμάτων του πρώτου σταδίου (δηλαδή, ούτε μόνο οι καλύτερες ούτε μόνο οι χειρότερες περιπτώσεις), προκειμένου να σχηματιστεί μια όσο το δυνατό ρεαλιστικότερη και αντιπροσωπευτικότερη εικόνα των δυνατοτήτων των υποψήφιων διαρθρώσεων, από πλευράς επιτευκτής χωρητικότητας μετάδοσης. Ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή του σταδίου.

Έστω μια σειρά N μετρήσεων, εντός της ζώνης συχνοτήτων b του φάσματος. Η ζώνη συχνοτήτων b καταλαμβάνει το τμήμα του φάσματος $[f_c - B/2, f_c + B/2]$, όπου B (σε Hz) το εύρος της ζώνης και f_c η κεντρική συχνότητά της (σε Hz). Οι μετρήσεις αυτές μπορεί να είναι υπό μορφή τιμών SINR, IT ή πιθανότητας BEP και, μάλιστα, μπορεί να είτε αποκλειστικά ενός μόνο τύπου είτε ανάμεικτες. Οι τιμές αυτές συμβολίζονται, στο εξής, ως $SINR_i(b)$, $T_{ii}(b)$ και $P_{bi}(b)$, $i=1,2,\dots,N$, αντίστοιχα, αφού αφορούν τη ζώνη συχνοτήτων b .

Δεδομένου ενός υποψήφιου τύπου ραδιοδιεπαφής r , οι επιμέρους χωρητικότητες μετάδοσης (Σχήμα 3-2, πρώτο στάδιο διαδικασίας) προσδιορίζονται, βάσει των παραπάνω μετρήσεων, ως εξής:

$$R_i(b,r) = \begin{cases} R(SINR_i(b),r), & \text{αν } MSR(i) = SINR \\ R(T_{ii}(b),r), & \text{αν } MSR(i) = IT \\ R(P_{bi}(b),r), & \text{αν } MSR(i) = BEP \end{cases} \quad (3-15)$$

όπου $i=1,2,\dots,N$, $R_i(b,r)$ συμβολίζει την επιμέρους χωρητικότητα μετάδοσης που αντιστοιχεί στη μέτρηση i , δεδομένων της ζώνης συχνοτήτων b και του τύπου ραδιοδιεπαφής r , και η συνάρτηση $MSR(i)$ (MeaSuRe ment) επιστρέφει τον τύπο της μέτρησης i (SINR, IT ή BEP). Οι τιμές $R(SINR_i(b),r)$, $R(T_{ii}(b),r)$ και

$R(P_{bi}(b), r)$ υπολογίζονται βάσει μιας από τις προτεινόμενες μεθόδους που περιγράφηκαν στις παραγράφους 3.2.2.1-3.2.2.5.

Με βάση την ως άνω μαθηματική διατύπωση, ο προσδιορισμός της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη στατιστική επεξεργασία των τιμών που προκύπτουν από τη σχέση (3-15), θεωρώντας ότι οι τιμές αυτές αποτελούν ένα δείγμα μεγέθους N ενός πληθυσμού.

Έτσι, αν χρησιμοποιηθεί η μέση τιμή του δείγματος ως εκτιμήτρια, τότε η ενεργός χωρητικότητα μετάδοσης έχει ως εξής:

$$C_{eff}^*(b, r) = \bar{R}(b, r) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i(b, r) \quad (3-16)$$

όπου με $C_{eff}^*(b, r)$ συμβολίζεται η εκτιμώμενη τιμή της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης της υποψήφιας διάρθρωσης (b, r) και με $\bar{R}(b, r)$ η μέση τιμή του δείγματος των επιμέρους χωρητικοτήτων μετάδοσης. Ο αστερίσκος στο συμβολισμό $C_{eff}^*(b, r)$ υποδηλώνει ότι η τιμή της ενεργού χωρητικότητας προέκυψε από μια διαδικασία «βασικής» συλλογιστικής, αποτελεί δηλαδή μια στιγμιαία εκτίμηση.

Αν χρησιμοποιηθεί η διάμεσος (median) του δείγματος ως εκτιμήτρια, τότε η ενεργός χωρητικότητα μετάδοσης προσδιορίζεται ως εξής:

$$C_{eff}^*(b, r) = \tilde{R}(b, r) = \mu_{1/2}(R(b, r)) \quad (3-17)$$

Όταν χρησιμοποιείται η σχέση (3-16) για τον υπολογισμό της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης, η διασπορά $s_R^2(b, r)$ του δείγματος δίδεται από:

$$s_R^2(b, r) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (R_i(b, r) - C_{eff}^*(b, r))^2 \quad (3-18)$$

Επιπλέον, δεδομένου του βαθμού εμπιστοσύνης γ , και για μεγάλο μέγεθος δείγματος ($N \geq 30$), το διάστημα εμπιστοσύνης δίδεται από τη σχέση:

$$C_{eff}^*(b, r) - z_p \frac{s_R(b, r)}{\sqrt{N}} < C_{eff}(b, r) < C_{eff}^*(b, r) + z_p \frac{s_R(b, r)}{\sqrt{N}}, \quad \text{με } p = \frac{1+\gamma}{2} \quad (3-19)$$

όπου η $C_{eff}^*(b, r)$ ταυτίζεται με τη μέση τιμή $\bar{R}(b, r)$, η $C_{eff}(b, r)$ (χωρίς αστερίσκο) υποδηλώνει την πραγματική τιμή της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης, $s_R(b, r)$ είναι η τυπική απόκλιση, η οποία μπορεί να προσδιοριστεί από τη σχέση (3-18), ενώ με z συμβολίζεται η τυποποιημένη κανονική κατανομή [10]-[11]. Ο όρος z_p δηλώνει

ότι το εμβαδόν αριστερά της τιμής z_p στη γραφική παράσταση της τυποποιημένης κανονικής κατανομής είναι ίσο με p , όπου $p = \frac{1+\gamma}{2}$.

Ομοίως, δεδομένου του βαθμού εμπιστοσύνης γ , αλλά για μικρό μέγεθος δείγματος ($N < 30$), το διάστημα εμπιστοσύνης δίδεται από τη σχέση:

$$C_{eff}^*(b,r) - t_{N-1,p} \frac{s_R(b,r)}{\sqrt{N}} < C_{eff}(b,r) < C_{eff}^*(b,r) + t_{N-1,p} \frac{s_R(b,r)}{\sqrt{N}}, \text{ με } p = \frac{1+\gamma}{2} \quad (3-20)$$

όπου με το σύμβολο t συμβολίζεται η κατανομή t του Student [12]-[14]. Ο δείκτης $N-1$ στον όρο $t_{N-1,p}$ αναπαριστά το πλήθος των βαθμών ελευθερίας της κατανομής. Ο δείκτης p υποδηλώνει ότι το εμβαδόν αριστερά της τιμής $t_{N-1,p}$ στη γραφική παράσταση της t - κατανομής Student είναι ίσο με p , όπου $p = \frac{1+\gamma}{2}$.

Οι σχέσεις (3-16)-(3-20) παρέχουν την επίσημη, μαθηματική περιγραφή της διαδικασίας στατιστικής επεξεργασίας στην οποία υποβάλλει η λειτουργία της βασικής συλλογιστικής τις επιμέρους υπολογισθείσες χωρητικότητες μετάδοσης. Αξίζει, για λόγους πληρότητας, να σημειωθεί ότι είναι δυνατές και άλλου τύπου στατιστικές επεξεργασίες, εφόσον οι μελλοντικοί ερευνητές το θεωρήσουν σκόπιμο. Μια εναλλακτική διαδικασία επεξεργασίας θα μπορούσε, επί παραδείγματι, να αναθέτει διαφορετικά βάρη (αυξημένη ή μειωμένη βαρύτητα):

- στις μετρήσεις που πραγματοποιούνται από απομακρυσμένα τερματικά σε σχέση με εκείνες που πραγματοποιούνται από κοντινά στο σταθμό τερματικά
- ανάλογα με τον τύπο ή το μοντέλο του τερματικού που εκτέλεσε τις μετρήσεις
- ανάλογα με τον τύπο των ίδιων των μετρήσεων (π.χ., μεγαλύτερη βαρύτητα στις μετρήσεις τύπου SINR, έναντι των μετρήσεων τύπου IT)
- ανάλογα με την ταχύτητα των τερματικών

Εφόσον κριθεί σκόπιμο από την επιστημονική κοινότητα, η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να ασχοληθεί με τη συγκριτική μελέτη τέτοιων τύπων στατιστικής επεξεργασίας.

3.3 Ακτίνα κάλυψης

3.3.1 Η ενεργός ακτίνα κάλυψης

Αντικείμενο της συγκεκριμένης ενότητας είναι η εκτίμηση της ακτίνας κάλυψης (coverage range) μιας υποψήφιας διάρθρωσης, βάσει μιας σειράς πρωτογενών δεδομένων. Για το σκοπό αυτό, εισάγεται και χρησιμοποιείται, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, η έννοια της ενεργού ακτίνας (ή εμβέλειας) κάλυψης (effective coverage range), η οποία εκφράζει την αναμενόμενη μέση ακτίνα κάλυψης μιας υποψήφιας διάρθρωσης, με τον όρο «μέση» να παραπέμπει στη στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων όλων των τερματικών που συμμετείχαν στη διαδικασία επαίσθησης. Σημειωτέον ότι η ενεργός ακτίνα κάλυψης δεν αναπαριστά την εμβέλεια της πραγματικής περιοχής κάλυψης της υποψήφιας διάρθρωσης, αλλά συνιστά περισσότερο ένα μέτρο (ένα βαθμό) της αποτελεσματικότητας της διάρθρωσης από πλευράς παρεχόμενης κάλυψης. Στα επόμενα, επικεντρωνόμαστε στον προσδιορισμό της ενεργού ακτίνας κάλυψης στην κατεύθυνση της καθόδου, ωστόσο η ίδια μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί κατ' αναλογία και στην κατεύθυνση της ανόδου.

3.3.2 Γενική διαδικασία εκτίμησης της ενεργού ακτίνας κάλυψης

Έστω μια σειρά N μετρήσεων στην κατεύθυνση της καθόδου, εντός της ζώνης συχνοτήτων b του φάσματος. Η προτεινόμενη μέθοδος προσδιορισμού της ενεργού ακτίνας κάλυψης αναπαρίσταται στο Σχήμα 3-6 και μπορεί να χωριστεί σε δύο φάσεις, (α) και (β): Στη φάση (α), υπολογίζονται ο εκθέτης απωλειών διαδρομής, \hat{n} , και η ενεργός απώλεια σκίασης, $\hat{\sigma}$, στην περιοχή του γνωστικού σταθμού βάσης, εντός της ζώνης b , βάσει των μετρήσεων. Όπως υπονοεί το όνομά της, η ενεργός απώλεια σκίασης, $\hat{\sigma}$, εκφράζει την αναμενόμενη μέση απώλεια σκίασης. Στη φάση (β), εξάγεται μια βασική εκτίμηση για την τιμή της ενεργού ακτίνας κάλυψης. Η ακρίβεια εκτίμησης του εκθέτη απωλειών διαδρομής και των απωλειών σκίασης, σε συνάρτηση με τον αριθμό των μετρήσεων που έχουν συγκεντρωθεί, μελετάται λεπτομερώς στις εργασίες [15]-[19].

Στη φάση (α), χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες παράμετροι εισόδου από κάθε συμμετέχον κινητό τερματικό:

- (i) η λαμβανόμενη ισχύς του επιθυμητού σήματος (δηλαδή, η ισχύς του λαμβανόμενου πιλοτικού σήματος, μη συμπεριλαμβανομένης της ισχύος των παρεμβολών)
- (ii) η θέση του τερματικού (απόσταση από το γνωστικό σταθμό βάσης), με ικανοποιητική ακρίβεια (π.χ., μέσω GPS ή άλλης ακριβούς μεθόδου)

Αφού ληφθούν υπόψη οι παράμετροι εισόδου όλων των αναμεμιγμένων στη διαδικασία επαίσθησης κινητών τερματικών, παράγεται μια εκτίμηση του εκθέτη απωλειών διαδρομής και της ενεργού απώλειας σκίασης, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3-6.

Στη φάση (β), χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες παράμετροι εισόδου:

- (i) ο εκθέτης απωλειών διαδρομής και η ενεργός απώλεια σκίασης, βάσει της φάσης (α)
- (ii) το ελάχιστο απαιτούμενο επίπεδο SINR, ώστε να διασφαλίζεται αποδεκτή ποιότητα υπηρεσίας (δεδομένης της υπηρεσίας, η τιμή αυτή εξαρτάται από τον τύπο της ραδιοδιεπαφής)
- (iii) η ισχύς εκπομπής κατά τη λήψη των μετρήσεων (σημειωτέον ότι ενδέχεται να υπάρχουν περιορισμοί για το μέγιστο και το ελάχιστο επίπεδο της ισχύος εκπομπής, ανάλογα με τον τύπο ραδιοδιεπαφής)
- (iv) η μέση ισχύς παρεμβολών (ή κάποιο άλλο αντιπροσωπευτικό στατιστικό μέγεθος, π.χ. διάμεσος), βάσει των αναφορών των εμπλεκόμενων τερματικών

Μέσω της επεξεργασίας των παραμέτρων αυτών, μπορεί να επιτευχθεί μια στιγμιαία εκτίμηση της ενεργού ακτίνας κάλυψης.

Σχήμα 3-6. Μέθοδος προσδιορισμού της ενεργού ακτίνας κάλυψης

3.3.3 Μέθοδοι εκτίμησης της ενεργού ακτίνας κάλυψης

Στις παραγράφους που ακολουθούν, διατυπώνονται αναλυτικά οι δυνατές μέθοδοι εκτίμησης της ενεργού ακτίνας κάλυψης μιας υποψήφιας διάρθρωσης, βάσει μιας σειράς πρωτογενών δεδομένων. Εξ αυτών των μεθόδων, η πρώτη αποτελεί τη μαθηματική περιγραφή της διαδικασίας που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο και απεικονίστηκε στο Σχήμα 3-6. Οι υπόλοιπες αποτελούν τροποποιήσεις επί της βασικής αυτή μεθόδου. Όλες οι μέθοδοι συνιστούν προτεινόμενες από την παρούσα διατριβή προσεγγίσεις, στο πλαίσιο της λειτουργίας των γνωστικών δικτύων.

3.3.3.1 Μέθοδος Α': Γενική μέθοδος

Η μέθοδος που σκιαγραφήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο διατυπώνεται, αναλυτικά, ως εξής:

Φάση (α). Έστω μια σειρά N μετρήσεων, εντός της ζώνης συχνοτήτων b του φάσματος. Έστω $rx_i(b)$ η μετρηθείσα λαμβανόμενη ισχύς του επιθυμητού σήματος από το τερματικό i (εκφρασμένη σε dBm), $tx(b)$ η ισχύς εκπομπής του επιθυμητού σήματος (εκφρασμένη σε dBm), $n(b)$ ο εκθέτης απωλειών διαδρομής (σε dB), d_i η απόσταση του τερματικού i από το σταθμό βάσης (εκφρασμένη σε m) και $\sigma(b)$ οι απώλειες σκίασης (σε dB). Ισχύει:

$$rx_i(b) = tx(b) - 10n(b) \log(d_i) - \sigma(b) \quad (3-21)$$

Εφαρμόζοντας γραμμική παλινδρόμηση, μπορούν να εξαχθούν εκτιμήσεις τόσο για τον εκθέτη απωλειών διαδρομής όσο και για την ενεργό απώλεια σκίασης. Οι αντίστοιχες εκτιμήτριες, $\hat{n}(b)$ και $\hat{\sigma}(b)$, δίδονται από τις σχέσεις:

$$\hat{n}(b) = \frac{N \cdot S_{XY} - S_X S_Y}{N \cdot S_{XX} - S_X S_X} \quad (3-22)$$

$$\hat{\sigma}(b) = \frac{S_Y - \hat{n} \cdot S_X}{N} \quad (3-23)$$

όπου:

$$S_X = x_1 + x_2 + \dots + x_N, \quad S_Y = y_1 + y_2 + \dots + y_N, \quad (3-24)$$

$$S_{XX} = x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2, \quad S_{XY} = x_1 y_1 + x_2 y_2 + \dots + x_N y_N \quad (3-25)$$

με:

$$x_i = 10 \log(d_i), \quad y_i = tx(b) - rx_i(b), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3-26)$$

Φάση (β). Το ελάχιστο απαιτούμενο επίπεδο SINR, $SINR_{\min, req}(b, r)$, ώστε να διασφαλίζεται ένα αποδεκτό επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας, σε συνδυασμό με τη μέση ισχύ παρεμβολών, $\bar{I}(b)$, λαμβανομένων υπόψη των αναφορών όλων των τερματικών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να υπολογιστεί η ελάχιστη απαιτούμενη λαμβανόμενη ισχύς, $rx_{\min, req}(b, r)$:

$$rx_{\min, req}(b, r) = SINR_{\min, req}(b, r) + \bar{I}(b) \quad (3-27)$$

όπου:

$$\bar{I}(b) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i(b) \quad (3-28)$$

με τον όρο $I_i(b)$ να αναπαριστά την ισχύ παρεμβολών που μετράται από το τερματικό i , εντός της ζώνης b .

Η σχέση (3-27) εκφράζει την παραδοχή ότι στα όρια της περιοχής κάλυψης η ισχύς παρεμβολών αναμένεται να είναι ίση προς τη μέση ισχύ παρεμβολών που υφίστανται τα τερματικά. Η παραπάνω παραδοχή θα μπορούσε να αντικατασταθεί με την ακόλουθη:

$$rx_{\min,req}(b,r) = SINR_{\min,req}(b,r) + \tilde{I}(b) \quad (3-29)$$

σύμφωνα με την οποία στα όρια της περιοχής κάλυψης η ισχύς παρεμβολών αναμένεται να είναι ίση προς τη διάμεσο της ισχύος παρεμβολών που υφίστανται τα τερματικά:

$$\tilde{I}(b) = \mu_{1/2}(I(b)) \quad (3-30)$$

Ομοίως, όσον αφορά τον προσδιορισμό της αναμενόμενης ισχύος παρεμβολών στα όρια της περιοχής κάλυψης, μια εναλλακτική υλοποίηση μπορεί να αποδώσει μεγαλύτερη βαρύτητα στις μετρήσεις που καταδεικνύουν μεγάλα επίπεδα παρεμβολών. Σε μια τέτοια περίπτωση, η εν λόγω ισχύς, έστω $\hat{I}_{edge}(b)$, λαμβάνεται ίση προς:

$$\hat{I}_{edge}(b) = \mu_a(I(b)), \quad a \in (0.5,1) \quad (3-31)$$

Επί παραδείγματι, με $a = 3/4$, επιλέγεται ως εκτιμώμενη τιμή της $\hat{I}_{edge}(b)$ εκείνη η μέτρηση για την οποία τα $3/4$ των μετρήσεων είναι μικρότερες από αυτήν και το $1/4$ μεγαλύτερες. Κατ' επέκταση, η ελάχιστη απαιτούμενη λαμβανόμενη ισχύς μπορεί να προσδιοριστεί ως εξής:

$$rx_{\min,req}(b,r) = SINR_{\min,req}(b,r) + \hat{I}_{edge}(b) \quad (3-32)$$

όπου, αναλόγως της υλοποίησης, ισχύει μία από τις εξής σχέσεις για την εκτιμώμενη τιμή της $\hat{I}_{edge}(b)$:

$$\begin{aligned} \hat{I}_{edge}(b) &= \bar{I}(b) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i(b) \quad \text{ή} \\ \hat{I}_{edge}(b) &= \tilde{I}(b) = \mu_{1/2}(I(b)) \quad \text{ή} \\ \hat{I}_{edge}(b) &= \mu_a(I(b)), \quad \text{με } a \in (0.5,1) \end{aligned} \quad (3-33)$$

Εν συνεχεία, μια εκτίμηση της ενεργού ακτίνας κάλυψης μπορεί να προκύψει με επίλυση της εξίσωσης:

$$rx_{\min,req}(b,r) = tx(b) - 10\hat{n}(b)\log(D_{eff}^*(b,r)) - \hat{\sigma}(b) \quad (3-34)$$

όπου η τιμή της $rx_{\min,req}(b,r)$ προκύπτει από τις (3-32)-(3-33), ενώ με $D_{eff}^*(b,r)$ συμβολίζεται η εκτιμώμενη τιμή της ενεργού ακτίνας κάλυψης της υποψήφιας διάρθρωσης (b,r) . Ο αστερίσκος στο συμβολισμό $D_{eff}^*(b,r)$ υποδηλώνει ότι η τιμή της ενεργού ακτίνας κάλυψης προέκυψε από μια διαδικασία «βασικής» συλλογιστικής, αποτελεί δηλαδή μια στιγμιαία εκτίμηση. Επίλυση της (3-34) ως προς $D_{eff}^*(b,r)$ οδηγεί στο ακόλουθο, τελικό αποτέλεσμα:

$$10\log(D_{eff}^*(b,r)) = \frac{tx(b) - rx_{\min,req}(b,r) - \hat{\sigma}(b)}{\hat{n}(b)} \quad (3-35a)$$

$$D_{eff}^*(b,r) = 10^{\left(\frac{tx(b) - rx_{\min,req}(b,r) - \hat{\sigma}(b)}{10\hat{n}(b)}\right)} \quad (3-35b)$$

με την τιμή της $rx_{\min,req}(b,r)$ να δίδεται από τις (3-32)-(3-33) και τις τιμές των $\hat{n}(b)$ και $\hat{\sigma}(b)$ να δίδονται από τις (3-22) και (3-23), αντίστοιχα.

3.3.3.2 Μέθοδος Β': Συνδυασμένη αξιοποίηση SINR και IT μετρήσεων

Στην περίπτωση που σε μια μέτρηση τύπου SINR ο διαχωρισμός της ισχύος του επιθυμητού σήματος από την ισχύ παρεμβολών δεν είναι εύκολος, αλλά είναι διαθέσιμη η τιμή της θερμοκρασίας παρεμβολών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος που περιγράφεται σε αυτήν την παράγραφο.

Φάση (α). Σε πρώτη φάση, η σχέση (3-21) μετασχηματίζεται ως εξής:

$$rx_i(b) = tx(b) - 10n(b)\log(d_i) - \sigma(b) \Rightarrow$$

$$rx_i(b) - I_i(b) = tx(b) - I_i(b) - 10n(b)\log(d_i) - \sigma(b) \Rightarrow$$

$$SINR_i(b) = tx(b) - 10\log(kBT_{i_i}(b)) - 10n(b)\log(d_i) - \sigma(b) \quad (3-36)$$

Εφαρμόζοντας και πάλι γραμμική παλινδρόμηση, εξάγονται οι ακόλουθες εκτιμήσεις για τον εκθέτη απωλειών διαδρομής και για την ενεργό απώλεια σκίασης:

$$\hat{n}(b) = \frac{N \cdot S_{XY} - S_X S_Y}{N \cdot S_{XX} - S_X S_X} \quad (3-37)$$

$$\hat{\sigma}(b) = \frac{S_Y - \hat{n} \cdot S_X}{N} \quad (3-38)$$

όπου:

$$S_X = x_1 + x_2 + \dots + x_N, \quad S_Y = y_1 + y_2 + \dots + y_N, \quad (3-39)$$

$$S_{XX} = x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2, \quad S_{XY} = x_1 y_1 + x_2 y_2 + \dots + x_N y_N \quad (3-40)$$

με:

$$x_i = 10 \log(d_i), \quad y_i = tx(b) - SINR_i(b) - 10 \log(kBT_{i_i}(b)), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3-41)$$

Φάση (β). Εν συνεχεία, γίνεται χρήση του ελάχιστου απαιτούμενου επιπέδου SINR, $SINR_{\min, req}(b, r)$, ώστε να προσδιοριστεί η ενεργός ακτίνα κάλυψης $D_{eff}^*(b, r)$:

$$SINR_{\min, req}(b, r) = tx(b) - 10 \log(kB\hat{T}_{l, edge}(b)) - 10\hat{n}(b) \log(D_{eff}^*(b, r)) - \hat{\sigma}(b) \quad (3-42)$$

όπου, κατ' αναλογία της (3-33), ισχύει μία από τις εξής σχέσεις, αναλόγως της υλοποίησης:

$$\begin{aligned} \hat{T}_{l, edge}(b) &= \bar{T}_l(b) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{li}(b) \quad \text{ή} \\ \hat{T}_{l, edge}(b) &= \tilde{T}_l(b) = \mu_{1/2}(T_l(b)) \quad \text{ή} \\ \hat{T}_{l, edge}(b) &= \mu_a(T_l(b)), \quad a \in (0.5, 1) \end{aligned} \quad (3-43)$$

Επίλυση της (3-42) ως προς $D_{eff}^*(b, r)$ οδηγεί στο ακόλουθο, τελικό αποτέλεσμα:

$$10 \log(D_{eff}^*(b, r)) = \frac{tx(b) - SINR_{\min, req}(b, r) - 10 \log(kB\hat{T}_{l, edge}(b)) - \hat{\sigma}(b)}{\hat{n}(b)} \quad (3-44\alpha)$$

$$D_{eff}^*(b, r) = 10^{\left(\frac{tx(b) - SINR_{\min, req}(b, r) - 10 \log(kB\hat{T}_{l, edge}(b)) - \hat{\sigma}(b)}{10\hat{n}(b)} \right)} \quad (3-44\beta)$$

3.3.3.3 Μέθοδος Γ': Σταθμισμένη εκτίμηση των συντελεστών διάδοσης

Στη συγκεκριμένη μέθοδο, ο εκθέτης απωλειών διαδρομής και η ενεργός απώλεια σκίασης, $\hat{n}(b)$ και $\hat{\sigma}(b)$, που προκύπτουν μέσω γραμμικής παλινδρόμησης, αντικαθίστανται από το σταθμισμένο εκθέτη απωλειών διαδρομής και τη σταθμισμένη ενεργό απώλεια σκίασης, $\hat{n}_w(b)$ και $\hat{\sigma}_w(b)$, αντίστοιχα. Σκοπός είναι η αξιοποίηση όχι μόνο των αποτελεσμάτων της διαδικασίας γραμμικής παλινδρόμησης, αλλά και της εκ των προτέρων γνώσης που υπάρχει για τις συνθήκες διάδοσης στην περιοχή. Η γνώση αυτή έχει συνήθως προκύψει από το σχεδιασμό και τη μελέτη

ραδιοκάλυψης (radio planning) της ευρύτερης γεωγραφικής περιοχής και μεταφράζεται στην επιλογή συγκεκριμένων, κατάλληλων τιμών για τα μεγέθη του εκθέτη απωλειών διαδρομής και των απωλειών σκίασης (π.χ., τυπικές τιμές είναι: $3.5 \leq n \leq 5$ και $5 \leq \sigma \leq 10$ dB, για συνήθεις αστικές περιοχές).

Ορίζοντας ως $\hat{n}_{rp}(b)$ και $\hat{\sigma}_{rp}(b)$ τις τιμές που έχουν προκύψει από το σχεδιασμό ραδιοκάλυψης, τα αντίστοιχα σταθμισμένα μεγέθη, $\hat{n}_w(b)$ και $\hat{\sigma}_w(b)$, προσδιορίζονται ως εξής:

$$\hat{n}_w(b) = w_{rp} \cdot \hat{n}_{rp}(b) + (1 - w_{rp}) \cdot \hat{n}(b), \quad w_{rp} \in [0,1] \quad (3-45)$$

$$\hat{\sigma}_w(b) = w'_{rp} \cdot \hat{\sigma}_{rp}(b) + (1 - w'_{rp}) \cdot \hat{\sigma}(b), \quad w'_{rp} \in [0,1] \quad (3-46)$$

όπου $w_{rp} \in [0,1]$ το βάρος που προσδίδεται στην εκτιμώμενη από το σχεδιασμό ραδιοκάλυψης τιμή του εκθέτη απωλειών διαδρομής και $(1 - w_{rp})$ το βάρος που προσδίδεται στην εκτιμώμενη από τη γραμμική παλινδρόμηση τιμή του εκθέτη απωλειών διαδρομής. Ομοίως, $w'_{rp} \in [0,1]$ είναι το βάρος που προσδίδεται στην εκτιμώμενη από το σχεδιασμό ραδιοκάλυψης τιμή της ενεργού απώλειας σκίασης και $(1 - w'_{rp})$ το βάρος που προσδίδεται στην εκτιμώμενη από τη γραμμική παλινδρόμηση τιμή της ενεργού απώλειας σκίασης.

Υπό αυτό το πρίσμα, οι λύσεις που δίδονται από τους τύπους (3-35) και (3-44) αποτελούν ειδικές περιπτώσεις για $w_{rp} = 0$. Οι αντίστοιχες γενικές λύσεις δίδονται από τις σχέσεις:

$$10 \log(D_{eff}^*(b, r)) = \frac{tx(b) - rx_{\min, req}(b, r) - \hat{\sigma}_w(b)}{\hat{n}_w(b)} \quad (3-47a)$$

$$D_{eff}^*(b, r) = 10^{\left(\frac{tx(b) - rx_{\min, req}(b, r) - \hat{\sigma}_w(b)}{10 \hat{n}_w(b)} \right)} \quad (3-47\beta)$$

και

$$10 \log(D_{eff}^*(b, r)) = \frac{tx(b) - SINR_{\min, req}(b, r) - 10 \log(kBT_{I, edge}(b)) - \hat{\sigma}_w(b)}{\hat{n}_w(b)} \quad (3-48a)$$

$$D_{eff}^*(b, r) = 10^{\left(\frac{tx(b) - SINR_{\min, req}(b, r) - 10 \log(kBT_{I, edge}(b)) - \hat{\sigma}_w(b)}{10 \hat{n}_w(b)} \right)} \quad (3-48\beta)$$

3.3.3.4 Μέθοδος Δ': Γενικευμένη εκτίμηση των συντελεστών διάδοσης

Μια φυσική επέκταση της προηγούμενης μεθόδου είναι η περαιτέρω γενίκευση του φίλτρου που καθορίζεται από τις σχέσεις (3-45)-(3-46), ώστε να λαμβάνεται υπόψη και το ιστορικό των εκτιμήσεων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί ορίζοντας το σταθμισμένο εκθέτη απωλειών διαδρομής και τη σταθμισμένη ενεργό απώλεια σκίασης ως εξής:

$$\hat{n}_{w,k}(b) = w_{hist} \cdot \hat{n}_{w,k-1}(b) + w_{rp} \cdot \hat{n}_{rp}(b) + (1 - w_{hist} - w_{rp}) \cdot \hat{n}(b), \quad (3-49)$$

$$w_{rp}, w_{hist} \in [0,1], w_{rp} + w_{hist} \leq 1$$

$$\hat{\sigma}_{w,k}(b) = w'_{hist} \cdot \hat{\sigma}_{w,k-1}(b) + w'_{rp} \cdot \hat{\sigma}_{rp}(b) + (1 - w'_{hist} - w'_{rp}) \cdot \hat{\sigma}(b), \quad (3-50)$$

$$w'_{rp}, w'_{hist} \in [0,1], w'_{rp} + w'_{hist} \leq 1$$

όπου ο δείκτης k υποδεικνύει την τρέχουσα εκτίμηση και ο δείκτης $k-1$ την αμέσως προηγούμενη. Με $w_{hist} \in [0,1]$ συμβολίζεται το βάρος που προσδίδεται στην προηγούμενη εκτίμηση του σταθμισμένου εκθέτη απωλειών διαδρομής και με $w'_{hist} \in [0,1]$ το βάρος που προσδίδεται στην προηγούμενη εκτίμηση της σταθμισμένης ενεργού απώλειας σκίασης.

Υπό αυτό το πρίσμα, οι λύσεις που δίδονται από τους τύπους (3-35) και (3-44) αποτελούν ειδικές περιπτώσεις για $w_{rp} = 0$ και $w_{hist} = 0$. Επίσης, οι λύσεις των (3-47) και (3-48) αποτελούν ειδικές περιπτώσεις για $w_{hist} = 0$. Οι αντίστοιχες γενικές λύσεις δίδονται από τις σχέσεις:

$$10 \log(D_{eff}^*(b, r)) = \frac{tx(b) - rx_{\min, req}(b, r) - \hat{\sigma}_{w,k}(b)}{\hat{n}_{w,k}(b)} \quad (3-51a)$$

$$D_{eff}^*(b, r) = 10^{\left(\frac{tx(b) - rx_{\min, req}(b, r) - \hat{\sigma}_{w,k}(b)}{10 \hat{n}_{w,k}(b)} \right)} \quad (3-51b)$$

και

$$10 \log(D_{eff}^*(b, r)) = \frac{tx(b) - SINR_{\min, req}(b, r) - 10 \log(kB \hat{T}_{l, edge}(b)) - \hat{\sigma}_{w,k}(b)}{\hat{n}_{w,k}(b)} \quad (3-52a)$$

$$D_{eff}^*(b, r) = 10^{\left(\frac{tx(b) - SINR_{\min, req}(b, r) - 10 \log(kB \hat{T}_{l, edge}(b)) - \hat{\sigma}_{w,k}(b)}{10 \hat{n}_{w,k}(b)} \right)} \quad (3-52b)$$

3.3.3.5 Μέθοδος Ε': Αποκλειστική αξιοποίηση IT μετρήσεων

Στην περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμες μετρήσεις τύπου SINR, αλλά μόνο τύπου IT, η διαδικασία βασικής συλλογιστικής πρέπει να αρκестεί στις εκτιμώμενες από το σχεδιασμό ραδιοκάλυψης τιμές του εκθέτη απωλειών διαδρομής και της ενεργού απώλειας σκίασης. Ισχύει τότε:

$$SINR_{\min,req}(b,r) = tx(b) - 10 \log(kB\hat{T}_{I,edge}(b)) - 10\hat{n}_{rp}(b) \log(D_{eff}^*(b,r)) - \hat{\sigma}_{rp}(b) \quad (3-53)$$

όπου η $\hat{T}_{I,edge}(b)$ δίδεται από την (3-33), η οποία επαναλαμβάνεται εδώ για λόγους πληρότητας:

$$\begin{aligned} \hat{T}_{I,edge}(b) &= \bar{T}_I(b) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{Ii}(b) \quad \text{ή} \\ \hat{T}_{I,edge}(b) &= \tilde{T}_I(b) = \mu_{1/2}(T_I(b)) \quad \text{ή} \\ \hat{T}_{I,edge}(b) &= \mu_a(T_I(b)), \quad a \in (0.5, 1) \end{aligned} \quad (3-54)$$

Επίλυση της (3-53) ως προς $D_{eff}^*(b,r)$ οδηγεί στο ακόλουθο, τελικό αποτέλεσμα:

$$10 \log(D_{eff}^*(b,r)) = \frac{tx(b) - SINR_{\min,req}(b,r) - 10 \log(kB\hat{T}_{I,edge}(b)) - \hat{\sigma}_{rp}(b)}{\hat{n}_{rp}(b)} \quad (3-55\alpha)$$

$$D_{eff}^*(b,r) = 10^{\left(\frac{tx(b) - SINR_{\min,req}(b,r) - 10 \log(kB\hat{T}_{I,edge}(b)) - \hat{\sigma}_{rp}(b)}{10\hat{n}_{rp}(b)} \right)} \quad (3-55\beta)$$

3.4 Παραπομπές

- [1] S. Haykin, “Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications”, *IEEE Journal on Selected Areas In Communications*, vol. 23, no. 2, pp. 201-220, Feb. 2005.
- [2] S. Haykin, *Communication Systems*, 4th ed. New York: John Wiley, 2001.
- [3] S. Verdu, “Fifty years of Shannon theory”, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 44, no. 6, pp. 2057-2078, Oct. 1998.
- [4] Ν. Μήτρου, *Ψηφιακές Επικοινωνίες*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2002.
- [5] K. Schwieger, A. Kumar, and G. Fettweis, “On the Impact of the Physical Layer on Energy Consumption in Sensor Networks”, in *Proc. of the 2nd European Workshop on Wireless Sensor Networks*, pp. 13-24, 31 Jan.-2 Feb. 2005.
- [6] IEEE Computer Society, “802.11b-1999: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band”, IEEE Std. 802.11b-1999 (R2003), Supplement to ANSI/IEEE Std 802.11-1999, approved Sept. 1999, reaffirm. June 2003.
- [7] J. D. Prado and S. Choi, “Link Adaptation Strategy for IEEE 802.11 WLAN via Received Signal Strength Measurement”, in *Proc. ICC '03*, Anchorage, AK, pp.1108–1113, May 2003.
- [8] IEEE Computer Society, “802.11a-1999: High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band”, IEEE Std. 802.11a-1999 (R2003), Supplement to ANSI/IEEE Std 802.11-1999, approved 1999, reaffirm. June 2003.
- [9] K. Ramachandran, H. Kremo, M. Gruteser, P. Spasojevic, and I. Seskar, “Scalability Analysis of Rate Adaptation Techniques in Congested IEEE 802.11 Networks: An ORBIT Testbed Comparative Study”, White Paper, WINLAB, Rutgers State University of New Jersey, April 2007.
- [10] A. Papoulis, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, pp. 100-101, 1984.
- [11] J. K. Patel and C. B. Read, *Handbook of the Normal Distribution*. New York: Dekker, 1982.
- [12] W. S. Gosset (Student), “The probable error of a mean”, *Biometrika*, vol. 6, no. 1, pp 1–25, March 1908.
- [13] R. A. Fisher, “Applications of ‘Student’s’ Distribution”, *Metron*, vol. 5, pp. 3-17, 1925.

- [14] M. Abramowitz and I. A. Stegun (Eds.). *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*, 9th printing. New York: Dover, pp. 948-949, 1972.
- [15] K. K. Leung, "Power control by interference prediction for broadband wireless packet networks", *IEEE Transactions in Wireless Communications*, vol. 1, no. 2, pp. 256-265, Apr. 2002.
- [16] F. Santucci, M. Pratesi, M. Ruggieri, and F. Graziosi, "A general analysis of signal strength handover algorithms with cochannel interference", *IEEE Transactions in Communications*, vol. 48, no. 2, pp. 231-241, Feb. 2000.
- [17] S. C. Schwartz and Y. S. Yeh, "On the distribution function and moments of power sums with lognormal components", *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 61, pp. 1441-1462, Sept. 1982.
- [18] M. Pratesi, M. Ruggieri, F. Graziosi, and F. Santucci, "Performance of signal strength handover algorithms with interference and correlated shadowings", in *Proc. 47th IEEE Vehicular Technology Conference*, vol. 2, pp. 530-534, May 1997.
- [19] F. Graziosi, M. Pratesi, M. Ruggieri, and F. Santucci, "A multicell model of handover initiation in mobile cellular networks", *IEEE Transactions in Vehicular Technology*, vol. 48, no. 3, pp. 802-814, May 1999.
- [20] N. A. Marlow, "A Normal Limit Theorem for Power Sums of Normal Random Variables", *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 46, pp. 2081-2089, 1967.

Κεφάλαιο 4
Προηγμένη Συλλογιστική

4 Προηγμένη Συλλογιστική

4.1 Η ανάγκη για αξιοπιστία

Οι εκτιμήσεις που αποκτώνται μέσω των διαδικασιών που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο είναι, εξ ορισμού, στιγμιαίες. Αυτό συμβαίνει γιατί οι εκτιμήσεις αυτές αλλάζουν συχνά και με τυχαίο τρόπο, επηρεαζόμενες από μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες, συμπεριλαμβανομένης της τυχαίας και προσωρινής σκίασης των τερματικών συσκευών, καθώς, επίσης, και των επιλογών διάρθρωσης αυτόνομων κοντινών σταθμών βάσης. Ως απάντηση σε αυτό το πρόβλημα, το δεύτερο λειτουργικό καθήκον, αυτό της συλλογιστικής, πρέπει να ενισχυθεί με μια κατάλληλη τεχνική, που θα εξάγει αξιόπιστες εκτιμήσεις, επεξεργαζόμενη περαιτέρω τις στιγμιαίες εκτιμήσεις. Μια τέτοια τεχνική θα πρέπει να είναι σε θέση να λαμβάνει ευφυείς αποφάσεις, αντί να θεωρεί άκριτα τις πρόσφατες εκτιμήσεις ως έγκυρες και ακριβείς. Συγκεκριμένα, ο επιθυμητός στόχος είναι διττός:

- Πρώτον, να εξομαλυνθούν οποιεσδήποτε διακυμάνσεις πηγάζουν από στιγμιαίες συνθήκες και δεν αντανακλούν την πραγματική κατάσταση του ραδιοπεριβάλλοντος. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί λαμβάνοντας υπόψη προηγούμενη γνώση (εμπειρία). Διακυμάνσεις τέτοιου τύπου μπορούν να θεωρούνται ως θόρυβος και πρέπει να αποφεύγονται.
- Δεύτερον, να γίνει το σύστημα προσαρμόσιμο σε μόνιμες αλλαγές, λαμβάνοντας κατάλληλα υπό θεώρηση τις πρόσφατες στιγμιαίες εκτιμήσεις.

4.2 Τεχνικές μηχανικής μάθησης

4.2.1 Γενικά

Οι τεχνικές μηχανικής μάθησης (machine learning) είναι άκρως κατάλληλες για την εκτίμηση νέων, πιθανώς άγνωστων καταστάσεων, με βάση πρότερη γνώση [1]-[3]. Τα χαρακτηριστικά αυτών των τεχνικών κρίνονται απολύτως ταιριαστά με την πρόκληση της αξιόπιστης συλλογιστικής στα γνωστικά δίκτυα.

Το πεδίο της μηχανικής μάθησης αποτελεί τμήμα του ευρύτερου πεδίου της τεχνητής νοημοσύνης (artificial intelligence). Κύριο αντικείμενό του είναι ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη αλγορίθμων και τεχνικών που καθιστούν μια μηχανή ικανή να «μαθαίνει». Στόχος είναι η χρήση υπολογιστικών και στατιστικών μεθόδων για την αυτόματη εξαγωγή πληροφοριών από δεδομένα. Εν γένει, εφαρμόζονται δύο μέθοδοι μάθησης: i) ο επαγωγικός (inductive) τύπος και ii) ο παραγωγικός (deductive) τύπος. Η επαγωγική συλλογιστική επιχειρεί την εξαγωγή ενός γενικού κανόνα από ένα μεγάλο σύνολο δεδομένων, ενώ ο παραγωγικός συλλογισμός χρησιμοποιεί παραγωγικά επιχειρήματα σε μια πορεία από δεδομένες καταστάσεις οι οποίες υποτίθεται ότι αληθεύουν, σε συμπεράσματα τα οποία αληθεύουν, αν αληθεύουν οι δεδομένες καταστάσεις.

Οι μέθοδοι μηχανικής μάθησης κατηγοριοποιούνται, συχνά, βάσει του επιθυμητού αποτελέσματος του αλγορίθμου. Στους πιο συνηθισμένους τύπους αλγορίθμων ανήκουν οι αλγόριθμοι επιτηρούμενης μάθησης (supervised learning), μη επιτηρούμενης μάθησης (unsupervised learning), μάθησης ενίσχυσης (reinforcement learning) και άλλοι. Στα πλαίσια του συγκεκριμένου προβλήματος προσθήκης αξιοπιστίας, θα περιγραφούν και θα χρησιμοποιηθούν αλγόριθμοι επιτηρούμενης μάθησης. Στις μεθόδους αυτές, ο αλγόριθμος επιχειρεί την προσέγγιση συναρτήσεως αντιστοίχισης των εισόδων σε επιθυμητές εξόδους.

Συγκεκριμένα, αναζητείται στο χώρο υποθέσεων H , δηλαδή στο χώρο όλων των δυνατών συναρτήσεων, μια συνάρτηση (υπόθεση) h , η οποία θα αντιστοιχίσει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τις εισόδους του προβλήματος στις αντίστοιχες εξόδους. Η μάθηση των αλγορίθμων πραγματοποιείται μέσω κατάλληλων παραδειγμάτων εκπαίδευσης (training examples), που ανήκουν σε ένα σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης (training data) D [14], [18]. Ένα παράδειγμα εκπαίδευσης αποτελείται από γνώρισμα (attributes) εισόδου, τα οποία μπορεί να λαμβάνουν διάφορες τιμές (values), και το γνώρισμα-στόχο (target attribute), το οποίο αντιπροσωπεύει την έξοδο του αλγορίθμου.

4.2.2 Μάθηση δέντρων αποφάσεων

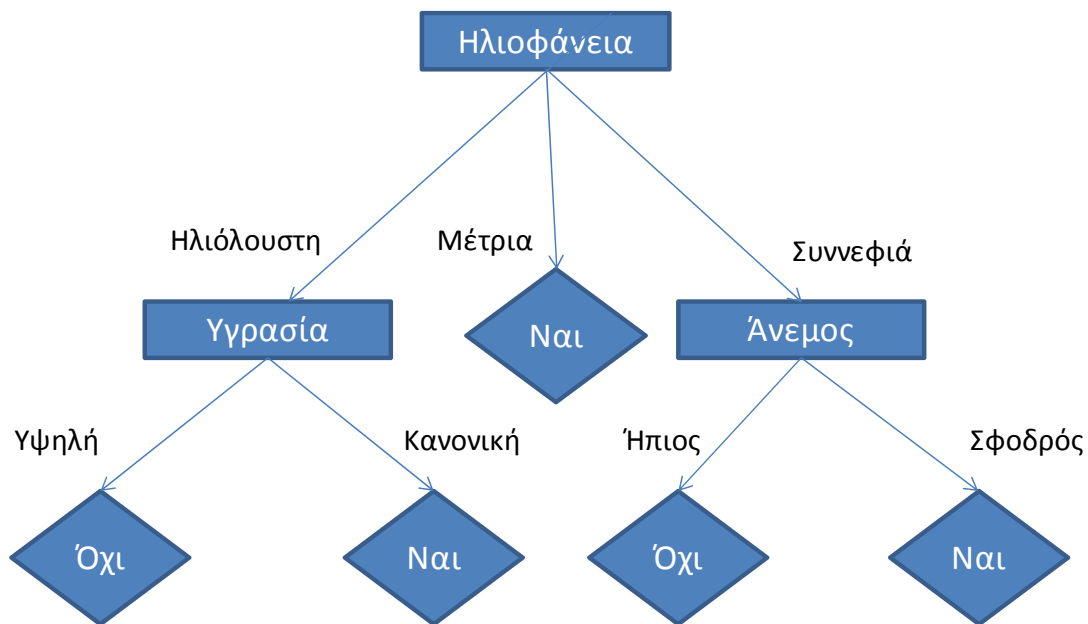
4.2.2.1 Γενικά

Η μάθηση δέντρων αποφάσεων (decision tree learning) είναι μια μέθοδος μηχανικής μάθησης που χρησιμοποιείται για την προσέγγιση συναρτήσεων διακριτών τιμών [14]-[16], [19], [22]. Η συνάρτηση μάθησης σε αυτήν την περίπτωση αναπαρίσταται με ένα δέντρο αποφάσεων. Τα δέντρα μάθησης μπορούν, επίσης, να παρασταθούν ως σύνολο κανόνων της μορφής «αν - τότε», προκειμένου να γίνουν πιο κατανοητά από τον άνθρωπο. Η μέθοδος αυτή μάθησης συγκαταλέγεται ανάμεσα στις πλέον δημοφιλείς μεθόδους επαγωγικής μάθησης, έχοντας επιτυχώς εφαρμοστεί σε μια ευρεία περιοχή εργασιών, όπως η μάθηση διάγνωσης ιατρικών υποθέσεων [4]-[6], η μάθηση στη διαδικασία εκτίμησης κινδύνων όσον αφορά τη χορήγηση δανείων [7], η μάθηση του κόστους παραγωγής και της ανάλυσης αγοράς [8], και πολλές άλλες.

4.2.2.2 Αναπαράσταση δέντρων αποφάσεων

Νέα στιγμιότυπα (instances) ταξινομούνται με μετακίνησή τους κατά μήκος του δέντρου από τη ρίζα (root) σε έναν κόμβο φύλλο (leaf node). Κάθε κόμβος φύλλο παρέχει μια πιθανή κατάταξη ενός στιγμιότυπου. Κάθε κόμβος στο δέντρο ορίζει έναν έλεγχο ενός γνωρίσματος του στιγμιότυπου, και κάθε κλαδί (branch) που προέρχεται από αυτόν τον κόμβο αντιστοιχεί σε μία από τις πιθανές τιμές του γνωρίσματος αυτού. Ένα στιγμιότυπο ταξινομείται ξεκινώντας από τον κόμβο ρίζα του δέντρου, ελέγχοντας το γνώρισμα που ορίζεται από αυτόν τον κόμβο, και, στη συνέχεια, διασχίζοντας προς τα κάτω το δέντρο, μέσω του κλαδιού που αντιστοιχεί στην τιμή του γνωρίσματος στο δεδομένο παράδειγμα.

Το Σχήμα 4-1 απεικονίζει ένα τυπικό δέντρο αποφάσεων μάθησης, σε ένα παράδειγμα προβλήματος που συναντάται στη βιβλιογραφία [9], [16].



Σχήμα 4-1. Τυπικό δέντρο αποφάσεων μάθησης

Το πρόβλημα που τίθεται εδώ είναι η κατηγοριοποίηση των κυριακάτικων πρωινών ανάλογα με το αν είναι κατάλληλα για τη διεξαγωγή παιχνιδιών αντισφαίρισης.

Για παράδειγμα, το στιγμιότυπο

{Ηλιοφάνεια = Ηλιόλουστος, Θερμοκρασία = Υψηλή,

Υγρασία = Υψηλή, Άνεμος = Σφοδρός}

ταξινομείται στο πιο αριστερό κλαδί του συγκεκριμένου δέντρου αποφάσεων και, συνεπώς, κατηγοριοποιείται ως ένα αρνητικό στιγμιότυπο, καθώς η απάντηση στην ερώτηση καταλληλότητας των συνθηκών για τη διεξαγωγή αγώνων αντισφαίρισης είναι, σε αυτήν την περίπτωση, αρνητική.

Γενικά, τα δέντρα αποφάσεων αναπαριστούν μια διάζευξη συζεύξεων των τιμών των γνωρισμάτων των στιγμιότυπων. Κάθε μονοπάτι από τη ρίζα του δέντρου ως ένα φύλλο αντιστοιχεί σε μια σύζευξη των ελέγχων των γνωρισμάτων, με το ίδιο το δέντρο να αποτελεί μια διάζευξη αυτών των συζεύξεων. Για παράδειγμα, το δέντρο που απεικονίζεται στο Σχήμα 4-1 αντιστοιχεί στην εξής λογική έκφραση:

$$(Ηλιοφάνεια = Ηλιόλουστη \cap Υγρασία = Κανονική) \cup (Ηλιοφάνεια = Μέτρια) \cup (Ηλιοφάνεια = Συννεφιά \cap Άνεμος = Ήπιος)$$

4.2.2.3 Κατάλληλα προβλήματα για μάθηση δέντρων αποφάσεων

Παρά την ποικιλία των μεθόδων μάθησης με δέντρα αποφάσεων [10]-[13], που παρουσιάζουν κατά κάποιο τρόπο διαφορετικές δυνατότητες και απαιτήσεις, η μάθηση τέτοιου τύπου είναι, σε γενικές γραμμές, περισσότερο κατάλληλη για την επίλυση προβλημάτων με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- **Τα στιγμιότυπα αναπαριστώνται με ζεύγη γνωρισμάτων-τιμών.** Τα στιγμιότυπα περιγράφονται μέσω ενός σταθερού συνόλου γνωρισμάτων (π.χ., *Θερμοκρασία*) και των τιμών τους (π.χ., *Υψηλή*). Η πιο εύκολη περίπτωση μάθησης δέντρων αποφάσεων υφίσταται όταν κάθε γνώρισμα λαμβάνει τιμές από ένα περιορισμένο σύνολο διαζεύξεων (π.χ., *Υψηλή, Μέτρια, Χαμηλή*). Παρόλα αυτά, επεκτάσεις του βασικού αλγορίθμου επιτρέπουν, επίσης, το χειρισμό γνωρισμάτων με πραγματικές τιμές (π.χ., η αριθμητική αναπαράσταση του γνωρίσματος *Θερμοκρασία*).
- **Η συνάρτηση-στόχος λαμβάνει διακριτές τιμές εξόδου.** Το δέντρο αποφάσεων του προηγούμενου παραδείγματος αναθέτει μια λογική κατηγοριοποίηση (π.χ., *ναι ή όχι*) σε κάθε παράδειγμα. Τα δέντρα αποφάσεων εύκολα επεκτείνονται σε συναρτήσεις μάθησης με περισσότερες από δύο πιθανές τιμές εξόδου. Μια πιο ουσιώδης επέκταση επιτρέπει τη μάθηση συναρτήσεων-στόχων με πραγματικές τιμές εξόδου, αν και η εφαρμογή των δέντρων αποφάσεων σε αυτήν την περίπτωση είναι λιγότερο συνηθισμένη.
- **Διαζευκτικές περιγραφές μπορεί να απαιτούνται.** Όπως, ήδη, αναφέρθηκε, τα δέντρα αποφάσεων αναπαριστούν διαζευκτικές εκφράσεις κατά φυσικό τρόπο.
- **Τα δεδομένα εκπαίδευσης μπορεί να περιέχουν σφάλματα.** Οι μέθοδοι μάθησης δέντρων αποφάσεων είναι ανθεκτικές τόσο σε σφάλματα στην κατάταξη των παραδειγμάτων εκπαίδευσης όσο και σε σφάλματα των τιμών των γνωρισμάτων που περιγράφουν αυτά τα παραδείγματα.
- **Τα δεδομένα εκπαίδευσης μπορεί να στερούνται τιμών σε συγκεκριμένα γνωρίσματα.** Οι μέθοδοι δέντρων αποφάσεων είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν ακόμα και όταν ορισμένα παραδείγματα εκπαίδευσης εμπεριέχουν άγνωστες τιμές (π.χ., αν η τιμή του γνωρίσματος *Υγρασία* είναι γνωστή σε τμήμα των παραδειγμάτων εκπαίδευσης).

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά εφαρμόζονται σε μια πληθώρα πρακτικών προβλημάτων. Συνεπώς, η μάθηση μέσω δέντρων αποφάσεων έχει εφαρμοστεί, όπως προαναφέρθηκε, στη μάθηση κατηγοριοποίησης των ασθενών βάσει της ασθένειάς τους, στην κατηγοριοποίηση των δυσλειτουργιών εξοπλισμού βάσει της αιτίας τους, στην κατηγοριοποίηση των αιτούντων δανείου βάσει της πιθανότητας ομαλής εξόφλησης των δόσεων και σε πλήθος άλλων περιπτώσεων. Τέτοια προβλήματα, στα οποία στόχος είναι η κατηγοριοποίηση (ταξινόμηση) των στιγμιότυπων σε μία εξ ενός διακριτού συνόλου κλάση, αναφέρονται συχνά ως προβλήματα κατηγοριοποίησης (classification problems).

4.2.2.4 Ο βασικός αλγόριθμος μάθησης δέντρων αποφάσεων

Ένα καίριο ερώτημα που προκύπτει είναι πώς δημιουργείται ένα δέντρο αποφάσεων που μπορεί να ταξινομεί αποτελεσματικά μελλοντικά στιγμιότυπα, βασιζόμενο σε ένα περιορισμένο σύνολο παραδειγμάτων εκπαίδευσης. Οι περισσότεροι αλγόριθμοι που έχουν αναπτυχθεί για τα δέντρα αποφάσεων αποτελούν παραλλαγές ενός βασικού αλγορίθμου, του επονομαζόμενου ID3 [20]-[21], [23]. Ο εν λόγω αλγόριθμος μαθαίνει τα δέντρα αποφάσεων, κατασκευάζοντάς τα με κατεύθυνση από πάνω προς τα κάτω, ξεκινώντας με το εξής ερώτημα: «Ποιο γνώρισμα πρέπει να ελεγχθεί (άρα να τοποθετηθεί) στη ρίζα του δέντρου;». Προκειμένου να απαντηθεί αυτό το ερώτημα, κάθε γνώρισμα εκτιμάται μέσω ενός στατιστικού ελέγχου, με στόχο τον προσδιορισμό του κατά πόσο αυτό το γνώρισμα από μόνο του κατατάσσει/διακρίνει τα παραδείγματα εκπαίδευσης. Το καλύτερο γνώρισμα επιλέγεται και χρησιμοποιείται ως έλεγχος στη ρίζα του δέντρου. Στη συνέχεια, ένας απόγονος της ρίζας δημιουργείται για κάθε δυνατή τιμή αυτού του γνωρίσματος, και τα παραδείγματα εκπαίδευσης ταξινομούνται στον κατάλληλο κόμβο απόγονο. Η όλη διαδικασία, εν συνεχεία, επαναλαμβάνεται χρησιμοποιώντας τα παραδείγματα εκπαίδευσης που συνδέονται με κάθε κόμβο απόγονο προκειμένου να επιλεγεί το καλύτερο προς έλεγχο γνώρισμα σε αυτό το σημείο του δέντρου. Σε κάθε βήμα, το γνώρισμα που είναι πιο χρήσιμο στην ταξινόμηση των παραδειγμάτων πρέπει να επιλέγεται. Η διαδικασία αυτή καθιστά μια άπληστη (greedy) αναζήτηση ενός αποδεκτού δέντρου αποφάσεων, χωρίς να εκτελεί κάποια αναδρομή προκειμένου να επανεξετάσει προηγούμενες επιλογές. Μια απλοποιημένη εκδοχή του

αλγόριθμου ID3, με εξειδίκευση στη μάθηση συναρτήσεων δυαδικών τιμών, παρουσιάζεται παρακάτω.

ID3 (Παραδείγματα, Γνώρισμα – στόχος, Γνωρίσματα)

Τα Παραδείγματα αποτελούν τα παραδείγματα εκπαίδευσης. Το Γνώρισμα – στόχος είναι το γνώρισμα εκείνο, η τιμή του οποίου επιχειρείται να προβλεφθεί από το δέντρο. Τα Γνωρίσματα είναι μια λίστα άλλων γνωρισμάτων που ενδεχομένως να ελεγχθούν από το δέντρο μάθησης. Ως αποτέλεσμα επιστρέφεται ένα δέντρο αποφάσεων που κατηγοριοποιεί σωστά τα δοθέντα Παραδείγματα.

- Δημιούργησε έναν κόμβο *Ρίζα* για το δέντρο
- Αν όλα τα *Παραδείγματα* είναι θετικά, Επίστρεψε το δέντρο μονού κόμβου *Ρίζα*, με ετικέτα =+
- Αν όλα τα *Παραδείγματα* είναι αρνητικά, Επίστρεψε το δέντρο μονού κόμβου *Ρίζα*, με ετικέτα =-
- Αν η λίστα *Γνωρίσματα* είναι κενή, Επίστρεψε το δέντρο μονού κόμβου *Ρίζα*, με ετικέτα = την πιο συχνή τιμή που έχει το *Γνώρισμα – στόχος* στα *Παραδείγματα*
- Σε άλλη περίπτωση, Ξεκίνα
 - $A \leftarrow$ γνώρισμα από τα γνωρίσματα που κατηγοριοποιεί καλύτερα* τα *Παραδείγματα*
 - Το γνώρισμα απόφασης για *Ρίζα* $\leftarrow A$
 - Για κάθε δυνατή τιμή v_i , του A ,
 - Πρόσθεσε ένα νέο κλαδί κάτω από τη *Ρίζα*, που αντιστοιχεί στον έλεγχο $A = v_i$
 - Έστω *Παραδείγματα*, το υποσύνολο του *Παραδείγματα* με τιμή v_i για το A
 - Αν το σύνολο *Παραδείγματα* είναι κενό
 - Τότε, κάτω από αυτό το νέο κλαδί πρόσθεσε ένα κόμβο-φύλλο με ετικέτα = την πιο συχνή τιμή που έχει το *Γνώρισμα – στόχος* στα *Παραδείγματα*
 - Αλλιώς, κάτω από αυτό το νέο κλαδί πρόσθεσε το υπόδεντρο ID3 (*Παραδείγματα, Γνώρισμα – στόχος, Γνωρίσματα – {A}*)

Τέλος

- Επίστρεψε Ρίζα

Όπως παρατηρούμε, ο αλγόριθμος καλείται σε κάποιο σημείο να προσδιορίσει το γνώρισμα εκείνο που κατηγοριοποιεί καλύτερα τα παραδείγματα. Για το σκοπό αυτό ορίζεται ένα κατάλληλο ποσοτικό μέτρο της αξίας κάθε γνωρίσματος. Ορίζεται, λοιπόν, μια στατιστική ιδιότητα, το κέρδος πληροφορίας (information gain) που μετρά το πόσο καλά ένα δοθέν γνώρισμα κατηγοριοποιεί τα παραδείγματα εκπαίδευσης με βάση το στόχο.

4.2.2.5 Εντροπία – Κέρδος πληροφορίας

Προκειμένου να οριστεί με ακρίβεια το κέρδος πληροφορίας ορίζεται, αρχικά, ένα μέτρο που χρησιμοποιείται ευρέως στη θεωρία πληροφορίας, η εντροπία [9]. Το μέτρο αυτό χαρακτηρίζει την «αγνότητα» μιας αυθαίρετης συλλογής παραδειγμάτων. Δοθέντος ενός συνόλου S , που περιέχει θετικά και αρνητικά παραδείγματα μιας έννοιας-στόχου, ορίζεται η εντροπία του συνόλου S που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη δυαδική κατηγοριοποίηση ως

$$\text{Entropy}(S) \equiv -p_{\oplus} \log_2 p_{\oplus} - p_{\ominus} \log_2 p_{\ominus}$$

όπου p_{\oplus} η αναλογία των θετικών παραδειγμάτων στο σύνολο S και p_{\ominus} η αναλογία των αρνητικών παραδειγμάτων αντίστοιχα. Σε όλους τους υπολογισμούς εντροπίας, ορίζεται $0 \log 0 \equiv 0$. Όπως γίνεται αντιληπτό, η εντροπία ισούται με 0 όταν όλα τα μέλη του S ανήκουν στην ίδια κλάση, οπότε και έχουμε $\text{Entropy}(S) = -1 \log_2 1 - 0 \log_2 0 = 0$. Αντίστοιχα η εντροπία ισούται με 1 όταν το σύνολο περιλαμβάνει ίδιο αριθμό θετικών και αρνητικών παραδειγμάτων. Σε αυτήν την περίπτωση, $\text{Entropy}(S) = -1/2 \log_2 1/2 - 1/2 \log_2 1/2 = -\log_2 1/2 = 1$. Αν ένα σύνολο αποτελείται από ανόμοιο αριθμό θετικών και αρνητικών παραδειγμάτων, τότε η εντροπία λαμβάνει τιμές στο πεδίο (0,1).

Για λόγους κατανόησης, ας εξεταστεί το παρακάτω παράδειγμα. Έστω S ένα σύνολο 14 παραδειγμάτων κάποιας δυαδικής έννοιας, αποτελούμενο από 9 θετικά και 5 αρνητικά παραδείγματα. Υιοθετείται ο συμβολισμός $[9+, 5-]$ για την αναπαράσταση του παραπάνω δείγματος δεδομένων. Η εντροπία του συνόλου S που σχετίζεται με τη συγκεκριμένη δυαδική κατηγοριοποίηση είναι

$$\text{Entropy}([9+, 5-]) = -9/14 \log_2 9/14 - 5/14 \log_2 5/14 = 0.940$$

Μια ερμηνεία της εντροπίας μέσω της θεωρίας πληροφορίας είναι η εξής: Η εντροπία ορίζει τον ελάχιστο αριθμό δυαδικών ψηφίων (bits) πληροφορίας που απαιτούνται για την κατηγοριοποίηση ενός αυθαίρετου μέλους του συνόλου S , ενός μέλους, για παράδειγμα, που επιλέγεται μέσω τυχαίου τρόπου με ομοιόμορφη κατανομή πιθανότητας. Παραδείγματος χάριν, αν $p_{\oplus} = 1$, ο δέκτης καταλαβαίνει ότι το παράδειγμα είναι θετικό και η εντροπία ισούται με 0. Αντίθετα, αν $p_{\oplus} = 0.5$, ένα bit απαιτείται για να δηλώσει ότι το παράδειγμα είναι θετικό ή αρνητικό. Τέλος, αν $p_{\oplus} = 0.8$, τότε ένα σύνολο μηνυμάτων μπορεί να κωδικοποιηθεί με μέσο όρο λιγότερα του ενός bit ανά μήνυμα, αναθέτοντας μικρότερους κώδικες σε σύνολα των θετικών παραδειγμάτων και μεγαλύτερους κώδικες στα λιγότερο πιθανά αρνητικά παραδείγματα.

Στην πιο γενική περίπτωση, όπου το γνώρισμα-στόχος μπορεί να λάβει μια από k πιθανές τιμές, ορίζεται η εντροπία αυτής της κατηγοριοποίησης ως $\text{Entropy}(S) \equiv \sum_{i=1}^k -p_i \log_2 p_i$, όπου p_i η αναλογία των μελών του συνόλου S που ανήκουν στην κλάση i . Στο σημείο αυτό, πρέπει να τονιστεί ότι ο λογάριθμος συνεχίζει να έχει βάση 2, καθώς η εντροπία είναι ένα μέτρο του αναμενόμενου μήκους κωδικοποίησης σε bits. Επίσης, αφού το γνώρισμα-στόχος μπορεί να λάβει k πιθανές τιμές, η μέγιστη τιμή της εντροπίας είναι $\log_2 k$.

Σχέση κέρδους πληροφορίας και εντροπίας. Διαθέτοντας, πλέον, ένα μέτρο της ομοιομορφίας ενός συνόλου παραδειγμάτων εκπαίδευσης μπορεί να οριστεί ένα μέτρο της αποτελεσματικότητας ενός γνωρίσματος στην κατηγοριοποίηση των δεδομένων εκπαίδευσης. Το μέτρο αυτό, που όπως προαναφέρθηκε καλείται κέρδος πληροφορίας, εκφράζει την αναμενόμενη μείωση της εντροπίας αν τα παραδείγματα διαχωριστούν με βάση αυτό το χαρακτηριστικό. Πιο συγκεκριμένα, το κέρδος πληροφορίας $\text{Gain}(S, A)$ ενός γνωρίσματος A που αντιστοιχεί σε ένα σύνολο παραδειγμάτων S ορίζεται ως:

$$\text{Gain}(S, A) \equiv \text{Entropy}(S) - \sum_{v \in \text{Values}(A)} \frac{|S_v|}{|S|} \text{Entropy}(S_v)$$

όπου $\text{Values}(A)$ το σύνολο όλων των δυνατών τιμών του γνωρίσματος A και S_v το υποσύνολο του συνόλου S στο οποίο το γνώρισμα A έχει την τιμή v , δηλαδή $S_v = \{s \in S | A(s) = v\}$. Ο πρώτος όρος της παραπάνω εξίσωσης του κέρδους πληροφορίας αποτελεί την εντροπία του αρχικού συνόλου S , ενώ ο δεύτερος όρος εκφράζει την

αναμενόμενη τιμή της εντροπίας, αφού το σύνολο S διαχωριστεί με βάση το γνώρισμα A . Αυτή η αναμενόμενη εντροπία είναι, απλώς, το άθροισμα των εντροπιών κάθε υποσυνόλου S_v με βάρος το κλάσμα των παραδειγμάτων $\frac{|S_v|}{|S|}$ που ανήκουν στο S_v . Συνεπώς, το κέρδος $\text{Gain}(S, A)$ είναι η αναμενόμενη μείωση της εντροπίας εξαιτίας της γνώσης της τιμής του γνωρίσματος A . Με άλλα λόγια, το κέρδος $\text{Gain}(S, A)$ αποτελεί την παρεχόμενη πληροφορία για τη συνάρτηση-στόχο, δεδομένης της τιμής του γνωρίσματος A . Η τιμή του κέρδους $\text{Gain}(S, A)$ εκφράζει τον αριθμό των bits που εξοικονομούνται κατά την κωδικοποίηση της τιμής-στόχου ενός τυχαίου μέλους του συνόλου S , γνωρίζοντας την τιμή του γνωρίσματος A .

Για παράδειγμα, επιστρέφοντας στο παράδειγμα της διεξαγωγής παιχνιδιών αντισφαίρισης, θεωρείται το σύνολο S ως ένα σύνολο ημερών-παραδειγμάτων εκπαίδευσης, περιγραφόμενο από γνωρίσματα όπως το γνώρισμα 'Ανεμος, που μπορεί να λάβει τις τιμές Σφοδρός ή 'Ηπιος. Όπως και προηγουμένως, ας υποθεθεί ότι το σύνολο S περιλαμβάνει 14 τιμές, 9 με θετικό αποτέλεσμα και 5 με αρνητικό ($[9+, 5-]$). Από αυτά τα 14 παραδείγματα, 6 εκ των θετικών παραδειγμάτων και 2 εκ των αρνητικών έχουν 'Ανεμος = 'Ηπιος, ενώ τα υπόλοιπα παραδείγματα έχουν Ανεμος = Σφοδρός. Το κέρδος πληροφορίας εξαιτίας της ταξινόμησης των 14 αρχικών παραδειγμάτων βάσει του γνωρίσματος 'Ανεμος υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Values}('Ανεμος) = 'Ηπιος, Σφοδρός$$

$$S = [9+, 5-]$$

$$S_{'Ηπιος} \leftarrow [6+, 2-]$$

$$S_{Σφοδρός} \leftarrow [3+, 3-]$$

$$\begin{aligned} \text{Gain}(S, \text{Ανεμος}) &= \text{Entropy}(S) - \sum_{v \in \{'Ηπιος, Σφοδρός\}} \frac{|S_v|}{|S|} \text{Entropy}(S_v) \\ &= \text{Entropy}(S) - \left(\frac{8}{14}\right) \text{Entropy}(S_{'Ηπιος}) \\ &\quad - \left(\frac{6}{14}\right) \text{Entropy}(S_{Σφοδρός}) = 0.940 - \left(\frac{8}{14}\right)0.811 - \left(\frac{6}{14}\right)1.00 \\ &= 0.048 \end{aligned}$$

Το κέρδος πληροφορίας είναι, όπως ειπώθηκε και παραπάνω, το μέτρο που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος ID3 για να επιλέξει το καλύτερο γνώρισμα κατά τη διαδικασία κατασκευής του δέντρου αποφάσεων.

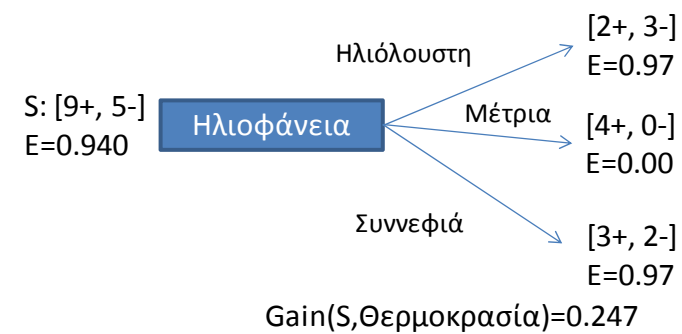
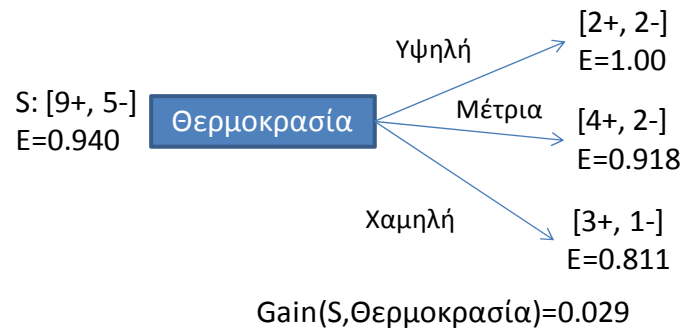
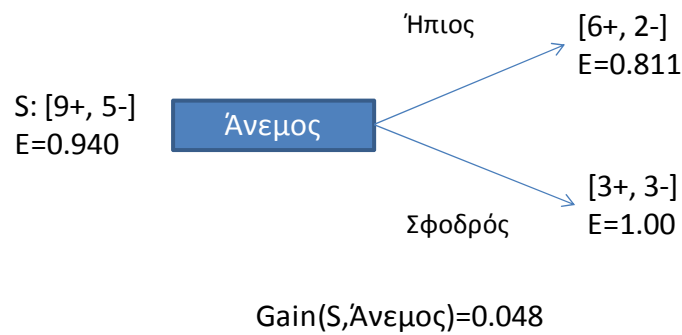
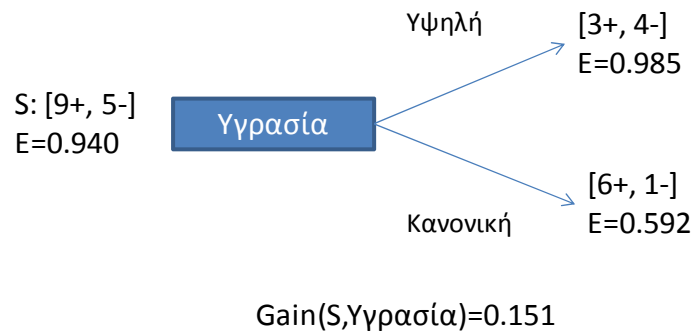
Σε όσα ακολουθούν, θα εξεταστεί και πάλι το παράδειγμα των παιχνιδιών αντισφαίρισης και θα επεξηγηθεί η ακολουθία βημάτων του αλγορίθμου ID3 για το

συγκεκριμένο παράδειγμα. Για το σκοπό αυτό, θεωρείται το σύνολο παραδειγμάτων εκπαίδευσης βάσει παρατηρήσεων επί συγκεκριμένων γνωρισμάτων διάρκειας 14 ημερών, που παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 4-1).

Πίνακας 4-1. Σύνολο παραδειγμάτων εκπαίδευσης

Ημέρα	Ηλιοφάνεια	Θερμοκρασία	Υγρασία	Άνεμος	Καταλληλότητα συνθηκών
D1	Ηλιόλουστη	Υψηλή	Υψηλή	Ήπιος	Όχι
D2	Ηλιόλουστη	Υψηλή	Υψηλή	Σφοδρός	Όχι
D3	Μέτρια	Υψηλή	Υψηλή	Ήπιος	Ναι
D4	Συννεφιά	Μέτρια	Υψηλή	Ήπιος	Ναι
D5	Συννεφιά	Χαμηλή	Κανονική	Ήπιος	Ναι
D6	Συννεφιά	Χαμηλή	Κανονική	Σφοδρός	Όχι
D7	Μέτρια	Χαμηλή	Κανονική	Σφοδρός	Ναι
D8	Ηλιόλουστη	Μέτρια	Υψηλή	Ήπιος	Όχι
D9	Ηλιόλουστη	Χαμηλή	Κανονική	Ήπιος	Ναι
D10	Συννεφιά	Μέτρια	Κανονική	Ήπιος	Ναι
D11	Ηλιόλουστη	Μέτρια	Κανονική	Σφοδρός	Ναι
D12	Μέτρια	Μέτρια	Υψηλή	Σφοδρός	Ναι
D13	Μέτρια	Υψηλή	Κανονική	Ήπιος	Ναι
D14	Συννεφιά	Μέτρια	Υψηλή	Σφοδρός	Όχι

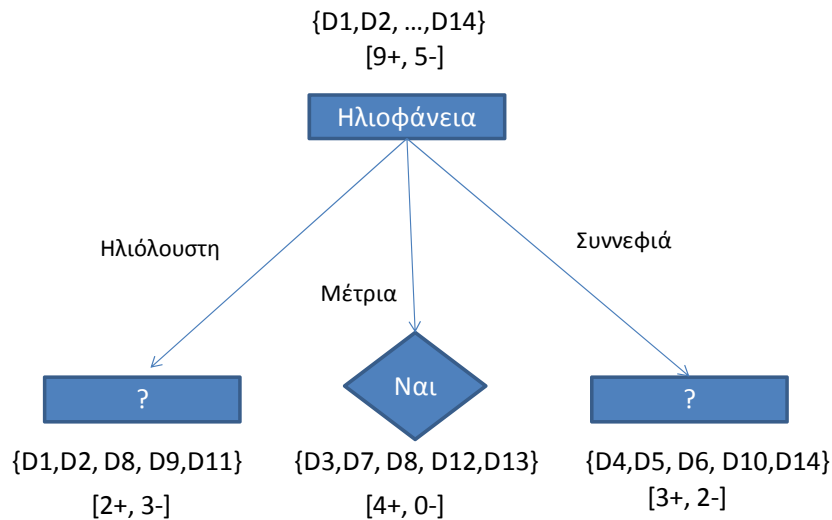
Οι επιμέρους εντροπίες και το κέρδος πληροφορίας καθενός από τα 4 γνωρίσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-2, που ακολουθεί.



Σχήμα 4-2. Επιμέρους εντροπίες και κέρδη πληροφορίας

Κατά την εκκίνησή του, ο αλγόριθμος ID3 εξετάζει ποιο από τα γνωρίσματα χρησιμεύει καλύτερα ως ρίζα του δέντρου, εξετάζοντας ποιο από τα γνωρίσματα έχει το μεγαλύτερο κέρδος πληροφορίας. Όπως είναι εμφανές στο Σχήμα 4-2, το γνώρισμα Ηλιοφάνεια είναι αυτό που έχει αυτήν την ιδιότητα και, επομένως,

διαχωρίζει καλύτερα τα παραδείγματα εκπαίδευσης. Το γνώρισμα αυτό, λοιπόν, τοποθετείται στη ρίζα του δέντρου και δημιουργούνται κλαδιά για καθεμία από τις δυνατές τιμές του. Το ημιτελές δέντρο που έχει προκύψει μετά από αυτό το βήμα εκτέλεσης του αλγόριθμου εικονίζεται στο Σχήμα 4-3 που ακολουθεί.



Σχήμα 4-3. Προκύπτων δέντρο μετά την πρώτη εκτέλεση του αλγορίθμου ID3

Όπως φαίνεται από την επισκόπηση των παραδειγμάτων εκπαίδευσης, όλα τα παραδείγματα στα οποία ισχύει Ηλιοφάνεια = Μέτρια οδηγούν σε θετική απάντηση, όσον αφορά την καταλληλότητα των συνθηκών. Για το λόγο αυτό, το συγκεκριμένο γνώρισμα παρουσιάζει μηδενική εντροπία και κατατάσσεται στο δέντρο ως κόμβος-φύλλο. Αντίθετα, οι απόγονοι που αντιστοιχούν στις τιμές Μέτρια και Συννεφιά συνεχίζουν να έχουν μη μηδενική εντροπία και επομένως, το δέντρο θα αναπτυχθεί περαιτέρω κάτω από αυτούς.

Η διαδικασία επιλογής, τώρα, ενός νέου γνώρισματος που διαχωρίζει καλύτερα τα παραδείγματα συνεχίζεται για κάθε εναπομείναντα μη τερματικό κόμβο, αυτήν τη φορά χρησιμοποιώντας μόνο τα παραδείγματα εκπαίδευσης που σχετίζονται με αυτόν τον κόμβο. Τα γνώρισμα που έχουν ήδη τοποθετηθεί σε κόμβο εξαιρούνται της διαδικασίας, έτσι ώστε κάθε γνώρισμα να συναντάται το πολύ μια φορά κατά μήκος οποιασδήποτε διαδρομής στο δέντρο αποφάσεων. Η παραπάνω διαδικασία συνεχίζεται για κάθε νέο κόμβο-φύλλο έως ότου εφαρμοστεί ένα από τα ακόλουθα κριτήρια τερματισμού:

- Κάθε γνώρισμα έχει συμπεριληφθεί σε μια διαδρομή του δέντρου

- Όλα τα παραδείγματα εκπαίδευσης που σχετίζονται με αυτόν τον κόμβο, έχουν την ίδια τιμή για το γνώρισμα-στόχο, η εντροπία τους, δηλαδή, είναι μηδενική

Το δέντρο αποφάσεων που προκύπτει ως έξοδος του συγκεκριμένου παραδείγματος απεικονίζεται στο Σχήμα 4-1.

4.2.2.6 Αναζήτηση χώρου υποθέσεων στη μάθηση δέντρων αποφάσεων

Όπως συμβαίνει και με άλλες μεθόδους επαγωγής, ο αλγόριθμος ID3 ερευνά το χώρο υποθέσεων προς εύρεση μιας υπόθεσης που ταιριάζει στα παραδείγματα εκπαίδευσης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο χώρος υποθέσεων είναι το σύνολο όλων των πιθανών δέντρων αποφάσεων. Ο αλγόριθμος αυτός ακολουθεί μια διαδρομή «από το απλό στο σύνθετο», ξεκινώντας με ένα κενό δέντρο και, εν συνεχεία, αναζητώντας προοδευτικά πιο λεπτομερείς υποθέσεις στην προσπάθειά του να καταλήξει σε ένα δέντρο αποφάσεων που ταιριάζει στα δεδομένα εκπαίδευσης. Η συνάρτησης εκτίμησης που καθοδηγεί αυτήν την αναζήτηση είναι το κέρδος πληροφορίας.

Παρατηρώντας τη λειτουργία του αλγορίθμου, από τη σκοπιά του χώρου και της στρατηγικής αναζήτησης, είναι δυνατή η επισήμανση των παρακάτω σχολίων όσον αφορά τις δυνατότητες και τους περιορισμούς του.

- Ο χώρος υποθέσεων του αλγορίθμου ID3, δηλαδή ο χώρος όλων των δέντρων απόφασης, είναι ένας πλήρης χώρος από πεπερασμένες συναρτήσεις διακριτών τιμών, σχετικών με τα υπό εξέταση γνωρίσματα. Καθώς κάθε συνάρτηση διακριτών τιμών μπορεί να αναπαρασταθεί με κάποιο δέντρο αποφάσεων, ο αλγόριθμος ID3 αποφεύγει έναν από τους μεγαλύτερους κινδύνους των μεθόδων που ερευνούν μη πλήρεις χώρους, την πιθανότητα ο χώρος υποθέσεων να μην περιλαμβάνει τη συνάρτηση-στόχο. Τέτοιες μέθοδοι είναι αυτές που θεωρούν αποκλειστικά συζευκτικές υποθέσεις [29]-[30].
- Ο αλγόριθμος ID3 διατηρεί μόνο μία τρέχουσα υπόθεση καθώς ερευνά το χώρο των δέντρων αποφάσεων, και όχι το σύνολο των υποθέσεων που σχετίζονται με τα δεδομένα εκπαίδευσης. Καθορίζοντας μόνο μια υπόθεση, ο ID3 χάνει τις δυνατότητες που συνοδεύουν τη ρητή αναπαράσταση όλων των υποθέσεων. Έτσι, δεν έχει τη δυνατότητα καθορισμού εναλλακτικών δέντρων

που παρουσιάζουν συνέπεια με τα διαθέσιμα παραδείγματα, ούτε τη δυνατότητα επιβολής νέων στιγμιαίων ερωτημάτων.

- Στην απλή μορφή του, ο αλγόριθμος ID3 δεν πραγματοποιεί «πορεία προς τα πίσω» στη διάρκεια της αναζήτησης του. Άπαξ και επιλέξει ένα γνώρισμα προς έλεγχο, δεν αναθεωρεί ποτέ αυτήν του την απόφαση. Εξαιτίας αυτού, υπόκειται στο κίνδυνο σύγκλισης σε ένα τοπικό βέλτιστο, που μπορεί να μην αποτελεί και την ολικά βέλτιστη λύση. Η τοπική αυτή βέλτιστη λύση αντιστοιχεί στην επιλογή ενός δέντρου αποφάσεων κατά μήκος της μονής διαδρομής που εξερευνά. Παρόλα αυτά, το δέντρο αυτό μπορεί να είναι λιγότερο επιθυμητό από δέντρα που ενδεχομένως να προέκυπταν σε διαφορετική διαδρομή. Το πρόβλημα αυτό επιλύεται με μια επέκταση του αλγορίθμου που προσθέτει κάποιο είδος «πορείας προς τα πίσω».
- Ο αλγόριθμος ID3 χρησιμοποιεί όλα τα παραδείγματα εκπαίδευσης, σε κάθε βήμα της διαδικασίας, προκειμένου να λάβει στατιστικές αποφάσεις για τον τρόπο διαχωρισμού της τρέχουσας υπόθεσης. Ένα πλεονέκτημα αυτής της διαδικασίας που αντιβαίνει στη συμπεριφορά μεθόδων που λαμβάνουν αποφάσεις αυξητικά [31]-[32] είναι ότι η εκμετάλλευση των στατιστικών ιδιοτήτων όλων των παραδειγμάτων καθιστά την έρευνα λιγότερο επιρρεπή σε σφάλματα μεμονωμένων παραδειγμάτων εκπαίδευσης. Ο αλγόριθμος ID3 μπορεί να επεκταθεί ώστε να χειρίζεται επιτυχώς θορυβώδη δεδομένα εκπαίδευσης, τροποποιώντας το κριτήριο τερματισμού του ώστε να αποδέχεται και υποθέσεις που δεν ταιριάζουν επακριβώς με τα παραδείγματα.
- Η επαγωγική μεροληψία (*inductive bias*) του αλγορίθμου ID3 μπορεί να συνοψιστεί στις ακόλουθες αρχές:
 - Τα μικρότερα δέντρα προτιμώνται έναντι των μεγαλύτερων.
 - Τα δέντρα που τοποθετούν γνώρισμα υψηλού κέρδους πληροφορίας πιο κοντά στη ρίζα προτιμώνται.

Μια γενίκευση της πρώτης αρχής, αποτελεί αντικείμενο συζήτησης μεταξύ των φιλοσόφων για εκατοντάδες χρόνια και παραμένει αναπάντητη μέχρι σήμερα. Ο William του Occam ήταν ο πρώτος που διατύπωσε αυτό το ερώτημα, περίπου το 1320, οπότε αυτή η αρχή συχνά αναφέρεται ως Occam's razor (Λεπίδα του Occam) [25]- [28], [42].

4.2.2.7 Υπερβολική προσαρμογή στα δεδομένα

Ο αλγόριθμος ID3 επεκτείνει το δέντρο τόσο, όσο χρειάζεται για να κατηγοριοποιηθούν τέλεια τα παραδείγματα εκπαίδευσης. Αν και μια τέτοια προσέγγιση φαίνεται λογική, εντούτοις μπορεί να προκαλέσει δυσκολίες όταν υπάρχει θόρυβος στα δεδομένα ή το σύνολο των παραδειγμάτων εκπαίδευσης είναι περιορισμένο. Σε αυτήν την περίπτωση, ο αλγόριθμος μπορεί να κατασκευάσει δέντρα που παρουσιάζουν υπερβολική προσαρμογή στα δεδομένα (overfitting).

Μια υπόθεση λέγεται ότι προσαρμόζεται υπερβολικά στα δεδομένα αν κάποια άλλη υπόθεση που προσαρμόζεται στα δεδομένα με λιγότερη ακρίβεια, στην πραγματικότητα έχει συνολικά καλύτερη απόδοση επί ολόκληρης της κατανομής των στιγμιότυπων. Η υπερβολική προσαρμογή [9] ορίζεται ως εξής: «Δεδομένου ενός χώρου υποθέσεων H , μια υπόθεση $h \in H$ λέγεται ότι προσαρμόζεται υπερβολικά στα δεδομένα, αν υπάρχει κάποια εναλλακτική υπόθεση $h' \in H$, τέτοια ώστε η υπόθεση h να δίνει μικρότερο σφάλμα από την h' επί των παραδειγμάτων εκπαίδευσης, αλλά η υπόθεση h' να παρουσιάζει μικρότερο σφάλμα από την h στο σύνολο όλων των στιγμιότυπων».

Όπως προαναφέρθηκε το φαινόμενο της υπερβολικής προσαρμογής απαντάται όταν τα παραδείγματα εκπαίδευσης περιέχουν λάθη ή θόρυβο. Ακόμα, όμως, και αν τα παραδείγματα εισόδου δεν παρουσιάζουν τα παραπάνω χαρακτηριστικά, είναι δυνατή η υπερβολική προσαρμογή και όταν μικρός αριθμός παραδειγμάτων εκπαίδευσης σχετίζεται με κόμβους-φύλλα. Σε αυτήν την περίπτωση είναι δυνατόν να υπάρχουν συμπτωματικές ομοιομορφίες, όπου ορισμένα γνωρίσματα φαίνεται να διαχωρίζουν τα παραδείγματα πολύ καλά, αν και δε σχετίζονται με την πραγματική συνάρτηση-στόχο.

Η υπερβολική προσαρμογή αποτελεί μια σημαντική πρακτική δυσκολία τόσο στη μέθοδο μάθησης δέντρων αποφάσεων όσο και σε άλλες μεθόδους μάθησης. Είναι χαρακτηριστικό ότι σε μια πειραματική έρευνα του αλγορίθμου ID3 [33], η οποία περιλάμβανε πέντε διαφορετικά καθήκοντα μάθησης με θορυβώδη, μη ντετερμινιστικά δεδομένα, προσδιορίστηκε ότι η υπερβολική προσαρμογή μείωνε την ακρίβεια των δέντρων απόφασης κατά 10-25% στα περισσότερα προβλήματα.

Έχουν βρεθεί αρκετές προσεγγίσεις για την αντιμετώπιση του προβλήματος προσαρμογής, οι οποίες χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

- Προσεγγίσεις που σταματούν να μεγαλώνουν το δέντρο νωρίς, πριν φτάσει στο σημείο να κατατάσσει τέλεια τα παραδείγματα [16].
- Προσεγγίσεις που επιτρέπουν στο δέντρο να προσαρμοστεί υπερβολικά και κατόπιν, το «κλαδεύουν» κατάλληλα [43].

Τα δέντρα αποφάσεων και ο αλγόριθμος ID3 μπορούν να επεκταθούν και στη μάθηση συναρτήσεων πραγματικών τιμών, συναρτήσεων δηλαδή όπου το γνώρισμα-στόχος δε λαμβάνει διακριτές αλλά πραγματικές τιμές. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με διαχωρισμό της πραγματικής τιμής σε διακριτά σύνολα διαστημάτων. Την προσέγγιση αυτοί ακολουθούν πολλές επεκτάσεις του βασικού αλγορίθμου [27], [34]- [36].

4.2.2.8 Εναλλακτικά μέτρα για την επιλογή γνωρισμάτων

Αν και το μέτρο του κέρδους πληροφορίας αποτελεί μια πολύ καλή επιλογή για την επιλογή των γνωρισμάτων που διαχωρίζουν καλύτερα τα παραδείγματα εκπαίδευσης, εν τούτοις, ορισμένες φορές μπορεί να παρουσιάσει ιδιαίτερες άσχημες επιδόσεις πρόβλεψης της συνάρτησης-στόχου. Αυτό συμβαίνει σε περιπτώσεις όπου ένα όρισμα μπορεί να λάβει ένα μεγάλο πλήθος δυνατών τιμών, όπως, για παράδειγμα, το γνώρισμα Ημερομηνία. Το γνώρισμα αυτό, εκ των πραγμάτων, διαχωρίζει τα παραδείγματα εκπαίδευσης σε πολύ μικρά υποσύνολα, έχει πολύ υψηλό κέρδος πληροφορίας αλλά σχεδόν μηδενική χρησιμότητα στην κατηγοριοποίηση νέων στιγμιότυπων.

Ένας τρόπος αποφυγής αυτού του προβλήματος είναι η επιλογή γνωρισμάτων απόφασης σύμφωνα με κάποιο διαφορετικό μέτρο. Ένα τέτοιο εναλλακτικό μέτρο αποτελεί ο λόγος κέρδους (gain ratio) που ορίζεται στην παραπομπή [16]. Ο λόγος κέρδους «τιμωρεί» γνωρίσματα όπως η Ημερομηνία χρησιμοποιώντας έναν όρο που ονομάζεται διαχωριστής πληροφορίας (split information). Το μέτρο αυτό παρουσιάζει ευαισθησία στο πόσο ομοιόμορφα διαχωρίζονται τα δεδομένα από ένα όρισμα. Ορίζεται ως:

$$\text{SplitInformation}(S, A) \equiv - \sum_{i=1}^k \frac{|S_i|}{S} \log_2 \frac{|S_i|}{|S|}$$

όπου S_1 έως S_k τα k υποσύνολα των παραδειγμάτων που προκύπτουν από το διαχωρισμού του συνόλου S βάσει του γνωρίσματος A , με k πιθανές τιμές. Θα πρέπει

να σημειωθεί ότι το μέτρο SplitInformation είναι, στην ουσία, η εντροπία του συνόλου S βάσει των τιμών του γνώρισματος A . Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τα προηγούμενα, όπου θεωρήθηκε η εντροπία του συνόλου S με βάση το γνώριμα-στόχο, η τιμή του οποίου ήταν το ζητούμενο προσδιορισμού.

Το μέτρο GainRatio ορίζεται σε συνάρτηση των μέτρων Gain και SplitInformation ως εξής:

$$\text{GainRatio}(S, A) \equiv \frac{\text{Gain}(S, A)}{\text{SplitInformation}(S, A)}$$

Αξιοσημείωτο είναι ότι ο όρος SplitInformation αποθαρρύνει την επιλογή γνωρισμάτων με κυρίως ομοιόμορφα κατανεμημένες τιμές. Για παράδειγμα, ας θεωρηθεί σύνολο n παραδειγμάτων που διαχωρίζονται πλήρως μέσω του γνώρισματος A . Σε αυτήν την περίπτωση η τιμή του μέτρου SplitInformation ισούται με $\log_2 n$. Αντίθετα, ένα δυαδικό γνώρισμα B που θα διαχώριζε πλήρως τα n παραδείγματα θα είχε SplitInformation = 1. Αν τα γνώρισμα A και B έχουν το ίδιο κέρδος πληροφορίας, τότε το γνώρισμα B θα είχε μεγαλύτερη τιμή στο μέτρο GainRatio.

Ένα πρακτικό ζήτημα που εγείρεται κατά τη χρήση του μέτρου GainRatio, αντί του μέτρου Gain, προκειμένου να επιλεγούν τα κατάλληλα γνώρισμα είναι ότι ο παρανομαστής μπορεί να είναι μηδενικός ή πολύ μικρός όταν $|S_i| \approx |S|$ για κάποιο από τα S_i . Έτσι, το GainRatio είναι είτε αδύνατο να οριστεί είτε πολύ μεγάλο για γνώρισμα που τυγχάνει να έχουν την ίδια τιμή για όλα σχεδόν τα μέλη του συνόλου S . Προς αποφυγή αυτού, είναι δυνατή η υιοθέτηση μιας ευριστικής μεθόδου, όπως ο αρχικός υπολογισμός του κέρδους πληροφορίας για όλα τα γνώρισμα και, στη συνέχεια, η εφαρμογή του λόγου κέρδους για τα γνώρισμα με μέσο κέρδος πληροφορίας [16].

Άλλα μέτρα διάκρισης των γνωρισμάτων έχουν επίσης προταθεί από διάφορους ερευνητές. Στην παραπομπή [37] προτείνεται ένα μέτρο βασιζόμενο στην απόσταση. Άλλα μέτρα αναλύονται εκτενώς στις εργασίες [38]-[39]. Στην παραπομπή [38] παρατίθεται μια πειραματική μελέτη της σχετικής αποτελεσματικότητας αρκετών τέτοιων μέτρων σε μια ποικιλία προβλημάτων.

Γνώρισμα με διαφορετικά βάρη. Σε ορισμένες διαδικασίες μάθησης, τα γνώρισμα των στιγμιότυπων μπορεί να έχουν συγκεκριμένα βάρη (weights). Αυτό είναι ιδιαίτερα συνηθισμένο στις περιπτώσεις ιατρικών διαγνώσεων, όπου κάθε

γνωρίσμα-σύμπτωμα έχει διαφορετική βαρύτητα. Στις διαδικασίες αυτές, επιλέγονται τα δέντρα αποφάσεων με γνωρίσματα μικρού βάρους, όπου αυτό είναι δυνατό, και γίνεται χρήση των γνωρισμάτων μεγάλου βάρους μόνο όταν αυτά παρέχουν αξιόπιστες κατηγοριοποιήσεις.

Ο αλγόριθμος ID3 μπορεί να τροποποιηθεί ώστε να λάβει υπόψη τα βάρη των γνωρισμάτων στη διαδικασία επιλογής τους. Για παράδειγμα, το κέρδος πληροφορίας μπορεί να διαιρεθεί με το βάρος του γνωρίσματος, έτσι ώστε τα γνωρίσματα μικρής βαρύτητας να επιλέγονται. Αν και μια τέτοια μέθοδος δεν εγγυάται την εύρεση ενός βέλτιστου δέντρου αποφάσεων, μπορεί να οδηγήσει την έρευνα του χώρου υποθέσεων στην κατεύθυνση των γνωρισμάτων χαμηλού βάρους.

Στην παραπομπή [40] ορίζεται ως μέτρο επιλογής ο λόγος $\frac{\text{Gain}^2(S,A)}{\text{Cost}(A)}$, ενώ στην παραπομπή [41] ορίζεται ως αντίστοιχο μέτρο ο λόγος $\frac{2^{\text{Gain}(S,A)} - 1}{(\text{Cost}(A)+1)^w}$, όπου $w \in [0, 1]$ μια σταθερά που καθορίζει τη σχετική σημασία του βάρους έναντι του κέρδους πληροφορίας.

4.2.3 Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

4.2.3.1 Γενικά

Οι μέθοδοι μάθησης νευρωνικών δικτύων (neural networks) παρέχουν μια αξιόπιστη λύση για την προσέγγιση συναρτήσεων-στόχων με πραγματικές, διακριτές ή διανυσματικές τιμές. Για συγκεκριμένους τύπους προβλημάτων, όπως είναι η μετάφραση σύνθετων δεδομένων αισθητήρων, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (artificial neural networks) συγκαταλέγονται ανάμεσα στις πιο αποτελεσματικές μεθόδους μάθησης. Για παράδειγμα, ο αλγόριθμος Backpropagation (οπισθοδιάδοση), που χρησιμοποιείται από τα νευρωνικά δίκτυα, έχει αποδειχθεί εκπληκτικά επιτυχής στη μάθηση αναγνώρισης γραπτών χαρακτήρων [44]-[45], στη μάθηση αναγνώρισης προσώπων [46]-[47] και στη μάθηση αναγνώρισης προφορικού λόγου [48]. Μια μελέτη των πρακτικών εφαρμογών του παρουσιάζεται στην παραπομπή [49].

4.2.3.2 Βιολογική προέλευση

Η μελέτη των τεχνητών νευρωνικών δικτύων έχει εμπνευστεί, εν μέρει, από την παρατήρηση των βιολογικών συστημάτων μάθησης, που βασίζονται σε εξαιρετικά πολύπλοκα δίκτυα διασυνδεδεμένων νευρώνων ή νευρώνων (neurons). Σε μια πρόχειρη αναλογία, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα κατασκευάζονται από ένα πυκνά διασυνδεδεμένο σύνολο απλών μονάδων, όπου κάθε μονάδα λαμβάνει έναν αριθμό από εισόδους πραγματικών τιμών, πιθανώς εξόδους άλλων μονάδων, και παράγει μία έξοδο πραγματικής τιμής. Η έξοδος αυτή μπορεί, εν συνεχεία, να γίνει είσοδος σε άλλες μονάδες. Η μεγάλη ταχύτητα αλλαγής των καταστάσεων των νευρώνων του ανθρώπινου εγκεφάλου έχει οδηγήσει πολλούς ερευνητές στην εκτίμηση ότι οι επεξεργαστικές ικανότητες των βιολογικών νευρωνικών συστημάτων πρέπει να πηγάζουν από διαδικασίες με μεγάλο βαθμό παραλληλίας που λειτουργούν επί αναπαραστάσεων, κατανεμημένων σε πολλούς νευρώνες. Ένα κίνητρο των νευρωνικών δικτύων είναι η σύλληψη αυτού του είδους υπολογισμού υψηλού παραλληλισμού βάσει κατανεμημένων αναπαραστάσεων. Το μεγαλύτερο μέρος του λογισμικού τεχνητών νευρωνικών δικτύων λειτουργεί σε σειριακές μηχανές, που εξομοιώνουν κατανεμημένες διεργασίες, ενώ ταχύτερες εκδοχές των αλγορίθμων «τρέχουν» σε μηχανές με υψηλό βαθμό παραλληλίας.

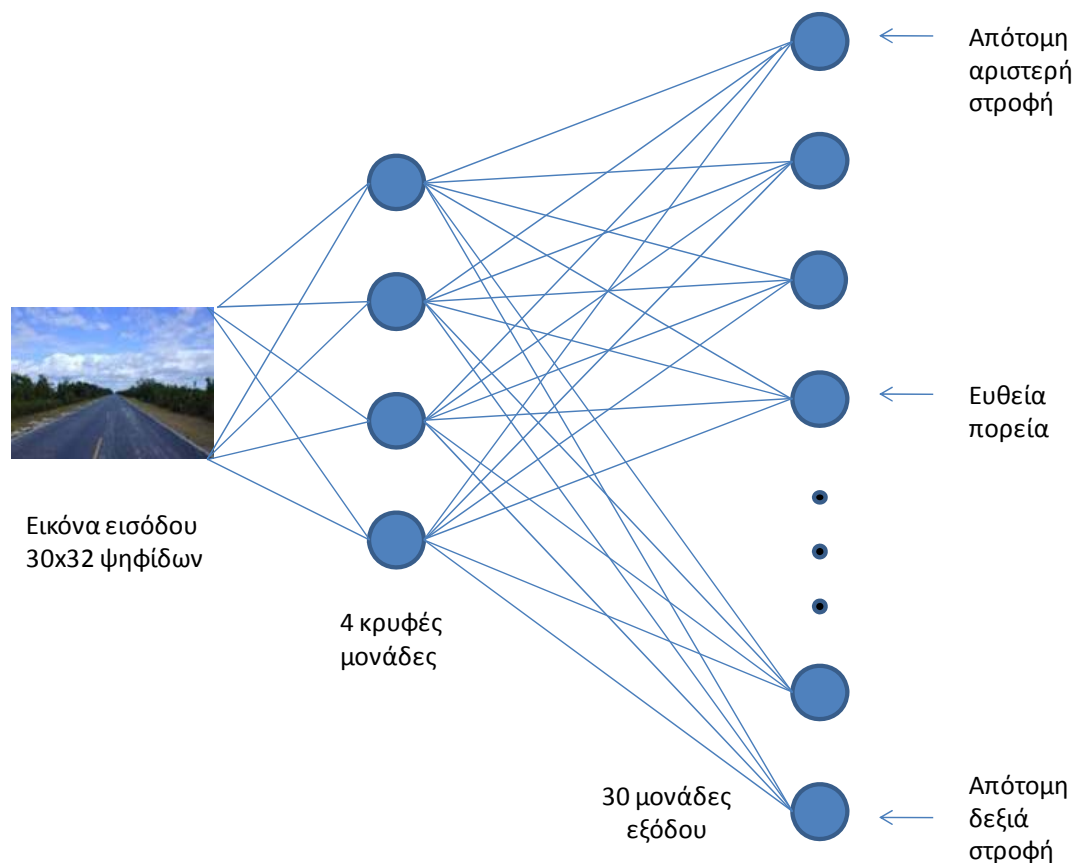
Παρά το γεγονός ότι τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα εμπνέονται από τα αντίστοιχα βιολογικά, εν τούτοις μεγάλο μέρος της πολυπλοκότητας των τελευταίων δε μοντελοποιείται από τα τεχνητά δίκτυα, μερικά χαρακτηριστικά των οποίων δεν έχουν συνέπεια με τα βιολογικά συστήματα. Παραδείγματος χάριν, θεωρούνται τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, οι μεμονωμένες μονάδες των οποίων παράγουν ως έξοδο μια σταθερή τιμή, σε αντίθεση με τους βιολογικούς νευρώνες που έχουν ως έξοδο μια σύνθετη χρονική σειρά αιχμών.

Στη συνέχεια, περιγράφονται τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα [49]-[54], που υλοποιούν αποτελεσματικούς αλγορίθμους μηχανικής μάθησης, ανεξάρτητα αν η συμπεριφορά τους μιμείται ή όχι αντίστοιχες βιολογικές διαδικασίες.

4.2.3.3 Αναπαράσταση νευρωνικών δικτύων

Ένα παράδειγμα πρωτοτύπου μάθησης νευρωνικών δικτύων περιγράφεται στην παραπομπή [55], όπου παρουσιάζεται το σύστημα ALVINN, που χρησιμοποιεί ένα

τεχνητό νευρωνικό δίκτυο που έχει «μάθει», προκειμένου να κατευθύνει ένα αυτόνομο όχημα, που κινείται με κανονική ταχύτητα σε δημόσιους αυτοκινητόδρομους. Η είσοδος του νευρωνικού δικτύου σε αυτήν την περίπτωση είναι ένα πλέγμα 30x32 ψηφίδων (pixels), αποκτηθέντων από μια κάμερα τοποθετημένη στο πρόσθιο τμήμα του οχήματος. Η έξοδος του δικτύου είναι η κατεύθυνση στην οποία πρέπει να κινηθεί το όχημα. Το αντίστοιχο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο έχει εκπαιδευτεί ώστε να μιμείται την οδική συμπεριφορά ενός ανθρώπου που οδηγεί το όχημα επί πέντε λεπτά. Το Σχήμα 4-4 παρουσιάζει την αναπαράσταση του νευρωνικού δικτύου σε μία από τις εκδοχές του προαναφερθέντος συστήματος. Οι νευρώνες (νευρώνια) είναι τα δομικά στοιχεία του δικτύου. Υπάρχουν δύο είδη νευρώνων, οι νευρώνες εισόδου και οι υπολογιστικοί νευρώνες: Οι νευρώνες εισόδου δεν υπολογίζουν τίποτα, απλά μεσολαβούν ανάμεσα στις εισόδους του δικτύου και τους υπολογιστικούς νευρώνες. Κάθε κόμβος στο διάγραμμα αντιστοιχεί στην έξοδο μιας μονάδας, με τις γραμμές που εισέρχονται στους κόμβους να αναπαριστούν τις αντίστοιχες εισόδους. Όπως φαίνεται, υπάρχουν τέσσερις κόμβοι οι οποίοι είναι κρυφοί (hidden nodes), δηλαδή η έξοδός τους είναι διαθέσιμη αποκλειστικά εντός του δικτύου και δεν αποτελεί τμήμα της συνολικής εξόδου του. Οι κόμβοι αυτοί δέχονται είσοδο απευθείας από τις 30x32 ψηφίδες της εικόνας. Καθένας από αυτούς υπολογίζει μία πραγματική τιμή εξόδου με βάση έναν ιεραρχημένο συνδυασμό των 960 εισόδων. Οι κρυφοί κόμβοι χρησιμοποιούνται στη συνέχεια ως είσοδος στο δεύτερο στρώμα με τριάντα μονάδες εξόδου. Κάθε μονάδα εξόδου αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση οδήγησης, και οι τιμές εξόδου αυτών των μονάδων καθορίζουν την κατεύθυνση που συνιστάται σε μεγαλύτερο βαθμό.



Σχήμα 4-4. Αναπαράσταση νευρωνικού δικτύου συστήματος ALVINN

Η δομή του τεχνητού δικτύου που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-4 είναι και η τυπική δομή πολλών τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Οι μεμονωμένες μονάδες είναι διασυνδεδεμένες σε στρώματα που σχηματίζουν ένα κατευθυνόμενο μη κυκλικό γράφο. Γενικά, τα νευρωνικά δίκτυα μπορούν να αναπαρασταθούν με διάφορους τύπους δομών, κυκλικούς ή ακυκλικούς, κατευθυνόμενους ή μη.

4.2.3.4 Κατάλληλα προβλήματα για τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

Η μάθηση τεχνητών νευρωνικών δικτύων είναι εξαιρετικά κατάλληλη για την επίλυση προβλημάτων στα οποία τα δεδομένα εκπαίδευσης αντιστοιχούν σε σύνθετα, θορυβώδη δεδομένα, όπως η είσοδος από κάμερες ή μικρόφωνα. Εφαρμόζεται, επίσης, σε προβλήματα όπου χρησιμοποιούνται περισσότερο συμβολικές αναπαραστάσεις, όπως τα προβλήματα που συζητήθηκαν στο τμήμα που πραγματεύεται τα δέντρα αποφάσεων. Σε αυτήν την περίπτωση, οι δύο μέθοδοι παράγουν αποτελέσματα συγκρίσιμης ακρίβειας. Ο αλγόριθμος Backpropagation αποτελεί την πιο συνηθισμένη τεχνική μάθησης των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Είναι κατάλληλος για προβλήματα με τα εξής χαρακτηριστικά:

- **Τα στιγμιότυπα αναπαριστώνται με πολλά ζεύγη γνωρισμάτων-τιμών.** Η συνάρτηση-στόχος που πρέπει να προσδιοριστεί ορίζεται μέσω στιγμιότυπων που περιγράφονται με ένα διάνυσμα προκαθορισμένων χαρακτηριστικών. Τα γνωρίσματα εισόδου μπορεί να είναι ισχυρά συσχετισμένα ή ανεξάρτητα μεταξύ τους. Τα γνωρίσματα αυτά μπορεί να έχουν πραγματικές τιμές.
- **Η συνάρτηση-στόχος μπορεί να έχει πραγματικές ή διακριτές τιμές. Μπορεί να έχει, επίσης, ως έξοδο διάνυσμα πραγματικών ή διακριτών τιμών.**
- **Τα παραδείγματα εκπαίδευσης μπορεί να περιέχουν θόρυβο.** Οι μέθοδοι μάθησης νευρωνικών δικτύων είναι αρκετά «ανθεκτικές» στα θορυβώδη δεδομένα εκπαίδευσης.
- **Είναι αποδεκτοί μεγάλοι χρόνοι εκπαίδευσης.** Οι αλγόριθμοι εκπαίδευσης των νευρωνικών δικτύων απαιτούν, συνήθως, μεγαλύτερους χρόνους εκπαίδευσης από τους αλγόριθμους μάθησης των δέντρων αποφάσεων. Οι χρόνοι εκπαίδευσης ποικίλουν από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι μερικές ώρες και εξαρτώνται από παράγοντες όπως ο αριθμός των βαρών στο δίκτυο, ο αριθμός των παραδειγμάτων εκπαίδευσης και η ρύθμιση των διάφορων παραμέτρων των τεχνικών μάθησης.
- **Μπορεί να απαιτείται γρήγορη εκτίμηση της συνάρτησης-στόχου.** Ενώ οι χρόνοι εκπαίδευσης ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου μπορεί να είναι πολύ μεγάλοι, η εκτίμηση του δικτύου προκειμένου να εκτιμηθεί ένα νέο στιγμιότυπο είναι τυπικά πολύ γρήγορη.
- **Η δυνατότητα των ανθρώπων να κατανοήσουν τη συνάρτηση-στόχο δεν είναι απαραίτητη.** Συχνά, είναι δύσκολο να γίνουν κατανοητά από τον άνθρωπο τα βάρη που μαθαίνονται από τα νευρωνικά δίκτυα, αντίθετα από τους κανόνες μάθησης που γίνονται πιο εύκολα αντιληπτοί.

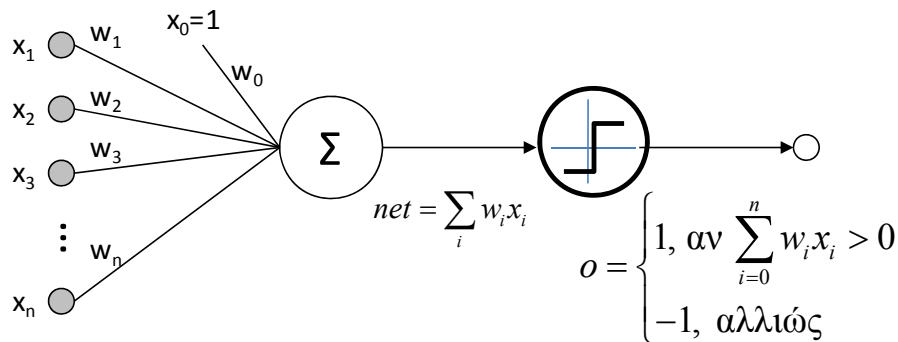
4.2.3.5 Αισθητήρες

Ο απλούστερος τύπος τεχνητού νευρωνικού δικτύου βασίζεται σε μια μονάδα που ονομάζεται perceptron (αισθητήρας) [56]-[57] και απεικονίζεται στο Σχήμα 4-5. Ένα perceptron λαμβάνει ένα διάνυσμα από εισόδους πραγματικών τιμών, υπολογίζει ένα γραμμικό συνδυασμό αυτών και παράγει έξοδο που ισούται με 1, αν το αποτέλεσμα είναι μεγαλύτερο από ένα συγκεκριμένο κατώφλι, και -1 στην αντίθετη περίπτωση.

Πιο συγκεκριμένα, δοθέντων εισόδων x_1 έως x_n , η έξοδος $o(x_1, \dots, x_n)$ υπολογίζεται από το perceptron ως εξής:

$$o(x_1, \dots, x_n) = \begin{cases} 1, & \text{αν } w_0 + w_1x_1 + w_2x_2 + \dots + w_nx_n > 0 \\ -1, & \text{σε άλλη περίπτωση} \end{cases}$$

όπου κάθε w_i είναι μια πραγματική σταθερά που ονομάζεται βάρος και καθορίζει τη συνεισφορά της εισόδου x_i στην έξοδο του perceptron. Η ποσότητα $(-w_0)$ είναι το κατώφλι που ο σταθμισμένος συνδυασμός των εισόδων $w_1x_1 + w_2x_2 + \dots + w_nx_n$ πρέπει να υπερβεί προκειμένου η έξοδος του perceptron να είναι ίση με 1.



Σχήμα 4-5. Το perceptron

Για απλοποίηση του συμβολισμού, θεωρείται μία επιπλέον σταθερή είσοδος $x_0 = 1$, έτσι ώστε η παραπάνω ανίσωση να μπορεί να γραφεί ως $\sum_{i=0}^n w_i x_i > 0$, ή σε μορφή διανύσματος ως $\vec{w} \cdot \vec{x} > 0$. Για λόγους συντομίας, η συνάρτηση του perceptron γράφεται ως: $o(\vec{x}) = \text{sgn}(\vec{w} \cdot \vec{x})$, όπου $\text{sgn}(y) = \begin{cases} 1 & \text{αν } y > 0 \\ -1 & \text{αλλιώς} \end{cases}$.

Η μάθηση ενός perceptron έγκειται στην επιλογή των βαρών w_1, \dots, w_n . Συνεπώς, ο χώρος H των υποψήφιων υποθέσεων στη μάθηση ενός perceptron είναι το σύνολο όλων των πιθανών διανυσμάτων βαρών δηλαδή $H = \{\vec{w} \mid \vec{w} \in \mathbb{R}^{(n+1)}\}$.

Ένα perceptron μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση πολλών δυαδικών συναρτήσεων. Για παράδειγμα, υποθέτοντας δυαδικές τιμές 0 (false) και 1 (true), τότε ένας τρόπος χρήσης ενός perceptron δύο εισόδων για την υλοποίηση της συνάρτησης λογικής σύζευξης (AND function) είναι η επιλογή των βαρών $w_0 = -0.8$ και $w_1 = w_2 = 0.5$. Τα perceptrons μπορούν να αναπαραστήσουν όλες τις πρωταρχικές λογικές συναρτήσεις όπως τη λογική σύζευξη (AND), διάζευξη (OR), αρνητική σύζευξη (NAND) και αρνητική διάζευξη (NOR). Παρόλα αυτά, υπάρχουν και λογικές συναρτήσεις, όπως αυτή της αποκλειστικής διάζευξης (XOR), που δεν μπορούν να αναπαρασταθούν από ένα μόνο perceptron. Εκφράζοντας, όμως, κάθε

λογική συνάρτηση ως διάζευξη ενός συνόλου συζεύξεων, τότε αυτή μπορεί να παρασταθεί χρησιμοποιώντας perceptrons δύο στρωμάτων.

Ο κανόνας εκπαίδευσης των perceptrons. Αν και το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στη μάθηση δικτύων πολλών διασυνδεδεμένων μονάδων, είναι χρήσιμος για την παραπέρα κατανόηση ο τρόπος επιλογής των βαρών ενός μονού perceptron. Το ακριβές πρόβλημα μάθησης σε αυτήν την περίπτωση είναι ο καθορισμός ενός διανύσματος βαρών που οδηγεί το perceptron στην παραγωγή του σωστού ± 1 αποτελέσματος για καθένα από τα δοθέντα παραδείγματα εκπαίδευσης.

Έχουν αναπτυχθεί πολλοί αλγόριθμοι για την επίλυση αυτού του προβλήματος μάθησης. Στις παραγράφους που ακολουθούν, περιγράφονται δύο από αυτούς. Ο κανόνας perceptron και ο κανόνας δέλτα. Οι δύο αυτοί αλγόριθμοι εγγυώνται σύγκλιση σε κάπως διαφορετικές αποδεκτές υποθέσεις, υπό, κατά κάποιο τρόπο, διαφορετικές συνθήκες. Η σπουδαιότητα τους έγκειται στο ότι παρέχουν τα θεμέλια για τη μάθηση δικτύων πολλών μονάδων.

Ένας τρόπος μάθησης ενός αποδεκτού διανύσματος βαρών είναι η αρχική επιλογή τυχαίων βαρών και, εν συνεχεία, η επαναλαμβανόμενη εφαρμογή του perceptron σε κάθε παράδειγμα εκπαίδευσης, με ταυτόχρονη τροποποίηση εκείνων κάθε φορά των βαρών που κατατάσσουν λανθασμένα το παράδειγμα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται όσες φορές απαιτούνται για τη σωστή κατάταξη όλων των παραδειγμάτων εισόδου. Σε κάθε βήμα, τα βάρη τροποποιούνται σύμφωνα με τον κανόνα εκπαίδευσης perceptron, που τροποποιεί το βάρος w_i που σχετίζεται με την είσοδο x_i σύμφωνα με τον κανόνα

$$w_i \leftarrow w_i + \Delta w_i$$

όπου $\Delta w_i = \eta(t - o)x_i$, με t την έξοδο-στόχο για το τρέχον παράδειγμα εκπαίδευσης, o την παραγόμενη έξοδο του perceptron, και η μια θετική σταθερά που καλείται ρυθμός μάθησης. Ο ρόλος αυτής της σταθεράς είναι ο έλεγχος του βαθμού στον οποίο τροποποιούνται τα βάρη σε κάθε βήμα. Συνήθως, λαμβάνει πολύ μικρή τιμή (π.χ., 0.1) και ορισμένες φορές ελαττώνεται με την παρέλευση των επαναληπτικών βημάτων.

Η μέθοδος αυτή μπορεί να αποδειχθεί ότι συγκλίνει, με το πέρας ενός πεπερασμένου αριθμού εφαρμογής του κανόνα, σε ένα διάνυσμα βαρών που κατηγοριοποιεί σωστά όλα τα παραδείγματα εκπαίδευσης, με την προϋπόθεση αυτά να είναι γραμμικώς διαχωρίσιμα και να χρησιμοποιείται μια μικρή τιμή του ρυθμού η

[9]. Αν τα δεδομένα δεν είναι γραμμικώς διαχωρίσιμα, τότε η σύγκλιση δεν είναι βέβαιη.

Μέθοδος κατάβασης κλίσης. Την αδυναμία σύγκλισης του κανόνα εκπαίδευσης perceptron όταν τα δεδομένα εκπαίδευσης δεν είναι γραμμικώς διαχωρίσιμα έρχεται να καλύψει ένας δεύτερος κανόνας εκπαίδευσης, ο κανόνας δέλτα [59]. Στην περίπτωση, λοιπόν, που τα δεδομένα δεν είναι γραμμικώς διαχωρίσιμα, ο κανόνας αυτός συγκλίνει προς μια βέλτιστη προσαρμογή στη συνάρτηση-στόχο.

Η βασική ιδέα πίσω από αυτήν τη μέθοδο είναι η χρήση κατάβασης κλίσης (gradient descent) [9] για διερεύνηση του χώρου υποθέσεων των πιθανών διανυσμάτων βαρών, με στόχο την εύρεση εκείνου του διανύσματος που προσαρμόζεται καλύτερα στα παραδείγματα εκπαίδευσης. Ο κανόνας αυτός είναι ιδιαίτερα χρήσιμος, καθώς αποτελεί τη βάση του αλγόριθμου Backpropagation, για τη μάθηση δικτύων πολλών στρωμάτων. Επίσης, μπορεί να λειτουργήσει ως βάση για την ανάπτυξη αλγορίθμων μάθησης οι οποίοι πρέπει να ερευνήσουν χώρους υποθέσεων που περιλαμβάνουν διαφορετικούς τύπους συνεχώς παραμετροποιημένων υποθέσεων.

Ο κανόνας εκπαίδευσης δέλτα γίνεται καλύτερα κατανοητός θεωρώντας το καθήκον εκπαίδευσης ενός perceptron χωρίς κατώφλι, δηλαδή μιας γραμμικής μονάδας, για την οποία η έξοδος ο δίνεται από την εξίσωση

$$o(\vec{x}) = \vec{w} \cdot \vec{x}$$

Συνεπώς, η γραμμική μονάδα αντιστοιχεί στο πρώτο στάδιο του perceptron χωρίς κατώφλι. Πριν την εξαγωγή ενός κανόνα μάθησης βαρών για γραμμικές μονάδες, θα πρέπει να οριστεί ένα μέτρο για το σφάλμα εκπαίδευσης μιας υπόθεσης, εδώ ενός διανύσματος βαρών, σε σχέση με τα παραδείγματα εκπαίδευσης. Ένα τέτοιο βολικό μέτρο είναι το μέτρο E που ορίζεται ως εξής:

$$E(\vec{w}) \equiv \frac{1}{2} \sum_{d \in D} (t_d - o_d)^2$$

όπου D το σύνολο των παραδειγμάτων εκπαίδευσης, t_d η έξοδος-στόχος για το παράδειγμα εκπαίδευσης d, και o_d η έξοδος της γραμμικής μονάδας για το ίδιο παράδειγμα. Βάσει αυτού του ορισμού, το σφάλμα $E(\vec{w})$ είναι απλά το μισό της τετραγωνικής διαφοράς ανάμεσα στην έξοδο-στόχο t_d και την έξοδο της γραμμικής μονάδας o_d , υπολογισμένη για το σύνολο των παραδειγμάτων εκπαίδευσης. Στην

παραπομπή [9], αποδεικνύεται ότι η υπόθεση που ελαχιστοποιεί το σφάλμα $E(\vec{w})$ είναι και η πιο πιθανή, δεδομένων των παραδειγμάτων εκπαίδευσης.

Η μέθοδος κατάβασης κλίσης καθορίζει ένα διάνυσμα βαρών που ελαχιστοποιεί το σφάλμα E , ξεκινώντας με ένα αυθαίρετο αρχικό διάνυσμα και, στη συνέχεια, τροποποιώντας το με μικρά βήματα. Σε κάθε βήμα, το διάνυσμα βαρών μεταβάλλεται προς την κατεύθυνση που παράγει την πιο απότομη μεταβολή στο E . Μέσω μερικής παραγωγίσιμης ως προς τα επιμέρους βάρη, προκύπτει ο κανόνας ενημέρωσης των βαρών της συγκεκριμένης μεθόδου ως:

$$\Delta w_i = \eta \sum_{d \in D} (t_d - o_d) x_{id}$$

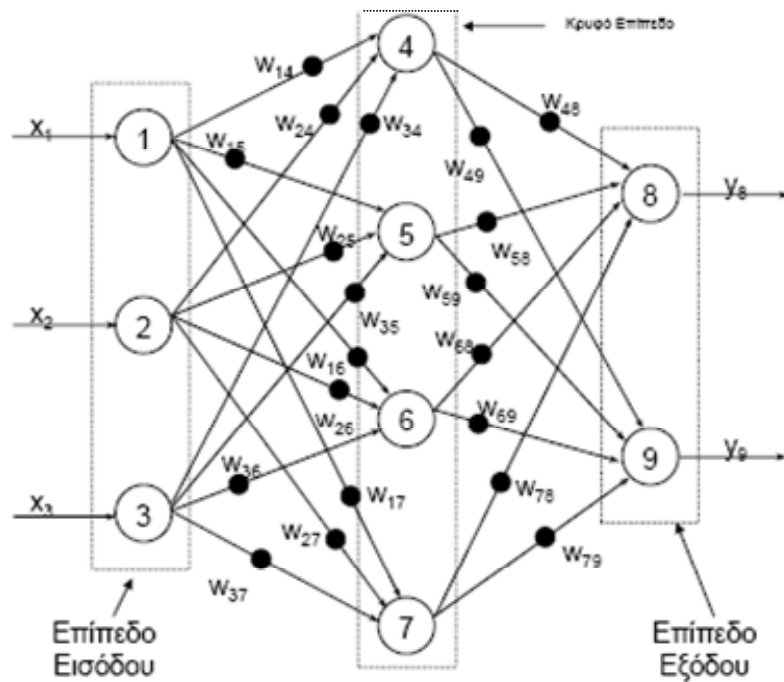
όπου x_{id} η είσοδος x_i για το παράδειγμα εκπαίδευσης d .

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου βρεθεί ένα ολικό ελάχιστο. Περισσότερες λεπτομέρειες επί της μεθόδου μπορούν να αναζητηθούν στις παραπομπές [9], [54].

Ένας τρίτος αλγόριθμος μάθησης του διανύσματος βαρών είναι ο γραμμικός προγραμματισμός (linear programming) [60]-[61]. Και αυτός ο αλγόριθμος, όμως, εφαρμόζεται μόνο στην περίπτωση που τα παραδείγματα εκπαίδευσης είναι γραμμικώς διαχωρίσιμα.

4.2.3.6 Πολυστρωματικά τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

Οι αλγόριθμοι που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους είναι κατάλληλοι για νευρωνικά δίκτυα μονού στρώματος, που μπορούν να εκφράζουν επιφάνειες γραμμικής απόφασης. Στο τμήμα που ακολουθεί θα περιγραφούν νευρωνικά δίκτυα πολλαπλών στρωμάτων (multilayer neural networks) και θα παρουσιαστεί ο αλγόριθμος Backpropagation που χρησιμοποιείται για τη μάθησή τους. Τα δίκτυα αυτά μπορούν να αναπαραστήσουν μια μεγάλη ποικιλία μη-γραμμικών επιφανειών απόφασης. Ένα πολυστρωματικό νευρωνικό δίκτυο παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-6.



Σχήμα 4-6. Παράδειγμα πολυστρωματικού νευρωνικού δικτύου

Όπως είναι φανερό, υπάρχουν τα εξής στρώματα:

- Το στρώμα εισόδου, το οποίο στέλνει τα σήματα εισόδου στους νευρώνες του κρυφού στρώματος
- Ένα ή περισσότερα κρυφά στρώματα, που συνήθως αποτελούνται από μη-γραμμικές μονάδες
- Το στρώμα εξόδου, το οποίο μπορεί να αποτελείται από γραμμικούς ή μη-γραμμικούς νευρώνες (ή συνδυασμό τους).

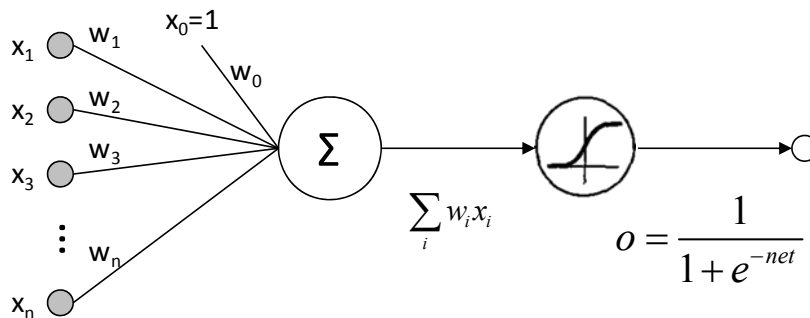
4.2.3.7 Σιγμοειδής μονάδα

Μια επιλογή μονάδων για την κατασκευή πολυστρωματικών τεχνητών δικτύων θα ήταν οι γραμμικές μονάδες. Τα πολλαπλά επίπεδα, όμως, τέτοιων γραμμικών μονάδων παράγουν μόνο γραμμικές συναρτήσεις, ενώ είναι επιθυμητή η δυνατότητα αναπαράστασης και μη-γραμμικών συναρτήσεων. Το perceptron είναι μια άλλη υποψήφια επιλογή μονάδας, αλλά το ασυνεχές κατώφλι του το καθιστά μη παραγωγίσιμο και, συνεπώς, ακατάλληλο για τη μέθοδο κατάβασης κλίσης. Αυτό που απαιτείται είναι μια μονάδα, η έξοδος της οποίας να είναι μια μη-γραμμική συνάρτηση των εισόδων της, αλλά επίσης και μια παραγωγίσιμη συνάρτηση αυτών. Μια λύση αποτελεί η σιγμοειδής μονάδα (sigmoid unit), η οποία παρουσιάζεται στο

Σχήμα 4-7. Όπως και το perceptron, υπολογίζει, αρχικά, ένα γραμμικό συνδυασμό των εισόδων και στη συνέχεια εφαρμόζει μια συνάρτηση κατωφλίου στο αποτέλεσμα. Στην περίπτωση της σιγμοειδούς μονάδας, όμως, η τιμή του κατωφλίου είναι μια συνεχής συνάρτηση των εισόδων του. Πιο συγκεκριμένα, η σιγμοειδής μονάδα υπολογίζει την έξοδο ο ως εξής:

$$o = \sigma(\vec{w} \cdot \vec{x})$$

όπου $\sigma(y) = \frac{1}{1+e^{-y}}$ η συνάρτηση σιγμοειδούς. Η συνάρτηση αυτή είναι γνησίως αύξουσα, λαμβάνοντας τιμές στο διάστημα (0, 1). Η παράγωγος αυτής της συνάρτησης εκφράζεται εύκολα ως: $\frac{d\sigma(y)}{dy} = \frac{e^{-y}}{(1+e^{-y})^2} = \sigma(y) \cdot (1 - \sigma(y))$. Ο κανόνας κατάβασης κλίσης κάνει χρήση αυτής της παραγώγου. Ορισμένες φορές χρησιμοποιούνται και άλλες μορφές της σιγμοειδούς συνάρτησης, όπως: $\sigma(y) = \frac{1}{1+e^{-ky}}$, με k μια θετική σταθερά που καθορίζει την κλίση του κατωφλίου.



Σχήμα 4-7. Η σιγμοειδής μονάδα

4.2.3.8 Ο αλγόριθμος Backpropagation

Ο αλγόριθμος Backpropagation μαθαίνει τα βάρη ενός πολυστρωματικού δικτύου, με καθορισμένο σύνολο μονάδων και διασυνδέσεων. Χρησιμοποιεί τη μέθοδο κατάβασης κλίσης με στόχο την ελαχιστοποίηση του τετραγωνικού σφάλματος ανάμεσα στις τιμές-στόχους και στις εξόδους του νευρωνικού δικτύου.

Λόγω της χρήσης πολλαπλών μονάδων εξόδου, το σφάλμα E ορίζεται επί όλων αυτών των μονάδων ως:

$$E(\vec{w}) \equiv \frac{1}{2} \sum_{d \in D} \sum_{k \in \text{outputs}} (t_{kd} - o_{kd})^2$$

όπου $outputs$ το σύνολο των μονάδων εξόδου του δικτύου και t_{kd} , o_{kd} οι τιμές-στόχοι και οι τιμές εξόδου, αντίστοιχα, που σχετίζονται με τη μονάδα εξόδου k και το παράδειγμα εκπαίδευσης d .

Το πρόβλημα που καλείται να αντιμετωπίσει ο αλγόριθμος Backpropagation είναι η αναζήτηση σε ένα μεγάλο χώρο υποθέσεων, που ορίζεται από το σύνολο των δυνατών τιμών των βαρών για όλες τις μονάδες του δικτύου. Η μέθοδος κατάβασης κλίσης χρησιμοποιείται για την εύρεση μιας υπόθεσης που ελαχιστοποιεί το σφάλμα E . Μια σημαντική διαφορά στην περίπτωση των πολυστρωματικών δικτύων είναι η δυνατότητα ύπαρξης πολλών τοπικών ελαχίστων στην επιφάνεια σφάλματος, σε αντίθεση με τα νευρωνικά δίκτυα μονού στρώματος. Παρόλα αυτά, όμως, ο αλγόριθμος Backpropagation έχει παρουσιάσει εξαιρετικά αποτελέσματα σε πολλές πραγματικές εφαρμογές [62].

Η αλληλουχία βημάτων του αλγόριθμου Backpropagation σε δίκτυο ευθείας τροφοδότησης με δύο στρώματα σιγμοειδών μονάδων παρουσιάζεται παρακάτω. Υποτίθεται ότι όλες οι μονάδες του δικτύου συνδέονται με όλες τις μονάδες του επόμενου στρώματος.

Backpropagation(trainingExamples, η , n_{in} , n_{out} , n_{hidden})

Κάθε παράδειγμα εκπαίδευσης *trainingExample* είναι ένα ζεύγος της μορφής (\vec{x}, \vec{t}) , όπου \vec{x} το διάνυσμα των τιμών εισόδου του δικτύου, και \vec{t} το διάνυσμα των τιμών-στόχων. Επίσης, η είναι ο ρυθμός μάθησης, n_{in} ο αριθμός εισόδων του δικτύου, n_{hidden} ο αριθμός κόμβων στο κρυφό στρώμα, και n_{out} ο αριθμός των μονάδων εξόδου. Η είσοδος από τη μονάδα i στη μονάδα j συμβολίζεται ως x_{ji} , και το αντίστοιχο βάρος ως w_{ji} .

Ο αλγόριθμος έχει ως εξής:

- Δημιούργησε ένα δίκτυο ευθείας τροφοδότησης με n_{in} εισόδους, n_{hidden} κρυφές μονάδες και n_{out} μονάδες εξόδου.
- Αρχικοποίησε όλα τα βάρη του δικτύου με τυχαίους μικρούς αριθμούς (π.χ., ανάμεσα στο 0.05 και στο 0.5).
- Μέχρι να ικανοποιηθεί η συνθήκη τερματισμού, Κάνε
 - Για κάθε ζεύγος (\vec{x}, \vec{t}) των *trainingExamples*, Κάνε
Μετάδωσε την είσοδο ευθεία «προς τα μπρος» στο δίκτυο:

1. Δώσε ως είσοδο το στιγμιότυπο \vec{x} στο δίκτυο και Υπολόγισε την έξοδο o_u κάθε μονάδας u του δικτύου.

Μετάδωσε τα σφάλματα «προς τα πίσω» στο δίκτυο:

2. Για κάθε μονάδα εξόδου k , Υπολόγισε τον όρο σφάλματος δ_k : $\delta_k \leftarrow o_k(1 - o_k)(t_k - o_k)$
3. Για κάθε κρυφή μονάδα h , Υπολόγισε τον όρο σφάλματος δ_h : $\delta_h \leftarrow o_h(1 - o_h) \sum_{k \in \text{outputs}} w_{kh} \delta_k$
4. Ενημέρωσε την τιμή κάθε βάρους w_{ji} : $w_{ji} \leftarrow w_{ji} + \Delta w_{ji}$, όπου $\Delta w_{ji} = \eta \delta_j x_{ji}$

Όπως γίνεται εμφανές, ο αλγόριθμος ξεκινά κατασκευάζοντας ένα δίκτυο με τον επιθυμητό αριθμό κρυφών μονάδων και μονάδων εξόδου και αρχικοποιώντας όλα τα βάρη του δικτύου με τυχαίους μικρούς αριθμούς. Δεδομένης της σταθερής δικτυακής δομής, ο κύριος βρόχος του αλγορίθμου επαναλαμβάνεται, στη συνέχεια, για όλα τα παραδείγματα εκπαίδευσης. Ο αλγόριθμος εισάγει κάθε τέτοιο παράδειγμα στο δίκτυο, υπολογίζει το σφάλμα της δικτυακής εξόδου για αυτό το παράδειγμα, υπολογίζει την παράγωγο με βάση το προαναφερθέν σφάλμα και, τέλος, ενημερώνει κατάλληλα τις τιμές όλων των βαρών του δικτύου. Αυτό το βήμα κατάβασης παραγωγού επαναλαμβάνεται, συνήθως, αρκετές εκατοντάδες φορές, χρησιμοποιώντας πάντα τα ίδια παραδείγματα εκπαίδευσης, μέχρι το δίκτυο να προσαρμοστεί σε αυτά με αρκετά καλό τρόπο.

Ο κανόνας κατάβασης κλίσης για την ενημέρωση των βαρών είναι παρόμοιος με τον κανόνα δέλτα που αναφέρθηκε στην περιγραφή μάθησης των perceptrons. Με παρόμοιο τρόπο, τροποποιεί κάθε βάρος ανάλογα με το ρυθμό μάθησης η , την τιμή εισόδου x_{ji} στην οποία εφαρμόζεται αυτό το βάρος, και το σφάλμα στην έξοδο της μονάδας. Η μόνη διαφορά είναι ότι το σφάλμα $(t - o)$ του κανόνα δέλτα δίνει τη θέση του σε έναν πιο σύνθετο όρο σφάλματος, το δ_j . Η ακριβής μορφή του δ_j προκύπτει με τρόπο που θα εξεταστεί σε επόμενη παράγραφο. Ο όρος σφάλματος των κρυφών μονάδων δ_h έχει παρόμοια μορφή. Παρόλα αυτά, καθώς τα παραδείγματα εκπαίδευσης παρέχουν τιμές στόχους t_k μόνο για τις εξόδους του δικτύου, δεν υπάρχουν τιμές-στόχοι για απευθείας σύγκριση των εξόδων των κρυφών μονάδων. Αντίθετα, ο όρος σφάλματος για κάθε κρυφή μονάδα h υπολογίζεται αθροίζοντας όλους τους όρους σφάλματος δ_k για κάθε μονάδα εισόδου που επηρεάζεται από το h ,

και σταθμίζοντας κάθε έναν από τους όρους δ_k με w_{kh} , δηλαδή με το βάρος από την κρυφή μονάδα h στη μονάδα εξόδου k . Το βάρος αυτό αντανακλά το βαθμό στον οποίο η κρυφή μονάδα h ευθύνεται για το σφάλμα της μονάδας εξόδου k .

Ο αλγόριθμος που παρουσιάστηκε παραπάνω ενημερώνει τα βάρη αυξητικά, ακολουθώντας την εισαγωγή κάθε παραδείγματος εκπαίδευσης. Αυτός ο τρόπος αντιστοιχεί σε μια στοχαστική προσέγγιση της κατάβασης κλίσης. Η πραγματική κλίση του E υπολογίζεται με άθροιση όλων των τιμών $\delta_j x_{ji}$ πριν την τροποποίηση των τιμών των βαρών.

Μια ποικιλία συνθηκών τερματισμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λήξη της εκτέλεσης του αλγορίθμου. Μια επιλογή θα ήταν ο τερματισμός μετά τη συμπλήρωση συγκεκριμένου αριθμού επαναλήψεων, ή ο τερματισμός όταν το σφάλμα λάβει τιμή μικρότερη ενός προκαθορισμένου κατωφλίου. Το κριτήριο τερματισμού αποτελεί μια σημαντική παράμετρο του συστήματος, καθώς λίγες επαναλήψεις μπορεί να οδηγήσουν σε μη ικανοποιητική μείωση του σφάλματος, ενώ, αντίθετα, πολλές επαναλήψεις μπορεί να προκαλέσουν υπερβολική προσαρμογή στα δεδομένα.

Προσθήκη ορμής (momentum). Καθώς ο αλγόριθμος Backpropagation είναι ευρέως διαδεδομένος, έχουν αναπτυχθεί, επίσης, αρκετές παραλλαγές του. Η πιο γνωστή από αυτές είναι η τροποποίηση του κανόνα ενημέρωσης των βαρών $\Delta w_{ji} = \eta \delta_j x_{ji}$, έτσι ώστε η ενημέρωση που πραγματοποιείται στην n επανάληψη να εξαρτάται μερικώς από την ενημέρωση που έλαβε χώρα κατά την $(n - 1)$ επανάληψη, ως εξής:

$$\Delta w_{ji}(n) = \eta \delta_j x_{ji} + \alpha \Delta w_{ji}(n - 1)$$

όπου α , μια σταθερά που καλείται ορμή (momentum). Η σταθερά αυτή λαμβάνει τιμές στο διάστημα $[0,1)$. Διαισθητικά, η ορμή είναι η διατήρηση της τάσης μετακίνησης προς την κατεύθυνση μείωσης του σφάλματος. Έχει, επίσης, την ιδιότητα αύξησης του βήματος έρευνας σε περιοχές που η κλίση παραμένει αμετάβλητη, ώστε να επιταχυνθεί η σύγκλιση.

4.2.3.9 Μάθηση σε αυθαίρετα ακυκλικά δίκτυα

Ο αλγόριθμος Backpropagation που περιγράφηκε σε προηγούμενη παράγραφο εφαρμόζεται μόνο σε δίκτυα δύο στρωμάτων. Εντούτοις, εύκολα τροποποιείται ώστε να γενικευτεί σε δίκτυα ευθείας διάδοσης με αυθαίρετο αριθμό στρωμάτων. Ο

κανόνας ενημέρωσης των βαρών παραμένει ο ίδιος, ενώ η μόνη αλλαγή έγκειται στον υπολογισμό των όρων σφάλματος δ . Γενικά, η τιμή δ_r για τη μονάδα r στο στρώμα m υπολογίζεται από τις τιμές δ στο στρώμα $m - 1$ ως εξής:

$$\delta_r = o_r(1 - o_r) \sum_{s \in \text{στρώμα}(m+1)} w_{sr} \delta_s$$

Είναι εξίσου εύκολη η γενίκευση του αλγορίθμου σε οποιονδήποτε κατευθυνόμενο ακυκλικό γράφο, ανεξάρτητα από το αν οι μονάδες του δικτύου είναι δομημένες σε ομοιόμορφα στρώματα, όπως έχει υποτεθεί μέχρι τώρα. Σε αυτήν την περίπτωση, ο κανόνας υπολογισμού του όρου σφάλματος δ_r μιας οποιασδήποτε εσωτερικής μονάδας γίνεται:

$$\delta_r = o_r(1 - o_r) \sum_{s \in \text{Downstream}(r)} w_{sr} \delta_s$$

όπου $\text{Downstream}(r)$ το σύνολο των μονάδων οι εισοδοι των οποίων περιλαμβάνουν την έξοδο της μονάδας r .

Παραγωγή του κανόνα Backpropagation. Το δοθέν πρόβλημα είναι η παραγωγή του στοχαστικού κανόνα κατάβασης κλίσης που υλοποιήθηκε στον αλγόριθμο Backpropagation. Όπως προαναφέρθηκε, η στοχαστική κατάβαση κλίσης περιλαμβάνει την εκτέλεση επαναλήψεων επί των παραδειγμάτων εκπαίδευσης, ενός παραδείγματος σε κάθε βήμα, με μείωση της κλίσης του σφάλματος E_d που αντιστοιχεί στο παράδειγμα d . Έτσι, λοιπόν, για κάθε παράδειγμα εκπαίδευσης d , κάθε βάρος w_{ji} ενημερώνεται με προσθήκη σε αυτό του όρου Δw_{ji} :

$$\Delta w_{ji} = -\eta \frac{\partial E_d}{\partial w_{ji}}$$

Ο όρος E_d είναι το σφάλμα στο παράδειγμα εκπαίδευσης d , που έχει αθροιστεί επί όλων των εισόδων του νευρωνικού δικτύου, δηλαδή:

$$E(\vec{w}) \equiv \frac{1}{2} \sum_{k \in \text{outputs}} (t_k - o_k)^2$$

Χρησιμοποιώντας τους παρακάτω συμβολισμούς:

- x_{ji} = η i -στη είσοδος στη μονάδα j
- w_{ji} = το βάρος που σχετίζεται με την i -στη είσοδος στη μονάδα j
- $net_j = \sum_i w_{ji} x_{ji}$, το σταθμισμένο άθροισμα των εισόδων στη μονάδα j
- o_j = η έξοδος της μονάδας j
- t_j = η έξοδος-στόχος για τη μονάδα j

- $\sigma = \eta$ σιγμοειδής συνάρτηση
- *outputs* = το σύνολο των μονάδων του τελευταίου στρώματος
- *Downstream(j)* = το σύνολο των μονάδων των οποίων οι άμεσοι είσοδοι περιλαμβάνουν την έξοδο της μονάδας j

παρατίθενται [9] οι ακόλουθοι κανόνες για την εκπαίδευση των βαρών:

- Για τις μονάδες εξόδου, $\Delta w_{ji} = -\eta \frac{\partial E_d}{\partial w_{ji}} = \eta(t_j - o_j)o_j(1 - o_j)x_{ji}$
- Για τις κρυφές μονάδες, $\Delta w_{ji} = \eta o_j(1 - o_j) \sum_{k \in \text{Downstream}(j)} \delta_j w_{kj}$

4.2.3.10 Σύνοψη χαρακτηριστικών μάθησης νευρωνικών δικτύων

Τα κυριότερα σημεία της λειτουργίας των νευρωνικών δικτύων, ως μεθόδου μηχανικής μάθησης, μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- Η μάθηση τεχνητών νευρωνικών δικτύων παρέχει μια πρακτική μέθοδο μάθησης συναρτήσεων πραγματικών ή διανυσματικών τιμών βάσει γνωρισμάτων διακριτών ή συνεχών τιμών. Η μέθοδος αυτή αποδεικνύεται αξιόπιστη ακόμα και στην περίπτωση δεδομένων με θόρυβο. Ο αλγόριθμος Backpropagation είναι ο πιο διαδεδομένος αλγόριθμος μάθησης νευρωνικών δικτύων και έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε μια ποικιλία καθηκόντων μάθησης, όπως η αναγνώριση γραφής, προσωπικού λόγου, προσώπων και πολλά άλλα.
- Ο χώρος υποθέσεων που θεωρείται από τον αλγόριθμο Backpropagation είναι ο χώρος όλων των συναρτήσεων που μπορούν να αναπαρασταθούν με την ανάθεση βαρών σε δεδομένη, σταθερή δομή μονάδων και διασυνδέσεων μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα, ο χώρος υποθέσεων είναι ένας Ευκλείδειος χώρος n διαστάσεων, όπου n τα βάρη του δικτύου. Ο χώρος αυτός είναι συνεχής, σε αντίθεση με το χώρο υποθέσεων της μάθησης δέντρων αποφάσεων που αναφέρθηκε σε προηγούμενο τμήμα. Το γεγονός ότι ο χώρος υποθέσεων είναι συνεχής, σε συνδυασμό με το ότι το σφάλμα E είναι παραγωγίσιμο ως προς τις συνεχείς μεταβλητές των υποθέσεων, οδηγεί σε μια καλά ορισμένη κλίση σφάλματος, η οποία παρέχει μια δομή χρήσιμη στην αναζήτηση της βέλτιστης υπόθεσης. Η μέθοδος κατάβασης κλίσης συγκλίνει σε ένα τοπικό ελάχιστο του σφάλματος εκπαίδευσης, συναρτήσει των βαρών του τεχνητού νευρωνικού δικτύου [63]-[64].

- Η υπερβολική προσαρμογή στα δεδομένα είναι ένα σημαντικό ζήτημα που εγείρεται στη μάθηση νευρωνικών δικτύων. Οδηγεί σε χαμηλό βαθμό γενίκευσης των δικτύων σε νέα δεδομένα παρά την εξαιρετική συμπεριφορά τους επί των δεδομένων εκπαίδευσης. Διάφοροι μέθοδοι [65]-[66] έχουν προταθεί για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος.
- Αν και ο αλγόριθμος Backpropagation είναι ο πλέον διαδεδομένος για τη μάθηση νευρωνικών δικτύων, ένα πλήθος άλλων αλγορίθμων, στοχευμένων σε εξειδικευμένα καθήκοντα, έχει αναπτυχθεί [69]-[70].

4.2.4 Μπεϋζιανά δίκτυα

4.2.4.1 Γενικά

Οι μέθοδοι μπεϋζιανής μάθησης αποτελούν σημαντικό κομμάτι της μηχανικής μάθησης για τους εξής λόγους:

- Οι μπεϋζιανοί αλγόριθμοι μάθησης, για τον υπολογισμό ρητών πιθανοτήτων των υποθέσεων, παρουσιάζουν εξαιρετικές επιδόσεις σε συγκεκριμένους τύπους προβλημάτων μάθησης και, συχνά, ξεπερνούν τις επιδόσεις άλλων μεθόδων μάθησης [76].
- Οι μπεϋζιανές μέθοδοι προσφέρουν μια χρήσιμη οπτική για την κατανόηση πολλών αλγορίθμων μάθησης, που μπορεί να μη σχετίζονται άμεσα με τον υπολογισμό πιθανοτήτων, όπως είναι οι μέθοδοι των δέντρων αποφάσεων και των νευρωνικών δικτύων, που περιγράφηκαν σε προηγούμενες παραγράφους.

Οι μέθοδοι μπεϋζιανής μάθησης χαρακτηρίζονται, μεταξύ άλλων, από τα εξής:

- Κάθε παρατηρούμενο παράδειγμα εκπαίδευσης μπορεί, αυξητικά, να μειώσει ή να αυξήσει την εκτιμώμενη πιθανότητα ορθότητας μιας υπόθεσης. Η συμπεριφορά αυτή παρέχει μια περισσότερο ευέλικτη προσέγγιση μάθησης από την αντίστοιχη συμπεριφορά αλγορίθμων που αποκλείουν εντελώς μια υπόθεση που δεν είναι συνεπής με τα παραδείγματα εκπαίδευσης.
- Προγενέστερη γνώση μπορεί να συνδυαστεί με δεδομένα παρατήρησης, με στόχο τον καθορισμό της τελικής πιθανότητας της υπόθεσης. Στην μπεϋζιανή μάθηση, η προγενέστερη γνώση αποκτάται μέσω i) μιας προγενέστερης πιθανότητας για κάθε υποψήφια υπόθεση και ii) μια κατανομής πιθανότητας μέσω δεδομένων παρατήρησης για κάθε υποψήφια υπόθεση.

- Οι μπεϋζιανές μέθοδοι μπορούν να υιοθετήσουν υποθέσεις που υποστηρίζουν πιθανοτικές προβλέψεις.
- Η κατηγοριοποίηση νέων στιγμιότυπων είναι δυνατή με συνδυασμό των προβλέψεων πολλαπλών υποθέσεων, σταθμισμένων με τις πιθανότητες τους.
- Ακόμα και στις περιπτώσεις που αποδεικνύονται υπολογιστικά ακατάλληλες, οι μπεϋζιανές μέθοδοι μάθησης παρέχουν ένα μέτρο της λήψης βέλτιστης απόφασης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από άλλες μεθόδους.
- Μια πρακτική δυσκολία της εφαρμογής μπεϋζιανών μεθόδων είναι η απαίτηση αρχικής γνώσης πολλών πιθανοτήτων. Η γνώση αυτή, αν δεν διατίθεται εκ των προτέρων, μπορεί να βασιστεί σε προηγούμενα διαθέσιμα δεδομένα και υποθέσεις για την υποκείμενη κατανομή των πιθανοτήτων. Μια δεύτερη πρακτική δυσκολία είναι το σημαντικό υπολογιστικό κόστος που απαιτείται για τον καθορισμό της μπεϋζιανής βέλτιστης υπόθεσης. Το κόστος αυτό, συνήθως, αυξάνεται γραμμικά με τον αριθμό των υποψήφιων υποθέσεων.

4.2.4.2 Θεώρημα Bayes

Όπως έχει ήδη ειπωθεί στις παραγράφους που προηγήθηκαν, στόχος μιας μεθόδου μηχανικής μάθησης είναι ο προσδιορισμός της βέλτιστης υπόθεσης από ένα χώρο υποθέσεων H , με δεδομένο ένα σύνολο παραδειγμάτων εκπαίδευσης D . Με όρους πιθανοτήτων, η παραπάνω αναζήτηση μπορεί να μεταφραστεί ως αναζήτηση της υπόθεσης με τη μεγαλύτερη πιθανότητα, με δεδομένα το σύνολο παραδειγμάτων εκπαίδευσης D και τυχόν αρχικής γνώσης για προγενέστερες πιθανότητες διαφόρων υποθέσεων του χώρου H [77]. Το θεώρημα Bayes παρέχει ακριβώς αυτή τη δυνατότητα υπολογισμού της πιθανότητας μιας υπόθεσης βάσει της προγενέστερης πιθανότητάς της, των πιθανοτήτων παρατήρησης διαφόρων δεδομένων, δοθείσης της υπόθεσης, και, τέλος, των ιδίων των δεδομένων παρατήρησης [77]-[78]. Στις παραγράφους που ακολουθούν, θα γίνεται χρήση των κάτωθι συμβολισμών:

- $P(h)$ = η αρχική πιθανότητα να ισχύει η υπόθεση h , πριν την παρατήρηση κάποιων δεδομένων. Η πιθανότητα αυτή συχνά αναφέρεται ως *προγενέστερη ή εκ των προτέρων πιθανότητα (prior probability)* της υπόθεσης h και αντανakλά τυχόν παρασκευιακή γνώση για την πιθανότητα η υπόθεση h να

είναι ορθή. Αν δεν υπάρχει καθόλου γνώση, τότε γίνεται απλά ανάθεση της ίδιας αρχικής πιθανότητας σε κάθε υποψήφια υπόθεση.

- $P(D)$ = η εκ των προτέρων πιθανότητα να παρατηρηθούν τα δεδομένα D , χωρίς καμία γνώση σχετικά με την πιο ορθή υπόθεση.
- $P(D|h)$ = η πιθανότητα να παρατηρηθούν τα δεδομένα D , αν αληθεύει η υπόθεση h . (Γενικά ο συμβολισμός $P(x|y)$ χρησιμοποιείται για να δηλώσει την πιθανότητα του x δεδομένου του y).
- $P(h|D)$ = η πιθανότητα να ισχύει η υπόθεση h δεδομένων των παρατηρούμενων παραδειγμάτων D . Η πιθανότητα αυτή, που είναι και το ζητούμενο των μεθόδων μηχανικής μάθησης, καλείται *εκ των υστέρων πιθανότητα (posterior probability)* της υπόθεσης h , δεδομένου ότι έχουν παρατηρηθεί τα δεδομένα D . Η πιθανότητα αυτή αντανακλά την επίδραση των παρατηρούμενων δεδομένων, σε αντίθεση με την πιθανότητα $P(h)$, η οποία είναι ανεξάρτητη αυτών.

Το θεώρημα Bayes αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο των μπεϋζιανών μεθόδων μάθησης, καθώς παρέχει έναν τρόπο υπολογισμού της πιθανότητας $P(h|D)$, από την εκ των προτέρων πιθανότητα $P(h)$ και τις πιθανότητες $P(D)$ και $P(D|h)$. Εκφράζεται ως:

$$P(h|D) = \frac{P(D|h) P(h)}{P(D)}$$

Όπως μπορεί να διαφανεί, σύμφωνα με το θεώρημα Bayes, η πιθανότητα $P(h|D)$ αυξάνεται καθώς αυξάνονται οι πιθανότητες $P(h)$ και $P(D|h)$, κάτι που επαληθεύεται και διαισθητικά. Αντίθετα, η πιθανότητα $P(h|D)$ μειώνεται με αύξηση της πιθανότητας $P(D)$, καθώς όσο πιο πιθανό είναι ότι τα δεδομένα D θα παρατηρηθούν ανεξάρτητα από την υπόθεση h , τόσο μικρότερη στήριξη παρέχει στην υπόθεση h η παρατήρησή τους.

Το θεώρημα Bayes, όπως εκφράζεται από την παραπάνω σχέση, αφορά μία υπόθεση h και ένα σύνολο αποδείξεων D . Μπορεί εύκολα να γενικευτεί για ένα στοιχείο D και πολλές (m το πλήθος) – εξαντλητικές και αμοιβαία αποκλειόμενες – υποθέσεις (h_1, h_2, \dots, h_m) :

$$P(h_i | D) = \frac{P(D | h_i) \cdot P(h_i)}{\sum_{k=1}^m P(D | h_k) \cdot P(h_k)}$$

Γενίκευση μπορεί, επίσης, να γίνει για n στοιχεία (D_1, D_2, \dots, D_n) και m υποθέσεις (h_1, h_2, \dots, h_m) , με την προϋπόθεση ότι και τα δύο αυτά σύνολα αφορούν εξαντλητικά και αμοιβαίως αποκλειόμενα ενδεχόμενα.

$$P(h_i | D_1 D_2 \dots D_n) = \frac{P(D_1 D_2 \dots D_n | h_i) \cdot P(h_i)}{\sum_{k=1}^m P(D_1 D_2 \dots D_n | h_k) \cdot P(h_k)}$$

Ο παραπάνω τύπος δεν είναι πρακτικά εφαρμόσιμος, καθώς απαιτεί τη γνώση των υπό συνθήκη πιθανοτήτων, για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των στοιχείων για όλες τις υποθέσεις. Εάν, όμως, θεωρηθεί επιπλέον ότι τα D_1, D_2, \dots, D_n είναι υπό συνθήκη ανεξάρτητα δεδομένης μιας οποιασδήποτε υπόθεσης h_i , τότε η παραπάνω εξίσωση γράφεται:

$$P(h_i | D_1 D_2 \dots D_n) = \frac{P(D_1 | h_i) \cdot P(D_2 | h_i) \cdot \dots \cdot P(D_n | h_i) \cdot P(h_i)}{\sum_{k=1}^m P(D_1 | h_k) \cdot P(D_2 | h_k) \cdot \dots \cdot P(D_n | h_k) \cdot P(h_k)}$$

Η παραπάνω απλούστερη μορφή της εξίσωσης εκφράζει και το πλέον συνηθισμένο σενάριο σε ένα πρόβλημα μάθησης, όπου θεωρείται ένα σύνολο υποψηφίων υποθέσεων H και αναζητείται η πιο πιθανή υπόθεση $h \in H$, με δεδομένο το σύνολο των δεδομένων παρατήρησης D . Αναζητείται, δηλαδή, η μέγιστη εκ των υστέρων υπόθεση (maximum a posteriori – MAP), h_{MAP} , για την οποία ισχύει:

$$h_{\text{MAP}} \equiv \operatorname{argmax} P(h|D) = \operatorname{argmax}_{h \in H} \frac{P(D|h)P(h)}{P(D)} = \operatorname{argmax}_{h \in H} P(D|h) P(h)$$

Στο τελευταίο βήμα έγινε απαλοιφή του όρου $P(D)$, καθώς είναι μια σταθερά, ανεξάρτητη της υπόθεσης h .

Σε ορισμένες περιπτώσεις, κάθε υπόθεση στο χώρο H είναι εξίσου πιθανή αρχικά με κάθε άλλη υπόθεση του ίδιου χώρου, δηλαδή $P(h_i) = P(h_j)$, $\forall h_i, h_j \in H$. Στην περίπτωση αυτή, απαλείφεται και ο όρος $P(h)$ της εξίσωσης, και κάθε πιθανότητα που μεγιστοποιεί τον όρο $P(D|h)$ καλείται «υπόθεση μέγιστης πιθανότητας» (maximum likelihood probability – ML) και ορίζεται ως: $h_{\text{ML}} \equiv \operatorname{argmax}_{h \in H} P(h|D)$.

Προκειμένου να υπάρξει συνέπεια με τις έννοιες και τους συμβολισμούς που χρησιμοποιήθηκαν στις μεθόδους μάθησης δέντρων αποφάσεων και τεχνητών νευρωνικών δικτύων, το θεώρημα Bayes εφαρμόζεται χρησιμοποιώντας τους ίδιους συμβολισμούς, με D να αναπαρίσταται το σύνολο των παραδειγμάτων εκπαίδευσης και με H το σύνολο των υποψηφίων συναρτήσεων-στόχων.

Ο Πίνακας 4-2, που ακολουθεί, συνοψίζει τους κανόνες που θα φανούν χρήσιμοι στα επόμενα.

Πίνακας 4-2. Βασικοί κανόνες υπολογισμού πιθανοτήτων

Κανόνας	Τύπος
Κανόνας γινομένου: πιθανότητα σύζευξης δύο ενδεχομένων (γεγονότων) A, B	$P(A \cap B) = P(A B)P(B) = P(B A)P(A)$
Κανόνας αθροίσματος: πιθανότητα διάζευξης δύο ενδεχομένων (γεγονότων) A, B	$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$
Θεώρημα Bayes: η εκ των υστέρων πιθανότητα του h , δεδομένου του D	$P(h D) = \frac{P(D h) P(h)}{P(D)}$
Θεώρημα ολικής πιθανότητας: Αν τα ενδεχόμενα A_1, \dots, A_n είναι αμοιβαίως αποκλειόμενα με $\sum_{i=1}^n P(A_i) = 1$, τότε	$P(B) = \sum_{i=1}^n P(B A_i)P(A_i)$

Στο τμήμα που ακολουθεί, θα παρουσιαστεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής του θεωρήματος Bayes, σε ένα πρόβλημα ιατρικής διάγνωσης με δύο πιθανές υποθέσεις:

- Ο ασθενής πάσχει από μια μορφή καρκίνου
- Ο ασθενής δεν πάσχει από αυτή τη μορφή καρκίνου

Το εργαστηριακό τεστ που διενεργείται έχει δύο πιθανά αποτελέσματα:

- Θετικό στην ασθένεια, \oplus
- Αρνητικό στην ασθένεια, \ominus

Από προγενέστερη γνώση, είναι αληθές ότι μόνο ένα ποσοστό ίσο με 0.008, επί του συνολικού πληθυσμού, παρουσιάζει αυτόν τον τύπο ασθένειας. Επιπλέον, ο εργαστηριακός έλεγχος είναι ένας ατελής δείκτης ύπαρξης της. Συγκεκριμένα, το τεστ επιστρέφει ένα ορθό θετικό αποτέλεσμα στο 98% των περιπτώσεων που η ασθένεια είναι παρούσα, και ένα ορθό αρνητικό αποτέλεσμα σε μόλις 87% των περιπτώσεων στις οποίες η ασθένεια δεν είναι παρούσα. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις, ο εργαστηριακός έλεγχος καταλήγει στο αντίθετο αποτέλεσμα. Τα προαναφερθέντα

στοιχεία συνοψίζονται, με μορφή πιθανοτήτων, στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 4-3).

Πίνακας 4-3. Δοθείσες πιθανότητες του προβλήματος ιατρικής διάγνωσης

Πιθανότητα	Τιμή
$P(\text{cancer})$	0.008
$P(\neg \text{cancer})$	0.992
$P(\oplus \text{cancer})$	0.98
$P(\ominus \text{cancer})$	0.02
$P(\oplus \neg \text{cancer})$	0.03
$P(\ominus \neg \text{cancer})$	0.97

Έστω, λοιπόν, ότι ο εργαστηριακός έλεγχος επιστρέφει θετικό αποτέλεσμα ύπαρξης της ασθένειας για έναν ασθενή. Αναζητείται, πλέον, η πιθανότητα αυτός ο ασθενής να πάσχει όντως από αυτήν τη μορφή καρκίνου. Για το σκοπό αυτό, γίνεται σύγκριση των πιθανοτήτων $P(\text{cancer} | \oplus)$ και $P(\neg \text{cancer} | \oplus)$. Χάρη στο θεώρημα του Bayes, αρκεί να συγκριθούν μεταξύ τους οι παρακάτω όροι:

$$P(\oplus | \text{cancer})P(\text{cancer}) = 0.98 \cdot 0.008 = 0.0078$$

$$P(\oplus | \neg \text{cancer})P(\neg \text{cancer}) = 0.03 \cdot 0.992 = 0.0298$$

Η πιο πιθανή υπόθεση, λοιπόν, είναι ο ασθενής να μην έχει αυτόν τον τύπο καρκίνου, αν και ο εργαστηριακός έλεγχος αποφάνθηκε υπέρ του αντιθέτου. Η ακριβής τιμή των εκ των υστέρων πιθανοτήτων μπορεί να υπολογιστεί μέσω της απαίτησης το άθροισμα τους να ισούται με 1. Συνεπώς, ακόμα και αν η τιμή $P(\oplus)$ δεν είναι γνωστή στα πλαίσια του προβλήματος, μπορεί να προσδιοριστεί από την προαναφερθείσα απαίτηση.

Συμπερασματικά, η μπεϋζιανή επαγωγή εξαρτάται άμεσα από τις εκ των προτέρων πιθανότητες, που πρέπει να είναι γνωστές για απευθείας εφαρμογή της μεθόδου. Οι εξεταζόμενες υποθέσεις δε γίνονται ολοκληρωτικά αποδεκτές ή απορριπτέες, αλλά, αντίθετα, καθίστανται περισσότερο ή λιγότερο πιθανές με βάση τα δεδομένα παρατήρησης.

Μέχρι στιγμής, ό,τι έχει αναφερθεί σχετίζεται με την ερώτηση «Ποια είναι η πιο πιθανή υπόθεση με βάση τα δεδομένα εκπαίδευσης;» Συνήθως, όμως, μεγαλύτερη

σημασία αποκτά η στενά συνδεδεμένη ερώτηση «Ποια είναι η πιο πιθανή κατηγοριοποίηση ενός νέου στιγμιότυπου με βάση τα δεδομένα εκπαίδευσης;». Αν και μια προφανής προσέγγιση θα ήταν ο προσδιορισμός της πιο πιθανής υπόθεσης βάσει αυτού του στιγμιότυπου, εντούτοις μια πιο αποδοτική θεώρηση θα ήταν η στάθμιση όλων των υποψήφιων υποθέσεων βάσει της πιθανότητας τους. Έστω, για παράδειγμα, οι εκ των προτέρων πιθανότητες τριών υποθέσεων που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Εκ των υστέρων πιθανότητα	Τιμή
$P(h_1 D)$	0.4
$P(h_2 D)$	0.3
$P(h_3 D)$	0.3

Έστω, τώρα, ένα νέο στιγμιότυπο x , το οποίο κατηγοριοποιείται ως θετικό από την υπόθεση h_1 , και ως αρνητικό από τις υποθέσεις h_2 και h_3 . Η υπόθεση με τη μεγαλύτερη πιθανότητα είναι η υπόθεση h_1 . Το αποτέλεσμα, όμως, δεν κατηγοριοποιείται ως θετικό, καθώς λαμβάνοντας υπόψη τις πιθανότητες όλων των υποθέσεων, η πιθανότητα το στιγμιότυπο x να είναι θετικό είναι 0.4, ενώ η πιθανότητα να είναι αρνητικό ισούται με 0.6.

Αν, επομένως, ένα στιγμιότυπο x μπορεί να λάβει οποιαδήποτε τιμή u_j από ένα σύνολο τιμών U , τότε η πιθανότητα $P(u_j|D)$ η ορθή κατηγοριοποίηση για το στιγμιότυπο αυτό να είναι η u_j ισούται με

$$P(u_j|D) = \sum_{h_i} P(u_j|h_i)P(h_i|D)$$

Επομένως, η βέλτιστη κατηγοριοποίηση ενός νέου στιγμιότυπου είναι η τιμή u_j για την οποία μεγιστοποιείται η πιθανότητα $P(u_j|D)$.

4.2.4.3 Μπεϋζιανά δίκτυα

Τα μπεϋζιανά δίκτυα (Bayesian belief networks) περιγράφουν την κατανομή πιθανότητας ενός συνόλου μεταβλητών, ορίζοντας ένα σύνολο παραδοχών

ανεξαρτησίας, καθώς και ένα σύνολο δεσμευμένων πιθανοτήτων. Επιτρέπουν τη δήλωση παραδοχών υπό συνθήκη ανεξαρτησίας που μπορεί να εφαρμοστεί και σε υποσύνολα των μεταβλητών. Τα μπεϋζιανά δίκτυα συγκεντρώνουν σημαντικό μερίδιο του ενδιαφέροντος της διεθνούς βιβλιογραφίας [79]-[80] και αποδεικνύονται χρήσιμα εργαλεία για την κωδικοποίηση, τη μάθηση και τη συλλογιστική επί πιθανοτικών σχέσεων. Οι εφαρμογές τους συναντώνται σε μια ποικιλία επιστημονικών πεδίων, όπως στην τεχνητή νοημοσύνη [76], στις ιατρικές διαγνώσεις [81]-[82] και αλλού.

Εν γένει, ένα μπεϋζιανό δίκτυο περιγράφει την κατανομή πιθανότητας ενός συνόλου μεταβλητών. Για παράδειγμα, έστω ένα αυθαίρετο σύνολο τυχαίων μεταβλητών X_1, \dots, X_n , όπου κάθε μεταβλητή X_i μπορεί να λάβει κάποια τιμή από το σύνολο $V(X_i)$. Ορίζεται ως από κοινού χώρος του συνόλου των μεταβλητών X το γινόμενο $V(X_1) \times V(X_2) \times \dots \times V(X_n)$. Έτσι, κάθε στοιχείο αντιστοιχεί σε μια εκ των δυνατών αναθέσεων τιμών του ενδεχομένου $\langle X_1, \dots, X_n \rangle$. Η κατανομή πιθανότητας σε αυτόν τον κοινό χώρο, αναφέρεται ως από κοινού κατανομή πιθανότητας, και καθορίζει την πιθανότητα καθενός στιγμιότυπου της μεταβλητής $\langle X_1, \dots, X_n \rangle$. Τα μπεϋζιανά δίκτυα περιγράφουν ακριβώς αυτήν την από κοινού κατανομή πιθανότητας.

Αναφέρθηκε στα προηγούμενα ότι τα μπεϋζιανά δίκτυα υποστηρίζουν τις παραδοχές υπό συνθήκη ανεξαρτησίας των μεταβλητών. Στο σημείο αυτό, θα ήταν χρήσιμος ο ορισμός αυτής της συνθήκης ανεξαρτησίας. Έστω, λοιπόν, τρία ενδεχόμενα A, B, C . Εάν $P(A|B) = P(A)$, τότε λέμε ότι τα ενδεχόμενα A και B είναι ανεξάρτητα. Εάν, $P(A, B|C) = P(A|C)$, τότε λέμε ότι τα A και B είναι υπό συνθήκη ανεξάρτητα, δεδομένου του C . Γενικεύοντας, ένα σύνολο μεταβλητών X_1, \dots, X_n θεωρείται υπό συνθήκη ανεξάρτητο ενός συνόλου μεταβλητών Y_1, \dots, Y_n , δεδομένου του συνόλου μεταβλητών Z_1, \dots, Z_n , όταν ισχύει:

$$P(X_1, \dots, X_n | Y_1, \dots, Y_n, Z_1, \dots, Z_n) = P(X_1, \dots, X_n | Z_1, \dots, Z_n)$$

Τα μπεϋζιανά δίκτυα, λοιπόν, αποτελούνται από τα εξής:

- Ένα σύνολο μεταβλητών (κάθε μια εκ των οποίων λαμβάνει ένα πεπερασμένο σύνολο διακριτών τιμών) και ένα σύνολο κατευθυνόμενων ακμών μεταξύ αυτών.

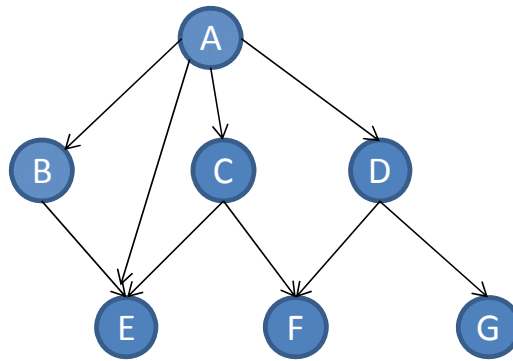
- Έναν πίνακα δεσμευμένης πιθανότητας (Conitional Probabilty Table - CPT) $P(A|B_1, B_2, \dots, B_n)$ για κάθε μεταβλητή A με 'γονείς' τις μεταβλητές B_1, B_2, \dots, B_n .

Έτσι, τα μπεϋζιανά δίκτυα αποτελούν κατευθυνόμενους μη-κυκλικούς γράφους (directed acyclic graphs), όπου κάθε κόμβος αναπαριστά μια τυχαία μεταβλητή. Οι ακμές του γράφου αναπαριστούν άμεσες σχέσεις εξάρτησης μεταξύ των συνδεδεμένων μεταβλητών, ενώ η ισχύς των εξαρτήσεων αυτών ποσοτικοποιείται από τις αντίστοιχες δεσμευμένες πιθανότητες. Στην πράξη, η δομή ενός μπεϋζιανού δικτύου μπορεί να οριστεί με την εξής εύκολη διαδικασία: αναθέτουμε μια κορυφή (κόμβο) σε κάθε μεταβλητή που μας ενδιαφέρει και, στη συνέχεια, σχεδιάζουμε βέλη προς κάθε κόμβο A_i από ένα επιλεγμένο σύνολο κορυφών $\text{Parents}(A_i)$, το οποίο περιλαμβάνει τις κορυφές που θεωρούνται άμεσες αιτίες του A_i (γονείς του A_i). Η ισχύς αυτών των άμεσων επιδράσεων ποσοτικοποιείται με την ανάθεση σε κάθε μεταβλητή A_i του πίνακα δεσμευμένης πιθανότητας $P(A_i|\text{parents}(A_i))$, που αναπαριστά τις υποκειμενικές εκτιμήσεις των δεσμευμένων πιθανοτήτων κάθε ενδεχομένου του A_i , με δεδομένο οποιονδήποτε συνδυασμό τιμών των $\text{parents}(A_i)$ του συνόλου γονέων (parent set) $\text{Parents}(A_i)$. Ο συνδυασμός αυτών των τοπικών εκτιμήσεων προσδιορίζει ένα πλήρες και συνεπές συνολικό μοντέλο, δηλαδή μια από κοινού συνάρτηση κατανομής πιθανότητας, στη βάση του οποίου μπορούν να απαντηθούν όλα τα πιθανολογικά ερωτήματα. Η συνολική από κοινού συνάρτηση κατανομής πιθανότητας των μεταβλητών A_1, \dots, A_n δίνεται από το γινόμενο:

$$P(A_1, A_2, \dots, A_n) = \prod_{i=1}^n P(A_i|\text{parents}(A_i))$$

Παραδείγματος χάριν, η κατανομή πιθανοτήτων που αντιστοιχεί στο γράφο που φαίνεται στο Σχήμα 4-8 δίνεται από τον τύπο:

$$P(A, B, C, D, E, F, G) = P(G|D) \cdot P(F|C, D) \cdot P(E|A, B, C) \cdot P(D|A) \cdot P(C|A) \cdot P(B|A) \cdot P(A)$$



Σχήμα 4-8. Γράφος μπεϋζιανού δικτύου

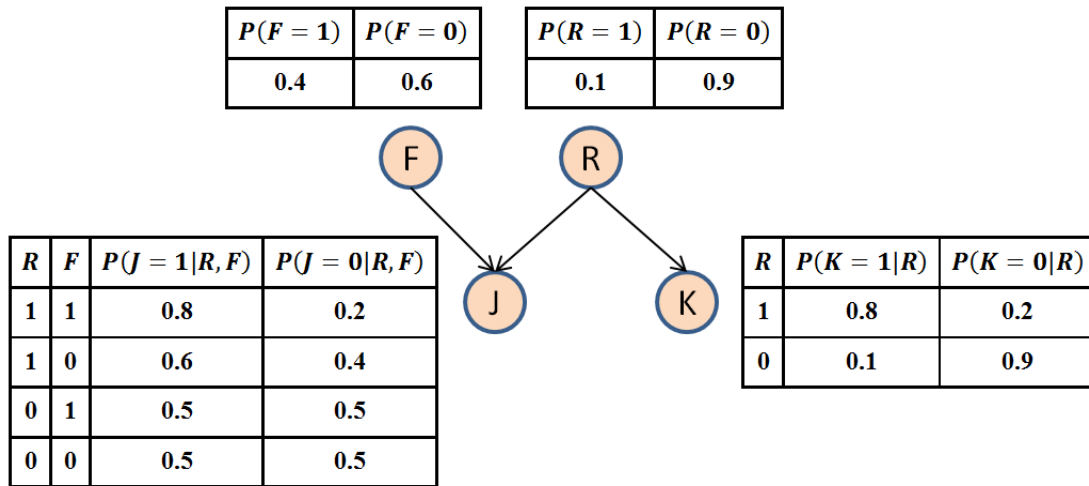
Στο τμήμα που ακολουθεί, θα παρουσιαστεί ένα παράδειγμα δημιουργίας και επίλυσης ενός μπεϋζιανού δικτύου. Έστω ότι η φοιτήτρια Τζένη καθυστέρησε στο εξαμηνιαίο διαγώνισμα. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στο ότι ο δρόμος είναι κλειστός, είτε στο ότι το ξυπνητήρι της Τζένης είναι χαλασμένο και δε χτύπησε. Έστω, επιπλέον, ότι και ο φοιτητής Κώστας είναι καθυστερημένος στο ίδιο διαγώνισμα. Η προσέλευση του Κώστα είναι γενικά εξαρτημένη από την προσέλευση της Τζένης, καθώς, αν η Τζένη καθυστέρησε, τότε ενδέχεται ο δρόμος να είναι κλειστός, άρα ενδέχεται και ο Κώστας να καθυστερήσει.

Οι μεταβλητές και τιμές που χρησιμοποιούνται για το συμβολισμό του προαναφερθέντος παραδείγματος παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 4-4):

Πίνακας 4-4. Λίστα μεταβλητών παραδείγματος μπεϋζιανού δικτύου

Μεταβλητή	Τιμή	Κατάσταση
J	1	Η Τζένη έχει καθυστερήσει
	0	Η Τζένη προσήλθε έγκαιρα
K	1	Ο Κώστας έχει καθυστερήσει
	0	Ο Κώστας προσήλθε έγκαιρα
R	1	Ο δρόμος είναι κλειστός
	0	Ο δρόμος δεν είναι κλειστός
F	1	Το ξυπνητήρι είναι χαλασμένο
	0	Το ξυπνητήρι δεν είναι χαλασμένο

Το μπεϋζιανό δίκτυο που αντιστοιχεί στις προαναφερθείσες εξαρτήσεις μεταβλητών απεικονίζεται στο Σχήμα 4-9. Στο σχήμα αυτό, παρουσιάζονται, επίσης, οι πίνακες δεσμευμένων πιθανοτήτων για κάθε μια από τις μεταβλητές.



Σχήμα 4-9. Παράδειγμα μπεϋζιανού δικτύου και πίνακες δεσμευμένων πιθανοτήτων αυτού

Η από κοινού συνάρτηση κατανομής πιθανότητας $P(R, F, J, K)$, υπολογίζεται σύμφωνα με τα προαναφερθείσα θεωρία ως: $P(R, F, J, K) = P(K|R) \cdot P(J|R, F) \cdot P(R) \cdot P(F)$. Οι πιθανές τιμές αυτής της συνάρτησης περιέχονται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 4-5). Ο πίνακας της από κοινού συνάρτησης πιθανότητας που εξετάζεται, αποτελείται από 16 εγγραφές και οι τιμές του έχουν άθροισμα ίσο με 1, δηλαδή ισχύει: $\sum_{R=\{0,1\}, F=\{0,1\}, J=\{0,1\}, K=\{0,1\}} P(R, F, J, K) = 1$.

Πίνακας 4-5. Πίνακας από κοινού συνάρτησης πιθανότητας

R	F	J	K	$P(R, F, J, K)$
1	1	1	1	0,0256
1	1	1	0	0,0064
1	1	0	1	0,0064
1	1	0	0	0,0016
1	0	1	1	0,0288
1	0	1	0	0,0072
1	0	0	1	0,0192
1	0	0	0	0,0048
0	1	1	1	0,0180

0	1	1	0	0,1620
0	1	0	1	0,0180
0	1	0	0	0,1620
0	0	1	1	0,0270
0	0	1	0	0,2430
0	0	0	1	0,0270
0	0	0	0	0,2430

Μέσω αυτού του πίνακα, μπορεί να υπολογιστεί, πλέον, οποιαδήποτε πιθανότητα, και το δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εξαγωγή συμπερασμάτων.

Για παράδειγμα, έστω ότι η Τζένη έχει καθυστερήσει. Ποια είναι η πιο πιθανή αιτία; Ο δρόμος είναι κλειστός ή δε λειτούργησε το ξυπνητήρι της;

- Για την πιθανότητα $P(R = 1|J = 1)$, ισχύει:

$$P(R = 1|J = 1) = \frac{P(R = 1, F, J = 1, K)}{P(J = 1)}$$

$$= \frac{\sum_{F=\{0,1\}, K=\{0,1\}} P(R = 1, F, J = 1, K)}{\sum_{R=\{0,1\}, F=\{0,1\}, K=\{0,1\}} P(R, F, J = 1, K)} = \frac{0.068}{0.518} = 0.131$$

- Για την πιθανότητα $P(F = 1|J = 1)$, ισχύει:

$$P(F = 1|J = 1) = \frac{P(R, F = 1, J = 1, K)}{P(J = 1)}$$

$$= \frac{\sum_{R=\{0,1\}, K=\{0,1\}} P(R, F = 1, J = 1, K)}{\sum_{R=\{0,1\}, F=\{0,1\}, K=\{0,1\}} P(R, F, J = 1, K)} = \frac{0.212}{0.518} = 0.409$$

Συνεπώς, η παρατήρηση καθυστέρησης της Τζένης ενισχύει τις υποθέσεις ότι ο δρόμος είναι κλειστός ή το ξυπνητήρι δε λειτούργησε. Η ενίσχυση αυτή, ως επαλήθευση του αποτελέσματός τους, αντανακλάται στην αύξηση των πιθανοτήτων τους σε σχέση με τις εκ των προτέρων πιθανότητές τους. Συγκεκριμένα, η πιθανότητα ο δρόμος να είναι κλειστός, κατόπιν της παρατήρησης καθυστέρησης της Τζένης, γίνεται 0.131, ενώ η πιθανότητα το ξυπνητήρι να είναι χαλασμένο γίνεται 0.409. Μέχρι στιγμής, οι δύο αιτίες «συναγωνίζονται» για την εξήγηση της παρατήρησης, με τη δεύτερη να αναδεικνύεται ως η πιο πιθανή.

Έστω, τώρα, ότι παρατηρείται ότι και ο Κώστας είναι καθυστερημένος. Ποια αναδεικνύεται, λοιπόν, ως πιο πιθανή αιτία, δεδομένων των δύο, πλέον, αυτών παρατηρήσεων;

- Για την πιθανότητα $P(R = 1|J = 1, K = 1)$, ισχύει:

$$P(R = 1|J = 1, K = 1) = \frac{P(R = 1, F, J = 1, K = 1)}{P(J = 1, K = 1)}$$

$$= \frac{\sum_{F=\{0,1\}} P(R = 1, F, J = 1, K = 1)}{\sum_{R=\{0,1\}, F=\{0,1\}} P(R, F, J = 1, K = 1)} = \frac{0.0544}{0.0994} = 0.547$$

- Για την πιθανότητα $P(F = 1|J = 1, K = 1)$, ισχύει:

$$P(F = 1|J = 1, K = 1) = \frac{P(R, F = 1, J = 1, K = 1)}{P(J = 1, K = 1)} = \frac{\sum_{R=\{0,1\}} P(R, F = 1, J = 1, K = 1)}{\sum_{R=\{0,1\}, F=\{0,1\}} P(R, F, J = 1, K = 1)} = \frac{0.0436}{0.0994} = 0.439$$

Είναι προφανές ότι το νέο δεδομένο παρατήρησης κατέστησε την πρώτη υπόθεση, αυτήν του κλειστού δρόμου, πιο πιθανή. Αφού, λοιπόν, η πρώτη υπόθεση εξηγεί τις δύο παρατηρήσεις, δε χρειάζεται πλέον η δεύτερη υπόθεση, η οποία αποκτά χαμηλότερη πιθανότητα. Στη στατιστική, το φαινόμενο αυτό αναφέρεται συχνά ως παράδοξο του Berkson [83] ή μεροληψία επιλογής (selection bias).

4.2.4.4 Μάθηση μπεϋζιανών δικτύων

Τα μπεϋζιανά δίκτυα, ως μια από τις πλέον διαδεδομένες μεθόδους μηχανικής μάθησης, έχουν ως απώτερο στόχο την ορθή κατάταξη ενός νέου στιγμιότυπου, βάσει της πρότερης εμπειρίας του συστήματος. Η εμπειρία αυτή αποκτάται, αρχικά, μέσω των παραδειγμάτων εκπαίδευσης, και ενισχύεται κατάλληλα όταν σημειώνεται μια νέα παρατήρηση. Η μάθηση ενός μπεϋζιανού δικτύου, δηλαδή η ενσωμάτωση της γνώσης που προσφέρουν τα δεδομένα εκπαίδευσης και παρατήρησης, υλοποιείται μέσω κατάλληλου μηχανισμού ενημέρωσης των τιμών των πινάκων δεσμευμένης πιθανότητας [84]. Η διαδικασία ενημέρωσης ποικίλλει, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε εφαρμογής. Μπορεί να είναι από στοιχειωδώς απλή, για παράδειγμα, αντικαθιστώντας ευθέως τις παλιές τιμές με τις νέες, έως εξαιρετικά πολύπλοκη, λαμβάνοντας υπόψη τις προγενέστερες τιμές και σταθμίζοντας τις κατάλληλα, ώστε οι τιμές αυτές να συνεισφέρουν σε κάποιο βαθμό στην παραγωγή της νέας γνώσης.

Τα μπεϋζιανά δίκτυα μπορεί να θεωρηθεί ότι αναπαριστούν μια συλλογή μοντέλων ταξινόμησης, οργανωμένων βάσει σχέσεων υπό συνθήκη ανεξαρτησίας. Υπ' αυτή την έννοια, για τη μάθηση των πιθανοτήτων σε ένα μπεϋζιανό δίκτυο μπορούν να χρησιμοποιηθούν, κυρίως, οι ακόλουθες τεχνικές: η γραμμική παλινδρόμηση (linear regression) [85]-[86], τα πιθανολογικά νευρωνικά δίκτυα (probabilistic neural networks) [50]-[51], [87]-[88] και οι λεξικοπαγείς αλγόριθμοι (dictionary-based algorithms) [89]. Οι περισσότερες μελετημένες μέθοδοι

περιλαμβάνουν τη γραμμική παλινδρόμηση με γκαουσιανό θόρυβο (linear regression with Gaussian noise) [90] και τη γενικευμένη γραμμική παλινδρόμηση (generalized linear regression) [91].

Στη μέθοδο μάθησης που προτείνεται στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, ακολουθείται μια εξειδικευμένη και αποτελεσματική προσέγγιση μάθησης και προσαρμογής, και παρουσιάζεται ένας μηχανισμός ενημέρωσης που καθιστά το σύστημα εύκολα προσαρμόσιμο σε νέες καταστάσεις, αλλά συγχρόνως ανεκτικό σε τυχαίες διακυμάνσεις των παρατηρήσεων, που μπορεί να οφείλονται σε ανεπιθύμητα αίτια.

4.3 Εφαρμογή τεχνικών μάθησης στο πρόβλημα της προηγμένης συλλογιστικής

4.3.1 Μοντελοποίηση του προβλήματος

Στα τμήματα που ακολουθούν, περιγράφεται ένας αριθμός μεθόδων μηχανικής μάθησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο πλαίσιο εξαγωγής αξιόπιστων εκτιμήσεων. Στόχος είναι η παρουσίαση του πλήρους τοπίου της μηχανικής μάθησης από τη σκοπιά της συλλογιστικής φάσης ενός γνωστικού συστήματος επικοινωνιών. Για κάθε μέθοδο μηχανικής μάθησης που περιγράφεται, σκιαγραφείται και η αντίστοιχη λύση στο πρόβλημα εξαγωγής αξιόπιστων εκτιμήσεων. Έμφαση δίνεται στον τρόπο μοντελοποίησης του προβλήματος, κατά τη χρήση κάθε μεθόδου.

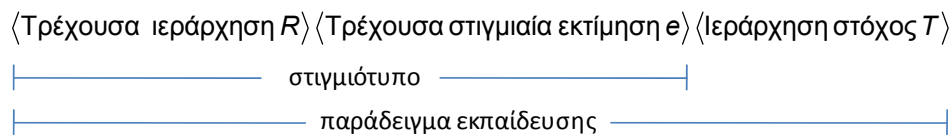
Στα παρακάτω, θεωρείται μια αυθαίρετη υποψήφια διάρθρωση c και εξετάζεται ο τρόπος με τον οποίο είναι δυνατό να αποκτηθούν αξιόπιστες εκτιμήσεις για την ενεργό χωρητικότητα μετάδοσης (παρόμοια διαδικασία ακολουθείται και για την ενεργό ακτίνα κάλυψης). Θεωρείται ότι η ενεργός χωρητικότητα μετάδοσης λαμβάνει τιμές από ένα σύνολο διακριτών τιμών αναφοράς, το οποίο συμβολίζεται με V_c , όπου c είναι η υπό εξέταση υποψήφια διάρθρωση.

Παραδείγματος χάριν, ας θεωρηθεί ότι για τη συγκεκριμένη υποψήφια διάρθρωση c ισχύει $|V_c|=6$, δηλαδή ότι το σύνολο των διακριτών τιμών αναφοράς απαρτίζεται από 6 διαφορετικές τιμές. Έστω ότι οι τιμές αυτές είναι (σε Mbps): $v_1=1$, $v_2=3$, $v_3=5$, $v_4=7$, $v_5=9$ και $v_6=11$ Mbps.

Σε κάθε δεδομένη στιγμή, η πραγματική ενεργός χωρητικότητα μετάδοσης μπορεί να είναι σε γειτονική περιοχή κάποιας από τις παραπάνω τιμές αναφοράς. Προκειμένου να γίνει αυτό κατανοητό, σε κάθε τιμή αναφοράς αποδίδεται ένα γνώρισμα ιεράρχησης (ranking attribute), το οποίο αντιπροσωπεύει το βαθμό εγγύτητας με την πραγματική τιμή. Έστω R το σύνολο που αντικατοπτρίζει τις τρέχουσες κατατάξεις των τιμών αναφοράς.

Για παράδειγμα, αν $R = \{2, 1, 3, 4, 5, 6\}$, τότε η τιμή αναφοράς v_1 θεωρείται, τη δεδομένη στιγμή, ως η δεύτερη πιο κοντινή (αφού $r_1=2$) στην πραγματική ενεργό χωρητικότητα μετάδοσης, με την τιμή v_2 ως την πιο κοντινή ($r_2=1$), την τιμή v_3 ως την τρίτη πιο κοντινή ($r_3=3$) κ.ο.κ. Από άλλη οπτική γωνία, η κατάταξη αυτή υποδεικνύει το πόσο πιθανό είναι για την αντίστοιχη τιμή αναφοράς να είναι η κοντινότερη στην πραγματική τιμή χωρητικότητας.

Όπως προαναφέρθηκε, μια μέθοδος μηχανικής μάθησης χρησιμοποιεί ένα σύνολο παραδειγμάτων εκπαίδευσης προκειμένου να μάθει αρχικά πώς πρέπει να συμπεριφέρεται. Το Σχήμα 4-10 αναπαριστά ένα δείγμα τέτοιου συνόλου παραδειγμάτων εκπαίδευσης στα πλαίσια της αξιόπιστης συλλογιστικής.



R						e	T					
2	1	3	4	5	6	v_1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	5	4	6	v_3	3	2	1	4	5	6
6	5	4	2	1	3	v_5	6	5	4	2	1	3
6	4	5	3	1	2	v_6	6	4	5	3	2	1
...

Σχήμα 4-10. Δείγμα συνόλου παραδειγμάτων εκπαίδευσης, στα πλαίσια της προηγμένης συλλογιστικής

Όπως φαίνεται στο σχήμα, κάθε παράδειγμα εκπαίδευσης αποτελείται από ένα σύνολο στιγμιαίων γνωρισμάτων (instant attributes) και ένα σύνολο γνωρισμάτων-στόχων (target attributes). Για το πρόβλημα υπό θεώρηση, υπάρχουν δύο τύποι στιγμιαίων γνωρισμάτων:

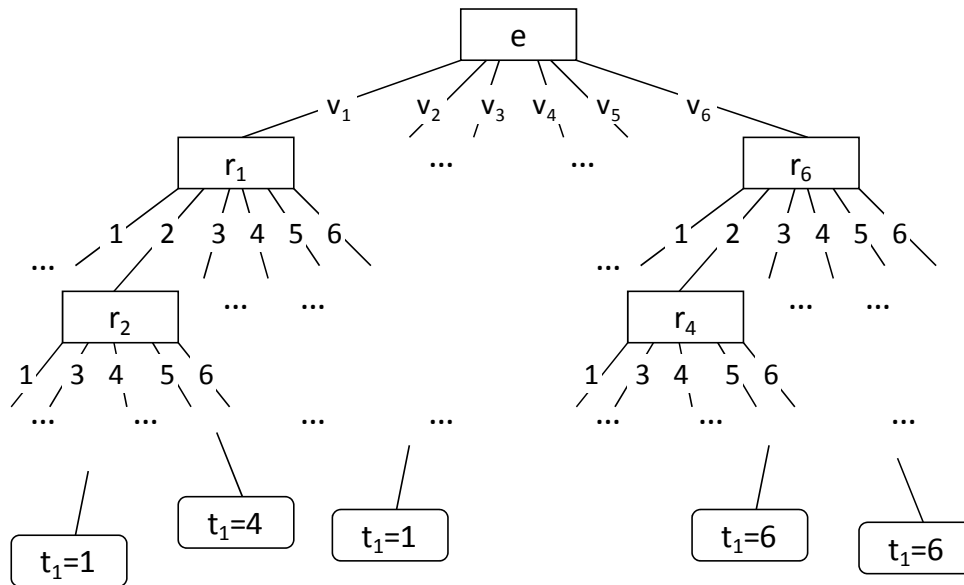
- τα γνωρίσματα ιεράρχησης (σύνολο R)
- η πλέον πρόσφατη εκτίμηση της ενεργούς χωρητικότητας μετάδοσης (συμβολίζεται για ευκολία με το σύμβολο e), όπως αυτή προέκυψε από το στάδιο της βασικής συλλογιστικής του γνωστικού κύκλου

Το γνώρισμα e μπορεί να λάβει οποιαδήποτε από τις τιμές αναφοράς της χωρητικότητας (π.χ., από v_1 έως v_6). Το ζεύγος $\langle R, e \rangle$ συγκροτεί το σύνολο των στιγμιαίων γνωρισμάτων. Η τρέχουσα ιεράρχηση των τιμών αναφοράς (R), μαζί με την πιο πρόσφατη στιγμιαία εκτίμηση της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης (e), πρέπει, από κοινού, να τεθούν υπόψη για τον προσδιορισμό μιας κατηγοριοποίησης-στόχου (target classification), δηλαδή μιας ιεράρχησης-στόχου (target ranking) των τιμών αναφοράς, η οποία πιθανώς να διαφέρει από την τρέχουσα ιεράρχηση. Συνεπώς, ορίζεται το σύνολο T ως το σύνολο των γνωρισμάτων-στόχων. Παραδείγματος χάριν, αν $t_1=3$, τότε η τιμή αναφοράς v_1 πρέπει να θεωρείται πλέον ως η τρίτη πιο κοντινή στην πραγματική τιμή ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης.

4.3.2 Εφαρμογή μάθησης δέντρων αποφάσεων

4.3.2.1 Μοντελοποίηση βάσει δέντρων αποφάσεων

Το Σχήμα 4-11 απεικονίζει ένα δέντρο αποφάσεων μάθησης, προσαρμοσμένο στο πρόβλημα προσδιορισμού αξιόπιστων εκτιμήσεων της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης.



Σχήμα 4-11. Δέντρο αποφάσεων για την αξιόπιστη εκτίμηση της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης

Το δέντρο αυτό δέχεται ως είσοδο ένα νέο στιγμιότυπο $\langle R, e \rangle$ και προτείνει την κατάταξη του γνωρίσματος-στόχου t_1 σε μια από τις πιθανές του διακριτές τιμές (π.χ., 1 έως 6). Παρόμοια δέντρα μπορούν, επίσης, να σχηματιστούν για τα υπόλοιπα γνωρίσματα-στόχους (t_2, t_3 , κτλ.). Περνώντας το νέο στιγμιότυπο μέσω όλων των δέντρων αποφάσεων, σχηματίζεται το σύνολο T των γνωρισμάτων-στόχων. Τυχόντα σημεία ασυνέπειας, όπως, για παράδειγμα, η απόδοση της ίδιας τιμής σε δύο γνωρίσματα-στόχους, επιλύονται μέσω μια τυχαίας επιλογής. Μια διαφορετική προσέγγιση συνίσταται στη χρήση ενός, μόνο, δέντρου αποφάσεων (αντί για έξι διαφορετικά δέντρα), με τους κόμβους φύλλα να αντιστοιχούν σε πιθανές τιμές του συνόλου T . Παρόλα αυτά, μια τέτοια προσέγγιση απαιτεί τουλάχιστον $6! = 720$ κόμβους φύλλα παρόντες στο δέντρο, προκειμένου να καλυφθούν όλες οι πιθανές τιμές του συνόλου T . Μια κατάλληλη διαδικασία εκπαίδευσης αυτού του δέντρου θα απαιτούσε ένα απαγορευτικά μεγάλο αριθμό παραδειγμάτων εκπαίδευσης.

Η δημιουργία κάθε δέντρου απόφασης μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια του βασικού αλγόριθμου ID3 ή κάποιας παραλλαγής του. Αντί να χρησιμοποιείται, όμως, ένα στατικό, αρχικό σύνολο παραδειγμάτων εκπαίδευσης, μια εναλλακτική λύση θα ήταν η υιοθέτηση μιας πιο δυναμικής προσέγγισης. Η ιδέα είναι η θεώρηση κάθε νέας κατάταξης ως νέου παραδείγματος εκπαίδευσης και η επανεκπαίδευση του συστήματος, δηλαδή η ανακατασκευή των δέντρων. Ως παράδειγμα, ας θεωρηθεί ότι υπάρχει ένα αρχικό σύνολο δέκα (10) παραδειγμάτων εκπαίδευσης που

χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενός συνόλου έξι (6) δέντρων αποφάσεων. Ας υποθεθεί τώρα ότι ένα νέο στιγμιότυπο ταξινομείται με τη βοήθεια αυτών των έξι δέντρων αποφάσεων. Μετά την ταξινόμησή του, το στιγμιότυπο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα νέο παράδειγμα εκπαίδευσης, οδηγώντας στην κατασκευή έξι νέων δέντρων αποφάσεων. Σε αυτό το σημείο υπάρχουν δύο επιλογές:

- Η άπειρη μεγέθυνση του συνόλου εκπαίδευσης
- Η αντικατάσταση ενός παλιού παραδείγματος εκπαίδευσης με ένα νεώτερο

Η δεύτερη περίπτωση είναι, προφανώς, υπολογιστικά αποτελεσματικότερη και θεωρεί τα νέα στιγμιότυπα περισσότερο χρήσιμα από τα παλιά, εφαρμόζοντας ένα κυλιόμενο παράθυρο παραδειγμάτων εκπαίδευσης. Παρά το γεγονός ότι μια τέτοια λύση φαίνεται να θέτει σε κίνδυνο την ακρίβεια, συνιστά μια έγκυρη προσέγγιση, καθώς λαμβάνει υπόψη τη χρονική εξάρτηση της διαδικασίας εκπαίδευσης, οδηγώντας σε: α) την ενσωμάτωση πρόσθετων παραδειγμάτων με την πάροδο του χρόνου και β) την προτίμηση των πρόσφατων στιγμιότυπων επί των παλιών.

4.3.2.2 Πολυπλοκότητα

Το πρόβλημα εύρεσης του ελαχίστου δέντρου, κατά την αρχή του Occum [28], το οποίο προσαρμόζεται τέλεια στα παραδείγματα εκπαίδευσης έχει αποδειχθεί ότι ανήκει στην κατηγορία των προβλημάτων NP-Hard [67]-[68]. Ωστόσο, η κατασκευή ενός μη-ελαχίστου δέντρου αποφάσεων μπορεί να υλοποιηθεί σε πολυωνυμικό χρόνο, αναλόγως και του χρησιμοποιούμενου αλγορίθμου κατασκευής.

Η χρονική πολυπλοκότητα της μεθόδου μάθησης δέντρων αποφάσεων προκύπτει από:

- το χρόνο που απαιτείται για την κατασκευή του δέντρου αποφάσεων
- το χρόνο εκτίμησης ενός νέου στιγμιότυπου

Ο αλγόριθμος ID3 και η κυριότερη έκδοσή του C4.5, που περιγράφηκαν σε προηγούμενες παραγράφους, κατασκευάζουν το δέντρο αποφάσεων χρησιμοποιώντας ως ευριστική μέθοδο το κέρδος πληροφορίας. Η χρονική πολυπλοκότητά τους υπολογίζεται ως εξής:

Έστω $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$, το σύνολο των παραδειγμάτων εκπαίδευσης και $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$, το σύνολο των γνωρισμάτων κάθε στιγμιότυπου. Στη χειρότερη περίπτωση, κατασκευάζεται ένα πλήρες δέντρο, όπου σε κάθε μονοπάτι του δέντρου ελέγχεται κάθε γνώρισμα του συνόλου A . Συνεπώς, το δέντρο αυτό έχει ύψος ίσο με

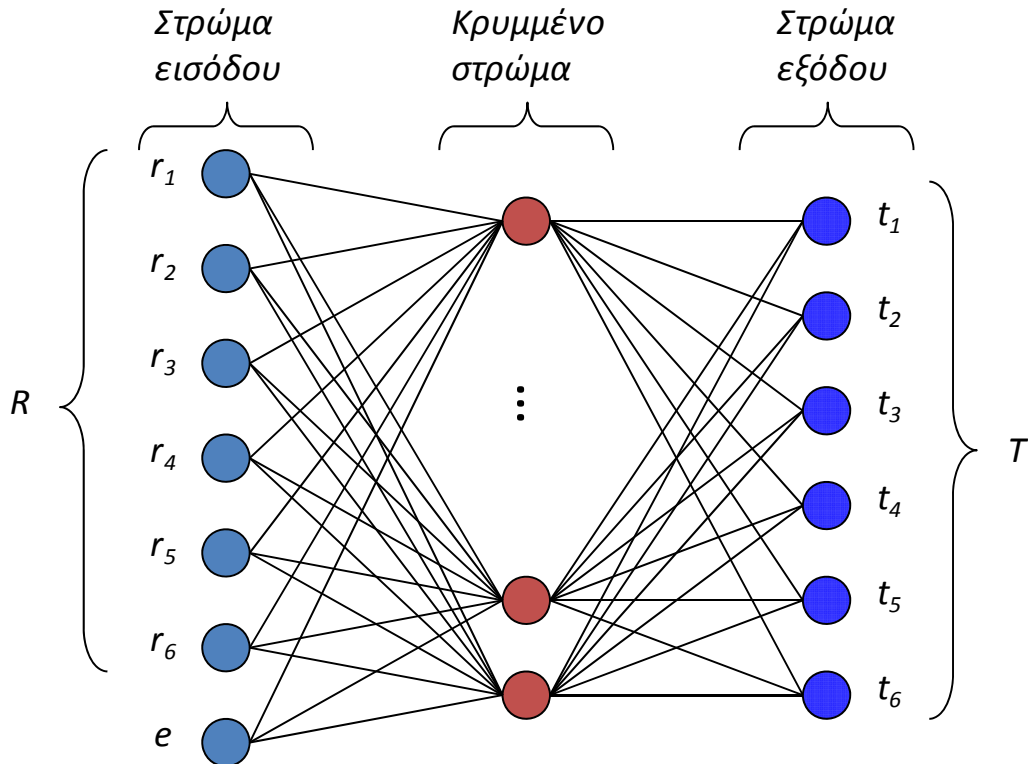
m , και μέγιστο n παραδειγμάτων σε όλους του κόμβους καθενός από τα m επίπεδα. Σε κάθε επίπεδο i , πρέπει να εξεταστούν τα εναπομείναντα $m - 1$ γνωρίσματα για κάθε στιγμιότυπο, προκειμένου να προσδιοριστούν τα αντίστοιχα κέρδη πληροφορίας. Επομένως, οι συνολικοί υπολογισμοί που λαμβάνουν χώρα είναι $O(n \cdot m)$ σε κάθε επίπεδο του δέντρου. Συνεπώς, η κατασκευή του συνολικού δέντρου έχει πολυπλοκότητα $O(n \cdot m^2)$. Για το πρόβλημα αξιόπιστης εκτίμησης των δυνατοτήτων ενός διαύλου, δεδομένης μιας υποψήφιας διάρθρωσης, με κάθε στιγμιότυπο να έχει τη μορφή που απεικονίζεται στο Σχήμα 4-11, απαιτούνται τόσα δέντρα αποφάσεων όσα είναι και τα γνωρίσματα-στόχοι. Θεωρώντας λοιπόν, m γνωρίσματα ιεράρχησης, μία (1) στιγμιαία μη αξιόπιστη εκτίμηση e , m γνωρίσματα-στόχους και n παραδείγματα εκπαίδευσης, η χρονική πολυπλοκότητα κατασκευής ενός δέντρου είναι της τάξης $O(n \cdot m^2)$ και, συνεπώς, η συνολική πολυπλοκότητα για m δέντρα είναι $m \cdot O(n \cdot m^2) = O(n \cdot m^3)$. Βέβαια, η κατασκευή των m δέντρων, μπορεί να γίνει παράλληλα, από m χωριστές διεργασίες.

Ο χρόνος εκτίμησης ενός στιγμιότυπου, με κατάταξη ενός από τα γνωρίσματα-στόχους, απαιτεί, για τη δεδομένη δομή του στιγμιότυπου, το πολύ m συγκρίσεις σε κάθε ένα από τα m επίπεδα του δέντρου, είναι, δηλαδή, της τάξης του $O(m^2)$. Αξίζει να σημειωθεί ότι, λόγω της δομής του στιγμιότυπου, κάθε γνώρισμα μπορεί να λάβει m δυνατές τιμές. Για την κατάταξη όλων των γνωρισμάτων, απαιτείται χρόνος $m \cdot O(m^2) = O(m^3)$, με τη διαδικασία να μπορεί και πάλι να εκτελεστεί από m χωριστές διεργασίες.

4.3.3 Εφαρμογή μάθησης τεχνητών νευρωνικών δικτύων

4.3.3.1 Μοντελοποίηση βάσει τεχνητών νευρωνικών δικτύων

Το Σχήμα 4-12 παρουσιάζει ένα παράδειγμα ενός τυπικού τεχνητού νευρωνικού δικτύου για το πρόβλημα υπό εξέταση, χρησιμοποιώντας και πάλι την ίδια δομή παραδείγματος εκπαίδευσης που παρουσιάστηκε παραπάνω. Για το πρόβλημα αξιόπιστης εκτίμησης της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης, το ακόλουθο σχήμα μπορεί να ακολουθηθεί.



Σχήμα 4-12. Τεχνητό νευρωνικό δίκτυο για την αξιόπιστη εκτίμηση της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης

Κωδικοποίηση εισόδου. Απαιτούνται οι εξής μονάδες εισόδου:

- η τιμή του γνωρίσματος e , δηλαδή η πιο πρόσφατη στιγμιαία εκτίμηση
- οι τιμές των γνωρισμάτων του συνόλου R , δηλαδή η ιεράρχηση των τιμών αναφοράς

Επομένως, συνολικά, απαιτούνται, επτά μονάδες εισόδου.

Κωδικοποίηση εξόδου. Το στρώμα εξόδου πρέπει να αποτελείται από έξι μονάδες, μία για κάθε γνώρισμα-στόχο του συνόλου T . Ο τύπος των μονάδων που θα χρησιμοποιηθούν αποτελεί μια σημαντική σχεδιαστική επιλογή. Μια λύση είναι η σιγμοειδής μονάδα (sigmoid unit), η οποία λαμβάνει ως είσοδο ένα διάνυσμα εισόδων πραγματικών τιμών, υπολογίζει ένα γραμμικό συνδυασμό αυτών των εισόδων και, στη συνέχεια, υπολογίζει μια μη γραμμική κλιμακοθέτηση (scaling), ως συνάρτηση κατωφλίου, με τιμές από 0 έως 1. Το Σχήμα 4-7 αναπαριστά μια τέτοια σιγμοειδή μονάδα. Χρησιμοποιώντας αυτό το εύρος τιμών, οι έξι δυνατές τιμές του γνωρίσματος στόχου πρέπει να κωδικοποιηθούν στο νευρωνικό δίκτυο όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-13. Μια πολύ χρήσιμη ιδιότητα της σιγμοειδούς μονάδας είναι ότι η μη γραμμική συνάρτηση κατωφλίου είναι εύκολα παραγωγίσιμη. Η μάθηση της

σιγμοειδούς μονάδας προβλέπει την επιλογή τιμών για τα βάρη των εισόδων με τέτοιο τρόπο, ώστε τα παραδείγματα εκπαίδευσης να κατατάσσονται επιτυχώς από το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο.

Ιεράρχηση	1	2	3	4	5	6
Κωδικοποίηση εξόδου	0.143	0.286	0.429	0.571	0.714	0.857

Σχήμα 4-13. Κωδικοποίηση εξόδου του τεχνητού νευρωνικού δικτύου

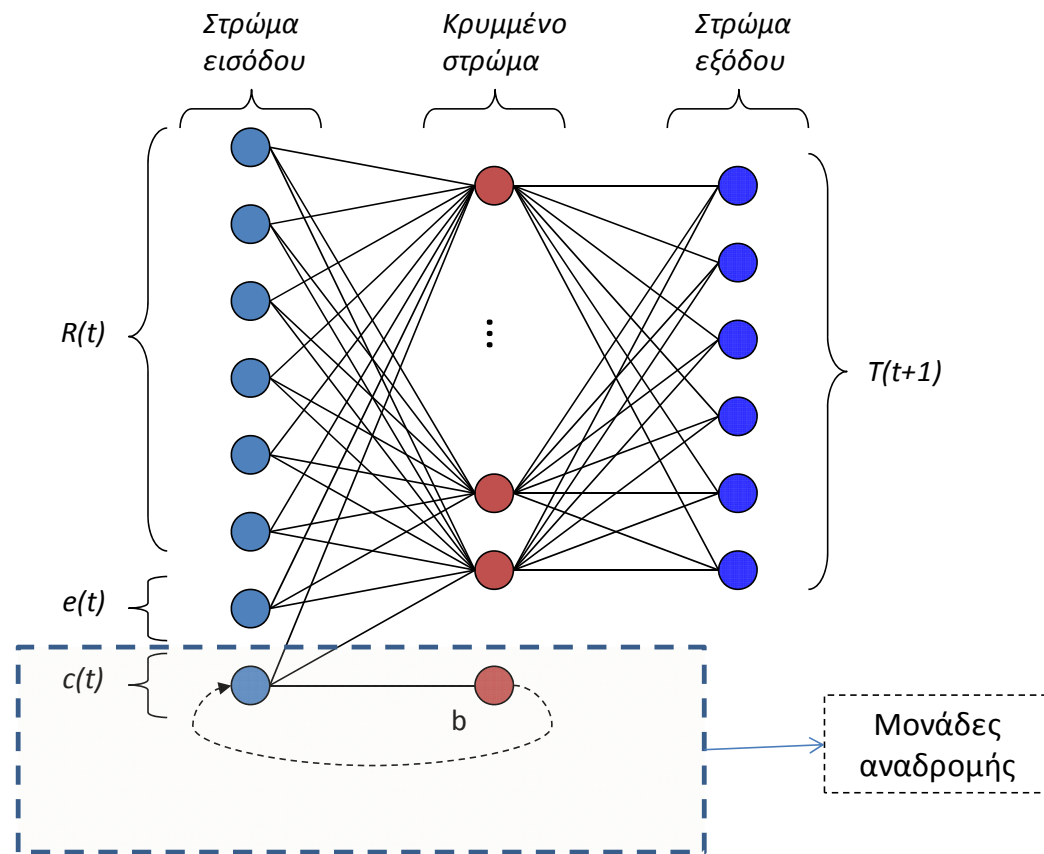
Δομή δικτυακού γράφου. Είναι συνηθισμένη πρακτική η χρησιμοποίηση ενός ή δύο κρυμμένων στρωμάτων σιγμοειδών μονάδων σε ένα τυπικό τεχνητό νευρωνικό δίκτυο. Στο συγκεκριμένο σχεδιασμό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μόνο κρυμμένο στρώμα. Ένα ακόμα ζήτημα θεμελιώδους σημασίας αποτελεί ο αριθμός των κρυμμένων κόμβων που θα συμπεριληφθούν στο νευρωνικό δίκτυο. Για το πρόβλημα υπό συζήτηση, μια κατάλληλη επιλογή είναι η επιλογή το πολύ έξι κρυμμένων μονάδων, δηλαδή μέγιστο αριθμό ίσο με τον αριθμό των τιμών αναφοράς για τη χωρητικότητα. Φυσικά, περισσότερες κρυμμένες μονάδες μπορεί να χρησιμοποιηθούν, γεγονός που οδηγεί μάλιστα, εν γένει, σε υψηλότερη ακρίβεια κατάταξης. Παρόλα αυτά, ικανοποιητική ακρίβεια κατάταξης μπορεί, επίσης, να επιτευχθεί ακόμα και με τη χρήση ενός μικρού αριθμού κρυμμένων μονάδων. Η προσέγγιση αυτή επιφέρει μεγαλύτερη ταχύτητα, καθώς όσο μικρότερος είναι ο αριθμός των κρυμμένων μονάδων, τόσο μικρότεροι είναι και οι χρόνοι που απαιτούνται για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου.

4.3.3.2 Προσθήκη αναδρομής

Μέχρι αυτό το σημείο, ένας σημαντικός περιορισμός του τεχνητού νευρωνικού δικτύου που έχει κατασκευαστεί είναι ότι η πρόβλεψη του συνόλου T τη χρονική στιγμή $t+1$ εξαρτάται αποκλειστικά από το σύνολο εισόδου R και e τη χρονική στιγμή t και δεν μπορεί να συλλάβει πιθανές εξαρτήσεις του συνόλου $T(t+1)$ από προγενέστερες τιμές των R και e . Φυσικά, αυτή η δυσκολία μπορεί να αντιμετωπιστεί με την εισαγωγή όχι μόνο των $R(t)$ και $e(t)$, αλλά και των τιμών $R(t-1)$ και $e(t-1)$, στο στρώμα εισόδου ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου. Παρόλα αυτά, αν είναι

επιθυμητό το δίκτυο να θεωρεί ένα αυθαίρετο χρονικό παράθυρο στο παρελθόν, όταν προβλέπει το σύνολο $T(t+1)$, τότε απαιτείται μια διαφορετική προσέγγιση.

Το αναδρομικό δίκτυο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-14 παρέχει μια τέτοια προσέγγιση. Εδώ, προστέθηκε μια νέα μονάδα b στο κρυμμένο στρώμα και μια νέα μονάδα εισόδου $c(t)$. Η τιμή της $c(t)$ ορίζεται ως η τιμή της μονάδας b τη χρονική στιγμή $t-1$. Με άλλα λόγια, η τιμή εισόδου $c(t)$ του δικτύου μια χρονική στιγμή απλά αντιγράφεται από την τιμή της μονάδας b την προηγούμενη χρονική στιγμή. Αξίζει να σημειωθεί ότι με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μια αναδρομική σχέση, στην οποία το b αναπαριστά πληροφορία σχετική με την ιστορία των εισόδων του τεχνητού νευρωνικού δικτύου. Καθώς το b εξαρτάται, όχι μόνο από τις τιμές $R(t)$ και $e(t)$, αλλά και από την τιμή $c(t)$, είναι δυνατόν το b να συνοψίζει πληροφορίες από προγενέστερες τιμές των R και e , που απέχουν αυθαίρετη χρονική απόσταση. Είναι, επίσης, ενδιαφέρον το γεγονός ότι τέτοια αναδρομικά δίκτυα μπορούν να εκπαιδευτούν χρησιμοποιώντας μια απλή παραλλαγή του αλγόριθμου Backpropagation.



Σχήμα 4-14. Αναδρομικό τεχνητό νευρωνικό δίκτυο για την αξιόπιστη εκτίμηση της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης

4.3.3.3 Πολυπλοκότητα

Αν και ο προσδιορισμός της εγγενούς πολυπλοκότητας του προβλήματος μάθησης ενός νευρωνικού δικτύου στην πλήρη ολότητά του παραμένει ένα ανοιχτό πρόβλημα, πολυάριθμες μερικές προσεγγίσεις έχουν παρουσιαστεί, οι οποίες συνηγορούν υπέρ του χαρακτηρισμού του ως δυσεπίλυτο πρόβλημα. Οι προσεγγίσεις αυτές βασίζονται, σε μεγάλο βαθμό, στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του ορισμού του προβλήματος, όπως, για παράδειγμα, η δικτυακή τοπολογία, ο τύπος των μονάδων ενεργοποίησης, τα χαρακτηριστικά των δεδομένων εκπαίδευσης και το ζητούμενο τελικό αποτέλεσμα. Οι περισσότερες από αυτές τις προτάσεις κινούνται στο πλαίσιο του προβλήματος φόρτωσης (loading problem), που ορίστηκε από τον Judd [71].

Η διατύπωση του προβλήματος φόρτωσης είναι η εξής: «Δεδομένου του ορισμού ενός δικτύου (με συγκεκριμένη τοπολογία, συναρτήσεις ενεργοποίησης κόμβων, κτλ) και ενός συνόλου παραδειγμάτων εκπαίδευσης $D = \{\vec{x}_i, y_i\}_{i=1}^N$, υπάρχει ένα σύνολο βαρών W , για το οποίο το δίκτυο παράγει τη σωστή έξοδο για όλα τα παραδείγματα

εκπαίδευσης N ; Πιο συγκεκριμένα, αν $f(x)$ η συνάρτηση που υλοποιεί το δίκτυο, υπάρχει σύνολο βαρών W τέτοιο ώστε $f(x_i) = y_i$, για κάθε $i = 1, 2, \dots, N$ »

Αξίζει να σημειωθεί ότι το πρόβλημα φόρτωσης είναι απλά ένα πρόβλημα απόφασης. Ο προσδιορισμός του ζητούμενου συνόλου βαρών αποτελεί, προφανώς, ένα τουλάχιστον εξίσου δύσκολο πρόβλημα [72]. Οι Blum και Rives απέδειξαν ότι το πρόβλημα φόρτωσης είναι NP-Complete γι' αυτό που θεωρείται από πολλούς ως το πιο απλό δίκτυο ενός κρυφού στρώματος, ένα δίκτυο κατωφλίου 3 κόμβων με 2 κόμβους στο κρυφό επίπεδο [72]. Ο Hoffgen απέδειξε ότι το πρόβλημα φόρτωσης ενός δικτύου με 3 κόμβους που χρησιμοποιούν συνεχείς σιγμοειδείς συναρτήσεις ενεργοποίησης είναι NP-Hard, υπό τον περιορισμό χρήσης δυαδικών βαρών [73]. Ο Sima απέδειξε ότι το ίδιο πρόβλημα σε δίκτυο 3 κόμβων με συνεχείς σιγμοειδής συναρτήσεις στο κρυφό επίπεδο, είναι NP-Hard, υπό τον περιορισμό το βάρος μεροληψίας (bias weight) της εξόδου να είναι μηδενικό [74]. Τέλος, εκτός πλαισίου του προβλήματος φόρτωσης, ο Jones απέδειξε ότι η εκπαίδευση ενός δικτύου 3 κόμβων, με κρυφούς κόμβους σιγμοειδούς συνάρτησης ενεργοποίησης και ένα γραμμικό κόμβο εξόδου, είναι πρόβλημα NP-Hard [75]. Η απόδειξή του απαιτεί οι σιγμοειδείς συναρτήσεις ενεργοποίησης στο κρυφό στρώμα να ικανοποιούν συγκεκριμένες συνθήκες μονοτονίας και συνθήκες Lipschitz.

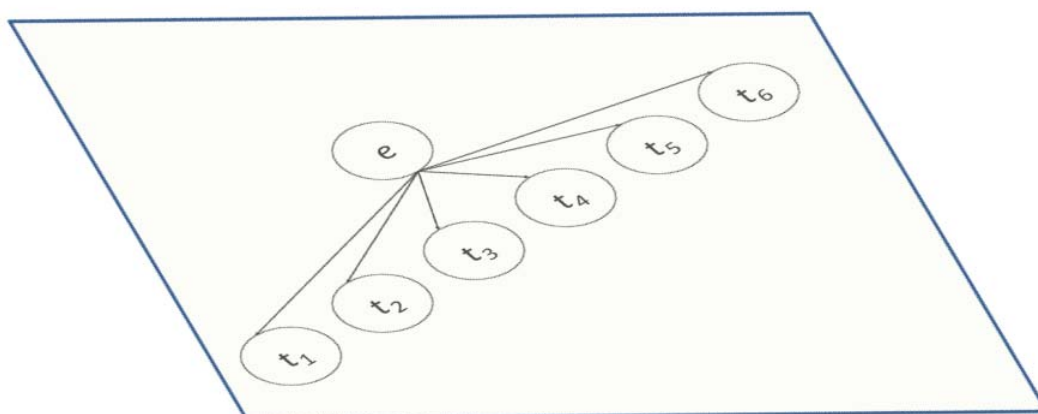
Αξίζει να σημειωθεί ότι το πρόβλημα φόρτωσης αναζητά μια λύση μηδενικού σφάλματος. Στην πράξη, όμως, αναμένεται ότι και η «καλύτερη» λύση θα εμπεριέχει κάποιο μη μηδενικό σφάλμα. Παρόλα αυτά, η απάντηση στην ερώτηση για την περίπτωση μη μηδενικού σφάλματος δεν είναι πιο δύσκολη από την αντίστοιχη απάντηση στην ερώτηση για το ελάχιστο σφάλμα, επομένως η πολυπλοκότητα του προβλήματος φόρτωσης έχει βαρύνουσα σημασία.

4.3.4 Εφαρμογή μάθησης μπεϋζιανών δικτύων

4.3.4.1 Μοντελοποίηση βάσει μπεϋζιανών δικτύων

Καθώς το πρόβλημα της αξιόπιστης εκτίμησης της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης είναι χρονικά εξαρτώμενο, μια απλή και υπολογιστικά αποτελεσματική στρατηγική μπορεί να ακολουθηθεί. Η βασική ιδέα εστιάζεται στη διατήρηση όσο το δυνατόν απλούστερης δομής δικτύου και στη μεταφορά της πολυπλοκότητας στην πλευρά του αλγόριθμου μάθησης. Σε αυτό το πνεύμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το

απλό μοντέλο που απεικονίζεται στο Σχήμα 4-15, και το ενδιαφέρον να μετατοπιστεί στον τρόπο με τον οποίο μπορούν να ενημερωθούν χρονικά οι τιμές των πινάκων δεσμευμένων (υπό συνθήκη) πιθανοτήτων, έτσι ώστε να αντανακλούν τις τρέχουσες πραγματικές συνθήκες. Ένα τμήμα πίνακα δεσμευμένων πιθανοτήτων για τη μεταβλητή t_1 ακολουθεί (Πίνακας 4-6).



Σχήμα 4-15. Μπεϋζιανό δίκτυο για την αξιόπιστη εκτίμηση της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης

Πίνακας 4-6. Πίνακας δεσμευμένων πιθανοτήτων για τη μεταβλητή t_1

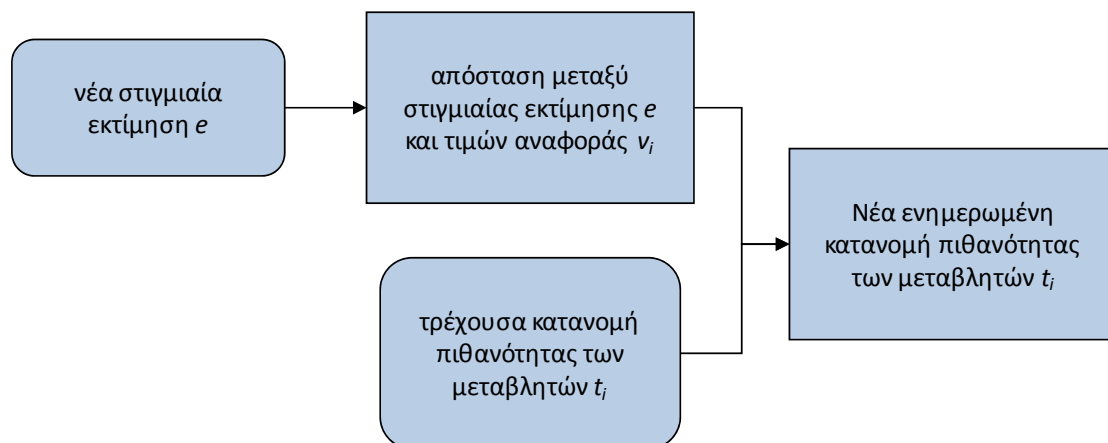
		e			
		v_1	v_2	...	v_6
t_1	1	0.04	0.40	...	0.04
	2	0.26	0.20	...	0.08
	3	0.35	0.25	...	0.15
	4	0.15	0.10	...	0.22
	5	0.12	0.03	...	0.27
	6	0.18	0.02	...	0.24

Η μάθηση των μπεϋζιανών δικτύων, δηλαδή η χρονική ενημέρωση των τιμών των προαναφερθέντων πινάκων, βρίσκεται, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, στο επίκεντρο μεγάλου τμήματος της τρέχουσας επιστημονικής δραστηριότητας. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα, μια διαδικασία ενημέρωσης, όπως αυτή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-16, μπορεί να λάβει χώρα. Κάθε φορά που μια καινούρια στιγμιαία εκτίμηση e γίνεται διαθέσιμη επαναλαμβάνεται η ακόλουθη διαδικασία:

- Υπολογίζεται η απόσταση της στιγμιαίας εκτίμησης e από κάθε τιμή αναφοράς v_i

- Χρησιμοποιείται αυτή η απόσταση, σε συνδυασμό με την τρέχουσα κατανομή των πιθανοτήτων καθενός γνωρίσματος-στόχου t_i , με στόχο των υπολογισμών της νέας, ενημερωμένης χρονικά, κατανομής πιθανότητας της μεταβλητής t_i

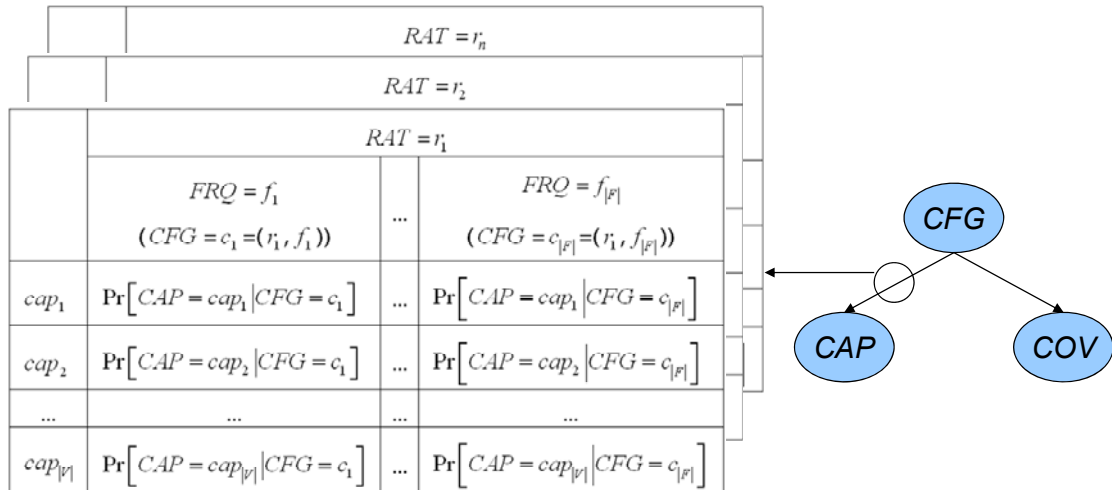
Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία, οι τιμές των πιθανοτήτων ενημερώνονται με τέτοιον τρόπο, ώστε να συλλαμβάνεται η επίδραση τόσο της παρελθοντικής όσο και της τρέχουσας γνώσης.



Σχήμα 4-16. Διαδικασία ενημέρωσης των τιμών των πινάκων δεσμευμένων πιθανοτήτων

4.3.4.2 Λεπτομερής συγκρότηση μπεύζιανού δικτύου

Στο τμήμα που ακολουθεί, θα παρουσιαστεί μια πιο λεπτομερής υλοποίηση του μπεύζιανού δικτύου που προτείνεται για τη μοντελοποίηση του συγκεκριμένου προβλήματος. Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα, επιλέγεται ένα απλό μπεύζιανό δίκτυο, που απεικονίζεται στο Σχήμα 4-17, με την πολυπλοκότητα να μεταφέρεται στο μηχανισμό μάθησης. Η στοχαστικότητα και η αβεβαιότητα των δυνατοτήτων μιας υποψήφιας διάρθρωσης, εδώ της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης και της ενεργού ακτίνας κάλυψης, οδηγούν στη χρήση αντίστοιχων τυχαίων μεταβλητών που εδώ θα αναφέρονται ως CAP και COV αντίστοιχα. Με το ακρωνύμιο CFG γίνεται αναφορά στην υποψήφια διάρθρωση. Η τυχαία αυτή μεταβλητή αποτελεί ένα προγνωστικό χαρακτηριστικό, καθώς πρόκειται για έναν κόμβο του οποίου η παρατηρούμενη τιμή επηρεάζει τις κατανομές πιθανότητας των μεταβλητών CAP και COV . Εδώ, λοιπόν, η μεταβλητή CFG και το σύνολο των μεταβλητών CAP και COV συνδέονται με μια σχέση αιτίου – αποτελέσματος, ενώ οι μεταβλητές CAP και COV είναι μεταξύ τους ανεξάρτητες, δεδομένης της τιμής της CFG .



Σχήμα 4-17. Μπεϋζιανό δίκτυο και αντίστοιχοι πίνακες δεσμευμένων πιθανοτήτων

Καθεμία από τις προαναφερθείσες τυχαίες μεταβλητές μπορεί να λάβει μια τιμή από ένα σύνολο πιθανών διακριτών τιμών. Προφανώς, όσο πιο πυκνό ή μεγαλύτερο είναι το σύνολο των δυνατών τιμών, τόσο πιο ακριβή είναι τα αποτελέσματα. Δεδομένης μιας υποψήφιας διάρθρωσης c , δηλαδή δεδομένου ότι $CFG=c$, και βασιζόμενοι στην προηγούμενη εμπειρία του σταθμού βάσης του δικτύου, οι πιθανές τιμές της μεταβλητής CAP δεν είναι, τουλάχιστον όχι στη γενική περίπτωση, ισοπίθανες. Το ίδιο ισχύει και για τις πιθανές τιμές της μεταβλητής COV .

Προκειμένου να εκφραστεί αυτό, οργανώνεται ένα πλήθος πινάκων δεσμευμένης πιθανότητας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-17. Για λόγους απλότητας το σχήμα περιλαμβάνει μόνον τους πίνακες δεσμευμένης πιθανότητας που αφορούν τη μεταβλητή CAP . Κάθε πίνακας δεσμευμένης πιθανότητας αναφέρεται σε μια συγκεκριμένη υποψήφια τεχνολογία ραδιοπρόσβασης (RAT) / τύπο ραδιοδιεπαφής (radio interface). Αν οριστεί ως R το σύνολο των υποψήφιων τύπων ραδιοδιεπαφής, τις οποίες οι αναδιαρθώσιμοι πομποδέκτες του σταθμού βάσης μπορούν να υποστηρίξουν, τότε απαιτούνται συνολικά $2 \cdot |R|$ πίνακες δεσμευμένης πιθανότητας, προκειμένου να συμπεριληφθεί το σύνολο των πληροφοριών για τις τυχαίες μεταβλητές CAP και COV . Κάθε στήλη ενός τέτοιου πίνακα αναφέρεται σε μια συγκεκριμένη διάρθρωση. Κάθε γραμμή του πίνακα δεσμευμένης πιθανότητας αντιστοιχεί σε μια πιθανή τιμή είτε της μεταβλητής CAP είτε της μεταβλητής COV . Κάθε κελί του πίνακα (διασταύρωση γραμμής και στήλης) παρέχει την πιθανότητα η διάρθρωση που αντιστοιχεί στη στήλη να επιτύχει την τιμή χωρητικότητας ή κάλυψης, που αντιστοιχεί στη γραμμή. Δεδομένης μιας υποψήφιας διάρθρωσης, η πιο

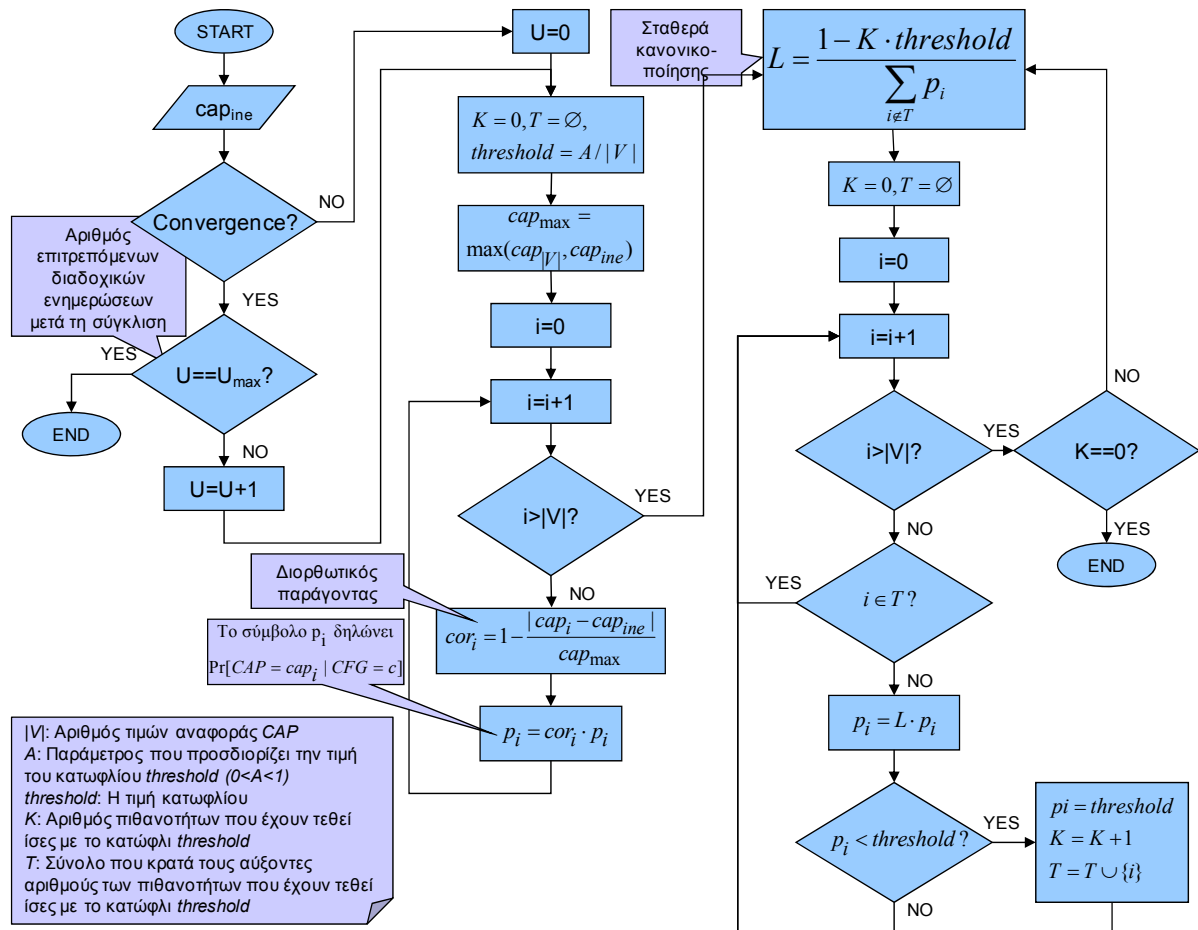
πιθανή τιμή της μεταβλητής CAP είναι αυτή που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη δεσμευμένη πιθανότητα. Το ίδιο ισχύει και για την πιο πιθανή τιμή της μεταβλητής COV . Οι πιο πιθανές τιμές των μεταβλητών CAP και COV συγκροτούν, αντίστοιχα, τις αξιόπιστες εκτιμήσεις της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης και της ενεργού ακτίνας κάλυψης της συγκεκριμένης διάρθρωσης.

Έστω, λοιπόν, πίνακας δεσμευμένης πιθανότητας για τη μεταβλητή CAP ενός τυχαίου τύπου ραδιοδιεπαφής r_1 ($r_1 \in R$). Ορίζοντας ως F το σύνολο των φέροντων στα οποία η ραδιοδιεπαφή r_1 μπορεί να λειτουργήσει, ο πίνακας δεσμευμένης πιθανότητας αποτελείται από $|F|$ στήλες (με $|F|$ να αναπαριστά το μέγεθος του συνόλου F), που αντιστοιχούν σε διαρθρώσεις (συνδυασμούς τύπου ραδιοδιεπαφής και συχνότητας φέροντος) $c_1=(r_1, f_1), \dots, c_{|F|}=(r_1, f_{|F|})$. Ορίζοντας το σύνολο V ως το σύνολο των πιθανών τιμών χωρητικότητας που υποστηρίζει τη ραδιοδιεπαφή r_1 , ο πίνακας δεσμευμένης πιθανότητας αποτελείται από $|V|$ γραμμές, που αντιστοιχούν στις τιμές της μεταβλητής CAP $cap_1, cap_2, \dots, cap_{|V|}$. Χωρίς απώλεια της γενικότητας, η απαρίθμηση πραγματοποιείται σε αύξουσα σειρά, δηλαδή $cap_1 < cap_2 < \dots < cap_{|V|}$, με $cap_{|V|}$ τη μέγιστη δυνατή τιμή. Το κελί που βρίσκεται στη διασταύρωση της γραμμής i και της στήλης j αποτελεί την τιμή μιας δεσμευμένης πιθανότητας. Εκφράζει την πιθανότητα να επιτευχθεί ενεργός χωρητικότητα cap_i , αν επιλεγεί η διάρθρωση c_j . Με φορμαλιστικό τρόπο η πιθανότητα αυτή δηλώνεται ως $\text{Pr}[CAP = cap_i | CFG = c_j]$. Για τη μεταβλητή COV , χρησιμοποιείται το σύμβολο W αντί του συμβόλου V , προκειμένου να δηλώσει το σύνολο των υποστηριζόμενων από τη ραδιοδιεπαφή r_1 τιμών ενεργού ακτίνας κάλυψης. Ας σημειωθεί, επίσης, ότι, για λόγους απλοποίησης του συμβολισμού, χρησιμοποιείται το σύμβολο F αντί του πιο ορθού Fr_1 . Το ίδιο εφαρμόζεται και για τα σύνολο F και V . Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί ότι τα σύνολα F , V , και W είναι, γενικά, διαφορετικά για κάθε $r \in R$.

Αρχικά, οι τιμές των πιθανοτήτων στους αντίστοιχους πίνακες του μπεϋζιανού δικτύου δεν είναι τίποτα περισσότερο από τιμές αναφοράς που έχουν οριστεί είτε τυχαία είτε από έμπειρη ομάδα ειδικών. Παρόλα αυτά, αυτό δεν είναι αρκετό. Οι τιμές αυτές πρέπει συνεχώς να ενημερώνονται χρονικά, ενσωματώνοντας γνώση και εμπειρία που έχει αποκτηθεί τόσο από τις παρελθοντικές όσο και από τις πιο πρόσφατες στιγμιαίες εκτιμήσεις.

Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, προτείνεται, επίσης, μια υπολογιστικά αποτελεσματική μέθοδος μάθησης και

προσαρμογής, που καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο ενημερώνονται οι τιμές των πιθανοτήτων στους πίνακες. Το διάγραμμα που εικονίζεται στο Σχήμα 4-18 παρουσιάζει την αλληλουχία βημάτων της προτεινόμενης στρατηγικής. Έστω, λοιπόν, μια τυχαία διάρθρωση $c=(r,f)$. Θα εξεταστεί ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται η χρονική ενημέρωση των αντίστοιχων τιμών πιθανοτήτων για την τυχαία μεταβλητή CAP . Η ίδια στρατηγική εφαρμόζεται και με τη μεταβλητή COV .



Σχήμα 4-18. Στρατηγική ενημέρωσης τιμών πινάκων δεσμευμένων πιθανοτήτων

Έστω cap_{ine} η τιμή τις πιο πρόσφατης στιγμιαίας εκτίμησης της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης της διάρθρωσης c (η τιμή cap_{ine} είναι μια συνεχής, μη διακριτή, μεταβλητή). Η διαδικασία ενημέρωσης λαμβάνει υπόψη της την «απόσταση», δηλαδή την απόλυτη διαφορά ανάμεσα σε κάθε υποψήφια τιμή της μεταβλητής CAP και την τιμή cap_{ine} . Ανάλογα με αυτήν την απόσταση, κάθε τιμή του πίνακα δεσμευμένης πιθανότητας που αντιστοιχεί στην υπό εξέταση διάρθρωση πρέπει να αυξάνεται ή να μειώνεται κατάλληλα.

Για το σκοπό αυτό, υπολογίζεται ένας διορθωτικός παράγοντας cor_i για κάθε

υποψήφια τιμής της χωρητικότητας cap_i . Για το διορθωτικό αυτόν παράγοντα ισχύει $0 \leq cor_i \leq 1$. Μια τιμή κοντά στο 1 δηλώνει ότι η αντίστοιχη υποψήφια τιμή cap_i είναι κοντά στην στιγμιαία εκτίμηση cap_{ine} και, συνεπώς, πρέπει να ενισχυθεί κατάλληλα. Το αντίθετο ισχύει για μια τιμή κοντά στο 0. Φορμαλιστικά, ο διορθωτικός παράγοντας εκφράζεται ως εξής:

$$cor_i = 1 - \frac{|cap_i - cap_{ine}|}{cap_{max}}$$

όπου: $cap_{max} = \max(cap_{|V|}, cap_{ine})$

Εν συνεχεία, η νέα τιμή της δεσμευμένης πιθανότητας, $\Pr[CAP = cap_i | CFG = c]$, υπολογίζεται ως το γινόμενο της παλαιάς τιμής της δεσμευμένη πιθανότητας, του αντίστοιχου διορθωτικού παράγοντα και μιας σταθεράς κανονικοποίησης L . Η σταθερά αυτή υπολογίζεται βάσει της απαίτησης όλες οι νέες τιμές πιθανοτήτων να έχουν άθροισμα ίσο με 1. Φορμαλιστικά, αυτό δηλώνεται ως εξής:

$$\Pr[CAP = cap_i | CFG = c]_{new} = L \cdot cor_i \cdot \Pr[CAP = cap_i | CFG = c]_{old}$$

Θεωρείται ότι το σύστημα έχει συγκλίνει όταν η πιο πιθανή υποψήφια τιμή της χωρητικότητας, αυτή δηλαδή που αντιστοιχεί στη μέγιστη δεσμευμένη πιθανότητα, προσεγγίζει περισσότερο από κάθε άλλη υποψήφια τιμή τη στιγμιαία εκτίμηση cap_{ine} . Μετά τη σύγκλιση, ο αριθμός U των διαδοχικών ενημερώσεων των τιμών των δεσμευμένων πιθανοτήτων της συγκεκριμένης διάρθρωσης περιορίζεται σε ένα μέγιστο αριθμό U_{max} . Με αυτό τον τρόπο συγκροτείται ένας πρακτικός μηχανισμός που διευκολύνει την ταχύτερη προσαρμογή σε νέες συνθήκες.

Για τον ίδιο λόγο, δεν επιτρέπεται η τιμή μιας δεσμευμένης πιθανότητας να γίνει μικρότερη από μια συγκεκριμένη κατωφλιακή τιμή, που αναπαριστάται ως $threshold$. Η τιμή αυτής της παραμέτρου ορίζεται ως $threshold = A/|V|$, όπου $0 < A < 1$. Στις περιπτώσεις όπου εφαρμόζεται ο μηχανισμός κατωφλίου, η σταθερά κανονικοποίησης L υπολογίζεται απαιτώντας όλες οι υπόλοιπες νέες τιμές να έχουν άθροισμα $1 - K \cdot threshold$, όπου K ο αριθμός των πιθανοτικών τιμών που έχουν θεθεί ίσες με την κατωφλιακή τιμή. Οι τιμές U_{max} και A αποτελούν σχεδιαστικές παραμέτρους.

4.4 Παραπομπές

- [1] E. Alpaydin, *Introduction to Machine Learning*, MIT Press, 2004.
- [2] D. J. C. MacKay, *Information Theory, Inference, and Learning Algorithms*, Cambridge University Press, 2003.
- [3] J. G. Carbonell, R. S. Michalski, and T. M. Mitchell, “An overview of machine learning”, in *Machine learning: An artificial intelligence approach*, R.S. Michalski, J.G. Carbonell, and T.M. Mitchell, (Eds.), Palo Alto: Tioga Publishing Company, 1983.
- [4] A. Stasis., E. Loukis, S. Pavlopoulos, and D. Koutsouris, “A multiple decision trees architecture for medical diagnosis: The differentiation of opening snap, second heart sound split and third heart sound”, *Computational Management Science*, vol. 1, no. 3-4, pp. 245-274, Oct. 2004.
- [5] W. Kuo, R. Chang, D. Chen, and C. Cheng, “Data mining with decision trees for diagnosis of breast tumor in medical ultrasonic images”, *Breast cancer research and treatment*, Springer, vol. 66, no. 1, pp. 51-57, Mar. 2001.
- [6] I. Zelic, I. Kononenko, N. Lavrac, and V. Vuga, “Diagnosis of sport injuries with machine learning: explanation of induced decisions”, *Proceedings of 10th IEEE Symposium on Computer-Based Medical Systems*, pp. 195-199, 1997.
- [7] M. Shaw and J. Gentry, “Inductive Learning for Risk Classification”, *Intelligent Systems*, IEEE, vol. 5, no. 1, pp. 47-53, Feb. 1990.
- [8] W. Yang and G.B. Sheble, “Modeling generation company decisions and electric market dynamics as discrete systems”, *Proceedings of Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 3, pp. 1385-1391, 2002.
- [9] T. Mitchell, *Machine Learning*, McGraw Hill, 1997.
- [10] Y. Yuan and M. J. Shaw, “Induction of fuzzy decision trees”, *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 69, no. 2, pp. 125–139, Jan. 1995.
- [11] R. O. Donnell and R. A. Servedio, “Learning monotone decision trees in polynomial time”, *Proceedings of 21st Annual IEEE Conference on Computational Complexity*, pp. 213-225, 2006.
- [12] S. Kushilevitz and Y. Mansour, “Learning decision trees using Fourier spectrum”, *Proceedings of 23rd Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, pp. 455-464, 1991.

- [13] J. Gama, P. Medas, and P. Rodrigues, "Learning decision trees from dynamic data streams", *Proceedings of the 2005 ACM Symposium on Applied Computing*, pp. 573-577, 2005
- [14] I. H. Witten and E. Frank, *Data Mining: Practical machine learning tools and techniques*, Morgan Kaufmann, 2005.
- [15] W. Buntine, "Learning classification trees", in *Artificial Intelligence Frontiers in Statistics: AI and Statistics III*, Chapman and Hall, 1993.
- [16] J. R. Quinlan, "Induction of Decision Trees", *Machine Learning*, vol. 1, no.1, pp. 81-106, Mar. 1986.
- [17] R. Williams and D. Zipser, "Gradient-based learning algorithms for recurrent networks and their computational complexity", in *Backpropagation: Theory, architectures, and applications*, Y. Chauvin and D. Rumelhart (Eds.), Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 1995, pp. 433-486.
- [18] R. A. O'Keefe, "Concept formation from very large training sets", *Proceedings of the Eighth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Karlsruhe, West Germany: Morgan Kaufmann, 1983.
- [19] J. R. Quinlan, "Decision trees and multi-valued attributes" in *Machine intelligence 11*", J.E. Hayes & D. Michie (Eds.), Oxford University Press, 1985.
- [20] J. R. Quinlan, "Improved use of continuous attributes in c4.5", *Journal of Artificial Intelligence Research*, ch.4, pp. 77-90, Feb. 1996.
- [21] A. Colin, "Building Decision Trees with the ID3 Algorithm", *Dr. Dobbs Journal*, June 1996.
- [22] P. E. Utgoff, *Incremental Induction of Decision Trees*, Kluwer Academic Publishers, 1989.
- [23] J. R. Quinlan, *C4.5 Programs for Machine Learning*, Morgan Kaufmann, 1993.
- [24] J. Pearl, *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*, San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 1988.
- [25] W. M. Thorburn, "The Myth of Occam's Razor", *Mind* 27, pp. 345-353, 1918.
- [26] A. Hyman and J. J. Walsh, *Philosophy in the Middle Ages*, Indianapolis: Hackett Publishing Co., 1973.
- [27] P. M. Murphy and M. J. Mazzani, "Exploring the decision forest: An empirical investigation of Occam's razor in decision tree induction", *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 1, Mar. 1994.

- [28] G. I. Webb, "Further Experimental evidence against the utility of Occam's Razor", *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 4, May 1996.
- [29] D. Haussman, "Learning conjunctive concepts in structural domains", *Machine Learning*, vol. 4, no.1, pp. 7-40, Oct. 1989.
- [30] F. Hayes-Roth and J. McDermott, "An interference matching technique for inducing abstractions", *Communications of the ACM*, vol. 21, no.5, pp. 401-411, May 1978.
- [31] G. Grieser and S.Lange, "Incremental learning of approximations from positive data", *Information Processing Letters*, vol. 89, no.1, pp. 37-42, Jan. 2004.
- [32] Y. Ma and Y. Han, "An Incremental Learning Algorithm Based on Rough Set Theory", *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 4489, pp. 444-447, July 2007.
- [33] J. Mingers, "En empirical comparison of pruning methods for decision-tree induction", *Machine Learning*, vol. 4, no. 2, pp. 227-243, Nov. 1989.
- [34] U. M. Fayad, "On the induction of decision trees for multiple concept learning", PhD. Dissertation, EECS Department, University of Michigan, 1991.
- [35] U. M. Fayad and K. B. Irani, "Multi-interval discretization of continuous-valued attributes in decision tree generation", *Machine Learning*, vol. 8, pp. 87-102, 1992.
- [36] P. E. Utgoff and C. E. Brodley, "Linear Machine decision trees", COINS Technical report, 1991.
- [37] R. Lopez de Mantaras, "A distance-based attribute selection measure for decision tree induction", *Machine Learning*, vol. 6, no. 1, pp. 81-92, Jan. 1991.
- [38] J. Mingers, "An empirical comparison of selection measures for decision-tree induction", *Machine Learning*, vol. 3, no. 4, pp. 319-342, Mar. 1989.
- [39] M. Kearns and Y. Mansour, "On the boosting ability of top-down decision tree induction", *Proceedings of the 28th ACM Symposium on the theory of Computing*, 1996.
- [40] M. Tan, "Cost-sensitive learning of classification knowledge and its application in robotics", *Machine Learning*, vol. 13, no. 1, pp. 1-33, Oct. 1993.
- [41] M. Nunez, "The use of background knowledge in decision tree induction", *Machine Learning*, vol. 6, no. 3, pp. 231-250, May 1991.
- [42] K. Popper, 7. Simplicity, *The Logic of Scientific Discovery*, London: Routledge, 1992. pp. 121-132.

- [43] D. T. Pham and Z. Salem, "A new technique for rule pruning in machine learning", *Proceedings of the International Conference on Information and Communication Technologies: From Theory to Applications*, IEEE, pp. 437-438, 2004.
- [44] A. M. Alimi, "A neuro-fuzzy approach to recognize Arabic handwritten characters", *Proceedings of the International Conference on Neural Networks*, IEEE, pp. 1397-1400, 1997.
- [45] M. D. Garris, R. A. Wilkinson, and C. L. Wilson, "Analysis of a biologically motivated neural network for character recognition", *Proceedings of Analysis of neural network applications*, ACM Press, 1991.
- [46] S. Laurence, C. Giles, A.C. Tsoi, and A. Back, "Face Recognition: A Convolutional Neural Network Approach", *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 8, no. 1, pp. 98-113, Jan. 1997.
- [47] J. Haddadnia, K. Faez, and P. Moallem, "Neural Network Based Face Recognition with Moments Invariant", *Proceedings of the International Conference on Image Processing*, IEEE, vol. 1, 2001.
- [48] Y. Yan, M. Fanty, and R. Cole, "Speech Recognition Using Neural Networks with Forward-backward Probability Generated Targets", *Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 4, 1997.
- [49] D. Rumelhart, B. Widrow, and M. Lehr, "The basic ideas in neural networks", *Communications of the ACM*, vol. 37, no. 3, pp. 87-92, Mar. 1994.
- [50] S. Haykin, *Neural networks, a comprehensive foundation*, Prentice Hall, 1998.
- [51] D. Specht, "Probabilistic neural networks", *Neural Networks*, vol. 3, pp. 109-118, Jan. 1990.
- [52] D. T. Pham and D. Karaboga, *Intelligent optimisation techniques: genetic algorithms, simulated annealing and neural networks*, Springer, 2000.
- [53] I. Alexander and H. Morton, *An introduction to neural computing*, London: Chapman & Hall, 1991.
- [54] J. Hertz, A. Krogh, and R.G. Palmer, "Introduction to the theory of neural computation", in *Lecture Notes*, vol. 1, Santa Fe Institute, Studies in the science of complexity, Redwood City: Addison-Wesley, 1991.

- [55] D. A. Pomerlau, “Knowledge-based training of artificial neural networks for autonomous robot driving”, in *Robot Learning*, J. Comell, S. Mahadevan (Eds.), Boston: Kluwer Academic Publishers, 1993, pp. 19-43.
- [56] S. I. Gallant, “Perceptron-based learning algorithms”, *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 1, no. 2, pp. 179-191, June 1990.
- [57] F. Rosenblatt, “The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain”, *Psychological Review*, vol. 65, no. 6, pp. 386-408, Nov. 1958.
- [58] M. Minsky and S. Papert, *Perceptrons*, Cambridge: MIT Press, 1969.
- [59] K. Gurney, *An Introduction to Neural Networks*, University College London (UCL) Press, 1997.
- [60] A. Cichocki, R. Unbehauen, K. Weinzierl, and R. Holzel, “A new neural network for solving linear programming problems”, *European Journal of Operational Research*, Elsevier, vol. 93, no. 2, pp. 244-256, Sep.1996.
- [61] T. P. Caudell and K. Zikan, “Neural network architecture for linear programming”, *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, IEEE, vol. 3, pp. 91-96, 1992.
- [62] Y. Chauvin and D. Rumelhart, *Backpropagation-Theory, Architectures, and Applications*, United Kingdom: Laurence Erlbaum Associates, Publishers, 1995.
- [63] M. Gori and A. Tesi, “On the problem of local minima in backpropagation”, *IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.14, no.1, pp.76–86, Jan. 1992.
- [64] W. Bi, X. Wang, Z. Tang, and H. Tamura, “Avoiding the Local Minima Problem in Backpropagation Algorithm with Modified Error Function”, *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol. E88-A, no. 12, pp. 3645-3653, Dec. 2005.
- [65] S. Lawrence and C. L. Giles, “Overfitting and Neural Networks: Conjugate Gradient and Backpropagation”, *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*, vol. 1, pp. 1114, 2000.
- [66] M. Defernez and E. K. Kemsley, “Avoiding overfitting in the analysis of high-dimensional data with artificial neural networks”, *Analyst*, Royal Society of Chemistry, vol. 124, no. 11, pp. 1675-1681, 1999.
- [67] L. Hyafil and R. L. Rivest, “Constructing optimal binary decision-trees is NP-Complete”, *Information Processing Letters*, vol. 5, no. 1, pp. 15-17, 1996.

- [68] D. Sieling, “Minimization of decision trees is hard to approximate”, *Proceedings of the 18th IEEE Annual Conference on Computational Complexity*, pp. 84-92, 2003.
- [69] J. Yan, N. Tokuda, and J. Miyamichi, “Simulating Competing Alife Organisms by Constructive Compound Neural Networks”, *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, vol. 1822/2000, pp. 267-279, 2000.
- [70] S. E. Fahlman and C. Lebiere, “The cascade-correlation learning architecture”, *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 2, D. S. Touretzky (Ed.), CA, San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1990.
- [71] J. Judd, *Neural Network Design and the Complexity of Learning*, Cambridge: MIT Press, 1990.
- [72] A. Blum and R. Rivest, “Training a 3-node neural network is NP-complete”, *Proceedings of the Computational Learning Theory Conference*, Morgan Kauffman, pp. 9-18, 1988.
- [73] K. Hoffgen, “Computational limitations on training sigmoidal neural networks”, *Information Proceeding Letters*, vol. 46, no. 6, July 1993.
- [74] J. Sima, “Back-propagation is not efficient”, *Neural Networks*, vol. 9, no. 6, pp. 1017-1023, Aug. 1996.
- [75] L. Jones, “The computational intractability of training sigmoidal neural networks”, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 43, no. 1, pp. 167-173, Jan. 1997.
- [76] D. Heckerman, A. Mandani, and M. Wellman, “Real-world applications of Bayesian networks”, *Communications of the ACM*, vol. 38, no. 3, pp. 24-30, Mar. 1995.
- [77] M. Spiegel, *Probability and Statistics*, McGraw-Hill, 1975.
- [78] Γ. Κοκολάκης και Ι. Σπηλιώτης, *Εισαγωγή στη Θεωρία Πιθανοτήτων και Στατιστική*, Εκδόσεις Συμεών, 1999.
- [79] F. Jensen, *An introduction to Bayesian Networks*, UCL Press, 1996.
- [80] W. Wiegerinck and T. Heskes, “Belief networks / Bayesian networks”, in *Dealing with the data flood: Mining data, text and multimedia*, J. Meij (Ed.), STT/Beweton, 2002, pp. 660-665.
- [81] I. Kononenko, “Inductive and Bayesian learning in medical diagnosis”, *Proceedings of Applied Artificial Intelligence*, vol. 7, no. 4, pp. 317-337, 1993.

- [82] D. Nikovski, "Constructing Bayesian Networks for Medical Diagnosis from Incomplete and Partially Correct Statistics", *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 12, no. 4, pp. 509-516, July 2000.
- [83] J. Berkson, "Limitations of the application of fourfold tables to hospital data", *Biometrics Bulletin*, vol. 2, no. 3, pp. 47-53, Jun. 1946.
- [84] D. Heckerman, "A Tutorial on Learning with Bayesian Networks", Technical Report MSR-TR-95-06, Microsoft Research, 1996.
- [85] W. Buntine, "A guide to the literature on learning probabilistic networks from data", *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 8, no. 2, pp.195-210, Apr. 1996.
- [86] D. MacKay, "Bayesian interpolation", *Neural Computation*, MIT Press, vol. 4, no. 3, pp. 415-447, May 1992.
- [87] C. M. Bishop, *Neural networks for pattern recognition*, Clarendon Press, 1998.
- [88] G. D. Garson, *Neural networks, an introductory guide for social scientists*, SAGE Publications, 1998.
- [89] J. Friedman, "Introduction to computational learning and statistical prediction", Technical Report, Department of Statistics, Stanford University, 1995.
- [90] D. Heckerman and D. Geiger, "Likelihoods and priors for Bayesian networks", Technical Report MSR-TR-95-54, Microsoft Research, 1996.
- [91] D. MacKay, "A practical Bayesian framework for backpropagation networks", *Neural Computation*, vol. 4, pp. 448-472, May 1992.
- [92] A. Raftery, *Hypothesis testing and model selection*, Chapman and Hall, 1996.

Κεφάλαιο 5

Αποτελέσματα προτεινόμενων μεθόδων μηχανικής μάθησης

5 Αποτελέσματα προτεινόμενων μεθόδων μηχανικής μάθησης

5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα εκτέλεσης των μεθόδων μηχανικής μάθησης που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 4. Συγκεκριμένα, υλοποιούνται κατάλληλα οι μέθοδοι μάθησης δέντρων αποφάσεων, τεχνητών νευρωνικών δικτύων καθώς και μπεϋζιανών δικτύων. Η συμπεριφορά των προτεινόμενων μοντέλων παρουσιάζεται υπό το πρίσμα τριών επιλεγμένων σεναρίων καθένα από τα οποία διαιρείται σε τέσσερις υποπεριπτώσεις. Η επιλογή των σεναρίων έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να διαφανεί η συμπεριφορά των μοντέλων όταν λαμβάνουν χώρα τόσο ραγδαίες, παροδικές μεταβολές της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης που προκύπτει από το στάδιο της βασικής συλλογιστικής, όπως αυτή παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, όσο και μόνιμες μεταβολές στην εκτιμώμενη τιμή αυτής. Στόχος είναι η μελέτη της ταχύτητας σύγκλισης των μοντέλων σε μια νέα, μόνιμη κατάσταση καθώς και η δυνατότητα εξομάλυνσης μιας απότομης, μη αντιπροσωπευτικής καταγραφής της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης.

Στις παραγράφους που ακολουθούν θα παρουσιαστεί αρχικά το σύνολο των δεδομένων εκπαίδευσης που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των δέντρων αποφάσεων καθώς και για την μάθηση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου. Στη συνέχεια, θα γίνει αναφορά στα σενάρια που θα χρησιμοποιηθούν για την μελέτη της συμπεριφοράς των προτεινόμενων μοντέλων ενημέρωσης και προσαρμογής. Κατόπιν, θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα μοντέλα που υλοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα αυτών για κάθε μια υποπερίπτωση των εξεταζόμενων σεναρίων. Τέλος, θα γίνει σύγκριση των προαναφερθέντων αποτελεσμάτων και εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων σχετικά με τη δυνατότητα προσαρμογής και την ταχύτητα σύγκλισης.

5.2 Δεδομένα εκπαίδευσης

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4, τα δέντρα αποφάσεων και τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα συνιστούν μεθόδους «επιτηρούμενης» μάθησης, στηρίζοντας τη λειτουργία τους στην εκπαίδευση ή μάθηση τους μέσω δεδομένων εκπαίδευσης. Τα δεδομένα αυτά διαμορφώνουν ουσιαστικά τη συμπεριφορά του μοντέλου καθώς παρέχουν «οδηγίες» για τον τρόπο που πρέπει να αποφανθεί αυτό σε περίπτωση που η είσοδος συνίσταται από συγκεκριμένες καταστάσεις. Η σωστή επιλογή των δεδομένων εκπαίδευσης προσδίδει στο σύστημα την ικανότητα να αντιδρά με τρόπο επιθυμητό σε κάθε πιθανό συνδυασμό εισόδου. Το μέγεθος του συνόλου εκπαίδευσης θα πρέπει να ισορροπεί ανάμεσα αφενός στην απαίτηση για γρήγορη μάθηση και μη υπερβολική προσαρμογή στα δεδομένα εκπαίδευσης και αφετέρου στην ανάγκη για όσο το δυνατόν ακριβέστερη πρόβλεψη.

Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε ένα σύνολο αποτελούμενο από 23 παραδείγματα εκπαίδευσης. Τα παραδείγματα αυτά μπορούν, εν γένει, να καθοριστούν από το διαχειριστή του δικτύου σύμφωνα με προδιαγεγραμμένους κανόνες και πολιτικές ή να εξαχθούν από πραγματικές καταστάσεις του συστήματος για την ορθότητα των οποίων υπάρχει μεγάλος βαθμός σιγουριάς.

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4, για το πρόβλημα υπό θεώρηση, υπάρχουν δύο τύποι στιγμιαίων γνωρισμάτων:

- τα γνωρίσματα ιεράρχησης (σύνολο R)
- η πλέον πρόσφατη εκτίμηση της ενεργούς χωρητικότητας μετάδοσης (e), όπως αυτή προέκυψε από το στάδιο της βασικής συλλογιστικής του γνωστικού κύκλου

Το σύνολο ιεράρχησης R αντικατοπτρίζει τις τρέχουσες κατατάξεις των τιμών αναφοράς. Για παράδειγμα, αν $R=\{2, 1, 3, 4, 5, 6\}$, τότε η τιμή αναφοράς v_1 θεωρείται, τη δεδομένη στιγμή, ως η δεύτερη πιο κοντινή (αφού $r_1=2$) στην πραγματική ενεργό χωρητικότητα μετάδοσης, με την τιμή v_2 ως την πιο κοντινή ($r_2=1$), την τιμή v_3 ως την τρίτη πιο κοντινή ($r_3=3$) κοκ. Από άλλη οπτική γωνία, η κατάταξη αυτή υποδεικνύει το πόσο πιθανό είναι για την αντίστοιχη τιμή αναφοράς να είναι η κοντινότερη στην πραγματική τιμή χωρητικότητας. Στα σενάρια που ακολουθούν, θεωρούνται έξι πιθανές τιμές αναφοράς για την ενεργό χωρητικότητα

μετάδοσης και συγκεκριμένα, θεωρείται $v_1 = 6$ Mbps, $v_2 = 12$ Mbps, $v_3 = 24$ Mbps, $v_4 = 36$ Mbps, $v_5 = 48$ Mbps και $v_6 = 54$ Mbps.

Ως εκ τούτου, το γνώρισμα e λαμβάνει τιμές από το σύνολο $\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ και συγκεκριμένα $e = n$, όπου n η τιμή για την οποία ελαχιστοποιείται η διαφορά $|C_{eff}^* - v_n|$. Συνεπώς η τιμή του γνωρίσματος e υποδηλώνει την τιμή αναφοράς που είναι πλησιέστερη στην εκτιμώμενη ενεργό χωρητικότητα μετάδοσης C_{eff}^* .

Ως γνώρισμα-στόχος, χρησιμοποιείται το σύνολο T , το οποίο, σε αντιστοιχία με το σύνολο R , εκφράζει την επιθυμητή ιεράρχηση των τιμών αναφοράς. Παραδείγματος χάριν, αν $t_1=2$, τότε η τιμή αναφοράς v_1 πρέπει να θεωρείται πλέον ως η δεύτερη πιο κοντινή στην πραγματική τιμή ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης.

Πίνακας 5-1. Σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης

r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	e	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
6	5	4	3	2	1	6	6	5	4	3	2	1
5	3	1	2	4	6	3	5	3	1	2	4	6
5	3	1	2	4	6	4	6	4	2	1	3	5
6	4	2	1	3	5	4	6	4	2	1	3	5
2	1	3	4	5	6	3	3	1	2	4	5	6
1	2	3	4	5	6	4	3	1	2	4	5	6
3	1	2	4	5	6	6	4	2	1	3	5	6
4	2	1	3	5	6	6	6	3	2	1	4	5
6	3	2	1	4	5	6	6	5	2	1	3	4
6	4	5	3	2	1	3	6	5	4	3	1	2
6	5	4	3	1	2	6	6	5	4	3	2	1
6	5	4	3	1	2	4	6	5	4	2	1	3
5	4	1	2	3	6	2	5	3	1	2	4	6
5	3	1	2	4	6	2	3	2	1	4	5	6
2	1	3	4	6	5	1	1	2	3	4	5	6
4	6	5	3	2	1	4	6	5	4	3	1	2
2	1	6	5	4	3	2	2	1	4	3	6	5
1	2	3	5	6	4	4	1	2	3	4	5	6
1	2	4	6	5	3	3	2	1	3	4	6	5
4	2	1	3	5	6	1	2	1	3	4	5	6
6	5	4	3	1	2	5	6	5	4	3	1	2
5	3	1	2	4	6	1	4	2	1	3	5	6

Συνεπώς, ένα παράδειγμα εκπαίδευσης αποτελείται από την τρέχουσα ιεράρχηση R , τη στιγμιαία εκτίμηση e και το σύνολο της επιθυμητής ιεράρχησης T .

Ο Πίνακας 5-1 περιλαμβάνει τα παραδείγματα εκπαίδευσης που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή και εκπαίδευση των δέντρων αποφάσεων και των τεχνητών νευρωνικών δικτύων στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

5.3 Σενάρια εκτέλεσης

Τα σενάρια που περιγράφονται παρακάτω έχουν ως κύριο στόχο να παρουσιάσουν τον τρόπο με τον οποίο τα προτεινόμενα μοντέλα αποφεύγουν τις σποραδικές διακυμάνσεις και συγκλίνουν σε μόνιμες αλλαγές. Θα εξεταστούν τρία επιμέρους σενάρια, κάθε ένα από τα οποία διαφοροποιείται ως προς την απόσταση της στιγμιαίας εκτίμησης e από την τρέχουσα κατά περίπτωση κατάσταση. Σε κάθε σενάριο παρουσιάζονται τέσσερις υποπεριπτώσεις με την κάθε μια να αντιστοιχεί σε διαφορετική χρονική διάρκεια της καταγραφείσας μεταβολής.

5.3.1 Σενάριο A

Υποπερίπτωση A1: Οι τιμές της στιγμιαίας εκτίμησης C_{eff}^* μεταβάλλονται όπως απεικονίζεται στον αντίστοιχο πίνακα (Πίνακας 5-2) ως εξής: {7, 7, 7, 11, 7, 7, 7, 7, ...}. Συνεπώς το γνώρισμα e μεταβάλλεται με τον ακόλουθο τρόπο: {1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, ...}. Με άλλα λόγια, τις τρεις πρώτες χρονικές περιόδους η στιγμιαία εκτιμώμενη ενεργός χωρητικότητα είναι 7 Mbps, στη συνέχεια τη χρονική φάση 3 καταγράφεται μια παροδική μεταβολή της στιγμιαίας εκτίμησης στα 11 Mbps, ενώ η στιγμιαία εκτίμηση επιστρέφει στα 7 Mbps σε κάθε επόμενη στιγμή.

Υποπερίπτωση A2: Οι τιμές της στιγμιαίας εκτίμησης C_{eff}^* μεταβάλλονται όπως απεικονίζεται στον αντίστοιχο πίνακα (Πίνακας 5-2) ως εξής: {7, 7, 7, 11, 11, 11, 7, 7, 7, ...}. Συνεπώς το γνώρισμα e μεταβάλλεται με τον ακόλουθο τρόπο: {1, 1, 1, 2, 2, 2, 1, 1, 1, ...}. Η υποπερίπτωση αυτή διαφοροποιείται από την υποπερίπτωση A1 ως προς τη διάρκεια της παρατηρούμενης μεταβολής. Έτσι, σε αυτήν την περίπτωση, η στιγμιαία εκτίμηση των 11 Mbps καταγράφεται, όχι σε μια, αλλά σε τρεις χρονικές περιόδους, μετά τις οποίες η εκτίμηση επιστρέφει στην τιμή του 1 Mbps. Η

περίπτωση αυτή στοχεύει στην εξέταση της συμπεριφοράς του συστήματος όταν η παρατηρούμενη μεταβολή έχει κάποια σχετική διάρκεια και δεν αφορά μια μεμονωμένη παρατήρηση.

Υποπερίπτωση A3: Στην περίπτωση αυτή η διάρκεια της παρατηρούμενης μεταβολής είναι ακόμα μεγαλύτερη, διαρκώντας έξι χρονικές περιόδους. Στόχος είναι και πάλι, η μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος σε μια κατάσταση που πιθανώς να αποτελεί όχι μια παροδική, αλλά μια νέα μόνιμη κατάσταση. Οι τιμές τις στιγμιαίας εκτίμησης C_{eff}^* μεταβάλλονται όπως απεικονίζεται στον αντίστοιχο πίνακα (Πίνακας 5-2) ως εξής: {7, 7, 7, 11, 11, 11, 11, 11, 11, 7, 7, ...}. Συνεπώς το γνώρισμα e μεταβάλλεται με τον ακόλουθο τρόπο: {1, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 1, 1, ...}.

Υποπερίπτωση A4: Η περίπτωση αυτή στοχεύει να αναδείξει τη συμπεριφορά του συστήματος όταν μια μόνιμη αλλαγή της τρέχουσας κατάστασης λαμβάνει χώρα. Σε αυτήν την περίπτωση είναι επιθυμητή η γρήγορη σύγκλιση του συστήματος στη νέα κατάσταση. Οι τιμές τις στιγμιαίας εκτίμησης C_{eff}^* μεταβάλλονται όπως απεικονίζεται στον αντίστοιχο πίνακα (Πίνακας 5-2) ως εξής: {7, 7, 7, 11, 11, 11, 11, 11, 11, 11, 11, 11, ...}. Συνεπώς το γνώρισμα e μεταβάλλεται με τον ακόλουθο τρόπο: {1, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, ...}.

Πίνακας 5-2. Χρονική αλληλουχία των στιγμιαίων εκτιμήσεων της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης στις υποπεριπτώσεις του σεναρίου A

Time Epoch	Case A1		Case A2		Case A3		Case A4	
	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e
0	7	1	7	1	7	1	7	1
1	7	1	7	1	7	1	7	1
2	7	1	7	1	7	1	7	1
3	11	2	11	2	11	2	11	2
4	7	1	11	2	11	2	11	2
5	7	1	11	2	11	2	11	2
6	7	1	7	1	11	2	11	2
7	7	1	7	1	11	2	11	2
8	7	1	7	1	11	2	11	2
9	7	1	7	1	7	1	11	2
10	7	1	7	1	7	1	11	2
11	7	1	7	1	7	1	11	2
12	7	1	7	1	1	1	11	2

5.3.2 Σενάριο B

Το σενάριο αυτό διαφοροποιείται από το σενάριο A ως προς τη απόκλιση της νέας, παρατηρούμενης τιμής από τη μέχρι τότε επικρατούσα κατάσταση. Συγκεκριμένα, στο σενάριο αυτό η νέα στιγμιαία εκτίμηση αφορά τα 21 Mbps, απέχει περισσότερο από τα 7 Mbps και αντιστοιχεί σε μια διαφορετική τιμή αναφοράς.

Υποπερίπτωση B1: Οι τιμές τις στιγμιαίας εκτίμησης C_{eff}^* μεταβάλλονται όπως απεικονίζεται στον αντίστοιχο πίνακα (Πίνακας 5-3) ως εξής: {7, 7, 7, 21, 7, 7, 7, 7, ...}. Συνεπώς το γνώρισμα e μεταβάλλεται με τον ακόλουθο τρόπο: {1, 1, 1, 3, 1, 1, 1, 1, ...}.

Υποπερίπτωση B2: Οι τιμές τις στιγμιαίας εκτίμησης C_{eff}^* μεταβάλλονται όπως απεικονίζεται στον αντίστοιχο πίνακα (Πίνακας 5-3) ως εξής: {7, 7, 7, 21, 21, 21, 7, 7, 7, ...}. Συνεπώς το γνώρισμα e μεταβάλλεται με τον ακόλουθο τρόπο: {1, 1, 1, 3, 3, 3, 1, 1, 1, ...}..

Υποπερίπτωση B3: Οι τιμές τις στιγμιαίας εκτίμησης C_{eff}^* μεταβάλλονται όπως απεικονίζεται στον αντίστοιχο πίνακα (Πίνακας 5-3) ως εξής: {7, 7, 7, 21, 21, 21, 21, 21, 21, 7, 7, ...}. Συνεπώς το γνώρισμα e μεταβάλλεται με τον ακόλουθο τρόπο: {1, 1, 1, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 1, 1, ...}.

Υποπερίπτωση B4: Οι τιμές τις στιγμιαίας εκτίμησης C_{eff}^* μεταβάλλονται όπως απεικονίζεται στον αντίστοιχο πίνακα (Πίνακας 5-3) ως εξής: {7, 7, 7, 21, 21, 21, 21, 21, 21, 21, 21, 21, 21, ...}. Συνεπώς το γνώρισμα e μεταβάλλεται με τον ακόλουθο τρόπο: {1, 1, 1, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, ...}.

Πίνακας 5-3. Χρονική αλληλουχία των στιγμιαίων εκτιμήσεων της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης στις υποπεριπτώσεις του σεναρίου B

Time Epoch	Case B1		Case B2		Case B3		Case B4	
	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e
0	7	1	7	1	7	1	7	1
1	7	1	7	1	7	1	7	1
2	7	1	7	1	7	1	7	1
3	21	3	21	3	21	3	21	3
4	7	1	21	3	21	3	21	3
5	7	1	21	3	21	3	21	3
6	7	1	7	1	21	3	21	3
7	7	1	7	1	21	3	21	3
8	7	1	7	1	21	3	11	3
9	7	1	7	1	7	1	21	3
10	7	1	7	1	7	1	21	3
11	7	1	7	1	7	1	21	3
12	7	1	7	1	1	1	21	3

5.3.3 Σενάριο C

Το σενάριο αυτό διαφοροποιείται από τα σενάρια A και B καθώς η νέα στιγμιαία εκτίμηση είναι η τιμή των 33 Mbps, απέχοντας ακόμα περισσότερο από την τιμή των 7 Mbps που επικρατεί μέχρι στιγμής.

Υποπερίπτωση C1: Οι τιμές τις στιγμιαίας εκτίμησης C_{eff}^* μεταβάλλονται όπως απεικονίζεται στον αντίστοιχο πίνακα (Πίνακας 5-4) ως εξής: {7, 7, 7, 33, 7, 7, 7, 7, ...}. Συνεπώς το γνώρισμα e μεταβάλλεται με τον ακόλουθο τρόπο: {1, 1, 1, 4, 1, 1, 1, 1, ...}.

Υποπερίπτωση C2: Οι τιμές τις στιγμιαίας εκτίμησης C_{eff}^* μεταβάλλονται όπως απεικονίζεται στον αντίστοιχο πίνακα (Πίνακας 5-4) ως εξής: {7, 7, 7, 33, 33, 33, 7, 7, 7, ...}. Συνεπώς το γνώρισμα e μεταβάλλεται με τον ακόλουθο τρόπο: {1, 1, 1, 4, 4, 4, 1, 1, 1, ...}.

Υποπερίπτωση C3: Οι τιμές τις στιγμιαίας εκτίμησης C_{eff}^* μεταβάλλονται όπως απεικονίζεται στον αντίστοιχο πίνακα (Πίνακας 5-4) ως εξής: {7, 7, 7, 33, 33, 33, 33, 33, 33, 7, 7, ...}. Συνεπώς το γνώρισμα e μεταβάλλεται με τον ακόλουθο τρόπο: {1, 1, 1, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 1, 1, ...}.

Υποπερίπτωση C4: Οι τιμές τις στιγμιαίας εκτίμησης C_{eff}^* μεταβάλλονται όπως απεικονίζεται στον αντίστοιχο πίνακα (Πίνακας 5-4) ως εξής: {7, 7, 7, 33, 33, 33, 33, 33, 33, 33, 33, 33, ...}. Συνεπώς το γνώρισμα e μεταβάλλεται με τον ακόλουθο τρόπο: {1, 1, 1, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, ...}.

Πίνακας 5-4. Χρονική αλληλουχία των στιγμιαίων εκτιμήσεων της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης στις υποπεριπτώσεις του σεναρίου C

Time Epoch	Case C1		Case C2		Case C3		Case C4	
	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e
0	7	1	7	1	7	1	7	1
1	7	1	7	1	7	1	7	1
2	7	1	7	1	7	1	7	1
3	33	4	33	4	33	4	33	4
4	7	1	33	4	33	4	33	4
5	7	1	33	4	33	4	33	4
6	7	1	7	1	33	4	33	4
7	7	1	7	1	33	4	33	4
8	7	1	7	1	33	4	33	4
9	7	1	7	1	7	1	33	4
10	7	1	7	1	7	1	33	4
11	7	1	7	1	7	1	33	4
12	7	1	7	1	1	1	33	4

Κατά την εκτέλεση των σεναρίων, ως αρχική κατάσταση θεωρείται η {3, 3, 3, 3, 3, 3}. Η κατάσταση αυτή, προφανώς δεν αντιστοιχεί σε μια ρεαλιστική κατάσταση αλλά χρησιμοποιείται για να εκφράσει το γεγονός ότι, αρχικά, όλες οι τιμές αναφοράς θεωρούνται ισοπίθανες.

5.4 Δέντρα αποφάσεων

5.4.1 Παράμετροι μοντέλου

Η μοντελοποίηση του προβλήματος αξιόπιστης εκτίμησης της ενεργούς χωρητικότητας μετάδοσης μια υποψήφιας διάρθρωσης κάνοντας χρήση της τεχνικής δέντρων αποφάσεων παρουσιάστηκε αναλυτικά στην παράγραφο του κεφαλαίου. Στο τμήμα που ακολουθεί θα παρουσιαστεί μια υλοποίηση του προτεινόμενου μοντέλου κατασκευάζοντας δυαδικά δέντρα με χρήση του εργαλείου DTREG, λογισμικού εμπορικής χρήσης για τη κατασκευή μοντέλων πρόγνωσης και πρόβλεψης.

Η κατασκευή των δέντρων αποφάσεων πραγματοποιήθηκε βάσει των παραμέτρων που παρουσιάζονται στον αντίστοιχο πίνακα (Πίνακας 5-5):

Πίνακας 5-5. Παράμετροι κατασκευής μοντέλου δέντρων αποφάσεων

Τύπος μοντέλου	Δυαδικό δέντρο
Αριθμός μεταβλητών πρόγνωσης	7
Μέγιστος αριθμός επιπέδων	10
Τύπος ανάλυσης	Ταξινόμηση
Αλγόριθμος διαχωρισμού	Εντροπία
Ελάχιστος αριθμός παραδειγμάτων εκπαίδευσης στον κόμβο ώστε να επιτραπεί διαχωρισμός	2
Κόστη λανθασμένης ταξινόμησης	Ομοιόμορφα
Κριτήριο «κλαδέματος»	Κανένα «κλάδεμα»
Μέθοδος επικύρωσης	Διασταυρωμένη επικύρωση (cross validation)
Αριθμός αναδιπλώσεων διασταυρωμένης επικύρωσης	10

Επιπλέον, στη μεταβλητή e αποδόθηκε βάρος 100% σε αντίθεση με τις υπόλοιπες μεταβλητές πρόβλεψης $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6$ στις οποίες αποδόθηκε βάρος 75%. Η επιλογή αυτή έγινε έτσι ώστε κατά την κατασκευή των δέντρων η μεταβλητή e να

έχει μεγαλύτερη βαρύτητα των διαχωρισμό, καθώς η απόδοση ιδιαίτερου βάρους στην στιγμιαία εκτίμηση αποτελεί μια φυσική και λογική προσέγγιση.

Επιπρόσθετα, σε περίπτωση απόδοσης ίδιας τιμής σε δύο μεταβλητές-στόχους, π.χ. $t_1=1$ και $t_2=1$, επιλέγεται ως επικρατέστερη η πλησιέστερη στην στιγμιαία εκτίμηση τιμή. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα αν $e=1$ επιλέγεται η ιεράρχηση $t_1=1$ και $t_2=2$ αντίστοιχα.

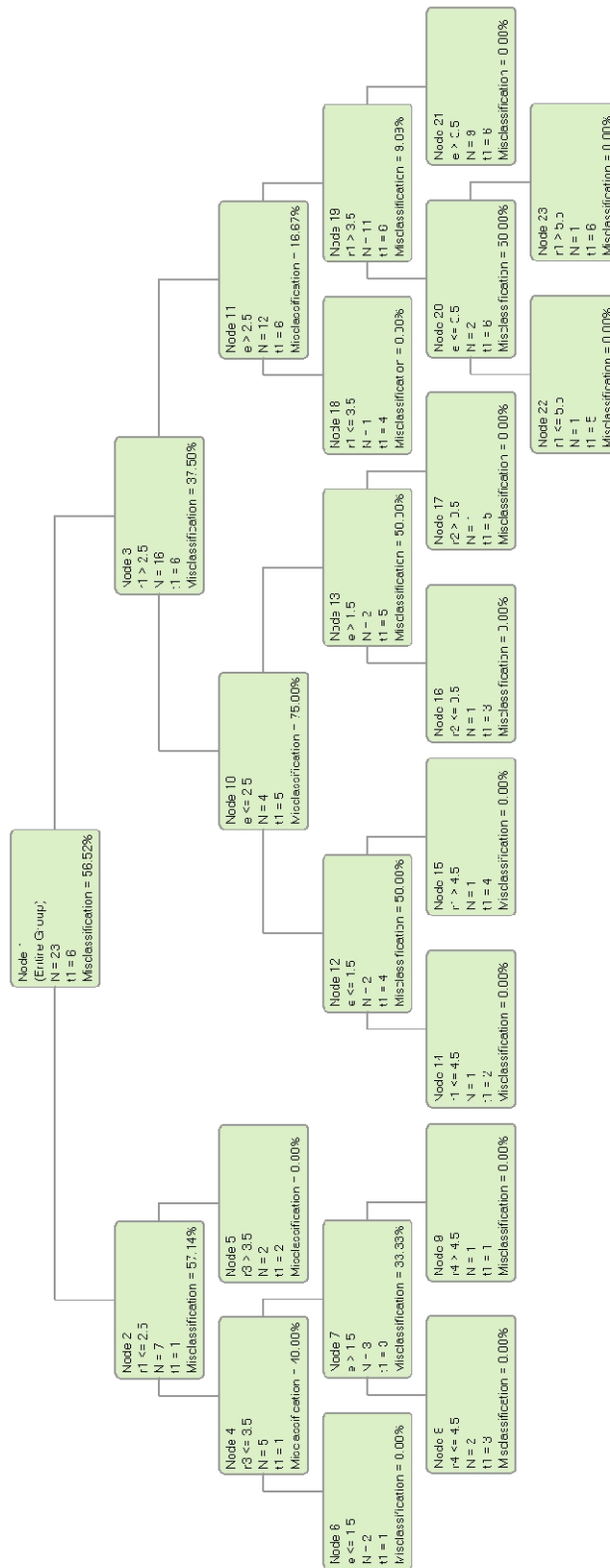
Τα δέντρα αποφάσεων που προέκυψαν βάσει των παραδειγμάτων εκπαίδευσης του πίνακα για κάθε μια από τις μεταβλητές-στόχους $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$ παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-2, Σχήμα 5-3, Σχήμα 5-4, Σχήμα 5-5, Σχήμα 5-6 και Σχήμα 5-7 αντίστοιχα.

Κάθε δέντρο αποτελείται από ένα σύνολο κόμβων, σαν αυτόν που απεικονίζεται στο Σχήμα 5-1 και περιλαμβάνει τις εξής πληροφορίες:

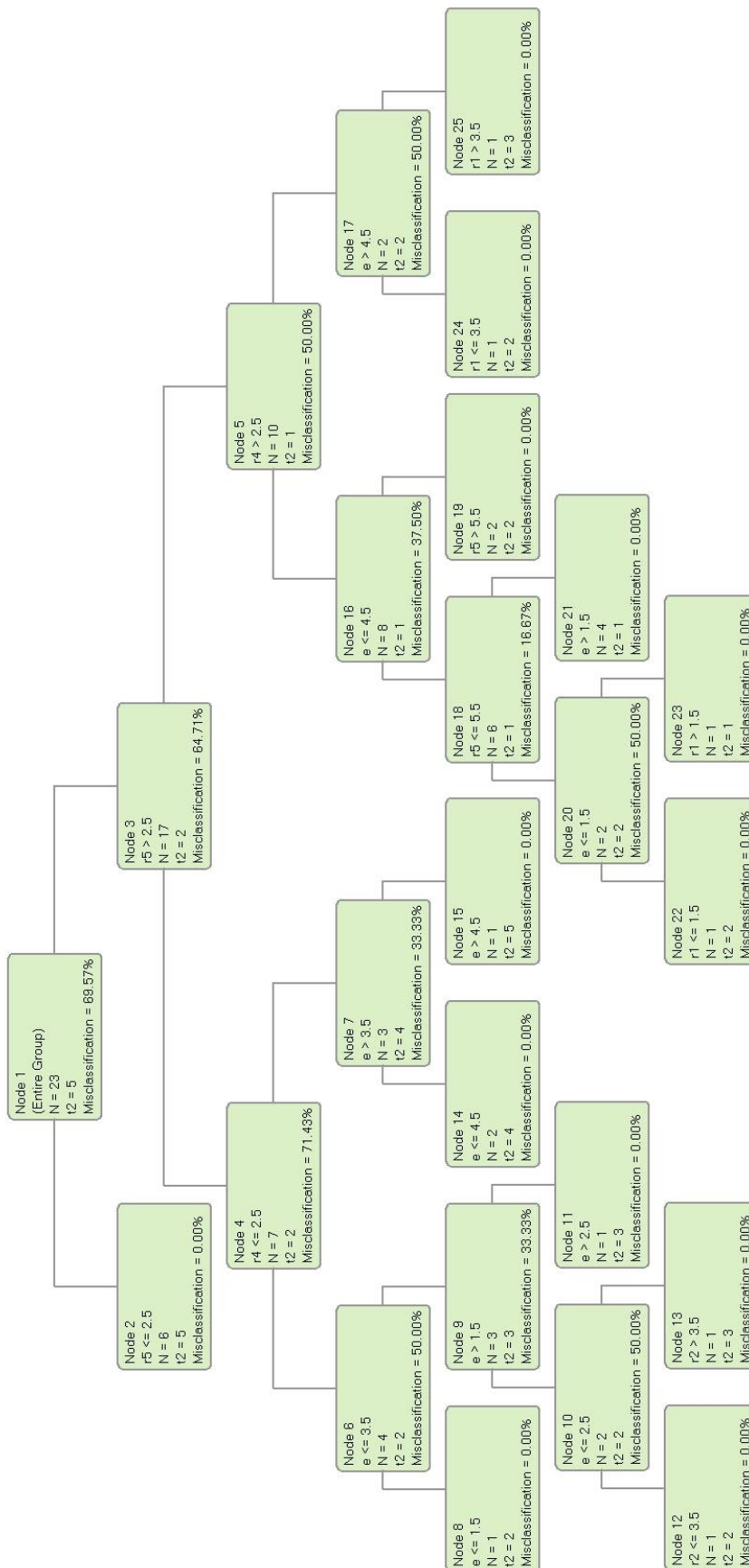
```
Node 12
r1 <= 4.5
N = 1
t5 = 4
Misclassification = 0.00%
```

Σχήμα 5-1. Παράδειγμα κόμβου δέντρου αποφάσεων

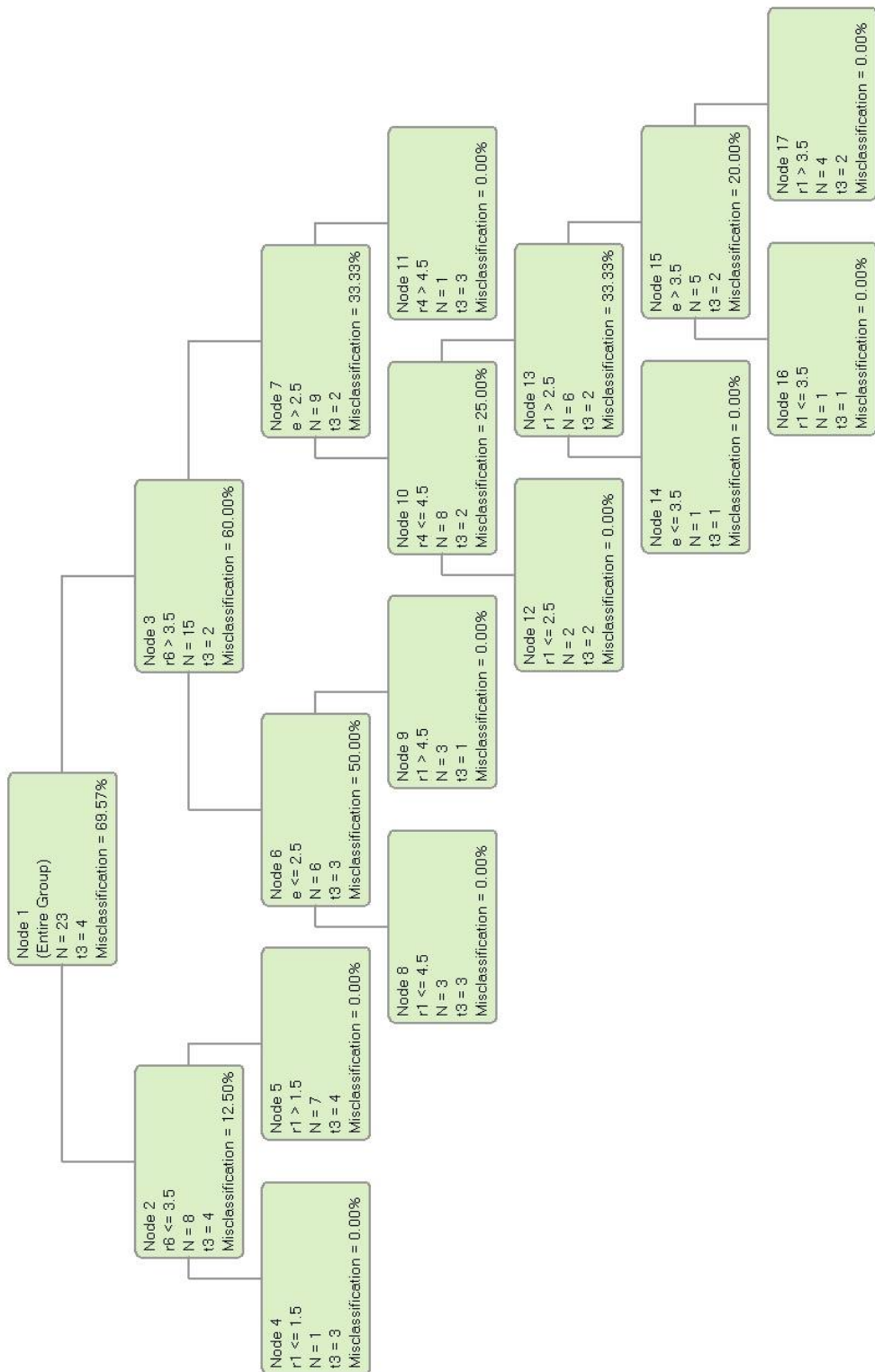
- Τον αύξοντα αριθμό του κόμβου
- Την προγνωστική μεταβλητή που χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό
- Τον αριθμό των παραδειγμάτων εκπαίδευσης που αντιστοιχούν στο συγκεκριμένο κόμβο
- Την μεταβλητή-στόχο και την κατάταξη της
- Το ποσοστό των παραδειγμάτων εκπαίδευσης που ταξινομούνται λανθασμένα από αυτόν τον κόμβο



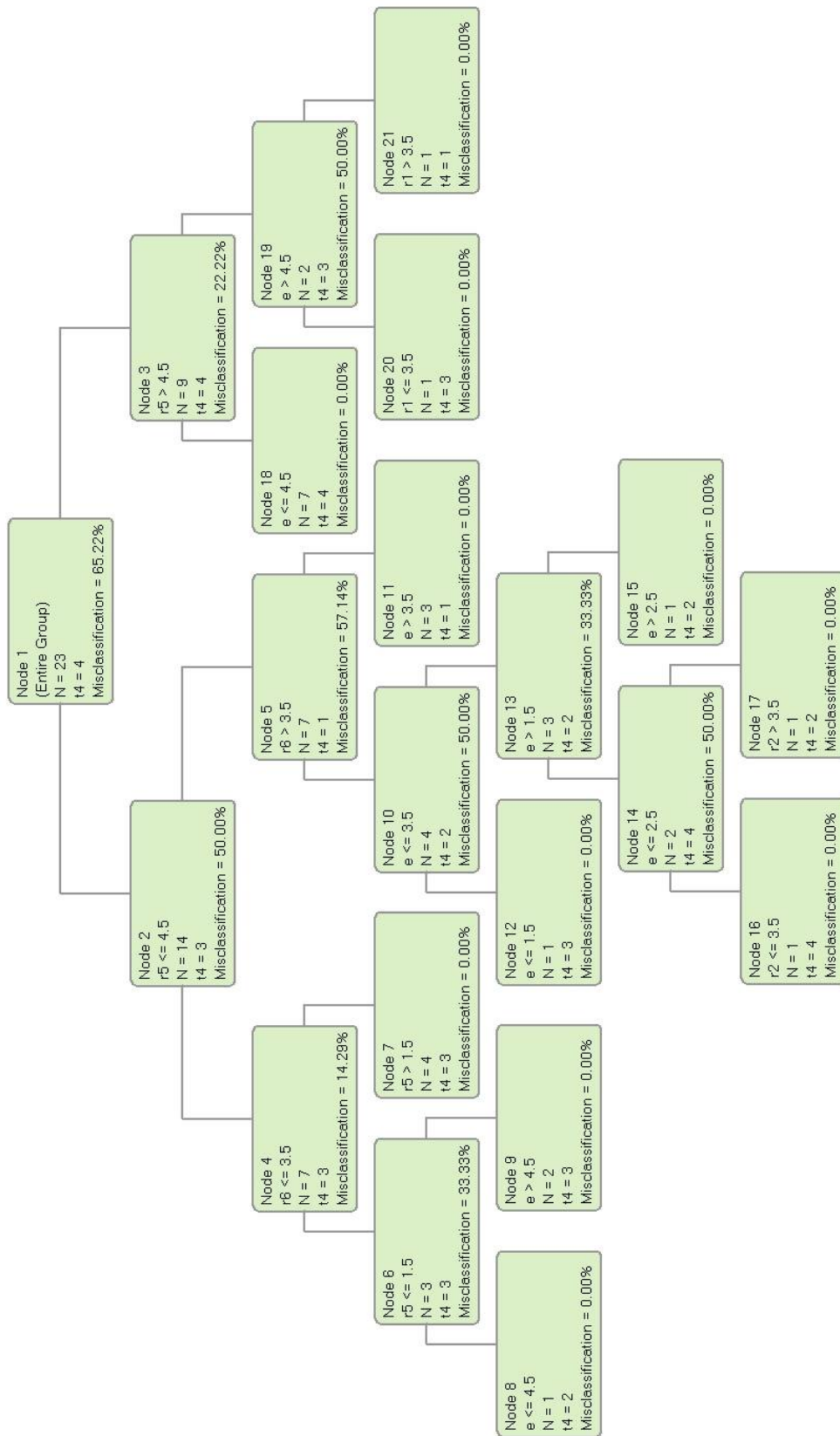
Σχήμα 5-2. Δέντρο αποφάσεων για προσδιορισμό της μεταβλητής t_1



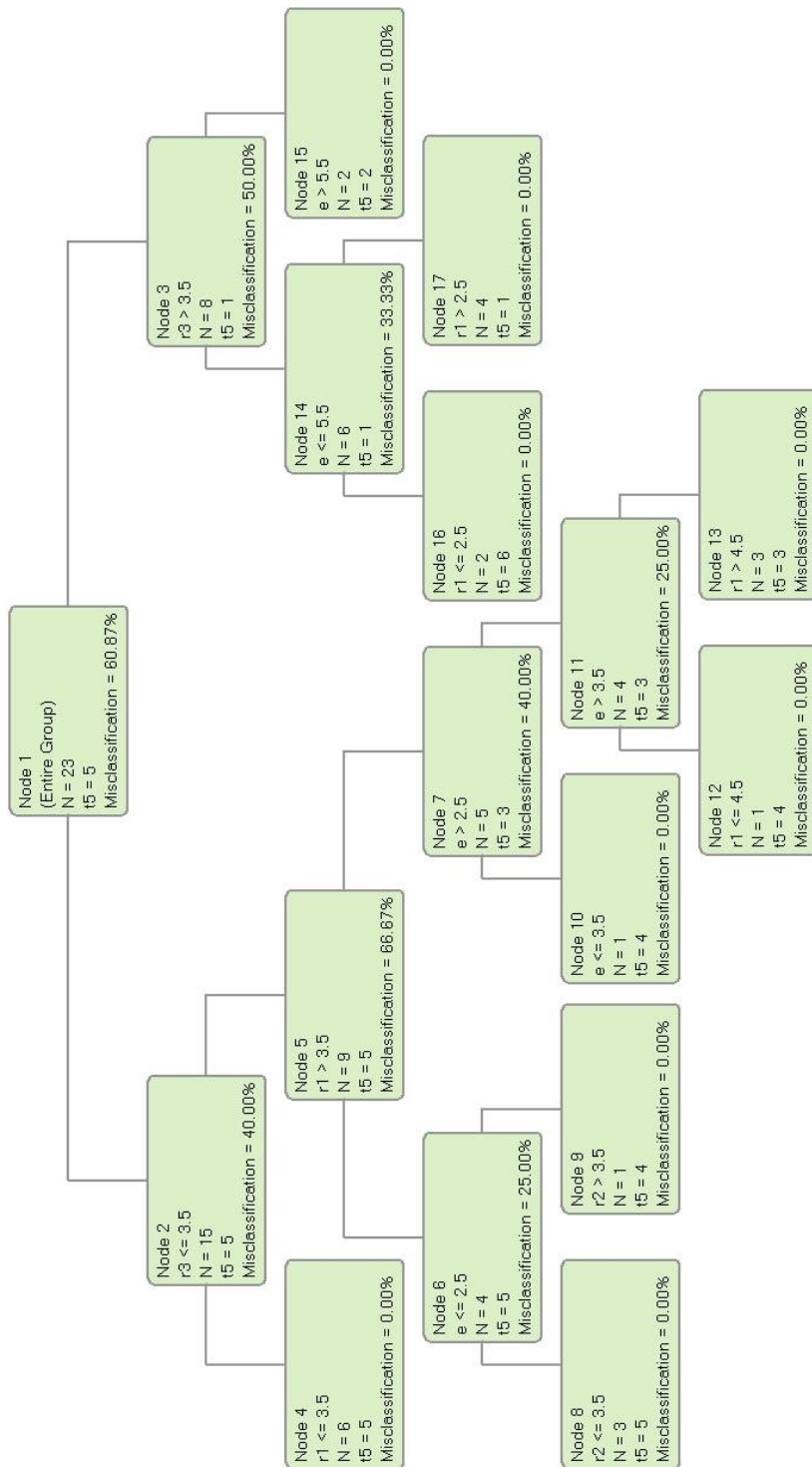
Σχήμα 5-3. Δέντρο αποφάσεων για προσδιορισμό της μεταβλητής t_2



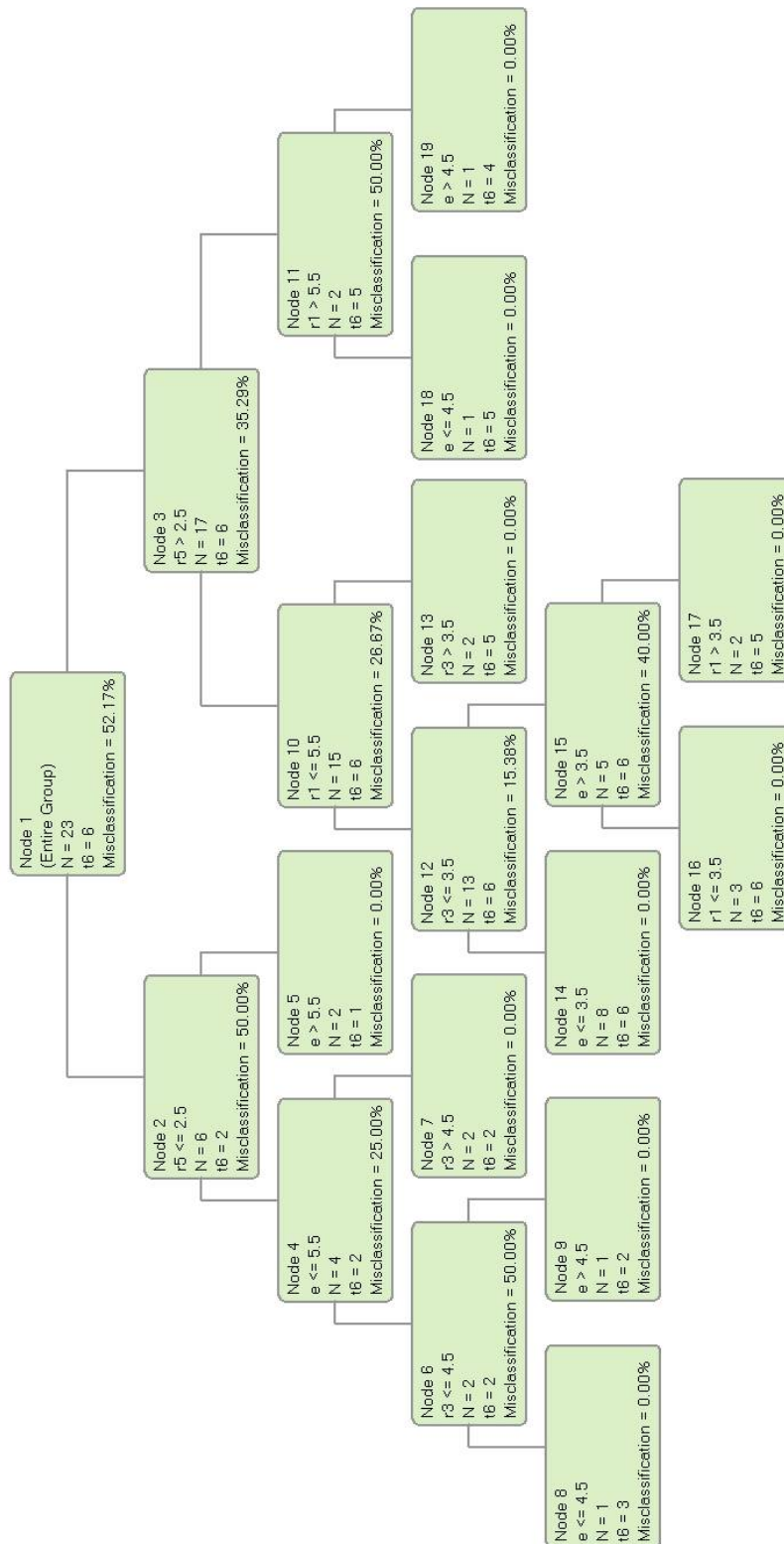
Σχήμα 5-4. Δέντρο αποφάσεων για προσδιορισμό της μεταβλητής t_3



Σχήμα 5-5. Δέντρο αποφάσεων για προσδιορισμό της μεταβλητής t_4



Σχήμα 5-6. Δέντρο αποφάσεων για προσδιορισμό της μεταβλητής t_5



Σχήμα 5-7. Δέντρο αποφάσεων για προσδιορισμό της μεταβλητής t_6

5.4.2 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν μέσω των παραπάνω δέντρων αποφάσεων, για κάθε μια από τις προαναφερθείσες υποπερίπτώσεις των σεναρίων Α, Β και C παρουσιάζονται αναλυτικά στους πίνακες που ακολουθούν (Πίνακας 5-6 έως Πίνακας 5-17).

Πίνακας 5-6. Έξοδος του μοντέλου δέντρων αποφάσεων σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης Α1

Time Epoch	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	e	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
0	3	3	3	3	3	3	1	2	1	4	3	5	6
1	2	1	4	3	5	6	1	2	1	3	4	5	6
2	2	1	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
4	2	1	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
5	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
6	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
7	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
8	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
9	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
10	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
11	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
12	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6

Πίνακας 5-7. Έξοδος του μοντέλου δέντρων αποφάσεων σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης Α2

Time Epoch	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	e	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
0	3	3	3	3	3	3	1	2	1	4	3	5	6
1	2	1	4	3	5	6	1	2	1	3	4	5	6
2	2	1	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
4	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
5	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
6	2	1	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
7	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
8	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
9	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
10	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
11	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
12	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6

Πίνακας 5-8. Έξοδος του μοντέλου δέντρων αποφάσεων σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης A3

Time Epoch	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	e	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
0	3	3	3	3	3	3	1	2	1	4	3	5	6
1	2	1	4	3	5	6	1	2	1	3	4	5	6
2	2	1	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
4	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
5	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
6	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
7	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
8	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
9	2	1	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
10	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
11	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
12	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6

Πίνακας 5-9. Έξοδος του μοντέλου δέντρων αποφάσεων σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης A4

Time Epoch	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	e	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
0	3	3	3	3	3	3	1	2	1	4	3	5	6
1	2	1	4	3	5	6	1	2	1	3	4	5	6
2	2	1	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
4	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
5	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
6	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
7	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
8	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
9	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
10	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
11	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
12	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6

Πίνακας 5-10. Έξοδος του μοντέλου δέντρων αποφάσεων σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης B1

Time Epoch	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	e	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
0	3	3	3	3	3	3	1	2	1	4	3	5	6
1	2	1	4	3	5	6	1	2	1	3	4	5	6
2	2	1	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	3	3	1	2	4	5	6
4	3	1	2	4	5	6	1	2	1	3	4	5	6
5	2	1	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
6	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
7	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
8	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
9	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
10	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
11	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
12	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6

Πίνακας 5-11. Έξοδος του μοντέλου δέντρων αποφάσεων σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης B2

Time Epoch	r ₁	r ₂	r ₃	r ₄	r ₅	r ₆	e	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆
0	3	3	3	3	3	3	1	2	1	4	3	5	6
1	2	1	4	3	5	6	1	2	1	3	4	5	6
2	2	1	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	3	3	1	2	4	5	6
4	3	1	2	4	5	6	3	4	2	1	3	5	6
5	4	2	1	3	5	6	3	5	2	1	3	4	6
6	5	2	1	3	4	6	1	4	1	2	3	5	6
7	4	1	2	3	5	6	1	2	1	3	4	5	6
8	2	1	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
9	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
10	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
11	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
12	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6

Πίνακας 5-12. Έξοδος του μοντέλου δέντρων αποφάσεων σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης B3

Time Epoch	r ₁	r ₂	r ₃	r ₄	r ₅	r ₆	e	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆
0	3	3	3	3	3	3	1	2	1	4	3	5	6
1	2	1	4	3	5	6	1	2	1	3	4	5	6
2	2	1	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	3	3	1	2	4	5	6
4	3	1	2	4	5	6	3	4	2	1	3	5	6
5	4	2	1	3	5	6	3	5	2	1	3	4	6
6	5	2	1	3	4	6	3	5	2	1	3	4	6
7	5	2	1	3	4	6	3	5	2	1	3	4	6
8	5	2	1	3	4	6	3	5	2	1	3	4	6
9	5	2	1	3	4	6	1	4	1	2	3	5	6
10	4	1	2	3	5	6	1	2	1	3	4	5	6
11	2	1	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
12	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6

Πίνακας 5-13. Έξοδος του μοντέλου δέντρων αποφάσεων σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης B4

Time Epoch	r ₁	r ₂	r ₃	r ₄	r ₅	r ₆	e	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆
0	3	3	3	3	3	3	1	2	1	4	3	5	6
1	2	1	4	3	5	6	1	2	1	3	4	5	6
2	2	1	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	3	3	1	2	4	5	6
4	3	1	2	4	5	6	3	4	2	1	3	5	6
5	4	2	1	3	5	6	3	5	2	1	3	4	6
6	5	2	1	3	4	6	3	5	2	1	3	4	6
7	5	2	1	3	4	6	3	5	2	1	3	4	6
8	5	2	1	3	4	6	3	5	2	1	3	4	6
9	5	2	1	3	4	6	3	5	2	1	3	4	6
10	5	2	1	3	4	6	3	5	2	1	3	4	6
11	5	2	1	3	4	6	3	5	2	1	3	4	6
12	5	2	1	3	4	6	3	5	2	1	3	4	6

Πίνακας 5-14. Έξοδος του μοντέλου δέντρων αποφάσεων σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης C1

Time Epoch	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	e	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
0	3	3	3	3	3	3	1	2	1	4	3	5	6
1	2	1	4	3	5	6	1	2	1	3	4	5	6
2	2	1	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	4	3	1	2	4	5	6
4	3	1	2	4	5	6	1	2	1	3	4	5	6
5	2	1	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
6	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
7	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
8	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
9	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
10	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
11	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
12	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6

Πίνακας 5-15. Έξοδος του μοντέλου δέντρων αποφάσεων σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης C2

Time Epoch	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	e	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
0	3	3	3	3	3	3	1	2	1	4	3	5	6
1	2	1	4	3	5	6	1	2	1	3	4	5	6
2	2	1	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	4	3	1	2	4	5	6
4	3	1	2	4	5	6	4	4	2	1	3	5	6
5	4	2	1	3	5	6	4	6	1	2	4	3	5
6	6	1	2	4	3	5	1	4	1	2	3	5	6
7	4	1	2	3	5	6	1	2	1	3	4	5	6
8	2	1	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
9	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
10	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
11	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
12	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6

Πίνακας 5-16. Έξοδος του μοντέλου δέντρων αποφάσεων σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης C3

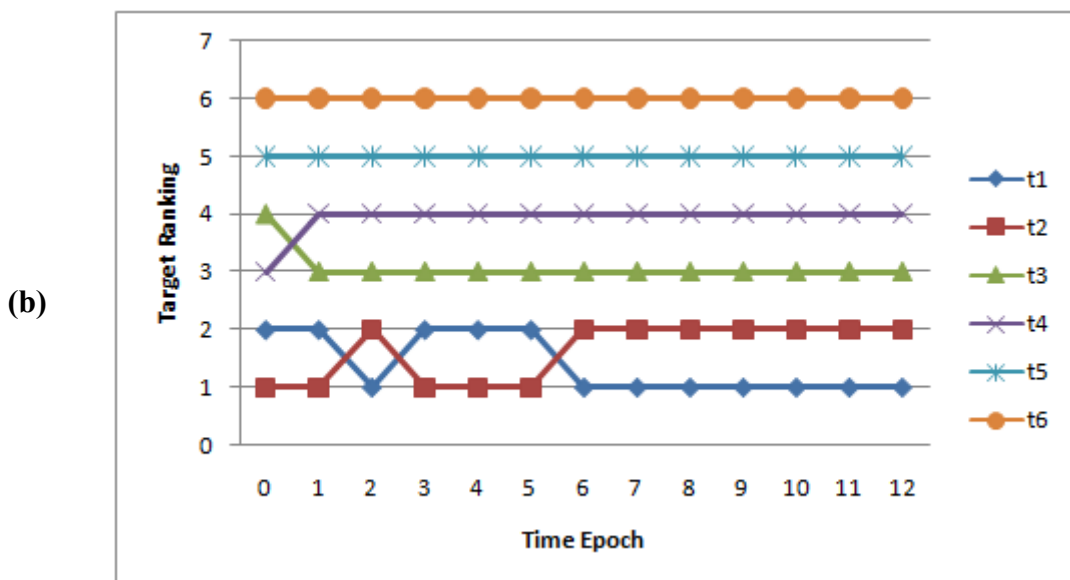
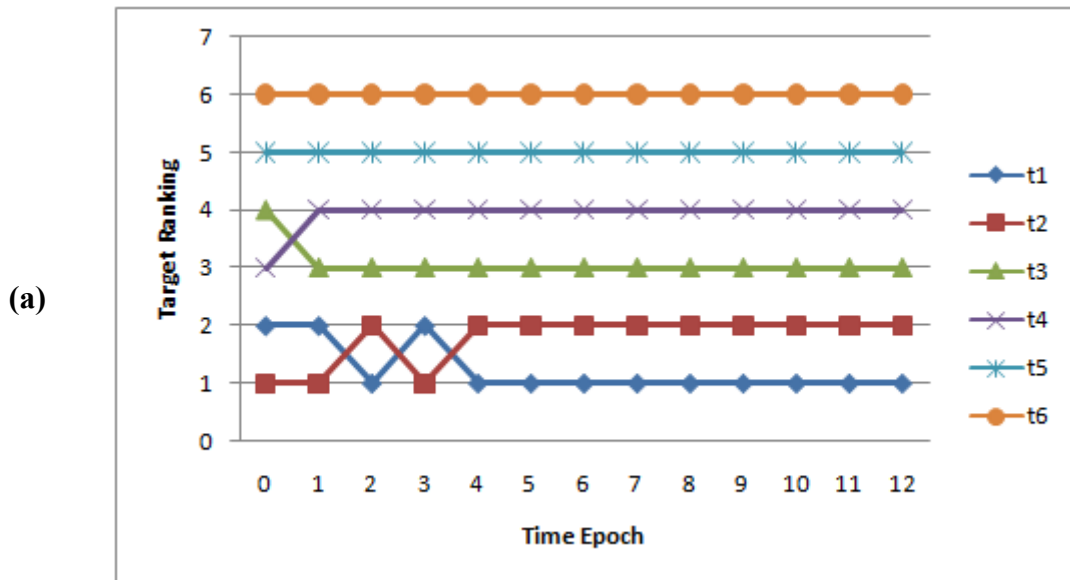
Time Epoch	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	e	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
0	3	3	3	3	3	3	1	2	1	4	3	5	6
1	2	1	4	3	5	6	1	2	1	3	4	5	6
2	2	1	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	4	3	1	2	4	5	6
4	3	1	2	4	5	6	4	4	2	1	3	5	6
5	4	2	1	3	5	6	4	6	1	2	4	3	5
6	6	1	2	4	3	5	4	6	4	2	1	3	5
7	6	4	2	1	3	5	4	6	4	2	1	3	5
8	6	4	2	1	3	5	4	6	4	2	1	3	5
9	6	4	2	1	3	5	1	5	2	1	3	4	6
10	5	2	1	3	4	6	1	4	1	2	3	5	6
11	4	1	2	3	5	6	1	2	1	3	4	5	6
12	2	1	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6

Πίνακας 5-17. Έξοδος του μοντέλου δέντρων αποφάσεων σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης C4

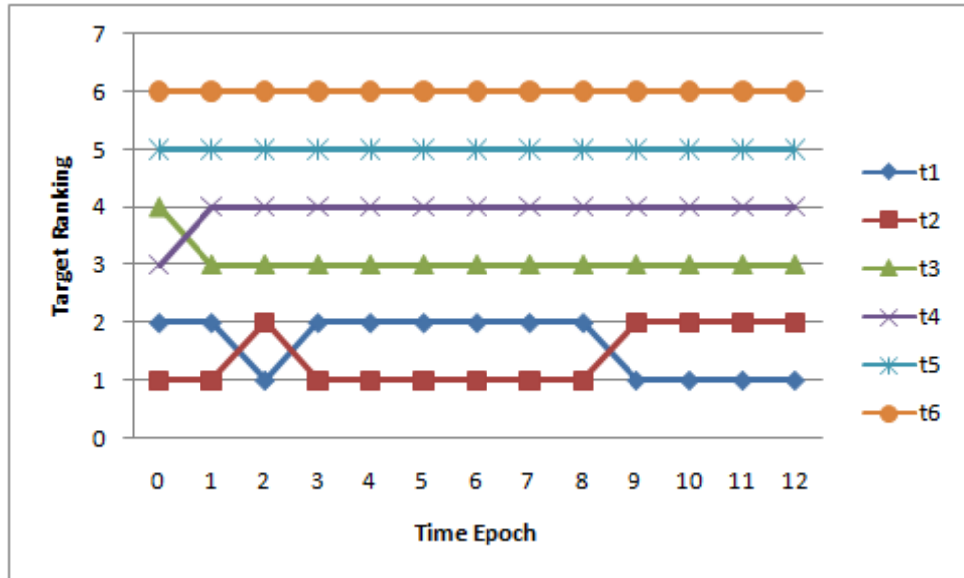
Time Epoch	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	e	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
0	3	3	3	3	3	3	1	2	1	4	3	5	6
1	2	1	4	3	5	6	1	2	1	3	4	5	6
2	2	1	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	4	3	1	2	4	5	6
4	3	1	2	4	5	6	4	4	2	1	3	5	6
5	4	2	1	3	5	6	4	6	1	2	4	3	5
6	6	1	2	4	3	5	4	6	4	2	1	3	5
7	6	4	2	1	3	5	4	6	4	2	1	3	5
8	6	4	2	1	3	5	4	6	4	2	1	3	5
9	6	4	2	1	3	5	4	6	4	2	1	3	5
10	6	4	2	1	3	5	4	6	4	2	1	3	5
11	6	4	2	1	3	5	4	6	4	2	1	3	5
12	6	4	2	1	3	5	4	6	4	2	1	3	5

Εποπτικά, η ιεράρχηση των τιμών αναφοράς σε κάθε χρονική στιγμή παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-8, Σχήμα 5-9 και Σχήμα 5-10.

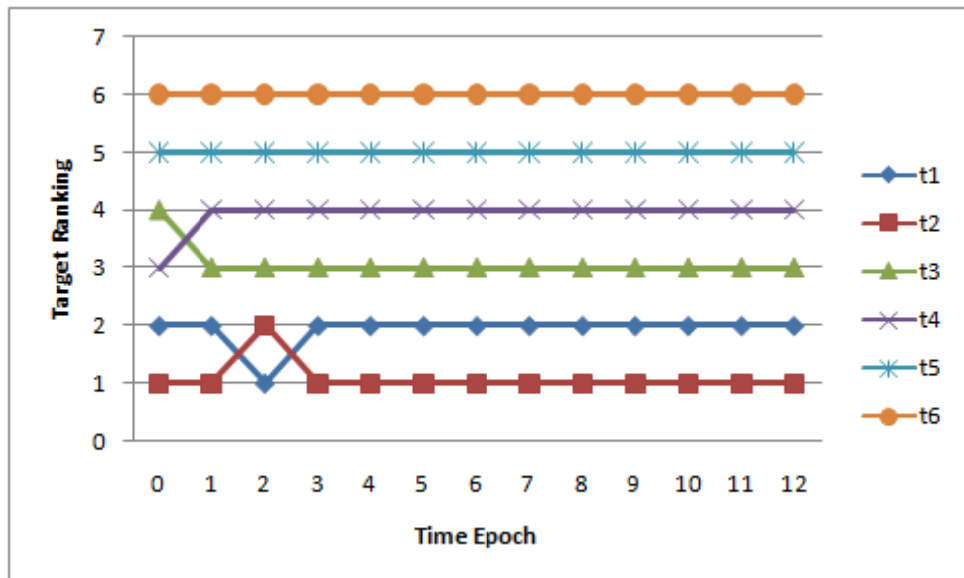
Time Epoch	Case A1		Case A2		Case A3		Case A4	
	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e
0	7	1	7	1	7	1	7	1
1	7	1	7	1	7	1	7	1
2	7	1	7	1	7	1	7	1
3	11	2	11	2	11	2	11	2
4	7	1	11	2	11	2	11	2
5	7	1	11	2	11	2	11	2
6	7	1	7	1	11	2	11	2
7	7	1	7	1	11	2	11	2
8	7	1	7	1	11	2	11	2
9	7	1	7	1	7	1	11	2
10	7	1	7	1	7	1	11	2
11	7	1	7	1	7	1	11	2
12	7	1	7	1	1	1	11	2



(c)

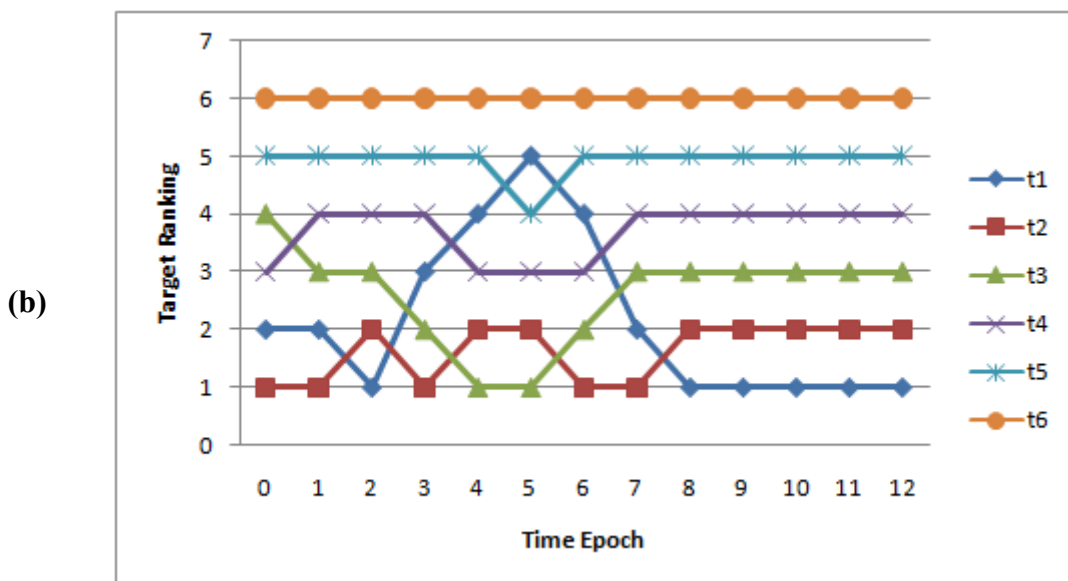
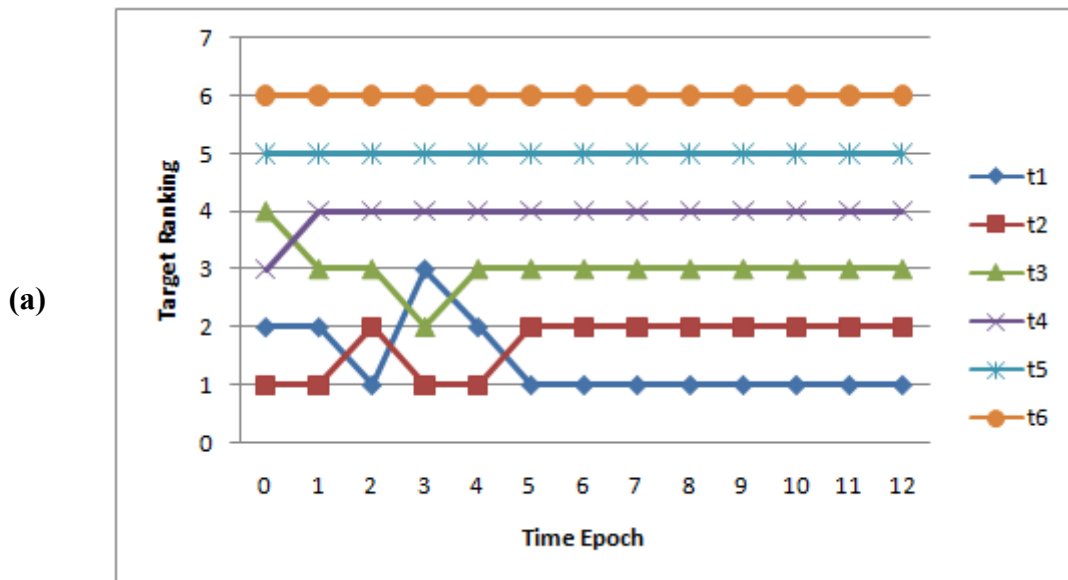


(d)

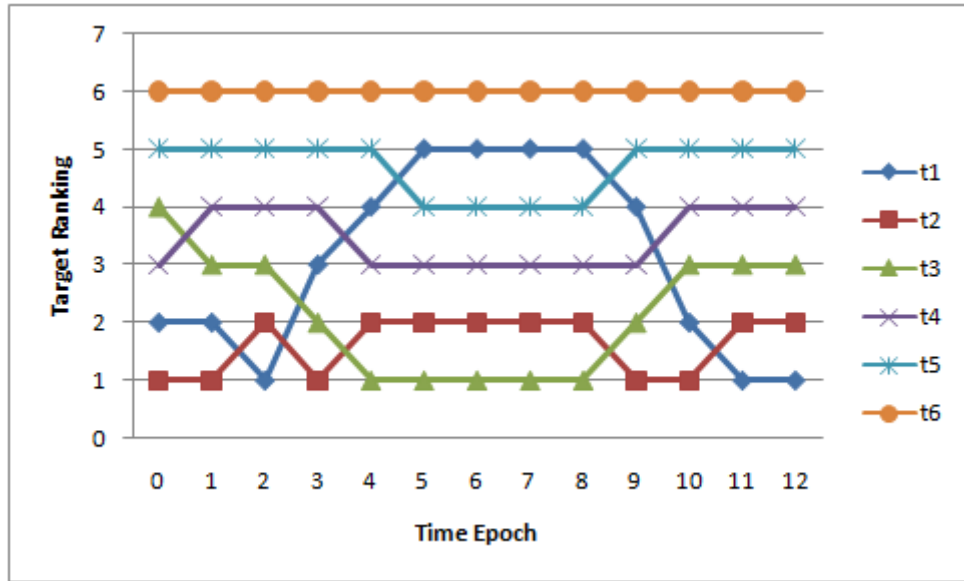


Σχήμα 5-8. Χρονική εξέλιξη των τιμών των μεταβλητών ιεράρχησης μέσω του μοντέλου δέντρων αποφάσεων στην (a) υποπερίπτωση A1; (b) υποπερίπτωση A2; (c) υποπερίπτωση A3; και (d) υποπερίπτωση A4

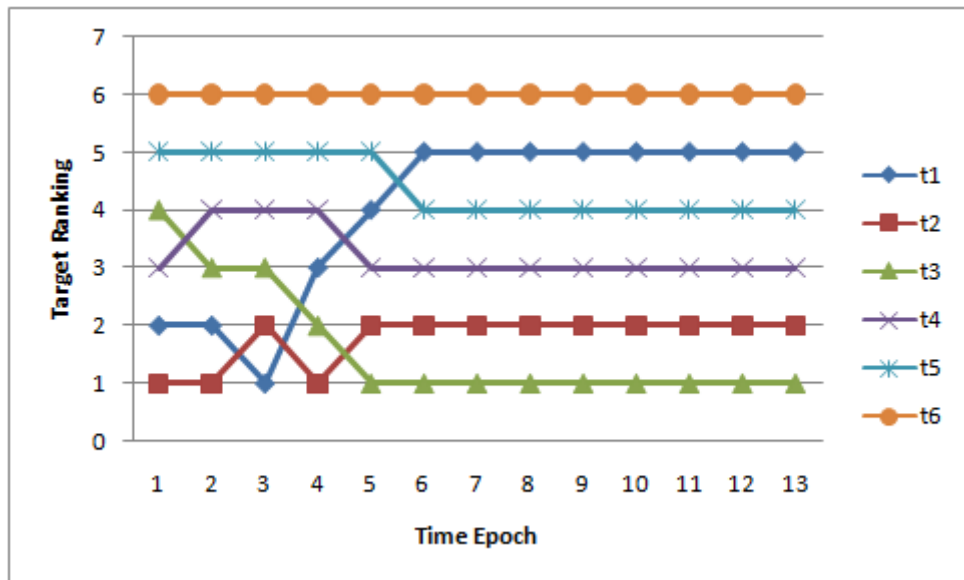
Time Epoch	Case B1		Case B2		Case B3		Case B4	
	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e
0	7	1	7	1	7	1	7	1
1	7	1	7	1	7	1	7	1
2	7	1	7	1	7	1	7	1
3	21	3	21	3	21	3	21	3
4	7	1	21	3	21	3	21	3
5	7	1	21	3	21	3	21	3
6	7	1	7	1	21	3	21	3
7	7	1	7	1	21	3	21	3
8	7	1	7	1	21	3	11	3
9	7	1	7	1	7	1	21	3
10	7	1	7	1	7	1	21	3
11	7	1	7	1	7	1	21	3
12	7	1	7	1	1	1	21	3



(c)

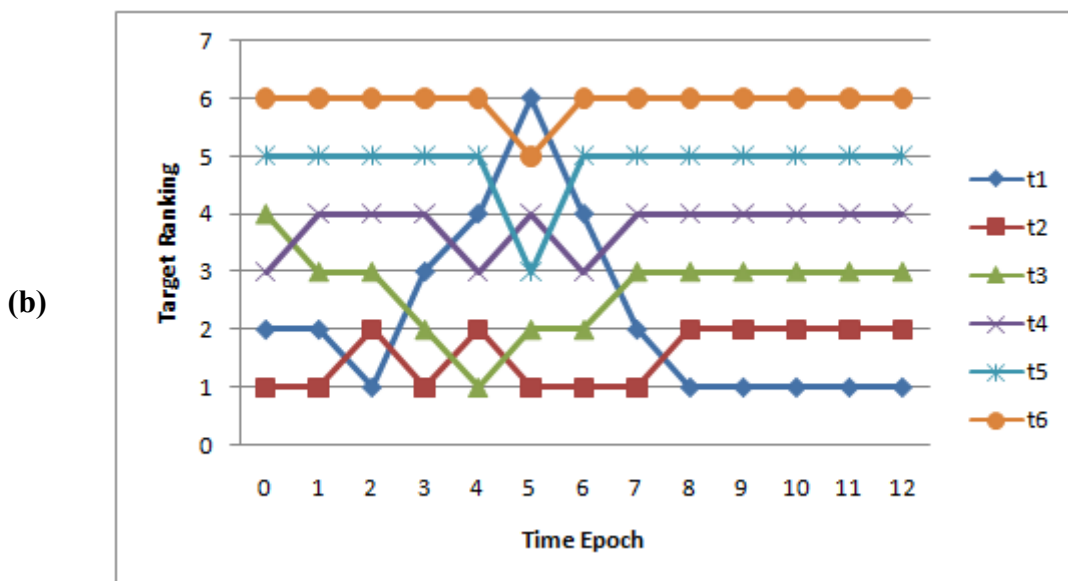
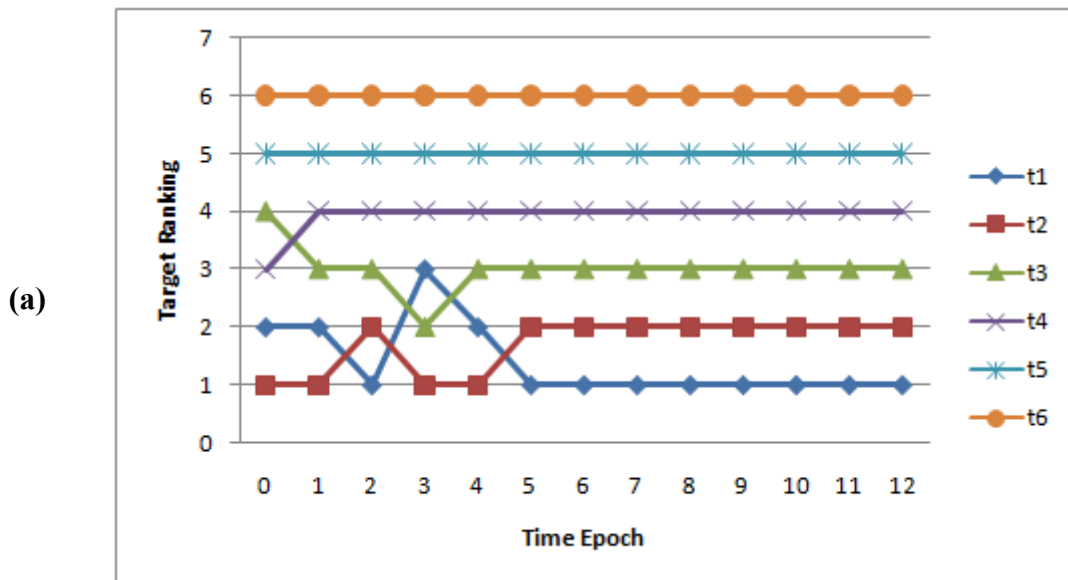


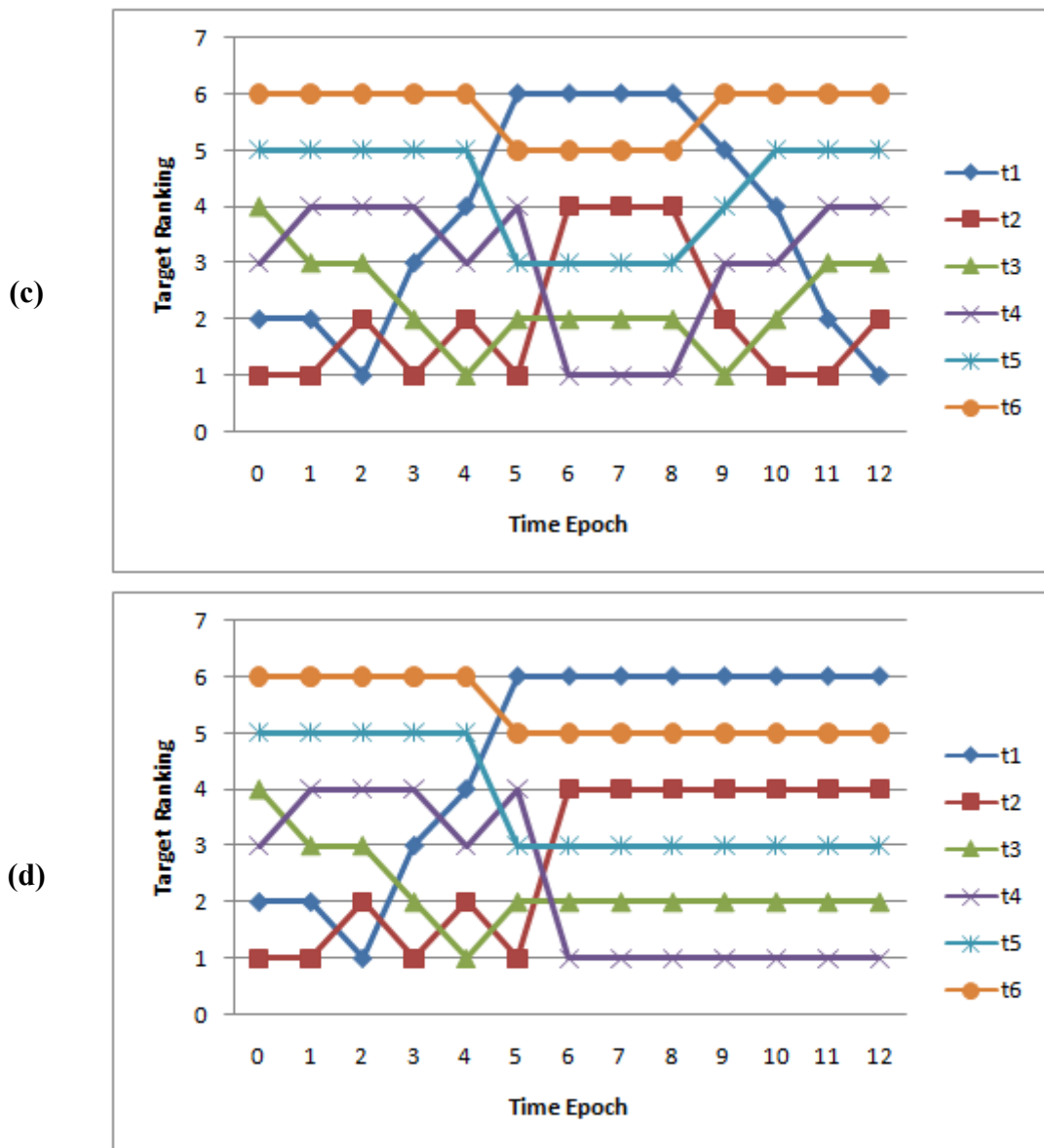
(d)



Σχήμα 5-9. Χρονική εξέλιξη των τιμών των μεταβλητών ιεράρχησης μέσω του μοντέλου δέντρων αποφάσεων στην (a) υποπερίπτωση B1; (b) υποπερίπτωση B2; (c) υποπερίπτωση B3; και (d) υποπερίπτωση B4

Time Epoch	Case C1		Case C2		Case C3		Case C4	
	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e
0	7	1	7	1	7	1	7	1
1	7	1	7	1	7	1	7	1
2	7	1	7	1	7	1	7	1
3	33	4	33	4	33	4	33	4
4	7	1	33	4	33	4	33	4
5	7	1	33	4	33	4	33	4
6	7	1	7	1	33	4	33	4
7	7	1	7	1	33	4	33	4
8	7	1	7	1	33	4	33	4
9	7	1	7	1	7	1	33	4
10	7	1	7	1	7	1	33	4
11	7	1	7	1	7	1	33	4
12	7	1	7	1	1	1	33	4





Σχήμα 5-10. Χρονική εξέλιξη των τιμών των μεταβλητών ιεράρχησης μέσω του μοντέλου δέντρων αποφάσεων στην (a) υποπερίπτωση C1; (b) υποπερίπτωση C2; (c) υποπερίπτωση C3; και (d) υποπερίπτωση C4

5.4.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Μελετώντας τα αποτελέσματα της εκτέλεσης των προαναφερθέντων σεναρίων προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Ξεκινώντας από ομοιόμορφη κατανομή των πιθανών τιμών αναφοράς, που για πρακτικούς λόγους δηλώνεται ως κατάσταση $\{3, 3, 3, 3, 3, 3\}$, απαιτούνται τρεις χρονικές περίοδοι με στιγμιαία εκτίμηση υπέρ της πρώτης τιμής αναφοράς ($e=1$) προκειμένου το σύστημα να σταθεροποιηθεί και να υποδείξει αυτήν την τιμή ως επικρατέστερη.

- Στην περίπτωση A1, όπου παρατηρείται η μικρότερη απόκλιση μεταξύ της παλιάς και της νέας στιγμιαίας εκτίμησης για την ενεργό χωρητικότητα μετάδοσης, το σύστημα προσαρμόζεται αμέσως, σε ένα μόλις βήμα υποδεικνύοντας τη νέα τιμή ως επικρατέστερη με την προηγούμενη τιμή αναφοράς να ακολουθεί αμέσως μετά. Το ίδιο συμβαίνει και στις περιπτώσεις A2, A3 και A4.
- Η επαναφορά του μοντέλου στην κατάσταση όπου η πρώτη τιμή υποδεικνύεται ως η πιο πιθανή, μετά την αλλαγή της στιγμιαίας εκτίμησης στην αρχική της τιμή στις περιπτώσεις A1, A2 και A3, λαμβάνει χώρα επίσης άμεσα.
- Τα αποτελέσματα των περιπτώσεων A1, A2 και A3 μαρτυρούν ότι η διάρκεια της καταγραφείσας απόκλισης στο συγκεκριμένο σενάριο δεν επηρεάζει καθόλου το χρόνο που απαιτείται για την επαναφορά του συστήματος. Οποιαδήποτε μεταβολή από την πρώτη στη δεύτερη τιμή αναφοράς και αντίστροφα πραγματοποιείται άμεσα.
- Η συμπεριφορά του μοντέλου διαφοροποιείται όταν η στιγμιαία εκτίμηση αφορά την τρίτη τιμή αναφοράς, όπως συμβαίνει στις περιπτώσεις B1, B2, B3, B4. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση B1 το μοντέλο, αφού καταγραφεί η νέα στιγμιαία εκτίμηση, ναι μεν παύει να υποδεικνύει την πρώτη τιμή ως επικρατέστερη, αντί αυτής, όμως, υποδεικνύει ως επικρατέστερη την δεύτερη τιμή με την τρίτη τιμή να την ακολουθεί αμέσως μετά. Η συμπεριφορά αυτή, κρίνεται ως επιθυμητή καθώς συμβαδίζει με την απαίτηση για ομαλή προσαρμογή και εξομάλυνση των διακυμάνσεων. Συνεχίζοντας, στην περίπτωση B2 όπου η στιγμιαία εκτίμηση υπέρ της τρίτης τιμής αναφοράς διαρκεί τρεις, και όχι μια, χρονικές περιόδους, επιτυγχάνεται σύγκλιση του μοντέλου στην νέα κατάσταση με υπόδειξη της τρίτης τιμής ως επικρατέστερης σε διάστημα δύο χρονικών περιόδων. Την αμέσως επόμενη στιγμή, η ιεράρχηση των επικρατέστερων τιμών παραμένει η ίδια, με μικρή διαφοροποίηση στις λιγότερο πιθανές τιμές. Το σύστημα καταλήγει σε ισορροπία, χωρίς δηλαδή επιπλέον μεταβολές, στις περιπτώσεις B3 και B4, μετά από τέσσερις καταγραφές της στιγμιαίας εκτίμησης υπέρ της τρίτης τιμής αναφοράς ($e=3$).

- Η επαναφορά του συστήματος στην κατάσταση όπου η πρώτη τιμή υποδεικνύεται ως η πιο πιθανή, μετά από την αντίστοιχη μεταβολή της στιγμιαίας εκτίμησης ($e=1$), λαμβάνει χώρα σε δύο βήματα στην υποπερίπτωση B2 και σε τρία βήματα στις υποπεριπτώσεις B2 και B3, μαρτυρώντας την εξάρτηση του χρόνου επαναφοράς από τη χρονική διάρκεια της καταγραφείσας απόκλισης. Η συμπεριφορά αυτή είναι απολύτως επιθυμητή καθώς, πέρα από την ανάγκη για εξομάλυνση των διακυμάνσεων, πρέπει συγχρόνως να ικανοποιείται και η ανάγκη για προσαρμογή σε νέες καταστάσεις.
- Οι υποπεριπτώσεις C1, C2, C3 και C4, όπου η νέα στιγμιαία εκτίμηση διαφέρει κατά πολύ από την προηγούμενη τιμή ($e=4$), δείχνουν την συμπεριφορά του μοντέλου όταν παρατηρείται μια αρκετά απότομη μεταβολή. Στην υποπερίπτωση C1, όπου η νέα τιμή καταγράφεται μόνο μια φορά, το μοντέλο, ναι μεν αντιδρά, αλλά υποδεικνύει ως επικρατέστερη όχι την τέταρτη αλλά την δεύτερη τιμή αναφοράς. Η ομαλή αυτή προσαρμογή συνεχίζεται και στις περιπτώσεις C2 και C3 όπου η νέα στιγμιαία εκτίμηση καταγράφεται τρεις και έξι χρονικές περιόδους αντίστοιχα. Οι τιμές μεταβάλλονται κατάλληλα με την τέταρτη τιμή αναφοράς να υποδεικνύεται πλέον ως πιο πιθανή μετά από τέσσερις χρονικές περιόδους, όπως φαίνεται στα αποτελέσματα της περίπτωσης B3. Μετά από αυτή τη στιγμή, και ενόσω η στιγμιαία εκτίμηση παραμένει η ίδια, δεν παρατηρείται καμία μεταβολή.
- Η χρονική διάρκεια της καταγραφείσας απόκλισης επηρεάζει την επιστροφή του συστήματος στην αρχική του κατάσταση όταν η στιγμιαία εκτίμηση αφορά και πάλι την πρώτη τιμή αναφοράς. Η επιστροφή αυτή, πραγματοποιείται και πάλι ομαλά και ολοκληρώνεται σε δύο βήματα στην περίπτωση C1, τρία βήματα στην περίπτωση C2 και τέσσερα βήματα στην περίπτωση C3.

5.5 Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

5.5.1 Παράμετροι μοντέλου

Η μοντελοποίηση του προβλήματος αξιόπιστης εκτίμησης της ενεργούς χωρητικότητας μετάδοσης μια υποψήφιας διάρθρωσης κάνοντας χρήση της τεχνικής των τεχνητών νευρωνικών δικτύων παρουσιάστηκε αναλυτικά στην παράγραφο του κεφαλαίου. Στο τμήμα που ακολουθεί θα παρουσιαστεί μια υλοποίηση του προτεινόμενου μοντέλου μέσω κατασκευής και εκπαίδευσης ενός πολυστρωματικού νευρωνικού δικτύου.

Η κατασκευή του νευρωνικού δικτύου πραγματοποιήθηκε βάσει των παραμέτρων που παρουσιάζονται στον αντίστοιχο πίνακα (Πίνακας 5-19).

Η κατασκευή και η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου, η οποία πραγματοποιήθηκε μέσω των παραδειγμάτων εκπαίδευσης που παρουσιάζονται στον αντίστοιχο πίνακα (Πίνακας 5-1), οδήγησε στη δημιουργία μοντέλου με τα χαρακτηριστικά του ακόλουθου πίνακα (Πίνακας 5-19) για κάθε μια από τις μεταβλητές-στόχους.

Πίνακας 5-18. Παράμετροι κατασκευής μοντέλου νευρωνικού δικτύου

Τύπος μοντέλου	Πολυστρωματικό νευρωνικό δίκτυο
Αριθμός στρωμάτων	3
Αριθμός κρυφών στρωμάτων	1
Αριθμός μεταβλητών πρόγνωσης	7
Αναζήτηση βέλτιστου αριθμού νευρώνων κρυφού στρώματος στο διάστημα	[0, 20]
Συνάρτηση ενεργοποίησης νευρώνων κρυφού στρώματος	Σιγμοειδής
Συνάρτηση ενεργοποίησης νευρώνων στρώματος εξόδου	Σιγμοειδής
Τύπος ανάλυσης	Ταξινόμηση
Μέθοδος επικύρωσης	Διασταυρωμένη επικύρωση (cross validation)
Αριθμός αναδιπλώσεων διασταυρωμένης επικύρωσης	10

Μέθοδος εκπαίδευσης	Κλιμακοθετημένη κατάβαση κλίσης
Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων κατά την εκπαίδευση	10000
Ανόχη σύγκλισης	10^{-3}
Ελάχιστη βελτίωση στην προσέγγιση	10^{-6}
Ελάχιστη τιμή κλίσης	10^{-6}

Πίνακας 5-19. Χαρακτηριστικά μοντέλου νευρωνικού δικτύου

Μεταβλητή-στόχος	Αριθμός νευρώνων κρυφού επιπέδου που σχετίζονται με τη συγκεκριμένη μεταβλητή	Μέσο απόλυτο σφάλμα πρόβλεψης της συγκεκριμένης μεταβλητής επί των παραδειγμάτων εκπαίδευσης
t ₁	2	0.0451180
t ₂	3	0.0376166
t ₃	3	0.0262581
t ₄	3	0.0232367
t ₅	9	0.0356552
t ₆	6	0.0390880

5.5.2 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν μέσω του τεχνητού νευρωνικού δικτύου, για κάθε μια από τις προαναφερθείσες υποπεριπτώσεις των σεναρίων Α, Β και C παρουσιάζονται αναλυτικά στους πίνακες που ακολουθούν (Πίνακας 5-20 έως Πίνακας 5-31).

Πίνακας 5-20. Έξοδος του μοντέλου νευρωνικού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης A1

Time Epoch	r ₁	r ₂	r ₃	r ₄	r ₅	r ₆	e	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆
0	3	3	3	3	3	3	1	3	1	4	2	5	6
1	3	1	4	2	5	6	1	1	3	2	4	5	6
2	1	3	2	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
4	2	1	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
5	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
6	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
7	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
8	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
9	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
10	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
11	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
12	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6

Πίνακας 5-21. Έξοδος του μοντέλου νευρωνικού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης A2

Time Epoch	r ₁	r ₂	r ₃	r ₄	r ₅	r ₆	e	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆
0	3	3	3	3	3	3	1	3	1	4	2	5	6
1	3	1	4	2	5	6	1	1	3	2	4	5	6
2	1	3	2	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
4	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
5	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
6	2	1	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
7	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
8	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
9	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
10	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
11	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
12	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6

Πίνακας 5-22. Έξοδος του μοντέλου νευρωνικού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης A3

Time Epoch	r ₁	r ₂	r ₃	r ₄	r ₅	r ₆	e	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆
0	3	3	3	3	3	3	1	3	1	4	2	5	6
1	3	1	4	2	5	6	1	1	3	2	4	5	6
2	1	3	2	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
4	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
5	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
6	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
7	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
8	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
9	2	1	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
10	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
11	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
12	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6

Πίνακας 5-23. Έξοδος του μοντέλου νευρωνικού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης A4

Time Epoch	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	e	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
0	3	3	3	3	3	3	1	3	1	4	2	5	6
1	3	1	4	2	5	6	1	1	3	2	4	5	6
2	1	3	2	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
4	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
5	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
6	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
7	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
8	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
9	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
10	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
11	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
12	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6

Πίνακας 5-24. Έξοδος του μοντέλου νευρωνικού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης B1

Time Epoch	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	e	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
0	3	3	3	3	3	3	1	3	1	4	2	5	6
1	3	1	4	2	5	6	1	1	3	2	4	5	6
2	1	3	2	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	3	2	1	3	4	5	6
4	2	1	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
5	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
6	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
7	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
8	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
9	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
10	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
11	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
12	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6

Πίνακας 5-25. Έξοδος του μοντέλου νευρωνικού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης B2

Time Epoch	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	e	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
0	3	3	3	3	3	3	1	3	1	4	2	5	6
1	3	1	4	2	5	6	1	1	3	2	4	5	6
2	1	3	2	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	3	2	1	3	4	5	6
4	2	1	3	4	5	6	3	3	1	2	4	5	6
5	3	1	2	4	5	6	3	3	1	2	4	5	6
6	3	1	2	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
7	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
8	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
9	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
10	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
11	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
12	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6

Πίνακας 5-26. Έξοδος του μοντέλου νευρωνικού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης B3

Time Epoch	r ₁	r ₂	r ₃	r ₄	r ₅	r ₆	e	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆
0	3	3	3	3	3	3	1	3	1	4	2	5	6
1	3	1	4	2	5	6	1	1	3	2	4	5	6
2	1	3	2	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	3	2	1	3	4	5	6
4	2	1	3	4	5	6	3	3	1	2	4	5	6
5	3	1	2	4	5	6	3	3	1	2	4	5	6
6	3	1	2	4	5	6	3	3	1	2	4	5	6
7	3	1	2	4	5	6	3	3	1	2	4	5	6
8	3	1	2	4	5	6	3	3	1	2	4	5	6
9	3	1	2	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
10	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
11	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
12	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6

Πίνακας 5-27. Έξοδος του μοντέλου νευρωνικού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης B4

Time Epoch	r ₁	r ₂	r ₃	r ₄	r ₅	r ₆	e	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆
0	3	3	3	3	3	3	1	3	1	4	2	5	6
1	3	1	4	2	5	6	1	1	3	2	4	5	6
2	1	3	2	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	3	2	1	3	4	5	6
4	2	1	3	4	5	6	3	3	1	2	4	5	6
5	3	1	2	4	5	6	3	3	1	2	4	5	6
6	3	1	2	4	5	6	3	3	1	2	4	5	6
7	3	1	2	4	5	6	3	3	1	2	4	5	6
8	3	1	2	4	5	6	3	3	1	2	4	5	6
9	3	1	2	4	5	6	3	3	1	2	4	5	6
10	3	1	2	4	5	6	3	3	1	2	4	5	6
11	3	1	2	4	5	6	3	3	1	2	4	5	6
12	3	1	2	4	5	6	3	3	1	2	4	5	6

Πίνακας 5-28. Έξοδος του μοντέλου νευρωνικού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης C1

Time Epoch	r ₁	r ₂	r ₃	r ₄	r ₅	r ₆	e	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆
0	3	3	3	3	3	3	1	3	1	4	2	5	6
1	3	1	4	2	5	6	1	1	3	2	4	5	6
2	1	3	2	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	4	3	1	2	4	5	6
4	3	1	2	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
5	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
6	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
7	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
8	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
9	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
10	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
11	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
12	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6

Πίνακας 5-29. Έξοδος του μοντέλου νευρωνικού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης C2

Time Epoch	r ₁	r ₂	r ₃	r ₄	r ₅	r ₆	e	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆
0	3	3	3	3	3	3	1	3	1	4	2	5	6
1	3	1	4	2	5	6	1	1	3	2	4	5	6
2	1	3	2	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	4	3	1	2	4	5	6
4	3	1	2	4	5	6	4	4	2	1	3	5	6
5	4	2	1	3	5	6	4	5	3	1	2	4	6
6	5	3	1	2	4	6	1	4	2	1	3	5	6
7	4	2	1	3	5	6	1	2	1	3	4	5	6
8	2	1	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
9	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
10	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
11	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
12	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6

Πίνακας 5-30. Έξοδος του μοντέλου νευρωνικού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης C3

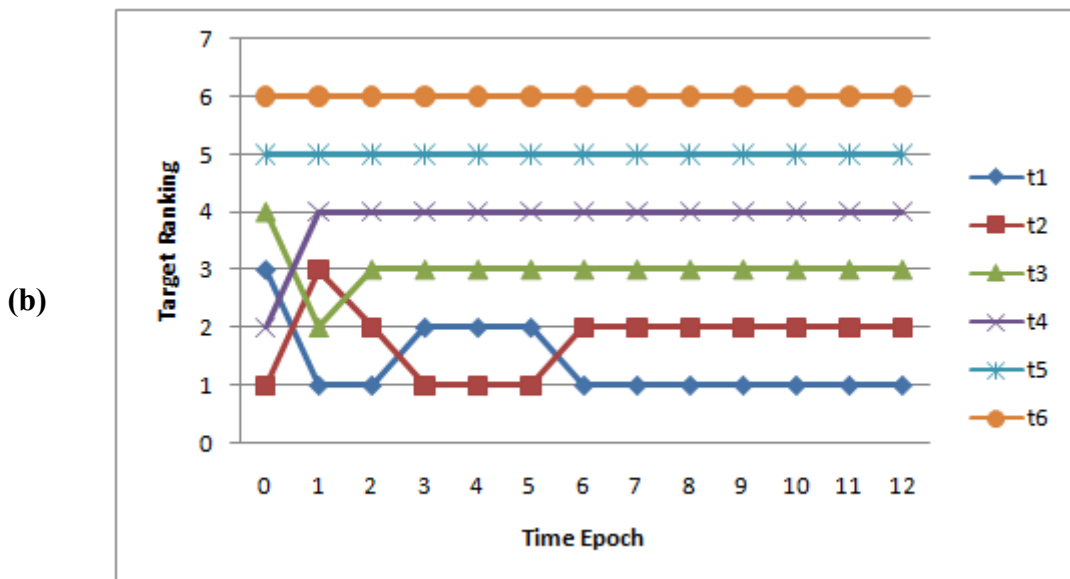
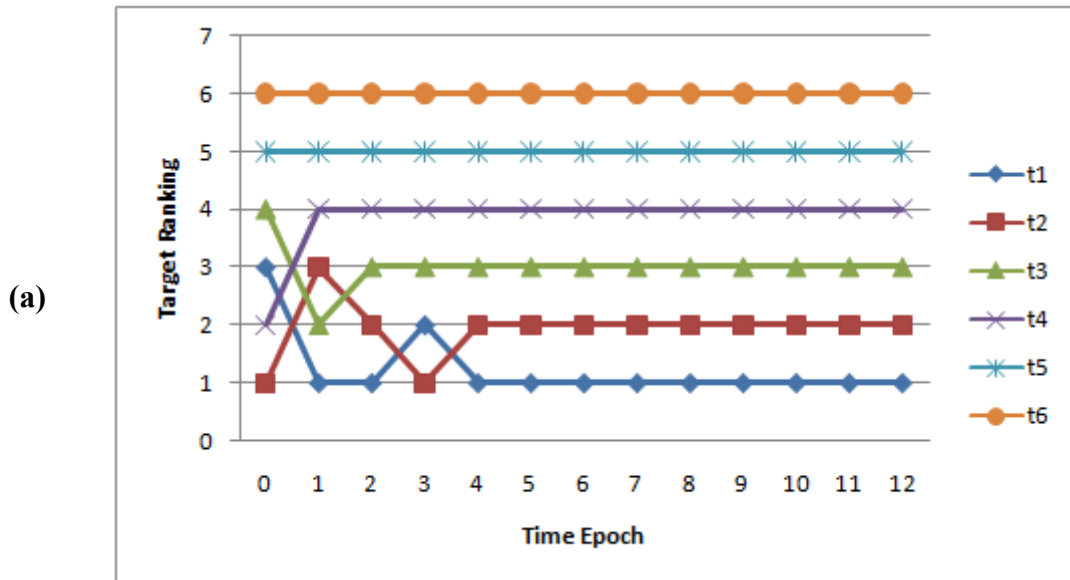
Time Epoch	r ₁	r ₂	r ₃	r ₄	r ₅	r ₆	e	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆
0	3	3	3	3	3	3	1	3	1	4	2	5	6
1	3	1	4	2	5	6	1	1	3	2	4	5	6
2	1	3	2	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	4	3	1	2	4	5	6
4	3	1	2	4	5	6	4	4	2	1	3	5	6
5	4	2	1	3	5	6	4	5	3	1	2	4	6
6	5	3	1	2	4	6	4	6	4	2	1	3	5
7	6	4	2	1	3	5	4	6	4	2	1	3	5
8	6	4	2	1	3	5	4	6	4	2	1	3	5
9	6	4	2	1	3	5	1	4	5	1	2	3	6
10	4	5	1	2	3	6	1	3	4	1	2	5	6
11	3	4	1	2	5	6	1	1	2	3	4	5	6
12	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6

Πίνακας 5-31. Έξοδος του μοντέλου νευρωνικού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης C4

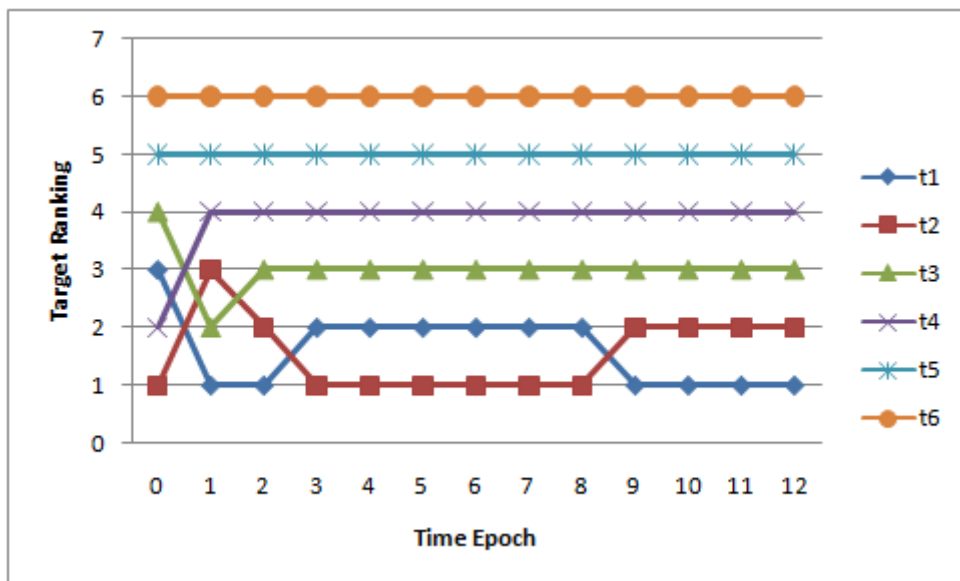
Time Epoch	r ₁	r ₂	r ₃	r ₄	r ₅	r ₆	e	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆
0	3	3	3	3	3	3	1	3	1	4	2	5	6
1	3	1	4	2	5	6	1	1	3	2	4	5	6
2	1	3	2	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	4	3	1	2	4	5	6
4	3	1	2	4	5	6	4	4	2	1	3	5	6
5	4	2	1	3	5	6	4	5	3	1	2	4	6
6	5	3	1	2	4	6	4	6	4	2	1	3	5
7	6	4	2	1	3	5	4	6	4	2	1	3	5
8	6	4	2	1	3	5	4	6	4	2	1	3	5
9	6	4	2	1	3	5	4	6	4	2	1	3	5
10	6	4	2	1	3	5	4	6	4	2	1	3	5
11	6	4	2	1	3	5	4	6	4	2	1	3	5
12	6	4	2	1	3	5	4	6	4	2	1	3	5

Εποπτικά, η ιεράρχηση των τιμών αναφοράς σε κάθε χρονική στιγμή παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-11, Σχήμα 5-12 και Σχήμα 5-13.

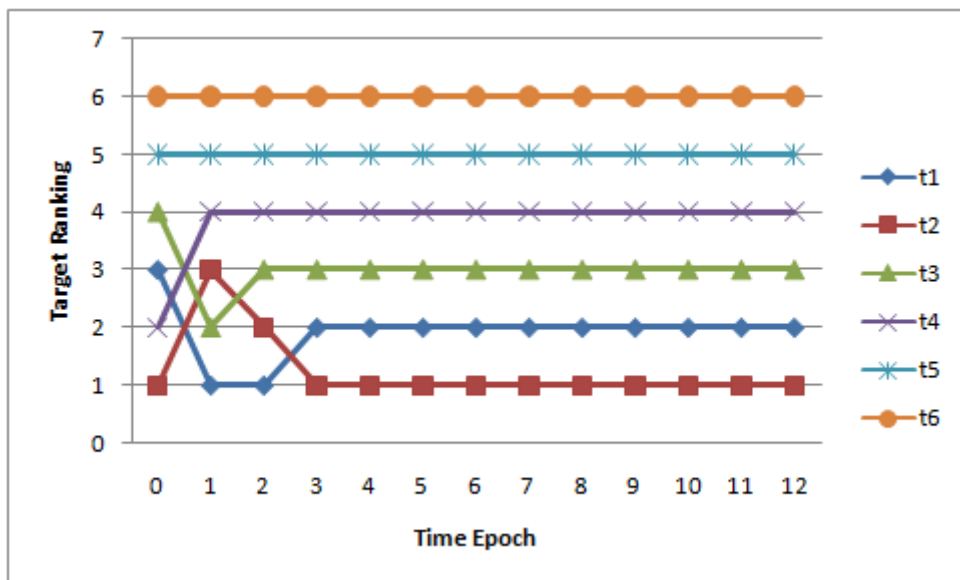
Time Epoch	Case A1		Case A2		Case A3		Case A4	
	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e
0	7	1	7	1	7	1	7	1
1	7	1	7	1	7	1	7	1
2	7	1	7	1	7	1	7	1
3	11	2	11	2	11	2	11	2
4	7	1	11	2	11	2	11	2
5	7	1	11	2	11	2	11	2
6	7	1	7	1	11	2	11	2
7	7	1	7	1	11	2	11	2
8	7	1	7	1	11	2	11	2
9	7	1	7	1	7	1	11	2
10	7	1	7	1	7	1	11	2
11	7	1	7	1	7	1	11	2
12	7	1	7	1	1	1	11	2



(c)

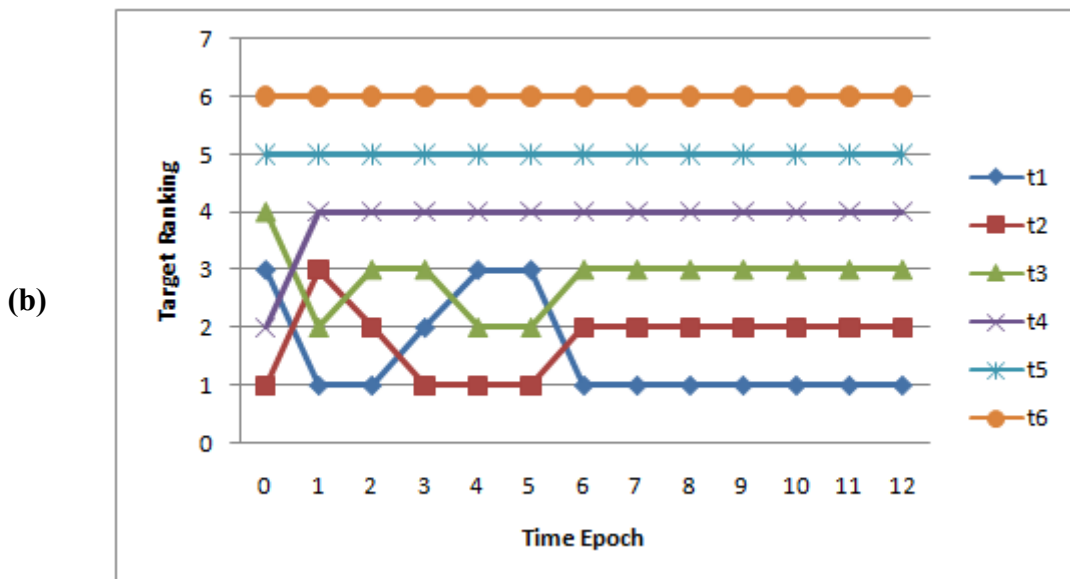
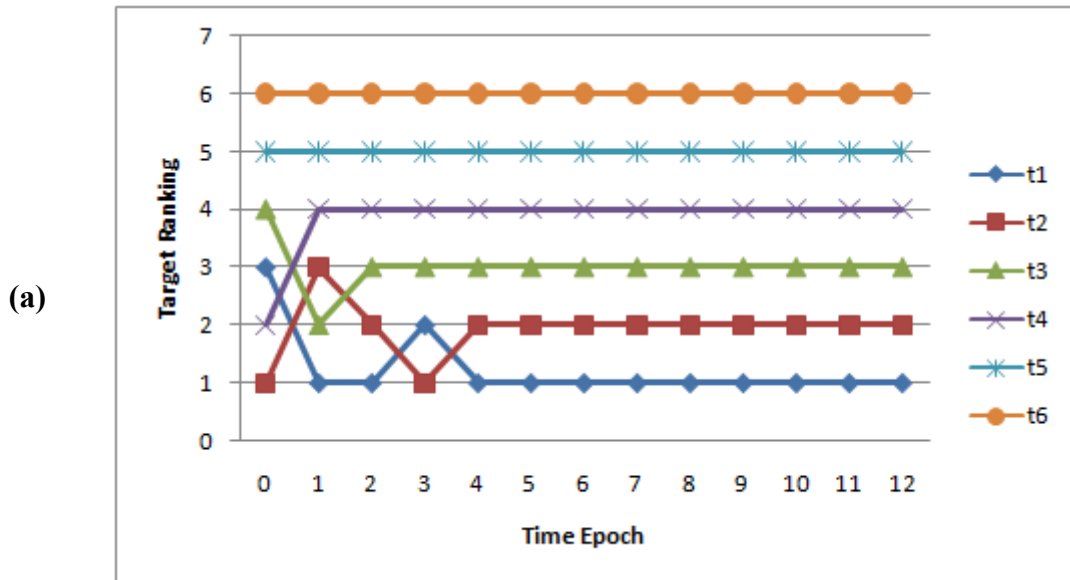


(d)

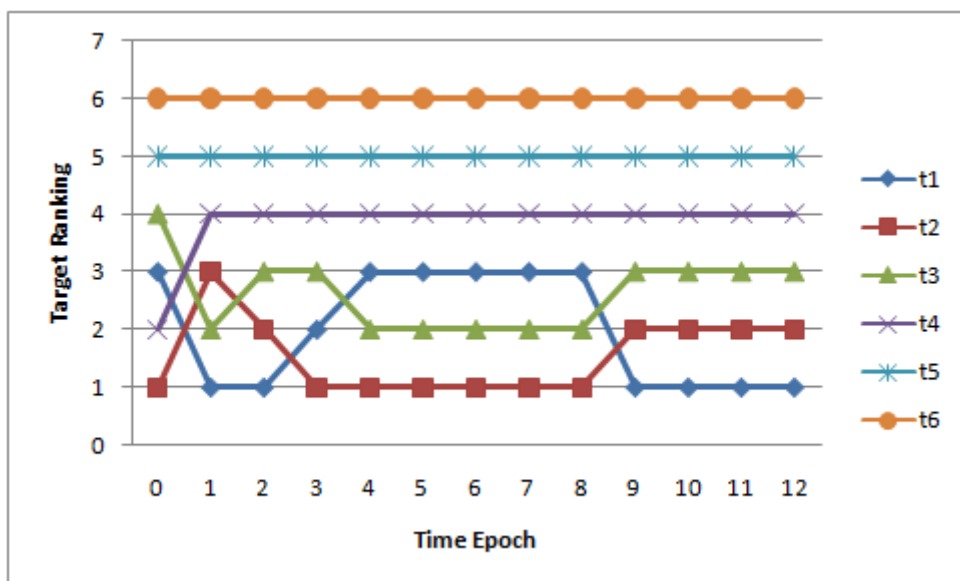


Σχήμα 5-11. Χρονική εξέλιξη των τιμών των μεταβλητών ιεράρχησης μέσω του μοντέλου νευρωνικού δικτύου στην (a) υποπερίπτωση A1; (b) υποπερίπτωση A2; (c) υποπερίπτωση A3; και (d) υποπερίπτωση A4

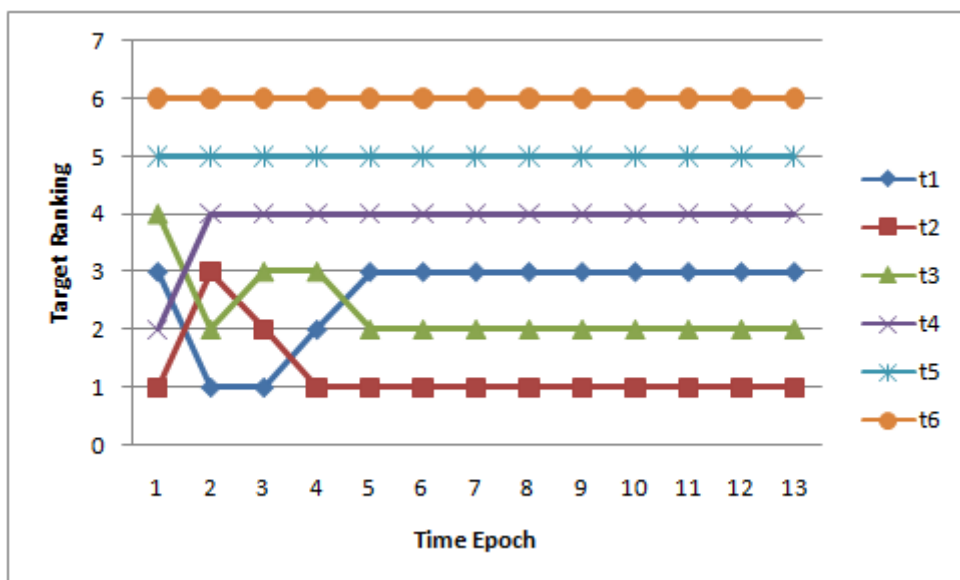
Time Epoch	Case B1		Case B2		Case B3		Case B4	
	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e
0	7	1	7	1	7	1	7	1
1	7	1	7	1	7	1	7	1
2	7	1	7	1	7	1	7	1
3	21	3	21	3	21	3	21	3
4	7	1	21	3	21	3	21	3
5	7	1	21	3	21	3	21	3
6	7	1	7	1	21	3	21	3
7	7	1	7	1	21	3	21	3
8	7	1	7	1	21	3	11	3
9	7	1	7	1	7	1	21	3
10	7	1	7	1	7	1	21	3
11	7	1	7	1	7	1	21	3
12	7	1	7	1	1	1	21	3



(c)

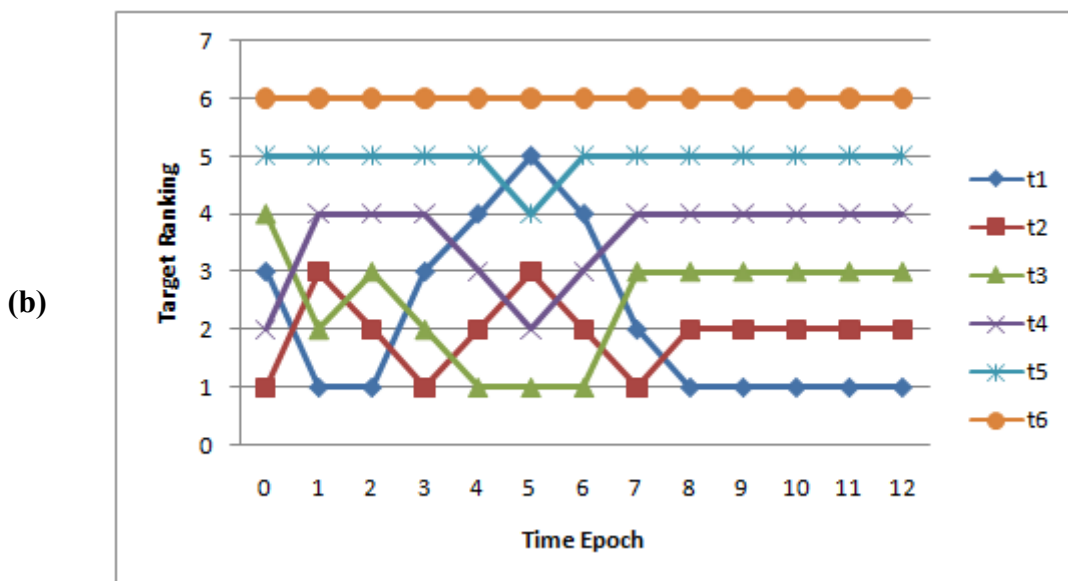
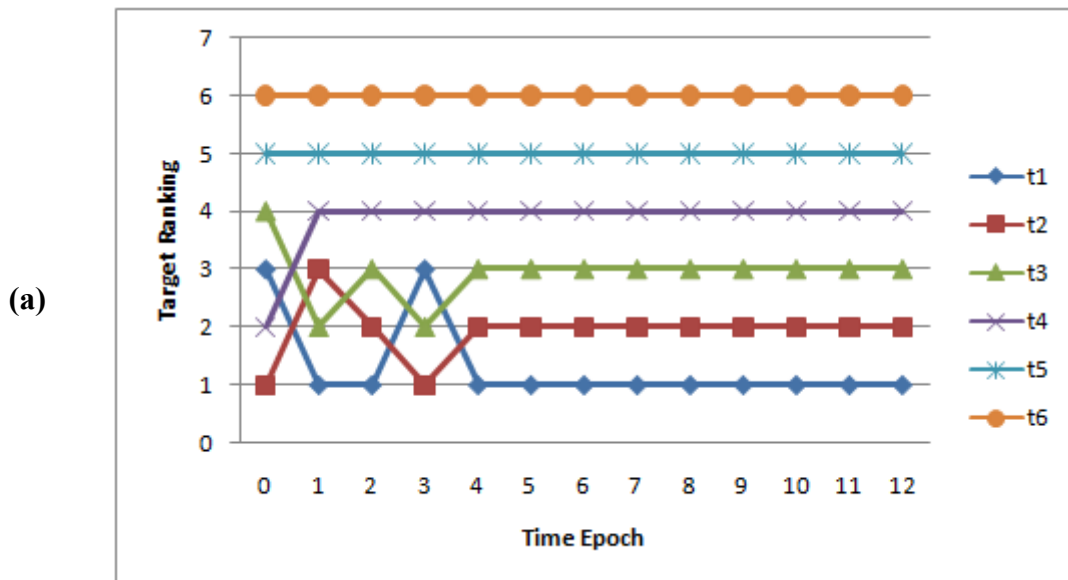


(d)

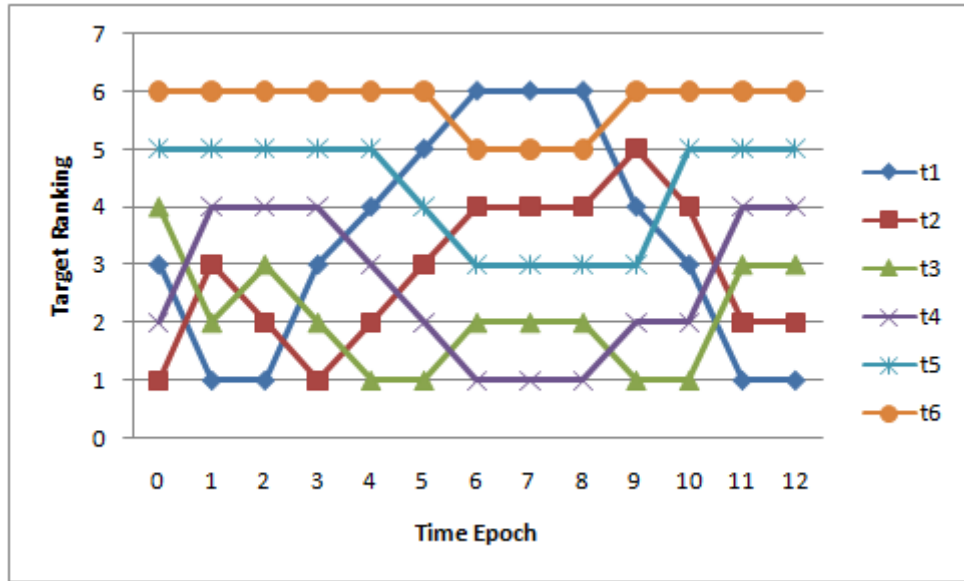


Σχήμα 5-12. Χρονική εξέλιξη των τιμών των μεταβλητών ιεράρχησης μέσω του μοντέλου νευρωνικού δικτύου στην (a) υποπερίπτωση B1; (b) υποπερίπτωση B2; (c) υποπερίπτωση B3; και (d) υποπερίπτωση B4

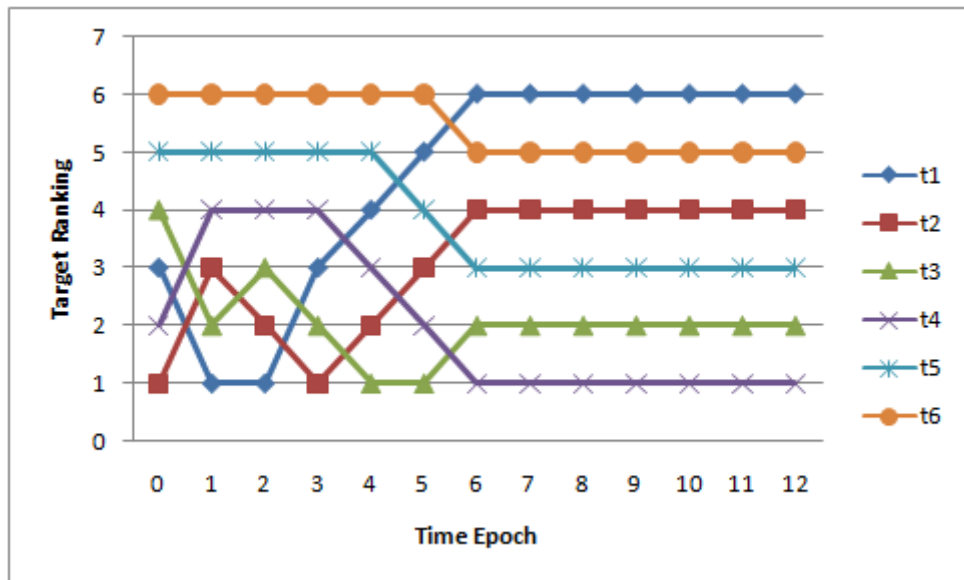
Time Epoch	Case C1		Case C2		Case C3		Case C4	
	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e
0	7	1	7	1	7	1	7	1
1	7	1	7	1	7	1	7	1
2	7	1	7	1	7	1	7	1
3	33	4	33	4	33	4	33	4
4	7	1	33	4	33	4	33	4
5	7	1	33	4	33	4	33	4
6	7	1	7	1	33	4	33	4
7	7	1	7	1	33	4	33	4
8	7	1	7	1	33	4	33	4
9	7	1	7	1	7	1	33	4
10	7	1	7	1	7	1	33	4
11	7	1	7	1	7	1	33	4
12	7	1	7	1	1	1	33	4



(c)



(d)



Σχήμα 5-13. Χρονική εξέλιξη των τιμών των μεταβλητών ιεράρχησης μέσω του μοντέλου νευρωνικού δικτύου στην (a) υποπερίπτωση C1; (b) υποπερίπτωση C2; (c) υποπερίπτωση C3; και (d) υποπερίπτωση C4

5.5.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Μελετώντας τα αποτελέσματα της εκτέλεσης των προαναφερθέντων σεναρίων προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Ξεκινώντας από ομοιόμορφη κατανομή των πιθανών τιμών αναφοράς, που για πρακτικούς λόγους δηλώνεται ως κατάσταση $\{3, 3, 3, 3, 3, 3\}$, απαιτούνται δύο χρονικές περίοδοι με στιγμιαία εκτίμηση υπέρ της πρώτης τιμής αναφοράς ($e=1$) προκειμένου το σύστημα να υποδείξει αυτήν την τιμή ως επικρατέστερη. Απαιτείται ένα επιπλέον βήμα με την ίδια στιγμιαία εκτίμηση ώστε το σύστημα να σταθεροποιηθεί σε μια κατάσταση.
- Στις περιπτώσεις του σεναρίου A, όπου και καταγράφεται η μικρότερη απόκλιση μεταξύ της νέας και της παλιάς στιγμιαίας εκτίμησης το μοντέλο συγκλίνει αμέσως στη νέα κατάσταση, υποδεικνύοντας τη δεύτερη τιμή αναφοράς ως επικρατέστερη σε ένα μόλις βήμα. Η κατάσταση μάλιστα στην οποία μεταβαίνει το σύστημα είναι μια σταθερή κατάσταση, αφού δεν πραγματοποιούνται επιπλέον μεταβολές με κάθε νέα καταγραφή της στιγμιαίας εκτίμησης υπέρ της δεύτερης τιμής αναφοράς ($e=2$).
- Η επιστροφή του μοντέλου στην προηγούμενη κατάσταση, σε αυτήν δηλαδή με επικρατέστερη την πρώτη τιμή αναφοράς, αφού καταγραφεί και η αντίστοιχη στιγμιαία εκτίμηση, λαμβάνει χώρα άμεσα σε μια χρονική περίοδο όπως παρατηρείται στις περιπτώσεις A1, A2 και A3.
- Η χρονική διάρκεια καταγραφής της απόκλισης ($e=2$), φαίνεται ότι δεν επηρεάζει τη συμπεριφορά του μοντέλου, αφού μια και μόνο καταγραφή της απόκλισης αρκεί προκειμένου το σύστημα να μεταβεί σε μια σταθερή κατάσταση.
- Στο σενάριο B, όπου η καταγραφείσα στιγμιαία εκτίμηση απέχει περισσότερο από την τρέχουσα κατάσταση, η συμπεριφορά του μοντέλου διαφοροποιείται. Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα της περίπτωσης B1, η πρώτη καταγραφή της νέας στιγμιαίας εκτίμησης οδηγεί στην υπόδειξη της δεύτερης τιμής ως πλέον πιθανής με την πρώτη τιμή να ακολουθεί αμέσως μετά. Περαιτέρω καταγραφές της στιγμιαίας εκτίμησης υπέρ της τρίτης τιμής ($e=3$), έχουν ως αποτέλεσμα μικρή διαφοροποίηση της κατάστασης με την δεύτερη τιμή να υποδεικνύεται ως πιο πιθανή ακολουθούμενη τώρα από την τρίτη τιμή (περιπτώσεις B2 και B3). Δυστυχώς, κατά μη επιθυμητό τρόπο, το

μοντέλο σταθεροποιείται σε αυτήν την κατάσταση και δεν υποδεικνύει ποτέ την τρίτη τιμή ως πιο πιθανή ανεξάρτητα από το πλήθος των εμφανίσεων της, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην περίπτωση B4. Η συμπεριφορά αυτή δεν συμβαδίζει με την απαίτηση για προσαρμογή σε μια νέα κατάσταση και θα πρέπει να αποφευχθεί. Μια λύση αντιμετώπισης αυτού του προβλήματος είναι η επανεκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου, όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 4, ώστε να ληφθεί υπόψη αυτή η ειδική περίπτωση και έμμεσα να δοθούν οδηγίες στο μοντέλο για το χειρισμό της.

- Η επιστροφή του συστήματος στην πρότερη του κατάσταση, όταν λάβει χώρα και η αντίστοιχη μεταβολή της στιγμιαίας εκτίμησης, πραγματοποιείται και πάλι άμεσα, σε ένα μόλις βήμα, ανεξάρτητα από τη διάρκεια της απόκλισης. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο αφού, όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα, το σύστημα δεν έχει συγκλίνει σε κατάσταση όπου πιθανότερη είναι η τρίτη τιμή αναφοράς, αλλά αντίθετα έχει ισορροπήσει σε μια προηγούμενη κατάσταση.
- Μέσα από τα αποτελέσματα του σεναρίου C διαγράφεται η συμπεριφορά του νευρωνικού δικτύου όταν παρατηρείται μια νέα στιγμιαία εκτίμηση ($e=4$) με αρκετά μεγάλη απόκλιση από την προηγούμενη. Όπως φαίνεται στις περιπτώσεις C1, C2, C3, μετά από μια χρονική περίοδο το σύστημα υποδεικνύει τη δεύτερη τιμή ως επικρατέστερη, στις επόμενες δύο χρονικές περιόδους υποδεικνύεται η τρίτη τιμή ως πλέον πιθανή, ενώ χρειάζονται τέσσερις καταγραφές τις νέας τιμής προκειμένου να υποδειχθεί αυτή τελικά ως η πιο πιθανή. Αντίστοιχες μεταβολές παρατηρούνται και στις υπόλοιπες μεταβλητές ιεράρχησης. Η συμπεριφορά αυτή κρίνεται ως απολύτως επιθυμητή αφού ικανοποιεί το διττό στόχο του προτεινόμενου μοντέλου: προσαρμόζεται σε μια νέα κατάσταση και εξομαλύνει τυχόν παροδικές διακυμάνσεις.
- Η επιστροφή του μοντέλου, εξαρτάται από τη χρονική διάρκεια της απόκλισης. Έτσι, στην περίπτωση C1, η επιστροφή γίνεται σε ένα μόλις βήμα, ενώ, αντίθετα στις περιπτώσεις C2 και C3 όπου το μοντέλο έχει επιτύχει προσαρμογή και σύγκλιση, διαρκεί συνολικά τρεις χρονικές περιόδους.

5.6 Μπεϋζιανά δίκτυα

5.6.1 Παράμετροι μοντέλου

Η μοντελοποίηση του προβλήματος αξιόπιστης εκτίμησης της ενεργούς χωρητικότητας μετάδοσης μια υποψήφιας διάρθρωσης κάνοντας χρήση της τεχνικής των μπεϋζιανών δικτύων παρουσιάστηκε αναλυτικά στην παράγραφο του κεφαλαίου. Στο τμήμα που ακολουθεί θα παρουσιαστεί μια υλοποίηση του προτεινόμενου μοντέλου μέσω κατασκευής ενός τέτοιου μπεϋζιανού δικτύου.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, σε αντίθεση με τις περιπτώσεις των δέντρων αποφάσεων και των τεχνητών νευρωνικών δικτύων που εξετάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες, εδώ δεν πραγματοποιήθηκε εκπαίδευση του δικτύου με κάποιο σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης. Οι τιμές των πιθανοτήτων των τιμών αναφοράς που περιλαμβάνονται στους πίνακες δεσμευμένων πιθανοτήτων διαμορφώνονται εξ' ορισμού κατόπιν δεδομένων παρατήρησης και διαμορφώνονται βάσει της χρονικής αλληλουχίας των παρατηρήσεων. Η διαμόρφωση τους μέσω των δεδομένων εκπαίδευσης, τα οποία αφορούν μεμονωμένα και ανεξάρτητα στιγμιότυπα και όχι συγκεκριμένη αλληλουχία παρατηρήσεων, θα είχε ως αποτέλεσμα την αλλοίωση των αποτελεσμάτων.

Συνοπτικά οι παράμετροι της υλοποίησης παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 5-32).

Πίνακας 5-32. Παράμετροι κατασκευής μοντέλου μπεϋζιανού δικτύου

Τύπος μοντέλου	Μπεϋζιανό δίκτυο
Δεδομένα παρατήρησης	1 – Στιγμιαία εκτίμηση
Τιμή καταφλίου (ως ποσοστό επί της πιθανότητας μιας τιμής αναφοράς στην περίπτωση ομοιόμορφης κατανομής)	5%
Μέγιστος αριθμός διαδοχικών ενημερώσεων μετά τη σύγκλιση	3
Αρχική κατανομή πιθανοτήτων	Ομοιόμορφη

5.6.2 Αποτελέσματα

Η έξοδος του μοντέλου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου είναι σε αυτή την περίπτωση η κατανομή των πιθανοτήτων των τιμών αναφοράς. Η χρονική εξέλιξη της κατανομής αυτής παρουσιάζεται, για κάθε υποπερίπτωση των σεναρίων Α, Β και C στο Σχήμα 5-15, Σχήμα 5-17 και Σχήμα 5-19, αντίστοιχα. Προκειμένου όμως να είναι εύκολη η σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά που προέκυψαν μέσω των μεθόδων των δέντρων αποφάσεων και των τεχνητών νευρωνικών δικτύων έχουν κατασκευαστεί και οι πίνακες που ακολουθούν με τις αντίστοιχες τιμές των μεταβλητών-στόχων για κάθε υποπερίπτωση των σεναρίων (Πίνακας 5-33 έως Πίνακας 5-44).

Πίνακας 5-33. Έξοδος του μοντέλου μπεϋζιανού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης Α1

Time Epoch	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	e	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
0	3	3	3	3	3	3	1	1	2	3	4	5	6
1	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
2	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	2	1	2	3	4	5	6
4	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
5	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
6	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
7	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
8	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
9	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
10	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
11	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
12	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6

Πίνακας 5-34. Έξοδος του μοντέλου μπεϋζιανού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης A2

Time Epoch	r ₁	r ₂	r ₃	r ₄	r ₅	r ₆	e	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆
0	3	3	3	3	3	3	1	1	2	3	4	5	6
1	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
2	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	2	1	2	3	4	5	6
4	1	2	3	4	5	6	2	1	2	3	4	5	6
5	1	2	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
6	2	1	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
7	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
8	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
9	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
10	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
11	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
12	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6

Πίνακας 5-35. Έξοδος του μοντέλου μπεϋζιανού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης A3

Time Epoch	r ₁	r ₂	r ₃	r ₄	r ₅	r ₆	e	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆
0	3	3	3	3	3	3	1	1	2	3	4	5	6
1	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
2	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	2	1	2	3	4	5	6
4	1	2	3	4	5	6	2	1	2	3	4	5	6
5	1	2	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
6	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
7	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
8	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
9	2	1	3	4	5	6	1	2	1	3	4	5	6
10	2	1	3	4	5	6	1	2	1	3	4	5	6
11	2	1	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
12	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6

Πίνακας 5-36. Έξοδος του μοντέλου μπεϋζιανού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης A4

Time Epoch	r ₁	r ₂	r ₃	r ₄	r ₅	r ₆	e	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆
0	3	3	3	3	3	3	1	1	2	3	4	5	6
1	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
2	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	2	1	2	3	4	5	6
4	1	2	3	4	5	6	2	1	2	3	4	5	6
5	1	2	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
6	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
7	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
8	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
9	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
10	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
11	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6
12	2	1	3	4	5	6	2	2	1	3	4	5	6

Πίνακας 5-37. Έξοδος του μοντέλου μπεϋζιανού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης B1

Time Epoch	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	e	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
0	3	3	3	3	3	3	1	1	2	3	4	5	6
1	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
2	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	3	1	2	3	4	5	6
4	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
5	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
6	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
7	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
8	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
9	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
10	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
11	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
12	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6

Πίνακας 5-38. Έξοδος του μοντέλου μπεϋζιανού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης B2

Time Epoch	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	e	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
0	3	3	3	3	3	3	1	1	2	3	4	5	6
1	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
2	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	3	1	2	3	4	5	6
4	1	2	3	4	5	6	3	2	1	3	4	5	6
5	2	1	3	4	5	6	3	2	1	3	4	5	6
6	2	1	3	4	5	6	1	2	1	3	4	5	6
7	1	2	3	4	5	6	1	2	1	3	4	5	6
8	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
9	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
10	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
11	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
12	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6

Πίνακας 5-39. Έξοδος του μοντέλου μπεϋζιανού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης B3

Time Epoch	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	e	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
0	3	3	3	3	3	3	1	1	2	3	4	5	6
1	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
2	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	3	1	2	3	4	5	6
4	1	2	3	4	5	6	3	2	1	3	4	5	6
5	2	1	3	4	5	6	3	2	1	3	4	5	6
6	2	1	3	4	5	6	3	3	1	2	4	5	6
7	3	1	2	4	5	6	3	3	1	2	4	5	6
8	3	1	2	4	5	6	3	3	1	2	4	5	6
9	3	1	2	4	5	6	1	3	1	2	4	5	6
10	3	1	2	4	5	6	1	2	1	3	4	5	6
11	2	1	3	4	5	6	1	2	1	3	4	5	6
12	2	1	3	4	5	6	1	2	1	3	4	5	6

Πίνακας 5-40. Έξοδος του μοντέλου μπεϋζιανού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης B4

Time Epoch	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	e	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
0	3	3	3	3	3	3	1	1	2	3	4	5	6
1	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
2	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	3	1	2	3	4	5	6
4	1	2	3	4	5	6	3	2	1	3	4	5	6
5	2	1	3	4	5	6	3	2	1	3	4	5	6
6	2	1	3	4	5	6	3	3	1	2	4	5	6
7	3	1	2	4	5	6	3	3	1	2	4	5	6
8	3	1	2	4	5	6	3	3	1	2	4	5	6
9	3	1	2	4	5	6	3	3	2	1	4	5	6
10	3	2	1	4	5	6	3	3	2	1	4	5	6
11	3	2	1	4	5	6	3	3	2	1	4	5	6
12	3	2	1	4	5	6	3	3	2	1	4	5	6

Πίνακας 5-41. Έξοδος του μοντέλου μπεϋζιανού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης C1

Time Epoch	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	e	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
0	3	3	3	3	3	3	1	1	2	3	4	5	6
1	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
2	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	4	2	1	3	4	5	6
4	2	1	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
5	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
6	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
7	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
8	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
9	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
10	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
11	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
12	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6

Πίνακας 5-42. Έξοδος του μοντέλου μπεϋζιανού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης C2

Time Epoch	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	e	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
0	3	3	3	3	3	3	1	1	2	3	4	5	6
1	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
2	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	4	2	1	3	4	5	6
4	2	1	3	4	5	6	4	3	1	2	3	5	6
5	3	1	2	3	5	6	4	3	2	1	2	4	6
6	3	2	1	2	4	6	1	3	1	2	3	5	6
7	3	1	2	3	5	6	1	2	1	3	4	5	6
8	2	1	3	4	5	6	1	2	1	3	4	5	6
9	2	1	3	4	5	6	1	2	1	3	4	5	6
10	2	1	3	4	5	6	1	2	1	3	4	5	6
11	2	1	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
12	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6

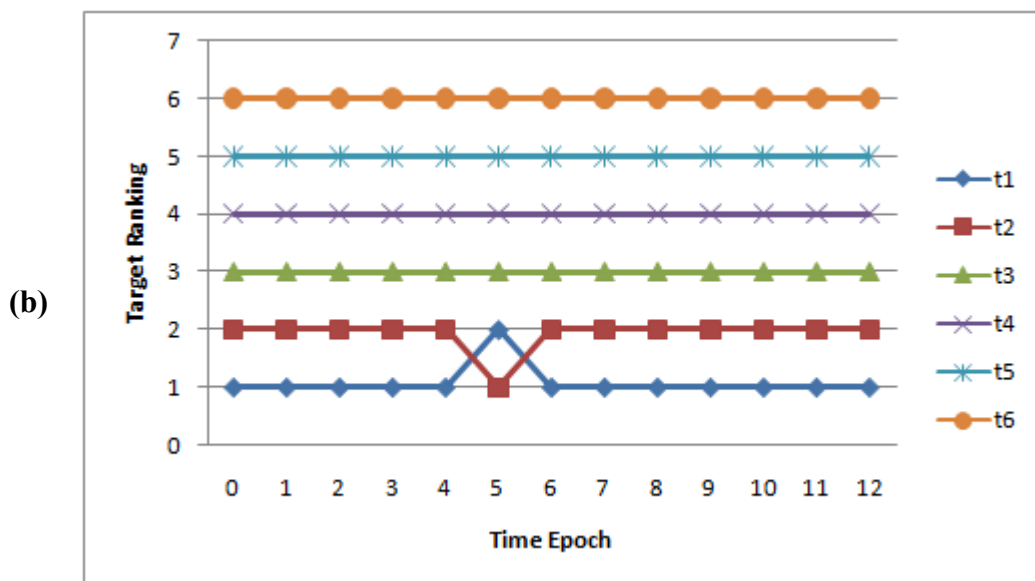
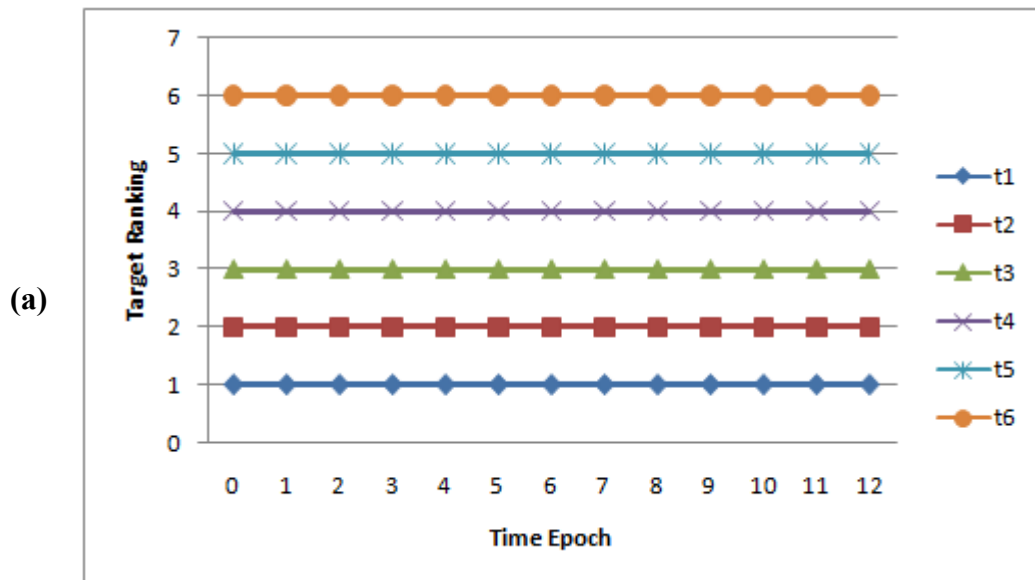
Πίνακας 5-43. Έξοδος του μοντέλου μπεύζιανού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης C3

Time Epoch	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	e	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
0	3	3	3	3	3	3	1	1	2	3	4	5	6
1	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
2	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	4	2	1	3	4	5	6
4	2	1	3	4	5	6	4	3	1	2	4	5	6
5	3	1	2	4	5	6	4	3	2	1	4	4	6
6	3	2	1	4	4	6	4	4	2	1	3	5	6
7	4	2	1	3	5	6	4	4	3	1	2	5	6
8	4	3	1	2	5	6	4	4	3	1	2	5	6
9	4	3	1	2	5	6	1	4	2	1	3	5	6
10	4	2	1	3	5	6	1	3	2	1	4	5	6
11	3	2	1	4	5	6	1	3	2	1	4	5	6
12	3	2	1	4	5	6	1	3	1	2	4	5	6

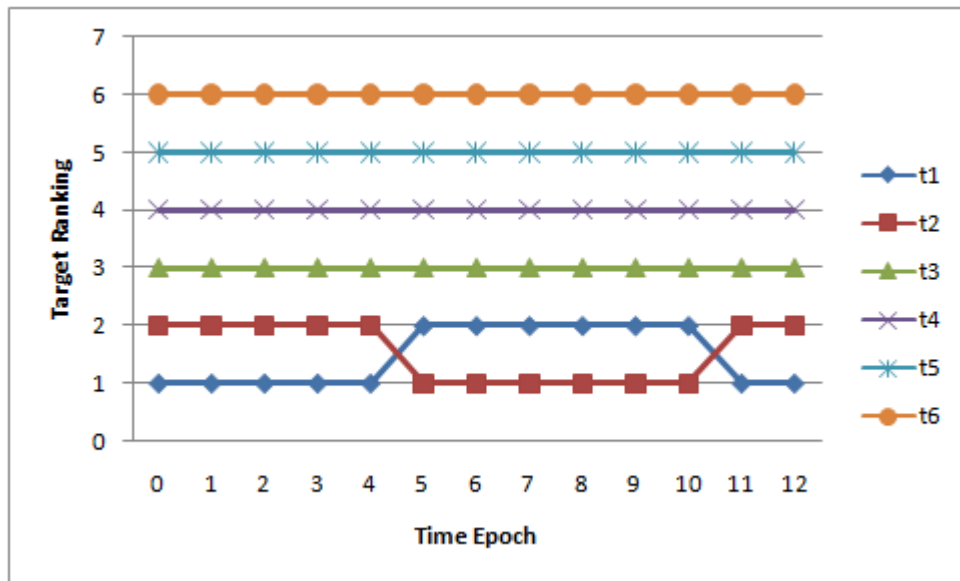
Πίνακας 5-44. Έξοδος του μοντέλου μπεύζιανού δικτύου σε κάθε βήμα εκτέλεσης του σεναρίου της υποπερίπτωσης C4

Time Epoch	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	e	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
0	3	3	3	3	3	3	1	1	2	3	4	5	6
1	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
2	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6
3	1	2	3	4	5	6	4	2	1	3	4	5	6
4	2	1	3	4	5	6	4	3	1	2	4	5	6
5	3	1	2	4	5	6	4	3	2	1	4	4	6
6	3	2	1	4	4	6	4	4	2	1	3	5	6
7	4	2	1	3	5	6	4	4	3	1	2	5	6
8	4	3	1	2	5	6	4	4	3	1	2	5	6
9	4	3	1	2	5	6	4	4	2	1	3	5	6
10	4	2	1	3	5	6	4	4	2	1	3	5	6
11	4	2	1	3	5	6	4	4	2	1	3	5	6
12	4	2	1	3	5	6	4	4	2	1	3	5	6

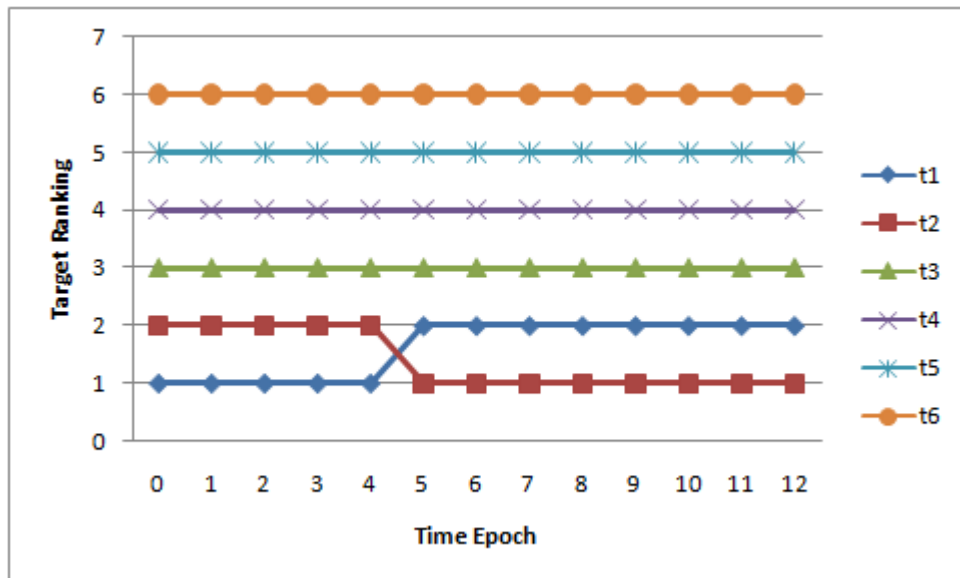
Time Epoch	Case A1		Case A2		Case A3		Case A4	
	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e
0	7	1	7	1	7	1	7	1
1	7	1	7	1	7	1	7	1
2	7	1	7	1	7	1	7	1
3	11	2	11	2	11	2	11	2
4	7	1	11	2	11	2	11	2
5	7	1	11	2	11	2	11	2
6	7	1	7	1	11	2	11	2
7	7	1	7	1	11	2	11	2
8	7	1	7	1	11	2	11	2
9	7	1	7	1	7	1	11	2
10	7	1	7	1	7	1	11	2
11	7	1	7	1	7	1	11	2
12	7	1	7	1	1	1	11	2



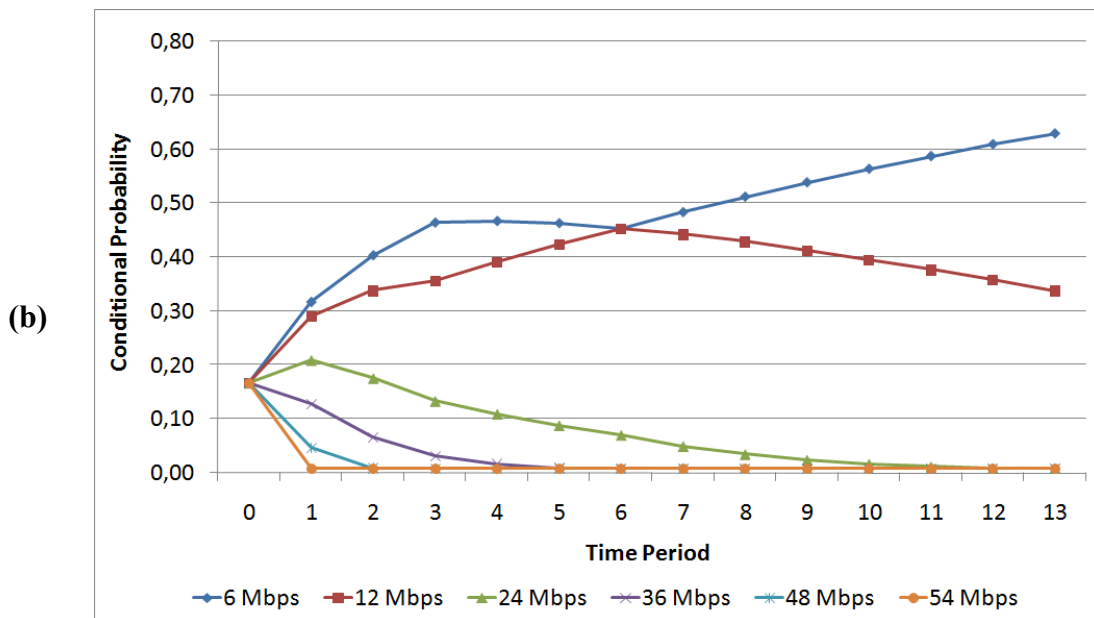
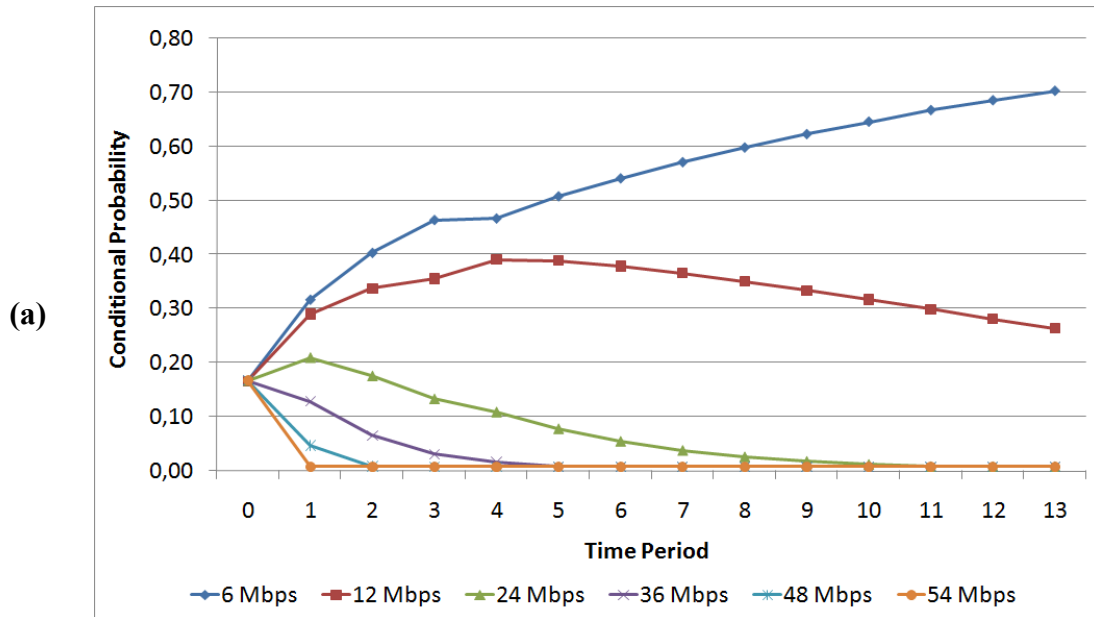
(c)

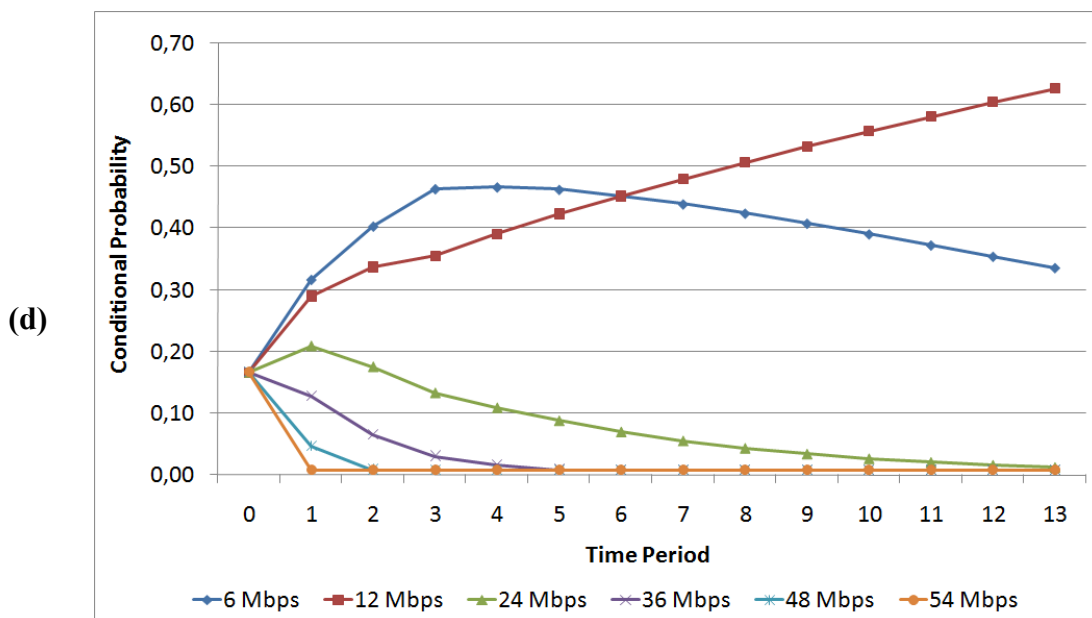
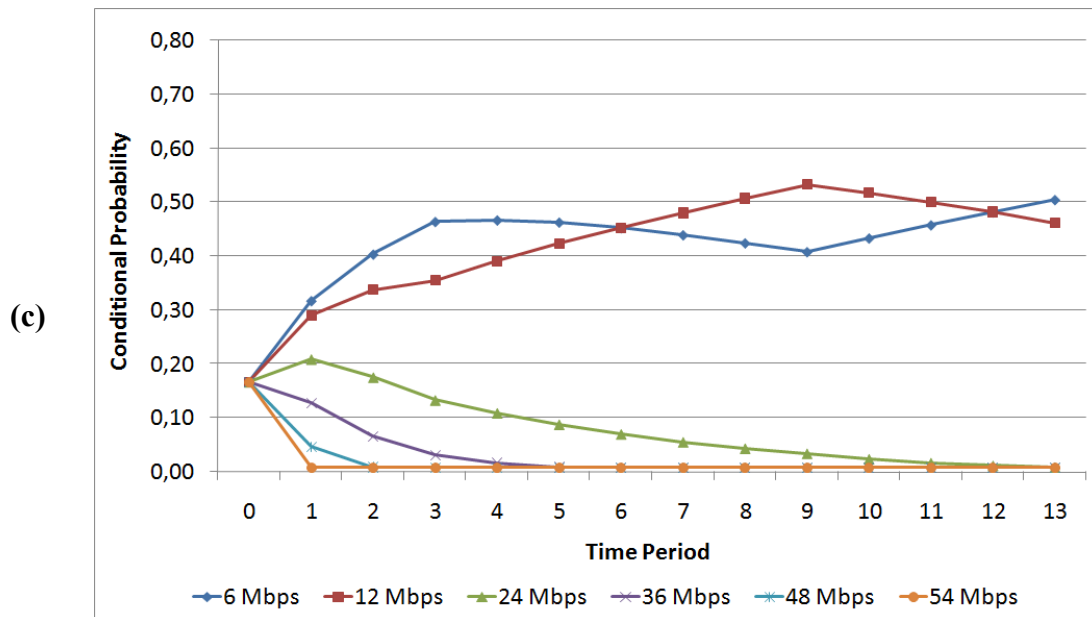


(d)



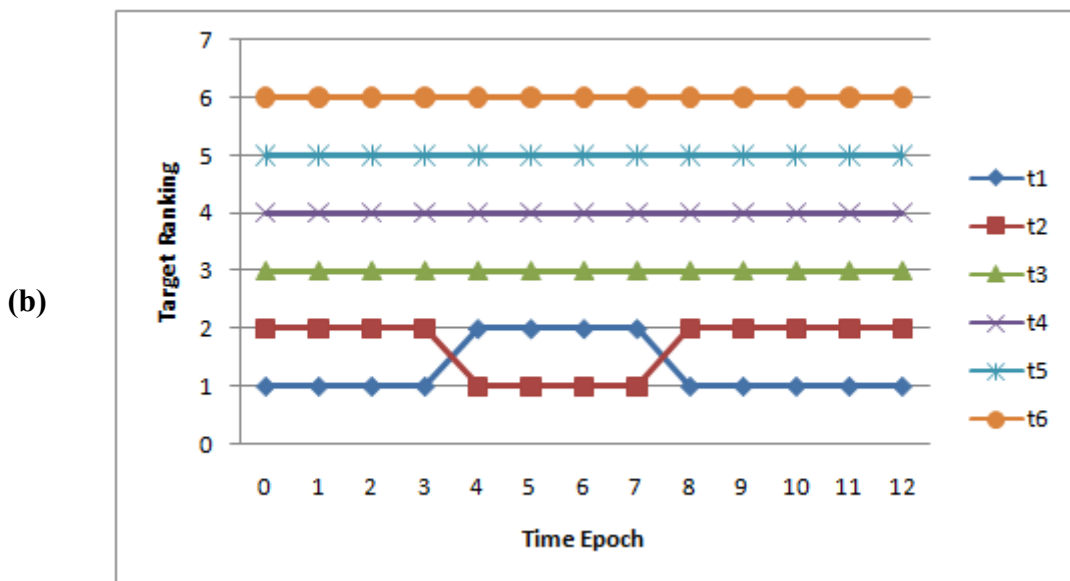
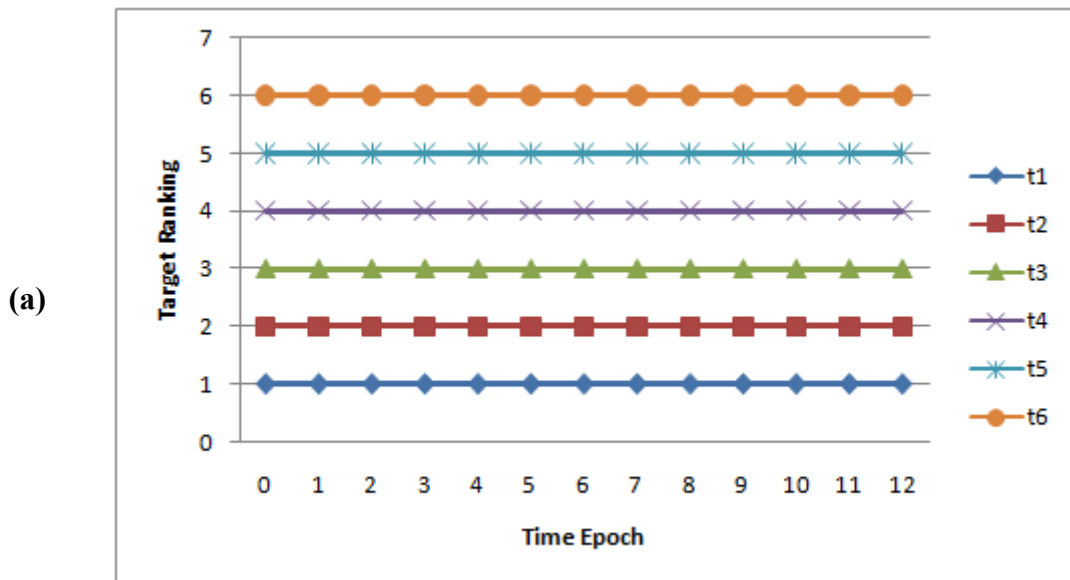
Σχήμα 5-14. Χρονική εξέλιξη των τιμών των μεταβλητών ιεράρχησης μέσω του μοντέλου μπεϋζιανού δικτύου στην (a) υποπερίπτωση A1; (b) υποπερίπτωση A2; (c) υποπερίπτωση A3; και (d) υποπερίπτωση A4



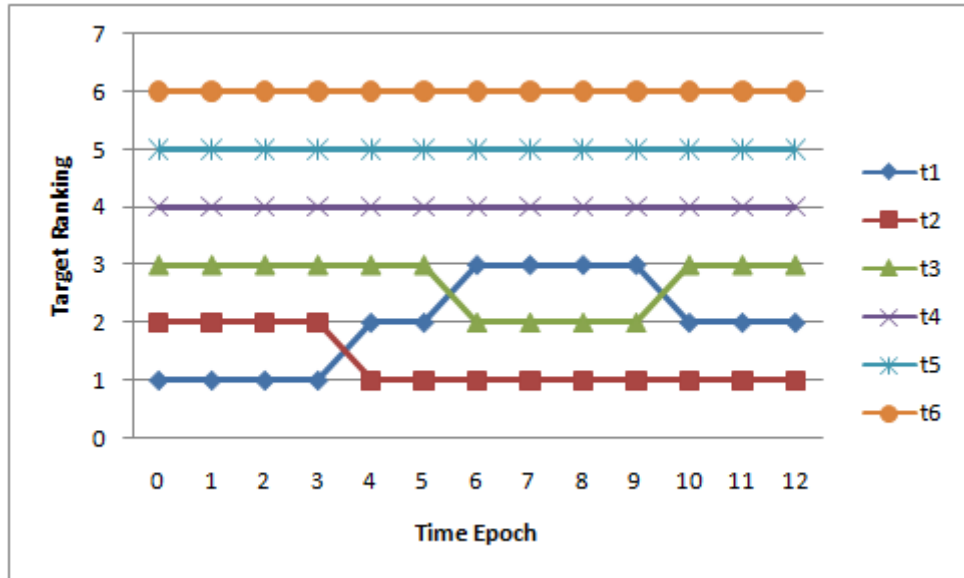


Σχήμα 5-15. Χρονική εξέλιξη της κατανομής πιθανότητας στην (a) υποπερίπτωση A1; (b) υποπερίπτωση A2; (c) υποπερίπτωση A3; και (d) υποπερίπτωση A4

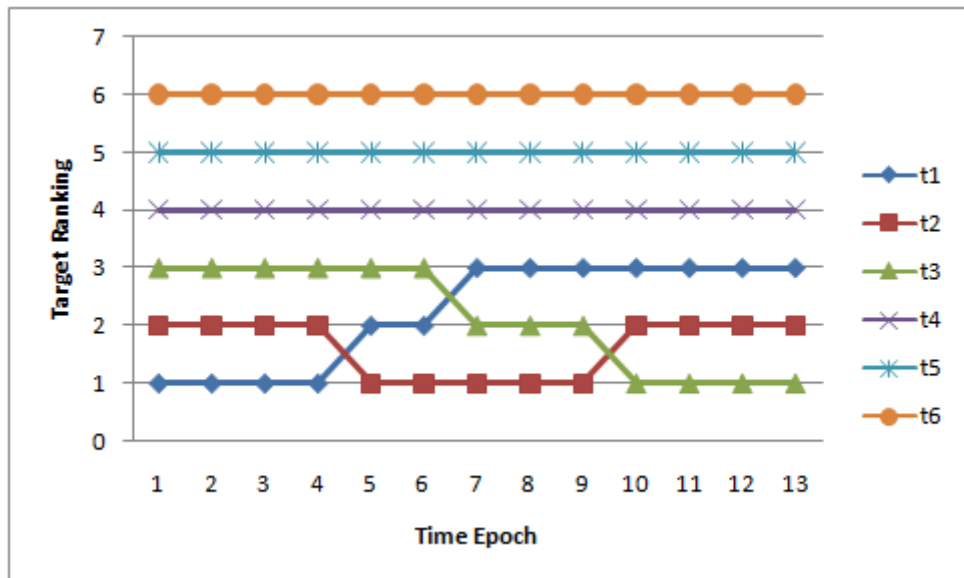
Time Epoch	Case B1		Case B2		Case B3		Case B4	
	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e
0	7	1	7	1	7	1	7	1
1	7	1	7	1	7	1	7	1
2	7	1	7	1	7	1	7	1
3	21	3	21	3	21	3	21	3
4	7	1	21	3	21	3	21	3
5	7	1	21	3	21	3	21	3
6	7	1	7	1	21	3	21	3
7	7	1	7	1	21	3	21	3
8	7	1	7	1	21	3	11	3
9	7	1	7	1	7	1	21	3
10	7	1	7	1	7	1	21	3
11	7	1	7	1	7	1	21	3
12	7	1	7	1	1	1	21	3



(c)

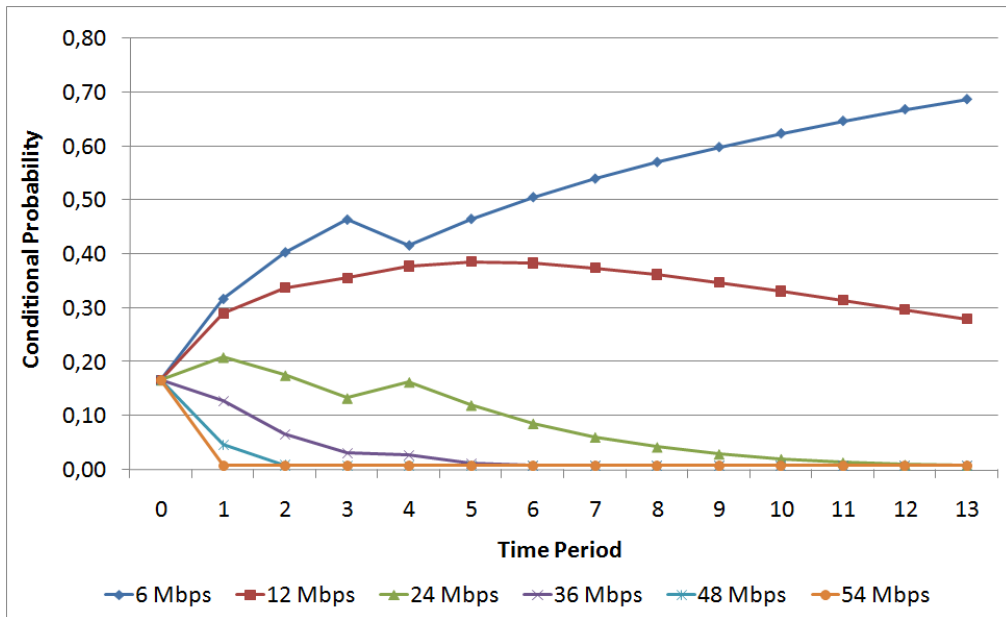


(d)

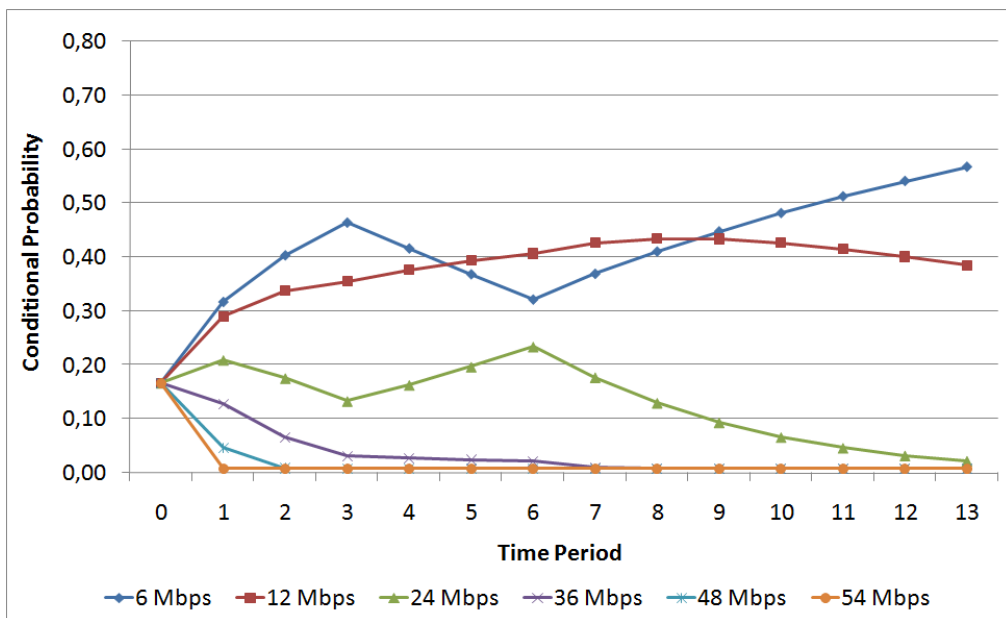


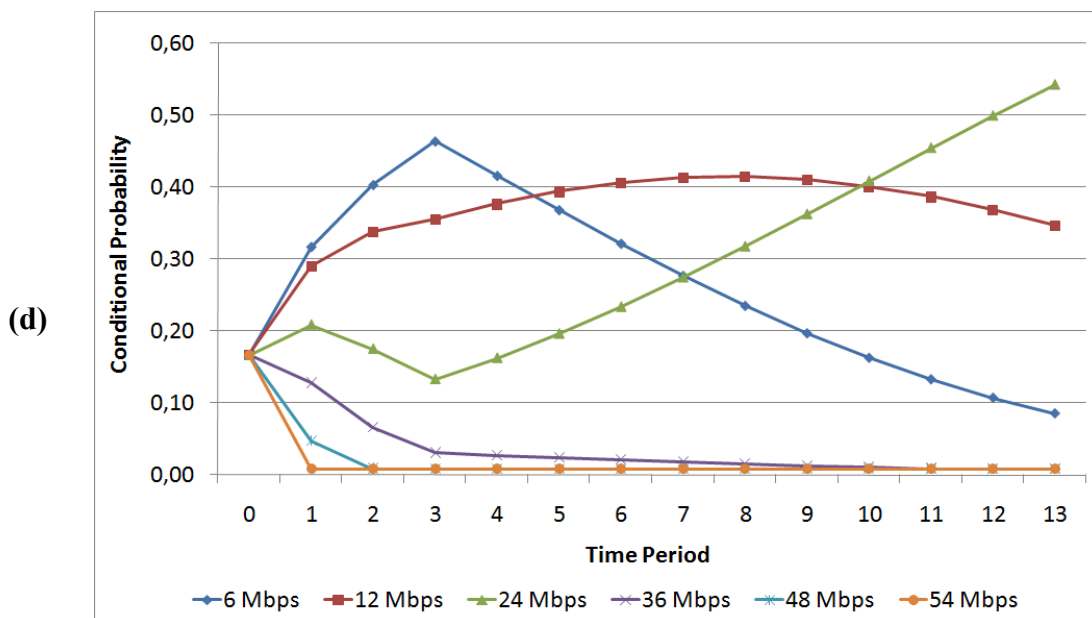
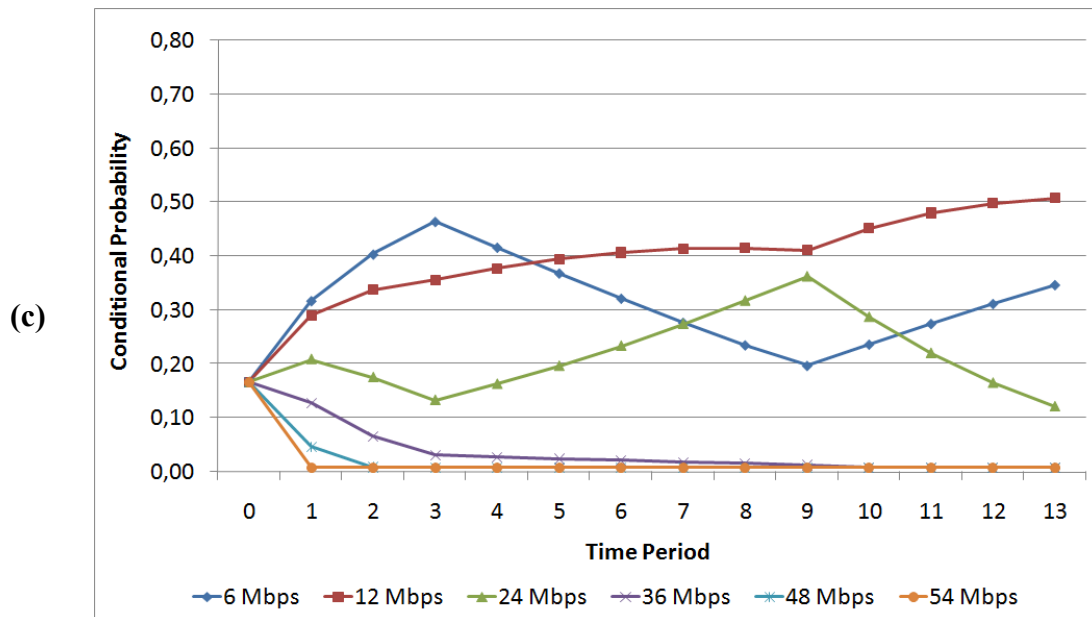
Σχήμα 5-16. Χρονική εξέλιξη των τιμών των μεταβλητών ιεράρχησης μέσω του μοντέλου μπεϋζιανού δικτύου στην (a) υποπερίπτωση B1; (b) υποπερίπτωση B2; (c) υποπερίπτωση B3; και (d) υποπερίπτωση B4

(a)



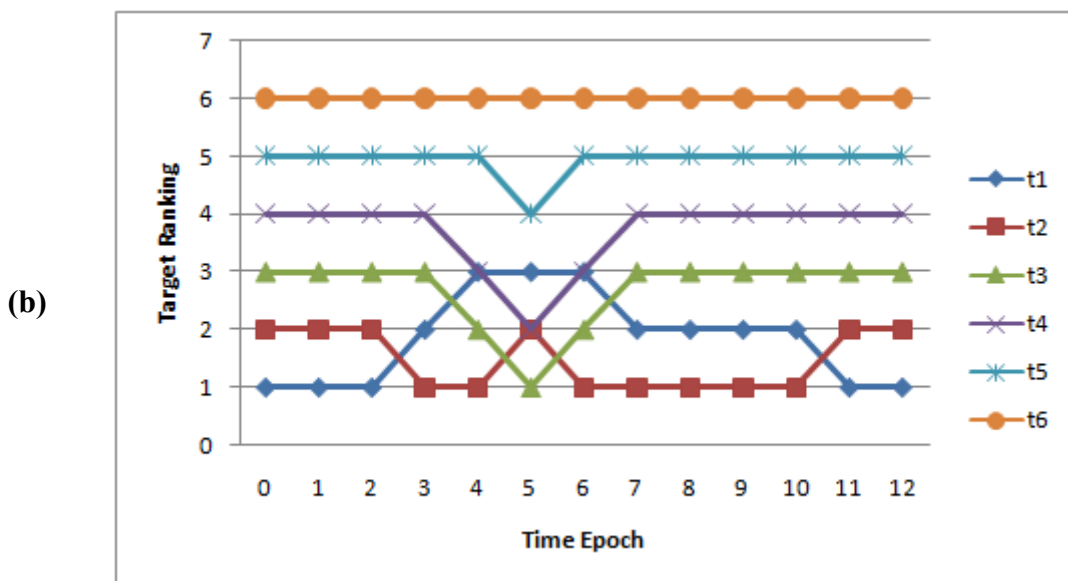
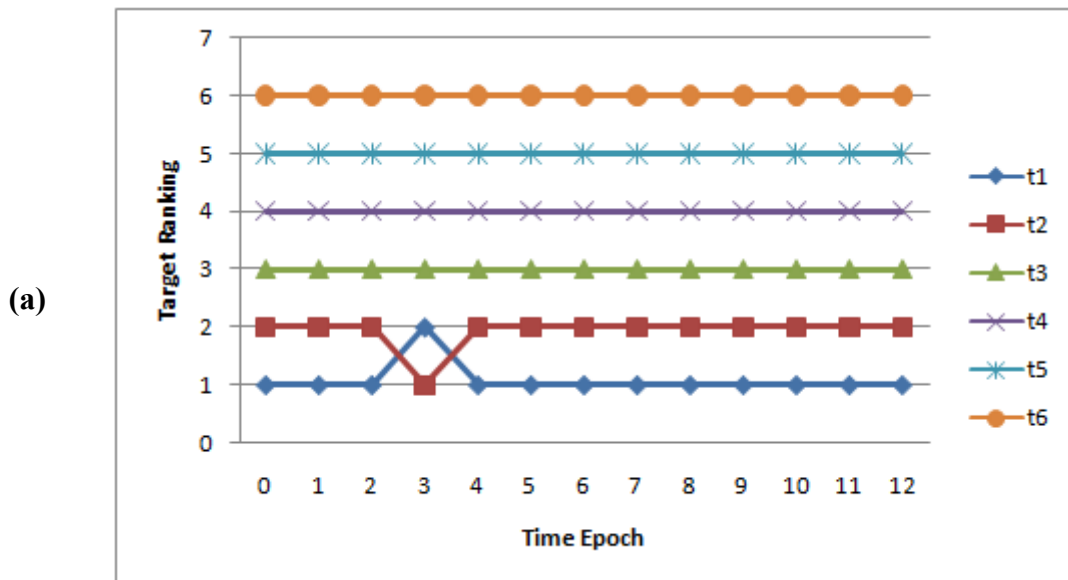
(b)



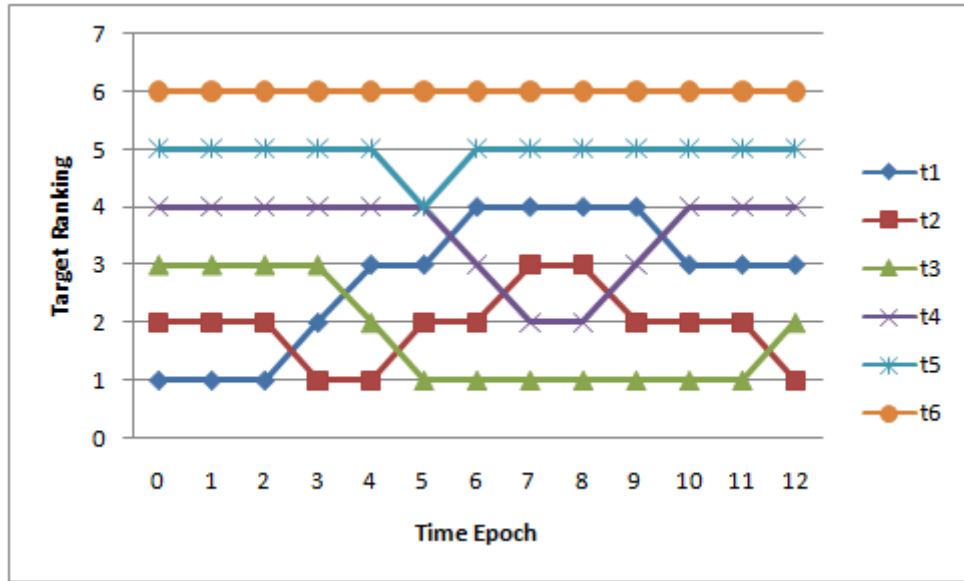


Σχήμα 5-17. Χρονική εξέλιξη της κατανομής πιθανότητας στην (a) υποπερίπτωση B1; (b) υποπερίπτωση B2; (c) υποπερίπτωση B3; και (d) υποπερίπτωση B4

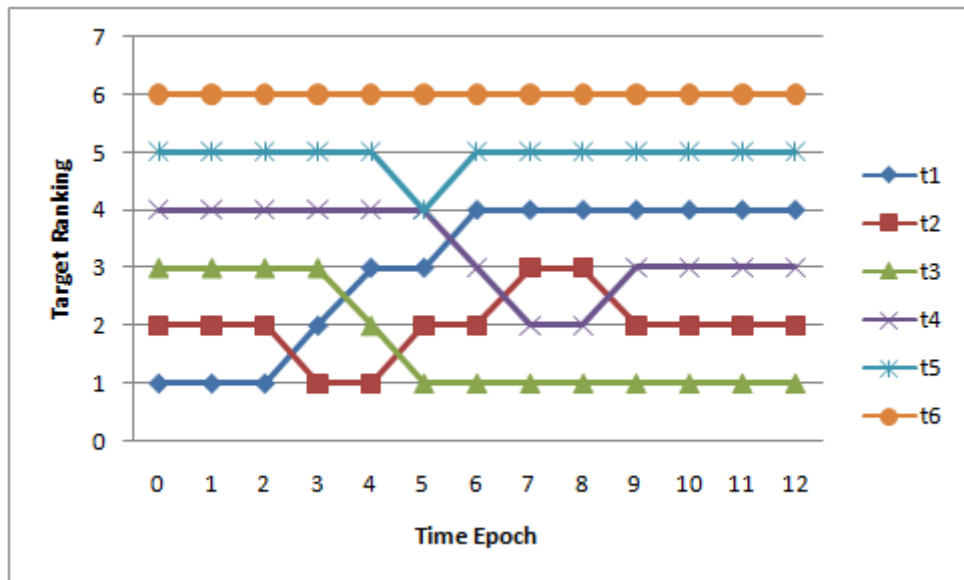
Time Epoch	Case C1		Case C2		Case C3		Case C4	
	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e	C_{eff}^*	e
0	7	1	7	1	7	1	7	1
1	7	1	7	1	7	1	7	1
2	7	1	7	1	7	1	7	1
3	33	4	33	4	33	4	33	4
4	7	1	33	4	33	4	33	4
5	7	1	33	4	33	4	33	4
6	7	1	7	1	33	4	33	4
7	7	1	7	1	33	4	33	4
8	7	1	7	1	33	4	33	4
9	7	1	7	1	7	1	33	4
10	7	1	7	1	7	1	33	4
11	7	1	7	1	7	1	33	4
12	7	1	7	1	1	1	33	4



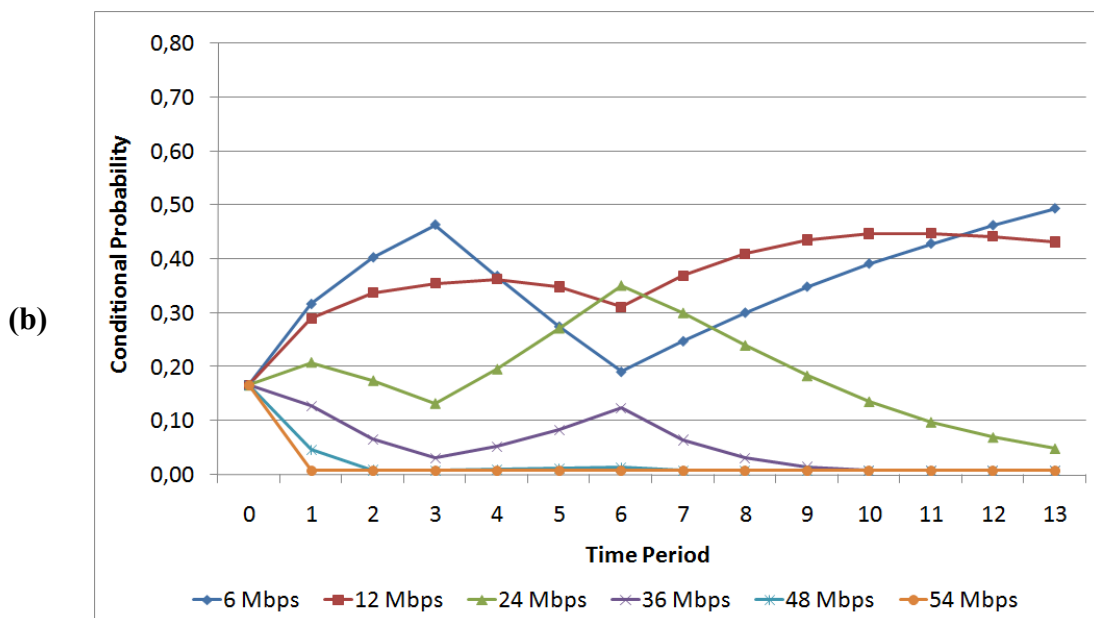
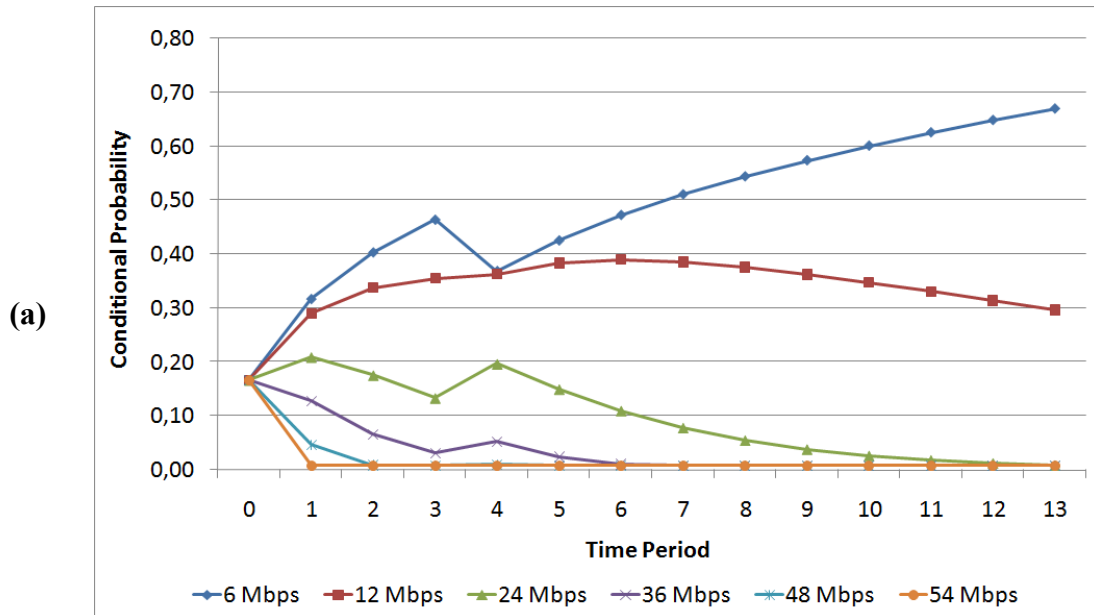
(c)

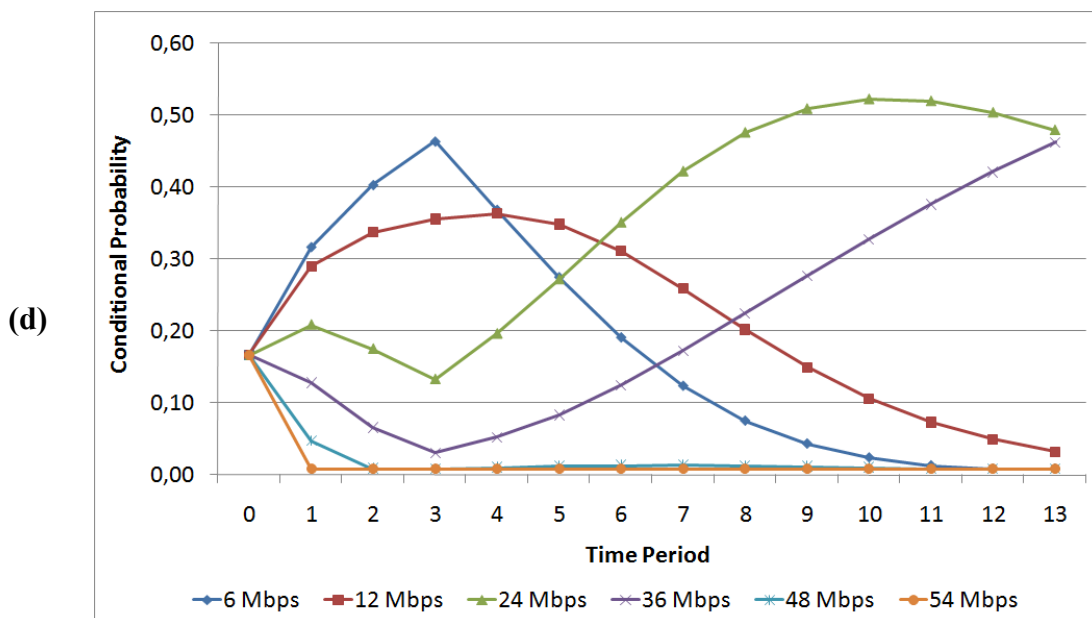
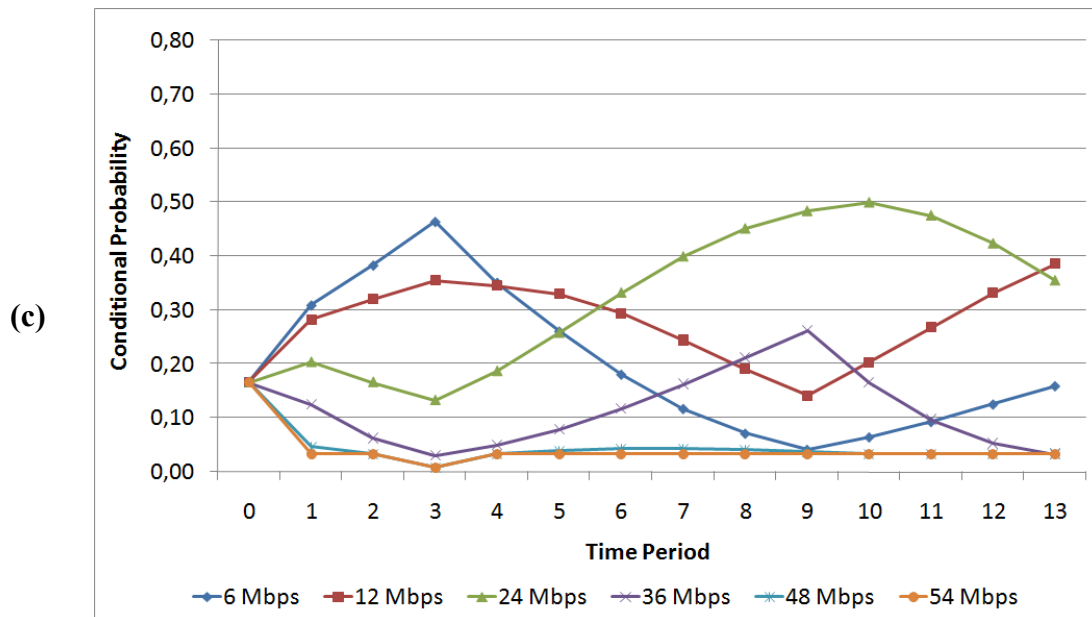


(d)



Σχήμα 5-18. Χρονική εξέλιξη των τιμών των μεταβλητών ιεράρχησης μέσω του μοντέλου μπεϋζιανού δικτύου στην (a) υποπερίπτωση C1; (b) υποπερίπτωση C2; (c) υποπερίπτωση C3; και (d) υποπερίπτωση C4





Σχήμα 5-19. Χρονική εξέλιξη της κατανομής πιθανότητας στην (a) υποπερίπτωση C1; (b) υποπερίπτωση C2; (c) υποπερίπτωση C3; και (d) υποπερίπτωση C4

5.6.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Μελετώντας τα αποτελέσματα της εκτέλεσης των προαναφερθέντων σεναρίων προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Ξεκινώντας από ομοιόμορφη κατανομή πιθανοτήτων, δηλαδή ίδια πιθανότητα για κάθε υποψήφια τιμή αναφοράς της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης, και με πρώτη στιγμιαία εκτίμηση υπέρ της πρώτης τιμής ($e=1$) το μοντέλο υποδεικνύει από το πρώτο κιάλας βήμα την τιμή αυτή ως επικρατέστερη. Η συμπεριφορά αυτή είναι απολύτως φυσιολογική καθώς το μοντέλο δεν ενσωματώνει μέχρι στιγμής καμιά πρότερη γνώση ή εμπειρία.
- Οι δύο επόμενοι χρονικές περίοδοι, κατά τις οποίες καταγράφεται η ίδια πάλι εκτίμηση, οδηγούν σε περαιτέρω ενίσχυση της πιθανότητας της πρώτης τιμής και των γειτονικών αυτής και αντίστοιχη μείωση των πιθανοτήτων των πιο απομακρυσμένων τιμών.
- Στην υποπερίπτωση A1, την τρίτη χρονική περίοδο όπου καταγράφεται στιγμιαία εκτίμηση υπέρ της δεύτερης τιμής αναφοράς, παρατηρείται μεταβολή των πιθανοτήτων υπέρ της νέας αυτής κατάστασης. Παρά τη μεταβολή αυτή, όμως το μοντέλο συνεχίζει να υποδεικνύει την πρώτη τιμή ως επικρατέστερη με μειωμένη όμως πιθανότητα.
- Η κατάσταση γίνεται ακόμα πιο ξεκάθαρη στις περιπτώσεις A2 και A3, όπου η διάρκεια τις καταγραφείσας απόκλισης είναι μεγαλύτερη. Η ενίσχυση της δεύτερης τιμής αναφοράς συνεχίζεται, με ταυτόχρονη προσαρμογή των υπόλοιπων πιθανοτήτων, για να καταλήξει να υποδειχθεί ως επικρατέστερη μετά από τρία βήματα. Στην περίπτωση A4 όπου πλέον έχει διαφανεί ότι πρόκειται όχι για μια παροδική αλλά για μια μόνιμη μεταβολή, η εν λόγω πιθανότητα ενισχύεται ακόμη περισσότερο.
- Η εξάρτηση των αποτελεσμάτων από τη διάρκεια της καταγραφείσας απόκλισης είναι εμφανής αφού σε κάθε βήμα μεταβάλλεται κατάλληλα και η κατανομή των πιθανοτήτων. Η εξάρτηση αυτή επηρεάζει και το χρόνο επιστροφής του μοντέλου στην πρότερη κατάσταση με αποτέλεσμα να απαιτούνται τρεις χρονικές περίοδοι στην περίπτωση A3 έναντι μόλις μιας στην περίπτωση A2.
- Η ήπια προσαρμογή του μοντέλου στις νέες καταστάσεις διαφαίνεται ακόμα καλύτερα στις περιπτώσεις του σεναρίου B, όπου η νέα εκτίμηση διαφέρει

περισσότερο από την επικρατούσα μέχρι εκείνη τη στιγμή κατάσταση. Όπως προκύπτει από τα διαγράμματα, αρχικά ενισχύεται η πιθανότητα της δεύτερης τιμής αναφοράς. Συγκεκριμένα, απαιτούνται δύο βήματα έως ότου υποδειχθεί αυτή ως επικρατέστερη αλλά απαιτούνται επιπλέον πέντε βήματα, συνολικά επτά, με στιγμιαία εκτίμηση υπέρ της τρίτης τιμής προκειμένου αυτή να υποδειχθεί ως πιο πιθανή (περίπτωση B3). Η συμπεριφορά αυτή είναι απόλυτα επιθυμητή καθώς ικανοποιεί την απαίτηση για προσαρμογή σε νέα κατάσταση, παρέχοντας όμως παράλληλα και τη δυνατότητα εξομάλυνσης μιας απότομης, στιγμιαίας διακύμανσης.

- Τα αποτελέσματα του σεναρίου C επικυρώνουν ακόμα περισσότερο την προαναφερθείσα συμπεριφορά. Καθώς η νέα στιγμιαία εκτίμηση απέχει πάρα πολύ από την τρέχουσα κατάσταση, το μοντέλο αντιμετωπίζει επιφυλακτικά τα νέα δεδομένα. Αντιδρά μεν, υποδεικνύοντας αρχικά τη δεύτερη τιμή ως πιο πιθανή και μάλιστα με μεγαλύτερη ταχύτητα από την περίπτωση A1 και B1, αλλά καθυστερεί αρκετά να υποδείξει την τέταρτη τιμή ως επικρατέστερη. Συγκεκριμένα, ακόμα και στην περίπτωση C4 μετά από δέκα καταγραφές υπέρ της τέταρτης τιμής ($e=4$), το σύστημα δεν έχει επιτύχει σύγκλιση στη νέα κατάσταση, υποδεικνύοντας ως πιο πιθανή όχι πλέον τη δεύτερη αλλά την τρίτη τιμή. Φυσικά, η πιθανότητα της τέταρτης τιμής αυξάνεται διαρκώς, εξασφαλίζοντας ότι η σύγκλιση δεν θα αργήσει να επιτευχθεί.
- Η εξάρτηση από τη χρονική διάρκεια της καταγραφής είναι παραπάνω από εμφανής σε αυτό το σενάριο. Η επιστροφή στην κατάσταση όπου πιθανότερη θεωρείται η πρώτη τιμή πραγματοποιείται σε ένα βήμα στην περίπτωση C1, όπου καταγράφεται και η μικρότερη προσαρμογή, έξι βήματα στην περίπτωση C2 ενώ απαιτούνται περισσότερα από δεκατρία βήματα για την επιστροφή στην περίπτωση C3.
- Αξίζει να σημειωθεί ότι οι πιθανότητες των λιγότερων πιθανών τιμών δεν εκμηδενίζονται αλλά τίθενται ίσες με το ελάχιστο κατώφλι προκειμένου να δοθεί η δυνατότητα στο σύστημα να επανέλθει και να προσαρμοστεί γρήγορα σε περίπτωση εμφάνισης κάποιων τιμών από αυτές.

5.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων των τριών μεθόδων μάθησης

Στις ενότητες που προηγήθηκαν παρουσιάστηκαν αναλυτικά τα αποτελέσματα εκτέλεσης των σεναρίων A, B και C και σχολιάστηκε η συμπεριφορά του εκάστοτε μοντέλου. Στο τμήμα που ακολουθεί θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων των τριών μεθόδων και θα διατυπωθούν συμπεράσματα για την απόδοση των αντίστοιχων μοντέλων.

Η σύγκριση των συστημάτων θα γίνει με γνώμονα τους δύο βασικούς στόχους που πρέπει να πληρούνται από ένα αποτελεσματικό σύστημα μάθησης και προσαρμογής:

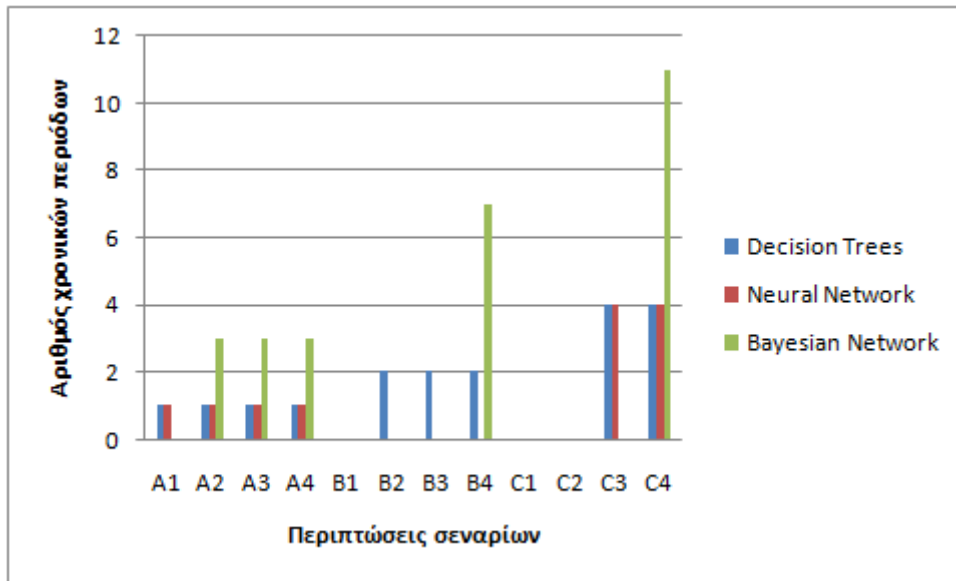
- Τη δυνατότητα εξομάλυνσης τυχαίων, απότομων και παροδικών διακυμάνσεων που δεν αντικατοπτρίζουν τη πραγματική κατάσταση του ραδιοπεριβάλλοντος
- Τη δυνατότητα ομαλής και γρήγορης προσαρμογής σε κάθε νέα μόνιμη κατάσταση του ραδιοπεριβάλλοντος, ακόμα και στην περίπτωση που αυτή διαφέρει ριζικά από την τρέχουσα κατάσταση

Για το σκοπό αυτό θα εξεταστεί η συμπεριφορά των μοντέλων βάσει δυο κύριων χαρακτηριστικών, της ταχύτητας σύγκλισης σε μια νέα κατάσταση και της ταχύτητας ανάκαμψης ή επιστροφής στην προηγούμενη κατάσταση, μετά από μια παροδική απόκλιση της στιγμιαίας εκτίμησης.

5.7.1 Ταχύτητα σύγκλισης

Ο όρος σύγκλιση, στην προκειμένη περίπτωση, χρησιμοποιείται για να δηλώσει την κατάσταση εκείνη όπου η τιμή αναφοράς που υποδεικνύεται ως επικρατέστερη από το μοντέλο συμπίπτει με την τρέχουσα στιγμιαία εκτίμηση. Συνεπώς, στην περίπτωση στιγμιαίων ή μικρής διάρκειας μεταβολών η σύγκλιση είναι ανεπιθύμητη σε αντίθεση με την περίπτωση μόνιμων μεταβολών όπου απαιτείται μια γρήγορη πορεία προς τη σύγκλιση.

Το Σχήμα 5-20 παρουσιάζει τα βήματα (χρονικές περιόδους) που απαιτούνται για τη μετάβαση κάθε μοντέλου σε κατάσταση σύγκλισης, για κάθε περίπτωση των σεναρίων A, B και C. Οι περιπτώσεις στις οποίες δεν επιτυγχάνεται σύγκλιση δηλώνονται στο διάγραμμα από την απουσία των αντίστοιχων ενδείξεων.



Σχήμα 5-20. Αριθμός χρονικών περιόδων που απαιτούνται για τη μετάβαση του μοντέλου σε κατάσταση σύγκλισης

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, η ταχύτητα προσαρμογής των μοντέλων που βασίζονται στα δέντρα αποφάσεων και το νευρωνικό δίκτυο είναι σχεδόν ταυτόσημη. Εξάιρεση αποτελεί η περίπτωση του σεναρίου B, λόγω αδυναμίας του μοντέλου να «εξέλθει» από μια συγκεκριμένη κατάσταση. Η αδυναμία αυτή μπορεί να αντιμετωπιστεί με τρόπο που αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Όπως διαφαίνεται από τις υποπεριπτώσεις των ίδιων σεναρίων, η ταχύτητα σύγκλισης στα δύο αυτά μοντέλα είναι ανεξάρτητη από τη χρονική διάρκεια της καταγραφείσας απόκλισης σε αντίθεση με το μοντέλο του μπεϋζιανού δικτύου, όπου η ταχύτητα σύγκλισης, ειδικά στις περιπτώσεις καταγραφής μεγάλης απόκλισης, εξαρτάται σημαντικά από τη διάρκεια της αποκλίνουσας στιγμιαίας εκτίμησης. Πρακτικά, αυτό συμβαίνει διότι τα δέντρα αποφάσεων και το νευρωνικό δίκτυο αναγνωρίζουν μόνο την ιεραρχία των τιμών αναφοράς ενώ αντίθετα, το μπεϋζιανό μοντέλο ενσωματώνει και συγκεκριμένη πληροφορία για την πιθανότητα κάθε τιμής, καταγράφοντας και με ποσοτικό τρόπο τη μεταξύ τους απόσταση.

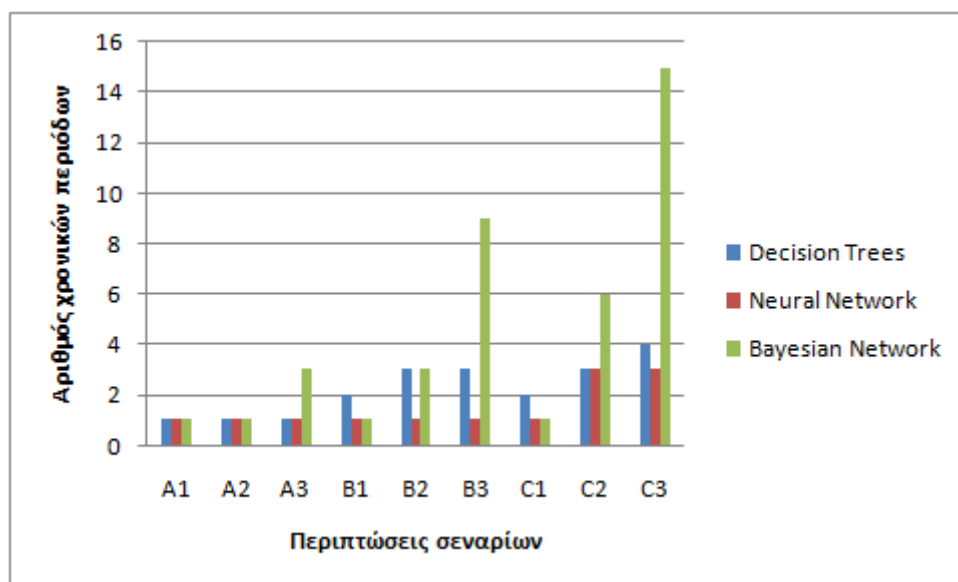
Επιπρόσθετα, διαφαίνεται ότι η ταχύτητα σύγκλισης του μπεϋζιανού δικτύου είναι σημαντικά μικρότερη από την αντίστοιχη των δύο άλλων μοντέλων. Η συμπεριφορά αυτή βοηθάει μεν στην εξομάλυνση των παροδικών μεταβολών οδηγεί όμως σε αδυναμία γρήγορης προσαρμογής σε μια νέα, μόνιμη κατάσταση. Η χρυσή τομή αυτών των δύο χαρακτηριστικών μπορεί να επιτευχθεί μέσω επιλογής κατάλληλων παραμέτρων του μπεϋζιανού δικτύου που σχετίζονται με την περιορισμένη ενίσχυση

της επικρατούσας πιθανότητας και το κατώφλι ελάχιστης τιμής για όλες τις πιθανότητες.

5.7.2 Ταχύτητα ανάκαμψης

Το μέγεθος αυτό εκφράζει στην ουσία τη δυνατότητα του μοντέλου να ανακάμψει μετά από μια απόκλιση της στιγμιαίας εκτίμησης. Στις περιπτώσεις A3, B3 και C3, όπου η καταγραφείσα απόκλιση διαρκεί έξι χρονικές περιόδους και μπορεί να θεωρηθεί όχι ως διακύμανση αλλά ως νέα κατάσταση μικρής διάρκειας, η ταχύτητα ανάκαμψης μπορεί να θεωρηθεί και ως ταχύτητα σύγκλισης σε μια νέα κατάσταση.

Το Σχήμα 5-21 παρουσιάζει τα βήματα (χρονικές περιόδους) που απαιτούνται για την επιστροφή κάθε μοντέλου στην πρότερη κατάσταση, για κάθε περίπτωση των σεναρίων A, B και C.



Σχήμα 5-21. Αριθμός χρονικών περιόδων που απαιτούνται για τη μετάβαση κάθε μοντέλου στην πρότερη κατάσταση

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, οι ταχύτητες ανάκαμψης των μοντέλων που βασίζονται στα δέντρα αποφάσεων και στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι περίπου ίδιες με μια μικρή διαφορά υπέρ των νευρωνικών δικτύων. Οι περιπτώσεις του σεναρίου B παρουσιάζουν, όπως ήδη αναφέρθηκε, μια ιδιομορφία και επομένως πρέπει να αξιολογηθούν με μικρή βαρύτητα. Η γρήγορη επιστροφή των δύο αυτών μοντέλων οφείλεται ακριβώς στη μη εξάρτησή τους από τη χρονική διάρκεια της παρατηρούμενης απόκλισης. Τα μοντέλα αντιμετωπίζουν, δηλαδή, με τον ίδιο τρόπο

μια κατάσταση είτε αυτή έχει προκύψει μετά από μια μόνο παρατηρούμενη απόκλιση είτε είναι μια κατάσταση στην οποία το σύστημα έχει ισορροπήσει μετά από αρκετές στιγμιαίες εκτιμήσεις.

Όσον αφορά το μπεϋζιανό δίκτυο, όπως διαφαίνεται και στο διάγραμμα, αυτό παρουσιάζει και πάλι μεγαλύτερες ταχύτητες επιστροφής. Η συμπεριφορά αυτή εξηγείται, κατά τον ίδιο τρόπο, μέσω της χρονικής εξάρτησης των πιθανοτήτων. Το μοντέλο διαμορφώνεται ανάλογα με κάθε νέα στιγμιαία εκτίμηση χωρίς να φτάνει ποτέ σε μια αμετάβλητη κατάσταση. Συνεπώς, όσο διαρκεί η απόκλιση οι πιθανότητες υπέρ αυτής ενισχύονται κατάλληλα με αποτέλεσμα να απαιτείται περισσότερος χρόνος για την επαναφορά τους.

5.7.3 Σύγκριση τεχνικών μάθησης

Επιχειρώντας μια σύγκριση των τριών τεχνικών τεχνικής μάθησης μπορούν να επισημανθούν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Τα μοντέλα που βασίζονται στα δέντρα αποφάσεων και τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα δεν επηρεάζονται από τη χρονική διάρκεια της καταγραφείσας απόκλισης. Το γεγονός αυτό τα καθιστά ικανά να επανέρχονται γρήγορα στην πρότερη κατάσταση αλλά τους στερεί τη δυνατότητα να ενσωματώσουν πληροφορία για την χρονική εξέλιξη της παρατηρούμενης μεταβολής
- Το μοντέλο του μπεϋζιανού δικτύου, επιδεικνύοντας μικρότερες ταχύτητες σύγκλισης, επιτυγχάνει περισσότερο ομαλή προσαρμογή και καταφέρνει να εξασφαλίσει μεγαλύτερη εξομάλυνση των απότομων, παροδικών μεταβολών. Από την άλλη μεριά, οι μικρές ταχύτητες προσαρμογής το καθιστούν λιγότερο ικανό να προσαρμοστεί γρήγορα σε μια νέα, μόνιμη κατάσταση.
- Τα μοντέλα που βασίζονται στα δέντρα αποφάσεων και τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα ενσωματώνουν πληροφορία μόνο για την προηγούμενη ιεραρχία των παραμέτρων, ανεξάρτητα από τον τρόπο που αυτή έχει διαμορφωθεί.
- Το μπεϋζιανό μοντέλο, ενσωματώνει τις τιμές πιθανοτήτων, οι οποίες έμμεσα μαρτυρούν και τη χρονική εξέλιξη των καταστάσεων του. Για παράδειγμα, αν η τιμή της πιθανότητας μια τιμής αναφοράς είναι ιδιαίτερα αυξημένη και διακρίνεται σαφώς από τις υπόλοιπες τιμές, τότε μπορεί κάποιος με ασφάλεια

να συμπεράνει ότι υπήρξαν παραπάνω από μια στιγμιαίες εκτιμήσεις υπέρ αυτής της τιμής.

- Τα μοντέλα νευρωνικών δικτύων και δέντρων αποφάσεων δεν εξασφαλίζουν σύγκλιση σε μια νέα, μόνιμη κατάσταση. Υπάρχει πάντα το ενδεχόμενο να μεταβεί το σύστημα σε μια κατάσταση, η οποία σε συνδυασμό με τη στιγμιαία εκτίμηση να αποδειχθεί λανθασμένα «στάσιμη» αποκλείοντας το ενδεχόμενο σύγκλισης. Το πρόβλημα αυτό, επιλύεται με επανεκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου ή επανακατασκευή των δέντρων αποφάσεων μέσω ενός νέου συνόλου δεδομένων εκπαίδευσης το οποίο θα περιλαμβάνει οδηγίες προς την κατεύθυνση επίλυσης αυτής της αδυναμίας.
- Το μοντέλο του μπεϋζιανού δικτύου εξασφαλίζει πάντα σύγκλιση σε μια κατάσταση, καθώς προβλέπει τη συνεχή μεταβολή των δεσμευμένων πιθανοτήτων, ακόμα και αν παρατηρείται συνεχώς η ίδια στιγμιαία εκτίμηση.

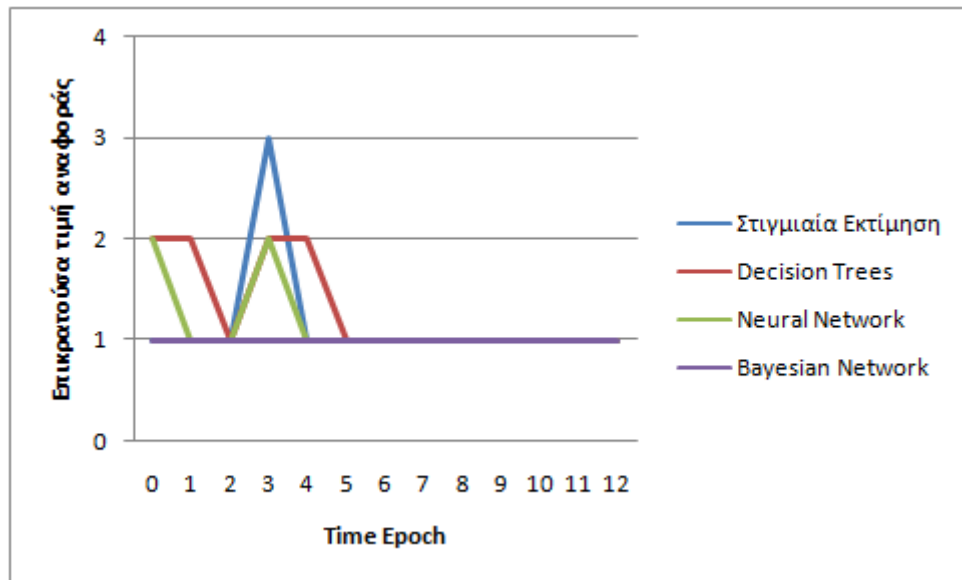
Οι παραπάνω παρατηρήσεις σε συνδυασμό με τη δυνατότητα τροποποίησης κάποιων παραμέτρων λειτουργίας του μπεϋζιανού μοντέλου οδηγούν στην πρόκριση αυτού ως την πλέον αποτελεσματική μέθοδο προσθήκης αξιοπιστίας στο συγκεκριμένο πρόβλημα. Φυσικά, η τελική επιλογή κάποιου μοντέλου ή συνδυασμού αυτών καθορίζεται από τις πολιτικές και τους προδιαγεγραμμένους κανόνες που θέτει ο διαχειριστής του δικτύου προκειμένου να προσεγγίσει την επιθυμητή γι' αυτόν συμπεριφορά. Παραδείγματος χάριν, ο διαχειριστής υπό συγκεκριμένες συνθήκες, ενδέχεται να επιθυμεί προπάντων γρήγορη προσαρμογή ενώ υπό άλλες συνθήκες, να επιθυμεί πρωτίστως εξομάλυνση των παρατηρούμενων παροδικών αποκλίσεων.

5.8 Αποτελεσματικότητα τεχνικών μηχανικής μάθησης

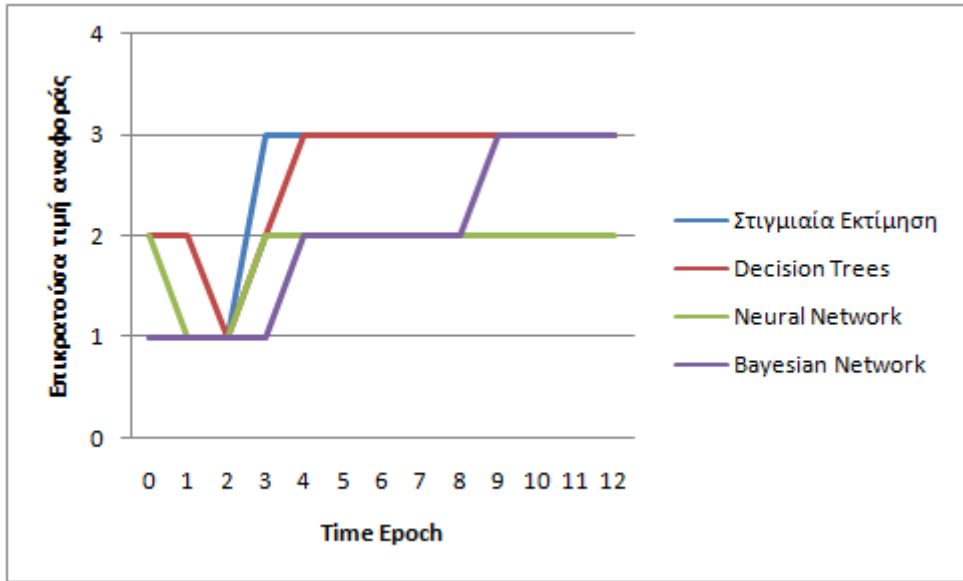
Παρά τις διαφορές τους όμως, και οι τρεις προτεινόμενες τεχνικές μάθησης επιδεικνύουν συμπεριφορά που ικανοποιεί τις απαιτήσεις για ένα αποδοτικό και ευέλικτο σύστημα μάθησης και προσαρμογής. Η ενσωμάτωσή τους στο στάδιο της συλλογιστικής καθιστά τις εκτιμήσεις περισσότερο αξιόπιστες και προσδίδει στο γνωστικό σύστημα τη δυνατότητα αξιοποίησης της εμπειρίας του για την αντιμετώπιση νέων και πιθανώς, πρωτόγνωρων καταστάσεων.

Τα σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 5-22 έως Σχήμα 5-26) παρουσιάζουν ενδεικτικά την έξοδο του συστήματος μέσω των τεχνικών μηχανικής μάθησης, για κάποιες

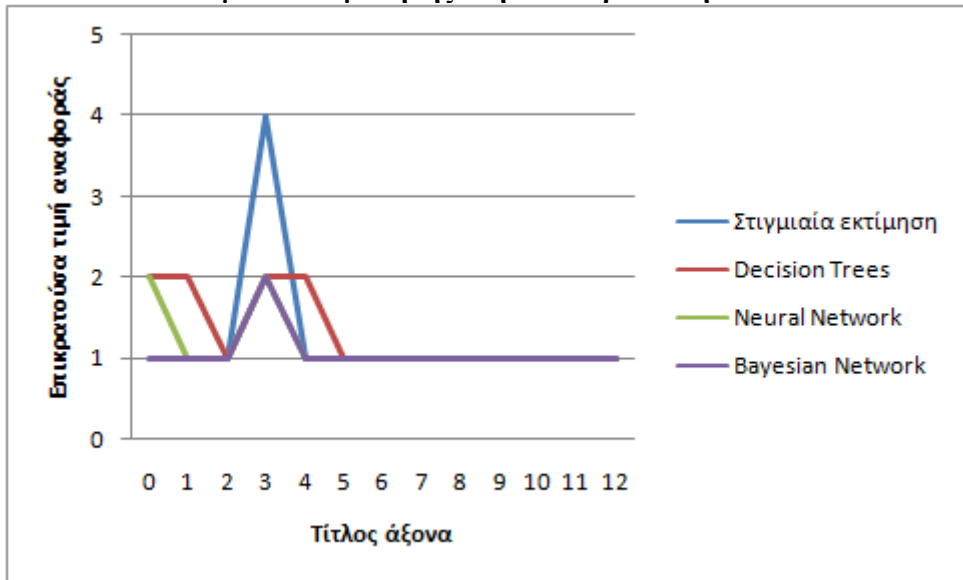
υποπεριπτώσεις των σεναρίων, αντιπαραβάλλοντας την με την εκάστοτε στιγμιαία εκτίμηση, την έξοδο δηλαδή που θα προέκυπτε απουσία του σταδίου της αξιόπιστης συλλογιστικής.



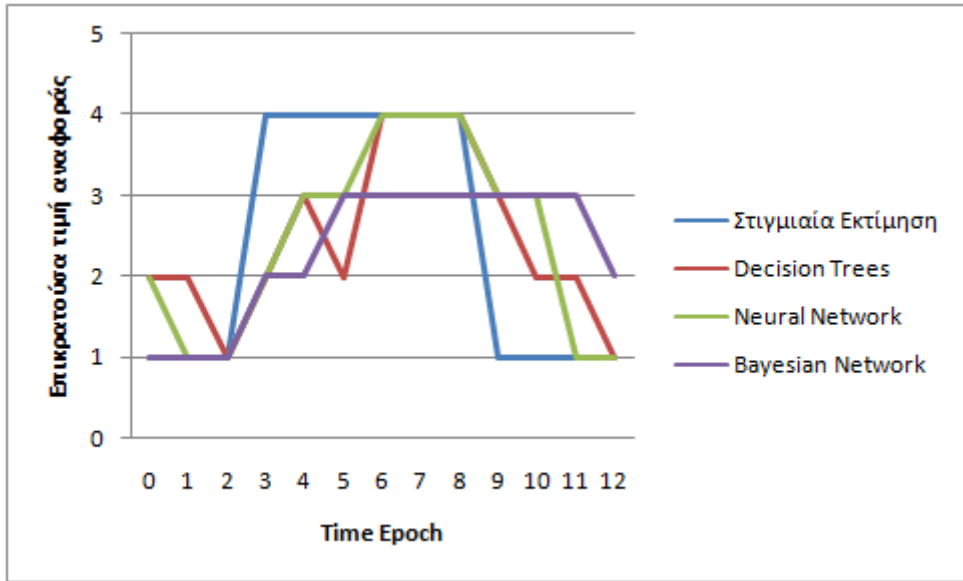
Σχήμα 5-22. Αντιπαραβολή της στιγμιαίας εκτίμησης με τις αξιόπιστες εκτιμήσεις κάθε μοντέλου μάθησης στην υποπερίπτωση B1



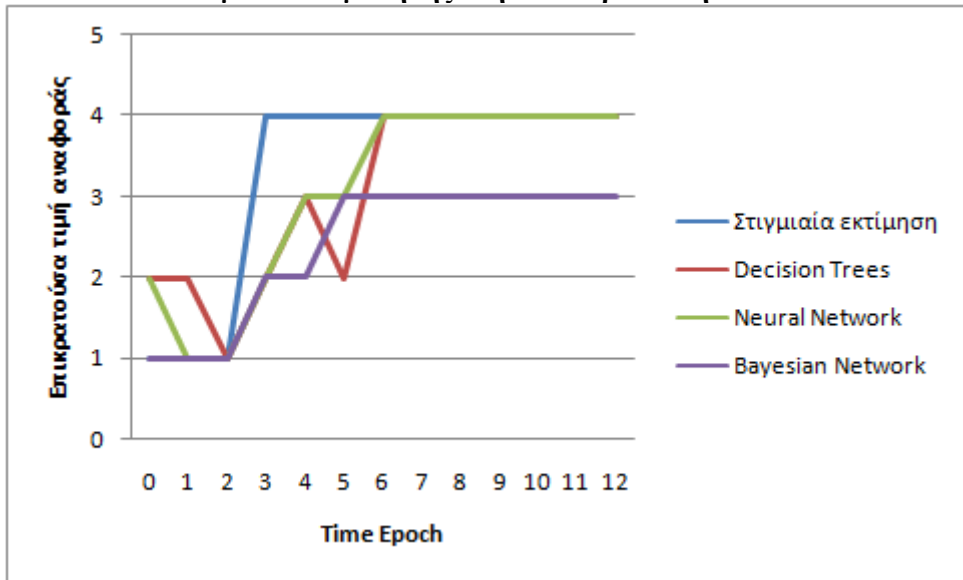
Σχήμα 5-23. Αντιπαραβολή της στιγμιαίας εκτίμησης με τις αξιόπιστες εκτιμήσεις κάθε μοντέλου μάθησης στην υποπερίπτωση B4



Σχήμα 5-24. Αντιπαραβολή της στιγμιαίας εκτίμησης με τις αξιόπιστες εκτιμήσεις κάθε μοντέλου μάθησης στην υποπερίπτωση C1



Σχήμα 5-25. Αντιπαραβολή της στιγμιαίας εκτίμησης με τις αξιόπιστες εκτιμήσεις κάθε μοντέλου μάθησης στην υποπερίπτωση C3



Σχήμα 5-26. Αντιπαραβολή της στιγμιαίας εκτίμησης με τις αξιόπιστες εκτιμήσεις κάθε μοντέλου μάθησης στην υποπερίπτωση C4

Κεφάλαιο 6
Ανακεφαλαίωση –
Μελλοντικές Επεκτάσεις

6 Ανακεφαλαίωση – Μελλοντικές Επεκτάσεις

6.1 Ανακεφαλαίωση

Τα γνωστικά δίκτυα προβάλλουν ως μια καινοτόμα, πολλά υποσχόμενη προσέγγιση του B3G οράματος. Προκρίνοντας το διαμοιρασμό του φάσματος και, συγκεκριμένα, την ευκαιριακή χρήση ζωνών συχνοτήτων που παραμένουν ακρησιμοποίητες στο χώρο και στο χρόνο, τα γνωστικά δίκτυα επιχειρούν να ανοίξουν το δρόμο στην ανάπτυξη νέων υπηρεσιών, στη βελτίωση της εμπειρίας του χρήστη, στην κατασκευή εξελιγμένων τερματικών συσκευών, καθώς και στην υιοθέτηση νέων, προηγμένων μεθόδων διαχείρισης.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής τα γνωστικά δίκτυα ορίζονται ως *«Δίκτυα που μπορούν να «αισθάνονται» το περιβάλλον τους και να αντιδρούν, προληπτικά ή διορθωτικά, σε εξωτερικά ερεθίσματα, αλλάζοντας τις παραμέτρους λειτουργίας τους με στόχο τη βέλτιστη προσαρμογή στις συνθήκες του περιβάλλοντός τους. Λαμβάνουν τις τελικές αποφάσεις διάρθρωσης, αυτόνομα, βασιζόμενα σε γνώση και εμπειρία που έχουν συγκεντρώσει κατά τη λειτουργία τους»*.

Για την εκπλήρωση, λοιπόν, των απαιτήσεων εύρυθμης και αποδοτικής λειτουργίας ενός γνωστικού δικτύου, η παρούσα διατριβή πρότεινε ένα μοντέλο αναφοράς, το οποίο περιλαμβάνει τις τρεις θεμελιώδεις και στενά συνδεδεμένες λειτουργικές φάσεις ενός τέτοιου δικτύου:

- Τη λειτουργία της επαίσθησης, η οποία επικεντρώνεται στην ανάλυση του ραδιοπεριβάλλοντος μιας κυψέλης, ειδικά δε, στη διαδικασία λήψης και συλλογής μετρήσεων που αντανακλούν τις συνθήκες και τα επίπεδα θορύβου και παρεμβολών εντός των αξιοποιήσιμων ζωνών συχνοτήτων.
- Τη λειτουργία της συλλογιστικής, η οποία εστιάζεται στην ανακάλυψη των δυνατοτήτων των υποψήφιων εναλλακτικών διαρθρώσεων, δηλαδή των δυνατικών επιδόσεών τους ως προς συγκεκριμένα κριτήρια, σε περίπτωση εφαρμογής τους.
- Τη λειτουργία λήψης αποφάσεων, κύριο αντικείμενο της οποίας είναι η λήψη απόφασης για τη βέλτιστη κατανομή διαρθρώσεων λαμβάνοντας υπόψη πλήθος παραμέτρων όπως είναι οι εκτιμήσεις για τις δυνατότητες των διαρθρώσεων, η χωρική κατανομή των τερματικών, ο βαθμός

κινητικότητάς τους, το φορτίο κίνησης, το είδος των αιτούμενων υπηρεσιών, το κόστος αναδιάρθρωσης και οι πολιτικές των παρόχων.

Η εν λόγω διατριβή επικεντρώθηκε στις δύο πρώτες λειτουργικές φάσεις των γνωστικών δικτύων; τη λειτουργία της επαίσθησης και τη λειτουργία της συλλογιστικής.

Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφηκαν οι διαδικασίες της συλλογής πρωτογενών δεδομένων στα πλαίσια της λειτουργικής φάσης της επαίσθησης. Συγκεκριμένα, παρουσιάστηκαν η προτεινόμενη τοπολογία δικτύου καθώς και οι έννοιες της αναδιάρθρωσης και της αυτονομίας των γνωστικών σταθμών βάσης. Εξετάστηκαν κατάλληλα μέτρα ποιότητας καναλιού με έμφαση σε αυτά του λόγου σήματος προς θόρυβο και παρεμβολές και της θερμοκρασίας παρεμβολών. Επιπρόσθετα, συζητήθηκαν οι απαιτήσεις υποστήριξης της λειτουργίας επαίσθησης και προτάθηκε η αξιοποίηση των κινητών τερματικών ως ένα εκτεταμένο δίκτυο επαισθητικών οργάνων. Εν συνεχεία, παρουσιάστηκαν τα δύο βασικά σχήματα επαίσθησης και εξετάζονται κατάλληλα σχήματα ανάθεσης των απαιτούμενων πόρων. Κατόπιν, παρουσιάστηκε η προτεινόμενη λειτουργική αρχιτεκτονική για τη λειτουργία επαίσθησης τόσο στην πλευρά του γνωστικού σταθμού βάσης όσο και στην πλευρά των αναδιαρθρώσιμων κινητών τερματικών. Προτάθηκε κατάλληλο πρωτόκολλο επικοινωνίας των δύο πλευρών και ορίστηκε η δομή των μηνυμάτων αίτησης επαίσθησης και αναφοράς επαίσθησης. Το κεφάλαιο έκλεισε με την παρουσίαση της ροής πληροφορίας μεταξύ των εμπλεκόμενων μονάδων στη διαδικασία επαίσθησης τόσο σε κανάλι καθόδου όσο και σε κανάλι ανόδου καθώς και με συζήτηση περί ειδικών θεμάτων υλοποίησης.

Το Κεφάλαιο 3 εστιάστηκε στη βασική συλλογιστική επί των πρωτογενών δεδομένων που συγκεντρώθηκαν μέσω της διαδικασίας επαίσθησης. Αρχικά εξηγήθηκε ο ρόλος της διαδικασίας της βασικής συλλογιστικής και παρουσιάστηκαν κατάλληλα μέτρα των προσδοκώμενων δυνατοτήτων των υποψηφίων διαρθρώσεων. Εν συνεχεία, διαχωρίστηκαν οι όροι της επιμέρους χωρητικότητας μετάδοσης και της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης και παρουσιάστηκε εποπτικά η διαδικασία της βασικής συλλογιστικής στο σύνολο της. Κατόπιν, παρουσιάστηκαν διάφοροι μέθοδοι για την εκτίμηση της επιμέρους χωρητικότητας μετάδοσης και αναλύθηκε η διαδικασία υπολογισμού της αντίστοιχης

ενεργού χωρητικότητας. Τέλος, προτάθηκαν κατάλληλες μέθοδοι για την εκτίμηση της ενεργού ακτίνας κάλυψης.

Το Κεφάλαιο 4 είχε ως αντικείμενο την διαδικασία προηγμένης συλλογιστικής με στόχο την εξαγωγή αξιόπιστων εκτιμήσεων. Αρχικά, συζητήθηκε η ανάγκη ύπαρξης σταδίου προηγμένης συλλογιστικής και αναλύθηκε ο διττός στόχος αυτού. Εν συνεχεία, προτάθηκε η εφαρμογή κατάλληλων τεχνικών μηχανικής μάθησης με στόχο την ενσωμάτωση γνώσης και εμπειρίας στο προτεινόμενο γνωστικό σύστημα. Συγκεκριμένα, παρουσιάστηκαν τρεις τεχνικές μηχανικής μάθησης κατάλληλες για τη λειτουργία της προηγμένης συλλογιστικής; η μάθηση δέντρων αποφάσεων, η μάθηση τεχνητών νευρωνικών δικτύων και η μάθηση μπεϋζιανών δικτύων. Κατόπιν, παρουσιάστηκε μια αρχική, γενική μοντελοποίηση του υπό εξέταση προβλήματος. Εν συνεχεία, έγινε παρουσίαση μιας προσαρμοσμένης μοντελοποίησης του σύμφωνα με τις αρχές κάθε ξεχωριστής τεχνικής. Τέλος, αναλύθηκαν οι παράμετροι μοντελοποίησης και παρουσιάστηκε η αντίστοιχη πολυπλοκότητα του προβλήματος.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάστηκε με λεπτομέρεια η υλοποίηση κάθε προτεινόμενου μοντέλου μηχανικής μάθησης για την επίλυση του προβλήματος απόκτησης αξιόπιστων εκτιμήσεων των δυνατοτήτων μιας υποψήφιας διάρθρωσης. Η συμπεριφορά των προτεινόμενων μοντέλων παρουσιάστηκε υπό το πρίσμα τριών επιλεγμένων σεναρίων. Η επιλογή των σεναρίων έγινε με τέτοιο τρόπο, ώστε να διαφανεί η συμπεριφορά των μοντέλων όταν λαμβάνουν χώρα τόσο ραγδαίες, παροδικές μεταβολές της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης που προκύπτει από το στάδιο της βασικής συλλογιστικής, όσο και μόνιμες μεταβολές στην εκτιμώμενη τιμή αυτής. Στόχος ήταν η μελέτη της ταχύτητας σύγκλισης των μοντέλων σε μια νέα, μόνιμη κατάσταση, καθώς και η δυνατότητα εξομάλυνσης μιας απότομης, μη αντιπροσωπευτικής καταγραφής της ενεργού χωρητικότητας μετάδοσης.

Συνοψίζοντας, η παρούσα διδακτορική διατριβή συνεισφέρει στη λειτουργική φάση της επαίσθησης και στη λειτουργική φάση της συλλογιστικής των γνωστικών δικτύων. Συγκεκριμένα, στη φάση της επαίσθησης, η παρούσα διατριβή:

- Πρότεινε τη χρήση των κινητών τερματικών ως ένα εκτεταμένο δίκτυο αισθητήρων, που πραγματοποιεί μετρήσεις επαίσθησης.
- Πρότεινε μια λειτουργική αρχιτεκτονική τόσο για την πλευρά του γνωστικού δικτύου όσο και για την πλευρά του γνωστικού τερματικού.

- Όρισε το ρόλο κάθε λειτουργικής μονάδας καθώς και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των επιμέρους μονάδων.
- Όρισε κατάλληλο πρωτόκολλο για την επικοινωνία μεταξύ γνωστικού σταθμού βάσης και γνωστικού τερματικού.
- Αξιοποίησε τα συγκριτικά πλεονεκτήματα κάθε μέτρου ποιότητας καναλιού για τους σκοπούς της επαίσθησης.

Στη φάση της συλλογιστικής, η παρούσα διατριβή:

- Συνήγαγε τις δυνατότητες μιας πιθανής διάρθρωσης βάσει των συλλεχθέντων δεδομένων της διαδικασίας επαίσθησης.
- Έκανε χρήση κατάλληλων τεχνικών μηχανικής μάθησης με στόχο το συγκερασμό της παρελθούσας εμπειρίας με πρόσφατα δεδομένα επαίσθησης προκειμένου να επιτευχθεί μια βελτιωμένη εκτίμηση των δυνατοτήτων των υποψήφιων διαρθρώσεων.
- Εισήγαγε τη χρήση πιθανοτικών μοντέλων για την αξιόπιστη εκτίμηση των δυνατοτήτων των υποψήφιων διαρθρώσεων και την αντιμετώπιση της στοχαστικής φύσης των χαρακτηριστικών του ραδιοπεριβάλλοντος.
- Συνέκρινε τα αποτελέσματα των επιμέρους τεχνικών μάθησης και εξήγαγε χρήσιμα συμπεράσματα.

6.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Αν και πολλά υποσχόμενο, το πεδίο των γνωστικών δικτύων παραμένει σε μεγάλο βαθμό ανεξερεύνητο. Μόνο σχετικά πρόσφατα έχει αρχίσει να διεξάγεται σχετική έρευνα στο πλαίσιο ευρωπαϊκών ή εθνικών προγραμμάτων. Στόχος της παρούσας διατριβής ήταν η κάλυψη ελλείψεων στην υπάρχουσα επιστημονική έρευνα και βιβλιογραφία, ελλείψεων που εστιάζονται στις λειτουργικές φάσεις της επαίσθησης και της συλλογιστικής. Μελλοντικές επεκτάσεις για τη συνέχιση της παρούσας εργασίας μπορεί να είναι:

- Η ανάπτυξη επιπρόσθετων πρωτοκόλλων τόσο για την ομότιμη (peer-to-peer) επικοινωνία μεταξύ των γνωστικών κινητών τερματικών όσο και για την επικοινωνία μεταξύ των γνωστικών σταθμών βάσης.

- Η χρήση επιπρόσθετων μέτρων και κριτηρίων των δυνητικών επίδοσης μιας υποψήφιας διάρθρωσης, όπως η πιθανότητα διακοπής κάλυψης, η μέση διάρκεια διαλείψεων, ο χρόνος συνοχής, ο ρυθμός υπέρβασης στάθμης και άλλα.
- Η μεταφορά της λειτουργικότητας των μεθόδων μηχανικής μάθησης στην πλευρά των κινητών τερματικών, λαμβάνοντας υπόψη τους συνακόλουθους περιορισμούς όπως είναι η επεξεργαστική ισχύς, η διαθέσιμη μνήμη, η διάρκεια της μπαταρίας κτλ.

6.3 Δημοσιεύσεις

6.3.1 Δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά

- [1] E. Adamopoulou, K. Demestichas, M. Theologou, “Enhanced Estimation of Configuration Capabilities in Cognitive Radio”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, no. 4, pp. 56-63, April 2008. (included among the Top 100 IEEE accessed articles)
- [2] E. Adamopoulou, K. Demestichas, P. Demestichas, and M. Theologou, “Enhancing Cognitive Radio Systems with Robust Reasoning”, *International Journal of Communication Systems, Wiley*, Vol. 21, No. 8, pp. 311-330, March 2008.
- [3] K. Demestichas, E. Adamopoulou, and M. Theologou, “Intelligent Discovery of the Capabilities of Reconfiguration Options in a Cognitive Wireless B3G Context”, *Soft Computing, Springer*, doi: 10.1007/s00500-008-0374-0, Sept. 2008.
- [4] K. Demestichas, E. Adamopoulou, and M. Theologou, “Application-Layer Community-Oriented Uplink Scheduler for CDMA Networks”, accepted for publication in the *International Journal of Communication Systems, Wiley*.
- [5] E. Adamopoulou, K. Demestichas, M. Theologou, “Robust Discovery of Reconfiguration Capabilities for Cognitive Radio”, under review in *Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics, International Institute of Informatics and Cybernetics*

- [6] K. Demestichas, E. Adamopoulou, Y. Markoulidakis, and M. Theologou, “Towards Anonymous Mobile Community Services”, *Journal of Network and Computer Applications, Elsevier*, doi:10.1016/j.jnca.2008.04.002, April 2008.
- [7] G. Dimitrakopoulos, K. Tsagkaris, K. Demestichas, E. Adamopoulou, P. Demestichas, “ A management scheme for distributed cross-layer reconfigurations in the context of cognitive B3G infrastructures”, *Computer Communications, Elsevier*, doi:10.1016/j.comcom.2007.09.011.
- [8] A. Koutsorodi, E. Adamopoulou, K. Demestichas, and M. Theologou, “Service Configuration and User Profiling in 4G Terminals”, *Wireless Personal Communications, Springer*, Vol. 43, No. 4, pp. 1303-1321, Dec. 2007.
- [9] K. Demestichas, A. Koutsorodi, E. Adamopoulou, and M. Theologou, “Modelling User Preferences and Configuring Services in B3G Devices”, *Wireless Networks, Springer*, vol. 14, no. 5, pp. 699-713, Oct. 2008.
- [10] A. Koutsorodi, E. Adamopoulou, K. Demestichas, and M. Theologou, “Terminal Management and Intelligent Access Selection in Heterogeneous Environments”, *Mobile Networks and Applications, Springer*, Vol. 11, No. 6, pp. 861-871, Dec. 2006
- [11] Y. Kritikou, P. Demestichas, E. Adamopoulou, K. Demestichas, M. Theologou, M. Paradia, “User Profile Modeling in the Context of Web – Based Learning Management Systems”, *Journal of Network and Computer Applications, Elsevier*, vol. 31, no. 4, pp. 603-627, Nov. 2008.
- [12] V. Stavroulaki, K. Demestichas, E. Adamopoulou, and P. Demestichas, “Distributed Web-based Management Framework for Ambient Reconfigurable Services in the Intelligent Environment”, *Mobile Networks and Applications, Springer*, Vol. 11, No. 6, pp. 889-900, Dec. 2006.

6.3.2 Δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά βιβλία

- [1] K. Demestichas, E. Adamopoulou, M. Masikos, and C. Patrikakis, “Location-Based Services and Techniques”, chapter of the “Handbook on Mobile Ad Hoc and Pervasive Communications”, M. K. Denko and L. T. Yang (Eds.), *American Scientific Publishers, USA*, Dec. 2006.

6.3.3 Δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά συνέδρια

- [1] E. Adamopoulou, K. Demestichas, M. Theologou, “Robust Discovery of Reconfiguration Capabilities for Cognitive Radio”, *12th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics* in Orlando, Florida, U.S.A., 29 June-2 July 2008. (received best paper award)
- [2] K. Demestichas, E. Adamopoulou, M. Theologou, “Towards the Incorporation of Learning and Adaptation Functionality in Cognitive Radio Systems”, *12th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics* in Orlando, Florida, U.S.A., 29 June-2 July 2008.
- [3] K. Demestichas, E. Adamopoulou, M. Theologou, “Ambient Community Services - Concept and Implementation”, *12th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics* in Orlando, Florida, U.S.A., 29 June-2 July 2008.
- [4] K. Demestichas, E. Adamopoulou, M. Theologou, C. Desiniotis, and J. Markoulidakis, “Towards Ambient Community Services”, in *11th IEEE/ACM International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT 2007)* in Chania, Crete Island, Greece, 22-26 Oct. 2007.
- [5] E. Adamopoulou, K. Demestichas, C. Desiniotis, J. Markoulidakis, M. Theologou, “Architecture and Scalability Issues for the Provision of Anonymous Real-Time Mobile Community Services”, in the *18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2007)* in Athens, Greece, Sept. 2007.
- [6] E. Adamopoulou, K. Demestichas, C. Dessiniotis, J. Markoulidakis, and M. Theologou, “Introducing Anonymous Real-Time Mobile Community Services”, in *16th IST Mobile Summit* in Budapest, Hungary, 1-5 July 2007.
- [7] K. Demestichas, E. Adamopoulou, M. Theologou, P. Demestichas, D. Boscovic, and D. Bourse, “Towards Cognitive B3G Networks: Autonomic Management of Access Points”, in *16th IST Mobile Summit* in Budapest, Hungary, 1-5 July 2007.
- [8] G. Dimitrakopoulos, K. Tsagkaris, E. Adamopoulou, K. Demestichas, and P. Demestichas, “Management Strategies for Distributed Cross-Layer Reconfigurations in the Context of Cognitive, B3G Infrastructures”, in *16th IST Mobile Summit* in Budapest, Hungary, 1-5 July 2007.
- [9] Y. Kritikou, P. Demestichas, E. Adamopoulou, and K. Demestichas, “User Modeling in the Context of Cognitive Service Delivery: Application to Learning

- Management Systems”, in the *International Joint Conferences on Computer, Information, and Systems Sciences, and Engineering, International Conference on Engineering Education, Instructional Technology, Assessment, and E-learning (CISSE 2006)*, 4-14 Dec. 2006.
- [10] E. Adamopoulou, K. Demestichas, P. Demestichas, and M. Theologou, “Robust Discovery of Reconfiguration Capabilities in Cognitive Radio Systems”, in the *17th Wireless World Research Forum (WWRF) Meeting* in Heidelberg, Germany, 15-17 Nov. 2006.
- [11] V. Stavroulaki, K. Demestichas, E. Adamopoulou, and P. Demestichas, “Distributed Ambient Management Platform for Heterogeneous Devices and Networks in an Intelligent Environment (DAPHNE)”, presented at *eChallenges e-2006* in Barcelona, Spain, 25-27 Oct. 2006.
- [12] P. Demestichas, G. Dimitrakopoulos, K. Tsagkaris, K. Demestichas, J. Adamopoulou, and J. Strassner, “Reconfiguration Discovery and Selection in the Context of Autonomic Management of Cognitive Wireless Infrastructures”, in the *1st IEEE International Workshop on Modelling Autonomic Communication Environments (MACE 2006)* in Dublin, Ireland, 25-26 Oct. 2006.
- [13] A. Koutsorodi, E. Adamopoulou, K. Demestichas, and M. Theologou, “User Profiling and Preference Modelling in 4G Terminals”, in the *17th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2006)* in Helsinki, Finland, pp. 1-6, Sept. 2006.
- [14] F. Malamateniou, K. Tsagkaris, K. Demestichas, E. Adamopoulou, and P. Demestichas, “Developing a Context-Aware, Multimodal Hospital Information System”, in the *Medical Informatics Europe (MIE) Conference 2006* in Maastricht, The Netherlands, 27-30 August 2006.
- [15] M. Masikos, K. Demestichas, E. Adamopoulou, and C. Desiniotis, “The MOTIVE Concept – Enabling Mobile Terminals to Act as Sensors”, in the *International Conference on Wireless Information Networks and Systems 2006 (WINSYS 2006)* in Setubal, Portugal, 7-10 August 2006.
- [16] A. Koutsorodi, K. Demestichas, E. Adamopoulou, and M. Theologou, “Service Configuration and Access Selection in 4G Terminals”, in the *5th International Symposium on Communications Systems, Networks and Digital Signal Processing* in Patras, Greece, 19-21 July 2006.

- [17] P. Demestichas, G. Dimitrakopoulos, K. Tsagkaris, K. Demestichas, and J. Adamopoulou, "Reconfigurations Selection in Cognitive, Beyond 3G, Radio Infrastructures", in the *1st International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom 2006)* in Myconos, Greece, 8-10 June 2006.
- [18] A. Koutsorodi, E. Adamopoulou, K. Demestichas, and M. Theologou, "Intelligent Access Network Selection in Heterogeneous Networks – Simulation Results", in the *15th IST Mobile Summit* in Myconos, Greece, 4-8 June 2006.
- [19] A. Koutsorodi, E. Adamopoulou, K. Demestichas, and M. Theologou, "A User-Centric Approach for Beyond 3G Business Models", in the *16th Wireless World Research Forum (WWRF) Meeting* in Shanghai, China, 26-28 April 2006.
- [20] E. Adamopoulou, K. Demestichas, A. Koutsorodi, and M. Theologou, "Intelligent Access Network Selection in Heterogeneous Networks", in the *12th European Wireless Conference 2006* in Athens, Greece, 2-5 April 2006.
- [21] E. Adamopoulou, K. Demestichas, A. Koutsorodi, and M. Theologou, "Access Selection and User Profiling in Reconfigurable Terminals", in the *15th Wireless World Research Forum (WWRF) Meeting* in Paris, France, 8-9 Dec. 2005.
- [22] E. Adamopoulou, K. Demestichas, A. Koutsorodi, and M. Theologou, "Intelligent Access Selection in Heterogeneous Networks – Simulation Results", in the *2nd International Symposium on Wireless Communication Systems 2005 (ISWCS 2005)* in Sienna, Italy, pp. 279-283, 5-7 Sept. 2005.
- [23] A. Koutsorodi, E. Adamopoulou, K. Demestichas, and M. Theologou, "Terminal-Controlled Access Network Selection in Heterogeneous Networks", in the *14th Wireless World Research Forum (WWRF) Meeting* in San Diego, US, 7-8 July 2005.

Αρτικόλεξα

Αρτικόλεξο	Απόδοση στην Αγγλική	Απόδοση στην Ελληνική
ADC	Analogue to Digital Converters	Μετατροπείς Ψηφιακού Σήματος σε Αναλογικό
AMPS	Advanced Mobile Phone System	Προχωρημένο Σύστημα Κινητής Τηλεφωνίας
AMS	Application Management System	Σύστημα Διαχείρισης Εφαρμογών
API	Application Programming Interface	Διεπαφή Προγραμματισμού Εφαρμογών
ASN.1	Abstract Syntax Notation One	Αφηρημένη Δήλωση Σύνταξης
AWGN	Additive White Gaussian Noise	Αθροιστικός Λευκός Γκαουσιανός Θόρυβος
B3G	Beyond the Third Generation	Πέραν της 3ης Γενιάς
BEP	Bit Error Probability	Πιθανότητα Λάθους Δυαδικού Ψηφίου
BER	Bit Error Rate	Ρυθμός Λάθους Δυαδικού Ψηφίου
CAPEX	Capital Expenditures	Έξοδα Κεφαλαίου
CBS	Cell Broadcast Service	Υπηρεσία Εκπομπής Κυπέλλης
CDMA	Code Division Multiple Access	Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Κώδικα
CLPC	Closed-Loop Power Control	Έλεγχος Ισχύος Κλειστού Βρόχου
CSI	Channel State Information	Πληροφορία Κατάστασης Καναλιού
DAC	Digital to Analogue Converters	Μετατροπείς Αναλογικού Σήματος σε Ψηφιακό
DB - ΒΔ	Database	Βάση Δεδομένων
DFS	Dynamic Frequency Selection	Δυναμική Επιλογή Συχνότητας
DSP	Digital Signal Processors	Επεξεργαστές Ψηφιακού Σήματος
DVB	Digital Video Broadcasting	Ψηφιακή Μετάδοση Video
EBML	Extensible Binary Meta Language	Επεκτάσιμη Δυαδική Μετα-Γλώσσα
ED	Euclidean Distance	Ευκλείδεια Απόσταση
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution	Ενισχυμένοι Ρυθμοί Δεδομένων για την Εξέλιξη του GSM
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power	Ισοδύναμη Ισοτροπικά Εκπεμπόμενη Ισχύς
EXI	Efficient XML Interchange	Αποτελεσματική Ανταλλαγή XML
FCC	Federal Communication Commission	Ομοσπονδιακή Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών
FER	Frame Error Rate	Ρυθμός Λάθους Πλαισίου
FFT	Fast Fourier Transformation	Ταχύς Μετασχηματισμός Φουριέ

FPGA	Field Programmable Gate Arrays	Μήτρες Προγραμματιζόμενων Πυλών Πεδίου
FSK	Frequency Shift Keying	Διαμόρφωση Μετατόπισης Συχνότητας
GPP	General Purpose Processors	Επεξεργαστές Γενικής Χρήσης
GPRS	General Packet Radio Service	Γενική Ασύρματη Υπηρεσία Πακέτου
GPS	Global Positioning System	Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης
GSM	Global System for Mobile Communications	Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών
HOS	Higher Order Statistics	Στατιστικά Στοιχεία Υψηλότερης Τάξεως
HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access	Υψηλής Ταχύτητας Πρόσβαση Πακέτου στη Ζεύξη Καθόδου
HS-DSCH	High-Speed Downlink Shared Channel	Υψηλής Ταχύτητας Διαμοιραζόμενος Δίαυλος στη Ζεύξη Καθόδου
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών
IP	Internet Protocol	Πρωτόκολλο Διαδικτύου
IP	Interference Projection	Προβολή Παρεμβολής
ISO	International Organization for Standardization	Διεθνής Οργανισμός Προτυποποίησης
IT	Interference Temperature	Θερμοκρασία Παρεμβολών
ITU	International Telecommunications Union	Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών
J2ME	Java 2 Micro Edition	Έκδοση της Γλώσσας Java
MIDP	Mobile Information Device Profile	Προφίλ Πληροφοριών Κινητής Συσκευής
MMSE	Minimum Mean Square-Error	Ελάχιστο Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα
MSE	Mean Squared Error	Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing	Ορθογωνική Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access	Ορθογωνική Πολλαπλή Πρόσβασης Διαίρεσης Συχνότητας
PAM	Pulse Amplitude Modulation	Διαμόρφωση Έυρους Παλμού
PER	Packed Encoding Rules	Κανόνες Συμπιεσμένης Κωδικοποίησης
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	Εγκάρσια Διαμόρφωση Εύρους
QoS	Quality of Service	Ποιότητα Υπηρεσίας
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying	Εγκάρσια Διαμόρφωση Μετατόπισης Φάσης
RAT	Radio Access Technology	Τεχνολογία Ραδιοπρόσβασης
RF	Radio Frequency	Ραδιοσυχνότητα
SB	Subspace-Based	Βασισμένο σε Υποχώρους

SDR	Software Defined Radio	Λογισμικώς Καθορισμένα Συστήματα Ασύρματων Επικοινωνιών
SEP	Symbol Error Probability	Πιθανότητα Λάθους Συμβόλου
SER	Symbol Error Rate	Ρυθμός Λάθους Συμβόλου
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio	Λόγος Σήματος προς Παρεμβολή και Θόρυβο
SIR	Signal-to-Interference Ratio	Λόγος Σήματος προς Παρεμβολή
SMS	Short Message Service	Υπηρεσία Σύντομων Μηνυμάτων
SOM	Self-Organizing Map	Αυτο-Οργανούμενος Χάρτης
SOS	Second Order Statistics	Στατιστικά Στοιχεία Δευτέρας Τάξεως
SP	Signal Projection	Προβολή Σήματος
STTD	Space Time Transmit Diversity	Χωροχρονικός Διαφορισμός Εκπομπής
TCP	Transmission Control Protocol	Πρωτόκολλο Ελέγχου Μετάδοσης
TDMA	Time Division Multiple Access	Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Χρόνου
TPC	Transmit Power Control	Έλεγχος Ισχύος Μετάδοσης
UDP	User Datagram Protocol	Πρωτόκολλο Δεδομενογραμμάτων Χρήστη
UML	Unified/Universal Modeling Language	Παγκόσμια Γλώσσα Μοντελοποίησης
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System	Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Τηλεπικοινωνιών
UWB	Ultra Wide Band	Υπερευρυζωνικό
VBIP	Vector-Based Interference Projection	Προβολή Παρεμβολής Βασισμένη σε Διανύσματα
WAP	Wireless Application Protocol	Πρωτόκολλο Ασύρματων Εφαρμογών
W-CDMA	Wideband-Code Division Multiple Access	Ευρυζωνική Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Κώδικα
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access	Παγκόσμια Διαλειτουργικότητα για Μικροκυματική Πρόσβαση
WLAN	Wireless Local Area Network	Ασύρματο Τοπικό Δίκτυο
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network	Ασύρματο Μητροπολιτικό Δίκτυο
XML	Extensible Markup Language	Επεκτάσιμη Γλώσσα Σήμανσης