



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

**ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΓΝΩΣΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Κωνσταντίνου Πέτρου Δεμέστιχα

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

Κωνσταντίνου Π. Δεμέστιχα

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ 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

.....
Κωνσταντίνος Π. Δεμέστιχας

Διδάκτωρ Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

Copyright © Κωνσταντίνος Π. Δεμέστιχας, 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 το συγγραφέα.

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

Περίληψη

Τα γνωστικά δίκτυα συνιστούν μία νέα πρόταση για την εξέλιξη των συστημάτων ασύρματων επικοινωνιών, από ετερογενή σύνολα διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης σε ενοποιημένα, αυτόνομα συστήματα επικοινωνιών με επίγνωση περιβάλλοντος, ικανά να αντιλαμβάνονται, να προσαρμόζονται, να δρουν, να αντιδρούν και να μαθαίνουν. Η βασική αρχή λειτουργίας τους κινείται σε δύο άξονες: την αυτόνομη διαχείριση και την ευκαιριακή χρήση συχνοτήτων που μένουν αχρησιμοποίητες στο χώρο και στο χρόνο.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, χρησιμοποιείται ένα μοντέλο λειτουργίας των γνωστικών δικτύων, το οποίο αποτελείται από τρεις θεμελιώδεις λειτουργικές διαδικασίες: τη λειτουργία της επαίσθησης, τη λειτουργία της συλλογιστικής και τη λειτουργία της λήψης απόφασης. Στα πλαίσια της λειτουργίας της επαίσθησης, το γνωστικό σύστημα παρακολουθεί τις συνθήκες που διαμορφώνονται στο ραδιοπεριβάλλον του, όπως ακριβώς ένας βιολογικός οργανισμός παρατηρεί και «διαισθάνεται» το δικό του περιβάλλον. Έτσι, καθίσταται δυνατή η προσαρμογή του συστήματος στις παρατηρούμενες μεταβολές. Σκοπός της λειτουργίας της συλλογιστικής είναι η επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων που συλλέγονται μέσω της διαδικασίας της επαίσθησης, προκειμένου να προσδιοριστούν οι προσδοκώμενες επιδόσεις των υποψήφιων διαρθρώσεων, σε περίπτωση εφαρμογής τους. Ο απώτερος σκοπός ενός γνωστικού συστήματος είναι η επιλογή της καταλληλότερης διάρθρωσης για τη βέλτιστη ικανοποίηση των χρηστών του, κάτι που αποτελεί αντικείμενο της λειτουργίας της λήψης απόφασης. Οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη σε μια τέτοια διαδικασία βελτιστοποίησης είναι τα δευτερογενή δεδομένα της συλλογιστικής λειτουργίας, η διάταξη των τερματικών, ο βαθμός κινητικότητάς τους και το φορτίο κίνησής τους, το κόστος αναδιάρθρωσης, καθώς και οι προδιαγεγραμμένοι κανόνες και πολιτικές.

Η παρούσα διατριβή ασχολείται με το πρώτο και το τρίτο στρώμα του γνωστικού μοντέλου αναφοράς, δηλαδή με τις λειτουργίες της επαίσθησης και της λήψης απόφασης. Συγκεκριμένα, στο στάδιο της επαίσθησης, η παρούσα διατριβή υιοθετεί την ιδέα της αξιοποίησης των κινητών τερματικών ως κατανεμημένων αισθητήρων λήψης μετρήσεων επαίσθησης, με το γνωστικό σταθμό βάσης να λειτουργεί ως σημείο συγκέντρωσης και επεξεργασίας των επαισθητικών δεδομένων. Σε αυτήν τη

βάση, προσδιορίζει και οριοθετεί το πρόβλημα της κλιμακωσιμότητας της λειτουργίας της επαίσθησης, ειδικά ως προς τη διαδικασία συγκέντρωσης των επαισθητικών μετρήσεων στο γνωστικό σταθμό βάσης. Εν συνεχεία, προχωρά στην ενδελεχή μελέτη της δυνατότητας κλιμάκωσης της διαδικασίας της επαίσθησης, για διάφορους τύπους ραδιοδιεπαφών μεταξύ τερματικών και σταθμού βάσης και εξετάζει την επίδραση μιας σειράς διαφορετικών παραμέτρων. Τέλος, προτείνει καινοτόμους αλγόριθμους χρονοπρογραμματισμού της διαδικασίας ενημέρωσης του σταθμού βάσης, εφαρμόσιμους στις περιπτώσεις που συμμετέχουν σε αυτήν πολλαπλά τερματικά, με απώτερο στόχο την επίτευξη ενός ικανοποιητικού συμβιβασμού μεταξύ του βαθμού χρησιμοποίησης των διαθέσιμων ραδιοπόρων και της ταχύτητας συλλογής των επαισθητικών δεδομένων.

Όσον αφορά το στάδιο της λήψης απόφασης, η παρούσα διατριβή προτείνει έναν ευφυή αλγόριθμο βέλτιστης επιλογής διαρθρώσεων για τους γνωστικούς σταθμούς βάσης, ο οποίος συνυπολογίζει το είδος και τις δυνατότητες των υποψήφιων διαρθρώσεων, το αιτούμενο φορτίο κίνησης, τη χωρική διάταξη των τερματικών, το κόστος αναδιάρθρωσης και άλλες παραμέτρους, επιτυγχάνοντας μια πολύπλευρη αξιολόγηση των υποψήφιων διαρθρώσεων σε τομείς όπως το ποσοστό κάλυψης, η χωρητικότητα χρηστών, η χωρητικότητα μετάδοσης, η υποστήριξη κινητικότητας και το κόστος. Εν συνεχεία, επεκτείνει τον προτεινόμενο αλγόριθμο βελτιστοποίησης ενσωματώνοντας μια λειτουργία ευφυούς ιεράρχησης των κριτηρίων επίδοσης. Τέλος, προχωρά στην εξαγωγή, το σχολιασμό και την αξιολόγηση αποτελεσμάτων εκτέλεσης του προτεινόμενου αλγορίθμου.

Λέξεις κλειδιά: γνωστικά δίκτυα, διαμοιρασμός φάσματος, αναδιάρθρωση, αξιολόγηση διαρθρώσεων, βελτιστοποίηση κατανομής διαρθρώσεων, αυτόνομη διαχείριση, πλατφόρμα διαχείρισης, ασύρματες επικοινωνίες πέραν της τρίτης γενιάς, λογισμικώς καθορισμένα συστήματα ασύρματων επικοινωνιών, επαίσθηση, δυνατότητες κλιμάκωσης, αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού, μηχανική μάθηση, πιθανολογικά μοντέλα, νευρωνικά δίκτυα.

Abstract

Cognitive networks constitute a new approach towards the evolution of wireless communication systems, from heterogeneous sets of diverse technologies to unified, autonomous and environment-aware communication systems, capable of sensing, adjusting, acting, reacting and learning. Their main operational principle lies in two focal points: the concept of autonomic management and the opportunistic use of frequencies that remain unexploited in space and time.

In the context of the present thesis, a functional model of cognitive networks is presented. This model comprises of three fundamental operational processes; the process of sensing, the process of reasoning and the decision-reaching process. During the sensing phase, the cognitive system monitors the conditions of its RF environment, just as a biological entity monitors and senses its own environment. This sensing process renders the system capable of adjusting to the monitored environmental changes. The reasoning phase aims at processing the raw data collected during the sensing phase, in order to determine the anticipated capabilities of alternate configurations, in case the latter are applied. The ultimate goal of a cognitive system is the selection of the most appropriate configuration for the optimal satisfaction of end users. The decision-reaching phase focuses on, exactly, this selection procedure. The parameters taken into account in the optimization process are the processed data of the reasoning phase, the spatial distribution of mobile terminals, their mobility degree, the reconfiguration cost, as well as the network operators' policies and strategies.

The present thesis focuses on the first and the third phase of the cognitive reference model, namely the sensing and the decision-reaching phase. In detail, regarding the sensing phase, the thesis adopts the concept of using mobile terminals as distributed, low-cost sensors with the corresponding base station responsible for collecting and processing the sensing data. In this light, it defines and dimensions the scalability issues arising during the sensing process, regarding the process of transmitting the sensing data to the cognitive base station. Following this, it studies in detail the scalability options for different types of radio interfaces and examines the corresponding effect of various parameters. Finally, it proposes innovative time-scheduling algorithms for the base station updating process, applicable in cases of

multiple sensing mobile terminals, with a view to achieving a satisfactory compromise between the allocation of available radio resources and the speed of sensing data collection.

Regarding the decision-reaching phase, the thesis proposes an intelligent algorithm for the optimal selection of the cognitive base stations' configurations, which takes under consideration the type and capabilities of candidate configurations, the network load, the spatial distribution of mobile terminals, the reconfiguration cost and other parameters, achieving a multifaceted evaluation of alternate configurations, in terms of coverage capability, user capacity, transmission capacity, mobility support and cost. Furthermore, the thesis enhances the suggested optimization algorithm by encompassing an intelligent ranking functionality of the performance criteria. Finally, the thesis proceeds with the extraction and evaluation of representative results of the proposed algorithm.

Keywords: cognitive networks, spectrum sharing, reconfiguration, configuration evaluation, optimization of configuration distribution, autonomic management, management platform, B3G wireless communications, software defined radio, sensing, scalability, time-scheduling, machine learning, probabilistic models, neural 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. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Θεολόγου από τα βάθη της καρδιάς μου όχι μόνο για την αμέριστη βοήθεια και συμπαράσταση που μου παρείχε, αλλά και γιατί στέκεται ως φωτεινό υπόδειγμα (και επιστήμονα αλλά και ανθρώπου) για όλους μας.

Επιπλέον, δε θα μπορούσα να μη μνημονεύσω τη βοήθεια που έλαβα, κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής, 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. Οι συμβουλές και η καθοδήγηση που μου προσέφεραν, χάρη στην εμπειρία τους, αποδείχτηκαν εξαιρετικά χρήσιμες και θα ήθελα να τους ευχαριστήσω ειλικρινά γι' αυτό.

Θα ήθελα, ακόμα, να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς τους Καθηγητές κ. Γεώργιο Στασινόπουλο, κ. Φίλιππο Κωνσταντίνου και κ. Νικόλαο Μήτρου, μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής της διατριβής μου, για τη στήριξη, τόσο ηθική όσο και επιστημονική, που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια της παρουσίας μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. 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 μου.

Ευχαριστώ θερμά όλους τους φίλους, το Μιχάλη και την Όλγα, τους δύο Δημήτρηδες (Αξιώτη και Νικητόπουλο), καθώς και όλους τους συνεργάτες, για τη συμπαράσταση και τις ωραίες στιγμές που περάσαμε στο εργαστήριο. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Άρτεμη για την καταπληκτική συνεργασία που είχαμε αλλά και τη φιλία που μας συνδέει.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Τζένη, γιατί υπάρχει στη ζωή μου και γιατί ήταν, είναι και θα είναι ό,τι πιο σημαντικό σε αυτήν. Γι' αυτό και η εργασία αυτή είναι αφιερωμένη σ' εκείνη.

Κωνσταντίνος Π. Δεμέστιχας

Στην Τζένη

Πίνακας Περιεχομένων

1	Εισαγωγή	27
1.1	Σημερινό τοπίο των ασύρματων επικοινωνιών	27
1.2	Περιβάλλον πέραν της 3ης γενιάς	29
1.3	Γνωστικά Δίκτυα	29
1.3.1	<i>Κίνητρα ανάπτυξης</i>	29
1.3.2	<i>Ορισμός</i>	30
1.3.3	<i>Καινοτομίες γνωστικών δικτύων</i>	30
1.3.4	<i>Διαμοιρασμός φάσματος</i>	31
1.3.4.1	Τρέχον σχήμα ανάθεσης συχνοτήτων	31
1.3.4.2	Ευκαιριακή χρήση συχνοτήτων	33
1.3.4.3	Μέτρα εκτίμησης παρεμβολών	33
1.3.5	<i>Λογισμικώς Καθορισμένα Συστήματα Επικοινωνιών</i>	36
1.3.5.1	Γενικά	36
1.3.5.2	Αρχιτεκτονική αναφοράς	37
1.3.6	<i>Αυτονομία γνωστικών δικτύων</i>	38
1.3.6.1	Βασικές αρχές διαχείρισης	38
1.3.6.2	Πιθανά σχήματα διαχείρισης	38
1.3.6.3	Αυτόνομη υπολογιστική	39
1.3.6.4	Πρόβλημα διαχειριστικής πολυπλοκότητας	39
1.3.6.5	Η επιλογή της αυτονομίας	40
1.3.6.6	Χαρακτηριστικά αυτόνομων δικτύων	41
1.3.6.7	Αρχιτεκτονικές θεωρήσεις	43
1.3.7	<i>Πλεονεκτήματα γνωστικών δικτύων</i>	48
1.3.8	<i>Γνωστικός κύκλος</i>	50
1.4	Αντικείμενο διατριβής	52
1.5	Σχετικές εργασίες	55
1.6	Διάρθρωση διατριβής	61
1.7	Παραπομπές	63
2	Δυνατότητες κλιμάκωσης της συλλογής επαισθητικών δεδομένων	75
2.1	Η ανάγκη μελέτης της κλιμακωσιμότητας της λειτουργίας της επαίσθησης 75	
2.1.1	<i>Τοπολογία του εξεταζόμενου γνωστικού δικτύου</i>	75
2.1.2	<i>Η λειτουργία της επαίσθησης και το πρόβλημα της κλιμάκωσης</i>	77
2.2	Μελέτη των δυνατοτήτων κλιμάκωσης	79
2.2.1	Γενικά	79
2.2.2	<i>GERAN – SMS</i>	80
2.2.2.1	Παράμετροι μοντέλου	80
2.2.2.2	Μέτρα κλιμακωσιμότητας	81
2.2.2.3	Σενάριο 1 – Κλιμακωσιμότητα συναρτήσει του αριθμού των SDCCH καναλιών	83
2.2.2.4	Σενάριο 2 – Κλιμακωσιμότητα συναρτήσει του χρόνου κατάληψης ενός SDCCH καναλιού	84
2.2.2.5	Σενάριο 3 – Κλιμακωσιμότητα συναρτήσει του μεγέθους της αναφοράς 88	

2.2.2.6	Σενάριο 4 – Κλιμακωσιμότητα συναρτήσει του ρυθμού ενημέρωσης	91
2.2.3	<i>GERAN – GPRS</i>	93
2.2.3.1	Παράμετροι μοντέλου	93
2.2.3.2	Μέτρα κλιμακωσιμότητας	94
2.2.3.3	Σενάριο 1 – Κλιμακωσιμότητα συναρτήσει του μεγέθους της αναφοράς	96
2.2.3.4	Σενάριο 2 – Κλιμακωσιμότητα συναρτήσει των χρησιμοποιήσιμων ραδιοπόρων	99
2.2.3.5	Σενάριο 3 – Κλιμακωσιμότητα συναρτήσει της μέσης ταχύτητας μετάδοσης	102
2.2.3.6	Σενάριο 4 – Κλιμακωσιμότητα συναρτήσει του ρυθμού ενημέρωσης	106
2.2.4	<i>UTRAN</i>	108
2.2.4.1	Παράμετροι μοντέλου	108
2.2.4.2	Μέτρα κλιμακωσιμότητας	108
2.2.4.3	Σενάριο 1 – Κλιμακωσιμότητα συναρτήσει του φορτίου κανονικής κίνησης	110
2.2.4.4	Σενάριο 2 – Κλιμακωσιμότητα συναρτήσει του ρυθμού ενημέρωσης	115
2.2.4.5	Σενάριο 3 – Κλιμακωσιμότητα συναρτήσει του μεγέθους της αναφοράς	122
2.2.5	<i>WLAN</i>	129
2.2.6	<i>Επίλογος</i>	130
2.3	Παραπομπές	131
3	Αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού της διαδικασίας ενημέρωσης του γνωστικού σταθμού βάσης	135
3.1	Εισαγωγή	135
3.2	Μοντέλο χρονοπρογραμματισμού «birthday paradox»	136
3.2.1	<i>Γενικά</i>	136
3.2.2	<i>Θεωρητικό υπόβαθρο</i>	137
3.2.3	<i>Μοντελοποίηση του προβλήματος</i>	138
3.2.4	<i>Επίλυση του προβλήματος και αποτελέσματα</i>	140
3.2.4.1	Επίλυση του προβλήματος	140
3.2.4.2	Αποτελέσματα	141
3.3	Χρονοπρογραμματιστής αλυσιδωτών δυνωμικών κατανομών	145
3.3.1	<i>Γενικά</i>	145
3.3.2	<i>Ανάλυση του μοντέλου και αποτελέσματα</i>	145
3.4	Μοντέλο χρονοπρογραμματισμού βασισμένο στη θεωρία παιγνίων	151
3.4.1	<i>Γενικά</i>	151
3.4.2	<i>Θεωρία παιγνίων</i>	151
3.4.2.1	Εισαγωγή	151
3.4.2.2	Χαρακτηριστικά παιγνίου	152
3.4.2.3	Το δίλημμα των φυλακισμένων	153
3.4.2.4	Επικρατούσα στρατηγική – Nash Equilibrium	154
3.4.2.5	Τεχνικές προσδιορισμού του Nash Equilibrium	156
3.4.2.6	Σύνθετες στρατηγικές	157
3.4.2.7	Τεχνικές προσδιορισμού του Nash Equilibrium στην περίπτωση σύνθετων στρατηγικών	159
3.4.3	<i>Ανάλυση του μοντέλου και αποτελέσματα</i>	160

3.5	Παραπομπές	164
4	Βέλτιστες αποφάσεις αναδιάρθρωσης	167
4.1	Εισαγωγή	167
4.2	Η αναγκαιότητα ευφών αλγορίθμων επιλογής διαρθρώσεων	169
4.3	Γενική περιγραφή της προτεινόμενης μεθόδου	171
4.4	Μαθηματική μοντελοποίηση των παραμέτρων του προβλήματος.....	173
4.5	Μαθηματική επίλυση του προβλήματος.....	178
4.6	Επιλογή συναρτήσεων ωφέλειας	183
4.6.1	<i>Η έννοια της ωφέλειας</i>	183
4.6.2	<i>Κατάλληλες συναρτήσεις ωφέλειας</i>	186
4.7	Πλατφόρμα διαχείρισης της επιλογής βέλτιστων κατανομών διαρθρώσεων 193	
4.8	Εξαγωγή αποτελεσμάτων	206
4.8.1	<i>Παράμετροι εισόδου</i>	206
4.8.1.1	Γενικές ρυθμίσεις.....	206
4.8.1.2	Παράμετροι συναρτήσεων ωφέλειας.....	207
4.8.1.3	Ειδικές παράμετροι των τεχνολογιών πρόσβασης.....	208
4.8.1.4	Παράμετροι φορτίου κίνησης	211
4.8.1.5	Παράμετροι υποστήριξη κινητικότητας, κόστους αναδιάρθρωσεων και βαρών	212
4.8.2	<i>Διαμόρφωση σεναρίων</i>	213
4.8.3	<i>Λίστα υποψήφιων κατανομών διαρθρώσεων</i>	215
4.8.4	<i>1η σειρά σεναρίων</i>	217
4.8.4.1	Ομοιόμορφη κατανομή χρηστών.....	217
4.8.4.2	Κατανομή χρηστών με υψηλή πυκνότητα στο κέντρο	222
4.8.4.3	Κατανομή χρηστών με υψηλή πυκνότητα στα άκρα	224
4.8.4.4	Συγκεντρωτικοί πίνακες αποτελεσμάτων	225
4.8.5	<i>2η σειρά σεναρίων</i>	226
4.8.5.1	Ομοιόμορφη κατανομή χρηστών	226
4.8.5.2	Κατανομή χρηστών με υψηλή πυκνότητα στο κέντρο	228
4.8.5.3	Κατανομή χρηστών με υψηλή πυκνότητα στα άκρα.....	229
4.8.5.4	Συγκεντρωτικοί πίνακες αποτελεσμάτων	231
4.8.6	<i>3η σειρά σεναρίων</i>	232
4.8.6.1	Ομοιόμορφη κατανομή χρηστών.....	232
4.8.6.2	Κατανομή χρηστών με υψηλή πυκνότητα στο κέντρο	234
4.8.6.3	Κατανομή χρηστών με υψηλή πυκνότητα στα άκρα.....	235
4.8.6.4	Συγκεντρωτικοί πίνακες αποτελεσμάτων	237
4.8.7	<i>Σχολιασμός αποτελεσμάτων</i>	237
4.8.8	<i>Σύγκριση με προκαθορισμένες πολιτικές</i>	240
4.9	Παραπομπές	243
5	Ευφύης ιεράρχηση των κριτηρίων επίδοσης	247
5.1	Ανάγκη ευφούς ιεράρχησης των κριτηρίων επίδοσης.....	247
5.2	Νευρωνικά δίκτυα.....	249
5.2.1	<i>Εισαγωγή</i>	249
5.2.2	<i>Ιστορική εξέλιξη</i>	249
5.2.3	<i>Δυνατότητα μάθησης νευρωνικών δικτύων</i>	250
5.2.4	<i>Το μοντέλο πολυστρωματικού νευρωνικού δικτύου</i>	251
5.2.5	<i>Αρχιτεκτονική πολυστρωματικού νευρωνικού δικτύου</i>	252
5.2.6	<i>Εκπαίδευση πολυστρωματικών νευρωνικών δικτύων</i>	253
5.3	Προτεινόμενο μοντέλου νευρωνικού δικτύου	259

5.3.1	<i>Κατασκευή και εκπαίδευση νευρωνικού δικτύου</i>	259
5.3.2	<i>Ενδεικτικά αποτελέσματα εξόδου νευρωνικού δικτύου</i>	264
5.4	Παραπομπές	269
6	Ανακεφαλαίωση – Μελλοντικές επεκτάσεις	273
6.1	Ανακεφαλαίωση	273
6.2	Μελλοντικές επεκτάσεις	276
6.3	Δημοσιεύσεις	277
6.3.1	<i>Δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά</i>	277
6.3.2	<i>Δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά βιβλία</i>	279
6.3.3	<i>Δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά συνέδρια</i>	279
	Αρκτικόλεξα	283

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1-1. Μεσοσταθμισμένη χρησιμοποίηση φάσματος σε έξι περιοχές των Η.Π.Α.	32
Σχήμα 1-2. Βασική αρχιτεκτονική ενός SDR συστήματος.....	38
Σχήμα 1-3. Αρχιτεκτονική αναφοράς συστήματος αυτόνομης υπολογιστικής.....	44
Σχήμα 1-4. Τυπικός βρόχος ελέγχου ενός αυτόνομου συστήματος.....	46
Σχήμα 1-5. Γνωστικός κύκλος.....	50
Σχήμα 1-6. Γνωστικό μοντέλο αναφοράς.....	53
Σχήμα 2-1. Υπό θεώρηση γνωστική δικτυακή τοπολογία.....	75
Σχήμα 2-2. Η καθυστέρηση T συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N, για διάφορες τιμές του αριθμού των διαθέσιμων στο κελί καναλιών SDCCH.....	83
Σχήμα 2-3. Ο βαθμός χρησιμοποίησης u_{sense} συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N, για διάφορες τιμές του αριθμού των διαθέσιμων στο κελί καναλιών SDCCH.....	84
Σχήμα 2-4. Η καθυστέρηση T συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N, για διάφορες τιμές του χρόνου κατάληψης ενός καναλιού SDCCH, όταν $n_{SDCCH}=8$	86
Σχήμα 2-5. Ο βαθμός χρησιμοποίησης u_{sense} συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N, για διάφορες τιμές του χρόνου κατάληψης ενός καναλιού SDCCH, όταν $n_{SDCCH}=8$	86
Σχήμα 2-6. Η καθυστέρηση T συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N, για διάφορες τιμές του χρόνου κατάληψης ενός καναλιού SDCCH, όταν $n_{SDCCH}=6$	87
Σχήμα 2-7. Ο βαθμός χρησιμοποίησης u_{sense} συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N, για διάφορες τιμές του χρόνου κατάληψης ενός καναλιού SDCCH, όταν $n_{SDCCH}=6$	87
Σχήμα 2-8. Η καθυστέρηση T συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N, για διάφορα μεγέθη αναφορών, όταν $n_{SDCCH}=8$	89
Σχήμα 2-9. Ο βαθμός χρησιμοποίησης u_{sense} συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N, για διάφορα μεγέθη αναφορών, όταν $n_{SDCCH}=8$	89
Σχήμα 2-10. Η καθυστέρηση T συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N, για διάφορα μεγέθη αναφορών, όταν $n_{SDCCH}=6$	90
Σχήμα 2-11. Ο βαθμός χρησιμοποίησης u_{sense} συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N, για διάφορα μεγέθη αναφορών, όταν $n_{SDCCH}=6$	90
Σχήμα 2-12. Ο βαθμός χρησιμοποίησης u_{sense} συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N, για διάφορες τιμές του ρυθμού ενημέρωσης του σταθμού βάσης, όταν $n_{SDCCH}=8$	92
Σχήμα 2-13. Ο βαθμός χρησιμοποίησης u_{sense} συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N, για διάφορες τιμές του ρυθμού ενημέρωσης του σταθμού βάσης, όταν $n_{SDCCH}=6$	92
Σχήμα 2-14. Η καθυστέρηση T συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N, για διάφορες τιμές του μεγέθους αναφοράς.....	97
Σχήμα 2-15. Ο βαθμός χρησιμοποίησης u_{sense} συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N, για διάφορες τιμές του μεγέθους αναφοράς.....	97
Σχήμα 2-16. Η καθυστέρηση T συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N, για διάφορες τιμές του μεγέθους αναφοράς (B' Μέρος).....	98

Σχήμα 2-17. Ο βαθμός χρησιμοποίησης u_{sense} συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για διάφορες τιμές του μεγέθους αναφοράς (Β' Μέρος).98	
Σχήμα 2-18. Η καθυστέρηση T συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για διάφορα επίπεδα των αξιοποιήσιμων ραδιοπόρων, όταν $L_{msg}=1000$ bytes	100
Σχήμα 2-19. Ο βαθμός χρησιμοποίησης u_{sense} συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για διάφορα επίπεδα των αξιοποιήσιμων ραδιοπόρων, όταν $L_{msg}=1000$ bytes	100
Σχήμα 2-20. Η καθυστέρηση T συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για διάφορα επίπεδα των αξιοποιήσιμων ραδιοπόρων, όταν $L_{msg}=3000$ bytes	101
Σχήμα 2-21. Ο βαθμός χρησιμοποίησης u_{sense} συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για διάφορα επίπεδα των αξιοποιήσιμων ραδιοπόρων, όταν $L_{msg}=3000$ bytes	101
Σχήμα 2-22. Η καθυστέρηση T συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για διάφορες κατανομές $\{p_{CS1}, p_{CS2}, p_{CS3}, p_{CS4}\}$ των τερματικών επαίσθησης στα σχήματα κωδικοποίησης του GPRS, όταν $L_{msg}=1000$ bytes	104
Σχήμα 2-23. Ο βαθμός χρησιμοποίησης u_{sense} συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για διάφορες κατανομές $\{p_{CS1}, p_{CS2}, p_{CS3}, p_{CS4}\}$ των τερματικών επαίσθησης στα σχήματα κωδικοποίησης του GPRS, όταν $L_{msg}=1000$ bytes	104
Σχήμα 2-24. Η καθυστέρηση T συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για διάφορες κατανομές $\{p_{CS1}, p_{CS2}, p_{CS3}, p_{CS4}\}$ των τερματικών επαίσθησης στα σχήματα κωδικοποίησης του GPRS, όταν $L_{msg}=3000$ bytes	105
Σχήμα 2-25. Ο βαθμός χρησιμοποίησης u_{sense} συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για διάφορες κατανομές $\{p_{CS1}, p_{CS2}, p_{CS3}, p_{CS4}\}$ των τερματικών επαίσθησης στα σχήματα κωδικοποίησης του GPRS, όταν $L_{msg}=3000$ bytes	105
Σχήμα 2-26. Ο βαθμός χρησιμοποίησης u_{sense} συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για διάφορες τιμές του ρυθμού ενημέρωσης του σταθμού βάσης, όταν $L_{msg}=500$ bytes	107
Σχήμα 2-27. Ο βαθμός χρησιμοποίησης u_{sense} συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για διάφορες τιμές του ρυθμού ενημέρωσης του σταθμού βάσης, όταν $L_{msg}=1500$ bytes	107
Σχήμα 2-28. Ο συντελεστής φορτίου ζεύξης ανόδου συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για φορτίο κανονικής κίνησης $\{N_{VOICE}=10, N_{DATA}=1\}$	111
Σχήμα 2-29. Η άνοδος θορύβου συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για φορτίο κανονικής κίνησης $\{N_{VOICE}=10, N_{DATA}=1\}$	111
Σχήμα 2-30. Ο συντελεστής φορτίου ζεύξης ανόδου συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για φορτίο κανονικής κίνησης $\{N_{VOICE}=20, N_{DATA}=2\}$	112
Σχήμα 2-31. Η άνοδος θορύβου συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για φορτίο κανονικής κίνησης $\{N_{VOICE}=20, N_{DATA}=2\}$	112
Σχήμα 2-32. Ο συντελεστής φορτίου ζεύξης ανόδου συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για φορτίο κανονικής κίνησης $\{N_{VOICE}=30, N_{DATA}=3\}$	113
Σχήμα 2-33. Η άνοδος θορύβου συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για φορτίο κανονικής κίνησης $\{N_{VOICE}=30, N_{DATA}=3\}$	113
Σχήμα 2-34. Ο συντελεστής φορτίου ζεύξης ανόδου συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για φορτίο κανονικής κίνησης $\{N_{VOICE}=40, N_{DATA}=4\}$	114
Σχήμα 2-35. Η άνοδος θορύβου συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για φορτίο κανονικής κίνησης $\{N_{VOICE}=40, N_{DATA}=4\}$	114

Σχήμα 2-58. Ο συντελεστής φορτίου ζεύξης ανόδου συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N, για μέσο μέγεθος αναφοράς $L_{msg}=20000$ bytes	128
Σχήμα 2-59. Η άνοδος θορύβου συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N, για μέσο μέγεθος αναφοράς $L_{msg}=20000$ bytes	128
Σχήμα 3-1. Γραφική παράσταση της πιθανότητας υπέρβασης του ορίου $A_{ULF_{sense}}$, συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης και του αριθμού των διαθέσιμων διαστημάτων εκπομπής, όταν $A_{ULF_{sense}}=20\%$	143
Σχήμα 3-2. Γραφική παράσταση της πιθανότητας υπέρβασης του ορίου $A_{ULF_{sense}}$, συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης και του αριθμού των διαθέσιμων διαστημάτων εκπομπής, όταν $A_{ULF_{sense}}=20\%$	144
Σχήμα 3-3. Γραφική παράσταση της πιθανότητας υπέρβασης του ορίου $A_{ULF_{sense}}$, συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης και του αριθμού των διαθέσιμων διαστημάτων εκπομπής, όταν $A_{ULF_{sense}}=20\%$	144
Σχήμα 3-4. Μοντέλο των αλυσιδωτών δυωνυμικών κατανομών, όταν επιτρέπεται μία μόνο μετάδοση ανά χρονοσχισμή	146
Σχήμα 3-5. Μοντέλο των αλυσιδωτών δυωνυμικών κατανομών, όταν επιτρέπονται περισσότερες της μιας ταυτόχρονες μεταδόσεις ανά χρονοσχισμή	148
Σχήμα 3-6. Μοντέλο αλυσιδωτών δυωνυμικών κατανομών – Αποτελέσματα για διάφορες τιμές των επιτρεπόμενων ταυτόχρονων μεταδόσεων ανά χρονοσχισμή....	150
Σχήμα 3-7. Μοντέλο θεωρίας παιγνίων – Αποτελέσματα για διάφορες τιμές του παράγοντα κόστους c και του παράγοντα έκπτωσης δ	163
Σχήμα 4-1. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αναδιάρθρωσης γνωστικού σταθμού βάσης	168
Σχήμα 4-2. Γραμμικές συναρτήσεις ωφέλειας	187
Σχήμα 4-3. Εκθετικές συναρτήσεις ωφέλειας	188
Σχήμα 4-4. Συναρτήσεις ισχύος	189
Σχήμα 4-5. Λογαριθμικές συναρτήσεις ωφέλειας	190
Σχήμα 4-6. Λογιστική συνάρτηση ωφέλειας	191
Σχήμα 4-7. Γενικευμένη λογιστική συνάρτηση ωφέλειας	192
Σχήμα 4-8. Γραφικό περιβάλλον πλατφόρμας διαχείρισης	194
Σχήμα 4-9. Οθόνη 1: Επιλογή γενικών παραμέτρων και κατανομής χρηστών	196
Σχήμα 4-10. Ενδεικτικό παράδειγμα ομοιόμορφης κατανομής χρηστών	197
Σχήμα 4-11. Ενδεικτικό παράδειγμα κατανομής χρηστών με υψηλή πυκνότητα στο κέντρο	197
Σχήμα 4-12. Ενδεικτικό παράδειγμα κατανομής χρηστών με υψηλή πυκνότητα στα άκρα	198
Σχήμα 4-13. Οθόνη 2: Καθορισμός συναρτήσεων ωφέλειας	199
Σχήμα 4-14. Οθόνη 3: Καθορισμός ειδικών παραμέτρων των τεχνολογιών ραδιοπρόσβασης	201
Σχήμα 4-15. Οθόνη 4: Προσδιορισμός του φορτίου κίνησης	203
Σχήμα 4-16. Οθόνη 5: Καθορισμός προδιαγραφών υποστήριξης κινητικότητας, κόστους αναδιαρθρώσεων και βαρών	204
Σχήμα 4-17. Οθόνη 6: Εκτέλεση προσομοίωσης	205
Σχήμα 4-18. Παράμετροι συναρτήσεων ωφέλειας	208
Σχήμα 4-19. Ειδικές παράμετροι των τεχνολογιών πρόσβασης	209
Σχήμα 4-20. Παράμετροι υποστήριξη κινητικότητας, κόστους αναδιαρθρώσεων και βαρών	213
Σχήμα 4-21. Σενάρια της μορφής 1-500-U – Αποτελέσματα	218
Σχήμα 4-22. Σύγκριση των ωφελειών διαφορετικών κατανομών μέσω διαγραμμάτων τύπου «ραντάρ»	221

Σχήμα 4-23. Σενάρια της μορφής 1-1000-U – Αποτελέσματα.....	221
Σχήμα 4-24. Σενάρια της μορφής 1-2000-U – Αποτελέσματα.....	222
Σχήμα 4-25. Σενάρια της μορφής 1-500-N – Αποτελέσματα.....	222
Σχήμα 4-26. Σενάρια της μορφής 1-1000-N – Αποτελέσματα.....	223
Σχήμα 4-27. Σενάρια της μορφής 1-2000-N – Αποτελέσματα.....	223
Σχήμα 4-28. Σενάρια της μορφής 1-500-F – Αποτελέσματα.....	224
Σχήμα 4-29. Σενάρια της μορφής 1-1000-F – Αποτελέσματα.....	224
Σχήμα 4-30. Σενάρια της μορφής 1-2000-F – Αποτελέσματα.....	225
Σχήμα 4-31. Σενάρια της μορφής 2-500-U – Αποτελέσματα.....	226
Σχήμα 4-32. Σενάρια της μορφής 2-1000-U – Αποτελέσματα.....	227
Σχήμα 4-33. Σενάρια της μορφής 2-2000-U – Αποτελέσματα.....	227
Σχήμα 4-34. Σενάρια της μορφής 2-500-N – Αποτελέσματα.....	228
Σχήμα 4-35. Σενάρια της μορφής 2-1000-N – Αποτελέσματα.....	228
Σχήμα 4-36. Σενάρια της μορφής 2-2000-N – Αποτελέσματα.....	229
Σχήμα 4-37. Σενάρια της μορφής 2-500-F – Αποτελέσματα.....	229
Σχήμα 4-38. Σενάρια της μορφής 2-1000-F – Αποτελέσματα.....	230
Σχήμα 4-39. Σενάρια της μορφής 2-2000-F – Αποτελέσματα.....	230
Σχήμα 4-40. Σενάρια της μορφής 3-500-U – Αποτελέσματα.....	232
Σχήμα 4-41. Σενάρια της μορφής 3-1000-U – Αποτελέσματα.....	233
Σχήμα 4-42. Σενάρια της μορφής 3-2000-U – Αποτελέσματα.....	233
Σχήμα 4-43. Σενάρια της μορφής 3-500-N – Αποτελέσματα.....	234
Σχήμα 4-44. Σενάρια της μορφής 3-1000-N – Αποτελέσματα.....	234
Σχήμα 4-45. Σενάρια της μορφής 3-2000-N – Αποτελέσματα.....	235
Σχήμα 4-46. Σενάρια της μορφής 3-500-F – Αποτελέσματα.....	235
Σχήμα 4-47. Σενάρια της μορφής 3-1000-F – Αποτελέσματα.....	236
Σχήμα 4-48. Σενάρια της μορφής 3-2000-F – Αποτελέσματα.....	236
Σχήμα 4-49. Σύγκριση της προτεινόμενης μεθόδου («optimal») με τις βασισμένες σε πολιτικές μεθόδους («P1» και «P2»).....	242
Σχήμα 5-1. Τυπικό νευρωνικό δίκτυο τριών στρωμάτων.....	251
Σχήμα 5-2. Παράδειγμα νευρωνικού δικτύου με δύο κρυφά στρώματα.....	253
Σχήμα 5-3. Γραφική παράσταση σφάλματος συναρτήσεως ενός συντελεστή στάθμισης.....	255
Σχήμα 5-4. Προτεινόμενο μοντέλο νευρωνικού δικτύου.....	260
Σχήμα 5-5. Απόκλιση ωφέλειας μεταξύ μοντέλου σταθερών συντελεστών και μοντέλου νευρωνικού δικτύου για την περίπτωση όπου blocking probability=2%, data demand=1000 Kbps, voice demand=10 Erlang, data demand=10 Erlang, χωρική κατανομή χρηστών: συγκέντρωση στα άκρα.....	265
Σχήμα 5-6. Απόκλιση ωφέλειας μεταξύ μοντέλου σταθερών συντελεστών και μοντέλου νευρωνικού δικτύου για την περίπτωση όπου blocking probability=1%, data demand=500 Kbps, voice demand=5 Erlang, data demand=20 Erlang, χωρική κατανομή χρηστών: ομοιόμορφη.....	266
Σχήμα 5-7. Απόκλιση ωφέλειας μεταξύ μοντέλου σταθερών συντελεστών και μοντέλου νευρωνικού δικτύου για την περίπτωση όπου blocking probability=0.1%, data demand=2000 Kbps, voice demand=10 Erlang, data demand=10 Erlang, χωρική κατανομή χρηστών: συγκέντρωση στα άκρα.....	267

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1-1. Σύγκριση διαχειριστικών αρχών μεταξύ των παραδοσιακών και των αυτόνομων συστημάτων	43
Πίνακας 1-2. Πλεονεκτήματα γνωστικών δικτύων	49
Πίνακας 2-1. Σχήματα κωδικοποίησης στο GRPS	95
Πίνακας 3-1. Πίνακας στρατηγικών για το παίγνιο «Δίλημμα των φυλακισμένων»	154
Πίνακας 3-2. Πίνακας παραμέτρων για το παίγνιο «Δίλημμα των φυλακισμένων».	155
Πίνακας 4-1. Λίστα δυνατών διαρθρώσεων πομποδεκτών	206
Πίνακας 4-2. Συγκεντρωτικός πίνακας υποψήφιων κατανομών διαρθρώσεων	216
Πίνακας 4-3. Πίνακας αποτελεσμάτων του Σεναρίου 1 {500,5,5}U	218
Πίνακας 4-4. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα 1 ^{ης} σειράς σεναρίων.....	225
Πίνακας 4-5. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα 2 ^{ης} σειράς σεναρίων.....	231
Πίνακας 4-6. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα 3 ^{ης} σειράς σεναρίων.....	237
Πίνακας 5-1. Σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης νευρωνικού δικτύου	261
Πίνακας 5-2. Παράμετροι κατασκευής μοντέλου νευρωνικού δικτύου	263
Πίνακας 5-3. Στατιστικά στοιχεία της διαδικασίας κατασκευής και επικύρωσης του νευρωνικού δικτύου	264
Πίνακας 5-4. Στατιστικά στοιχεία για την απόκλιση ωφέλειας μεταξύ μοντέλου σταθερών συντελεστών και μοντέλου νευρωνικού δικτύου για την περίπτωση όπου blocking probability=2%, data demand=1000 Kbps, voice demand=10 Erlang, data demand=10 Erlang, χωρική κατανομή χρηστών: συγκέντρωση στα άκρα	265
Πίνακας 5-5. Στατιστικά στοιχεία για την απόκλιση ωφέλειας μεταξύ μοντέλου σταθερών συντελεστών και μοντέλου νευρωνικού δικτύου για την περίπτωση όπου blocking probability=1%, data demand=500 Kbps, voice demand=5 Erlang, data demand=20 Erlang, χωρική κατανομή χρηστών: ομοιόμορφη.....	266
Πίνακας 5-6. Στατιστικά στοιχεία για την απόκλιση ωφέλειας μεταξύ μοντέλου σταθερών συντελεστών και μοντέλου νευρωνικού δικτύου για την περίπτωση όπου blocking probability=0.1%, data demand=2000 Kbps, voice demand=10 Erlang, data demand=10 Erlang, χωρική κατανομή χρηστών: συγκέντρωση στα άκρα	267

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1 Εισαγωγή

1.1 Σημερινό τοπίο των ασύρματων επικοινωνιών

Τη σύγχρονη εποχή συντελείται μια έκρηξη των παραγόμενων πληροφοριών που συνοδεύεται και από ανάλογη άνθηση των προσφερόμενων υπηρεσιών. Το πεδίο των ασύρματων επικοινωνιών αποτελεί αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αυτής της άνθησης. Έτσι, σήμερα, ο τελικός χρήστης απολαμβάνει υπηρεσίες φωνής και υπηρεσίες δεδομένων, που καθίστανται ελκυστικότερες με την προσθήκη προηγμένων χαρακτηριστικών όπως η επίγνωση θέσης, η επίγνωση προσωπικών προτιμήσεων και, γενικότερα, η επίγνωση περιβάλλοντος χρήσης (context awareness) [1].

Η προαναφερθείσα ανάπτυξη των προσφερόμενων υπηρεσιών, όμως, δε θα ήταν δυνατή χωρίς την εξέλιξη των αντίστοιχων τεχνολογικών υποδομών και, συγκεκριμένα, των υποκείμενων τεχνολογιών ραδιοπρόσβασης (Radio Access Technology - RAT). Οι κυριότερες τεχνολογίες πρόσβασης που συνυπάρχουν σήμερα, με τρόπο συνεργατικό και ενίοτε ανταγωνιστικό, είναι οι εξής:

- **Κυψελωτά συστήματα 2^{ης} γενιάς:** Το πρότυπο GSM (Global System for Mobile communications) αποτελεί, αυτήν τη στιγμή, το πιο διαδεδομένο πρότυπο κινητής τηλεφωνίας [2]. Εκτιμάται ότι το 82% της παγκόσμιας αγοράς κινητών επικοινωνιών χρησιμοποιεί το πρότυπο αυτό [12]. Η ανάγκη, ωστόσο, για υποστήριξη μετάδοσης πακέτων δεδομένων, καθώς και η ανάγκη για υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης οδήγησαν στην ανάπτυξη, αρχικά, του προτύπου GPRS (General Packet Radio Service) [4]-[5] και, στη συνέχεια, του προτύπου EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution) [6], καθιερώνοντας τη λεγόμενη «2.5 γενιά» των κυψελωτών συστημάτων.
- **Κυψελωτά συστήματα 3^{ης} γενιάς:** Οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις για μεγαλύτερους ρυθμούς δεδομένων, που θα επέτρεπαν την ανάπτυξη νέων υπηρεσιών, όπως η βιντεοκλήση, η ταυτόχρονη δηλαδή αμφίδρομη μετάδοση ήχου και εικόνας σε πραγματικό χρόνο, οδήγησαν στην εμφάνιση της 3^{ης} γενιάς συστημάτων επικοινωνιών. Το πιο γνωστό πρότυπο αυτής της γενιάς είναι το πρότυπο UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) [7]-

- [8]. Σχετικά πρόσφατα, έκανε την εμφάνιση του ένα ακόμα πρωτόκολλο του UMTS το HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access), το οποίο επιτυγχάνει ρυθμούς που αγγίζουν τα 14.4 Mbps στη ζεύξη καθόδου [9].
- **Ασύρματα τοπικά και μητροπολιτικά δίκτυα:** Στην κατηγορία αυτή, ανήκουν τα ευρυζωνικά ασύρματα, τοπικά και μητροπολιτικά, δίκτυα. Με ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 54 Mbps και, σχετικά πρόσφατα, μέχρι 248 Mbps (πρότυπο IEEE 802.11n), τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless Local Area Networks - WLANs) έχουν γίνει καθεστώς πλέον σε πανεπιστήμια, ξενοδοχεία, συνεδριακούς χώρους, αεροδρόμια κτλ. Το μεγαλύτερο μειονέκτημά τους, αυτό της σχετικά μικρής ακτίνας κάλυψης που δεν ξεπερνά τα 250 μέτρα (πρότυπο IEEE 802.11n), έρχονται να καλύψουν τα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (Wireless Metropolitan Networks-WMAN's) ή, όπως συχνά αναφέρονται, τα δίκτυα WiMax (Worldwide Interoperability for Microwave Access). Οι οικογένειες πρωτοκόλλων που περιγράφουν τη λειτουργία των παραπάνω δικτύων είναι οι 802.11x και 802.16, αντίστοιχα [10].
 - **Συστήματα ψηφιακής εκπομπής:** Το πρότυπο DVB (Digital Video Broadcasting) αποτελεί τον πιο γνωστό αντιπρόσωπο αυτής της κατηγορίας τηλεπικοινωνιακών συστημάτων [11]. Υποστηρίζει την επίγεια, καλωδιακή και δορυφορική μετάδοση ψηφιακού περιεχομένου, εξασφαλίζοντας μεγάλη γεωγραφική κάλυψη, υψηλούς ρυθμούς δεδομένων και υποστήριξη κινητικότητας χρηστών. Σήμερα, η πλειονότητα των συσκευών τηλεόρασης ενσωματώνει δέκτες DVB προς εξυπηρέτηση των μεταδόσεων ψηφιακής τηλεόρασης.

Οι προαναφερθείσες τεχνολογίες πρόσβασης υλοποιούνται από τους παρόχους δικτύου, ανάλογα με τις ανάγκες, τις διαθέσιμες υποδομές και την απώτερη στρατηγική τους. Κάθε μια από τις τεχνολογίες αυτές παρουσιάζει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ως προς το είδος των υποστηριζόμενων υπηρεσιών, λόγω των διαφορετικών ρυθμών μετάδοσης, του διαφορετικού κόστους, της διαφορετικής κάλυψης και του διαφορετικού εξοπλισμού. Συνεπώς, προκειμένου να καθίσταται ανταγωνιστικός ένας πάροχος, εμπλουτίζει τη δικτυακή υποδομή του με περισσότερες από μια τεχνολογίες, προσφέροντας στον τελικό καταναλωτή εμπορικά

πακέτα προσαρμοσμένα στις ανάγκες του. Ο χρήστης, από τη δική του πλευρά, έχοντας πλέον αποκτήσει, έστω στοιχειώδη, κατανόηση των παρεχόμενων υπηρεσιών και των αντίστοιχων απαιτήσεών του, επιλέγει σε αρκετές περιπτώσεις περισσότερους από έναν παρόχους, προκειμένου να αποκτήσει τις επιθυμητές υπηρεσίες στο ελάχιστο κόστος.

1.2 Περιβάλλον πέραν της 3ης γενιάς

Ακριβώς αυτή η πληθώρα διαθέσιμων ετερογενών τεχνολογιών πρόσβασης αποτέλεσε τη βάση για τη θεμελίωση μιας νέας τάσης στο χώρο των ασύρματων τηλεπικοινωνιών, τη λεγόμενη «πέραν της τρίτης γενιάς» (Beyond Third Generation-B3G). Η τάση αυτή βρίσκεται στο επίκεντρο μεγάλης μερίδας της επιστημονικής έρευνας [12]-[15], ενώ έχει αποτελέσει και συνεχίζει να αποτελεί το κύριο αντικείμενο έρευνας αρκετών προγραμμάτων συγχρηματοδοτούμενων από την Ευρωπαϊκή Ένωση [16]-[18]. Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση, προτείνεται η ενοποίηση των διαθέσιμων ετερογενών δικτυακών υποδομών εντός μιας κοινής αρχιτεκτονικής, η οποία θα διασφαλίζει την παροχή βέλτιστης ποιότητας υπηρεσίας στον τελικό χρήστη, σύμφωνα με την αρχή «Συνεχώς Βέλτιστα Συνδεδεμένος» (Always Best Connected - ABC) [19]. Ανώτερος στόχος λοιπόν, είναι η αδιάλειπτη παροχή υπηρεσιών με βέλτιστο τρόπο, ακόμα και αν, προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, απαιτείται η διαπομπή (μετάβαση της τερματικής συσκευής του χρήστη) σε άλλη τεχνολογία πρόσβασης. Σε αυτήν την περίπτωση, οι απαιτούμενες διαπομπές και αναδιαμορφώσεις οφείλουν να γίνονται με τρόπο διαφανή προς τον χρήστη.

1.3 Γνωστικά Δίκτυα

1.3.1 Κίνητρα ανάπτυξης

Παρά τις σημαντικές προσπάθειες που έχουν γίνει, όμως, προς την κατεύθυνση της από κοινού εκμετάλλευσης των διαθέσιμων τεχνολογιών, ο πρωταρχικός πόρος στον οποίον βασίζονται όλες οι ασύρματες επικοινωνίες, το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα συχνοτήτων, είναι από τη φύση του περιορισμένο. Επιπρόσθετα, η κατάτμησή του σε διαχωρισμένες ζώνες συχνοτήτων έχει οδηγήσει στην υπερ-χρησιμοποίηση

ορισμένων από αυτές, ενώ άλλες παραμένουν σε μεγάλο βαθμό υπο-χρησιμοποιημένες [20]-[22]. Αυτή η υπο-χρησιμοποίηση του φάσματος έχει προκύψει ως αποτέλεσμα ενός αριθμού διαφορετικών παραγόντων, συμπεριλαμβανομένης της υπερβολικά αυστηρής ανάθεσης ζωνών φρούρησης (guard bands), της προτίμησης ψηφιακών κυματομορφών έναντι των λιγότερο φασματικά αποδοτικών αναλογικών, καθώς και της φυσιολογικής διακύμανσης του δικτυακού φορτίου κατά της διάρκεια της ημέρας [23]-[24].

1.3.2 Ορισμός

Συνεπώς, το πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι η πολυπλοκότητα και η ετερογένεια των περιβαλλόντων πέραν της 3^{ης} γενιάς, σε συνδυασμό με τη περιορισμένη φύση του φάσματος και την υπο-χρησιμοποίησή του. Τα *γνωστικά δίκτυα* (Cognitive Networks) προβάλλουν ως μια αποτελεσματική, πολλά υποσχόμενη λύση του παραπάνω σύνθετου προβλήματος. Σύμφωνα με ορισμούς που έχουν διατυπωθεί από μέλη της ερευνητικής κοινότητας [25]-[34], τα γνωστικά δίκτυα μπορούν να διαισθάνονται το ραδιο-περιβάλλον τους και να δρουν, είτε προληπτικά είτε αντιδραστικά, σε εξωτερικά ερεθίσματα. Η αντίδραση των γνωστικών δικτύων συνίσταται στην αναδιάρθρωση των αλγορίθμων και των παραμέτρων λειτουργίας τους, έτσι ώστε να καθίσταται δυνατή η προσαρμογή στις τρέχουσες συνθήκες του περιβάλλοντος. Οι αποφάσεις για αναδιάρθρωση λαμβάνονται αυτόνομα, βάσει γνώσης και εμπειρίας που έχει αποκτηθεί κατά τη λειτουργία του συστήματος.

1.3.3 Καινοτομίες γνωστικών δικτύων

Η καινοτομία των γνωστικών δικτύων έγκειται στα εξής σημεία:

- Υιοθετούν ως βασική αρχή λειτουργίας το διαμοιρασμό του φάσματος. Σύμφωνα με την αρχή αυτή, τα γνωστικά δίκτυα διαισθάνονται το περιβάλλον τους και εκμεταλλεύονται ευκαιριακά ζώνες συχνοτήτων που είναι ανεκμετάλλευτες στο χώρο και στο χρόνο. Λεπτομέρειες αυτής της προσέγγισης θα παρουσιαστούν στις επόμενες παραγράφους.
- Προτείνουν ένα αυτόνομο σχήμα διαχείρισης της λειτουργίας τους, οι κύριες αρχές του οποίου θα παρουσιαστούν αναλυτικά σε επόμενο τμήμα. Η

εφαρμογή αυτού του σχήματος παρουσιάζει συγκριτικά πλεονεκτήματα έναντι των σχημάτων διαχείρισης που έχουν προταθεί μέχρι σήμερα για τα συνεργατικά δίκτυα [35]-[38], καθώς εξαλείφει την ανάγκη ανάπτυξης σύνθετων πλαισίων διαχείρισης, αντιμετωπίζει την αδυναμία κλιμακωσιμότητας και επεκτασιμότητας των υφιστάμενων δικτύων και, τέλος, ενισχύει την ευελιξία διαχείρισης, καταργώντας την εφαρμογή στατικών, προσυμφωνημένων κανόνων και πολιτικών.

- Καταργούν την ανάγκη ύπαρξης διαφορετικής υποδομής για κάθε υποστηριζόμενη τεχνολογία πρόσβασης. Τα γνωστικά δίκτυα προβλέπουν τη χρήση αναδιαρθρώσιμων δικτυακών στοιχείων, τα οποία, τροποποιώντας τις παραμέτρους λειτουργίας τους κατά τα πρότυπα των Λογισμικώς Καθορισμένων Συστημάτων (Software Defined Radio - SDR), είναι σε θέση να υποστηρίξουν πολλαπλές τεχνολογίες πρόσβασης. Περισσότερες πληροφορίες για τα SDR συστήματα αναφέρονται στις παραγράφους που ακολουθούν.

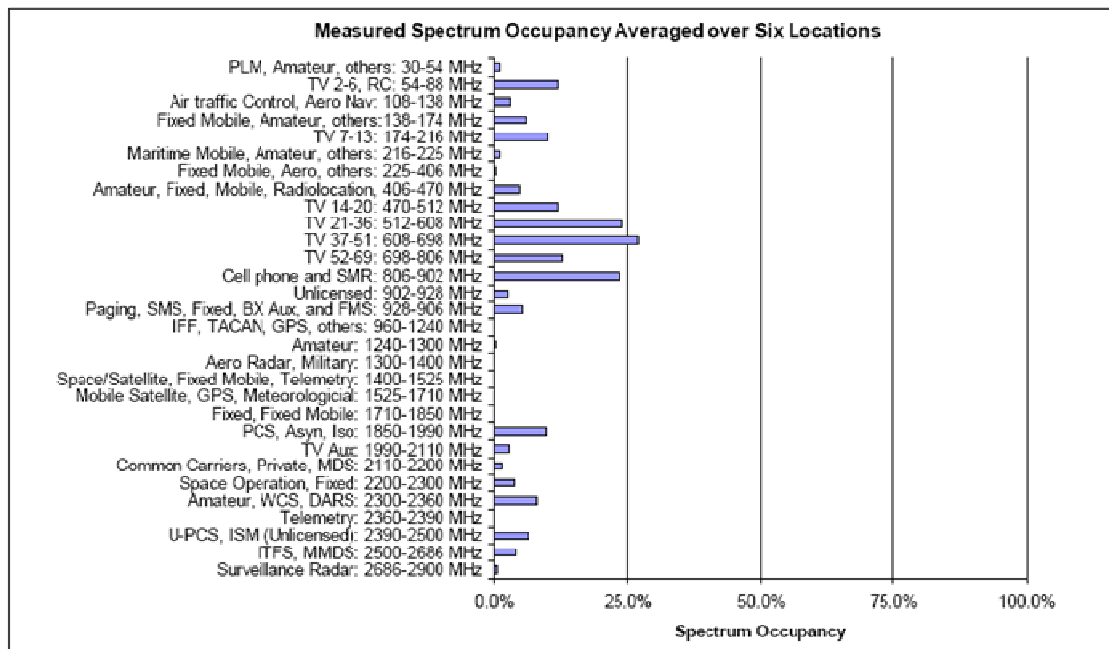
1.3.4 Διαμοιρασμός φάσματος

1.3.4.1 Τρέχον σχήμα ανάθεσης συχνοτήτων

Όπως προαναφέρθηκε, το φάσμα συχνοτήτων, ο φυσικός πόρος στον οποίο βασίζονται οι ασύρματες επικοινωνίες, αποτελεί έναν από τους πλέον σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη σχεδίαση ενός τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Σύμφωνα με το ισχύον καθεστώς, οι πάροχοι δικτύου που επιθυμούν να αναπτύξουν ασύρματο δίκτυο που θα εκπέμπει σε μια περιοχή συχνοτήτων, ζητούν τη χορήγηση της σχετικής άδειας από αρμόδιους ρυθμιστικές αρχές που συνήθως ανήκουν σε κρατικούς φορείς, υπεύθυνους για θέματα επικοινωνιών. Η διαδικασία αυτή αποδεικνύεται τις περισσότερες φορές επίπονη, χρονοβόρα και με αυξημένο κόστος, ενώ καταλήγει στην εξουσιοδότηση του αιτούντος παρόχου για αποκλειστική χρήση μιας ζώνης συχνοτήτων, στατικής και ρητά καθορισμένης. Κύριο κριτήριο και απώτερος στόχος της διαδικασίας αποτελεί η αποφυγή παρεμβολών. Το σχήμα αυτό ανάθεσης συχνοτήτων παρουσιάζει σημαντικά μειονεκτήματα, τα κυριότερα από τα οποία συνοψίζονται στα εξής:

- Ο πάροχος δικτύου αιτείται τμήμα φάσματος σύμφωνα με το φορτίο του δικτύου του σε ώρα αιχμής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μεγάλο τμήμα του φάσματος να μένει ανεκμετάλλευτο κατά τη διάρκεια της ημέρας.
- Ένας πάροχος είναι δυνατόν να αναπτύσσει το δίκτυο του σε συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή, με αποτέλεσμα η συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων να παραμένει, σε μεγάλο βαθμό, χωρικά ανεκμετάλλευτη.
- Προκειμένου να καλύψει τυχόν μελλοντικές ανάγκες σε φάσμα για την ανάπτυξη νέων υπηρεσιών, αποφεύγοντας την επανάληψη της διαδικασίας ανάθεσης, ένας πάροχος ενδέχεται να «αγοράζει» φάσμα, μεγαλύτερο αυτό που απαιτείται για την κάλυψη των τρεχουσών αναγκών του.

Το προαναφερθέν στατικό σχήμα ανάθεσης κρίνεται σήμερα ως αναποτελεσματικό, καθώς παρατηρείται υπερβολική συμφόρηση σε ορισμένες ζώνες, ενώ άλλες χρησιμοποιούνται σε πολύ μικρό ποσοστό. Το Σχήμα 1-1 που ακολουθεί παρουσιάζει τα αποτελέσματα έρευνας που διεξήχθησαν σε 6 περιοχές της Ηνωμένων Πολιτειών [39] και καταδεικνύει ακριβώς αυτό το γεγονός της υπο-χρησιμοποίησης των φασματικών συχνοτήτων.



Σχήμα 1-1. Μεσοσταθμισμένη χρησιμοποίηση φάσματος σε έξι περιοχές των Η.Π.Α.

1.3.4.2 Ευκαιριακή χρήση συχνοτήτων

Τα γνωστικά δίκτυα προσφέρουν μια λύση στο προαναφερθέν πρόβλημα, προτείνοντας την «ευκαιριακή» χρήση συχνοτήτων που δε χρησιμοποιούνται ή χρησιμοποιούνται σε ελάχιστο βαθμό, από δευτερεύοντες, μη αδειοδοτημένους χρήστες, με την προϋπόθεση οι τελευταίοι να μην προκαλούν παρεμβολές, τέτοιες ώστε να παρεμποδίζεται η λειτουργία των ασύρματων συστημάτων των πρωτεύοντων, αδειοδοτημένων χρηστών. Οι ζώνες συχνοτήτων με μικρό ή μηδενικό βαθμό χρησιμοποίησης χαρακτηρίζονται συχνά ως «οπές φάσματος» (spectrum holes).

Ο S. Haykin [22] προτείνει μια διάκριση του φάσματος συχνοτήτων ως εξής:

- «Λευκοί χώροι» - Ζώνες συχνοτήτων που είναι απαλλαγμένες από παρεμβολές και χαρακτηρίζονται μόνο από την παρουσία θορύβου με φυσικά ή τεχνητά αίτια.
- «Γκρι χώροι» - Ζώνες συχνοτήτων που χαρακτηρίζονται από την παρουσία παρεμβολών χαμηλής ισχύος.
- «Μαύροι χώροι» - Ζώνες συχνοτήτων που χαρακτηρίζονται από την παρουσία παρεμβολών υψηλής ισχύος.

Όπως γίνεται προφανές, οι λευκοί και οι γκρι χώροι αποτελούν ζώνες συχνοτήτων υποψήφιες για «ευκαιριακή» («οπορτουμιστική») χρήση τους, όπως προβλέπεται από την αρχή λειτουργίας των γνωστικών δικτύων. Βασική προϋπόθεση είναι η εξασφάλιση ότι οι χρήστες που θα κάνουν ευκαιριακή χρήση των χώρων αυτών δε θα προκαλούν σημαντικές παρεμβολές στους πρωτεύοντες χρήστες. Σε αυτό το πνεύμα, προβάλλει επιτακτική η ανάγκη χρήσης κατάλληλων μέτρων για το χαρακτηρισμό μιας ζώνης συχνοτήτων ως ελεύθερης ή μη παρεμβολών.

1.3.4.3 Μέτρα εκτίμησης παρεμβολών

Δύο μέτρα αποτελούν τα πλέον διαδεδομένα στη διαδικασία εκτίμησης των παρεμβολών: i) ο λόγος σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο (Signal to Noise plus Interference Ratio – SNR) και ii) η θερμοκρασία παρεμβολών (Interference Temperature – IT).

Λόγος σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο

Η ισχύς των παρεμβολών δε συνιστά από μόνη της μέτρο ικανό να περιγράψει την επίδραση των παρεμβολών, καθώς πρέπει να εξεταστεί σε άμεση σύνδεση με την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος. Συνεπώς, ένα κατάλληλο μέτρο της ποιότητας του λαμβανόμενου σήματος είναι ο λόγος της ισχύος του επιθυμητού λαμβανόμενου σήματος προς το ολικό άθροισμα των ισχύων παρεμβολής [40], όπως φαίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

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

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.

Η εκτίμηση του SINR είναι καίριας σημασίας για τη λειτουργία των ασύρματων συστημάτων επικοινωνιών, με πλήθος εφαρμογών μεταξύ των οποίων:

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

Όσον αφορά το πεδίο των γνωστικών δικτύων, η εκτίμηση του SINR αναδεικνύεται εξίσου ουσιώδης, καθώς αποτελεί το θεμέλιο λίθο δύο εξαιρετικά σημαντικών διαδικασιών:

- της διαδικασίας εντοπισμού των συχνοτήτων που δε χρησιμοποιούνται καθόλου ή υπο-χρησιμοποιούνται
- της διαδικασίας εκτίμησης των δυνατοτήτων μιας υποψήφιας διάρθρωσης, προκειμένου να ληφθεί η απόφαση βέλτιστης αναδιάρθρωσης του δικτύου. Προφανώς, όσο πιο υψηλή είναι η τιμή του SINR τόσο πιο δυνατή καθίσταται η χρήση αποδοτικότερων σχημάτων διαμόρφωσης που εξασφαλίζουν υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων. Επιπρόσθετα, όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή των παρεμβολών στο δέκτη τόσο μικρότερο είναι και το περιθώριο εξασθένησης του σήματος και κατ' επέκταση τόσο μικρότερη είναι η ακτίνα κάλυψης, για την ίδια πάντα ισχύ εκπομπής.

Για την εκτίμηση του λόγου SINR έχουν προταθεί πολυάριθμες μέθοδοι τόσο για συστήματα Πολλαπλής Πρόσβασης Διαίρεσης Χρόνου (Time Division Multiple Access – TDMA) [41]-[45], όσο και συστήματα Πολλαπλής Πρόσβασης Διαίρεσης

Κώδικα (Code Division Multiple Access – CDMA) [46]-[52], συστήματα Ορθογωνικής Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing - OFDM) και Ορθογωνικής Πολλαπλής Πρόσβασης Διαίρεσης Συχνότητας (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access - OFDMA) [53]-[55].

Θερμοκρασία παρεμβολών

Ένα μέτρο που εισήχθη, σχετικά πρόσφατα, από την Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (Federal Communications Commission – FCC) των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής για την ποσοτικοποίηση της παρουσίας παρεμβολών είναι η *θερμοκρασία παρεμβολών* [56]-[58].

Η θερμοκρασία παρεμβολών ορίζεται, κατ' αναλογία με τη θερμοκρασία θορύβου μιας κεραίας, ως:

$$T_I = \frac{I}{kB}$$

όπου το I δηλώνει την ισχύ την ισχύ παρεμβολών σε Watt, B το εύρος ζώνης σε Hertz και k η σταθερά Boltzmann ίση με 1.38×10^{-23} Joule ανά βαθμό Kelvin.

Σύμφωνα με το νέο μοντέλο της FCC καθορίζεται σε κάθε γεωγραφική περιοχή, από τις αρμόδιες ρυθμιστικές αρχές, ένα ανώτατο όριο θερμοκρασίας παρεμβολών (interference temperature limit – IT limit). Κάθε πομπός οφείλει να διασφαλίζει ότι με την εκπομπή του δεν παραβιάζει αυτό το ανώτατο όριο. Θα πρέπει να ισχύει, δηλαδή:

$$P_s / kB + T_I \leq T_L$$

όπου P_s η ισχύς εκπομπής, k η σταθερά Boltzmann, B το εύρος ζώνης, T_I η θερμοκρασία παρεμβολών και T_L το όριο θερμοκρασίας παρεμβολών.

Μέσω του μεγέθους της θερμοκρασίας παρεμβολών, λοιπόν, γίνεται προσπάθεια ρύθμισης της λαμβανόμενης ισχύος αντί της εκπεμπόμενης, σε αντίθεση με το ισχύον μοντέλο το οποίο προβλέπει ρύθμιση της εκπεμπόμενης ισχύος, ώστε να προσεγγίσει ένα δεδομένο επίπεδο θορύβου σε συγκεκριμένη απόσταση από τον πομπό [22].

Η εκτίμηση της θερμοκρασίας παρεμβολών μπορεί να αποδειχθεί ένα εξαιρετικά δύσκολο έργο. Μια συστηματική προσπάθεια εκτίμησής της παρουσιάζεται από τον S. Haykin στην εργασία [22].

Σύγκριση των δύο μεγεθών

Η εκτίμηση της θερμοκρασίας θορύβου είναι πιο εύκολη συγκρινόμενη με αυτήν του λόγου SINR, καθώς:

- δεν απαιτεί τη μετάδοση πιλοτικών σημάτων στην υπό εξέταση συχνότητα
- δεν απαιτεί τη συγχρονισμένη εκπομπή και λήψη μεταξύ σταθμού βάσης και κινητού τερματικού
- είναι αρκετή η μέτρηση της λαμβανόμενης ισχύος στην υπό εξέταση ζώνη συχνοτήτων
- έχει χαμηλότερη πολυπλοκότητα υπολογισμού

Από την άλλη πλευρά, η εκτίμηση του λόγου SINR απαιτεί τη συγχρονισμένη εκπομπή και λήψη μεταξύ σταθμού βάσης και κινητού τερματικού και τη μετάδοση πιλοτικών σημάτων στην υπό εξέταση συχνότητα, παρέχει, όμως, την τιμή ενός μέτρου περισσότερο ισχυρού, καθώς περιλαμβάνει πληροφορίες σύγκρισης του επιθυμητού σήματος σε σχέση με τις ανεπιθύμητες παρεμβολές.

1.3.5 Λογισμικώς Καθορισμένα Συστήματα Επικοινωνιών

1.3.5.1 Γενικά

Όπως προαναφέρθηκε, τα γνωστικά δίκτυα «αισθάνονται» το περιβάλλον τους και προσαρμόζουν κατάλληλα τη λειτουργία τους, προκειμένου να ανταποκριθούν καλύτερα στις νέες συνθήκες. Η προσαρμογή αυτή υλοποιείται μέσω τροποποίησης των παραμέτρων λειτουργίας τους, μεταξύ των οποίων συγκαταλέγονται:

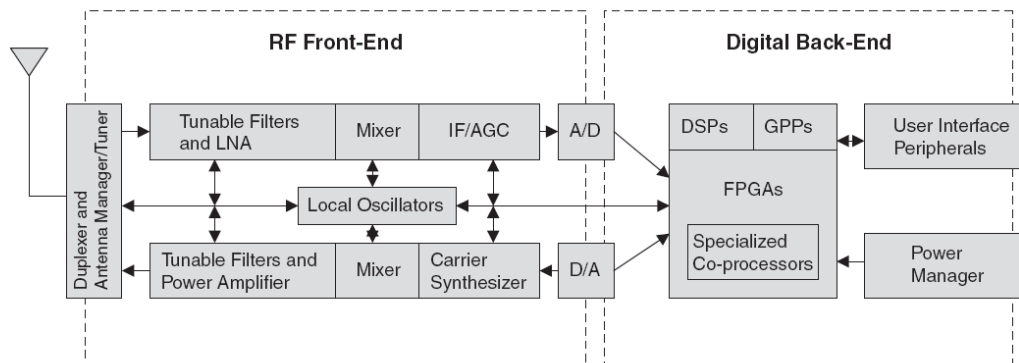
- Η ζώνη συχνοτήτων
- Ο τύπος διαμόρφωσης
- Ο τύπος κωδικοποίησης διαύλου
- Ο τύπος κωδικοποίησης λαθών
- Το σχήμα πολλαπλής πρόσβασης
- Το σχήμα διαίρεσης αμφίδρομης επικοινωνίας
- Η μέγιστη ισχύς εκπομπής

Όπως γίνεται, προφανές, λοιπόν, η ανάπτυξη γνωστικών δικτύων, προϋποθέτει την ύπαρξη διεπαφών αναδιαρθρώσιμων ως προς τις προαναφερθείσες παραμέτρους, τόσο στην πλευρά του δικτύου όσο και στην πλευρά των τερματικών. Την απάντηση σε αυτήν την τεχνολογική πρόκληση δίνουν τα Λογισμικώς Καθορισμένα συστήματα

(Software Defined Radio – SDR). Σύμφωνα με την αμερικανική επιτροπή FCC, SDR σύστημα καλείται «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 τη ραδιοεκπομπή» [59].

1.3.5.2 Αρχιτεκτονική αναφοράς

Κατά τη λειτουργία ενός γνωστικού δικτύου, μπορεί να κριθεί απαραίτητη, η αναδιάρθρωση των δικτυακών επαφών, από μια τεχνολογία πρόσβασης με συγκεκριμένες παραμέτρους και ζώνη συχνοτήτων σε μια εντελώς διαφορετική τεχνολογία και συχνότητα αντίστοιχα. Η μετάβαση αυτή θα πρέπει να πραγματοποιηθεί σε ελάχιστο χρόνο και να είναι διαφανής στον τελικό χρήστη. Προκειμένου, λοιπόν, να είναι εφικτή η πραγματοποίηση μιας τέτοιας καθολικής αναδιάρθρωσης, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός αρκετά ευέλικτου μετωπιαίου άκρου (front-end). Η παραδοσιακή τεχνολογία δεν είναι σε θέση να ανταποκριθεί σε αυτήν την απαίτηση, καθώς παρουσιάζει περιορισμούς ως προς τη ζώνη συχνοτήτων και το εύρος διαμόρφωσης. Συνεπώς, η επιθυμητή συμπεριφορά μπορεί να επιτευχθεί μόνο με τη μετατροπή του σήματος όσο το δυνατόν πιο κοντά στην κεραία, ώστε να πραγματοποιείται ψηφιακή επεξεργασία αυτού. Οι μετατροπές αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (digital to analogue converters – DACs), καθώς και οι μετατροπές ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (analogue to digital converters – ADCs), θα πρέπει να είναι σε θέση να χειρίζονται διαφορετικά επίπεδα ισχύος και να υποστηρίζουν ένα αρκετά μεγάλο εύρος συχνοτήτων, ώστε να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις κάθε διάρθρωσης. Το Σχήμα 1-2 που ακολουθεί παρουσιάζει τη βασική αρχιτεκτονική ενός SDR συστήματος. Η αρχιτεκτονική αυτή 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 1-2. Βασική αρχιτεκτονική ενός SDR συστήματος

1.3.6 Αυτονομία γνωστικών δικτύων

1.3.6.1 Βασικές αρχές διαχείρισης

Όπως γίνεται προφανές, τα γνωστικά δίκτυα θα πρέπει να υποστηρίζουν ένα σχήμα διαχείρισης που θα λαμβάνει αποφάσεις με γνώμονα δύο βασικές αρχές:

- Τη βελτιστοποίηση της διάρθρωσης κάθε γνωστικού δικτυακού στοιχείου, προκειμένου να διασφαλιστούν τα συμφέροντα και η εύρυθμη λειτουργία του.
- Την ομαλή συνύπαρξη όλων των παραπλήσιων γνωστικών στοιχείων, που εξ ορισμού θα ανταγωνίζονται για τους ίδιους φασματικούς πόρους και, συνεπώς, μπορεί να θίγονται από τις επιμέρους αποφάσεις αναδιάρθρωσης. Προκειμένου να επιτευχθεί ομαλή συμβίωση, είναι απαραίτητος ο αποδοτικός συντονισμός και η αποτελεσματική επίλυση συγκρούσεων, όταν αυτές προκύπτουν.

1.3.6.2 Πιθανά σχήματα διαχείρισης

Τρία βασικά συστήματα διαχείρισης μπορούν να εφαρμοστούν στην περίπτωση των γνωστικών δικτύων, με στόχο την ικανοποίηση των δύο προαναφερθέντων στόχων:

- Κεντρικό σύστημα διαχείρισης: Σύμφωνα με το σύστημα αυτό, το σύνολο των γνωστικών στοιχείων μιας περιοχής δέχεται διαχειριστικές εντολές από μια ενιαία, κεντρική οντότητα, η οποία καλείται να προσδιορίσει τις βέλτιστες αποφάσεις διαρθρώσεων για κάθε μεμονωμένο γνωστικό στοιχείο, σεβόμενη τις απαιτήσεις και τα δικαιώματα όλων των επιμέρους στοιχείων. Η υψηλή πολυπλοκότητα που απαιτείται για την επίλυση του συνολικού προβλήματος

- βελτιστοποίησης οδηγεί σε υπολογιστικό φορτίο απαγορευτικής τάξης μεγέθους και καταλήγει σε μη αποδοτικές αποφάσεις αναδιαρθρώσεων.
- Ομαδοποίηση γνωστικών στοιχείων: Σύμφωνα με αυτό το σχήμα διαχείρισης, προβλέπεται ο διαχωρισμός των γνωστικών στοιχείων σε ομάδες, με κριτήρια γεωγραφικής γειτνίασης, ώστε τα μέλη κάθε ομάδας να διαχειρίζονται από μια κοινή οντότητα. Η κατανομή του υπολογιστικού φορτίου αποτελεί το σημαντικότερο πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης, η οποία, ωστόσο, παρουσιάζει αξιοπρόσεκτα μειονεκτήματα, όπως είναι η αυξημένη αρχιτεκτονική πολυπλοκότητα και η ανάγκη αποτελεσματικής συνεννόησης και επικοινωνίας μεταξύ των διαχειριστικών οντοτήτων, προκειμένου να αποφευχθούν συγκρούσεις σε γειτονικές ομάδες.
 - Αυτόνομη διαχείριση γνωστικών στοιχείων: Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, προτείνεται ένα σχήμα αυτόνομης διαχείρισης των επιμέρους γνωστικών δικτυακών στοιχείων. Σύμφωνα με το σχήμα αυτό, κάθε γνωστικό στοιχείο είναι ικανό να προσαρμόζεται από μόνο του στο περιβάλλον του, χωρίς την ανάγκη να έχει προηγηθεί εντολή από μια διαχειριστική οντότητα υψηλότερου επιπέδου. Τα κύρια χαρακτηριστικά των αυτόνομων συστημάτων, που ακολουθούν τις αρχές της αυτόνομης υπολογιστικής, θα παρουσιαστούν λεπτομερώς στο τμήμα που ακολουθεί.

1.3.6.3 Αυτόνομη υπολογιστική

Μπορεί ο όρος *αυτόνομη υπολογιστική (autonomic computing)* να χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από την εταιρία IBM [1], η τάση, όμως, προς τα αυτόνομα συστήματα ανάγεται πίσω σε εργασίες σχετικές με αυτοματισμούς, τεχνητή νοημοσύνη, τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, ρομποτική, έμπειρα συστήματα, ευφυή συστήματα, πράκτορες λογισμικού και άλλα. Οι εργασίες αυτές συνετέλεσαν στο σχηματισμό της έννοιας της αυτόνομης υπολογιστικής [2]-[3].

1.3.6.4 Πρόβλημα διαχειριστικής πολυπλοκότητας

Η δυσκολία διαχείρισης των σημερινών υπολογιστικών και τηλεπικοινωνιακών συστημάτων εκτείνεται αρκετά πέρα από τη διαχείριση ξεχωριστών περιβαλλόντων και μονάδων. Η ανάγκη ενοποίησης πολλών ετερογενών τεχνολογιών υπό μια κοινή

«ομπρέλα» και η επέκταση της λειτουργικότητάς τους εισάγει νέα επίπεδα πολυπλοκότητας. Η πολυπλοκότητα των υπολογιστικών συστημάτων, σήμερα, φαίνεται να αγγίζει τα όρια της ανθρώπινης δυνατότητας, ενώ, αντίθετα, η πορεία των δικτύων προς αυξημένη διασυνδεσιμότητα και ενοποίηση προχωρά με γοργούς ρυθμούς.

Η πορεία αυτή, ενισχυμένη από την ανάπτυξη των συστημάτων της διάχυτης υπολογιστικής (pervasive computing) [63], αυξάνει ακόμα περισσότερο την πολυπλοκότητα διαχείρισης. Καινοτόμες λύσεις σε επίπεδο προγραμματιστικών γλωσσών έχουν επεκτείνει το μέγεθος και την πολυπλοκότητα των λειτουργικών αρχιτεκτονικών, αλλά η χρήση τους ως αποκλειστική προσέγγιση για μελλοντικές επεκτάσεις δεν κρίνεται ικανή να αντιμετωπίσει την τρέχουσα έκρηξη της πολυπλοκότητας. Τα υπολογιστικά και δικτυακά συστήματα θα γίνουν σύντομα τόσο μαζικά και πολύπλοκα, ώστε θα καταστεί αδύνατη η εγκατάσταση, η ρύθμιση, ο έλεγχος, η συντήρηση και η διασύνδεσή τους.

1.3.6.5 Η επιλογή της αυτονομίας

Σε ένα τέτοιο περιβάλλον αυξημένης πολυπλοκότητας, προβάλλει, όχι μόνο ως ελκυστική, αλλά ως μοναδική λύση στο διαφαινόμενο πρόβλημα, η ανάπτυξη συστημάτων αυτόνομης υπολογιστικής. Τα αυτόνομα αυτά συστήματα μπορούν να διαχειρίζονται τα ίδια τους εαυτούς τους, βάσει στόχων υψηλού επιπέδου που έχουν καθοριστεί από διαχειριστές. Η ιδέα της αυτόνομης υπολογιστικής προβλέπει τη χρήση της τεχνολογίας για τη διαχείριση της τεχνολογίας. Με σαφή βιολογική προέλευση, ο όρος αυτόνομη παραπέμπει στο αυτόνομο ανθρώπινο νευρικό σύστημα, το οποίο παρακολουθεί τους καρδιακούς παλμούς, ελέγχει τα επίπεδα σακχάρου και διατηρεί τη θερμοκρασία του ανθρώπινου σώματος, χωρίς συνειδητή προσπάθεια από τον ίδιο τον άνθρωπο. Στο ίδιο πνεύμα, ένα υπολογιστικό σύστημα ρυθμίζει το ίδιο τη λειτουργία του, ελαχιστοποιώντας την ανθρώπινη παρέμβαση. Μια βασική διαφορά ανάμεσα στα βιολογικά και τα υπολογιστικά αυτόνομα συστήματα είναι ότι στα μεν πρώτα οι αντιδράσεις είναι αντανεκλαστικές, ενώ στα δεύτερα οι διαχειριστικές αποφάσεις και ενέργειες υπακούουν σε πολιτικές που έχουν τεθεί από τους διαχειριστές. Επιπρόσθετα, είναι δυνατή η ανάπτυξη μια ιεραρχίας αυτο-διαχειριζόμενων συστημάτων καθώς καθένα από αυτά μπορεί να αποτελείται από δεκάδες ή εκατοντάδες δομικές μονάδες, επίσης ικανές να αυτο-διαχειριστούν, και οι οποίες με

τη σειρά τους είναι δυνατόν να αποτελούνται από αλληλεπιδρώντα αυτο-διαχειριζόμενα στοιχεία σε χαμηλότερο επίπεδο.

1.3.6.6 Χαρακτηριστικά αυτόνομων δικτύων

Η ουσία των αυτόνομων συστημάτων είναι η δυνατότητα αυτο-διαχείρισης. Όπως και τα ομώνυμα βιολογικά συστήματα, τα αυτόνομα συστήματα και δίκτυα προσαρμόζουν και βελτιστοποιούν τη λειτουργία τους, σύμφωνα με τις εσωτερικές μεταβολές, το προσφερόμενο φορτίο, τις απαιτήσεις από ανώτερο επίπεδο και τις συνθήκες περιβάλλοντος. Στο τμήμα που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι τέσσερις θεμελιώδεις πτυχές της έννοιας της αυτό-διαχείρισης.

- **Αυτο-ρύθμιση (Self-configuration)**. Τα αυτόνομα συστήματα ρυθμίζουν τις παραμέτρους λειτουργίας τους αυτόματα, σύμφωνα με πολιτικές ανωτέρου επιπέδου, όπως, για παράδειγμα, οι επιχειρηματικοί στόχοι. Οι πολιτικές αυτές καθορίζουν το επιθυμητό αποτέλεσμα, χωρίς, όμως, να ορίζουν τον τρόπο με τον οποίο αυτό θα επιτευχθεί. Όταν μια νέα μονάδα εισαχθεί, θα ενοποιηθεί διαφανώς από μόνη της, μαθαίνοντας τη δομή και τις ρυθμίσεις του συστήματος, ενώ το υπόλοιπο σύστημα θα προσαρμοστεί στην παρουσία αυτής της μονάδας. Η νέα μονάδα θα καταχωρήσει μόνη της τις δυνατότητές της, ώστε να επιτρέψει στα υπόλοιπα τμήματα είτε να αλληλεπιδράσουν μαζί της είτε να προσαρμόσουν κατάλληλα τη δική τους λειτουργία. Επιπρόσθετα, ένα αυτόνομο σύστημα τροποποιεί αυτόματα τις ρυθμίσεις του, προκειμένου να ανταποκριθεί στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του περιβάλλοντος.
- **Αυτο-βελτιστοποίηση (Self-optimization)**. Τα αυτόνομα συστήματα δεν επαναπαύονται σε ένα σύνολο ρυθμίσεων, αλλά, αντίθετα, αναζητούν διαρκώς τρόπους βελτίωσης της λειτουργίας τους. Έτσι, προσπαθούν συνέχεια να αναγνωρίσουν και να εκμεταλλευτούν ευκαιρίες που θα καταστήσουν τα ίδια περισσότερο αποδοτικά, όσον αφορά την επίδοση, το κόστος ή άλλα διαχειριστικά κριτήρια. Τα αυτόνομα συστήματα παρακολουθούν το περιβάλλον τους, πειραματίζονται συνεχώς με πιθανές διαρθρώσεις και, εν τέλει, μαθαίνουν να λαμβάνουν κατάλληλες αποφάσεις που βελτιστοποιούν τη συμπεριφορά τους.
- **Αυτο-θεραπεία (Self-healing)**. Οι μεγαλύτεροι κατασκευαστές τηλε-κοινωνιακών συστημάτων διαθέτουν πολυάριθμα τμήματα με μοναδικό

σκοπό τον εντοπισμό, τη διάγνωση και την επιδιόρθωση λειτουργικών προβλημάτων και σχεδιαστικών σφαλμάτων. Τα αυτόνομα συστήματα ανιχνεύουν, διαγιγνώσκουν και επιδιορθώνουν μόνα τους τοπικά προβλήματα του υλικού και του λογισμικού. Ένα αυτόματο σύστημα συνήθως διαθέτει μια μονάδα αφιερωμένη στη διάγνωση προβλημάτων, η οποία, χρησιμοποιώντας τη γνώση που έχει για τις ρυθμίσεις και τους στόχους του, αναλύει δεδομένα από την παρακολούθηση του συστήματος, προκειμένου να αποφανθεί περί της ταυτότητας και της αιτίας του σφάλματος και να δράσει με τον κατάλληλο τρόπο προς αντιμετώπιση αυτού. Σε αρκετά τέτοια συστήματα, γίνεται χρήση μπεϋζιανών δικτύων (Bayesian networks) [64]-[65].

- **Αυτο-προστασία (Self-protection)**. Τα αυτόνομα συστήματα αυτο-προστατεύονται με δύο τρόπους, προληπτικά και αντιδραστικά. Έτσι, αφενός αναγνωρίζουν και αναμένουν προβλήματα βάσει δεδομένων που έχουν συλλέξει από τους αισθητήρες τους και λαμβάνουν μέτρα προς αποφυγή ή περιορισμό της βλάβης και αφετέρου αναδιοργανώνονται μέσω των μηχανισμών αυτο-θεραπείας, όταν υποστούν κάποια κακόβουλη και επιβλαβή ενέργεια.

Ο Πίνακας 1-1 που ακολουθεί συγκρίνει τον τρόπο που υλοποιούνται οι τέσσερις βασικές πτυχές της διαχείρισης στα παραδοσιακά και στα αυτόνομα συστήματα.

Πίνακας 1-1. Σύγκριση διαχειριστικών αρχών μεταξύ των παραδοσιακών και των αυτόνομων συστημάτων

Αρχή	Παραδοσιακά συστήματα	Αυτόνομα συστήματα
Αυτο-ρύθμιση	Η εγκατάσταση, η ρύθμιση και η ενσωμάτωση των συστημάτων γίνονται με τρόπο μη αυτόματο. Είναι διαδικασίες χρονοβόρες και επιρρεπείς σε σφάλματα.	Η ρύθμιση των μονάδων και των συστημάτων πραγματοποιείται αυτόματα, ακολουθώντας κανόνες υψηλού επιπέδου. Η προσαρμογή του συστήματος είναι διαφανής και αυτόματη.
Αυτο-βελτιστοποίηση	Τα συστήματα διαθέτουν έναν τεράστιο αριθμό μη γραμμικών, χειροκίνητα καθορισμένων παραμέτρων.	Τα συστήματα αναζητούν διαρκώς ευκαιρίες βελτίωσης της επίδοσης και της γενικότερης απόδοσής τους.
Αυτο-θεραπεία	Η εύρεση και η επιδιόρθωση του προβλήματος σε πολύπλοκα συστήματα αποτελεί μια εξαιρετικά χρονοβόρο διαδικασία.	Τα συστήματα αυτόματα ανιχνεύουν, διαγιγνώσκουν και επιδιορθώνουν προβλήματα λειτουργίας και σφάλματα υλικού και λογισμικού.
Αυτο-προστασία	Η ανίχνευση και η επαναφορά κατόπιν επίθεσης γίνεται με μη αυτόματο τρόπο.	Τα συστήματα αυτόματα υπερασπίζονται τον εαυτό τους έναντι κακόβουλων επιθέσεων. Διαθέτουν την ικανότητα πρόβλεψης και πρόληψης τέτοιων ενεργειών.

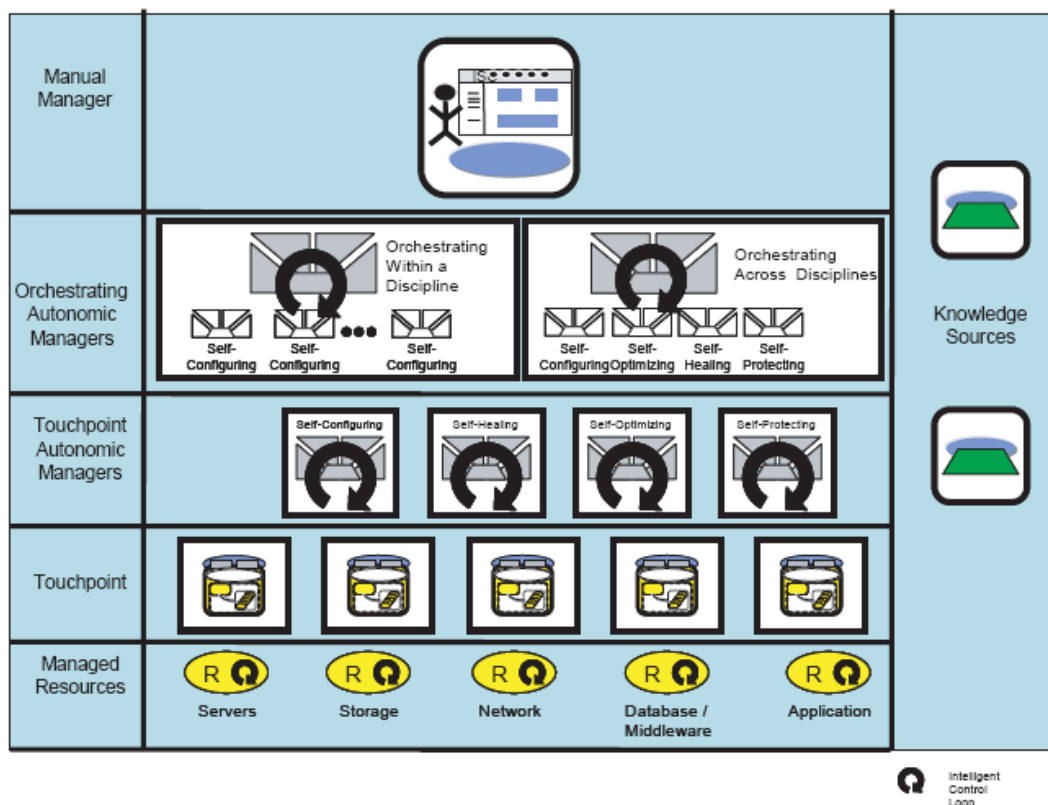
1.3.6.7 Αρχιτεκτονικές θεωρήσεις

Τα αυτόνομα συστήματα συνιστούν αλληλεπιδρώντα σύνολα αυτόνομων στοιχείων, επιμέρους, δηλαδή, μονάδων που χειρίζονται πόρους, εκτελούν διεργασίες και παραδίδουν υπηρεσίες. Η διαχείριση της εσωτερικής κατάστασης και των σχέσεων των στοιχείων με τα υπόλοιπα στοιχεία καθορίζεται, όπως προαναφέρθηκε, από κανόνες και πολιτικές που έχουν οριστεί από τους διαχειριστές. Η έννοια της

αυτο-διαχείρισης εκτείνεται τόσο στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των επιμέρους στοιχείων όσο και στην εσωτερική αυτο-διαχείριση κάθε στοιχείου χωριστά.

Το Σχήμα 1-3 που ακολουθεί παρουσιάζει την οργάνωση ενός αυτόνομου συστήματος σε στρώματα και μονάδες [67]. Τα επιμέρους τμήματα επικοινωνούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας προτυποποιημένους μηχανισμούς, όπως οι Υπηρεσίες Ιστού (Web Services) [68]. Οι επιμέρους λειτουργικές μονάδες, οι οποίες περιλαμβάνουν:

- Σημεία επαφής (touchpoints)
 - Πηγές γνώσης
 - Αυτόνομους διαχειριστές
 - Χειροκίνητους (manual) διαχειριστές
- ενοποιούνται υπό ενιαίο πλαίσιο.



Σχήμα 1-3. Αρχιτεκτονική αναφοράς συστήματος αυτόνομης υπολογιστικής

Το στρώμα χαμηλότερου επιπέδου περιλαμβάνει τις μονάδες συστήματος και, εν γένει, τους διαθέσιμους πόρους που συγκροτούν την τηλεπικοινωνιακή υποδομή. Οι πόροι αυτοί μπορεί να είναι είτε πόροι λογισμικού είτε πόροι υλικού και μπορεί να

έχουν ενσωματωμένα χαρακτηριστικά αυτοδιαχείρισης. Το επόμενο στρώμα αποτελείται από σαφείς, συνεπείς, προτυποποιημένες διεπαφές διαχείρισης για την πρόσβαση στους διαχειριζόμενους πόρους, καθώς και τον έλεγχο αυτών. Οι προτυποποιημένες αυτές διεπαφές εφαρμόζονται μέσω ενός σημείου επαφής.

Το τρίτο και το τέταρτο στρώμα αυτοματοποιούν μέρος της διαχειριστικής διαδικασίας χρησιμοποιώντας έναν αυτόνομο διαχειριστή. Ένας συγκεκριμένος πόρος μπορεί να διαθέτει ένα ή περισσότερα σημεία επαφής αυτόνομων διαχειριστών, καθένα από τα οποία υλοποιεί ένα σχετικό βρόχο ελέγχου. Το στρώμα 3 που απεικονίζεται στο Σχήμα 1-3 παρουσιάζει ένα σημείο επαφής αυτόνομου διαχειριστή για κάθε μια από τις θεμελιώδεις έννοιες της διαχείρισης που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενες παραγράφους, δηλαδή τις έννοιες της αυτο-ρύθμισης, της αυτο-βελτιστοποίησης, της αυτο-θεραπείας και της αυτο-προστασίας. Το τέταρτο στρώμα περιλαμβάνει αυτόνομους διαχειριστές που «ενορχηστρώνουν» και συντονίζουν τη λειτουργία άλλων αυτόνομων διαχειριστών. Είναι ακριβώς αυτοί οι διαχειριστές που υλοποιούν την καθολική δυνατότητα αυτονομίας του συστήματος, καθώς ενσωματώνουν βρόχους ελέγχου που έχουν την πλήρη εικόνα της συνολικής δικτυακής υποδομής. Το ανώτερο στρώμα περιλαμβάνει ένα χειροκίνητο διαχειριστή, ο οποίος παρέχει μια κοινή διεπαφή διαχείρισης του συστήματος προς έναν εξειδικευμένο διαχειριστή. Τα διάφορα στρώματα χειροκίνητης και αυτόνομης διαχείρισης έχουν τη δυνατότητα απόκτησης και διαμοιρασμού γνώσης μέσω των πηγών γνώσης.

Στο τμήμα που ακολουθεί, θα παρουσιαστεί με περισσότερες λεπτομέρειες ο ρόλος καθενός από τα προαναφερθέντα επιμέρους στρώματα.

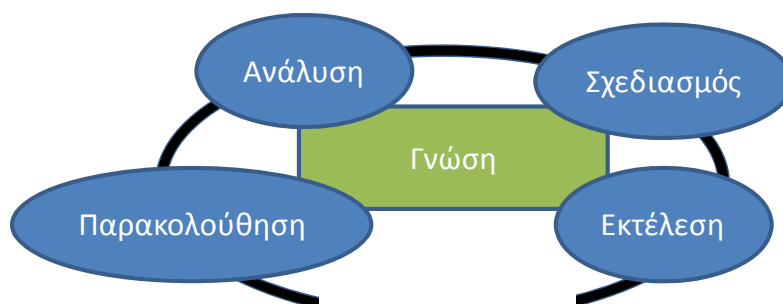
Διαχειριζόμενοι πόροι. Ένας διαχειριζόμενος πόρος είναι μια μονάδα υλικού ή λογισμικού που μπορεί να τεθεί υπό διαχείριση. Παραδείγματα τέτοιων μονάδων είναι οι πομποδέκτες, οι μονάδες αποθήκευσης, οι εξυπηρετητές εφαρμογών κτλ. Μια διαχειριζόμενη μονάδα μπορεί να περιέχει το δικό της ενσωματωμένο βρόχο ελέγχου αυτο-διαχείρισης καθώς και άλλους αυτόνομους διαχειριστές που μπορεί να συνδέονται με αυτόν τον πόρο.

Ευφυείς βρόχοι ελέγχου είναι δυνατό να είναι ενσωματωμένοι στο περιβάλλον εκτέλεσης του διαχειριζόμενου πόρου, παρέχοντας τη δυνατότητα αυτο-διαχείρισης. Οι λεπτομέρειες αυτών των ενσωματωμένων βρόχων ελέγχου μπορεί να μην είναι εξωτερικά ορατές. Ο βρόχος μπορεί να είναι «βαθιά» ενσωματωμένος στον πόρο,

ώστε να μην είναι ορατός μέσω της διεπαφής διαχείρισης. Σε περίπτωση, όμως, που κάτι τέτοιο δε συμβαίνει, ο βρόχος ελέγχου ρυθμίζεται μέσω της προαναφερθείσας διεπαφής.

Σημεία επαφής. Ένα σημείο επαφής είναι μια δομική μονάδα ενός αυτόνομου υπολογιστικού συστήματος που υλοποιεί λειτουργίες αισθητήρων και μονάδων επηρεασμού (effectors) για έναν ή περισσότερους μηχανισμούς διαχείρισης πόρων, παρέχοντας, επιπλέον, μια προτυποποιημένη διεπαφή διαχείρισης, μέσω της οποίας επιτυγχάνεται η πρόσβαση και ο έλεγχος των πόρων. Οι διεπαφές διαχείρισης εφαρμόζουν μηχανισμούς όπως είναι η τήρηση αρχείου συμβάντων, οι εντολές, οι διεπαφές προγραμματισμού εφαρμογών και η τήρηση αρχείων ρυθμίσεων. Οι μηχανισμοί αυτοί παρέχουν ποικίλους τρόπους συλλογής πληροφοριών σχετικών με τους διαχειριζόμενους πόρους, καθώς και μέσα τροποποίησης της συμπεριφοράς αυτών. Έτσι, οι μηχανισμοί συλλογής πληροφοριών συγκεντρώνονται σε έναν αισθητήρα του διαχειριζόμενου πόρου, ενώ, αντίστοιχα, οι μηχανισμοί τροποποίησης της συμπεριφοράς συγκεντρώνονται σε μια μονάδα επηρεασμού.

Σημεία επαφής αυτόνομων διαχειριστών. Οι αυτόνομοι διαχειριστές υλοποιούν ευφυείς βρόχους ελέγχου που αυτοματοποιούν συνδυασμούς των συνηθισμένων τηλεπικοινωνιακών διεργασιών. Ένας τυπικός βρόχος ελέγχου παρουσιάζεται στο Σχήμα 1-4.



Σχήμα 1-4. Τυπικός βρόχος ελέγχου ενός αυτόνομου συστήματος

Τα σημεία επαφής αυτόνομων διαχειριστών είναι αυτά που επικοινωνούν απευθείας με τους διαχειριζόμενους πόρους μέσω των σημείων επαφής που περιγράφηκαν στην αμέσως προηγούμενη παράγραφο. Τα σημεία επαφής αυτόνομων διαχειριστών διαθέτουν και αυτά με τη σειρά τους ευφυείς βρόχους ελέγχου με καθήκοντα όπως τα εξής:

- Εκτέλεση διαδικασιών αυτο-διάρθρωσης, όπως, για παράδειγμα, η εγκατάσταση νέου λογισμικού.
- Εκτέλεση διαδικασιών αυτο-θεραπείας, όπως η διόρθωση μονάδων με σφάλματα λειτουργίας
- Εκτέλεση διαδικασιών αυτο-βελτιστοποίησης, όπως η προσαρμογή της λειτουργίας σε διακυμάνσεις του προσφερόμενου φορτίου.
- Εκτέλεση διαδικασιών αυτο-προστασίας, όπως είναι η «στεγανοποίηση» μονάδων που έχουν προσβληθεί από ιό, κτλ.

Η πλειοψηφία των αυτόνομων διαχειριστών εφαρμόζουν πολιτικές προκειμένου να καθορίσουν τη συμπεριφορά των ευφών βρόχων ελέγχου. Τα σημεία επαφής αυτόνομων διαχειριστών χρησιμοποιούν αυτές τις πολιτικές για να καθορίζουν τις ενέργειες που πρέπει να λάβουν χώρα επί των διαχειριζόμενων πόρων.

Αυτόνομοι διαχειριστές-συντονιστές. Ένα επιμέρους σημείο επαφής αυτόνομων διαχειριστών μπορεί να επιτύχει αυτόνομο έλεγχο αποκλειστικά επί των πόρων που διαχειρίζεται. Συνεπώς, είναι απαραίτητος ο συντονισμός των επιμέρους αυτόνομων διαχειριστών, προκειμένου να επιτευχθεί καθολική αυτονομία. Ο ρόλος του συντονισμού ανατίθεται σε έναν ιδιαίτερο τύπο διαχειριστών, τους αυτόνομους διαχειριστές-συντονιστές. Υπάρχουν δυο διαφορετικές προσεγγίσεις στη διαδικασία του συντονισμού:

- *Συντονισμός σε μια αρχή.* Ένας αυτόνομος διαχειριστής-συντονιστής συντονίζει πολλαπλά σημεία επαφής αυτόνομων διαχειριστών ίδιας αρχής, δηλαδή είτε αυτο-ρύθμισης ή αυτο-θεραπείας ή αυτο-προστασίας ή αυτο-βελτιστοποίησης.
- *Συντονισμός μεταξύ αρχών.* Σε αυτήν την περίπτωση, ο διαχειριστής-συντονιστής συντονίζει αυτόνομους διαχειριστές πολλαπλών ιδιοτήτων.

Ένα παράδειγμα διαχειριστή-συντονιστή αποτελεί ένας διαχειριστής υπολογιστικού φορτίου. Ένα αυτόνομο σύστημα διαχείρισης υπολογιστικού φορτίου μπορεί να περιλαμβάνει πολλαπλούς αυτόνομους διαχειριστές αυτο-βελτιστοποίησης για συγκεκριμένους πόρους, όπως και ένα διαχειριστή-συντονιστή για τη διαχείριση μιας ομάδας πόρων. Ένα σημείο επαφής αυτόνομου διαχειριστή είναι σε θέση να βελτιστοποιήσει τη χρησιμοποίηση ενός πόρου, βάσει των απαιτήσεων της εφαρμογής. Αντίθετα, ένας διαχειριστής-συντονιστής μπορεί να βελτιστοποιήσει τη χρησιμοποίηση ενός συνόλου πόρων, σύμφωνα με κανόνες συναλλαγών και

πολιτικές. Η παρουσία των συντονιστών διαχείρισης είναι απαραίτητη, καθώς η ύπαρξη αποκλειστικά επιμέρους αυτόνομων διαχειριστών δεν εγγυάται τη συνολική βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος.

Χειροκίνητος (μη αυτόνομος) διαχειριστής. Ένας χειροκίνητος διαχειριστής παρέχει μια διεπαφή διαχείρισης του συστήματος προς έναν εξειδικευμένο διαχειριστή τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Τα αυτο-διαχειριζόμενα αυτόνομα συστήματα συχνά χρησιμοποιούν τη συμβατική τεχνολογία κονσόλας, προκειμένου να δημιουργήσουν μια αποτελεσματική διεπαφή φιλική προς τον ανθρώπινο χρήστη. Όπως προαναφέρθηκε, τα συστήματα σχεδιάζονται ως αυτόνομα, προκειμένου να εκτελούν, σύμφωνα με κανόνες και πολιτικές, διεργασίες που σε άλλη περίπτωση θα διενεργούνταν από ειδικευμένους διαχειριστές. Σε περίπτωση που ο σχεδιαστής επιλέξει και ανθρώπινη παρέμβαση, θα πρέπει να προβλέψει και το χειρισμό κατάλληλης κονσόλας που θα επιτρέπει τη χειροκίνητη διαχείριση και έλεγχο των επιμέρους δομικών μονάδων και πόρων. Η χρήση προτύπων για τη δημιουργία της κονσόλας διαχείρισης (όπως είναι οι προτυποποιημένες διεπαφές προγραμματισμού εφαρμογών Java, συμπεριλαμβανομένων των JSR-168 και JSR-127 [71]) προσφέρουν εύκολη επέκταση των λειτουργιών διαχείρισης και επιτρέπουν την ανάπτυξη νέων προϊόντων.

1.3.7 Πλεονεκτήματα γνωστικών δικτύων

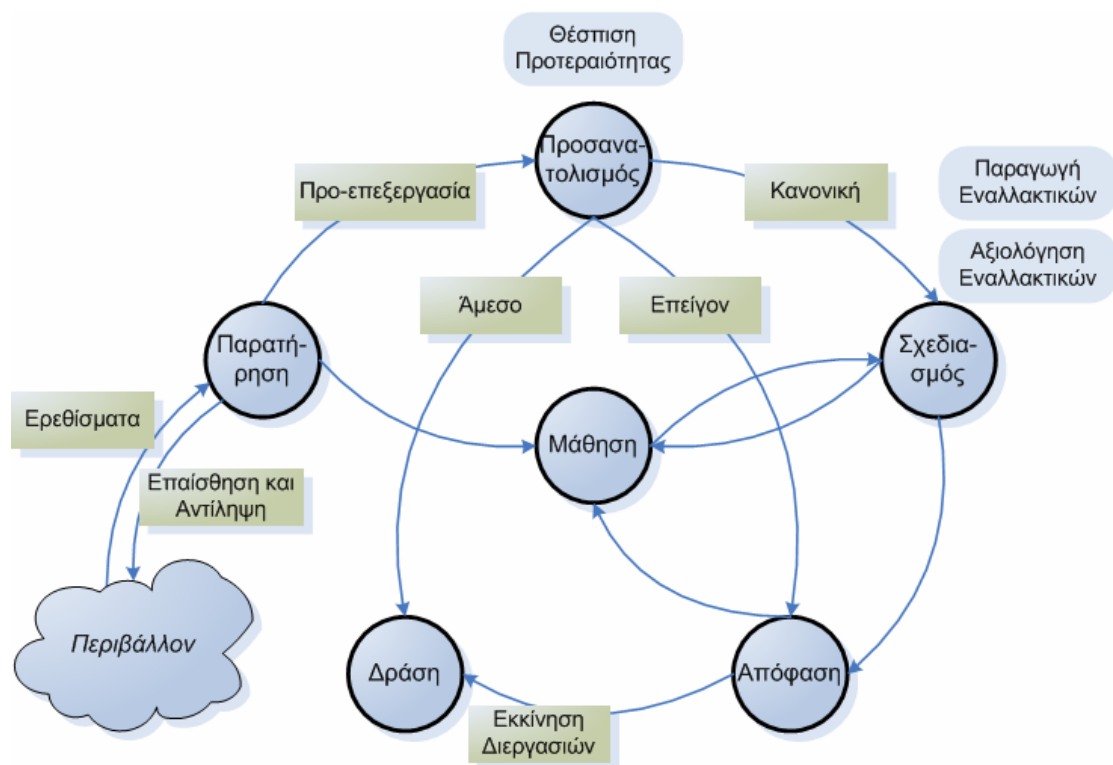
Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, τα γνωστικά δίκτυα αποτελούν μια προσέγγιση του B3G οράματος, προτείνοντας λύσεις στο πρόβλημα αφενός της έλλειψης φάσματος και αφετέρου της πολυπλοκότητας διαχείρισης ετερογενών δικτυακών υποδομών. Από την προσέγγιση αυτή προκύπτουν πολλά οφέλη για όλους τους εμπλεκόμενους παράγοντες της διαδικασίας παροχής υπηρεσιών. Έτσι, ωφελούνται σημαντικά οι ρυθμιστικές αρχές, οι πάροχοι δικτύου, οι πάροχοι υπηρεσιών, οι κατασκευαστές τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού και, φυσικά, οι τελικοί χρήστες. Ο τρόπος με τον οποίο βελτιώνεται η εμπειρία και η λειτουργία καθενός από αυτούς τους παράγοντες ποικίλει και εξαρτάται από το ρόλο που αυτός διαδραματίζει στο τηλεπικοινωνιακό τοπίο. Ο Πίνακας 1-2 που ακολουθεί καταγράφει αυτά τα οφέλη.

Πίνακας 1-2. Πλεονεκτήματα γνωστικών δικτύων

Τελικοί χρήστες	Βελτιωμένη ποιότητα υπηρεσίας, που προκύπτει από υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων, μικρότερη καθυστέρηση, χαμηλότερο κόστος κτλ.
	Αυξημένη αξιοπιστία και διαθεσιμότητα
	Παροχή βέλτιστης σύνδεσης, όπως αυτή ορίζεται για κάθε χρήστη χωριστά
Πάροχοι δικτύου	Δυνατότητα εισαγωγής νέων υπηρεσιών προστιθέμενης αξίας
	Βελτιστοποίηση δικτύων μέσω μετρήσεων φάσματος που πραγματοποιούν τα γνωστικά τερματικά
	Μείωση εξόδων κεφαλαίου
	Απόκτηση κέρδους μέσω ενοικίασης συχνοτήτων για τις οποίες έχει αποκτηθεί άδεια, αλλά παραμένουν ανεκμετάλλευτες για μεγάλα χρονικά διαστήματα
	Απλοποίηση διαχείρισης
Πάροχοι υπηρεσιών	Αποδοτικότερη χρήση του φάσματος, που μεταφράζεται σε αύξηση του αριθμού των χρηστών και αύξηση των παρεχόμενων ρυθμών δεδομένων
Κατασκευαστές εξοπλισμού	Κατασκευή εξοπλισμού με δυνατότητα υποστήριξης ετερογενών τεχνολογιών και δυνατότητα χρήσης σε ποικίλες φασματικές ζώνες
	Διευκόλυνση στη διαδικασία ενσωμάτωσης μελλοντικών αλλαγών
Ρυθμιστικές αρχές	«Χαλάρωση» των προϋποθέσεων αδειοδότησης
	Δυνατότητα απόκτησης κέρδους μέσω «μεσιτείας» φάσματος

1.3.8 Γνωστικός κύκλος

Αν και η δυνατότητα αναδιάρθρωσης είναι ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά λειτουργίας των γνωστικών δικτύων, εντούτοις δεν πρέπει αυτά να συγχέονται με τα αναδιαρθρώσιμα SDR συστήματα. Στην πραγματικότητα, θεμελιώδες χαρακτηριστικό ενός γνωστικού συστήματος είναι η ικανότητα να παρατηρεί το περιβάλλον του, να αναγνωρίζει νέες καταστάσεις και να μαθαίνει, δηλαδή να αποκτά γνώση και εμπειρία μέσω αυτών. Η γνώση αυτή λαμβάνεται, στη συνέχεια, υπόψη κατά τη λήψη αποφάσεων, προκειμένου να γίνει το αποτέλεσμα αυτής περισσότερο αξιόπιστο και αποδοτικό. Οι παραπάνω λειτουργικές φάσεις αναπαριστώνται από το λεγόμενο «γνωστικό κύκλο», ο οποίος παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με το λειτουργικό κύκλο των αυτόνομων συστημάτων. Ο γνωστικός κύκλος που προτάθηκε από τον Joseph Mitola, «πατέρα» και θεμελιωτή των γνωστικών δικτύων [69]-[70], παρουσιάζεται στο Σχήμα 1-5.



Σχήμα 1-5. Γνωστικός κύκλος

Παρατήρηση (Επαίσθηση και Αντίληψη).

Η φάση της παρατήρησης είναι λογικά η πρώτη λειτουργική φάση του γνωστικού κύκλου. Κατά τη λειτουργία της παρατήρησης, το σύστημα διαισθάνεται κατάλληλα το περιβάλλον του και αντιλαμβάνεται τις τρέχουσες συνθήκες. Μέσω κατάλληλης

διαδικασίας επαίσθησης, εντοπίζει τις συχνότητες που είναι ανεκμετάλλευτες ή υπο-χρησιμοποιούνται ως υποψήφιος για ευκαιριακή χρήση. Η διαδικασία της αντίληψης επεξεργάζεται τα πρωτογενή δεδομένα που συλλέγονται, για να καταλήξει σε αρχικές εκτιμήσεις.

Προσανατολισμός.

Κατά τη φάση αυτή, τα πρωτογενή δεδομένα που έχουν προ-επεξεργαστεί συγκρίνονται με τη γνώση του συστήματος, προκειμένου αυτό να αποφανθεί για το αν πρόκειται για μια πρωτόγνωρη κατάσταση ή επανάληψη μιας κατάστασης του παρελθόντος. Στη δεύτερη περίπτωση, το σύστημα ανατρέχει στην εμπειρία που έχει συλλέξει και τη γνώση που έχει αποκτήσει προκειμένου να ταυτίσει ένα ή περισσότερα γνωρίσματα της τρέχουσας κατάστασης και να καταλήξει στην πλέον ενδεδειγμένη απόφαση δράσης.

Σχεδίαση

Η φάση αυτή περιλαμβάνει μια διαδικασία συλλογιστικής επί των δεδομένων, προκειμένου να καθοριστεί η συμπεριφορά του συστήματος. Σε αυτήν τη βάση, εφαρμόζονται κατάλληλοι κανόνες και πολιτικές διαχείρισης που έχουν προκαθοριστεί από τους διαχειριστές του δικτύου ή καθορίζονται από το ίδιο το σύστημα κατά τρόπο δυναμικό και αυτόνομο. Αναλύοντας τα λαμβανόμενα ερεθίσματα, σε συνδυασμό με τις επιθυμητές ή προκαθορισμένες συμπεριφορές, προτείνεται η κατάλληλη απόφαση, συνήθως μέσω εργαλείων που ενσωματώνουν μοντέλα αιτιακής σχέσης.

Απόφαση

Κατά τη φάση αυτή επιλύεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης της λειτουργίας των γνωστικών στοιχείων και προκύπτει η βέλτιστη κατανομή διαρθρώσεων. Επιπρόσθετα από την έξοδο της προηγούμενης φάσης, ως παράμετροι εισόδου στο πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να θεωρηθούν οι προτιμήσεις των χρηστών, οι απαιτήσεις του παρόχου δικτύου, οι ρυθμιστικοί κανόνες κ.ά.

Δράση

Η φάση δράσης περιλαμβάνει την εκτέλεση όλων εκείνων των διαδικασιών που αφορούν την τροποποίηση των παραμέτρων λειτουργίας του γνωστικού δικτύου, και

μπορεί να εφαρμόζονται είτε επί εσωτερικών καταστάσεων είτε με τρόπο που επηρεάζει το περιβάλλον. Έτσι, στην πρώτη περίπτωση, μπορεί, για παράδειγμα, να εκτελείται κάποια μετάδοση μηνυμάτων στα δικτυακά στοιχεία, μέσω προκαθορισμένων πρωτοκόλλων. Στη δεύτερη περίπτωση, ανήκουν οι διαδικασίες ενεργοποίησης του κατάλληλου λογισμικού, προκειμένου να εφαρμοστεί μια νέα διάρθρωση, ή, εν γένει, να πραγματοποιηθεί αυτοματοποιημένη διαχείριση των πόρων του συστήματος.

Μάθηση

Η φάση αυτή είναι θεμελιώδης, καθώς, σε μεγάλο βαθμό, η ύπαρξή της είναι αυτή που χαρακτηρίζει το σύστημα ως γνωστικό. Στη φάση αυτή, λοιπόν, εφαρμόζονται κατάλληλες τεχνικές μάθησης, με στόχο τη σύγκριση κάθε λαμβανόμενου ερεθίσματος και την απόκτηση γνώσης και εμπειρίας. Η διαδικασία της μάθησης, συνήθως, περιλαμβάνει τρία στάδια τα οποία είναι τα εξής:

- αρχική εκπαίδευση, ακολουθούμενη από χρήση
- μάθηση σε πραγματικό χρόνο για την απόκτηση επιπλέον γνώσης
- πληροφορίες ανάδρασης, θετικές ή αρνητικές, από το περιβάλλον

Λόγω του αυξημένου υπολογιστικού φορτίου που, ενδεχομένως, συνεπάγεται η διαδικασία μάθησης, είναι δυνατό κάποιες από τις προαναφερθείσες ενέργειες να μην εκτελούνται σε πραγματικό χρόνο, αλλά σε στιγμές που το σύστημα είτε είναι ανενεργό είτε βρίσκεται σε κατάσταση ήπιας λειτουργίας.

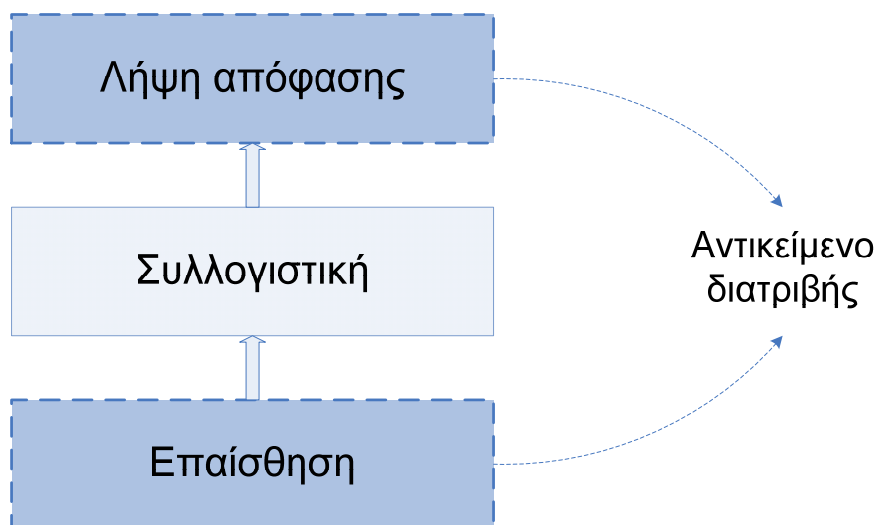
1.4 Αντικείμενο διατριβής

Το μοντέλο του γνωστικού κύκλου που μόλις παρουσιάστηκε μπορεί να απλοποιηθεί περαιτέρω, προκειμένου να αποτελέσει ένα περισσότερο εύχρηστο σημείο αναφοράς. Στο απλοποιημένο, λοιπόν, γνωστικό μοντέλο αναφοράς που απεικονίζεται στο Σχήμα 1-6, περιλαμβάνονται τρεις θεμελιώδεις και στενά συνδεδεμένες λειτουργίες:

- **Λειτουργία επαίσθησης**: Στα πλαίσια της λειτουργίας αυτής, το γνωστικό σύστημα παρακολουθεί τις συνθήκες που διαμορφώνονται στο ραδιοπεριβάλλον του, όπως ακριβώς ένας βιολογικός οργανισμός παρατηρεί και «διαισθάνεται» το δικό του περιβάλλον. Έτσι, καθίσταται δυνατή η

προσαρμογή του συστήματος στις παρατηρούμενες μεταβολές. Η παρούσα διατριβή επικεντρώνεται στη δυνατότητα κλιμάκωσης και στο χρονοπρογραμματισμό της λειτουργίας της επαίσθησης ενός γνωστικού σταθμού βάσης, με δύο σαφείς όσο και αντικρουόμενους στόχους: την εκτέλεση της λειτουργίας αφενός στον ταχύτερο δυνατό χρόνο, αφετέρου με την ελάχιστη δυνατή δέσμευση ραδιοπόρων.

- **Λειτουργία συλλογιστικής:** Σκοπός της εν λόγω λειτουργίας είναι η επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων που συλλέγονται μέσω της διαδικασίας της επαίσθησης, προκειμένου να προσδιοριστούν οι προσδοκώμενες επιδόσεις των υποψήφιων διαρθρώσεων, σε περίπτωση εφαρμογής τους. Παραδείγματα τέτοιων επιδόσεων είναι η αναμενόμενη χωρητικότητα μετάδοσης και η αναμενόμενη ακτίνα κάλυψης. Ένα πραγματικά γνωστικό σύστημα οφείλει να αξιοποιεί όχι μόνο τις τρέχουσες μετρήσεις αλλά και την πρότερη εμπειρία του, για τον αξιόπιστο προσδιορισμό των εν λόγω προσδοκώμενων επιδόσεων.
- **Λειτουργία λήψης απόφασης:** Ο απώτερος σκοπός ενός γνωστικού συστήματος είναι η επιλογή της καταλληλότερης διάρθρωσης για τη βέλτιστη ικανοποίηση των χρηστών του. Οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη σε μια τέτοια διαδικασία βελτιστοποίησης είναι τα δευτερογενή δεδομένα της συλλογιστικής λειτουργίας, η διάταξη των τερματικών, ο βαθμός κινητικότητάς τους και το φορτίο κίνησής τους, το κόστος αναδιάρθρωσης, καθώς και οι προδιαγεγραμμένοι κανόνες και πολιτικές.



Σχήμα 1-6. Γνωστικό μοντέλο αναφοράς

Η παρούσα διατριβή ασχολείται με το πρώτο και το τρίτο στρώμα του γνωστικού μοντέλου αναφοράς, δηλαδή με τις λειτουργίες της επαίσθησης και της λήψης απόφασης. Σκοπός της είναι να παραδώσει πρωτότυπες μεθόδους και αλγορίθμους και στους δύο αυτούς τομείς, καλύπτοντας τα κενά της σημερινής επιστημονικής βιβλιογραφίας.

Συγκεκριμένα, στο στάδιο της επαίσθησης, η παρούσα διατριβή

- Υιοθετεί την ιδέα της αξιοποίησης των κινητών τερματικών ως καταναμημένων αισθητήρων λήψης μετρήσεων επαίσθησης, με το γνωστικό σταθμό βάσης να λειτουργεί ως σημείο συγκέντρωσης και επεξεργασίας των επαισθητικών δεδομένων.
- Προσδιορίζει και οριοθετεί το πρόβλημα της κλιμακωσιμότητας της λειτουργίας της επαίσθησης, ειδικά ως προς τη διαδικασία συγκέντρωσης των επαισθητικών μετρήσεων στο γνωστικό σταθμό βάσης.
- Προχωρά στην ενδελεχή μελέτη της δυνατότητας κλιμάκωσης της διαδικασίας της επαίσθησης, για διάφορους τύπους ραδιοδιεπαφών μεταξύ τερματικών και σταθμού βάσης και εξετάζει την επίδραση μιας σειράς διαφορετικών παραμέτρων.
- Προτείνει καινοτόμους αλγόριθμους χρονοπρογραμματισμού της διαδικασίας ενημέρωσης του σταθμού βάσης, εφαρμόσιμους στις περιπτώσεις που συμμετέχουν σε αυτήν πολλαπλά τερματικά, με απώτερο στόχο την επίτευξη ενός ικανοποιητικού συμβιβασμού μεταξύ του βαθμού χρησιμοποίησης των διαθέσιμων ραδιοπόρων και της ταχύτητας συλλογής των επαισθητικών δεδομένων.

Όσον αφορά το στάδιο της λήψης απόφασης, η παρούσα διατριβή

- Προτείνει έναν ευφυή αλγόριθμο βέλτιστης επιλογής διαρθρώσεων για τους γνωστικούς σταθμούς βάσης, ο οποίος συνυπολογίζει το είδος και τις δυνατότητες των υποψήφιων διαρθρώσεων, το αιτούμενο φορτίο κίνησης, τη χωρική διάταξη των τερματικών, το κόστος αναδιάρθρωσης και άλλες παραμέτρους, επιτυγχάνοντας μια πολύπλευρη αξιολόγηση των υποψήφιων διαρθρώσεων σε τομείς όπως το ποσοστό κάλυψης, η χωρητικότητα χρηστών, η χωρητικότητα μετάδοσης, η υποστήριξη κινητικότητας και το κόστος.

- Επεκτείνει τον προτεινόμενο αλγόριθμο βελτιστοποίησης ενσωματώνοντας μια λειτουργία ευφυούς ιεράρχησης των κριτηρίων επίδοσης, η οποία υλοποιείται με τη χρήση νευρωνικών δικτύων.
- Προχωρά στην εξαγωγή, το σχολιασμό και την αξιολόγηση αποτελεσμάτων εκτέλεσης του προτεινόμενου αλγορίθμου. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, υλοποιείται μια πλατφόρμα διαχείρισης της επιλογής βέλτιστων διαρθρώσεων, ενώ, επίσης, γίνεται σύγκριση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων με εκείνα που προκύπτουν από την εφαρμογή προκαθορισμένων πολιτικών διαχείρισης.

1.5 Σχετικές εργασίες

Το πεδίο των γνωστικών συστημάτων έχει συγκεντρώσει τα τελευταία χρόνια σημαντικό μέρος των παγκόσμιων ερευνητικών προσπαθειών, κάτι που αντικατοπτρίζεται και στο αξιόλογο ποσοστό κονδυλίων έρευνας και τεχνολογίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης το οποίο αφιερώνεται σε σχετικά ερευνητικά προγράμματα. Εντούτοις, τα θέματα με τα οποία ασχολείται η παρούσα διατριβή δεν έχουν μέχρι στιγμής τύχει εκτενούς μελέτης από την επιστημονική κοινότητα. Στις παραγράφους που ακολουθούν, παρατίθενται οι έως σήμερα σχετικές ερευνητικές εργασίες και εντοπίζονται οι διαφορές τους από την παρούσα διατριβή.

Οι σχετικές ερευνητικές εργασίες μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν εργασίες οι οποίες αφορούν διαδικασίες βελτιστοποίησης σε περιβάλλοντα πέραν της τρίτης γενεάς. Στη δεύτερη ανήκουν εργασίες οι οποίες αφορούν τα γνωστικά συστήματα αυτά καθεαυτά και ασχολούνται με τα στάδια της επαίσθησης ή/και της λήψης απόφασης.

Η πρώτη κατηγορία εργασιών επικεντρώνεται στη μοντελοποίηση και επίλυση του προβλήματος «Συνεχώς Βέλτιστα Συνδεδεμένος» (Always Best Connected - ABC) [19], σύμφωνα με το οποίο, σε ένα ετερογενές δικτυακό περιβάλλον, κάθε χρήστης θα πρέπει, ανά πάσα στιγμή, να εξυπηρετείται από το βέλτιστο διαθέσιμο σημείο πρόσβασης, δηλαδή εκείνο που εξυπηρετεί καλύτερα τόσο τις δικές του ανάγκες όσο και τις ανάγκες του παρόχου. Πρέπει να γίνει, ωστόσο, κατανοητό ότι το συγκεκριμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης διαφέρει ριζικά από εκείνο το οποίο έχει

ως στόχο να επιλύσει η παρούσα διατριβή. Στις μέχρι σήμερα μελέτες, θεωρείται ως δεδομένη μία συγκεκριμένη δικτυακή τοπολογία, με πιθανώς ετερογενή, αλλά σε κάθε περίπτωση προκαθορισμένα και σταθερά, σημεία πρόσβασης. Έπειτα, επιχειρείται να προσδιοριστεί η βέλτιστη κατανομή των χρηστών στα σημεία πρόσβασης, με στόχο την καλύτερη δυνατή εξυπηρέτησή τους και τη βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας του δικτύου. Αντίθετα, η παρούσα διατριβή δε θεωρεί ως δεδομένη τη δικτυακή τοπολογία, αλλά ως πλήρως αναδιαρθρώσιμη. Σκοπός, λοιπόν, είναι η εύρεση της βέλτιστης διάρθρωσης του δικτύου πρόσβασης ώστε να καταστεί δυνατή η βέλτιστη εξυπηρέτηση των χρηστών. Με άλλα λόγια, η παρούσα διατριβή επικεντρώνεται σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης το οποίο σαφώς προηγείται χρονικά εκείνου της βέλτιστης κατανομής της κίνησης των χρηστών.

Στη συγκεκριμένη κατηγορία ερευνητικών εργασιών, που μόλις περιγράφηκε, ανήκουν οι δραστηριότητες ευρωπαϊκών ερευνητικών προγραμμάτων, όπως τα MONASIDRE [72], CREDO [73] και DAIDALOS [74]. Στο πρόγραμμα MONASIDRE, προσομοιώθηκε μια αρχιτεκτονική η οποία ενοποιούσε τις τεχνολογίες UMTS, HiperLan-2 και DVB-T. Βασικός άξονας του προγράμματος ήταν η προσομοίωση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης κάθε δικτύου και η ανακατανομή της στις διάφορες δικτυακές συνιστώσες (με χρήση κάθετων διαπομπών), μέσω της συνεργασίας των διαχειριστικών μονάδων κάθε δικτύου. Στο πρόγραμμα CREDO, ακολουθήθηκε η ίδια λογική διαχείρισης της σύνθετης δικτυακής υποδομής (GPRS, WLAN, DVB-T), αυτήν τη φορά, όμως, με πραγματικά δίκτυα και όχι με προσομοιωτές. Δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην υλοποίηση της κάθετης διαπομπής μικρού αριθμού τερματικών, σύμφωνα με τις αποφάσεις του συστήματος διαχείρισης, και σε θέματα επικοινωνίας τερματικού και δικτύου, με απώτερο στόχο την οδήγηση του πρώτου στο καλύτερο για κάθε αιτούμενη υπηρεσία δίκτυο. Το πρόγραμμα DAIDALOS επιχείρησε να ενοποιήσει ένα μεγάλο πλήθος τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης (WLAN, DVB-T, TD-CDMA, Bluetooth, κ.λπ.), ενσωματώνοντας ιδέες της διάχυτης υπολογιστικής στο επίπεδο των υπηρεσιών και κάνοντας εκτεταμένη χρήση του IPv6 και τεχνικών εξασφάλισης της ποιότητας υπηρεσίας, με σκοπό τη βελτιστοποίηση παραμέτρων της κάθετης διαπομπής [75]-[77]. Εδώ, το κινητό τερματικό θεωρείται ότι ενσωματώνει ένα μηχανισμό λήψης απόφασης σχετικά με το βέλτιστο σημείο πρόσβασης, ο οποίος λαμβάνει υπόψη τη διαθεσιμότητα των γειτονικών σημείων πρόσβασης και ένα βασικό προφίλ χρήστη. Πέραν αυτών, σε μια σειρά ανεξάρτητων εργασιών ([79]-[82]), το πρόβλημα της

επιλογής δικτύου πρόσβασης αντιμετωπίζεται σε συνάρτηση με συγκεκριμένες απαιτήσεις των υπηρεσιών και στο πλαίσιο συνεργαζόμενων πλατφορμών υπηρεσιών (federating service platforms). Στην παραπομπή [83], επεξηγείται με εποπτικό τρόπο η αρχή ABC, ενώ στην παραπομπή [84] παρατίθενται τρεις πιθανοί αλγόριθμοι επιλογής δικτύου πρόσβασης, αποτελώντας το έναυσμα για περαιτέρω μελέτες πάνω στο θέμα αυτό [85]-[87]. Τέλος, στις εργασίες [88]-[89] προτείνεται η μοντελοποίηση της βέλτιστης κατανομής χρηστών και υπηρεσιών σαν πρόβλημα τύπου knapsack [90].

Στη δεύτερη κατηγορία ερευνητικών δραστηριοτήτων, η οποία εστιάζεται στη λειτουργία των γνωστικών συστημάτων αυτών καθεαυτών, συναντώνται εξίσου σημαντικά ευρωπαϊκά ερευνητικά προγράμματα. Συγκεκριμένα, το ευρωπαϊκό πρόγραμμα SPORT VIEWS (Spectrum Policies and Radio Technologies Viable In Emerging Wireless Societies) μελετά τα αποτελέσματα τεσσάρων, κυρίως, 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) [91] ήταν ένα πρόγραμμα επιδοτούμενο από την Ευρωπαϊκή Ένωση που στόχευε 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 έξι 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 [92] και E3 [93], 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 αντανakλάται μέσα από τις μέχρι τώρα δημοσιευμένες εργασίες [94]-[95], περιορίζεται, σε πολλές περιπτώσεις, σε μια γενική περιγραφή οντοτήτων και αρχών λειτουργίας και όχι σε

έναν ενδεδειγμένο 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. Τέλος, 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 [98] 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 4 GHz, 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) [97], 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, επιχειρήθηκε μια 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. Εντούτοις, σε μεγάλο βαθμό, το πρόγραμμα επικεντρώθηκε σε τεχνικές δυναμικής ανάθεσης φάσματος και όχι σε μια συνολική προσέγγιση αξιολόγησης και επιλογής μια υποψήφιας διάρθρωσης. Επιπλέον, δε διενεργήθηκε μελέτη των δυνατοτήτων κλιμάκωσης της διαδικασίας της επαίσθησης.

Το ευρωπαϊκό πρόγραμμα SURFACE (Self Configurable Air Interface) [99], χρηματοδοτούμενο από το 6^ο Κοινοτικό Πλαίσιο Έρευνας και Τεχνολογίας είχε στόχο τη μελέτη και την εκτίμηση μιας καινοτόμου, 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 έλαβε υπόψη του 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 το πρόβλημα της βέλτιστης επιλογής διαρθρώσεων ενός γνωστικού σταθμού βάσης.

Σε παρόμοιο πνεύμα, κινήθηκε και το ευρωπαϊκό πρόγραμμα PHOENIX (Jointly optimising multimedia transmissions in IP based wireless networks) [100] στοχεύοντας στην ανάπτυξη ενός βελτιστοποιημένου απ' άκρο εις άκρο ασύρματου διαύλου επικοινωνίας. Η βελτιστοποίηση συνίστατο στη χρήση ευέλικτων μεθόδων κωδικοποίησης διαύλου και διαμόρφωσης σήματος, επικεντρωνόταν, δηλαδή, εκ νέου στο φυσικό στρώμα και όχι σε διαδικασίες και αλγορίθμους διαχείρισης.

Το αμερικανικό DARPA (Defence Advanced Research Projects Agency) στοχεύει σε αυτό που ονομάζει επόμενη γενιά (neXt Generation – XG) επικοινωνιών [96]. 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 του περιβάλλοντος, της ανακάλυψης των οπών φάσματος και της εκμετάλλευσής αυτών, και ii) με την ανάπτυξη ενός πλαισίου διαχείρισης των γνωστικών δικτύων μέσω πολιτικών. Λόγω του στρατιωτικού προσανατολισμού του συγκεκριμένου προγράμματος, τα αποτελέσματά 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 προαναφερθέντων δραστηριοτήτων σε επίπεδο ερευνητικών προγραμμάτων, ειδική αναφορά πρέπει να γίνει και σε συγκεκριμένες εργασίες ανεξάρτητων ερευνητών. Δυστυχώς, τα δύο προβλήματα με τα οποία καταπιάνεται η παρούσα διατριβή, δηλαδή η κλιμακωσιμότητα της διαδικασίας επαίσθησης και η

βέλτιστη επιλογή διαρθρώσεων, έχουν τύχει μέχρι στιγμής επιφανειακής αντιμετώπισης από τη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία. Αναφορικά με το πρώτο πρόβλημα, δεν έχει υπάρξει μέχρι σήμερα ούτε συνολική θεώρησή του, αλλά ούτε και συστηματική μελέτη του ή πρόταση αποτελεσματικής αντιμετώπισής του. Σχετικά με το δεύτερο πρόβλημα, οι υπάρχουσες εργασίες είτε περιορίζονται σε μια περιγραφή λειτουργιών σε υψηλό επίπεδο, χωρίς να παρέχουν λεπτομέρειες και αλγόριθμους υλοποίησης, είτε προτάσσουν λύσεις βασισμένες σε προκαθορισμένους κανόνες και πολιτικές. Τέτοιου είδους εργασίες περιλαμβάνουν τις παραπομπές [101]-[102], στις οποίες παρουσιάζεται ένας fuzzy-νευρωνικός αλγόριθμος επικεντρωμένος στη συνδυασμένη διαχείριση ραδιοπόρων (joint radio resource management). Το προτεινόμενο σχήμα, ωστόσο, συνιστά μια διαδικασία βελτιστοποίησης της επιλογής δικτύου πρόσβασης από την πλευρά του τερματικού, θεωρώντας σταθερή και μη αναδιαρθρώσιμη τη δικτυακή υποδομή. Στο ίδιο πνεύμα, στην παραπομπή [103], προτείνεται ένας παρόμοιος αλγόριθμος για τη βελτιωμένη διαχείριση των πόρων ενός ετερογενούς, αλλά και πάλι προκαθορισμένου, δικτύου. Στις παραπομπές [104]-[106], καθορίζεται μια υψηλού επιπέδου λειτουργική αρχιτεκτονική για την υποστήριξη της απ' άκρο εις άκρο αναδιαρθρωσιμότητας. Παρουσιάζεται η ιδέα ενός επιπέδου διαχείρισης αναδιαρθρώσεων (Reconfiguration Management Plane - RMP), χωρίς, ωστόσο, να παρέχονται λεπτομέρειες υλοποίησης των αλγορίθμων επιλογής των κατάλληλων αναδιαρθρώσεων. Στην παραπομπή [107], προτείνεται η χρήση του RMP για την υποστήριξη δικτυακών αναδιαρθρώσεων βασισμένων σε προκαθορισμένες πολιτικές. Τέλος, στις παραπομπές [108]-[109], αναγνωρίζονται τρεις λόγοι εκκίνησης μιας δικτυακής αναδιάρθρωσης: (i) όταν ο δικτυακός κόμβος δεν έχει κάποια εγγενή διάρθρωση και μια πλήρης, αρχική διάρθρωση πρέπει να επιλεγεί, (ii) όταν ο δικτυακός κόμβος είναι ήδη διαμορφωμένος σε κάποια διάρθρωση (π.χ., GSM), αλλά χρειάζεται να αναδιαρθρωθεί σε ένα διαφορετικό πρότυπο (π.χ., UMTS), και (iii) ο δικτυακός κόμβος είναι ήδη διαμορφωμένος σε κάποια διάρθρωση, αλλά μια μικρής έκτασης, μερική αναδιάρθρωση πρέπει να εκτελεστεί (π.χ., μερική αναβάθμιση του προτύπου). Σε αυτό το πλαίσιο, λοιπόν, οι αποφάσεις αναδιάρθρωσης αντιμετωπίζονται σαν το επακόλουθο μιας συγκεκριμένης αίτησης και όχι ως αποτέλεσμα μιας ευφυούς διαδικασίας βελτιστοποίησης.

1.6 Διάρθρωση διατριβής

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής, περιγράφηκαν οι στόχοι και οι βασικές αρχές λειτουργίας των γνωστικών συστημάτων επικοινωνιών, προσδιορίστηκαν οι αδυναμίες και ελλείψεις των σχετικών ερευνητικών εργασιών και καθορίστηκε το αντικείμενο της διατριβής και οι καινοτομίες που αυτή εισάγει. Αντικείμενο του δεύτερου κεφαλαίου αποτελεί η εκτίμηση και αξιολόγηση της κλιμακωσιμότητας της λειτουργίας της επαίσθησης σε γνωστικά συστήματα επικοινωνιών. Στο πλαίσιο αυτό, διεξάγεται μια εκτενής μελέτη, η οποία καλύπτει διάφορους τύπους ασύρματων διεπαφών μεταξύ των τερματικών-αισθητήρων και του γνωστικού σταθμού βάσης. Κεντρικός στόχος είναι η αποκάλυψη των παραμέτρων που επιδρούν στις δυνατότητες κλιμάκωσης, καθώς και του τρόπου και του βαθμού με τον οποίο αυτό επιτελείται.

Στο τρίτο κεφάλαιο, η διατριβή προχωρά ένα βήμα παραπέρα, προτείνοντας συγκεκριμένους ευφυείς αλγορίθμους χρονοπρογραμματισμού της διαδικασίας της επαίσθησης, οι οποίοι επιδιώκουν την εύρεση της χρυσής τομής ανάμεσα στη συνολική καθυστέρηση συλλογής των πρωτογενών δεδομένων και στην προκαλούμενη επιβάρυνση των ραδιοπόρων. Οι αλγόριθμοι αυτοί βρίσκουν εφαρμογή σε συστήματα πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης κώδικα ή διαίρεσης χρόνου. Το κεφάλαιο παρέχει, για κάθε προτεινόμενο αλγόριθμο, την αναλυτική μοντελοποίηση του προβλήματος, τη μαθηματική περιγραφή της λύσης, καθώς και αποτελέσματα εφαρμογής.

Το τέταρτο κεφάλαιο ασχολείται με το στρώμα λήψης απόφασης και επικεντρώνεται στο πρόβλημα της εύρεσης της βέλτιστης επιλογής διαρθρώσεων, για τους γνωστικούς σταθμούς βάσης. Το κεφάλαιο περιλαμβάνει τη θεμελίωση και περιγραφή του προβλήματος, όπως και την εκτενή μαθηματική διατύπωση της προτεινόμενης λύσης. Η μέθοδος που προτείνεται λαμβάνει υπόψη της μια πλειάδα παραμέτρων εισόδου, συμπεριλαμβανομένων των δυνατοτήτων των διαφόρων υποψήφιων διαρθρώσεων, του αιτούμενου φορτίου κίνησης, της χωρικής κατανομής των χρηστών και του κόστους αναδιάρθρωσης, και παράγει ως έξοδο την ωφέλεια που προσφέρει κάθε πιθανός συνδυασμός διαρθρώσεων. Η αξιολόγηση των υποψήφιων διαρθρώσεων γίνεται επί τη βάσει πολλαπλών κριτηρίων, συμπεριλαμβανομένων των δυνητικών επιδόσεων ως προς το ποσοστό κάλυψης, τη χωρητικότητα χρηστών, τη χωρητικότητα μετάδοσης, την υποστήριξη κινητικότητας

και το κόστος. Σε αυτό το πλαίσιο, σχεδιάζεται και υλοποιείται μια πλατφόρμα διαχείρισης γνωστικών δικτύων, η οποία προσφέρει ένα πλήρες και φιλικό προς το χρήστη περιβάλλον καθορισμού των παραμέτρων και εκτέλεσης του αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Με τη βοήθεια του συγκεκριμένου εργαλείου, εξάγονται και μελετώνται εκτενή αποτελέσματα, τα οποία, εν συνεχεία, και συγκρίνονται με αντιπροσωπευτικές μεθόδους προκαθορισμένων πολιτικών διαχείρισης. Το πέμπτο κεφάλαιο αποτελεί συμπλήρωμα και επέκταση του προηγούμενου, καθώς εισάγει και ενσωματώνει μια νέα λειτουργία ευφυούς ιεράρχησης των κριτηρίων επίδοσης. Σκοπός είναι η εφαρμογή ενός μοντέλου ανίχνευσης και μάθησης των προτεραιοτήτων που πρέπει να δοθούν σε ορισμένα από τα κριτήρια επίδοσης των διαρθρώσεων έναντι άλλων. Η συγκεκριμένη λειτουργία υλοποιείται μέσω ενός νευρωνικού δικτύου το οποίο κατασκευάζεται για το σκοπό αυτό. Τέλος, το έκτο κεφάλαιο συνοψίζει το αντικείμενο της διατριβής, τις μελλοντικές επεκτάσεις και παρέχει μια λίστα σχετικών διεθνών δημοσιεύσεων του συγγραφέα.

1.7 Παραπομπές

- [1] 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.
- [2] S. Redl, M. Weber, and M. Oliphant, *An introduction to GSM*. Artech House Publishers, 1995.
- [3] “GSM Facts and Figures, Quarterly Statistics”, www.gsmworld.com.
- [4] H. Granbohm and J. Wiklund, “GPRS – General packet radio service”, *Ericsson Review*, vol. 6, no. 1, 1999.
- [5] R. Kalden, I. Meirick, and M. Meyer, “Wireless Internet access based on GPRS”, *IEEE Personal Communications*, vol. 7, no. 2, April 2000.
- [6] “The Evolution of Edge”, Ericsson White Paper, 285 23-3107 Uen Rev A, Feb. 2007.
- [7] “Third generation mobile systems in Europe”, Special issue in *IEEE Personal Communications*, vol. 5, no. 2, April 1998.
- [8] “Wideband CDMA”, Feature topic in *IEEE Communications Magazine*, vol. 36, no. 9, Sept. 1998.
- [9] “High Speed Downlink Packet Access”, TS 25.308, v. 8.2.0, 3GPP, May 2008.
- [10] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 802 LAN/MAN Standards Committee Web site, <http://www.ieee802.org>, 2005.
- [11] Digital Video Broadcasting Web site, <http://www.dvb.org>, June 2005.
- [12] M. Bargh, J. Laarhuis, and D. J. Plas, “A structured framework for federation between 4G service platforms”, *Proceedings of the 14th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications*, Sept. 2003.
- [13] M. Bargh, D. Bijwaard, H. Zandbelt, E. Meeuwissen, and A. Peddemors, “Mobility management in beyond 3G environments”, presented at the *9th WWRF Meeting*, Zurich, Switzerland, July 2003.
- [14] J-Z. Sun, J. Sauvola, and D. Howie, “Features in Future: 4G Visions from a Technical Perspective”, *Proceedings of the IEEE Global Communications Conference*, 2001.

- [15] J. van Bommel, H. Teunissen, D. J. Plas, and A. Peddemors, "A Reference Architecture for 4G Services", presented at the 7th *WWRP Meeting*, Eindhoven, The Netherlands, Dec. 2002.
- [16] IST project DAIDALOS (Designing Advanced Network Interfaces for the Delivery and Administration of Location Independent, Optimized Personal Services), www.ist-daidalos.org
- [17] IST project CREDO (Composite Radio and Enhanced service Delivery for the Olympics) web site, www.credo.nal.motlabs.com
- [18] IST project 4GPLUS (4th Generation Platform Launching Ubiquitous Services) web site, 4gplus.freeband.nl
- [19] E. Gustafsson, and A. Jonsson, "Always Best Connected", *IEEE Wireless Communications*, vol. 10, no. 1, pp. 49-55, Feb. 2003.
- [20] M. McHenry, "Frequency agile spectrum access technologies", in *FCC Workshop Cognitive Radio*, May 2003.
- [21] G. Staple and K. Werbach, "The end of spectrum scarcity", *IEEE Spectrum*, Vol. 41, No. 3, pp. 48-52, March 2004.
- [22] S. Haykin, "Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications", *IEEE JSAC*, Vol. 23, No. 2, pp. 201-220, Feb. 2005.
- [23] J. O'Daniell Neel, "Analysis and Design of Cognitive Radio Networks and Distributed Radio Resource Management Algorithms", Dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfilment of the requirements for the degree of PhD in Electrical Engineering, Blacksburg, VA, Sept. 2006.
- [24] M. McHenry, "NSF Spectrum Occupancy Measurements Project Summary", Shared Spectrum Company, Aug. 15, 2005.
- [25] J. Mitola, "Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio", Doctor of Technology, Royal Inst. Technol. (KTH), Stockholm, Sweden, 2000.
- [26] S. Haykin, "Cognitive radio: brain-empowered wireless communications", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 2, pp. 201-220, Feb. 2005.
- [27] C. Ramming, "Cognitive networks", *Proceedings of the DARPA Tech Symposium*, Anaheim, CA, USA, Mar. 2004.

- [28] 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.
- [29] D. Boscovic, "Cognitive networks", Motorola Technology Position Paper, 2005.
- [30] 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.
- [31] "Cognitive Radio Technologies and Software Defined Radios", ET Docket No. 03-108, FCC 07-66, vol. 72, no. 108, pp. 31190-31192, June 2007.
- [32] "Software Defined Radio in the Land Mobile Service", ITU-R WP8A Working document towards a PDN Report, document 8A/228-E, Sept. 2005.
- [33] IEEE Standards Coordinating Committee 41 (Dynamic Spectrum Access Networks), <http://www.scc41.org/>.
- [34] "SDRF Cognitive Radio Definitions", Working Document SDRF-06-R-0011-V1.0.0, Nov. 2007.
- [35] "Wireless Cooperative Networks", Special issue in *EURASIP Journal on Advances in Signal processing*, May 2008.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] M. A. McHenry, "National Science Spectrum Occupancy Measurements Project Summary", Shared Spectrum Company report, Aug. 2005.
- [40] B. Walke, P. Seidenberg, and M. P. Althoff, *UMTS – The Fundamentals*. New York: John Wiley, 2003.
- [41] 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.

- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] L. Hanzo, W. Webb, and T. Keller, *Single- and Multi-carrier Quadrature Amplitude Modulation*. New York: John Wiley, 1999.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] S. Gunaratne, P. Taaghool, and R. Tafazolli, “Signal quality estimation algorithm”, *Electronics Letters*, vol. 36, no. 22, pp.1882-1884, Oct. 2000.

- [53] 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.
- [54] X. Li and L. Wu, "Differential Demodulation of OFDM Based on SOM", in *International Conference on Natural Computation*, Changsha, China, pp. 468-475, 2005.
- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] "Cognitive Radio Technologies and Software Defined Radios", ET Docket No. 03-108, FCC 07-66, vol. 72, no. 108, pp. 31190-31192, June 2007.
- [60] "IBM Autonomic Computing manifesto", IBM, 2001.
- [61] Y. Wang, "The theoretical framework of cognitive informatics", *International Journal of Cognitive Informatics and Natural Intelligence*, vol. 1, no. 1, pp. 1-27, Jan. 2007.
- [62] Y. Wang, "Towards the theoretical foundations of autonomic computing", *International Journal of Cognitive Informatics and Natural Intelligence*, vol. 1, no. 3, June 2007.
- [63] "Pervasive Computing", IBM Systems Journal, vol. 38, no. 4, 1999.
- [64] F. Jensen, *An introduction to Bayesian Networks*, UCL Press, 1996.
- [65] 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.

- [66] J. Kephart and D. Chess, “The Vision of Autonomic Computing”, *IEEE Computer*, vol. 36, no. 1, pp. 41-50, Jan. 2003.
- [67] “Autonomic Computing-An architectural blueprint for autonomic computing”, IBM, 3rd edition, June 2005.
- [68] D. Ferguson, T. Storey, B. Lovering, and J. Shewchuk, “Secure, Reliable, Transacted Web Services”, IBM White paper, Oct. 2003.
- [69] J. Mitola, “Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio”, Doctor of Technology, Royal Inst. Technol. (KTH), Stockholm, Sweden, 2000.
- [70] J. Mitola, “Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications”, *Mobile Networks and Applications*, vol. 6, no. 5, pp. 435-441, Sept. 2001.
- [71] Java Community Process official web-site, <http://www.jcp.org>.
- [72] IST project MONASIDRE (Management of Networks and Services in a Diversified Radio Environment) web site, www.monasidre.com, Nov. 2002.
- [73] IST project CREDO (Composite Radio and Enhanced service Delivery for the Olympics) web site, www.credo.nal.motlabs.com, March 2004.
- [74] IST project DAIDALOS (Designing Advanced Network Interfaces for the Delivery and Administration of Location Independent, Optimized Personal Services) web site, www.ist-aidalos.org, June 2005.
- [75] Deliverable 211 of IST-2002-506997 DAIDALOS Project, “Requirements and architecture, including initial interface specifications”, April 2004.
- [76] Deliverable 221 of IST-2002-506997 DAIDALOS Project, “Detailed specifications including complete interface specifications”, Jan. 2005.
- [77] Deliverable 221 of IST-2002-506997 DAIDALOS Project, “Simulation Results”, June 2005.
- [78] O. Tirla, A. Koutsorodi, M. Theologou, “Terminal Controlled Access Network Selection in B3G Environments”, presented at the International Wireless Summit 2005, Aalborg, Denmark, Sept. 2005.
- [79] IST project 4GPLUS (4th Generation Platform Launching Ubiquitous Services) web site, 4gplus.freeband.nl, April 2004.
- [80] M. Bargh, H. Zandbelt, A. Peddemors, “Managing mobility with federating service platforms”, presented at the IST-EVOLUTE Workshop on “Beyond 3G Evolution of Systems and Services”, Guildford, UK, Nov. 2003.

- [81] M. Bargh, J. Laarhuis, D.-J. Plas, “A structured framework for federation between 4G service platforms”, in *Proceedings of the 14th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications*, Sept. 2003.
- [82] M. Bargh, D. Bijwaard, H. Zandbelt, E. Meeuwissen, A. Peddemors, “Mobility management in beyond 3G environments”, presented at the 9th WWRF Meeting in Zurich, Switzerland, July 2003.
- [83] G. Leijonhufvud, “Multi access networks and Always Best Connected, ABC”, in *MMC Workshop*, Berlin, Germany, Nov. 2001.
- [84] G. Fodor, A. Furuskar, and J. Lundsjo, “On access selection techniques in always best connected networks”, in *ITC Specialist Seminar on Performance Evaluation of Wireless and Mobile Systems*, Aug. 2004.
- [85] B. Xing and V. Nalini, “Multi-Constraint Dynamic Access Selection in Always Best Connected Networks”, *Mobi-Quitous '05*, pp. 56–64, 2005.
- [86] A. Baraev, L. Jorguseski, and R. Litjens, ”Performance Evaluation of Radio Access Selection Procedures in Multi-Radio Access Systems”, in *Proceedings of WPMC '05*, Aalborg, Denmark, 2005
- [87] J. P. Singh, T. Alpcan, P. Agrawal, and V. Sharma, “An optimal flow assignment framework for heterogeneous network access”, in *Proc. IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, Helsinki, Finland, Apr. 2007.
- [88] V. Gazis, N. Houssos, N. Alonistioti, and L. Merakos, “On the complexity of ‘always best connected’ in 4g mobile networks,” in *Vehicular Technology Conference*, vol. 4, Oct. 2003.
- [89] V. Gazis, N. Alonistioti, and L. Merakos, “Toward a Generic ‘Always Best Connected’ Capability in Integrated WLAN/UMTS Cellular Mobile Networks (and Beyond),” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 12, no. 3, pp. 20–29, 2005.
- [90] S. Martello and P. Toth, *Knapsack Problems: Algorithms and Computer Implementations*. John Wiley & Sons, 1990.
- [91] IST project E²R (End-to-End Reconfigurability), <http://e2r.motlabs.com/>.
- [92] IST project E²R2 (End-to-End Reconfigurability Phase II), <http://e2r2.motlabs.com/>.
- [93] IST project E3 (End-to-End Efficiency), <https://ict-e3.eu/>.
- [94] 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.

- [95] E. Patouni and N. Alonistioti, “A Towards Self-Configuring Protocols for Reconfigurable Systems”, Proceedings of the 13th ICT Conference, Madeira, Portugal, May 2006.
- [96] Defence Advanced Research Projects Agency (DARPA) – next Generation project, <http://www.darpa.mil/sto/smallunitops/xg.html>.
- [97] IST project Oracle (Opportunistic Radio Communications in Unlicensed Environments), <http://www.ist-oracle.org/>.
- [98] IST project Winner (Wireless World Initiative New Radio), <http://www.ist-winner.org/>.
- [99] IST project Surface (Self Configurable Air Interface), <http://www.ist-surface.org>.
- [100] IST project Phoenix (Jointly optimising multimedia transmissions in IP based wireless networks), <http://www.ist-phoenix.org>.
- [101] R. Agusti, O. Sallent, J. Pérez-Romero, and L. Giupponi, “A Fuzzy-Neural Based Approach for Joint Radio Resource Management in a Beyond 3G Framework”, *1st International Conference on Quality of Service in Heterogeneous Wired/Wireless Networks, Qshine'04*, Dallas, USA, Oct. 2004.
- [102] L. Giupponi, R. Agusti, J. Pérez-Romero, O. Sallent, J. Luo, “A Novel Radio Resource Management Solution in Beyond 3G Scenarios”, in *WWRP 14 Meeting*, San Diego, California, USA, July 2005.
- [103] L. Giupponi, R. Agusti, J. Pérez-Romero, O. Sallent, “Joint Radio Resource Management algorithm for Multi-RAT networks”, *IEEE Globecom*, San Luis, USA, Nov. 2005.
- [104] Z. Boufidis, M. Stamatelatos, N. Alonistioti, A. Delautre, M. Dillinger, “Actors, Management Plane, and Policy Provision Challenges for End-to-End Reconfiguration”, *E2R Workshop on Reconfigurable Mobile Systems and Networks Beyond 3G*, Barcelona, Spain, Sept. 2004.
- [105] E. Patouni, S. Gault, M. Muck, N. Alonistioti, and K. Kominaki, “Autonomic Communications: Exploiting Advanced and Game Theoretical Techniques for RAT Selection and Protocol Reconfiguration”, *Autonomic Networking: Lecture Notes in Computer Science*, pp. 268-284, Sept. 2006.
- [106] Z. Boufidis, N. Alonistioti, M. Stamatelatos, D. Bourse, K. El-Khazen, and M. Muck, “Evolution of the Reconfiguration Management Plane for Autonomic

Communications”, in *Proceedings of the 15th IST Mobile and Wireless Communications Summit*, Mykonos, Greece, June 06.

- [107] N. Alonistioti, A. Glentis, F. Foukalas, and A. Kaloxylos, “Reconfiguration Management Plane for the Support of Policy-based Network Reconfiguration”, *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC) Symposium*, Barcelona, Spain, Sept. 2004.
- [108] K. Moessner, S. Gultchev, and R. Tafazolli, “Software defined radio reconfiguration management”, *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, vol. 1, pp. 91-95, Sept. 2001.
- [109] K. Moessner, D. Bourse, D. Greifendorf, and J. Stammen, “Software radio and reconfiguration management”, *Computer Communications*, vol.26, no. 1, pp. 26-35, 2003.

Κεφάλαιο 2

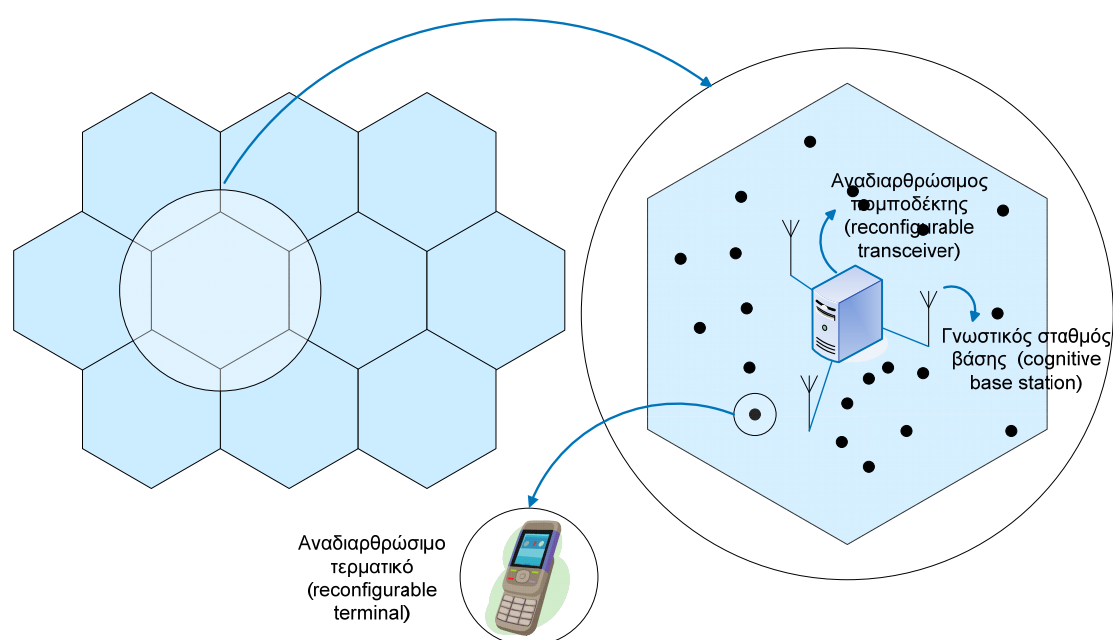
Δυνατότητες κλιμάκωσης της συλλογής επαισθητικών δεδομένων

2 Δυνατότητες κλιμάκωσης της συλλογής επαισθητικών δεδομένων

2.1 Η ανάγκη μελέτης της κλιμακωσιμότητας της λειτουργίας της επαίσθησης

2.1.1 Τοπολογία του εξεταζόμενου γνωστικού δικτύου

Η παρούσα διατριβή ασχολείται με μια τοπολογία γνωστικού δικτύου που έχει τη μορφή του σχήματος που ακολουθεί. Πρόκειται για μια κυψελωτή δικτυακή δομή, αποτελούμενη από γνωστικούς σταθμούς βάσης. Κάθε σταθμός βάσης παρακολουθεί τις συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή που εξυπηρετεί, τόσο στις χρησιμοποιούμενες ζώνες συχνοτήτων όσο και σε εναλλακτικές, αξιολογώντας τα δεδομένα που συγκεντρώνονται και αναπροσαρμόζοντας κατάλληλα τις παραμέτρους λειτουργίας του, με στόχο τη βελτιστοποίηση της ποιότητας της παρεχόμενης εξυπηρέτησης. Κάθε σταθμός βάσης μπορεί να είναι εξοπλισμένος με έναν ή περισσότερους πομποδέκτες και η εν λόγω αναπροσαρμογή υλοποιείται μέσω αναδιάρθρωσης των πομποδεκτών αυτών, δηλαδή μέσω μιας διαστρωματικής μεταβολής μέρους ή του συνόλου των παραμέτρων λειτουργίας τους.



Σχήμα 2-1. Υπό θεώρηση γνωστική δικτυακή τοπολογία

Οι πομποδέκτες με τους οποίους είναι εξοπλισμένος ένας γνωστικός σταθμός βάσης είναι λογισμικώς καθοριζόμενοι, δηλαδή η αναδιάρθρωσή τους υλοποιείται μέσω ενεργοποίησης και απενεργοποίησης των κατάλληλων συνιστωσών λογισμικού, κατά τα πρότυπα του SDR. Οι προσαρμόσιμες παράμετροι λειτουργίας, οι οποίες συναποτελούν μια πιθανή διάρθρωση της λειτουργίας του πομποδέκτη, είναι οι εξής:

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

Η πρώτη εξ αυτών των παραμέτρων υποδηλώνει την περιοχή των συχνοτήτων η οποία θα χρησιμοποιηθεί από τον πομποδέκτη. Οι υπόλοιπες παράμετροι καθορίζουν τη ραδιοδιεπαφή ή, αλλιώς, ασύρματη διεπαφή που θα χρησιμοποιηθεί εντός της συγκεκριμένης περιοχής συχνοτήτων. Η εύρεση της καταλληλότερης διάρθρωσης, δηλαδή του βέλτιστου συνδυασμού φάσματος συχνοτήτων και τύπου ραδιοδιεπαφής, αναλόγως των τρεχουσών συνθηκών και αναγκών, αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα βελτιστοποίησης, το οποίο παρουσιάζει εξαιρετικό ερευνητικό ενδιαφέρον και συνιστά κεντρικό αντικείμενο μελέτης της διατριβής.

Τα κινητά τερματικά του θεωρούμενου γνωστικού δικτύου είναι και αυτά αναδιαρθρώσιμα, διαθέτουν, δηλαδή, μία ή περισσότερες αναδιαρθρώσιμες δικτυακές διεπαφές. Οι διεπαφές αυτές ακολουθούν τις αναδιαρθρώσεις των πομποδεκτών του σταθμού βάσης από τον οποίο εξυπηρετείται το τερματικό.

Στη θεωρούμενη γνωστική δικτυακή τοπολογία, κάθε σταθμός βάσης λειτουργεί αυτόνομα, σύμφωνα με τις αρχές της αυτόνομης υπολογιστικής [1]-[6]. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι επιτελεί ο ίδιος τις απαιτούμενες γνωστικές λειτουργίες, χωρίς να λαμβάνει εντολές από ένα κεντρικό σύστημα διαχείρισης. Αυτή η δυνατότητα της «αυτο-διαχείρισης» προσδίδει μεγαλύτερη δυνατότητα κλιμάκωσης στο γνωστικό δίκτυο, αφού το πρόβλημα της διαχείρισης του συνολικού δικτύου επιμερίζεται σε μικρότερης πολυπλοκότητας προβλήματα διαχείρισης καθενός κελιού ξεχωριστά. Ταυτόχρονα, βέβαια, σε ένα τέτοιο μοντέλο διαχείρισης, εγείρονται και ζητήματα αναρμόνισης της παράλληλης λειτουργίας των αυτόνομων σταθμών βάσης. Τα

ζητήματα αυτά προκύπτουν από τη σύγκρουση «συμφερόντων» των σταθμών βάσης, αφού κάθε ένας αποσκοπεί στη μεγιστοποίηση του δικού του οφέλους, δηλαδή στη βελτιστοποίηση της εξυπηρέτησης των δικών του χρηστών. Τέτοιου είδους θέματα μπορούν να επιλυθούν:

- με την υιοθέτηση κανόνων και πολιτικών εύρυθμης λειτουργίας και
- με την εξασφάλιση της εγγενούς ροπής των αυτόνομων σταθμών βάσης προς την αποφυγή κατάχρησης των ραδιοπόρων

2.1.2 Η λειτουργία της επαίσθησης και το πρόβλημα της κλιμάκωσης

Σε ένα γνωστικό δίκτυο, όπως αυτό που μελετάται στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, η λειτουργία της επαίσθησης διαδραματίζει κεντρικό ρόλο. Στα πλαίσια της εν λόγω λειτουργίας, ένας γνωστικός σταθμός βάσης παρακολουθεί ανελλιπώς τις συνθήκες που διαμορφώνονται στο ραδιοπεριβάλλον του, ώστε να είναι ενήμερος για τις αλλαγές που συμβαίνουν και τις ευκαιρίες που παρουσιάζονται.

Προκειμένου η συνεχής και συστηματική αυτή παρακολούθηση να επιτευχθεί, ο γνωστικός σταθμός βάσης θα πρέπει να είναι σε θέση να διαισθάνεται όσα συμβαίνουν στο ραδιοπεριβάλλον του, σε όλα τα μήκη και πλάτη της επικράτειάς του, δηλαδή σε ολόκληρη τη γεωγραφική περιοχή που εξυπηρετεί. Κάτι τέτοιο είναι δυνατό μόνο μέσω της εγκατάστασης και εκμετάλλευσης ενός μεγάλου πλήθους κατανεμημένων αισθητήρων, ικανών να λαμβάνουν μετρήσεις σε μια μεγάλη περιοχή του φάσματος. Επειδή, ωστόσο, η δημιουργία μιας τέτοιας υποδομής σε κάθε κελί του γνωστικού δικτύου προϋποθέτει υψηλούς κόστους επενδύσεις, μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική επιλογή είναι η αξιοποίηση των ίδιων των κινητών τερματικών της περιοχής ως κατανεμημένων αισθητήρων επαίσθησης για λογαριασμό του σταθμού βάσης.

Σε αυτό το πνεύμα, ο γνωστικός σταθμός βάσης δίνει εντολές στα άεργα κινητά τερματικά της περιοχής να μετρήσουν τα τρέχοντα επίπεδα παρεμβολών σε συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων και, έπειτα, να αναφέρουν τα αποτελέσματα πίσω στο σταθμό βάσης. Εξειδικευμένη υποδομή για την επιτέλεση της λειτουργίας της επαίσθησης δε χρησιμοποιείται, παρά μόνο αξιοποιούνται τα άεργα τερματικά του κελιού, σε συνδυασμό με ένα πρωτόκολλο συνεννόησης μεταξύ του σταθμού και των τερματικών, για την αποστολή και λήψη των εντολών/αιτήσεων και των αναφορών. Άεργα θεωρούνται τα τερματικά στα οποία δε βρίσκεται σε εξέλιξη κάποια υπηρεσία,

είτε φωνής είτε δεδομένων, καθώς και εκείνα στα οποία υπάρχουν μεν εν εξελίξει υπηρεσίες, αλλά μία τουλάχιστον από τις διεπαφές που διαθέτουν είναι ανενεργή, δε χρησιμοποιείται, δηλαδή, για την παροχή υπηρεσιών. Οι συγκεντρωθείσες μετρήσεις γίνονται αντικείμενο επεξεργασίας από το σταθμό βάσης, με σκοπό τον εντοπισμό ζωνών συχνοτήτων που είναι υποχρησιμοποιούμενες, δηλαδή με αμελητέα ή σχετικά μικρή παρουσία παρεμβολών.

Τα τερματικά που λαμβάνουν μέρος σε μια τέτοια διαδικασία επαίσθησης, κατ' εντολή του σταθμού βάσης, οφείλουν να συντονίσουν προσωρινά μια από τις διεπαφές τους στην υπό εξέταση ζώνη συχνοτήτων, να εκτελέσουν τις μετρήσεις που απαιτείται (είτε απλώς μετρώντας την επικρατούσα θερμοκρασία παρεμβολών είτε με τη βοήθεια πιλοτικών σημάτων εκπεμπόμενων από το σταθμό βάσης) και, κατόπιν, να επανασυντονίσουν τη διεπαφή τους στην αρχική ζώνη συχνοτήτων (και, εν γένει, στην προ της επαίσθησης διάρθρωση) και να αποστείλουν στο σταθμό τα αποτελέσματα των μετρήσεων που εκτέλεσαν.

Όπως διαφαίνεται, σημαντική παράμετρος στην καινοτόμο διαδικασία υποστήριξης της λειτουργίας της επαίσθησης που μόλις περιγράφηκε είναι η αποστολή των δεδομένων επαίσθησης των τερματικών στο σταθμό βάσης, προς περαιτέρω επεξεργασία. Η αποστολή αυτή οφείλει να υλοποιείται στον ελάχιστο δυνατό χρόνο, αλλά και ταυτόχρονα με τον ελάχιστο δυνατό αντίκτυπο στους ραδιοπόρους του κελιού. Γενικότερα, η διαδικασία ενημέρωσης του σταθμού βάσης με τα δεδομένα επαίσθησης των τερματικών έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- κάνει χρήση των ζεύξεων ανόδου των τρεχουσών ραδιοδιεπαφών, χρησιμοποιώντας τους ίδιους ραδιοπόρους που αξιοποιούνται για την παροχή υπηρεσιών στους τελικούς χρήστες του κελιού
- λαμβάνει χώρα ανά τακτά χρονικά διαστήματα, αφού η παρακολούθηση των ραδιοσυνθηκών πρέπει να είναι, κατά το δυνατόν, αδιάλειπτη και οι προς εξέταση ζώνες συχνοτήτων ενδέχεται να είναι μεγάλες σε αριθμό
- στη διαδικασία ενδέχεται να συμμετέχει ένα μεγάλο πλήθος τερματικών, που μπορεί να αντιστοιχεί είτε σε μέρος είτε στο σύνολο των άεργων τερματικών του κελιού
- περιλαμβάνει την ταυτόχρονη αποστολή δεδομένων από τα συμμετέχοντα τερματικά

Από τα παραπάνω χαρακτηριστικά γίνεται φανερό ότι είναι απαραίτητη η μελέτη της κλιμακωσιμότητας της εν λόγω διαδικασίας, καθώς όσο περισσότερα τερματικά

συμμετέχουν σε μια διαδικασία ενημέρωσης του σταθμού βάσης, τόσο περισσότερο εμπλουτίζονται τα δεδομένα της επαίσθησης, αλλά και τόσο περισσότερο αυξάνεται η επιβάρυνση στους διαθέσιμους ραδιοπόρους στην κατεύθυνση της ανόδου. Αντίθετα, όσον αφορά την κατεύθυνση της καθόδου, η επίδραση στους διαθέσιμους ραδιοπόρους είναι σαφώς περιορισμένη, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα κανάλι ευρυεκπομπής για την έκδοση των εντολών/αιτήσεων επαίσθησης, αντί αποκλειστικών σημείου-προς-σημείο συνδέσεων.

Το αντικείμενο του παρόντος κεφαλαίου είναι η εξέταση και ανάλυση της δυνατότητας κλιμάκωσης της διαδικασίας της επαίσθησης στα μελλοντικά γνωστικά δίκτυα. Για το σκοπό αυτό, μελετάται η κλιμακωσιμότητα της διαδικασίας συγκέντρωσης των αναφορών για τις συνηθέστερες τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης. Πέραν τούτου, στο επόμενο κεφάλαιο, εισάγονται και προτείνονται τρεις καινοτόμες τεχνικές έμμεσου χρονοπρογραμματισμού της διαδικασίας ενημέρωσης, οι οποίες έχουν ως στόχο τον εντοπισμό της χρυσής τομής μεταξύ των δύο βασικών και αντικρουόμενων περιοριστικών παραμέτρων:

- της καθυστέρησης συγκέντρωσης των αναφορών και
- της επίδρασης στους διαθέσιμους ραδιοπόρους.

2.2 Μελέτη των δυνατοτήτων κλιμάκωσης

2.2.1 Γενικά

Στις παραγράφους που ακολουθούν, διεξάγεται μια ενδελεχής μελέτη της δυνατότητας κλιμάκωσης της λειτουργίας της επαίσθησης και, συγκεκριμένα, της διαδικασίας συλλογής των επαισθητικών δεδομένων. Συνολικά, εξετάζονται 5 διαφορετικά μοντέλα, καθένα από τα οποία αντιστοιχεί και σε ένα διαφορετικό τρόπο ασύρματης επικοινωνίας των τερματικών επαίσθησης με το γνωστικό σταθμό βάσης. Συγκεκριμένα, στο επίκεντρο της μελέτης βρίσκονται οι εξής τέσσερις τύποι ραδιοδιεπαφών:

- GERAN (GSM EDGE Radio Access Network), με χρήση της υπηρεσίας SMS (Short Message Service)
- GERAN (GSM EDGE Radio Access Network), με χρήση της υπηρεσίας GPRS (General Packet Radio Service)

- UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network)
- WLAN (Wireless Local Area Network) τύπου IEEE 802.11b

2.2.2 GERAN – SMS

2.2.2.1 Παράμετροι μοντέλου

Η πρώτη περίπτωση που εξετάζεται είναι η κλιμακωσιμότητα της διαδικασίας επαίσθησης όταν η ενημέρωση του γνωστικού σταθμού βάσης πραγματοποιείται από τα τερματικά μέσω διεπαφής τύπου GERAN και, συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας την Υπηρεσία Σύντομων Μηνυμάτων (Short Message Service, SMS).

Οι παράμετροι του αναλυτικού μοντέλου που χρησιμοποιείται είναι οι ακόλουθες:

- **N:** *Αριθμός τερματικών επαίσθησης στο κελί.* Η παράμετρος αυτή υποδεικνύει τον αριθμό των τερματικών που συμμετέχουν στην υπό μελέτη διαδικασία επαίσθησης.
- **r_{upd} :** *Ρυθμός ενημέρωσης του σταθμού βάσης.* Η παράμετρος αυτή αντιπροσωπεύει το μέσο ρυθμό ενημερώσεων του σταθμού βάσης, ανά τερματικό επαίσθησης, ανά ώρα.
- **$m_{\text{SMS/upd}}$:** *Απαιτούμενος αριθμός μηνυμάτων ανά μεμονωμένη ενημέρωση του σταθμού βάσης.* Επειδή το μέγεθος ενός SMS μηνύματος είναι περιορισμένο (140 bytes στις τυπικές υλοποιήσεις), ενδέχεται να απαιτούνται περισσότερα του ενός μηνύματα για την αποστολή μιας πλήρους αναφοράς επαίσθησης. Η συγκεκριμένη παράμετρος υποδεικνύει, λοιπόν, το μέσο αριθμό SMS μηνυμάτων που απαιτούνται για την αποστολή μιας πλήρους αναφοράς από ένα τερματικό. Η τιμή της εξαρτάται τόσο από το μέγεθος της αναφοράς όσο και από το πόσο συμπαγές είναι το σχήμα κωδικοποίησης των πληροφοριών που αυτή ενσωματώνει.
- **n_{SDCCH} :** *Αριθμός SDCCH καναλιών στο κελί.* Πρόκειται για μια σημαντική παράμετρο, αφού τα SDCCH κανάλια (Stand-alone Dedicated Control Channels – Ανεξάρτητοι Αποκλειστικοί Δίαυλοι Ελέγχου) του GERAN είναι υπεύθυνα, μεταξύ άλλων, για τη μετάδοση των SMS μηνυμάτων.
- **T_{SMS} :** *Χρόνος κατάληψης ενός SDCCH καναλιού από μια μεμονωμένη SMS σύνοδο.* Η συγκεκριμένη παράμετρος μετριέται σε δευτερόλεπτα.

2.2.2.2 Μέτρα κλιμακωσιμότητας

Τα μέτρα που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της δυνατότητας κλιμάκωσης της βασισμένης στο GERAN-SMS διαδικασίας επαίσθησης είναι τα ακόλουθα:

- **u_{sense} :** Βαθμός χρησιμοποίησης της χωρητικότητας του κελιού από τα τερματικά επαίσθησης.

Το εν λόγω μέτρο σχετίζεται με το ρυθμό ενημέρωσης του σταθμού βάσης από τα τερματικά επαίσθησης. Συγκεκριμένα, ο αριθμός των παραγόμενων λόγω επαίσθησης SMS μηνυμάτων, σε συνδυασμό με τον αριθμό των SMS μηνυμάτων που προέρχονται από την κανονική κίνηση των χρηστών, θα πρέπει να μην υπερβαίνει την ανά ώρα SMS χωρητικότητα του κελιού. Η εν λόγω χωρητικότητα εξαρτάται από τον αριθμό των SDCCH καναλιών του κελιού, n_{SDCCH} , καθώς και το χρόνο κατάληψης ενός SDCCH καναλιού από ένα SMS μήνυμα, T_{SMS} , και, με χρονική περίοδο αναφοράς τη μία ώρα (3600 sec), μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$Cell_Capacity_{SMS} = \frac{n_{SDCCH} \cdot 3600}{T_{SMS}} \quad (2.1)$$

Στις σημερινές υλοποιήσεις, η πρώτη εκ των δύο παραπάνω παραμέτρων, δηλαδή ο αριθμός των SDCCH καναλιών του κελιού, είτε τίθεται ίση με το διπλάσιο του αριθμού των φερόντων στο κελί είτε ίση με το ένα τρίτο ή ένα τέταρτο του αριθμού των καναλιών φωνής. Αυτό σημαίνει, για παράδειγμα, ότι, σε μια αστική περιοχή στην οποία χρησιμοποιούνται τέσσερα φέροντα ανά κελί, υπάρχουν οκτώ κανάλια SDCCH σε κάθε κελί. Αναφορικά με τη δεύτερη εκ των δύο παραμέτρων, δηλαδή τον απαιτούμενο χρόνο κατάληψης ενός SDCCH καναλιού, στα σύγχρονα συστήματα ο χρόνος αυτός είναι πολύ μικρός, της τάξεως του ενός δευτερολέπτου, μπορεί, όμως, στις χειρότερες δυνατές περιπτώσεις να φτάσει τα τέσσερα δευτερόλεπτα [7]-[8].

Ο μέσος, ανά ώρα, ρυθμός παραγωγής SMS μηνυμάτων λόγω επαίσθησης μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης, N , του ρυθμού ενημέρωσης του σταθμού βάσης, r_{upd} , και του απαιτούμενου αριθμού μηνυμάτων ανά μεμονωμένη ενημέρωση του σταθμού βάσης, $m_{SMS/upd}$, ως εξής:

$$R_{SMS,Sense} = N \cdot m_{SMS/upd} \cdot r_{upd} \quad (2.2)$$

Ο βαθμός χρησιμοποίησης, u_{sense} , ορίζεται ως ο λόγος του μέσου ρυθμού παραγωγής SMS μηνυμάτων λόγω επαίσθησης προς την ανά ώρα SMS χωρητικότητα του κελιού, δηλαδή:

$$u_{sense} = \frac{R_{SMS,Sense}}{Cell_Capacity_{SMS}} \quad (2.3)$$

Με τη βοήθεια των (2.1), (2.2), η (2.3) γίνεται:

$$u_{sense} = \frac{N \cdot m_{SMS/upd} \cdot r_{upd} \cdot T_{SMS}}{3600 \cdot n_{SDCCH}} \quad (2.4)$$

Όσο μικρότερος είναι ο βαθμός χρησιμοποίησης, u_{sense} , από τα τερματικά επαίσθησης, τόσο μικρότερη είναι η δέσμευση ραδιοπόρων από αυτά και, συνεπώς, τόσο μεγαλύτερες οι δυνατότητες κλιμάκωσης, χωρίς να προκαλείται σημαντικός αντίκτυπος στην εξυπηρέτηση της κανονικής κίνησης.

- **T:** *Συνολική καθυστέρηση συλλογής των αναφορών.*

Πρόκειται για ένα ιδιαίτερα σημαντικό μέτρο κλιμακωσιμότητας, καθώς εκφράζει το συνολικό χρόνο που πρέπει να περιμένει ο γνωστικός σταθμός βάσης, προκειμένου να έχει στη διάθεσή του τα δεδομένα επαίσθησης όλων των τερματικών. Όσο πιο μικρή αυτή η καθυστέρηση, τόσο γρηγορότερα μπορεί να ξεκινήσει η επεξεργασία των επαισθητικών δεδομένων.

Σε όσα ακολουθούν, λαμβάνονται τα εξής επίπεδα αναφοράς για τη σύγκριση των διαφόρων περιπτώσεων ενός σεναρίου:

- Θεωρείται πλήρως ικανοποιητική μια συνολική καθυστέρηση της τάξεως των 10 δευτερολέπτων, πολύ ικανοποιητική εκείνη που δεν υπερβαίνει τα 20 δευτερόλεπτα και αρκετά ικανοποιητική αν είναι μικρότερη από 30 δευτερόλεπτα. Ανεκτή, αλλά βέβαια λιγότερο ικανοποιητική, παραμένει μια καθυστέρηση που δεν ξεπερνά το όριο των 60 δευτερολέπτων, ενώ ανεπιθύμητη είναι μια καθυστέρηση μεγαλύτερη των 60 δευτερολέπτων.
- Επιθυμητό είναι ταυτόχρονα ο βαθμός χρησιμοποίησης να μην υπερβαίνει το όριο του 10%, ώστε το μεγαλύτερο ποσοστό των πόρων του δικτύου να είναι διαθέσιμο για την εξυπηρέτηση της κανονικής κίνησης των χρηστών.

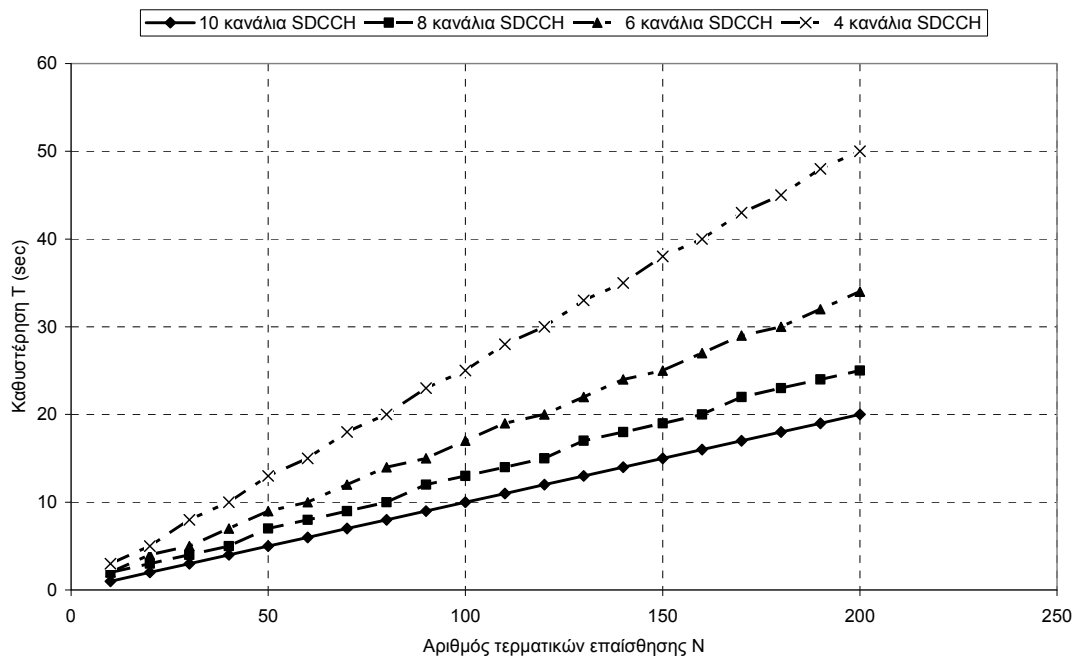
Όσο μικρότερος εμφανίζεται ο βαθμός χρησιμοποίησης, τόσο μεγαλύτερες είναι οι δυνατότητες κλιμάκωσης.

2.2.2.3 Σενάριο 1 – Κλιμακωσιμότητα συναρτήσεως του αριθμού των SDCCH καναλιών

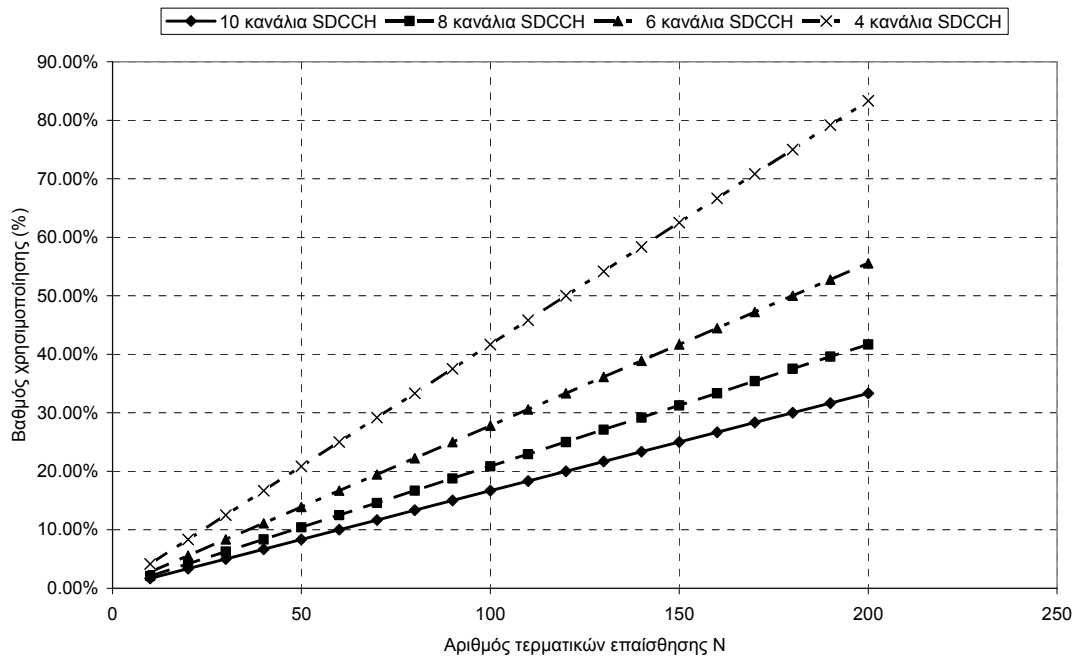
Το παρόν σενάριο στοχεύει στη μελέτη της κλιμακωσιμότητας, συναρτήσεως του αριθμού των διαθέσιμων στο κελί καναλιών SDCCH, n_{SDCCH} , καθώς αυξάνεται ο αριθμός των τερματικών επαίσεθης, N . Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου που χρησιμοποιείται στο σενάριο αυτό έχουν ως εξής:

- $N = \{10, 20, \dots, 200\}$ τερματικά επαίσεθης
- $r_{upd} = 60$ ενημερώσεις ανά τερματικό ανά ώρα
- $m_{SMS/upd} = 1$ μήνυμα SMS ανά ενημέρωση
- $n_{SDCCH} = \{4, 6, 8, 10\}$ κανάλια SDCCH
- $T_{SMS} = 1$ sec

Τα αποτελέσματα εκτέλεσης του σεναρίου παρατίθενται στα σχήματα που ακολουθούν.



Σχήμα 2-2. Η καθυστέρηση T συναρτήσεως του αριθμού των τερματικών επαίσεθης N, για διάφορες τιμές του αριθμού των διαθέσιμων στο κελί καναλιών SDCCH



Σχήμα 2-3. Ο βαθμός χρησιμοποίησης u_{sense} συναρτῆσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για διάφορες τιμές του αριθμού των διαθέσιμων στο κελί καναλιών SDCCH

Το Σχήμα 2-2 και το Σχήμα 2-3 αποτελούν, αντίστοιχα, γραφικές παραστάσεις της καθυστέρησης T και του βαθμού χρησιμοποίησης u_{sense} , συναρτῆσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για διάφορες τιμές του αριθμού των διαθέσιμων στο κελί καναλιών SDCCH. Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, για μεγάλο αριθμό διαθέσιμων καναλιών SDCCH (8 ή 10), οι δυνατότητες κλιμάκωσης (ειδικά ως προς το βαθμό χρησιμοποίησης) δεν υπερβαίνουν το επίπεδο των 50 τερματικών επαίσθησης. Για μικρότερο αριθμό διαθέσιμων καναλιών SDCCH (κάτω από 8) είναι ακόμα μικρότερες και μπορεί να πέσουν μέχρι και στο επίπεδο των 20 τερματικών επαίσθησης.

2.2.2.4 Σενάριο 2 – Κλιμακωσιμότητα συναρτῆσει του χρόνου κατάληψης ενός SDCCH καναλιού

Το παρόν σενάριο στοχεύει στη μελέτη της κλιμακωσιμότητας, συναρτῆσει του χρόνου κατάληψης ενός καναλιού SDCCH από μια μεμονωμένη SMS σύνοδο, T_{SMS} , καθώς αυξάνεται ο αριθμός των τερματικών επαίσθησης, N . Η μελέτη διεξάγεται για τις δύο πλέον τυπικές τιμές του αριθμού των διαθέσιμων SDCCH καναλιών και, συγκεκριμένα, για $n_{SDCCH}=8$ και $n_{SDCCH}=6$, που αποτελούν και τις δύο «μέσες»

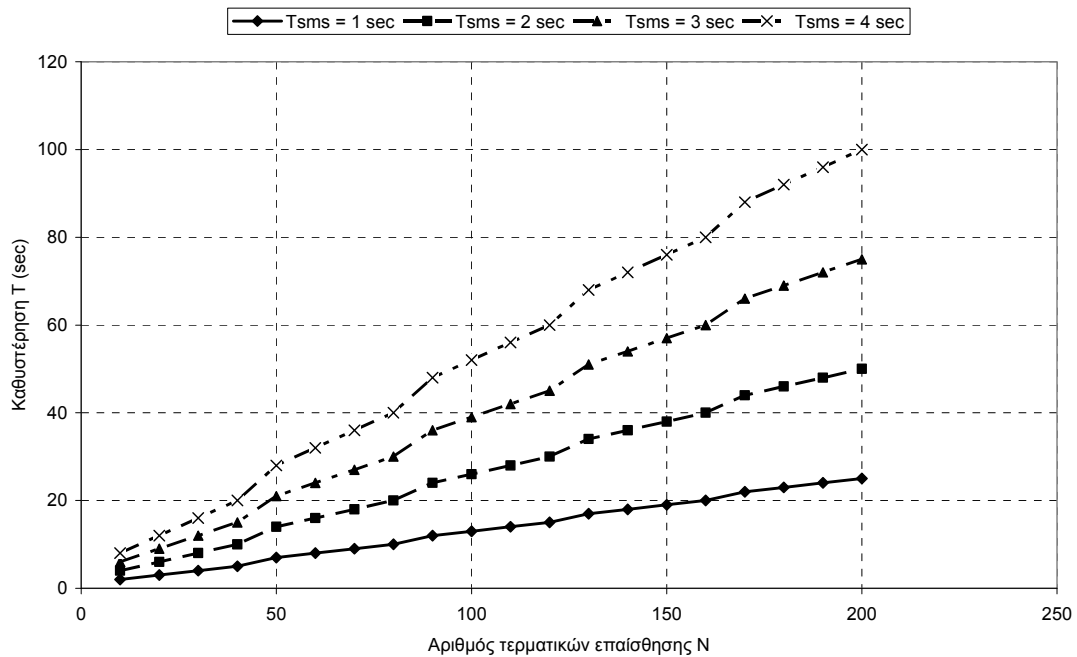
περιπτώσεις του Σεναρίου 1. Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου που χρησιμοποιείται στο σενάριο αυτό έχουν ως εξής:

- $N = \{10, 20, \dots, 200\}$ τερματικά επαίσθησης
- $r_{\text{upd}} = 60$ ενημερώσεις ανά τερματικό ανά ώρα
- $m_{\text{SMS/upd}} = 1$ μήνυμα SMS ανά ενημέρωση
- $n_{\text{SDCCH}} = \{6, 8\}$ κανάλια SDCCH
- $T_{\text{SMS}} = \{1, 2, 3, 4\}$ sec

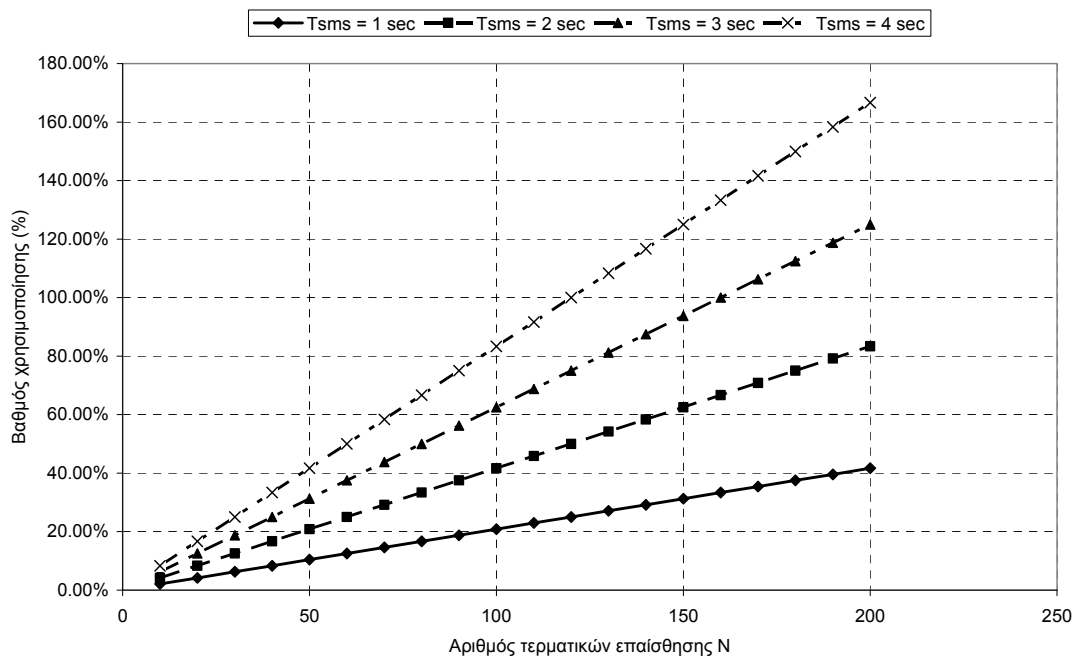
Τα αποτελέσματα εκτέλεσης του σεναρίου παρατίθενται στα σχήματα που ακολουθούν.

Το Σχήμα 2-4 και το Σχήμα 2-5 αποτελούν, αντίστοιχα, γραφικές παραστάσεις της καθυστέρησης T και του βαθμού χρησιμοποίησης u_{sense} , συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για διάφορες τιμές του χρόνου κατάληψης ενός καναλιού SDCCH, θεωρώντας ότι ο συνολικός αριθμός των διαθέσιμων καναλιών SDCCH στο κελί είναι ίσος με $n_{\text{SDCCH}}=8$. Το ίδιο ισχύει και για το Σχήμα 2-6 και το Σχήμα 2-7, με τη διαφορά ότι ο αριθμός των διαθέσιμων καναλιών SDCCH στο κελί είναι ίσος με $n_{\text{SDCCH}}=6$. Όπως εύκολα διαπιστώνεται, τόσο η καθυστέρηση T όσο και ο βαθμός χρησιμοποίησης αυξάνονται με την αύξηση του χρόνου κατάληψης. Αυτό συμβαίνει, γιατί μεγαλώνει ο χρόνος που μεσολαβεί έως ότου μια SMS σύνοδος απελευθερώσει το κανάλι που καταλαμβάνει, προκειμένου να εξυπηρετηθεί η επόμενη SMS σύνοδος.

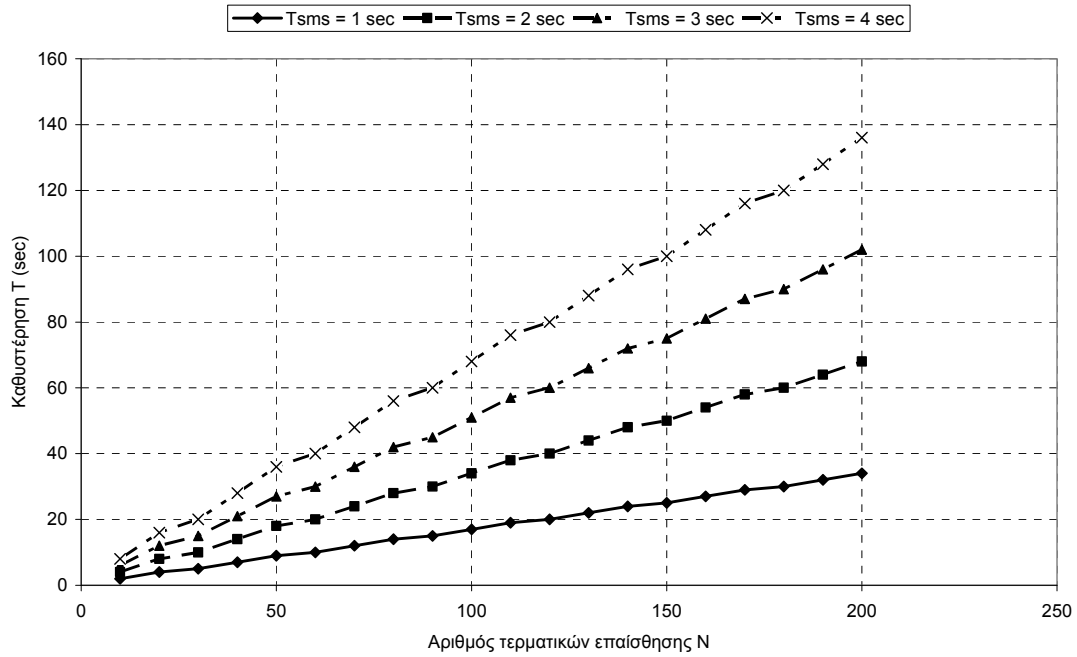
Όπως μπορεί να συναχθεί βάσει των παραπάνω αποτελεσμάτων, από τη σκοπιά της παρατηρούμενης συνολικής καθυστέρησης T , το σύστημα δεν μπορεί να υπερβεί το επίπεδο των 100 τερματικών, όταν ο χρόνος κατάληψης ενός καναλιού SDCCH λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του. Από τη σκοπιά του παρατηρούμενου βαθμού χρησιμοποίησης, οι δυνατότητες κλιμάκωσης είναι ακόμη μικρότερες και, μάλιστα, στη χειρότερη περίπτωση δεν μπορούν να ξεπεράσουν το επίπεδο των 10 τερματικών επαίσθησης.



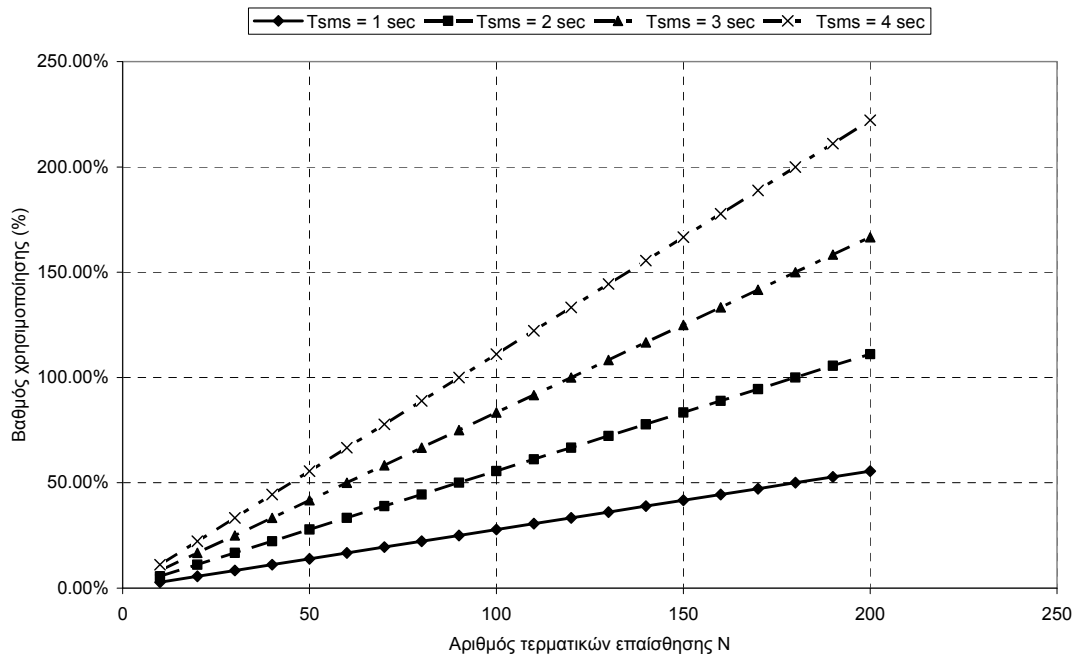
Σχήμα 2-4. Η καθυστέρηση T συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για διάφορες τιμές του χρόνου κατάληψης ενός καναλιού SDCCH, όταν $n_{SDCCH}=8$



Σχήμα 2-5. Ο βαθμός χρησιμοποίησης u_{sense} συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για διάφορες τιμές του χρόνου κατάληψης ενός καναλιού SDCCH, όταν $n_{SDCCH}=8$



Σχήμα 2-6. Η καθυστέρηση T συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για διάφορες τιμές του χρόνου κατάληψης ενός καναλιού SDCCH, όταν $n_{SDCCH}=6$



Σχήμα 2-7. Ο βαθμός χρησιμοποίησης u_{sense} συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για διάφορες τιμές του χρόνου κατάληψης ενός καναλιού SDCCH, όταν $n_{SDCCH}=6$

2.2.2.5 Σενάριο 3 – Κλιμακωσιμότητα συναρτήσεως του μεγέθους της αναφοράς

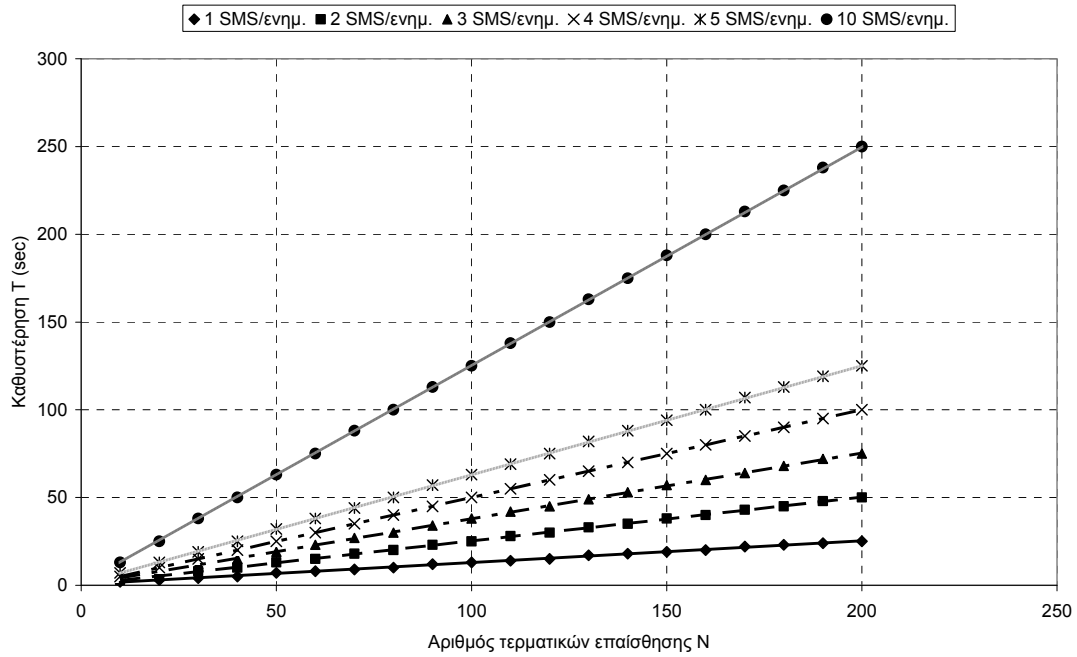
Το παρόν σενάριο στοχεύει στη μελέτη της κλιμακωσιμότητας, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των τερματικών επαίσθησης, N , συναρτήσεως του μεγέθους της αναφοράς, η οποία εκφράζεται μέσω του απαιτούμενου αριθμού SMS μηνυμάτων ανά μεμονωμένη αναφορά, $m_{SMS/upd}$. Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου που χρησιμοποιείται στο σενάριο αυτό έχουν ως εξής:

- $N = \{10, 20, \dots, 200\}$ τερματικά επαίσθησης
- $r_{upd} = 60$ ενημερώσεις ανά τερματικό ανά ώρα
- $m_{SMS/upd} = \{1, 2, 3, 4, 5, 10\}$ μηνύματα SMS ανά ενημέρωση
- $n_{SDCCH} = \{6, 8\}$ κανάλια SDCCH
- $T_{SMS} = 1$ sec

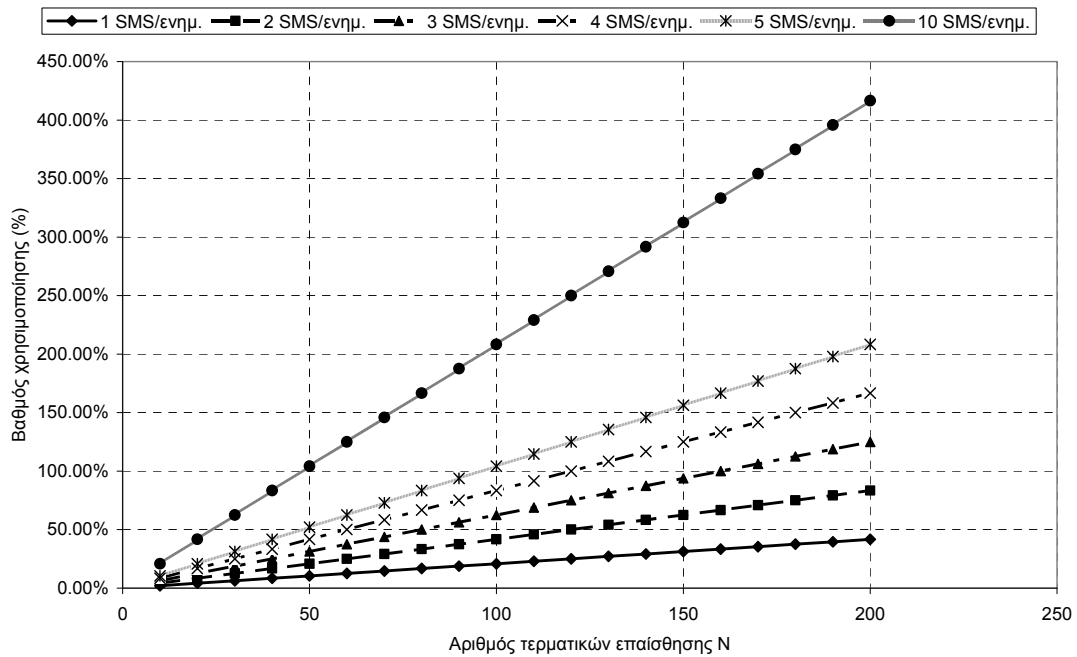
Τα αποτελέσματα εκτέλεσης του σεναρίου παρατίθενται στα σχήματα που ακολουθούν.

Το Σχήμα 2-8 και το Σχήμα 2-9 αποτελούν, αντίστοιχα, γραφικές παραστάσεις της καθυστέρησης T και του βαθμού χρησιμοποίησης u_{sense} , συναρτήσεως του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για διάφορα μεγέθη αναφορών, θεωρώντας ότι ο συνολικός αριθμός των διαθέσιμων καναλιών SDCCH στο κελί είναι ίσος με $n_{SDCCH}=8$. Το ίδιο ισχύει και για το Σχήμα 2-10 και το Σχήμα 2-11, με τη διαφορά ότι ο αριθμός των διαθέσιμων καναλιών SDCCH στο κελί είναι ίσος με $n_{SDCCH}=6$. Όπως είναι αναμενόμενο, τόσο η καθυστέρηση T όσο και ο βαθμός χρησιμοποίησης αυξάνονται με την αύξηση του μεγέθους της αναφοράς. Αυτό συμβαίνει, γιατί όσο μεγαλύτερη είναι η αναφορά ενός τερματικού προς το σταθμό βάσης, τόσο περισσότερα SMS μηνύματα χρειάζονται για τη μετάδοσή της.

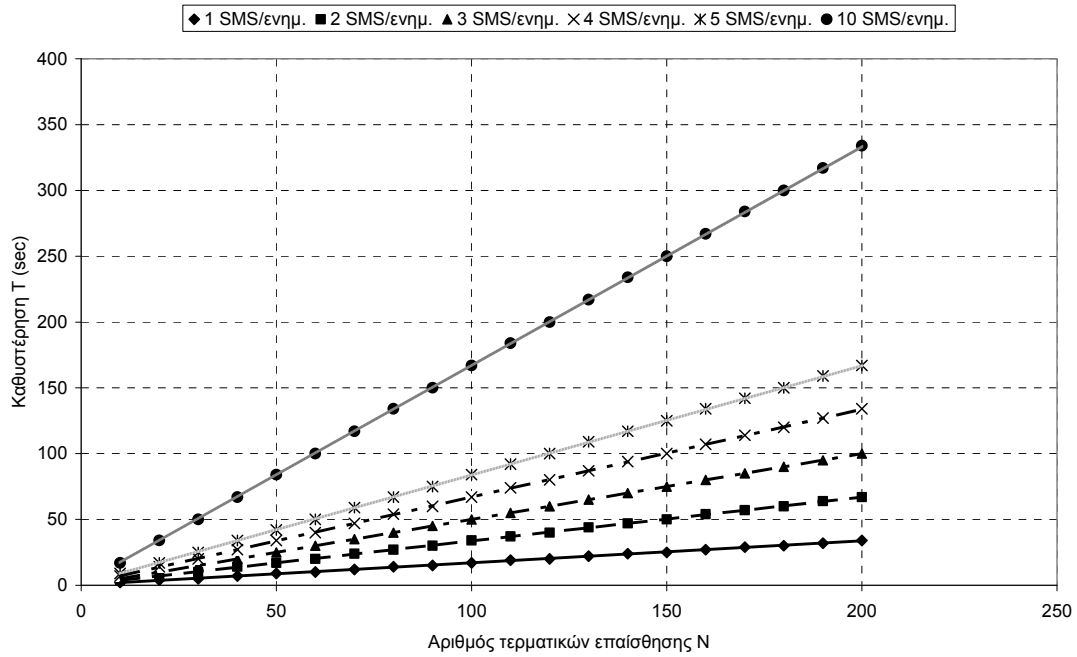
Όπως μπορεί να συναχθεί βάσει των παραπάνω αποτελεσμάτων, όταν το μέσο μέγεθος των αναφορών επαίσθησης υπερβαίνει το 1 SMS/ενημ., τότε εμφανίζονται σημαντικές δυσκολίες ως προς τη δυνατότητα κλιμάκωσης. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το πλήθος των τερματικών επαίσθησης πρέπει να διατηρηθεί σε πολύ χαμηλά επίπεδα, ακόμα και κάτω των 10.



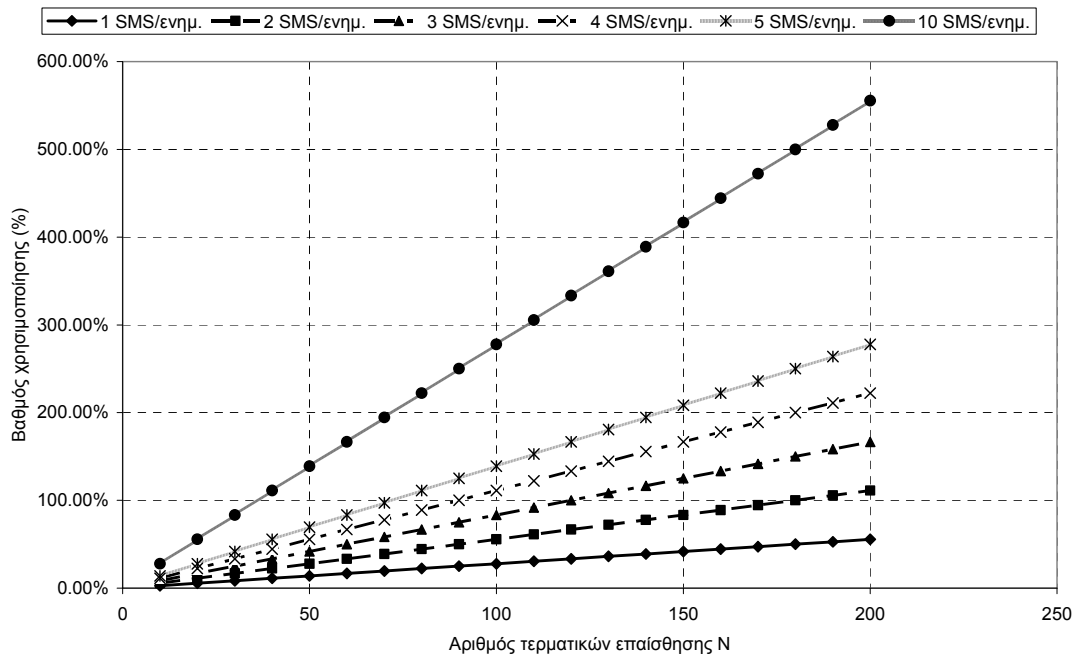
Σχήμα 2-8. Η καθυστέρηση T συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσησης N, για διάφορα μεγέθη αναφορών, όταν $n_{SDCCH}=8$



Σχήμα 2-9. Ο βαθμός χρησιμοποίησης u_{sense} συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσησης N, για διάφορα μεγέθη αναφορών, όταν $n_{SDCCH}=8$



Σχήμα 2-10. Η καθυστέρηση T συναρτῆσει του αριθμού των τερματικών επαίσησης N, για διάφορα μεγέθη αναφορών, όταν $n_{SDCCH}=6$



Σχήμα 2-11. Ο βαθμός χρησιμοποίησης u_{sense} συναρτῆσει του αριθμού των τερματικών επαίσησης N, για διάφορα μεγέθη αναφορών, όταν $n_{SDCCH}=6$

2.2.2.6 Σενάριο 4 – Κλιμακωσιμότητα συναρτήσεως του ρυθμού ενημέρωσης

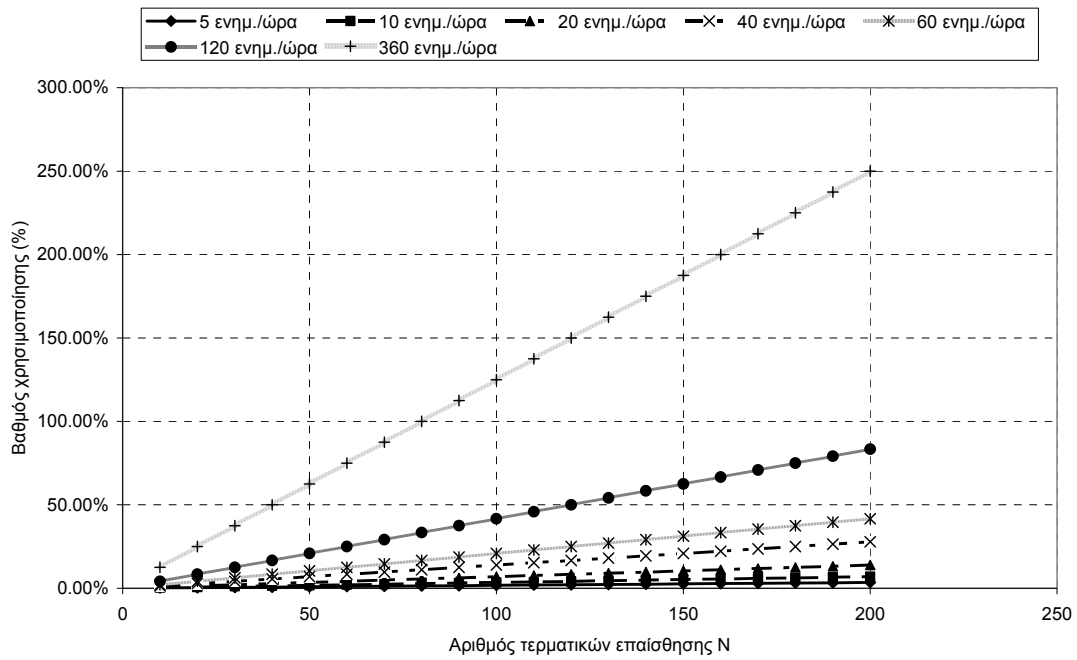
Το παρόν σενάριο στοχεύει στη μελέτη της κλιμακωσιμότητας, συναρτήσεως του ρυθμού ενημέρωσης του σταθμού βάσης, r_{upd} , καθώς αυξάνεται ο αριθμός των τερματικών επαίσεθης, N . Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου που χρησιμοποιείται στο σενάριο αυτό έχουν ως εξής:

- $N = \{10, 20, \dots, 200\}$ τερματικά επαίσεθης
- $r_{upd} = \{5, 10, 20, 40, 60, 120, 360\}$ ενημερώσεις ανά τερματικό ανά ώρα
- $m_{SMS/upd} = 1$ μήνυμα SMS ανά ενημέρωση
- $n_{SDCCH} = \{6, 8\}$ κανάλια SDCCH
- $T_{SMS} = 1$ sec

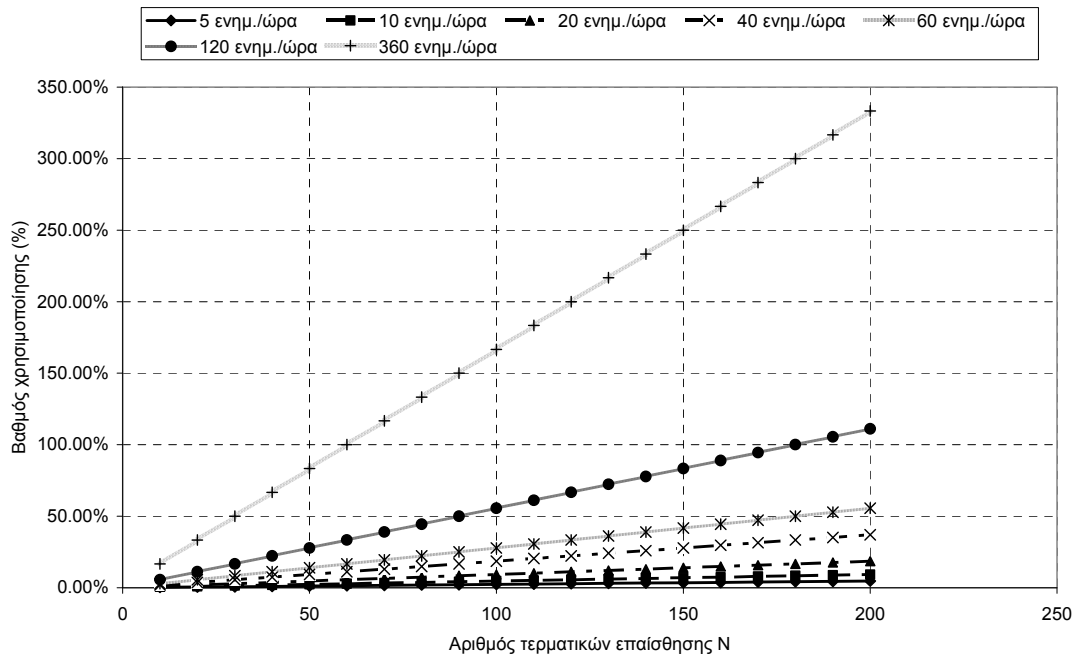
Τα αποτελέσματα εκτέλεσης του σεναρίου παρατίθενται στα σχήματα που ακολουθούν.

Το Σχήμα 2-12 και το Σχήμα 2-13 αποτελούν γραφικές παραστάσεις του βαθμού χρησιμοποίησης u_{sense} , συναρτήσεως του αριθμού των τερματικών επαίσεθης N , για διάφορες τιμές του ρυθμού ενημέρωσης του σταθμού βάσης, όταν ο συνολικός αριθμός των διαθέσιμων καναλιών SDCCH στο κελί είναι ίσος με $n_{SDCCH}=8$ και $n_{SDCCH}=6$, αντίστοιχα. Όπως είναι αναμενόμενο, ο βαθμός χρησιμοποίησης αυξάνεται με την αύξηση του ρυθμού ενημέρωσης. Αυτό συμβαίνει, γιατί όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός ενημέρωσης, τόσο συχνότερα αποστέλλονται αναφορές από τα τερματικά προς το σταθμό βάσης.

Όπως μπορεί να συναχθεί βάσει των παραπάνω αποτελεσμάτων, υπάρχει έντονη υποβάθμιση των δυνατοτήτων κλιμάκωσης όταν η συχνότητα των ενημερώσεων αυξάνει. Για μεγάλη συχνότητα ενημερώσεων του σταθμού βάσης, ο αριθμός των τερματικών επαίσεθης πρέπει να περιοριστεί σε πολύ χαμηλά επίπεδα, κάτω των 10 τερματικών, ειδάλως παρατηρείται κορεσμός ως προς το βαθμό χρησιμοποίησης του συστήματος και δε μένουν αρκετοί πόροι διαθέσιμοι για την εξυπηρέτηση της κανονικής κίνησης.



Σχήμα 2-12. Ο βαθμός χρησιμοποίησης u_{sense} συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N, για διάφορες τιμές του ρυθμού ενημέρωσης του σταθμού βάσης, όταν $n_{SDCCCH}=8$



Σχήμα 2-13. Ο βαθμός χρησιμοποίησης u_{sense} συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N, για διάφορες τιμές του ρυθμού ενημέρωσης του σταθμού βάσης, όταν $n_{SDCCCH}=6$

2.2.3 GERAN – GPRS

2.2.3.1 Παράμετροι μοντέλου

Η δεύτερη περίπτωση που εξετάζεται είναι η κλιμακωσιμότητα της διαδικασίας επαίσθησης όταν η ενημέρωση του γνωστικού σταθμού βάσης πραγματοποιείται από τα τερματικά μέσω διεπαφής τύπου GERAN και, συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας την υπηρεσία GPRS (General Packet Radio Service).

Οι παράμετροι του αναλυτικού μοντέλου που χρησιμοποιείται είναι οι ακόλουθες:

- **N:** Αριθμός τερματικών επαίσθησης στο κελί. Η παράμετρος αυτή υποδεικνύει τον αριθμό των τερματικών που συμμετέχουν στην υπό μελέτη διαδικασία επαίσθησης.
- **r_{upd} :** Ρυθμός ενημέρωσης του σταθμού βάσης. Η παράμετρος αυτή αντιπροσωπεύει το μέσο ρυθμό ενημερώσεων του σταθμού βάσης, ανά τερματικό επαίσθησης, ανά ώρα.
- **L_{msg} :** Μέγεθος μηνύματος αναφοράς. Πρόκειται για το μέσο μέγεθος σε bytes ενός μηνύματος αναφοράς επαίσθησης.
- **n_{PDCH} :** Αριθμός PDCH καναλιών στο κελί. Πρόκειται για μια σημαντική παράμετρο, αφού μέσα από τα κανάλια PDCH (Packet Data Channels – Δίαυλοι Πακέτων Δεδομένων) γίνεται η μετάδοση των GPRS δεδομένων.
- **a_{PDCH} :** Διαθεσιμότητα καναλιού PDCH για τη μεταφορά δεδομένων επαίσθησης. Υποδηλώνει το ανώτατο επιτρεπόμενο ποσοστό χρήσης ενός PDCH καναλιού για την αποστολή δεδομένων επαίσθησης. Αυτό σημαίνει ότι τα τερματικά επαίσθησης μπορούν να αξιοποιούν ένα διαθέσιμο PDCH κανάλι μόνο σε ποσοστό a_{PDCH} , όπου $a_{\text{PDCH}} \in [0,1]$. Το υπόλοιπο ποσοστό είναι αποκλειστικά διαθέσιμο για την εξυπηρέτηση κανονικής κίνησης. Η συγκεκριμένη παράμετρος βοηθά την επικέντρωση της μελέτης στις δυσμενέστερες περιπτώσεις που μπορούν να προκύψουν.
- **R_{PDCH} :** Μέσος ρυθμός δεδομένων καναλιού PDCH ανά χρονοσχισμή. Πρόκειται για τη μέση ταχύτητα δεδομένων χρήστη (σε bit/sec) που παρέχει ένα διαθέσιμο κανάλι PDCH, ανά χρονοσχισμή. Στο GERAN, υπάρχουν 8 χρονοσχισμές ανά κανάλι.

2.2.3.2 Μέτρα κλιμακωσιμότητας

Τα μέτρα που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της δυνατότητας κλιμάκωσης της βασισμένης στο GERAN-GPRS διαδικασίας επαίσθησης είναι τα ακόλουθα:

- u_{sense} : Βαθμός χρησιμοποίησης της χωρητικότητας των PDCH καναλιών από τα τερματικά επαίσθησης.

Το εν λόγω μέτρο σχετίζεται με το ρυθμό ενημέρωσης του σταθμού βάσης από τα τερματικά επαίσθησης. Συγκεκριμένα, ο ρυθμός των παραγόμενων λόγω επαίσθησης μηνυμάτων, σε συνδυασμό με ρυθμό δεδομένων κανονικής κίνησης, θα πρέπει να μην υπερβαίνει την ανά ώρα συνολική χωρητικότητα των PDCH καναλιών του κελιού. Η εν λόγω χωρητικότητα εξαρτάται από τον αριθμό των PDCH καναλιών του κελιού, n_{PDCH} , καθώς και από το μέσο προσφερόμενο ανά χρονοσχισμή ρυθμό δεδομένων ενός PDCH καναλιού, R_{PDCH} . Αφού στο GERAN υπάρχουν 8 χρονοσχισμές ανά κανάλι και λαμβάνοντας ως χρονική περίοδο αναφοράς τη μία ώρα (3600 sec), ο βαθμός χρησιμοποίησης u_{sense} μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$u_{sense} = \frac{8 \cdot r_{upd} \cdot L_{msg} \cdot N}{3600 \cdot R_{PDCH} \cdot 8 \cdot n_{PDCH}} \Rightarrow$$
$$u_{sense} = \frac{r_{upd} \cdot L_{msg} \cdot N}{3600 \cdot R_{PDCH} \cdot n_{PDCH}} \quad (2.5)$$

Όσο μικρότερος είναι ο βαθμός χρησιμοποίησης, u_{sense} , από τα τερματικά επαίσθησης, τόσο μικρότερη είναι η δέσμευση ραδιοπόρων από αυτά και, συνεπώς, τόσο μεγαλύτερες οι δυνατότητες κλιμάκωσης, χωρίς να προκαλείται σημαντικός αντίκτυπος στην εξυπηρέτηση της κανονικής κίνησης

Η μέση ταχύτητα R_{PDCH} στη σχέση (2.5) προσδιορίζεται βάσει της ακόλουθης μεθόδου: Στο GERAN ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων είναι 9.6 Kbps ανά χρονοσχισμή. Στο GPRS τα δεδομένα οργανώνονται σε πακέτα, κάτι που οδηγεί σε έναν ακόμα χαμηλότερο ρυθμό δεδομένων των 9.05 Kbps, εκ των οποίων μόνο τα 8 Kbps είναι διαθέσιμα για το χρήστη. Ωστόσο, η κωδικοποίηση καναλιού που χρησιμοποιείται μπορεί να προσαρμοστεί ανάλογα με την ποιότητα του ραδιοκαναλιού, ώστε ο τελικός ρυθμός δεδομένων να βελτιωθεί. Συγκεκριμένα, το

GPRS υποστηρίζει 4 σχήματα κωδικοποίησης, οι προσφερόμενοι ρυθμοί μετάδοσης των οποίων παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 2-1. Σχήματα κωδικοποίησης στο GPRS

Coding Scheme	Gross bit rate (Kbps)	User bit rate (Kbps)
CS-1	9.05	8
CS-2	13.4	12
CS-3	15.6	14.4
CS-4	21.4	20

Χρησιμοποιώντας το λιγότερο εύρωστο αλλά και ταχύτερο σχήμα κωδικοποίησης CS-4, επιτυγχάνεται ρυθμός μετάδοσης δεδομένων χρήστη της τάξεως των 20.0 Kbit/sec ανά χρονοσχισμή. Από την άλλη, ωστόσο, η χρήση του CS-4 επιτυγχάνει κάλυψη κελιού ίση με το 25% της κανονικής. Αντίθετα, το CS-1 υποστηρίζει ταχύτητες μόλις 8.0 Kbit/sec, αλλά επιτυγχάνει κάλυψη ίση με το 98% της κανονικής. Οι σύγχρονοι δικτυακοί εξοπλισμοί μπορούν να προσαρμόσουν την ταχύτητα μετάδοσης αυτόματα, ανάλογα με τη θέση του τερματικού (εγγύτητα στο σταθμό βάσης).

Βάσει των παραπάνω, αν είναι γνωστή η κατανομή των τερματικών επαίσθησης στα διάφορα σχήματα κωδικοποίησης, τότε μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η μέση ταχύτητα R_{PDCH} ανά χρονοσχισμή. Συμβολίζοντας με p_{CSi} , $i = 1, 2, 3, 4$, το ποσοστό των τερματικών επαίσθησης που χρησιμοποιούν το σχήμα CS- i και με R_{CSi} την αντίστοιχη ανά χρονοσχισμή ταχύτητα, ο ζητούμενος μέσος ρυθμός δεδομένων R_{PDCH} προκύπτει ως εξής:

$$R_{PDCH} = \sum_{i=1}^4 p_{CSi} \cdot R_{CSi} \quad (2.6)$$

Για παράδειγμα, αν η κατανομή είναι ομοιόμορφη, δηλαδή κάθε σχήμα κωδικοποίησης χρησιμοποιείται από το 25% των τερματικών επαίσθησης, τότε η μέση ταχύτητα R_{PDCH} είναι ίση με:

$$R_{PDCH} = \sum_{i=1}^4 0.25 \cdot R_{CSi} = 0.25 \cdot (8 + 12 + 14.4 + 20) = 13.6 \text{ Kbps}$$

- **T:** Συνολική καθυστέρηση συλλογής των αναφορών.

Πρόκειται για ένα ιδιαίτερα σημαντικό μέτρο κλιμακωσιμότητας, καθώς εκφράζει το συνολικό χρόνο που πρέπει να περιμένει ο γνωστικός σταθμός βάσης, προκειμένου να έχει στη διάθεσή του τα δεδομένα επαίσθησης όλων των τερματικών. Όσο πιο μικρή αυτή η καθυστέρηση, τόσο γρηγορότερα μπορεί να ξεκινήσει η επεξεργασία των επαισθητικών δεδομένων.

Στο υπό εξέταση μοντέλο, η τιμή της συνολικής καθυστέρησης T μπορεί να εκτιμηθεί ως εξής:

$$T = \frac{8 \cdot L_{msg} \cdot N}{a_{PDCH} \cdot n_{PDCH} \cdot R_{PDCH}} \quad (2.7)$$

Όπως γίνεται φανερό από τη σχέση (2.7), για το μέγεθος της παρατηρούμενης καθυστέρησης σημασία δεν έχει μεμονωμένα η τιμή της παραμέτρου a_{PDCH} ή της n_{PDCH} , αλλά το γινόμενό τους, δηλαδή το μέγεθος $a_{PDCH} \times n_{PDCH}$. Το γινόμενο αυτό εκφράζει ποσοτικά τους πόρους των οποίων η χρήση είναι επιτρεπτή για τη λειτουργία της επαίσθησης. Από την άλλη πλευρά, όπως προκύπτει από τη σχέση (2.5), ο βαθμός χρησιμοποίησης εξαρτάται μόνον από την τιμή του n_{PDCH} και όχι από την τιμή του a_{PDCH} .

Για τη συγκριτική μελέτη της κλιμακωσιμότητας των διαφόρων περιπτώσεων ενός σεναρίου, λαμβάνονται υπόψη τα ίδια επίπεδα αναφοράς που καθορίστηκαν στην παράγραφο 2.2.2.2.

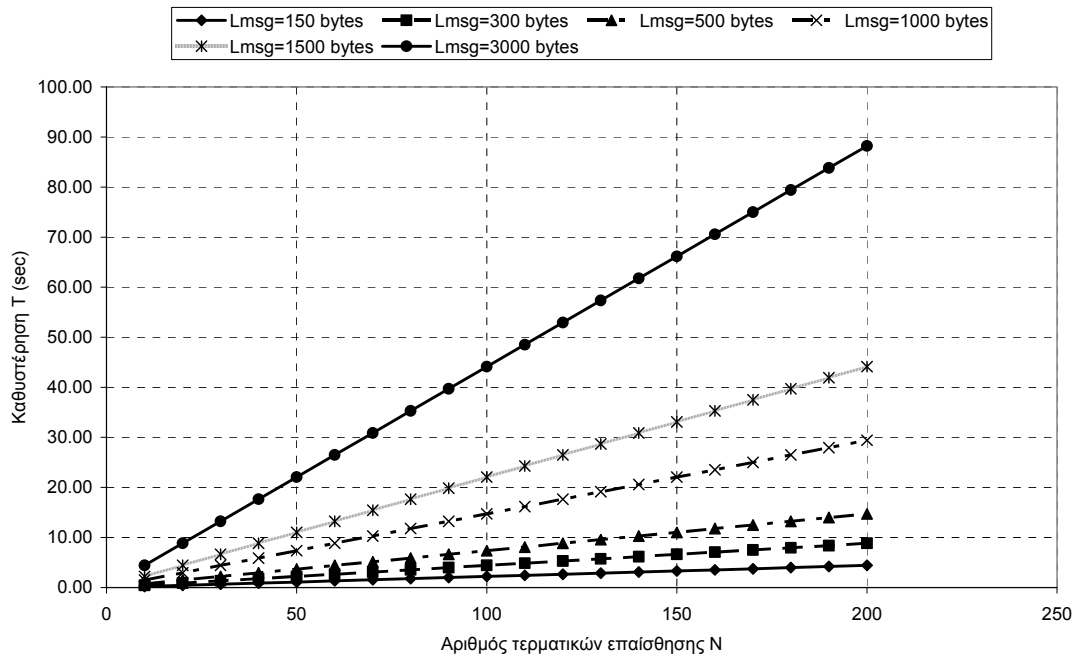
2.2.3.3 Σενάριο 1 – Κλιμακωσιμότητα συναρτήσεως του μεγέθους της αναφοράς

Το παρόν σενάριο στοχεύει στη μελέτη της κλιμακωσιμότητας, συναρτήσεως του μέσου μεγέθους μιας αναφοράς, L_{msg} , καθώς αυξάνεται ο αριθμός των τερματικών επαίσθησης, N . Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου που χρησιμοποιείται στο σενάριο αυτό έχουν ως εξής:

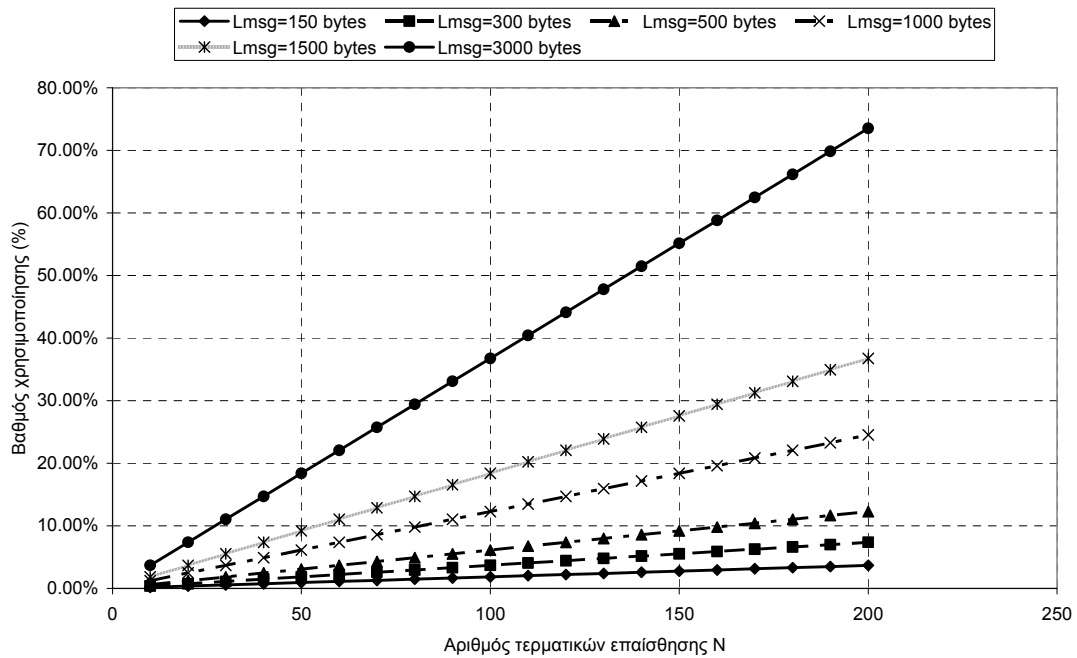
- $N = \{10, 20, \dots, 200\}$ τερματικά επαίσθησης
- $r_{upd} = 60$ ενημερώσεις ανά τερματικό ανά ώρα
- $L_{msg} = \{150, 300, 500, 1000, 1500, 3000, 10000, 15000, 20000\}$ bytes
- $a_{PDCH} \times n_{PDCH} = 0.5$

- $R_{PDCH} = 13.6 \text{ Kbps}$ ($p_{CSI} = 25\%$, $i = 1, 2, 3, 4$)

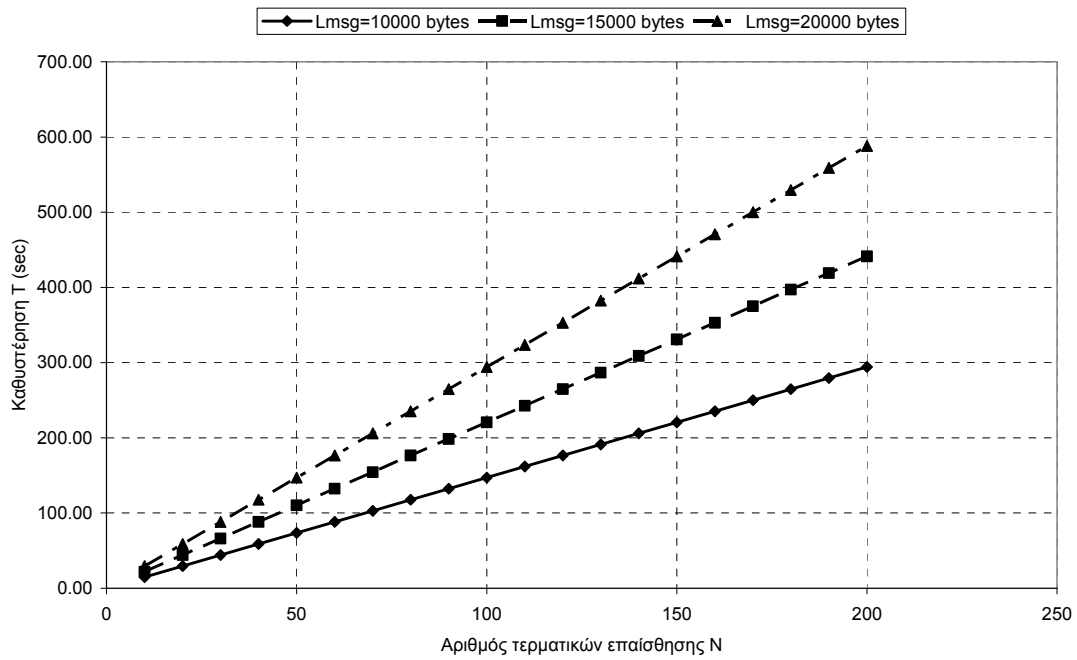
Τα αποτελέσματα εκτέλεσης του σεναρίου παρατίθενται στα σχήματα που ακολουθούν.



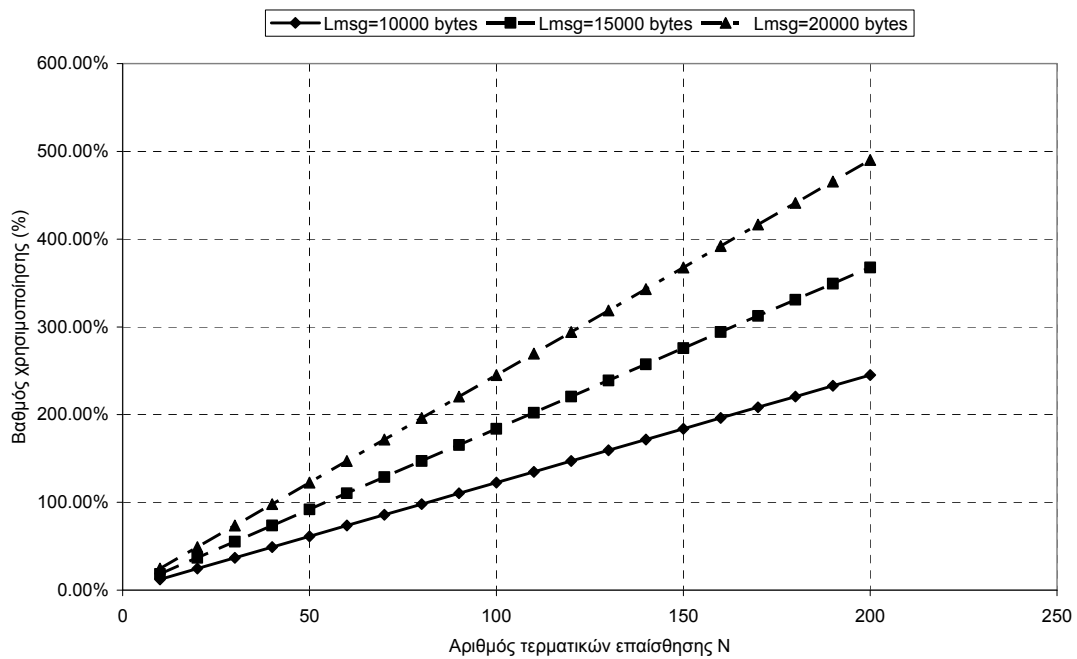
Σχήμα 2-14. Η καθυστέρηση T συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N, για διάφορες τιμές του μεγέθους αναφοράς



Σχήμα 2-15. Ο βαθμός χρησιμοποίησης u_{sense} συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N, για διάφορες τιμές του μεγέθους αναφοράς



Σχήμα 2-16. Η καθυστέρηση T συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για διάφορες τιμές του μεγέθους αναφοράς (Β' Μέρος)



Σχήμα 2-17. Ο βαθμός χρησιμοποίησης u_{sense} συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για διάφορες τιμές του μεγέθους αναφοράς (Β' Μέρος)

Το Σχήμα 2-14 και το Σχήμα 2-15 αποτελούν, αντίστοιχα, γραφικές παραστάσεις της καθυστέρησης T και του βαθμού χρησιμοποίησης u_{sense} , συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για διάφορες τιμές του μέσου μεγέθους μιας αναφοράς. Το ίδιο ισχύει και για το Σχήμα 2-16 και το Σχήμα 2-17, αντιστοίχως, με τη διαφορά ότι εξετάζονται μεγαλύτερες τιμές του μεγέθους αναφοράς. Όπως εύκολα διαπιστώνεται, τόσο η καθυστέρηση T όσο και ο βαθμός χρησιμοποίησης αυξάνονται με την αύξηση του μεγέθους των αναφορών. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς αυξάνεται η ποσότητα των προς αποστολή δεδομένων επαίσθησης.

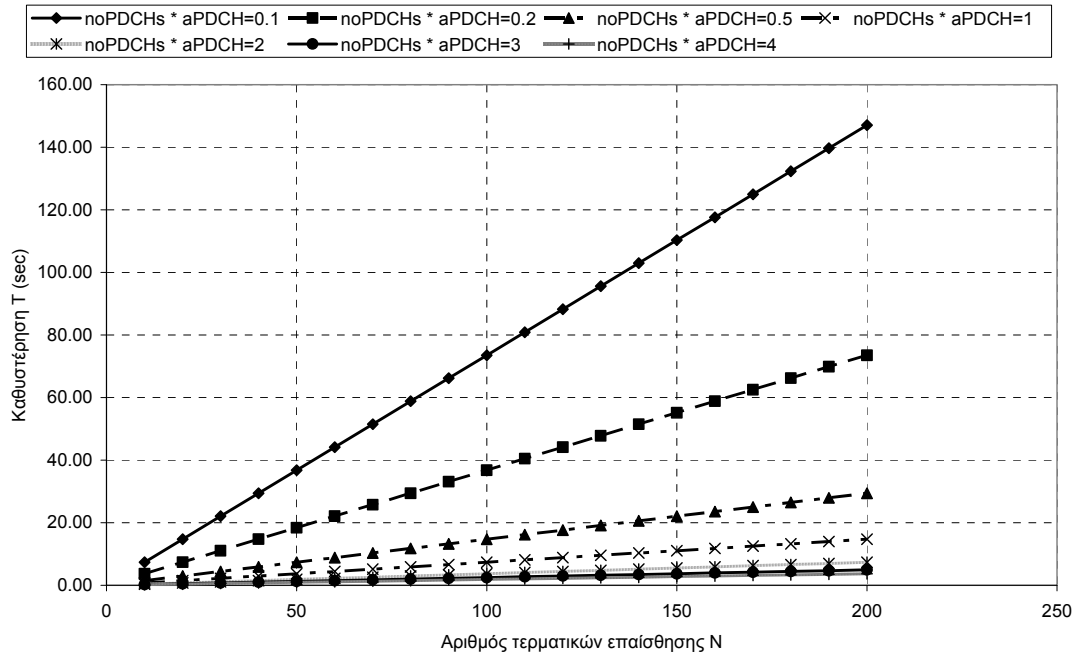
Όπως μπορεί να συναχθεί βάσει των παραπάνω αποτελεσμάτων, για μεγέθη αναφορών μέχρι 1500 bytes, οι επιδόσεις του συστήματος είναι ικανοποιητικές όταν τα τερματικά επαίσθησης δεν υπερβαίνουν τα 50. Για μεγαλύτερα μεγέθη αναφορών, οι δυνατότητες περιορίζονται περαιτέρω στα επίπεδα των 10 ή 20 τερματικών το πολύ, αναλόγως την περίπτωση.

2.2.3.4 Σενάριο 2 – Κλιμακωσιμότητα συναρτήσει των χρησιμοποιήσιμων ραδιοπόρων

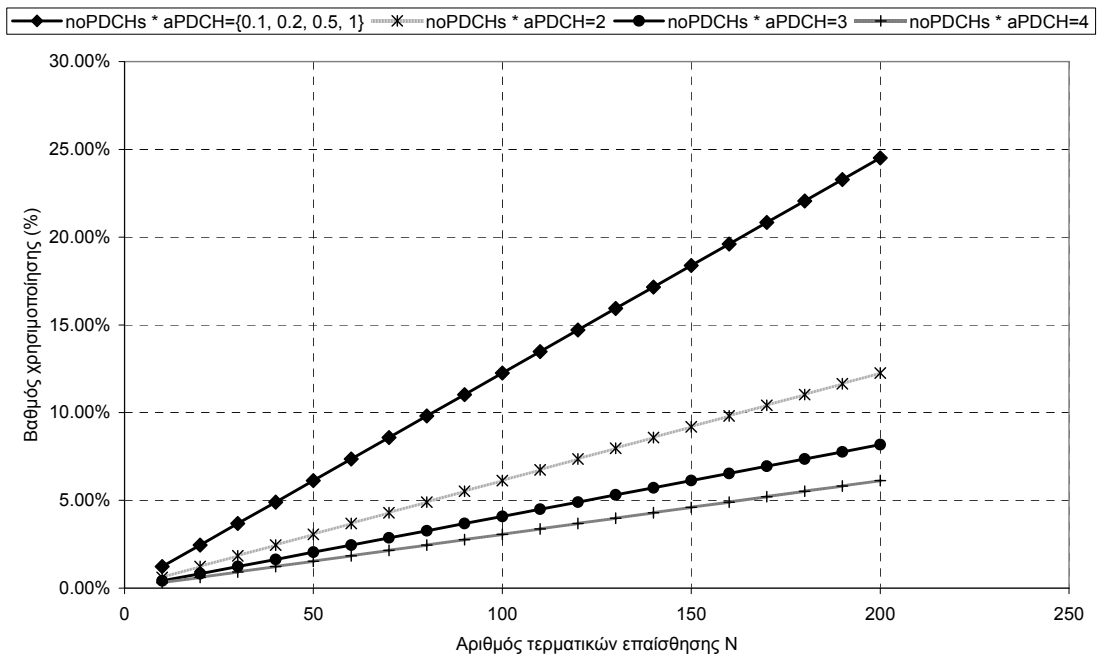
Το παρόν σενάριο στοχεύει στη μελέτη της κλιμακωσιμότητας, συναρτήσει των ραδιοπόρων των οποίων η χρήση επιτρέπεται για τους σκοπούς της επαίσθησης, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των τερματικών επαίσθησης, N . Οι χρησιμοποιήσιμοι ραδιοπόροι εκφράζονται ποσοτικά από το γινόμενο $a_{PDCH} \times n_{PDCH}$. Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου που χρησιμοποιείται στο σενάριο αυτό έχουν ως εξής:

- $N = \{10, 20, \dots, 200\}$ τερματικά επαίσθησης
- $r_{upd} = 60$ ενημερώσεις ανά τερματικό ανά ώρα
- $L_{msg} = \{1000, 3000\}$ bytes
- $a_{PDCH} \times n_{PDCH} = \{0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 3, 4\}$
- $R_{PDCH} = 13.6$ Kbps ($p_{CSI} = 25\%$, $i = 1, 2, 3, 4$)

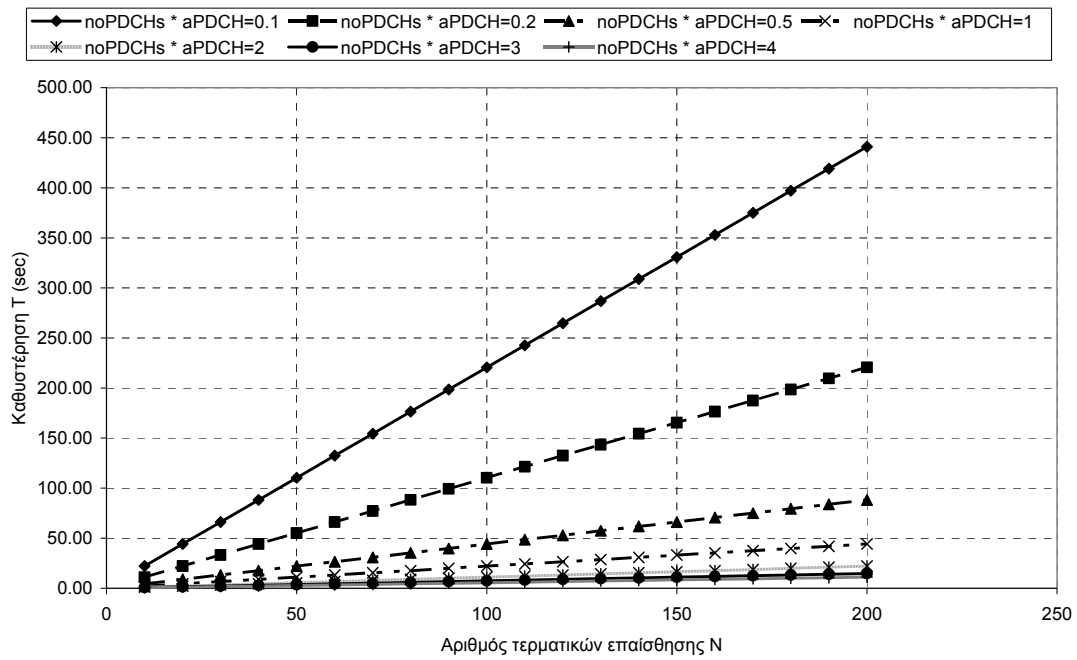
Τα αποτελέσματα εκτέλεσης του σεναρίου παρατίθενται στα σχήματα που ακολουθούν.



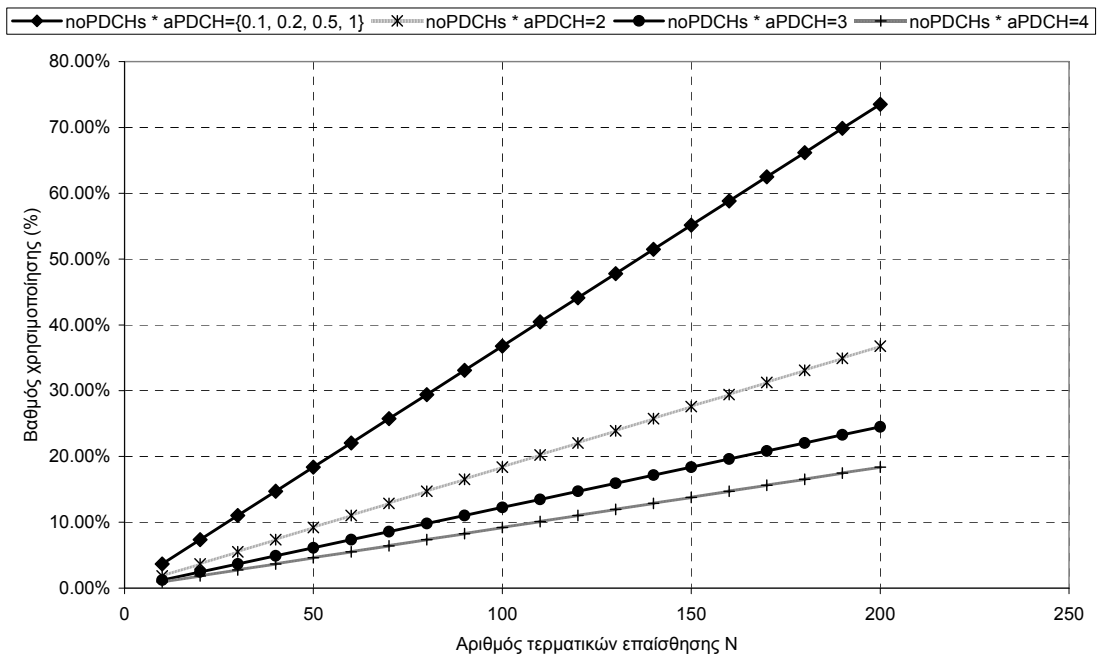
Σχήμα 2-18. Η καθυστέρηση T συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N, για διάφορα επίπεδα των αξιοποιήσιμων ραδιοπόρων, όταν $L_{msg}=1000$ bytes



Σχήμα 2-19. Ο βαθμός χρησιμοποίησης u_{sense} συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N, για διάφορα επίπεδα των αξιοποιήσιμων ραδιοπόρων, όταν $L_{msg}=1000$ bytes



Σχήμα 2-20. Η καθυστέρηση T συναρτίζει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N, για διάφορα επίπεδα των αξιοποιήσιμων ραδιοπόρων, όταν $L_{msg}=3000$ bytes



Σχήμα 2-21. Ο βαθμός χρησιμοποίησης u_{sense} συναρτίζει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N, για διάφορα επίπεδα των αξιοποιήσιμων ραδιοπόρων, όταν $L_{msg}=3000$ bytes

Το Σχήμα 2-18 και το Σχήμα 2-19 αποτελούν, αντίστοιχα, γραφικές παραστάσεις της καθυστέρησης T και του βαθμού χρησιμοποίησης u_{sense} , συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για διάφορα επίπεδα των αξιοποιήσιμων ραδιοπόρων, θεωρώντας ότι το μέσο μέγεθος των αναφορών είναι ίσο με $L_{msg}=1000$ bytes. Το ίδιο ισχύει και για το Σχήμα 2-20 και το Σχήμα 2-21, με τη διαφορά ότι το μέσο μέγεθος των αναφορών είναι ίσο με $L_{msg}=3000$ bytes. Όπως είναι αναμενόμενο, τόσο η καθυστέρηση T όσο και ο βαθμός χρησιμοποίησης αυξάνονται καθώς ελαττώνονται οι αξιοποιήσιμοι από τα τερματικά επαίσθησης ραδιοπόροι.

Όπως μπορεί να συναχθεί βάσει των παραπάνω αποτελεσμάτων, στην περίπτωση όπου $L_{msg}=1000$ bytes, το σύστημα εμφανίζει ικανοποιητικές επιδόσεις, όταν οι διαθέσιμοι πόροι υπερβαίνουν το επίπεδο του $a_{PDCH} \times n_{PDCH} = 1$. Αντίθετα, όταν οι διαθέσιμοι πόροι είναι λιγότεροι, τότε οι δυνατότητες κλιμάκωσης περιορίζονται στα επίπεδα των 80 τερματικών. Στην περίπτωση των $L_{msg}=3000$ bytes, το σύστημα εμφανίζει σαφώς πιο περιορισμένες δυνατότητες κλιμάκωσης, οι οποίες κυμαίνονται στα επίπεδα των 50 τερματικών επαίσθησης, όταν η διαθεσιμότητα των πόρων είναι υψηλή, και στα επίπεδα των 20 τερματικών, όταν η διαθεσιμότητα των πόρων είναι χαμηλή.

2.2.3.5 Σενάριο 3 – Κλιμακωσιμότητα συναρτήσει της μέσης ταχύτητας μετάδοσης

Το παρόν σενάριο στοχεύει στη μελέτη της κλιμακωσιμότητας, συναρτήσει του μέσου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων ανά χρονοσχισμή, R_{PDCH} , καθώς αυξάνεται ο αριθμός των τερματικών επαίσθησης, N . Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου που χρησιμοποιείται στο σενάριο αυτό έχουν ως εξής:

- $N = \{10, 20, \dots, 200\}$ τερματικά επαίσθησης
- $r_{upd} = 60$ ενημερώσεις ανά τερματικό ανά ώρα
- $L_{msg} = \{1000, 3000\}$ bytes
- $a_{PDCH} \times n_{PDCH} = 0.5$
- $R_{PDCH} = \{20, 14.4, 12, 8, 15.4, 11.8, 13.6\}$ Kbps

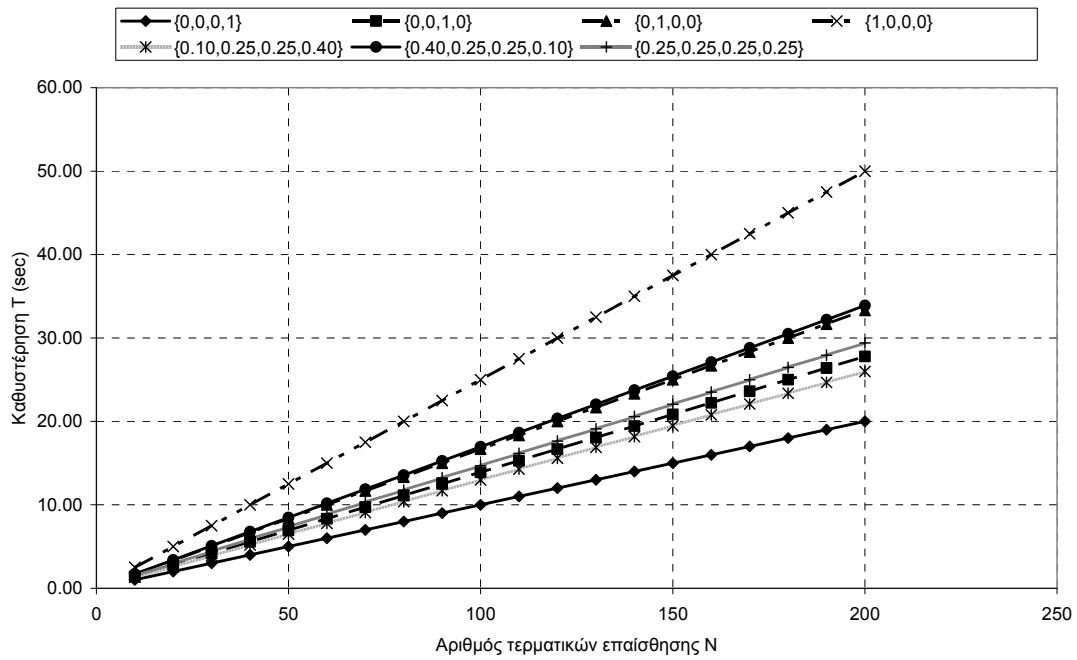
Οι παραπάνω υπό εξέταση τιμές του μέσου ρυθμού μετάδοσης προκύπτουν, αντίστοιχα, από τις εξής πιθανές κατανομές των τερματικών επαίσθησης ανά σχήμα κωδικοποίησης CS- i , $i = 1, 2, 3, 4$:

- $\{p_{CS1}, p_{CS2}, p_{CS3}, p_{CS4}\} = \{0, 0, 0, 1\}$
- $\{p_{CS1}, p_{CS2}, p_{CS3}, p_{CS4}\} = \{0, 0, 1, 0\}$
- $\{p_{CS1}, p_{CS2}, p_{CS3}, p_{CS4}\} = \{0, 1, 0, 0\}$
- $\{p_{CS1}, p_{CS2}, p_{CS3}, p_{CS4}\} = \{1, 0, 0, 0\}$
- $\{p_{CS1}, p_{CS2}, p_{CS3}, p_{CS4}\} = \{0.10, 0.25, 0.25, 0.40\}$
- $\{p_{CS1}, p_{CS2}, p_{CS3}, p_{CS4}\} = \{0.40, 0.25, 0.25, 0.10\}$
- $\{p_{CS1}, p_{CS2}, p_{CS3}, p_{CS4}\} = \{0.25, 0.25, 0.25, 0.25\}$

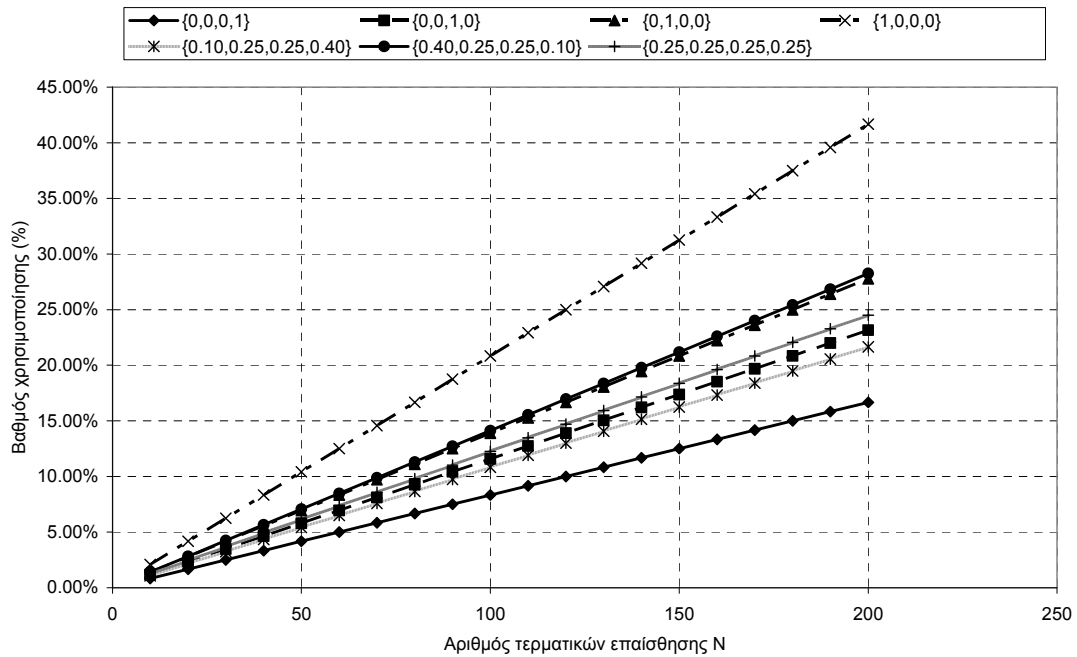
Τα αποτελέσματα εκτέλεσης του σεναρίου παρατίθενται στα σχήματα που ακολουθούν.

Το Σχήμα 2-22 και το Σχήμα 2-23 αποτελούν, αντίστοιχα, γραφικές παραστάσεις της καθυστέρησης T και του βαθμού χρησιμοποίησης u_{sense} , συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για διάφορες πιθανές κατανομές των τερματικών επαίσθησης ανά σχήμα κωδικοποίησης, θεωρώντας ότι το μέσο μέγεθος των αναφορών είναι ίσο με $L_{msg}=1000$ bytes. Το ίδιο ισχύει και για το Σχήμα 2-24 και το Σχήμα 2-25, με τη διαφορά ότι το μέσο μέγεθος των αναφορών είναι ίσο με $L_{msg}=3000$ bytes. Από τις υπό εξέταση πιθανές κατανομές η πλέον ευμενής είναι εκείνη για την οποία ισχύει $p_{CS4}=100\%$ και $p_{CSi}=0\%$ για $i=1,2,3$, ενώ η πλέον δυσμενής εκείνη για την οποία ισχύει $p_{CS1}=100\%$ και $p_{CSi}=0\%$ για $i=2,3,4$. Εξετάζονται, επίσης, και μια σειρά από ενδιάμεσες καταστάσεις. Όπως γίνεται εμφανές από τα σχήματα, τόσο η καθυστέρηση T όσο και ο βαθμός χρησιμοποίησης αυξάνονται, καθώς ελαττώνεται η μέση ταχύτητα μετάδοσης.

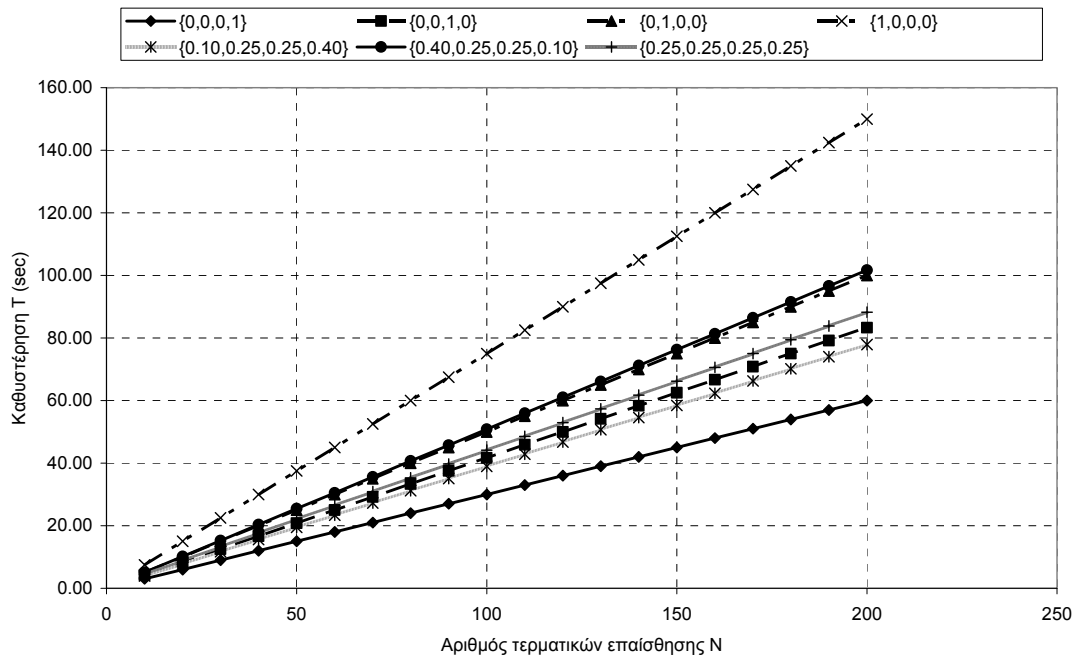
Όπως μπορεί να συναχθεί βάσει των παραπάνω αποτελεσμάτων, σημαντικές μεταβολές ως προς την κατανομή των τερματικών επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τις δυνατότητες κλιμάκωσης. Πράγματι, μεταξύ της πιο ευμενούς και της πιο δυσμενούς υπάρχει μια ψαλίδα σχεδόν 100% ως προς το ύψος των δυνατοτήτων κλιμάκωσης. Ωστόσο, μικρού εύρους μεταβολές επηρεάζουν σε σχεδόν ανεπαίσθητο βαθμό τις δυνατότητες κλιμάκωσης.



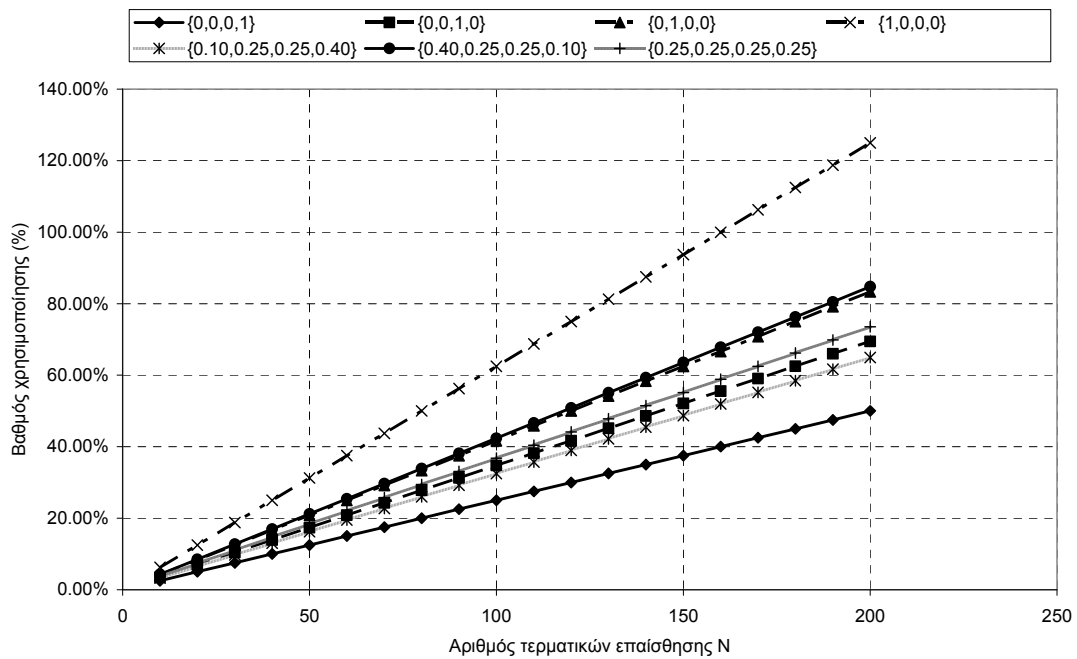
Σχήμα 2-22. Η καθυστέρηση T συναρτίζει του αριθμού των τερματικών επαίσεθης N, για διάφορες κατανομές $\{p_{CS1}, p_{CS2}, p_{CS3}, p_{CS4}\}$ των τερματικών επαίσεθης στα σχήματα κωδικοποίησης του GPRS, όταν $L_{msg}=1000$ bytes



Σχήμα 2-23. Ο βαθμός χρησιμοποίησης u_{sense} συναρτίζει του αριθμού των τερματικών επαίσεθης N, για διάφορες κατανομές $\{p_{CS1}, p_{CS2}, p_{CS3}, p_{CS4}\}$ των τερματικών επαίσεθης στα σχήματα κωδικοποίησης του GPRS, όταν $L_{msg}=1000$ bytes



Σχήμα 2-24. Η καθυστέρηση T συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσεθης N , για διάφορες κατανομές $\{p_{CS1}, p_{CS2}, p_{CS3}, p_{CS4}\}$ των τερματικών επαίσεθης στα σχήματα κωδικοποίησης του GPRS, όταν $L_{msg}=3000$ bytes



Σχήμα 2-25. Ο βαθμός χρησιμοποίησης u_{sense} συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσεθης N , για διάφορες κατανομές $\{p_{CS1}, p_{CS2}, p_{CS3}, p_{CS4}\}$ των τερματικών επαίσεθης στα σχήματα κωδικοποίησης του GPRS, όταν $L_{msg}=3000$ bytes

2.2.3.6 Σενάριο 4 – Κλιμακωσιμότητα συναρτήσεως του ρυθμού ενημέρωσης

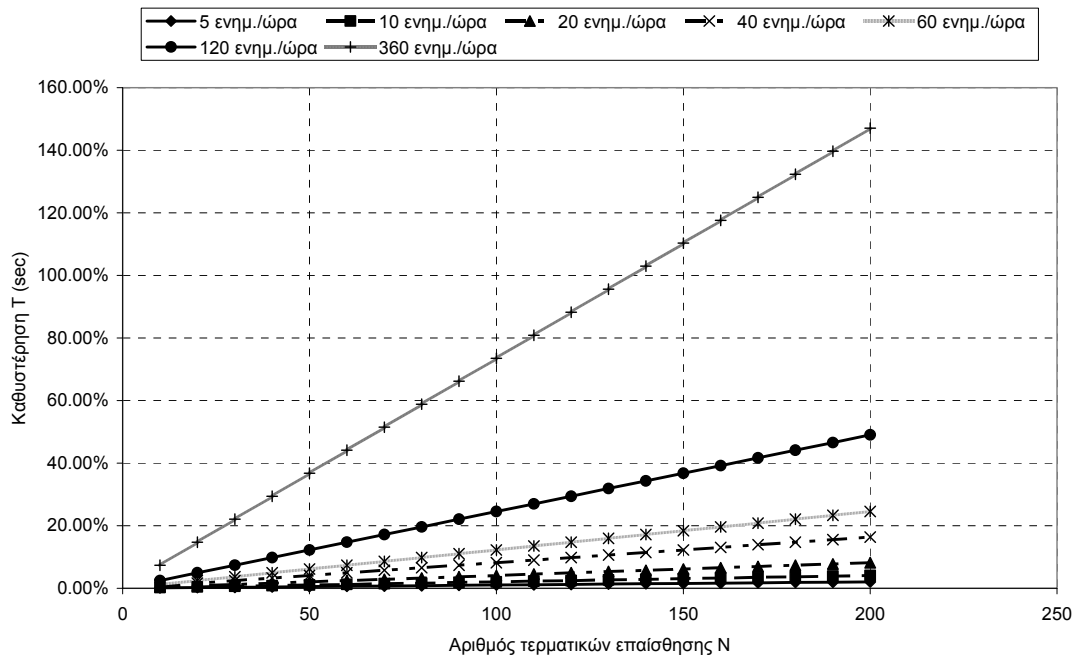
Το παρόν σενάριο στοχεύει στη μελέτη της κλιμακωσιμότητας, συναρτήσεως του ρυθμού ενημέρωσης του σταθμού βάσης, r_{upd} , καθώς αυξάνεται ο αριθμός των τερματικών επαίσεθης, N . Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου που χρησιμοποιείται στο σενάριο αυτό έχουν ως εξής:

- $N = \{10, 20, \dots, 200\}$ τερματικά επαίσεθης
- $r_{upd} = \{5, 10, 20, 40, 60, 120, 360\}$ ενημερώσεις ανά τερματικό ανά ώρα
- $L_{msg} = \{1000, 3000\}$ bytes
- $a_{PDCH} \times n_{PDCH} = 0.5$
- $R_{PDCH} = 13.6$ Kbps

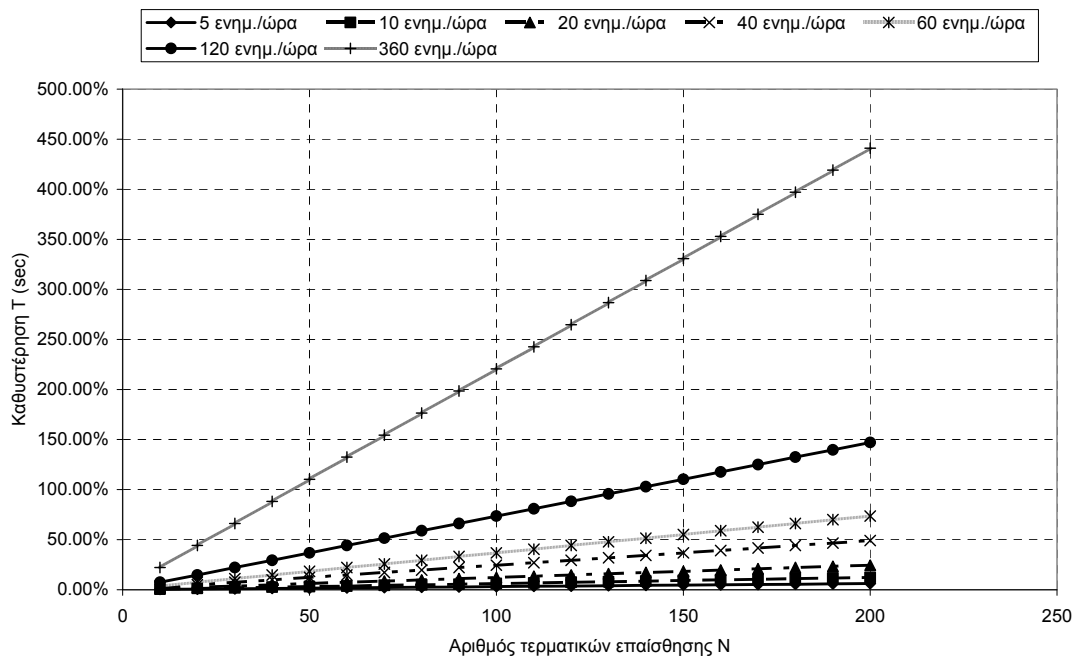
Τα αποτελέσματα εκτέλεσης του σεναρίου παρατίθενται στα σχήματα που ακολουθούν.

Το Σχήμα 2-26 και το Σχήμα 2-27 αποτελούν γραφικές παραστάσεις του βαθμού χρησιμοποίησης u_{sense} , συναρτήσεως του αριθμού των τερματικών επαίσεθης N , για διάφορες τιμές του ρυθμού ενημέρωσης του σταθμού βάσης, όταν το μέσο μέγεθος αναφοράς είναι $L_{msg}=1000$ bytes και $L_{msg}=3000$ bytes, αντίστοιχα. Όπως είναι αναμενόμενο, ο βαθμός χρησιμοποίησης αυξάνεται με την αύξηση του ρυθμού ενημέρωσης. Αυτό συμβαίνει, γιατί όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός ενημέρωσης, τόσο συχνότερα αποστέλλονται αναφορές από τα τερματικά προς το σταθμό βάσης.

Όπως μπορεί να συναχθεί βάσει των παραπάνω αποτελεσμάτων, υπάρχει έντονη υποβάθμιση των δυνατοτήτων κλιμάκωσης όταν η συχνότητα των ενημερώσεων αυξάνει. Για μεγάλη συχνότητα ενημερώσεων του σταθμού βάσης, ο αριθμός των τερματικών επαίσεθης πρέπει να περιοριστεί σε πολύ χαμηλά επίπεδα, κάτω των 10 τερματικών, ειδάλλως παρατηρείται κορεσμός ως προς το βαθμό χρησιμοποίησης του συστήματος και δε μένουν αρκετοί πόροι διαθέσιμοι για την εξυπηρέτηση της κανονικής κίνησης.



Σχήμα 2-26. Ο βαθμός χρησιμοποίησης u_{sense} συναρτῆσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για διάφορες τιμές του ρυθμού ενημέρωσης του σταθμού βάσης, όταν $L_{msg}=500$ bytes



Σχήμα 2-27. Ο βαθμός χρησιμοποίησης u_{sense} συναρτῆσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για διάφορες τιμές του ρυθμού ενημέρωσης του σταθμού βάσης, όταν $L_{msg}=1500$ bytes

2.2.4 UTRAN

2.2.4.1 Παράμετροι μοντέλου

Σκοπός της συγκεκριμένης ενότητας είναι η μελέτη της κλιμακωσιμότητας της διαδικασίας επαίσθησης όταν η ενημέρωση του γνωστικού σταθμού βάσης πραγματοποιείται από τα τερματικά μέσω διεπαφής τύπου UTRAN.

Οι παράμετροι του αναλυτικού μοντέλου που χρησιμοποιείται είναι οι ακόλουθες:

- **N:** Αριθμός τερματικών επαίσθησης στο κελί. Η παράμετρος αυτή υποδεικνύει τον αριθμό των τερματικών που συμμετέχουν στην υπό μελέτη διαδικασία επαίσθησης.
- **r_{upd}:** Ρυθμός ενημέρωσης του σταθμού βάσης. Η παράμετρος αυτή αντιπροσωπεύει το μέσο ρυθμό ενημερώσεων του σταθμού βάσης, ανά τερματικό επαίσθησης, ανά ώρα.
- **L_{msg}:** Μέγεθος μηνύματος αναφοράς. Πρόκειται για το μέσο μέγεθος σε bytes ενός μηνύματος αναφοράς επαίσθησης.
- **N_{VOICE}:** Αριθμός ενεργών χρηστών φωνής στο κελί. Πρόκειται για το μέσο αριθμό χρηστών που έχουν σε εξέλιξη μια φωνητική κλήση.
- **N_{DATA}:** Αριθμός ενεργών χρηστών φωνής στο κελί. Πρόκειται για το μέσο αριθμό χρηστών που έχουν σε εξέλιξη μια υπηρεσία δεδομένων.

2.2.4.2 Μέτρα κλιμακωσιμότητας

Τα μέτρα που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της δυνατότητας κλιμάκωσης της βασισμένης στο GERAN-GPRS διαδικασίας επαίσθησης είναι τα ακόλουθα:

- **n_{UL}:** Συντελεστής φορτίου ζεύξης ανόδου.

Σε ένα κελί τύπου UMTS ο συντελεστής φορτίου ζεύξης ανόδου (uplink load factor) δίδεται από τη σχέση:

$$n_{UL} = (1+i) \cdot \sum_{j=1}^{N_{TOT}} \frac{1}{1 + \frac{w}{\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_j \cdot R_j \cdot u_j}} \quad (2.8)$$

όπου:

- N_{TOT} : ο συνολικός αριθμός ενεργών συνόδων
- w : ο ρυθμός chip
- u_j : ο συντελεστής δραστηριότητας της συνόδου j
- R_j : ο ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας της συνόδου j
- i : το κλάσμα παρεμβολής από γειτονικές κυψέλες
- E_b/N_0 : ο λόγος ενέργειας ανά bit προς την πυκνότητα ισχύος θορύβου

Στην ανάλυση που ακολουθεί, οι ανωτέρω παράμετροι τέθηκαν στις ακόλουθες αντιπροσωπευτικές τιμές:

- $w = 3.84 \text{ Mcps}$
- $u_{VOICE} = 0.67, u_{DATA} = 1$
- $R_{VOICE} = 12.2 \text{ Kbps}, R_{DATA} = 144 \text{ Kbps}$
- $i = 0.65$ (για κατευθυντικές κεραίες)
- $(E_b/N_0)_{VOICE} = 5 \text{ dB}, (E_b/N_0)_{DATA/144\text{Kbps}} = 1.5 \text{ dB}$

Όταν ο συντελεστής φορτίου ζεύξης ανόδου πλησιάζει το 100%, τότε το σύστημα φτάνει στη χωρητικότητα κορεσμού του.

Προκειμένου να εκτιμηθεί ο συντελεστής δραστηριότητας της διαδικασίας της επαίσθησης, υποτίθεται ότι τα τερματικά επαίσθησης μεταδίδουν τις αναφορές τους μέσω καναλιού δεδομένων ταχύτητας 144 Kbps, το οποίο χρησιμοποιούν για σύντομο χρονικό διάστημα. Έτσι, ο εν λόγω συντελεστής δραστηριότητας μπορεί να εκτιμηθεί ως εξής:

$$u_{SENSE} = \frac{c_{cls} \cdot 8 \cdot L_{msg} \cdot r_{upd} \cdot N}{3600 \cdot 144000} \quad (2.9)$$

όπου ο συντελεστής $c_{cls} > 1$ εκφράζει τον αναπόφευκτα ατελή συγχρονισμό των τερματικών επαίσθησης κατά τη διαδικασία ενημέρωσης, ο οποίος οδηγεί σε πολλαπλές ταυτόχρονες εκπομπές και, ως εκ τούτου, σε αύξηση του συντελεστή φορτίου ζεύξης ανόδου. Γενικά, ισχύει $c_{cls} = c_{cls}(N)$.

Δηλαδή:

$$u_{SENSE} = \frac{c_{cls} \cdot L_{msg} \cdot r_{upd} \cdot N}{64.8 \cdot 10^6} \quad (2.10)$$

Κατά συνέπεια, η συμβολή των τερματικών επαίσθησης στη διαμόρφωση του συντελεστή φορτίου ζεύξης ανόδου μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση:

$$n_{SENSE} = \frac{1}{1 + \frac{w}{\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{DATA/144Kbps} \cdot R_{DATA} \cdot u_{SENSE}}} \quad (2.11)$$

- **N_{RISE}**: Άνοδος θορύβου.

Η άνοδος θορύβου (noise rise) είναι ενδεικτική της παρεμβολής που επικρατεί στη ασύρματη ζεύξη, και δεν πρέπει να υπερβαίνει το μέγιστο όριο παρεμβολών που έχει καθοριστεί από τον πάροχο του δικτύου αναφορικά με τον ισολογισμό ισχύος στη ραδιοζεύξη. Η άνοδος θορύβου δίδεται από τον τύπο:

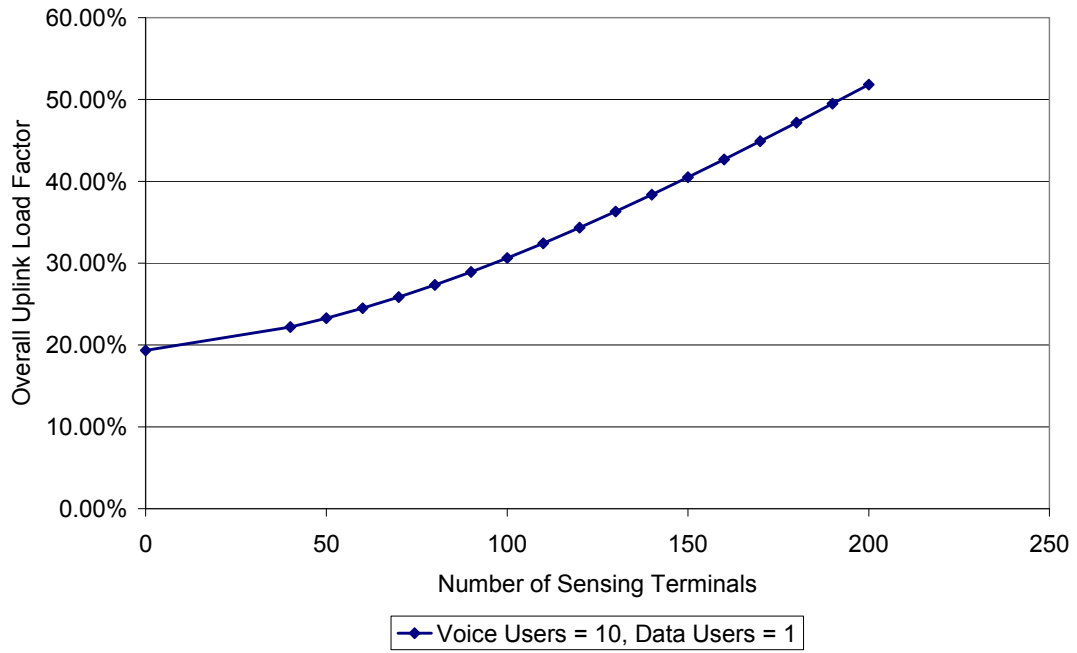
$$N_{RISE} = -10 \cdot \log(1 - n_{UL}) \quad (2.12)$$

2.2.4.3 Σενάριο 1 – Κλιμακωσιμότητα συναρτήσεως του φορτίου κανονικής κίνησης

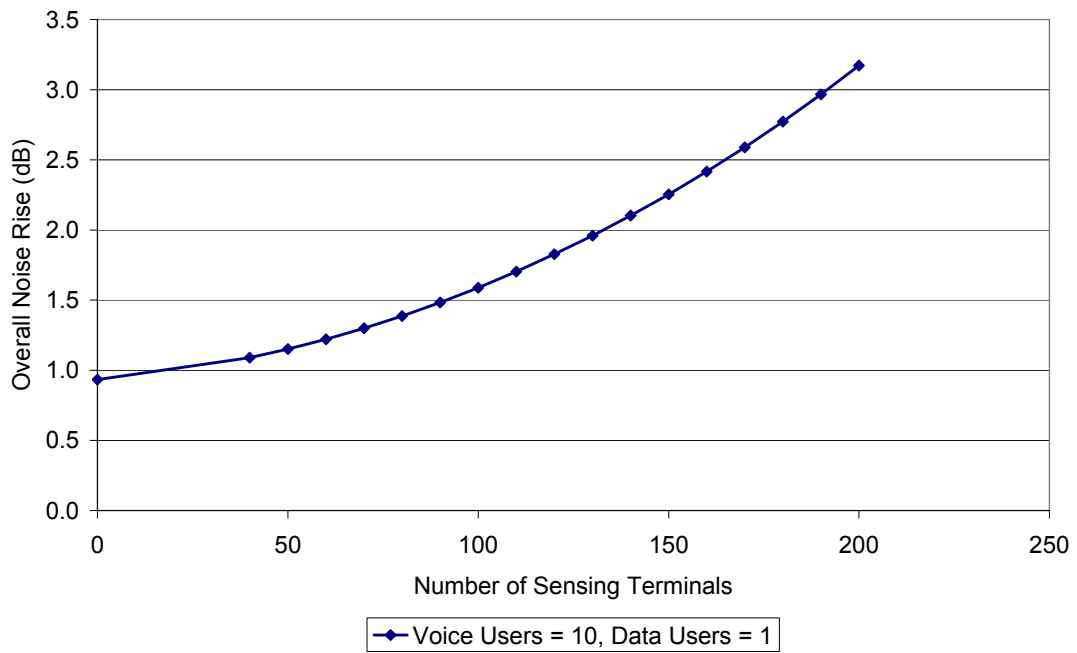
Το παρόν σενάριο στοχεύει στη μελέτη της κλιμακωσιμότητας, συναρτήσεως του φορτίου κανονικής κίνησης του κελιού, N_{VOICE} και N_{DATA} , καθώς αυξάνεται ο αριθμός των τερματικών επαίσεσης, N . Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου που χρησιμοποιείται στο σενάριο αυτό έχουν ως εξής:

- $N = \{10, 20, \dots, 200\}$ τερματικά επαίσεσης
- $r_{upd} = 60$ ενημερώσεις ανά τερματικό ανά ώρα
- $L_{msg} = 5000$ bytes
- $N_{VOICE} = \{10, 20, 30, 40\}$ χρήστες
- $N_{DATA} = \{1, 2, 3, 4\}$ χρήστες

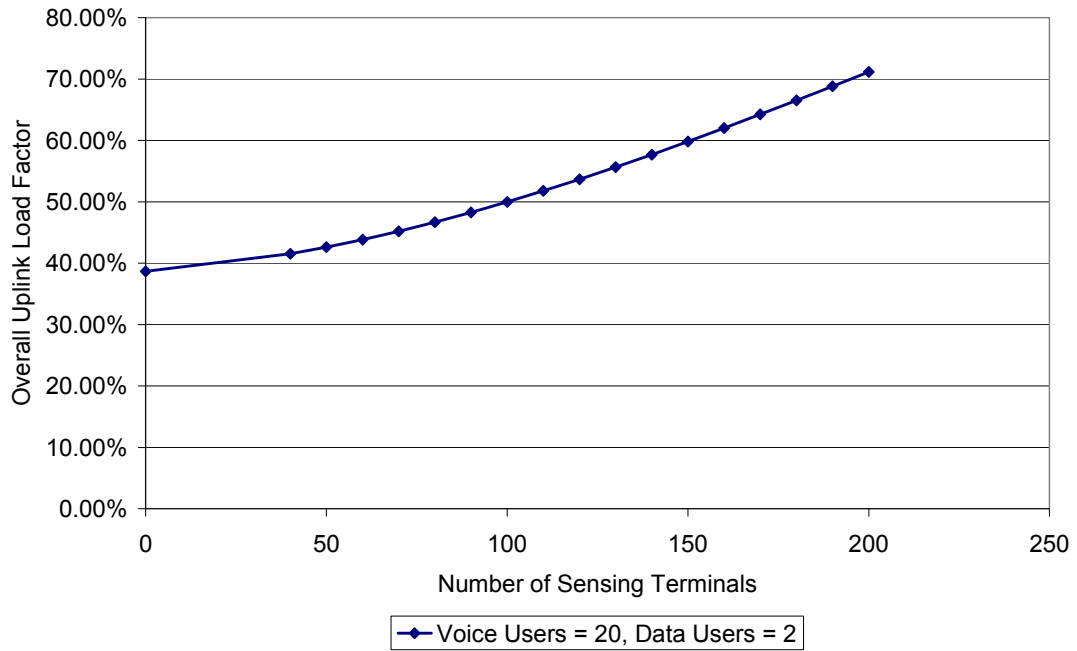
Τα αποτελέσματα εκτέλεσης του σεναρίου παρατίθενται στα σχήματα που ακολουθούν.



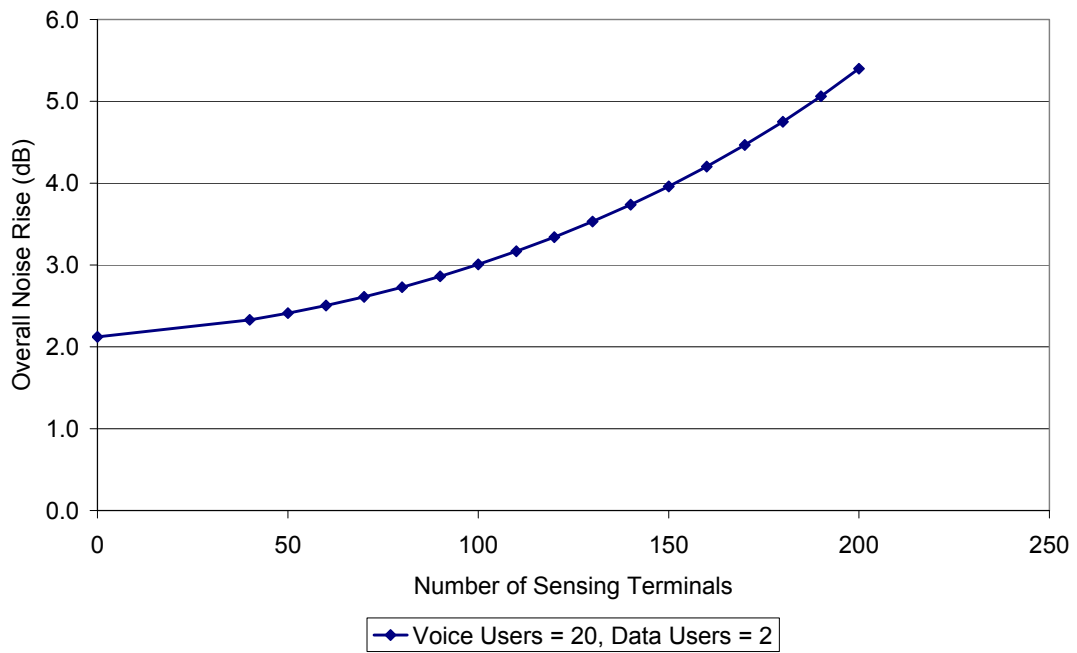
Σχήμα 2-28. Ο συντελεστής φορτίου ζεύξης ανόδου συναρτίζεται του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για φορτίο κανονικής κίνησης $\{N_{\text{VOICE}}=10, N_{\text{DATA}}=1\}$



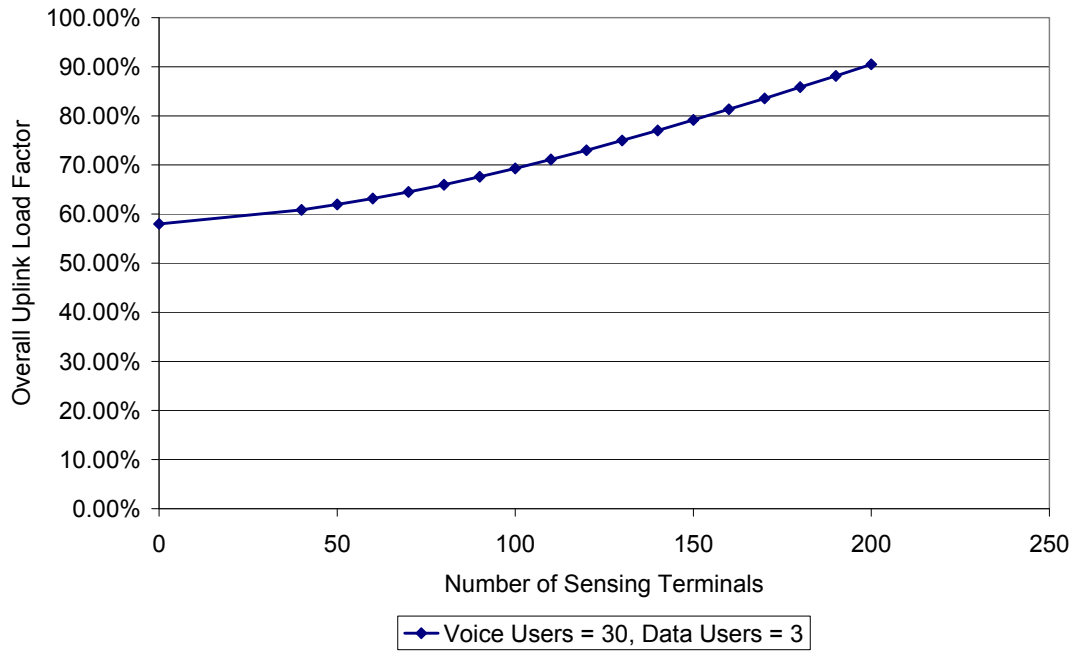
Σχήμα 2-29. Η άνοδος θορύβου συναρτίζεται του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για φορτίο κανονικής κίνησης $\{N_{\text{VOICE}}=10, N_{\text{DATA}}=1\}$



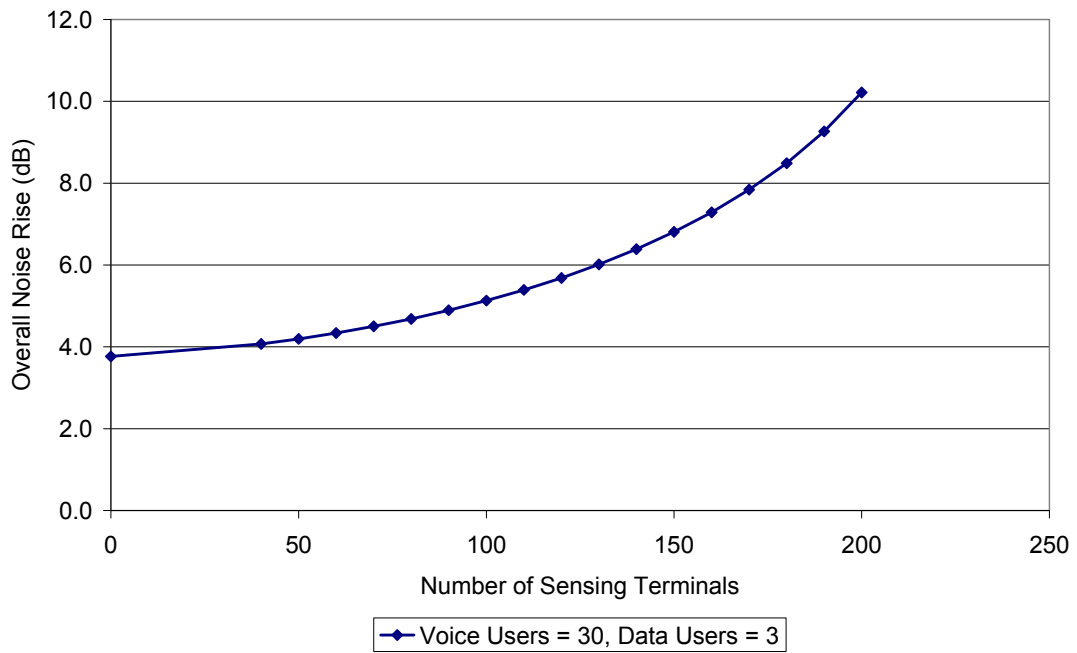
Σχήμα 2-30. Ο συντελεστής φορτίου ζεύξης ανόδου συναρτίζεται του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για φορτίο κανονικής κίνησης $\{N_{\text{VOICE}}=20, N_{\text{DATA}}=2\}$



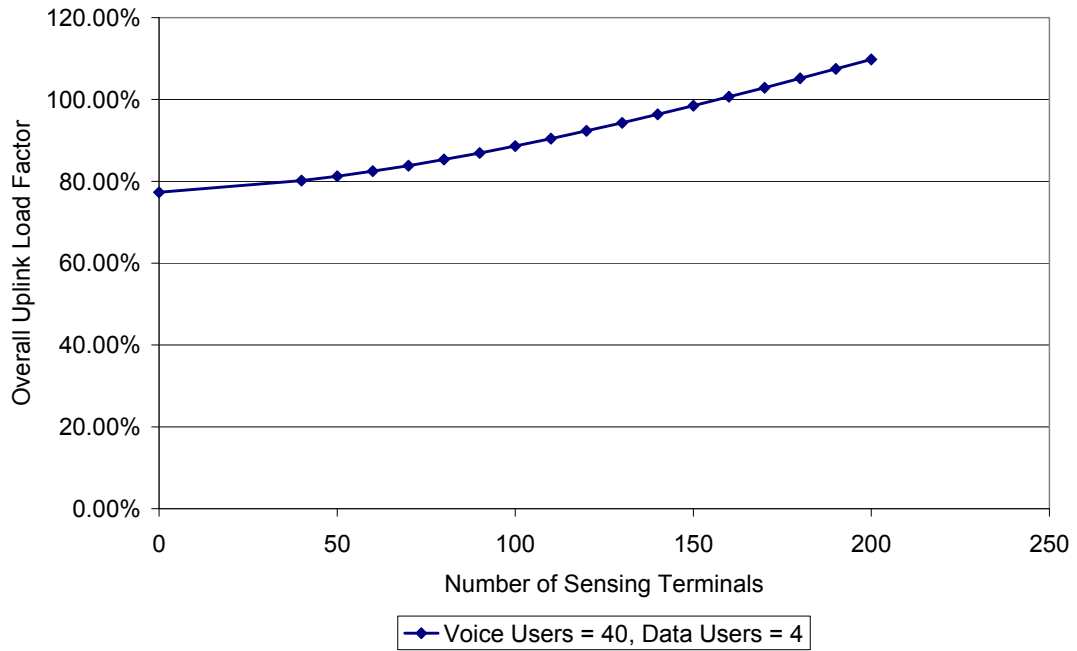
Σχήμα 2-31. Η άνοδος θορύβου συναρτίζεται του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για φορτίο κανονικής κίνησης $\{N_{\text{VOICE}}=20, N_{\text{DATA}}=2\}$



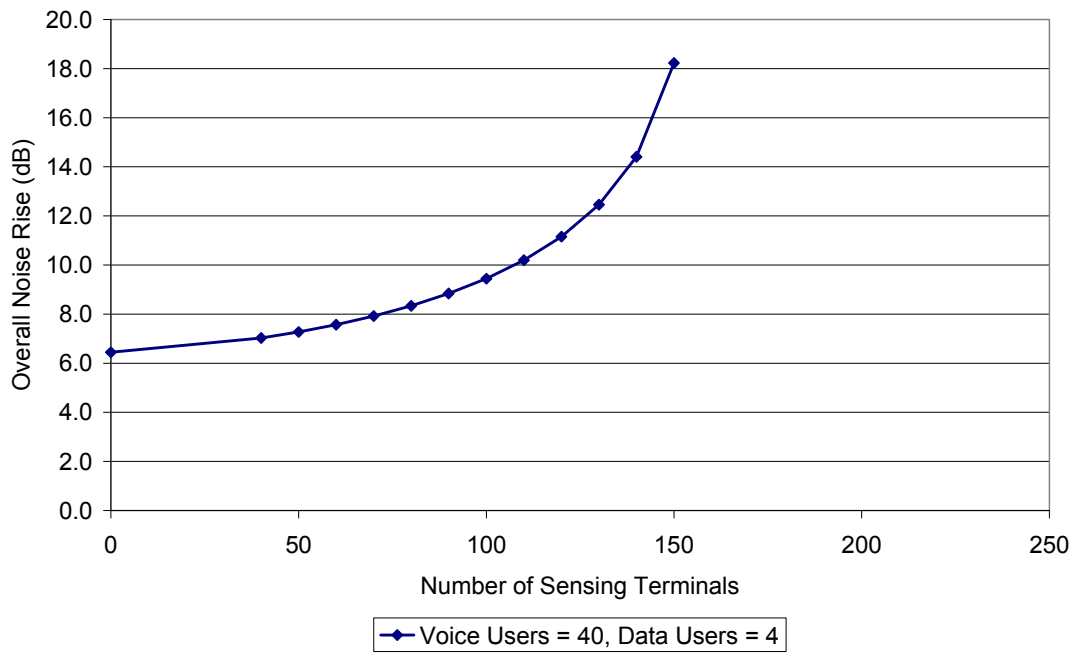
Σχήμα 2-32. Ο συντελεστής φορτίου ζεύξης ανόδου συναρτῆσει του αριθμού των τερματικών επαίσησης N , για φορτίο κανονικής κίνησης $\{N_{\text{VOICE}}=30, N_{\text{DATA}}=3\}$



Σχήμα 2-33. Η άνοδος θορύβου συναρτῆσει του αριθμού των τερματικών επαίσησης N , για φορτίο κανονικής κίνησης $\{N_{\text{VOICE}}=30, N_{\text{DATA}}=3\}$



Σχήμα 2-34. Ο συντελεστής φορτίου ζεύξης ανόδου συναρτῆσει του αριθμού των τερματικών επαίσησης N , για φορτίο κανονικής κίνησης $\{N_{\text{VOICE}}=40, N_{\text{DATA}}=4\}$



Σχήμα 2-35. Η άνοδος θορύβου συναρτῆσει του αριθμού των τερματικών επαίσησης N , για φορτίο κανονικής κίνησης $\{N_{\text{VOICE}}=40, N_{\text{DATA}}=4\}$

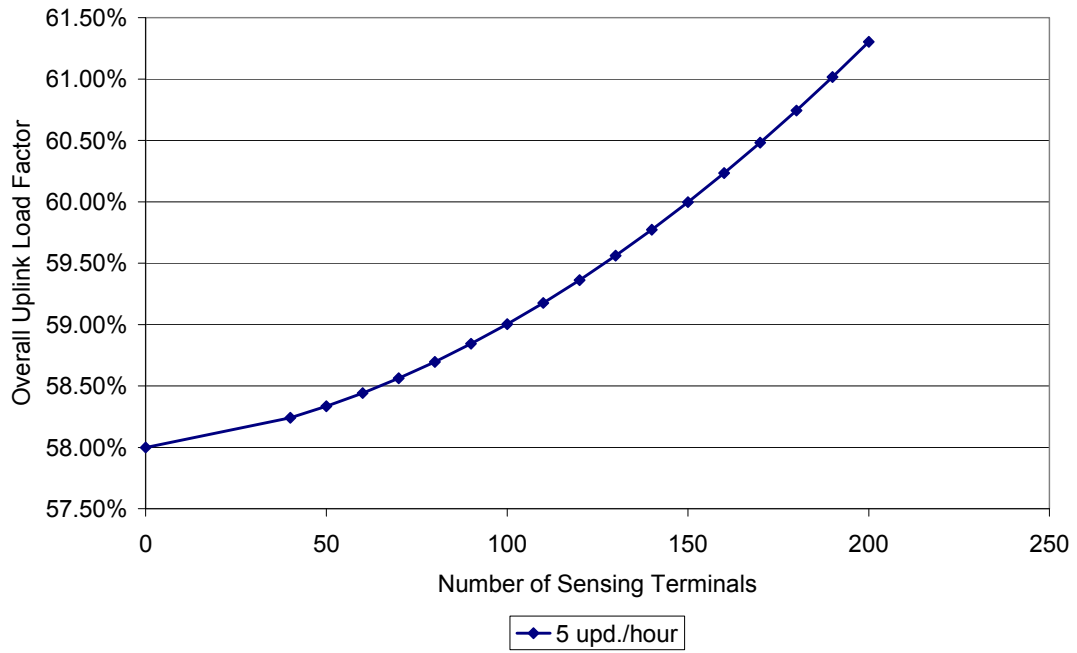
Από τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου σεναρίου (Σχήμα 2-28-Σχήμα 2-35) γίνεται φανερό ότι η διαδικασία επαίσθησης μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του συντελεστή φορτίου ζεύξης ανόδου μέχρι και κατά 30%, όταν συμμετέχουν σε αυτήν έως και 200 τερματικά. Η αύξηση αυτή καθίσταται απαγορευτική σε περιπτώσεις όπου το φορτίο κανονικής κίνησης είναι υψηλό (π.χ., 40 χρήστες φωνής, 4 χρήστες δεδομένων). Ως λογικότερη επιλογή διαφαίνεται η συμμετοχή το πολύ 100 τερματικών στις διαδικασίες επαίσθησης, κάτι που οδηγεί σε αύξηση του συντελεστή φορτίου ζεύξης ανόδου κατά 10%. Σαφώς μικρότερα περιθώρια υπάρχουν και πάλι όταν το φορτίο κανονικής κίνησης είναι σχετικά υψηλό.

2.2.4.4 Σενάριο 2 – Κλιμακωσιμότητα συναρτήσεως του ρυθμού ενημέρωσης

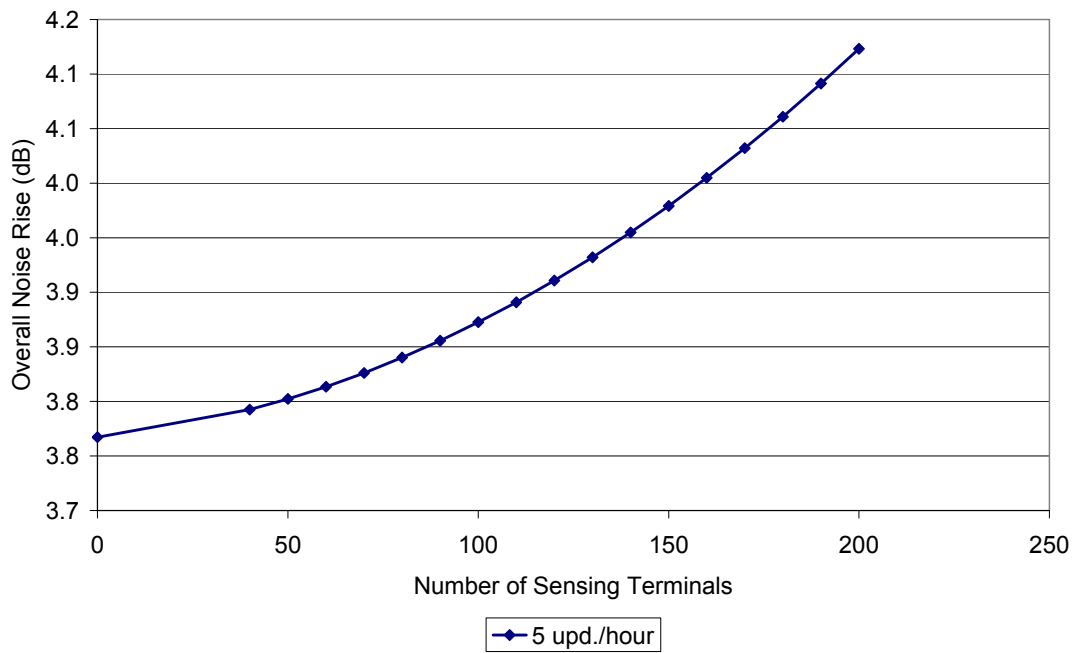
Το παρόν σενάριο στοχεύει στη μελέτη της κλιμακωσιμότητας, συναρτήσεως του ρυθμού ενημέρωσης του σταθμού βάσης, r_{upd} , καθώς αυξάνεται ο αριθμός των τερματικών επαίσθησης, N . Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου που χρησιμοποιείται στο σενάριο αυτό έχουν ως εξής:

- $N = \{10, 20, \dots, 200\}$ τερματικά επαίσθησης
- $r_{upd} = \{5, 10, 20, 60, 120, 360\}$ ενημερώσεις ανά τερματικό ανά ώρα
- $L_{msg} = 5000$ bytes
- $N_{VOICE} = 30$ χρήστες
- $N_{DATA} = 3$ χρήστες

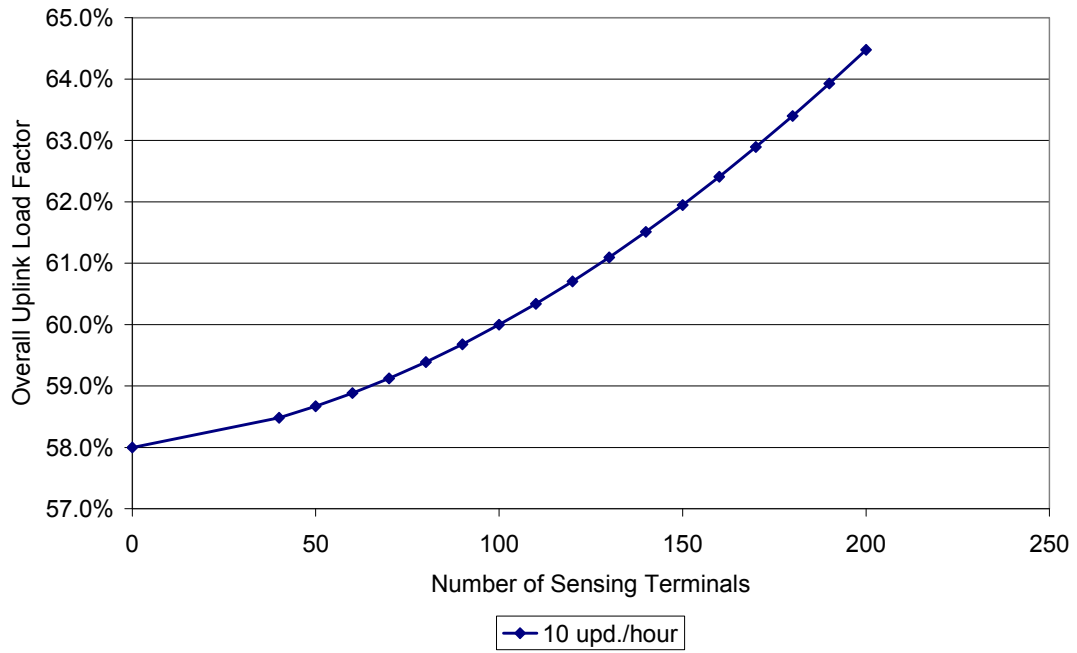
Τα αποτελέσματα εκτέλεσης του σεναρίου παρατίθενται στα σχήματα που ακολουθούν.



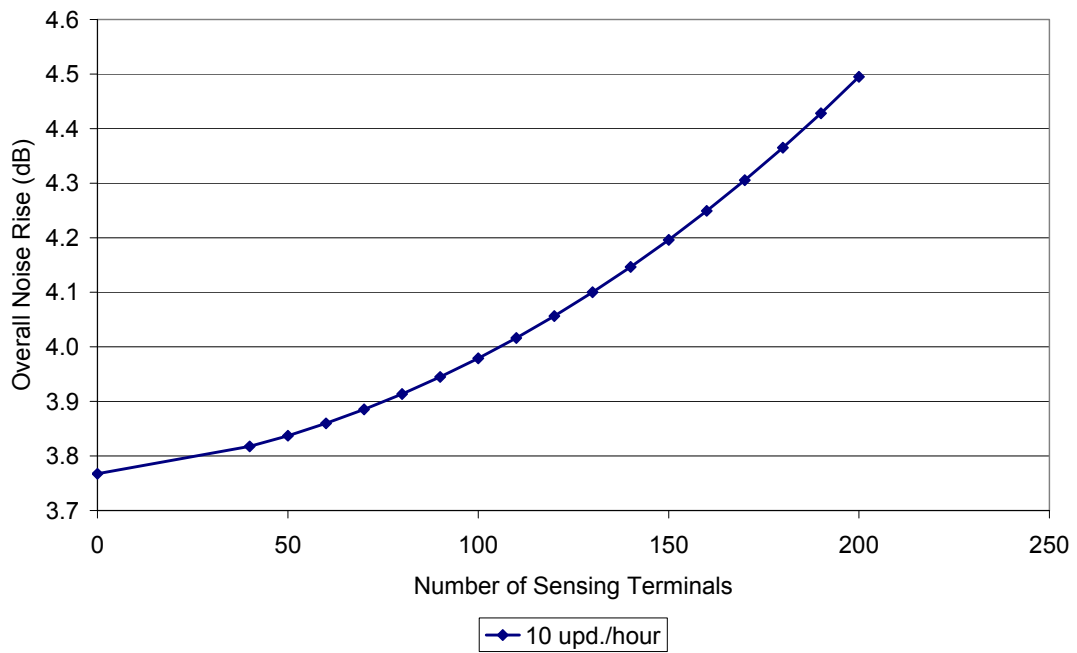
Σχήμα 2-36. Ο συντελεστής φορτίου ζεύξης ανόδου συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για ρυθμό ενημέρωσης $r_{\text{upd}}=5$ ενημ./ώρα ανά τερματικό



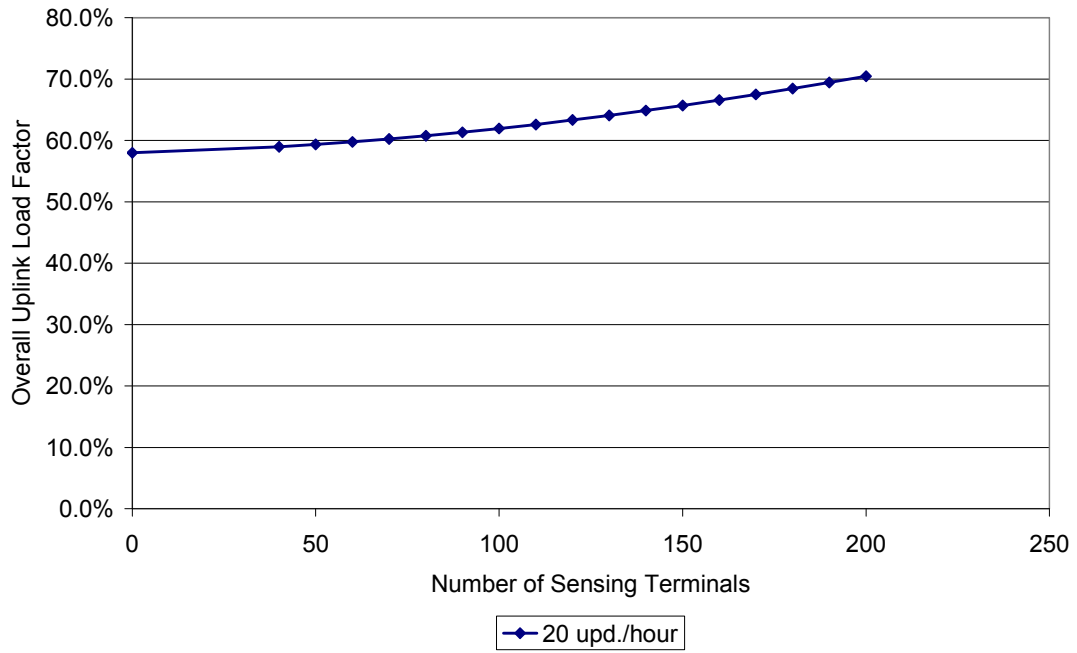
Σχήμα 2-37. Η άνοδος θορύβου συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για ρυθμό ενημέρωσης $r_{\text{upd}}=5$ ενημ./ώρα ανά τερματικό



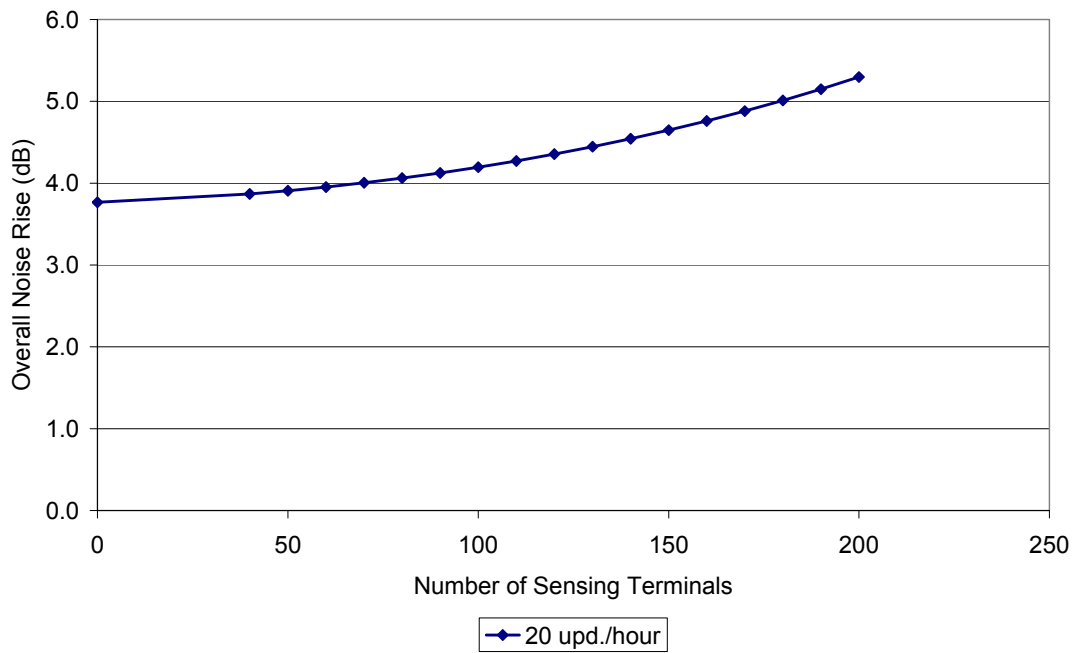
Σχήμα 2-38. Ο συντελεστής φορτίου ζεύξης ανόδου συναρτῆσει του αριθμού των τερματικών επαίσησης N , για ρυθμό ενημέρωσης $r_{\text{upd}}=10$ ενημ./ώρα ανά τερματικό



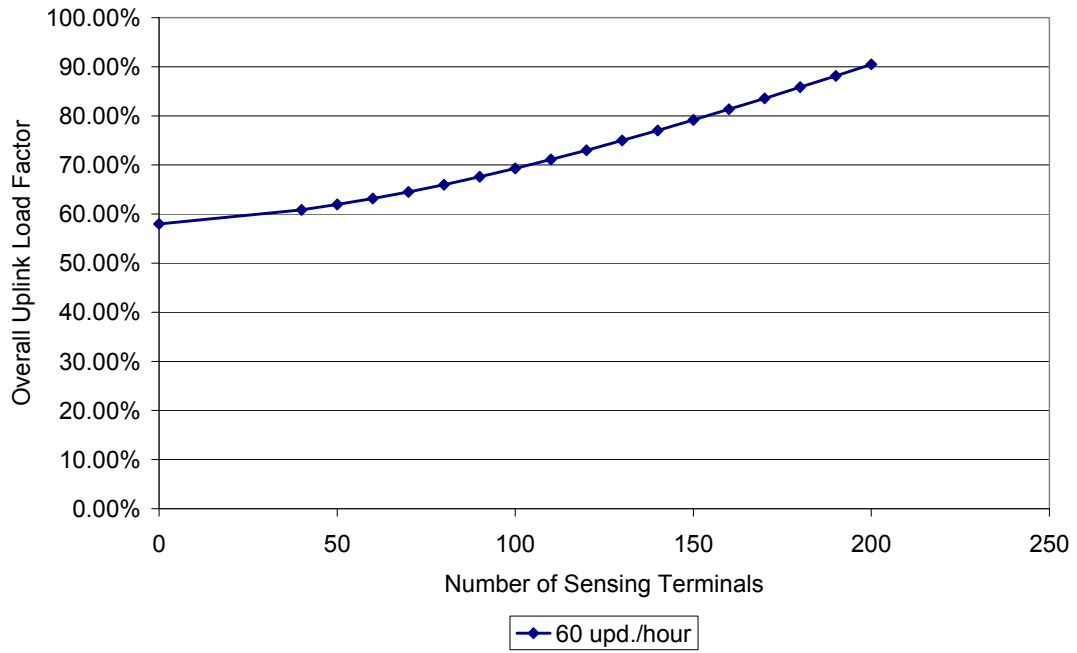
Σχήμα 2-39. Η άνοδος θορύβου συναρτῆσει του αριθμού των τερματικών επαίσησης N , για ρυθμό ενημέρωσης $r_{\text{upd}}=10$ ενημ./ώρα ανά τερματικό



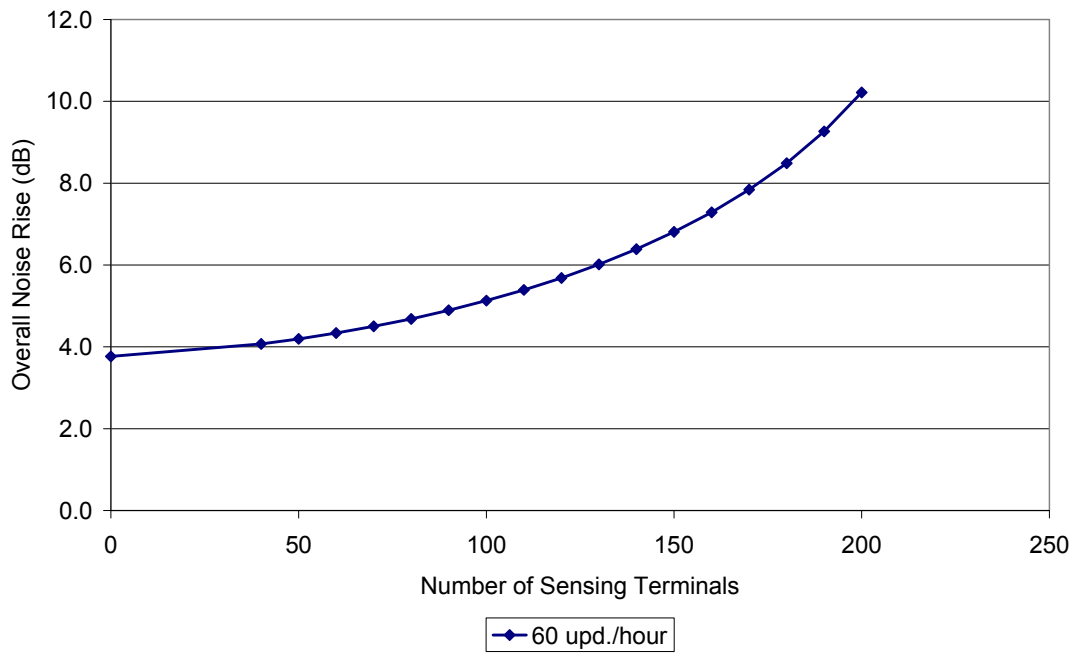
Σχήμα 2-40. Ο συντελεστής φορτίου ζεύξης ανόδου συναρτῆσει του αριθμού των τερματικών επαίσησης N , για ρυθμό ενημέρωσης $r_{\text{upd}}=20$ ενημ./ώρα ανά τερματικό



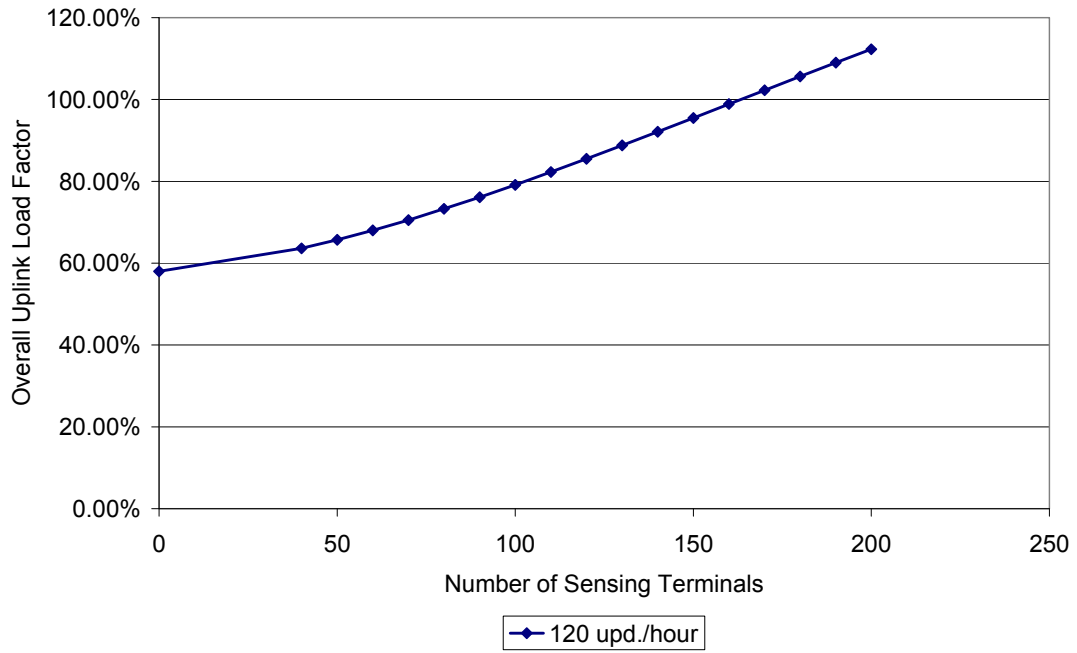
Σχήμα 2-41. Η άνοδος θορύβου συναρτῆσει του αριθμού των τερματικών επαίσησης N , για ρυθμό ενημέρωσης $r_{\text{upd}}=20$ ενημ./ώρα ανά τερματικό



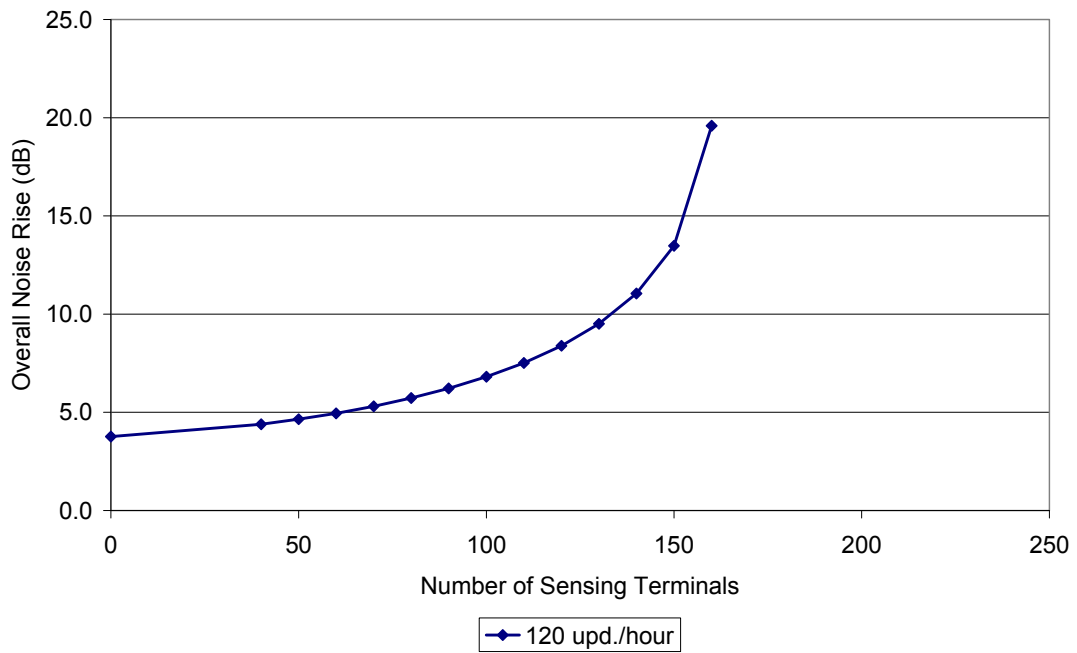
Σχήμα 2-42. Ο συντελεστής φορτίου ζεύξης ανόδου συναρτίζεται του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για ρυθμό ενημέρωσης $r_{\text{upd}}=60$ ενημ./ώρα ανά τερματικό



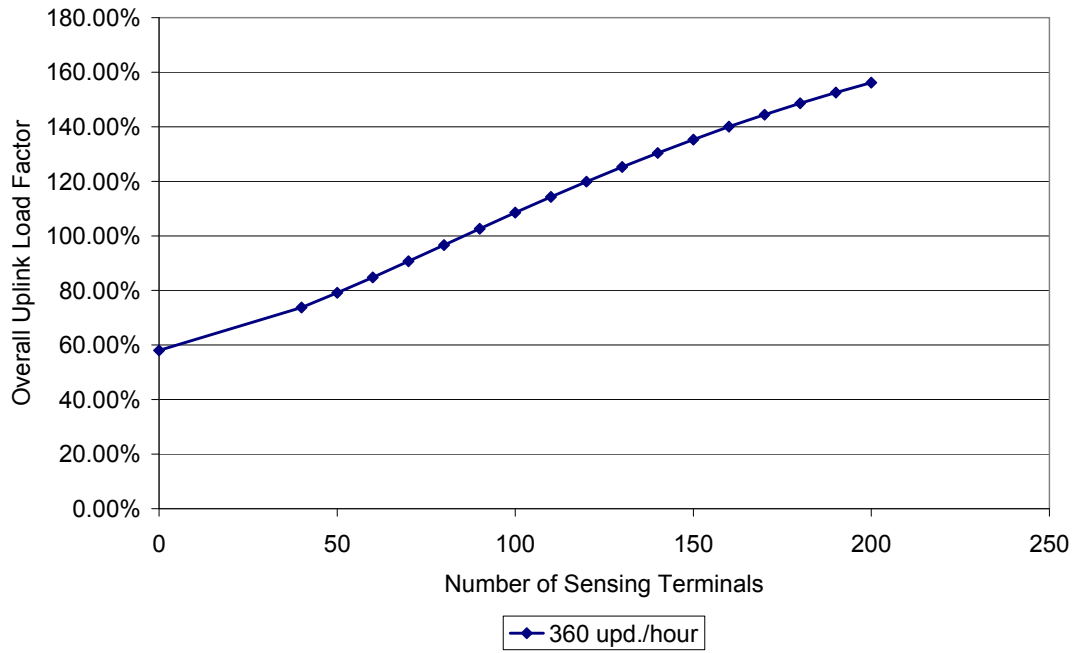
Σχήμα 2-43. Η άνοδος θορύβου συναρτίζεται του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για ρυθμό ενημέρωσης $r_{\text{upd}}=60$ ενημ./ώρα ανά τερματικό



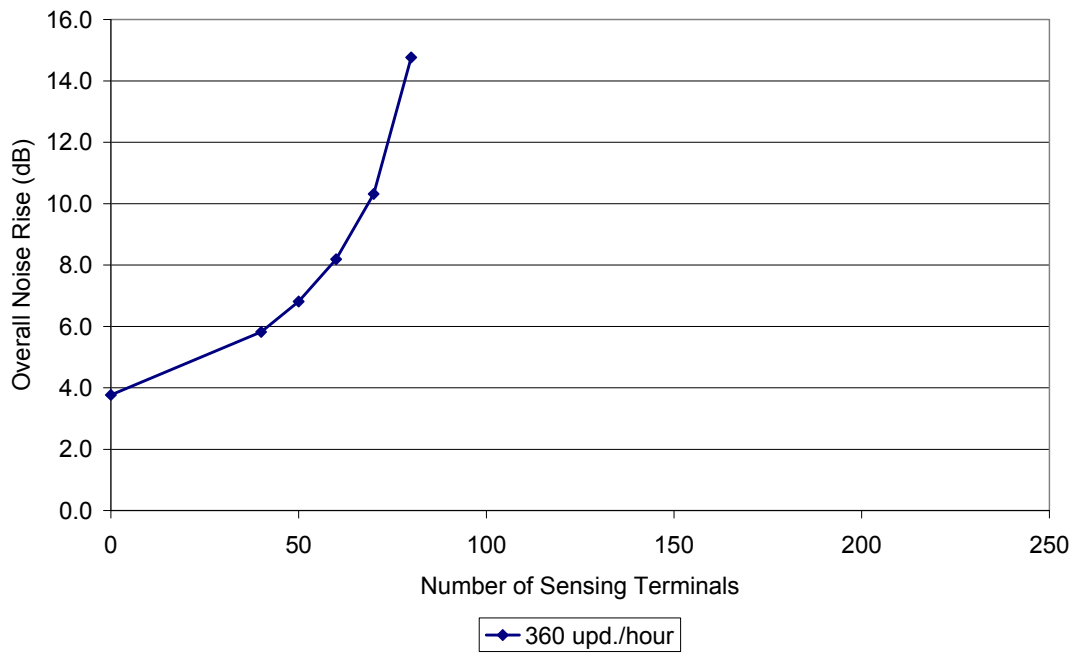
Σχήμα 2-44. Ο συντελεστής φορτίου ζεύξης ανόδου συναρτίζεται του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για ρυθμό ενημέρωσης $r_{\text{upd}}=120$ ενημ./ώρα ανά τερματικό



Σχήμα 2-45. Η άνοδος θορύβου συναρτίζεται του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για ρυθμό ενημέρωσης $r_{\text{upd}}=120$ ενημ./ώρα ανά τερματικό



Σχήμα 2-46. Ο συντελεστής φορτίου ζεύξης ανόδου συναρτῆσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για ρυθμό ενημέρωσης $r_{\text{upd}}=360$ ενημ./ώρα ανά τερματικό



Σχήμα 2-47. Η άνοδος θορύβου συναρτῆσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για ρυθμό ενημέρωσης $r_{\text{upd}}=360$ ενημ./ώρα ανά τερματικό

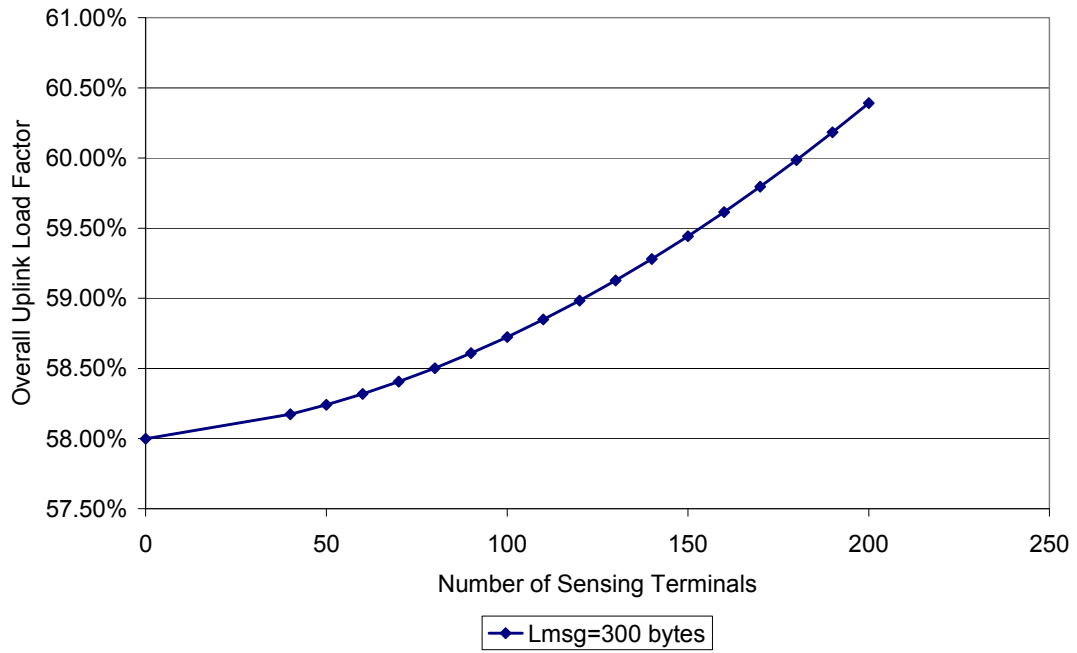
Από τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου σεναρίου (Σχήμα 2-36-Σχήμα 2-47) γίνεται φανερό ότι το σύστημα εμφανίζει πολύ ικανοποιητικές δυνατότητες κλιμάκωσης όταν ο ρυθμός ενημέρωσης είναι σχετικά χαμηλός, μέχρι 20 ενημερώσεις/ώρα ανά τερματικό. Για μεγαλύτερες, όμως, τιμές του ρυθμού ενημέρωσης, οι δυνατότητες κλιμάκωσης περιορίζονται σημαντικά, σε επίπεδα χαμηλότερα ακόμα και των 10 τερματικών για τη χειρότερη περίπτωση που εξετάζεται.

2.2.4.5 Σενάριο 3 – Κλιμακωσιμότητα συναρτήσει του μεγέθους της αναφοράς

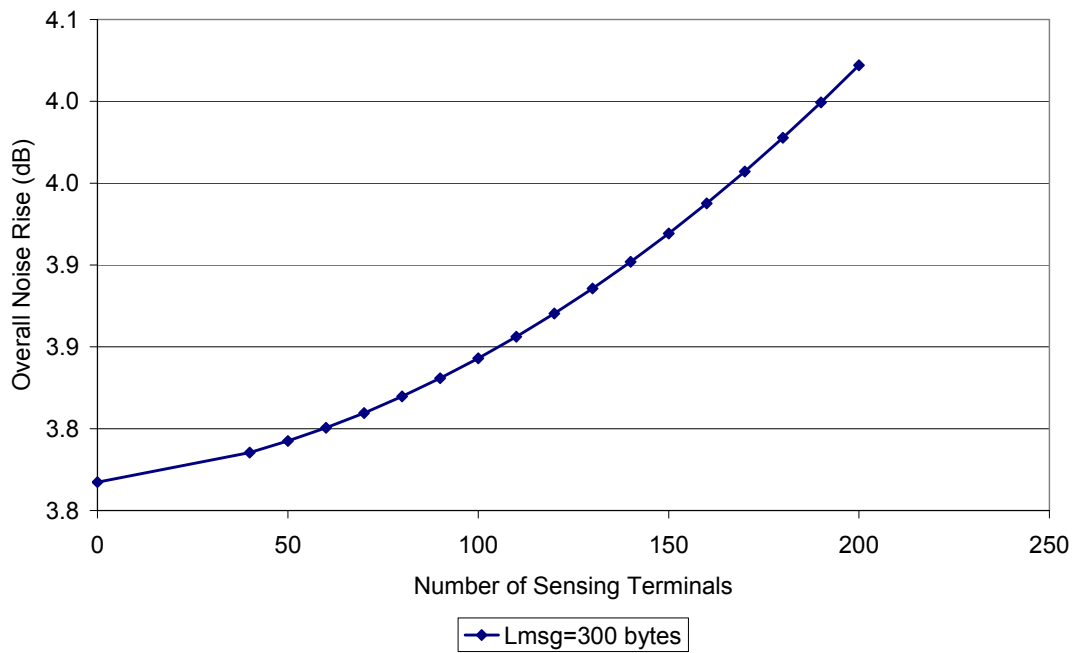
Το παρόν σενάριο στοχεύει στη μελέτη της κλιμακωσιμότητας, συναρτήσει του ρυθμού ενημέρωσης του σταθμού βάσης, L_{msg} , καθώς αυξάνεται ο αριθμός των τερματικών επαίσθησης, N . Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου που χρησιμοποιείται στο σενάριο αυτό έχουν ως εξής:

- $N = \{10, 20, \dots, 200\}$ τερματικά επαίσθησης
- $r_{upd} = 60$ ενημερώσεις ανά τερματικό ανά ώρα
- $L_{msg} = \{300, 500, 1000, 5000, 10000, 20000\}$ bytes
- $N_{VOICE} = 30$ χρήστες
- $N_{DATA} = 3$ χρήστες

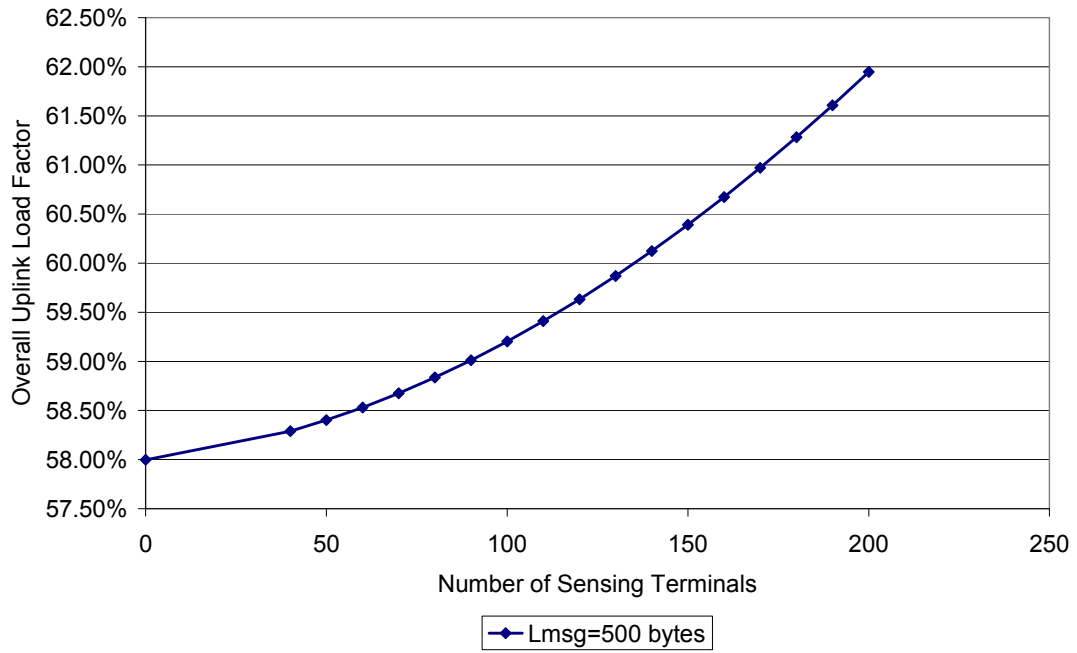
Τα αποτελέσματα εκτέλεσης του σεναρίου παρατίθενται στα σχήματα που ακολουθούν.



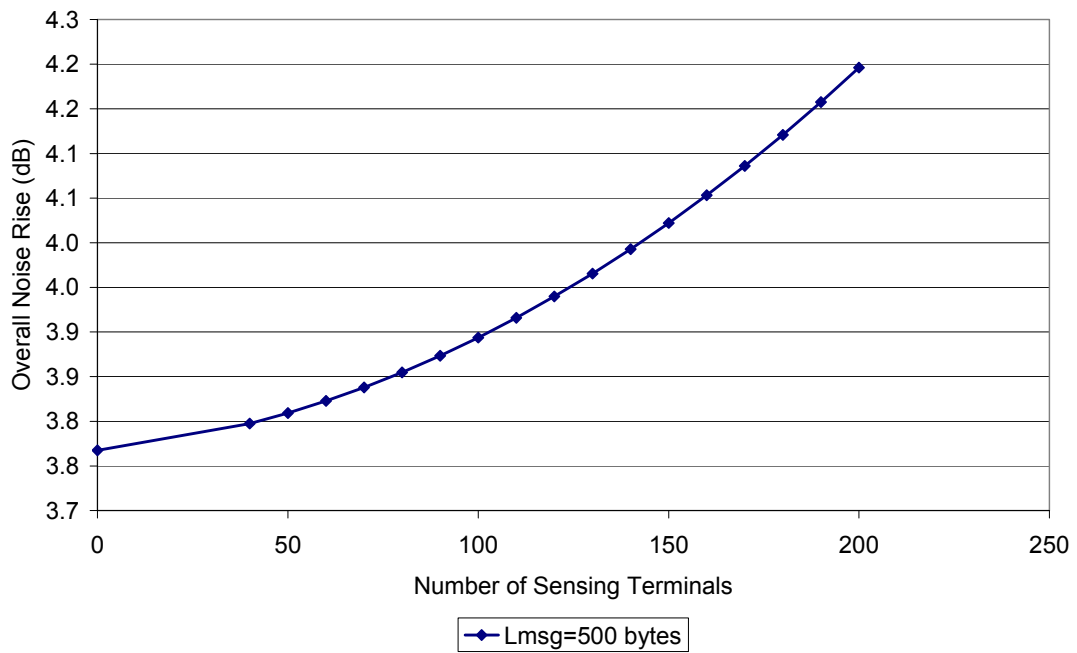
Σχήμα 2-48. Ο συντελεστής φορτίου ζεύξης ανόδου συναρτῆσει του αριθμού των τερματικών επαίσησης N , για μέσο μέγεθος αναφοράς $L_{msg}=300$ bytes



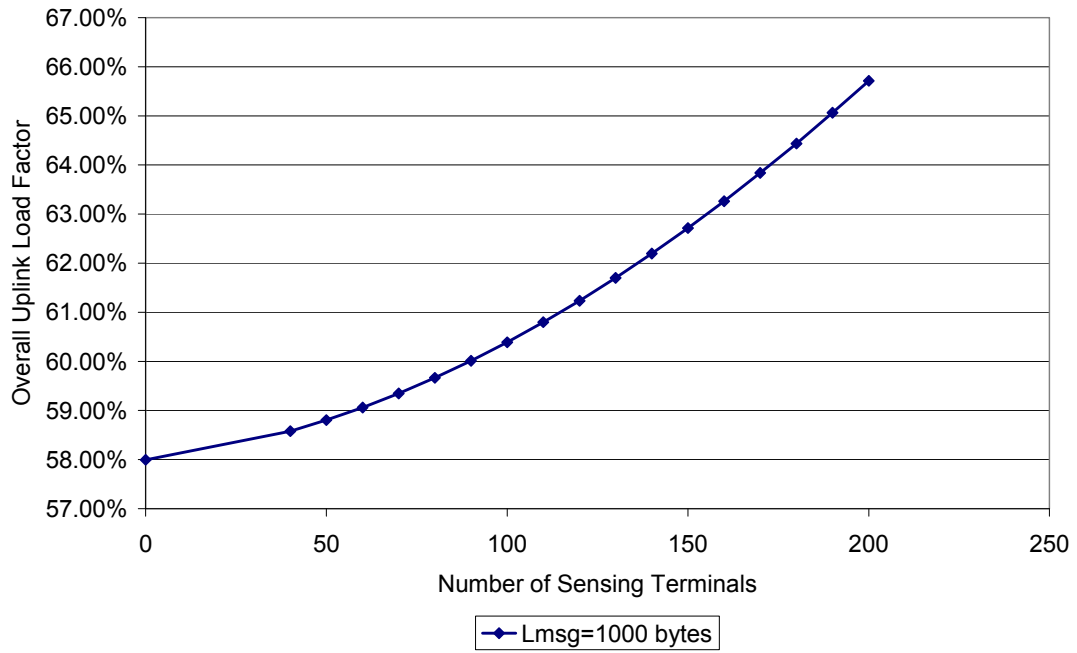
Σχήμα 2-49. Η άνοδος θορύβου συναρτῆσει του αριθμού των τερματικών επαίσησης N , για μέσο μέγεθος αναφοράς $L_{msg}=300$ bytes



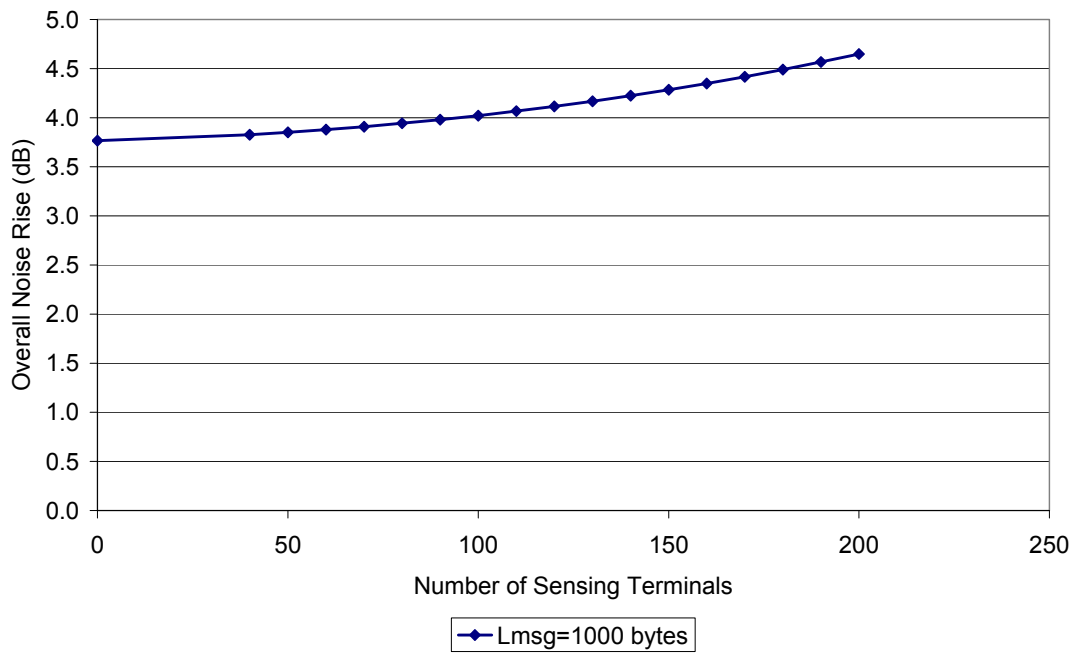
Σχήμα 2-50. Ο συντελεστής φορτίου ζεύξης ανόδου συναρτίζεται του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για μέσο μέγεθος αναφοράς $L_{msg}=500$ bytes



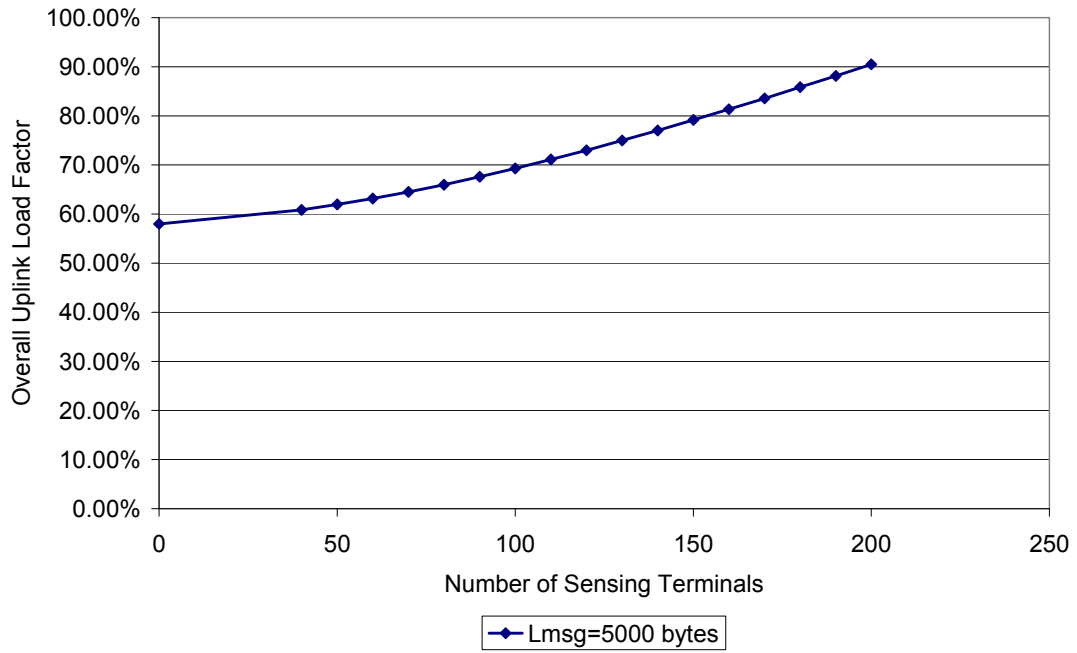
Σχήμα 2-51. Η άνοδος θορύβου συναρτίζεται του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για μέσο μέγεθος αναφοράς $L_{msg}=500$ bytes



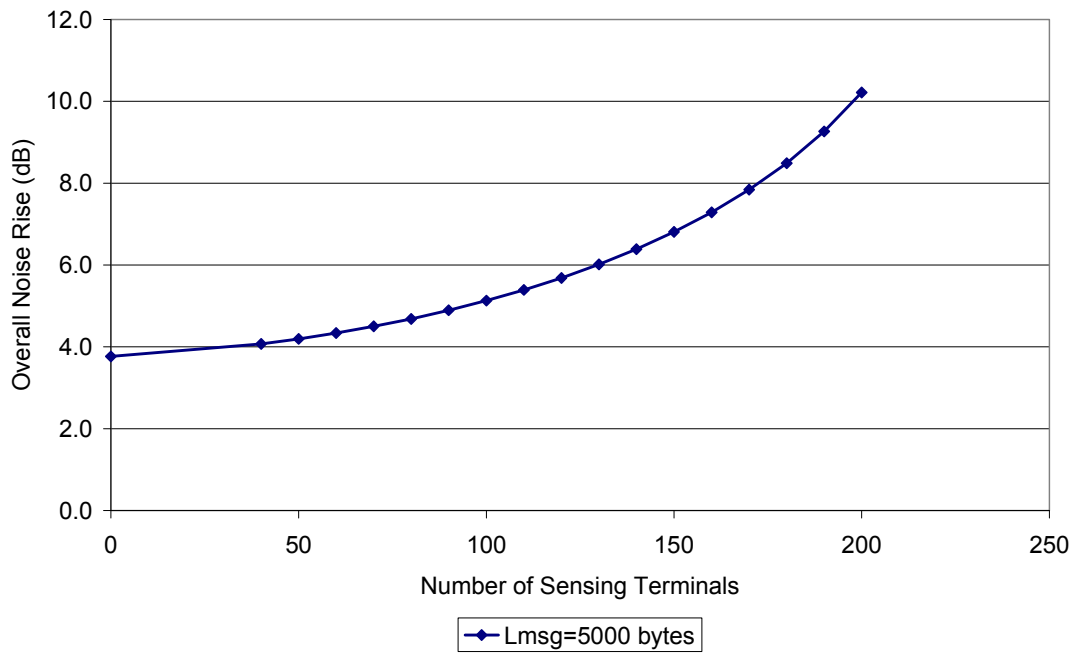
Σχήμα 2-52. Ο συντελεστής φορτίου ζεύξης ανόδου συναρτίζεται του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για μέσο μέγεθος αναφοράς $L_{msg}=1000$ bytes



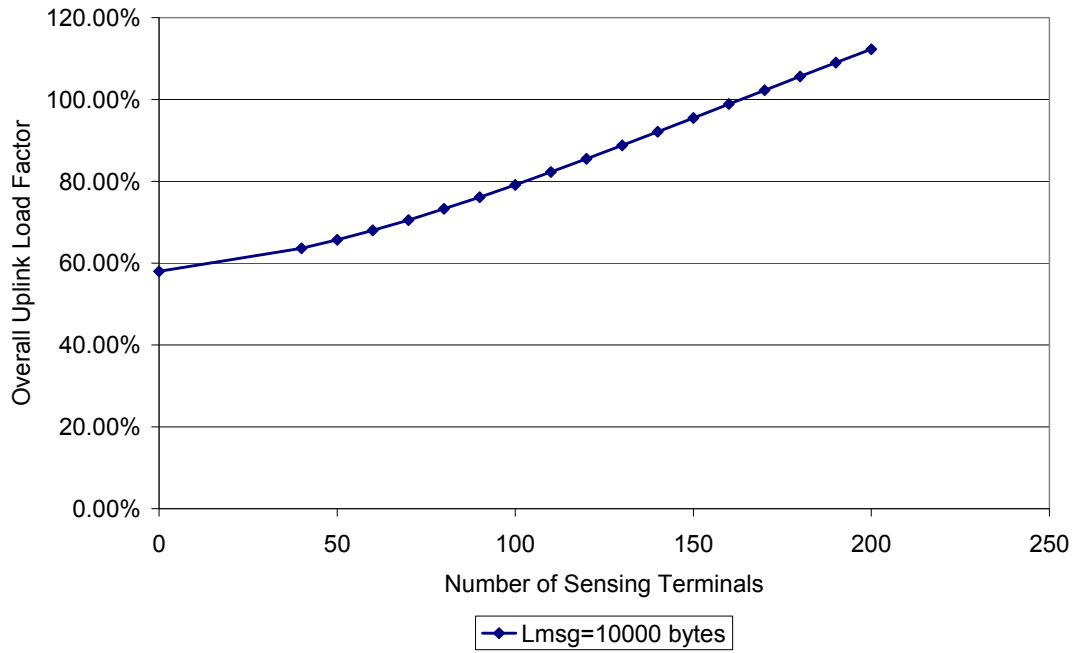
Σχήμα 2-53. Η άνοδος θορύβου συναρτίζεται του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για μέσο μέγεθος αναφοράς $L_{msg}=1000$ bytes



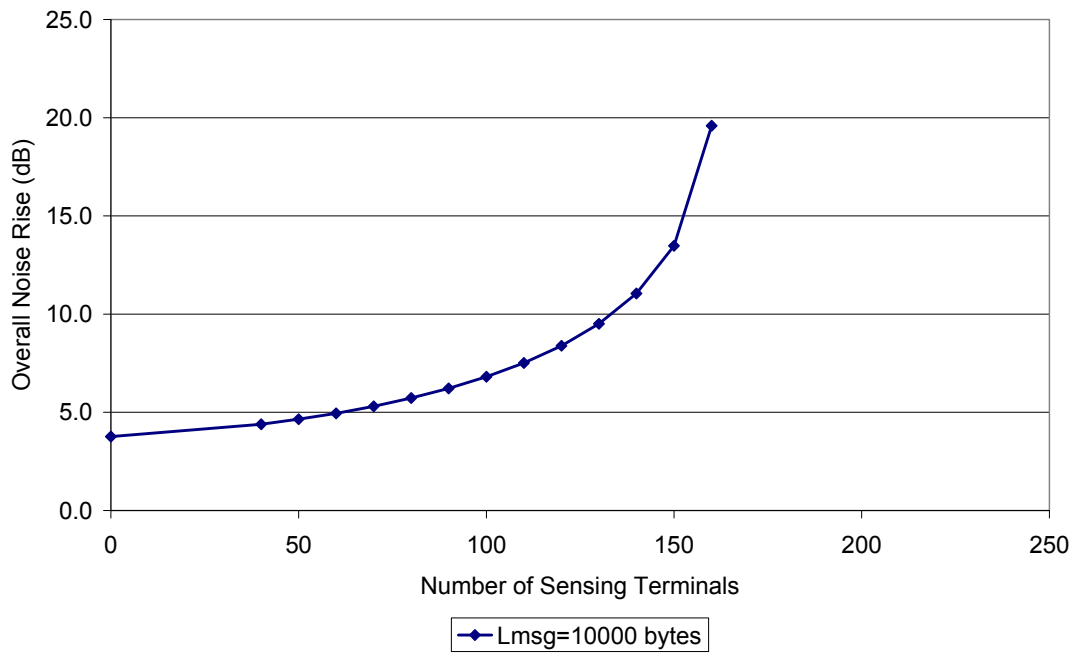
Σχήμα 2-54. Ο συντελεστής φορτίου ζεύξης ανόδου συναρτίζεται του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για μέσο μέγεθος αναφοράς $L_{msg}=5000$ bytes



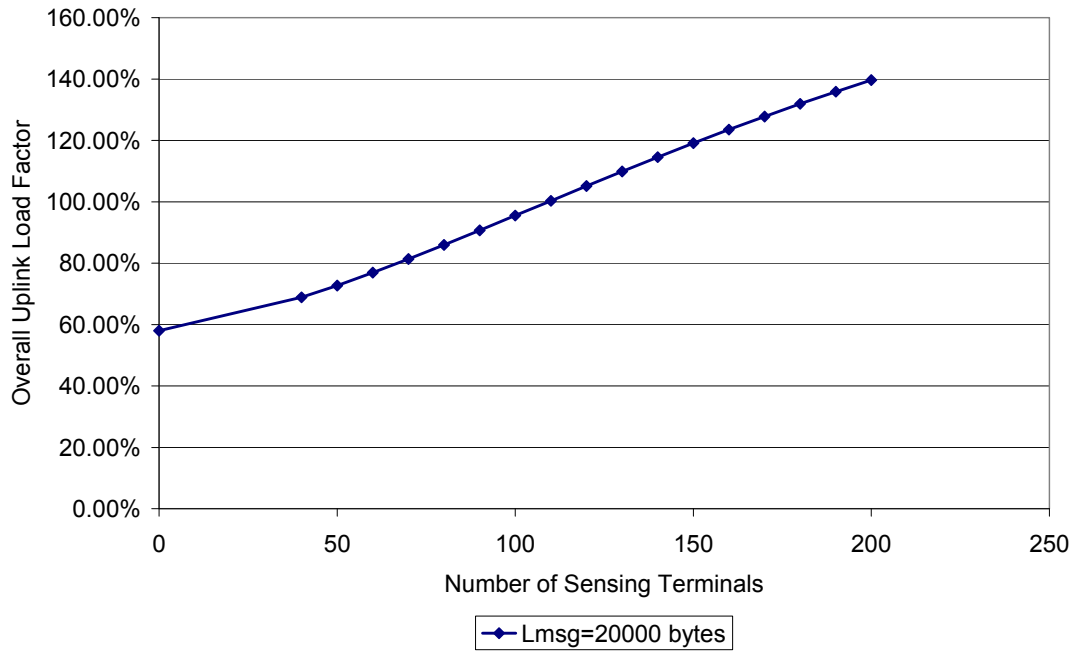
Σχήμα 2-55. Η άνοδος θορύβου συναρτίζεται του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για μέσο μέγεθος αναφοράς $L_{msg}=5000$ bytes



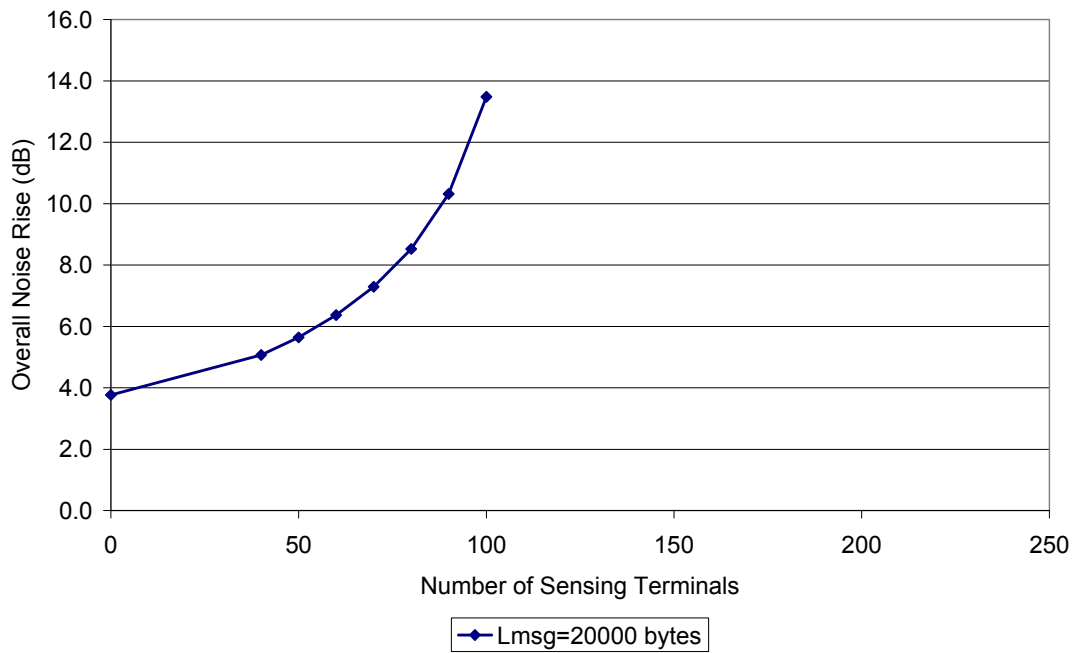
Σχήμα 2-56. Ο συντελεστής φορτίου ζεύξης ανόδου συναρτίζεται του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για μέσο μέγεθος αναφοράς $L_{msg}=10000$ bytes



Σχήμα 2-57. Η άνοδος θορύβου συναρτίζεται του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για μέσο μέγεθος αναφοράς $L_{msg}=10000$ bytes



Σχήμα 2-58. Ο συντελεστής φορτίου ζεύξης ανόδου συναρτίζεται του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για μέσο μέγεθος αναφοράς $L_{msg}=20000$ bytes



Σχήμα 2-59. Η άνοδος θορύβου συναρτίζεται του αριθμού των τερματικών επαίσθησης N , για μέσο μέγεθος αναφοράς $L_{msg}=20000$ bytes

Από τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου σεναρίου (Σχήμα 2-48-Σχήμα 2-59) γίνεται φανερό ότι το σύστημα εμφανίζει πολύ ικανοποιητικές δυνατότητες κλιμάκωσης όταν το μέγεθος των αναφορών είναι σχετικά μικρό, μέχρι 1000 bytes. Για μεγαλύτερα μεγέθη αναφορών, οι δυνατότητες κλιμάκωσης περιορίζονται σημαντικά, σε επίπεδα χαμηλότερα ακόμα και των 40 τερματικών για τη χειρότερη περίπτωση που εξετάζεται.

2.2.5 WLAN

Όταν η ενημέρωση του γνωστικού σταθμού βάσης πραγματοποιείται από τα τερματικά μέσω διεπαφής Wi-Fi (WLAN), τότε οι δυνατότητες κλιμάκωσης της διαδικασίας της επαίσθησης είναι σαφώς μεγαλύτερες, σε σύγκριση με τις τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης που εξετάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Αυτό συμβαίνει διότι οι ταχύτητες που επιτυγχάνονται από τα τερματικά είναι σημαντικά υψηλότερες, ενώ και η χωρητικότητα του συστήματος κυμαίνεται σε πολύ υψηλά επίπεδα.

Έτσι, για παράδειγμα, ας θεωρηθεί ότι σε σύστημα WLAN, έστω τύπου 802.11b [9]-[10], 200 τερματικά επαίσθησης διαμοιράζονται 11 Mbps και ότι η στάθμη κορεσμού λόγω συγκρούσεων είναι ίση με 0.8. Ας υποθεθεί, επίσης, ότι μόνο το 20% του διαθέσιμου εύρου ζώνης επιτρέπεται να χρησιμοποιηθεί για λόγους επαίσθησης. Τότε προκύπτει ότι σε κάθε τερματικό επαίσθησης αναλογεί ταχύτητα μετάδοσης ίση προς:

$$R_{sense} = \frac{11 \cdot 10^6 \cdot 0.8 \cdot 0.2}{200} = 8.8 \text{ Kbps}$$

Η ταχύτητα αυτή επαρκεί για τη μετάδοση ακόμα και μεγάλων αναφορών της τάξεως των 20 Kbytes σε μερικά δευτερόλεπτα (περίπου 18 sec). Συνεπώς, μπορεί να συναχθεί από τα προηγούμενα ότι στην περίπτωση τεχνολογίας WLAN οι δυνατότητες κλιμάκωσης είναι εξαιρετικά ικανοποιητικές.

2.2.6 Επίλογος

Όπως φάνηκε από την εκτενή μελέτη που παρατέθηκε, οι δυνατότητες κλιμάκωσης της διαδικασίας της επαίσθησης επηρεάζονται από μια πληθώρα παραμέτρων, ανάλογα και με τον τύπο της τεχνολογίας ασύρματης πρόσβασης που χρησιμοποιείται για την αποστολή των αναφορών από τα τερματικά. Εν γένει, οι δυνατότητες αυτές ποικίλουν, ανάλογα με τις τιμές που προσδίδονται σε παραμέτρους όπως το μέσο μέγεθος των αναφορών, ο ρυθμός ενημέρωσης του σταθμού βάσης, αλλά και σε ειδικές παραμέτρους και χαρακτηριστικά των τεχνολογιών ραδιοπρόσβασης, όπως, επί παραδείγματι, ο αριθμός των διαθέσιμων SDCCH στο GSM, ο αριθμός των διαθέσιμων καναλιών PDCH στο GPRS ή το υπάρχον φορτίο κίνησης στο UMTS κ.ά. Το πλήθος και η ποικιλομορφία των παραμέτρων που επενεργούν στην κλιμακωσιμότητα της επαίσθησης κατέστησαν απαραίτητη μια εκτενή και όσο το δυνατόν πληρέστερη μελέτη της τελευταίας. Καθώς η διενέργεια της διαδικασίας της επαίσθησης επιτελείται μέσω των ίδιων ραδιοπόρων με εκείνους που χρησιμοποιούνται για την ικανοποίηση του κανονικού φορτίου κίνησης, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη και χρήση κατανεμημένων αλγορίθμων που θα είναι σε θέση να επιτύχουν έναν ικανοποιητικό συμβιβασμό ανάμεσα στο βαθμό χρησιμοποίησης των διαθέσιμων ραδιοπόρων και στην ταχύτητα συλλογής των αναφορών επαίσθησης. Με το θέμα αυτό καταπιάνεται το επόμενο κεφάλαιο.

2.3 Παραπομπές

- [1] “IBM Autonomic Computing manifesto”, IBM, 2001.
- [2] Y. Wang, “The theoretical framework of cognitive informatics”, *International Journal of Cognitive Informatics and Natural Intelligence*, vol. 1, no. 1, pp. 1-27, Jan. 2007.
- [3] Y. Wang, “Towards the theoretical foundations of autonomic computing”, *International Journal of Cognitive Informatics and Natural Intelligence*, vol. 1, no. 3, June 2007.
- [4] S. Dobson, S. Denazis, A. Fernandez, D. Gaiti, E. Gelenbe, F. Massacci, P. Nixon, F. Saffre, N. Schmidt, and F. Zambonelli, “A survey of autonomic communications”, *ACM Trans. Auton. Adapt. Syst.*, vol. 1, no. 2, pp. 223-259, Dec. 2006.
- [5] B. Jennings, S. van der Meer, S. Balasubramaniam, D. Botvich, M. O. Foghlu, W. Donnelly, and J. Strassner, “Towards autonomic management of communications networks”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, no. 10, pp.112-121, Oct. 2007.
- [6] R. Sterritt, “Autonomic computing”, *Innovations in Systems and Software Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 79-88, 2005.
- [7] W. Enck, P. Traynor, P. McDaniel, and T. La Porta, “Exploiting Open Functionality in SMS Capable Cellular Networks”, in *12th ACM Conf. on Computer and Comm. Security (CCS'05)*, Alexandria, Virginia, USA, Nov. 2005.
- [8] National Communications System, “SMS over SS7”, Technical Report - Technical Information Bulletin 03-2 (NCS TIB 03-2), Dec. 2003.
- [9] IEEE-SA Standards Board, “802.11b-1999 Higher Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz band”, Approved Sept. 16, 1999.
- [10] IEEE Computer Society, “Corrigenda to 802.11b-1999 Higher Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz band”, Nov. 7, 2001.

Κεφάλαιο 3

Αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού της διαδικασίας ενημέρωσης του γνωστικού σταθμού βάσης

3 Αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού της διαδικασίας ενημέρωσης του γνωστικού σταθμού βάσης

3.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, έγινε μια εκτενής μελέτη της κλιμακωσιμότητας της διαδικασίας ενημέρωσης του γνωστικού σταθμού βάσης από τα τερματικά επαίσθησης. Η συγκεκριμένη διαδικασία της γνωστικής λειτουργίας της επαίσθησης συνιστά μια κρίσιμη πτυχή της, καθώς μέσω αυτής υλοποιείται η συλλογή επαισθητικών δεδομένων από το γνωστικό σταθμό βάσης και καθίσταται, συνεπώς, δυνατή η παρακολούθηση του ραδιοπεριβάλλοντος.

Χαρακτηριστικό γνώρισμα της εν λόγω διαδικασίας είναι η ταυτόχρονη χρήση ζεύξεων ανόδου από πολλαπλά τερματικά επαίσθησης, τα οποία διαθέτουν πανομοιότυπο ή έστω παρόμοιο όγκο δεδομένων προς μετάδοση. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, εμφανίζει, δηλαδή, υψηλή συχνότητα εκτέλεσης, και δεσμεύει μέρος των ίδιων ραδιοπόρων που χρησιμοποιούνται για την εξυπηρέτηση της κανονικής κίνησης των χρηστών.

Τούτο έχει ως συνέπεια ότι μια διαδικασία ενημέρωσης οφείλει να επιτυγχάνει το βέλτιστο συμβιβασμό ανάμεσα σε δύο αντικρουόμενους στόχους:

- τη συγκέντρωση των επαισθητικών δεδομένων της διαδικασίας στο σταθμό βάσης το ταχύτερο δυνατόν, δηλαδή με την ελάχιστη δυνατή συνολική καθυστέρηση
- την εξασφάλιση της ελάχιστης δυνατής επίδρασης στους διαθέσιμους ραδιοπόρους του δικτύου, ώστε να μην πληγεί η ικανότητα του σταθμού βάσης να εξυπηρετεί την κανονική (μη επαισθητική) κίνηση των χρηστών

Η κρισιμότητα της επαισθητικής διαδικασίας της ενημέρωσης του σταθμού βάσης, σε συνδυασμό με την απαίτηση ταυτόχρονης ικανοποίησης των δύο προαναφερθέντων αντικρουόμενων στόχων, οδηγεί στην ανάγκη εύρεσης αλγορίθμων αποτελεσματικού χρονοπρογραμματισμού (scheduling) των τερματικών επαίσθησης. Αντικείμενο του παρόντος κεφαλαίου είναι η εισαγωγή και ανάλυση καινοτόμων αλγορίθμων που επιτυγχάνουν ακριβώς αυτόν το διττό σκοπό που προαναφέρθηκε.

Οι αλγόριθμοι που θα παρουσιαστούν στο παρόν κεφάλαιο συγκεντρώνουν, επίσης, τα εξής χαρακτηριστικά:

- Πρόκειται για τεχνικές έμμεσου και όχι άμεσου χρονοπρογραμματισμού, με την έννοια ότι ο σταθμός βάσης δεν καθοδηγεί ένα προς ένα τα συμμετέχοντα τερματικά επαίσθησης για το πότε θα εκκινήσουν και πότε θα σταματήσουν την εκπομπή τους, κάτι που θα οδηγούσε σε επιβάρυνση των καναλιών σηματοδοσίας.
- Αποφεύγεται η εισαγωγή καινούριων καναλιών σηματοδοσίας και προτιμάται η χρήση του στρώματος εφαρμογής.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου, οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι παρουσιάζονται με αναλυτικό τρόπο. Για τη διατύπωσή τους, ακολουθείται μια μαθηματικοποιημένη προσέγγιση. Συνοπτικά, η διατριβή εισάγει και αναλύει τους εξής αλγορίθμους:

1. *Birthday Paradox Scheduler (BPS)*: Πρόκειται για έναν αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού για δίκτυα πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης κώδικα (CDMA) εμπνευσμένο από το «birthday paradox» («παράδοξο των γενεθλίων»).
2. *Chained Binomial Distribution Scheduler (CBDS)*: Πρόκειται για έναν αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού για δίκτυα πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης χρόνου (TDMA) βασισμένο σε ένα μοντέλο αλυσιδωτών δυωνυμικών κατανομών.
3. *Game Theoretic Scheduler (GTS)*: Πρόκειται για έναν αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού για δίκτυα πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης χρόνου (TDMA) βασισμένο στη θεωρία παιγνίων (game theory).

3.2 Μοντέλο χρονοπρογραμματισμού «birthday paradox»

3.2.1 Γενικά

Σε δίκτυα τύπου CDMA (πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης κώδικα), η επαισθητική διαδικασία ενημέρωσης εγείρει σημαντικές προκλήσεις, καθώς οι ταυτόχρονες εκπομπές στη ζεύξη ανόδου αυξάνουν την ενδοκυψελική παρεμβολή και οδηγούν σε μεγαλύτερο συντελεστή φορτίου ζεύξης ανόδου (uplink load factor). Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι η ανάπτυξη ενός αποτελεσματικού μοντέλου

χρονοπρογραμματισμού των αναφορών των τερματικών επαίσθησης σε δίκτυα CDMA, το οποίο θα είναι σε θέση να επιδιώκει το βέλτιστο δυνατό συνδυασμό συνολικής καθυστέρησης και προκαλούμενης στους ραδιοπόρους επιβάρυνσης. Η λύση που προτείνεται βασίζεται σε μια καινοτόμο πιθανοτική προσέγγιση εμπνεσμεύνη από το «birthday paradox» («παράδοξο των γενεθλίων») [1]-[5]. Μια τέτοια προσέγγιση δεν έχει μέχρι στιγμής υιοθετηθεί ούτε επιχειρηθεί στη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία.

3.2.2 Θεωρητικό υπόβαθρο

Στα επόμενα, θεωρείται ένα UMTS κελί το οποίο έχει n_u τερματικά επαίσθησης, $u_1, u_2, \dots, u_{n_u} \in U$, όπου $|U|=n_u$. Κάθε τερματικό έχει την ίδια σχεδόν ποσότητα δεδομένων να αποστείλει στο σταθμό βάσης και, για το σκοπό αυτό, επιλέγει ανεξάρτητα και τυχαία ένα ακριβώς διάστημα εκ των $s_1, s_2, \dots, s_{n_s} \in S$, προκειμένου να εκπέμψει, όπου $|S|=n_s$. Η κατά τυχαίο τρόπο, κατανεμημένη επιλογή ενός διαστήματος εκπομπής έχει το πλεονέκτημα ότι αποφεύγεται η καθοδήγηση των τερματικών από το σταθμό βάσης και η αντίστοιχη επιβάρυνση στη ζεύξη καθόδου. Εξάλλου, ο μέγιστος αριθμός διαστημάτων $|S|=n_s$ από τα οποία θα κληθούν τα τερματικά να επιλέξουν μπορεί να συμπεριληφθεί στο μήνυμα της αίτησης επαίσθησης του σταθμού βάσης προς τα τερματικά.

Οι ταυτόχρονες εκπομπές είναι, εν πολλοίς, ανεπιθύμητες κατά τη διαδικασία ενημέρωσης του σταθμού βάσης, αφού αυξάνουν το συντελεστή φορτίου ζεύξης ανόδου, ulf , ο οποίος ορίζεται ως εξής, για ένα κελί UMTS [6]-[7]:

$$ulf = (1+r) \cdot \sum_{j=1}^N \frac{1}{1 + \frac{w}{\left(\frac{E_b}{N_o}\right)_j \cdot R_j \cdot x_j}} \quad (3.1)$$

όπου:

- N είναι ο συνολικός αριθμός των ενεργών χρηστών
- w είναι ο ρυθμός chip (3.84 Mcps)
- x_j είναι ο συντελεστής δραστηριότητας του χρήστη j ($x_j=1$ για υπηρεσία δεδομένων, 0.67 για υπηρεσία φωνής)
- R_j είναι ο ρυθμός μετάδοσης bit του χρήστη j

- r είναι ο λόγος της διακυψελικής προς την ενδοκυψελική παρεμβολή ($r=0.55$ για ομοιοκατευθυντικές κεραιές, 0.65 για κατευθυντικές κεραιές τιμών)
- $(E_b/N_o)_j$ είναι ο λόγος της ενέργειας ανά bit προς τη φασματική πυκνότητα ισχύος θορύβου που απαιτείται από το χρήστη j , π.χ. $(E_b/N_o)_j=1.5$ dB για μια υπηρεσία δεδομένων ρυθμού 144 Kbps

Συσχετιζόμενη με το συντελεστή φορτίου ζεύξης ανόδου είναι η άνοδος θορύβου (noise rise) του κελιού, η οποία ορίζεται ως εξής (σε dB):

$$\text{Noise Rise} = -10 \cdot \log(1 - ulf) \quad (3.2)$$

Σημειωτέον ότι όταν ο συντελεστής φορτίου ζεύξης ανόδου πλησιάζει το 100%, η αντίστοιχη άνοδος θορύβου προσεγγίζει το άπειρο και το σύστημα φτάνει στη χωρητικότητα κορεσμού του. Αυτό προκαλεί έναν περιορισμό ως προς τον αριθμό των χρηστών που δύνανται να είναι ταυτόχρονα ενεργοί σε ένα CDMA κελί, οδηγώντας στην υπό θεώρηση περίπτωση στον περιορισμό του αριθμού των ταυτόχρονων εκπομπών των τερματικών επαίσθησης. Ωστόσο, λιγότερες ταυτόχρονες εκπομπές σημαίνουν και μεγαλύτερη καθυστέρηση συλλογής του συνόλου των επαισθητικών δεδομένων.

3.2.3 Μοντελοποίηση του προβλήματος

Εφόσον οι ταυτόχρονες εκπομπές από τα τερματικά επαίσθησης είναι, ως επί το πλείστον, ανεπιθύμητες, μπορούν να εκληφθούν ως συγκρούσεις και να μοντελοποιηθούν σύμφωνα με μια γενίκευση του παράδοξου των γενεθλίων.

Έστω $H : U \rightarrow S$ μια συνάρτηση κατακερματισμού (hash function), όπου το σύνολο U των τερματικών επαίσθησης είναι το πεδίο ορισμού και το σύνολο S των διαστημάτων είναι το πεδίο τιμών. Αν $H(u_i) = s_j$, σημαίνει ότι ο χρήστης $u_i \in U$ επιλέγει να εκπέμψει στο διάστημα $s_j \in S$. Μια σύγκρουση για την H συνίσταται σε ένα διακριτό ζεύγος $u_i, u_j \in U, i \neq j$, τέτοιο ώστε $H(u_i) = H(u_j)$. Οι πολλαπλές συγκρούσεις είναι μια εξίσου σημαντική έννοια και ορίζονται ομοίως. Μια k -σύγκρουση ($k \in \mathbb{N}$) για την H υφίσταται εφόσον υπάρχει σύνολο $V \subseteq U$ τέτοιο ώστε $V = \{u_i \mid H(u_i) = s\}, s \in S, 1 \leq i \leq n_u$, και $|V| = k$.

Σύμφωνα με την εξίσωση (2.2), αν n τερματικά επαίσθησης εκπέμπουν ταυτόχρονα, τότε ο συντελεστής φορτίου ζεύξης ανόδου που οφείλεται σε αυτά είναι (θέτοντας το συντελεστή δραστηριότητας ίσο με 1):

$$ulf_{sense}(n) = \frac{n \cdot (1+r)}{1 + \frac{w}{\left(\frac{E_b}{N_o}\right) \cdot R}} \quad (3.3)$$

Το άθροισμα του συντελεστή φορτίου ζεύξης ανόδου που οφείλεται στα τερματικά επαίσθησης και του συντελεστή φορτίου ζεύξης ανόδου λόγω κανονικής κίνησης πρέπει να είναι περιορισμένο κάτω του 100%, οδηγώντας σε ένα άνω φράγμα για το $A_{ULF_{sense}}$ για το συντελεστή ulf_{sense} σαφώς χαμηλότερο του 100% (π.χ., $A_{ULF_{sense}} = 30\%$):

$$ulf_{sense}(n) \leq A_{ULF_{sense}} \quad (3.4)$$

Η απαίτηση την οποία αντιπροσωπεύει η σχέση (3.4) μπορεί να μετριάσσει, εφαρμόζοντας μια πιθανοτική προσέγγιση, σύμφωνα με την οποία ο συντελεστής ulf_{sense} δε θα πρέπει να υπερβαίνει το φράγμα $A_{ULF_{sense}}$ με πιθανότητα μεγαλύτερη από A_p , όπου $A_p \in [0,1]$:

$$P\left[ulf_{com}\left(\left|H^{-1}(s)\right|\right) \geq A_{ULF_{sense}}\right] \leq A_p, \quad s \in S \quad (3.5)$$

Ισοδύναμα, η απαίτηση (3.5) μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$P\left[\left|H^{-1}(s)\right| \geq k\right] \leq A_p, \quad s \in S, \quad \text{με } k \in \mathbb{N} \text{ τέτοιο ώστε}$$

$$k = \min(\ell) : ulf_{com}\left(\left|H^{-1}(\ell)\right|\right) > A_{ULF_{sense}}, \quad \ell \in \mathbb{N} \quad (3.6)$$

Παράλληλα, η όλη διαδικασία ενημέρωσης του σταθμού βάσης είναι χρονικά περιοριζόμενη, καθόσον η συλλογή των αναφορών όλων των τερματικών επαίσθησης πρέπει να πραγματοποιηθεί το ταχύτερο δυνατόν. Αυτό οδηγεί σε μια επιπρόσθετη απαίτηση, σύμφωνα με την οποία η μέγιστη συνολική καθυστέρηση συλλογής των αναφορών δεν πρέπει να υπερβαίνει ένα χρονικό όριο A_T τέτοιο ώστε:

$$n_s \cdot T \leq A_T \quad (3.7)$$

όπου $n_s = |S|$, και T η χρονική διάρκεια ενός διαστήματος εκπομπής, δηλαδή:

$$T = \frac{\langle \text{msg length} \rangle}{\langle \text{data rate} \rangle} + \langle \text{guard time} \rangle \quad (3.8)$$

Ορίζοντας ένα νέο όριο A_S ως εξής:

$$A_s = \left\lceil \frac{A_T}{T} \right\rceil \quad (3.9)$$

η απαίτηση (3.7) μπορεί να ξαναγραφεί σε απλούστερη μορφή:

$$n_s \leq A_s, \quad A_s \in \mathbb{N} \quad (3.10)$$

Αφού κάθε χρήστης διαλέγει ένα διάστημα εκπομπής ανεξάρτητα και τυχαία, η πιθανότητα της σχέσης (3.6) συνιστά μια συνάρτηση του αριθμού των διαστημάτων n_s , του αριθμού των τερματικών επαίσθησης n_u , καθώς, επίσης, και της παραμέτρου k , δηλαδή:

$$P\left[|H^{-1}(s)| \geq k\right] = p(n_s, n_u, k) \quad (3.11)$$

Θεωρώντας ότι ο αριθμός των τερματικών επαίσθησης στο κελί, n_u , είναι γνωστός και καθοριζόμενος από το σταθμό βάσης, αναζητείται ο ελάχιστος αριθμός διαστημάτων, n_s , που ικανοποιεί τόσο την απαίτηση (3.6) όσο και τη (3.10). Με άλλα λόγια, το πρόβλημα διατυπώνεται πλέον ως εξής: Ποιος είναι ο ελάχιστος αριθμός διαστημάτων (τιμή της παραμέτρου n_s) ο οποίος να εξασφαλίζει:

(α) ότι ο συντελεστής φορτίου ζεύξης ανόδου δε θα ξεπεράσει ένα δεδομένο όριο (τιμή της παραμέτρου $A_{ULF_{sense}}$) με πιθανότητα μεγαλύτερη από ένα προκαθορισμένο κατώφλι (τιμή της παραμέτρου A_P), και

(β) ότι η συνολική διάρκεια της διαδικασίας ενημέρωσης του σταθμού βάσης δε θα υπερβεί ένα δεδομένο χρονικό περιορισμό (τιμή της παραμέτρου A_S);

3.2.4 Επίλυση του προβλήματος και αποτελέσματα

3.2.4.1 Επίλυση του προβλήματος

Προκειμένου να επιτευχθεί η επίλυση του υπό εξέταση προβλήματος, όπως αυτό διατυπώθηκε παραπάνω, μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι η πιθανότητα της σχέσης (3.6) εκφράζει, εν τέλει, την πιθανότητα τουλάχιστον k τερματικά να συγκρουστούν (να επιλέξουν το ίδιο διάστημα εκπομπής), στοιχείο το οποίο μάς προτρέπει να καταφύγουμε στο παράδοξο των γενέθλιων και την αντίστοιχη θεωρία [1]-[5]. Ως εκ τούτου, η εν λόγω πιθανότητα μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση:

$$p(n_s, n_u, k) = 1 - \sum_{j=1}^{k-1} Q(n_s, n_u, j) \quad (3.12)$$

στην οποία γίνεται χρήση του ακόλουθου αναδρομικού τύπου:

$$Q(n_s, n_u, \ell) = \begin{cases} 0, & \text{if } (n_u < \ell) \text{ or } (n_s < 1) \\ \text{αλλιώς :} \\ \left[\prod_{i=0}^{n_u-1} 1 - \frac{i}{n_s} \right], & \text{αν } \ell = 1 \\ \text{αλλιώς :} \\ \sum_{i=1}^{\lfloor \frac{n_u}{\ell} \rfloor} q(n_s, n_u, \ell, i) \cdot A(n_s, n_u, \ell, i) \end{cases} \quad (3.13)$$

όπου:

$$q(n_s, n_u, \ell, i) = \left(1 - \frac{i}{n_s}\right)^{n_u - \ell \cdot i} \cdot \prod_{j=1}^{\ell \cdot i} \frac{n_u - j + 1}{n_s} \cdot \prod_{j=1}^i \frac{n_s - j + 1}{j \cdot \ell!} \quad (3.14)$$

και

$$A(n_s, n_u, \ell, i) = \begin{cases} \sum_{j=1}^{\ell-1} Q(n_s - i, n_u - \ell \cdot i, j), & \text{if } \ell \cdot i < n_u \\ 1, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (3.15)$$

Ειδικότερα, η συνάρτηση $Q(n_s, n_u, j)$ υποδεικνύει την πιθανότητα ένα διάστημα να μοιράζεται μεταξύ ακριβώς j (και όχι περισσότερων) τερματικών επαίσθησης μέσα από σύνολο n_u τερματικών επαίσθησης. Έπειτα, η πιθανότητα ένα διάστημα να μοιράζεται από k ή περισσότερα τερματικά δίδεται από τη σχέση (3.12).

3.2.4.2 Αποτελέσματα

Στα επόμενα, εξετάζεται ένα σενάριο εκτέλεσης της προτεινόμενης μεθόδου, χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες τιμές παραμέτρων:

- $\mathbf{n}_u = \{10, 20, \dots, 100\}$ τερματικά επαίσθησης
- $\mathbf{n}_s = \{1, 2, \dots, 200\}$ διαστήματα
- $\mathbf{r} = 0.65$
- $\mathbf{w} = 3.84$ Mcps
- $\mathbf{R} = 144$ Kbps
- $\mathbf{E}_b/\mathbf{N}_0 = 1.5$ dB
- $\mathbf{A}_{ULF\text{sense}} = \{20\%, 30\%, 40\%\}$
- $\mathbf{A}_p = 0.5$
- $\mathbf{A}_s \in [1, 200]$

Τα αποτελέσματα εκτέλεσης του σεναρίου παρουσιάζονται στα σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 3-1–Σχήμα 3-3). Πρόκειται για γραφικές αναπαραστάσεις της πιθανότητας υπέρβασης του ορίου $A_{ULF_{sense}}$, συναρτήσεως του αριθμού των τερματικών επαίσθησης και του αριθμού των διαθέσιμων διαστημάτων εκπομπής. Εξετάζονται τρεις περιπτώσεις για την τιμή του ορίου $A_{ULF_{sense}}$ και, συγκεκριμένα, οι $A_{ULF_{sense}}=20\%$ (Σχήμα 3-1), $A_{ULF_{sense}}=30\%$ (Σχήμα 3-2) και $A_{ULF_{sense}}=40\%$ (Σχήμα 3-3). Ζητούμενο είναι η βέλτιστη τιμή ή, εν γένει, το βέλτιστο σύνολο τιμών αναφορικά με το μέγιστο αριθμό διαστημάτων εκπομπής, n_s , που πρέπει να επιλεγεί.

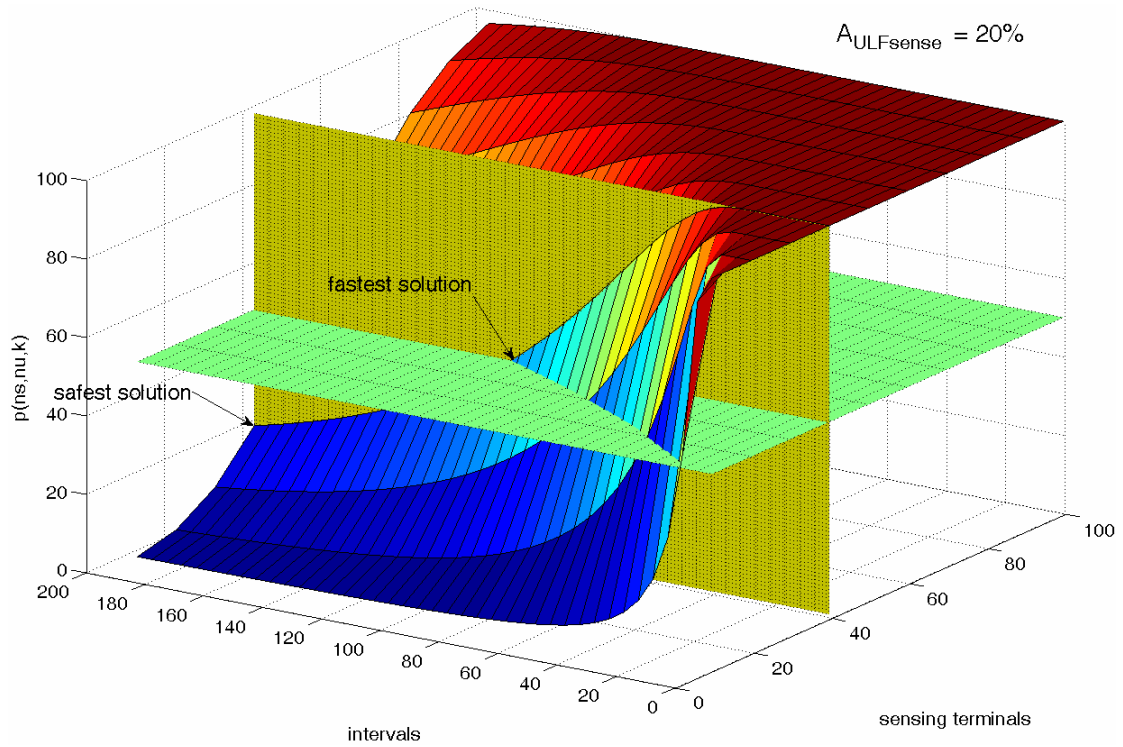
Αφού έχει εκληφθεί ότι $A_P=0.5$, αποδεκτές είναι μόνον οι λύσεις που βρίσκονται κάτω του αντίστοιχου επιπέδου. Ως αντιπροσωπευτικό παράδειγμα, υποδεικνύονται στα τρία σχήματα οι λύσεις που αντιστοιχούν στην περίπτωση κατά την οποία ισχύει $n_u=40$, υπάρχουν, δηλαδή, $n_u=40$ το πλήθος τερματικά επαίσθησης. Χαρακτηρίζεται και σημειώνεται ως «ασφαλέστερη» («safest») εκείνη η τιμή του n_s η οποία αντιστοιχεί στην ελάχιστη δυνατή πιθανότητα υπέρβασης του ορίου $A_{ULF_{sense}}$, ενώ ως «ταχύτερη» («fastest») εκείνη που αντιστοιχεί στην ελάχιστη δυνατή συνολική καθυστέρηση.

Η τομή της επιφάνειας $p(n_s, n_u, k)$ και του επιπέδου $n_u=40$, εκτεινόμενη το σημείο της «ασφαλέστερης» μέχρι το σημείο της «ταχύτερης» λύσης, συνιστά το μονοπάτι των αποδεκτών λύσεων, κάθε μια εκ των οποίων προσφέρει ένα μοναδικό συγκερασμό ανάμεσα στην ταχύτητα συλλογής και το μέγεθος της επίπτωσης επί των ραδιοπόρων του δικτύου. Μπορεί, επίσης, να καταγραφεί από την παρατήρηση των τριών αυτών σχημάτων ότι όσο περισσότερο ελαστικό (δηλαδή, αυξημένο) είναι το όριο $A_{ULF_{sense}}$, τόσο μικρότερη χρειάζεται να είναι η τιμή του n_s και άρα και η συνολική καθυστέρηση.

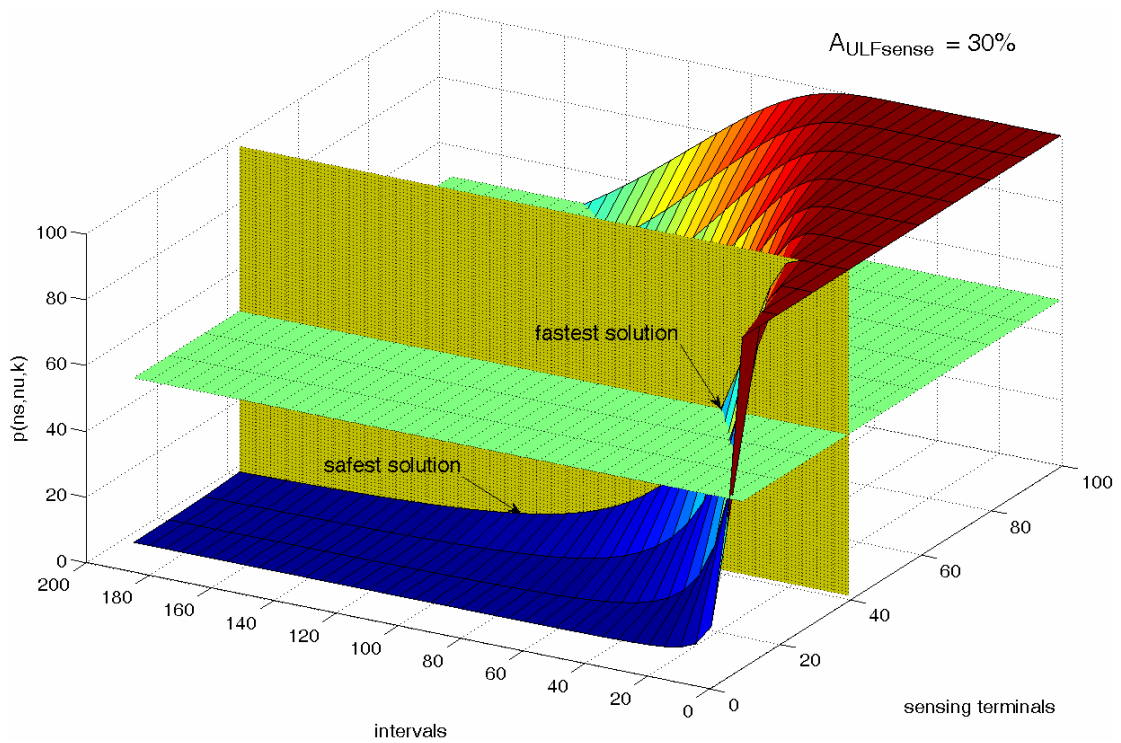
Συγκεντρωτικά, συνάγονται τα ακόλουθα αποτελέσματα, όπως προκύπτει από τα τρία προαναφερθέντα σχήματα:

1. Για $A_{ULF_{com}}=20\%$ (Σχήμα 3-1),
 - ασφαλέστερη λύση: $n_s = 200$, οδηγώντας σε $p(n_s=200, n_u=40, k) \approx 19.7\%$
 - ταχύτερη λύση: $n_s = 106$, οδηγώντας σε $p(n_s=106, n_u=40, k)=50\%$
 - γενική λύση: $n_s \in [106, 200]$
2. Για $A_{ULF_{com}}=30\%$ (Σχήμα 3-2),
 - ασφαλέστερη λύση: $n_s = 111$, οδηγώντας σε $p(n_s=111, n_u=40, k) \approx 5\%$
 - ταχύτερη λύση: $n_s = 51$, οδηγώντας σε $p(n_s=51, n_u=40, k)=50\%$
 - γενική λύση: $n_s \in [51, 111]$

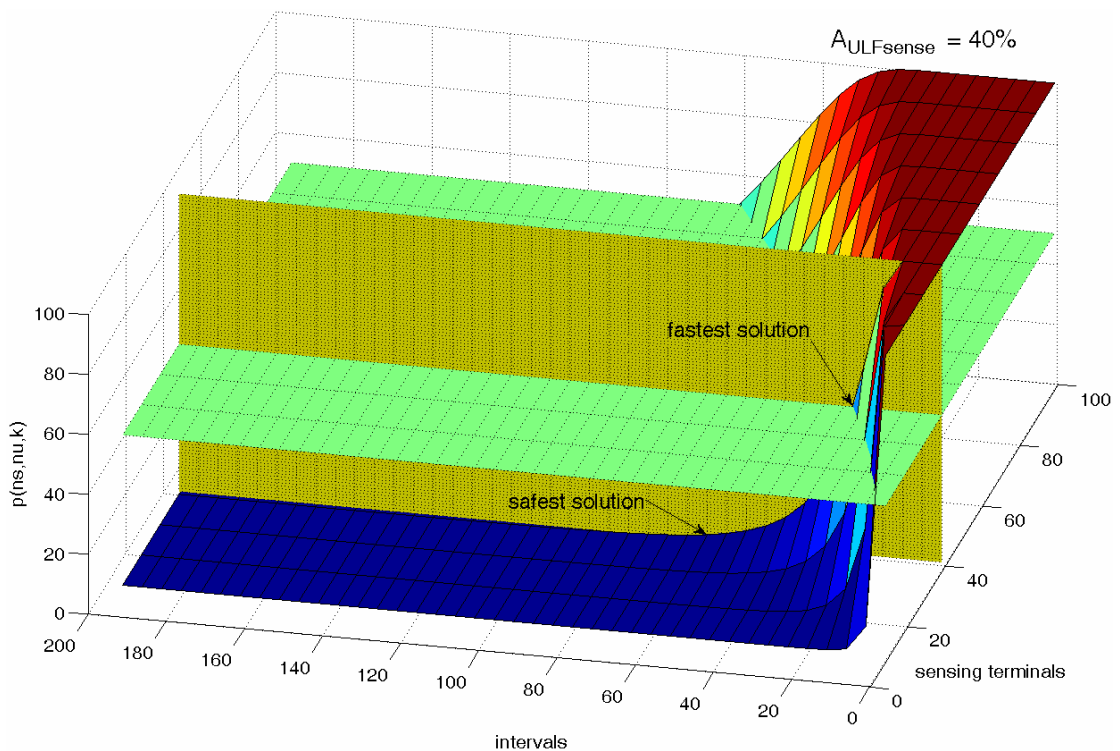
3. Για $A_{ULFcom}=40\%$ (Σχήμα 3-3),
- ασφαλέστερη λύση: $n_s = 56$, οδηγώντας σε $p(n_s=56, n_u=40, k) \approx 4\%$
 - ταχύτερη λύση: $n_s = 26$, οδηγώντας σε $p(n_s=26, n_u=40, k)=50\%$
 - γενική λύση: $n_s \in [26, 56]$



Σχήμα 3-1. Γραφική παράσταση της πιθανότητας υπέρβασης του ορίου $A_{ULFsense}$, συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης και του αριθμού των διαθέσιμων διαστημάτων εκπομπής, όταν $A_{ULFsense}=20\%$



Σχήμα 3-2. Γραφική παράσταση της πιθανότητας υπέρβασης του ορίου $A_{ULF_{sense}}$, συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης και του αριθμού των διαθέσιμων διαστημάτων εκπομπής, όταν $A_{ULF_{sense}}=20\%$



Σχήμα 3-3. Γραφική παράσταση της πιθανότητας υπέρβασης του ορίου $A_{ULF_{sense}}$, συναρτήσει του αριθμού των τερματικών επαίσθησης και του αριθμού των διαθέσιμων διαστημάτων εκπομπής, όταν $A_{ULF_{sense}}=20\%$

3.3 Χρονοπρογραμματιστής αλυσιδωτών δυωνυμικών κατανομών

3.3.1 Γενικά

Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι η ανάπτυξη ενός αποτελεσματικού μοντέλου χρονοπρογραμματισμού των αναφορών των τερματικών επαίσθησης σε δίκτυα TDMA, το οποίο θα είναι σε θέση να επιδιώκει το βέλτιστο δυνατό συνδυασμό συνολικής καθυστέρησης και προκαλούμενης στους ραδιοπόρους επιβάρυνσης. Η λύση που προτείνεται υιοθετεί μια πιθανοτική προσέγγιση η οποία βασίζεται σε μια καινοτόμο μοντελοποίηση του προβλήματος με τη βοήθεια αλυσιδωτών δυωνυμικών κατανομών. Στις παραγράφους που ακολουθούν, παρατίθεται η ανάλυση του μοντέλου.

3.3.2 Ανάλυση του μοντέλου και αποτελέσματα

Η δυωνυμική κατανομή αντιπροσωπεύει τη διακριτή κατανομή της πιθανότητας να τύχουν ακριβώς i επιτυχίες μέσα από n πειράματα Bernoulli [8]-[12]. Στα πειράματα Bernoulli, το αποτέλεσμα κάθε μεμονωμένου πειράματος είναι «θετικό» με πιθανότητα q και «αρνητικό» με πιθανότητα $p=1-q$. Βάσει αυτού του συμβολισμού, η πιθανότητα $Q(i, n)$ να συμβούν i επιτυχίες (θετικά αποτελέσματα) στα n πειράματα είναι:

$$Q(i, n) = \binom{n}{i} (1-q)^{n-i} q^i \quad (3.16)$$

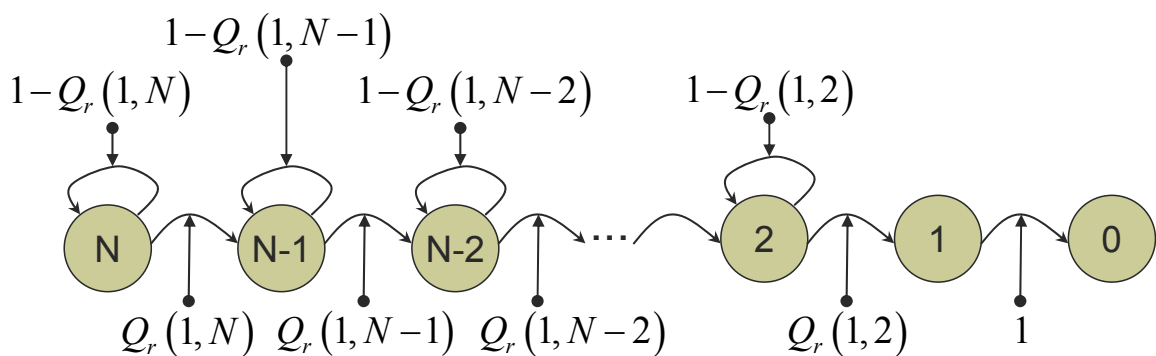
Έστω τώρα σύστημα TDMA στο οποίο λειτουργούν n τερματικά επαίσθησης. Αν κάθε τερματικό διαθέτει ένα πακέτο (αναφοράς) επαίσθησης προς μετάδοση, τότε, κατ' αναλογία με τα προηγούμενα, η πιθανότητα i ακριβώς από τα n τερματικά να εκπέμψουν εντός μιας χρονοσχισμής είναι:

$$Q_r(i, n) = \binom{n}{i} (1-q_r)^{n-i} q_r^i \quad (3.17)$$

όπου $Q_r(i, n)$ η προαναφερθείσα πιθανότητα και q_r η πιθανότητα επαναμετάδοσης πακέτου ενός τερματικού. Εν προκειμένω, δίχως βλάβη της γενικότητας, θεωρείται ότι κάθε πακέτο απαιτεί μία χρονοσχισμή για να μεταδοθεί εξ ολοκλήρου και ότι κάθε τερματικό επαίσθησης διαθέτει ένα μόνον πακέτο προς μετάδοση. Μια επιτυχής

μετάδοση συνοδεύεται από την «απόσυρση» του αντίστοιχου τερματικού από τη διαδικασία (μέχρι τουλάχιστον ένας καινούριος κύκλος ενημέρωσης του σταθμού βάσης να ξεκινήσει). Κάθε τερματικό επιλέγει κατά τυχαίο τρόπο αν θα εκπέμψει το πακέτο επαίσθησης που έχει σχηματίσει, εντός μιας χρονοσχισμής. Ζητούμενη είναι η βέλτιστη πολιτική $q_r = q_r(n) = ?$ που πρέπει να ακολουθεί κάθε τερματικό, προκειμένου η συλλογή όλων των αναφορών να πραγματοποιηθεί στο μικρότερο δυνατό χρόνο. Η λύση η οποία αναζητείται πρέπει να είναι συμμετρική, να μην κάνει διάκριση, δηλαδή, των τερματικών σε πρωτεύουσες, δευτερεύουσες, κοκ. κλάσεις, αλλά να τα αντιμετωπίζει όλα ισότιμα. Με άλλα λόγια, η πολιτική επανεκπομπών οφείλει να είναι η ίδια για όλα τα τερματικά.

Αρχικά, θα θεωρηθεί ότι επιτρέπεται μόνο 1 (ή καμία) εκπομπή ανά διάστημα. Τούτο σημαίνει ότι αν συμπέσουν δύο ή παραπάνω ταυτόχρονες εκπομπές τερματικών, τότε καμία δεν είναι επιτυχής και η χρονοσχισμή καθίσταται αναξιοποίητη. Το ανωτέρω πρόβλημα μπορεί να μοντελοποιηθεί με τον τρόπο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-4.



Σχήμα 3-4. Μοντέλο των αλυσιδωτών δυωνυμικών κατανομών, όταν επιτρέπεται μία μόνο μετάδοση ανά χρονοσχισμή

Όπως γίνεται φανερό από το σχήμα αυτό, δύο είναι οι δυνατότητες σε κάθε κατάσταση: παραμονή στην τρέχουσα κατάσταση με πιθανότητα $1 - Q_r(1, n)$, όπου n η τρέχουσα κατάσταση (δηλαδή, το πλήθος των τερματικών επαίσθησης που δεν έχουν ολοκληρώσει επιτυχώς τη μετάδοσή τους), ή μετάβαση στην κατάσταση n-1 με πιθανότητα $Q_r(1, n)$. Ζητούμενη είναι η βέλτιστη πολιτική $q_r = q_r(n) = ?$ η οποία ελαχιστοποιεί την πρώτη πιθανότητα και μεγιστοποιεί τη δεύτερη. Αμέσως γίνεται

φανερó ότι τα σημεία στα οποία ελαχιστοποιείται η πρώτη συμπίπτουν με εκείνα στα οποία μεγιστοποιείται η δεύτερη, καθώς:

$$\frac{d}{dq_r} \{1 - Q_r(1, n, q_r(n))\} = -\frac{dQ_r(1, n)}{dq_r} \quad (3.18)$$

$$\frac{d}{dq_r} \{Q_r(1, n, q_r(n))\} = \frac{dQ_r(1, n)}{dq_r} \quad (3.19)$$

Κατά συνέπεια, αρκεί η εύρεση εκείνης της συνάρτησης $q_r = q_r(n)$ η οποία ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$\frac{dQ_r(1, n)}{dq_r} = 0, \quad \forall n > 1, \quad \text{με } q_r = q_r(n) \in (0, 1) \quad (3.20)$$

Ισχύει διαδοχικά:

$$Q_r(1, n) = n(1 - q_r)^{n-1} q_r \quad (3.21)$$

$$\frac{dQ_r(1, n)}{dq_r} = n \left\{ (1 - q_r)^{n-1} q_r \right\}'$$

$$\frac{dQ_r(1, n)}{dq_r} = n \left[-(n-1)(1 - q_r)^{n-2} q_r + (1 - q_r)^{n-1} \right]$$

$$\frac{dQ_r(1, n)}{dq_r} = n(1 - q_r)^{n-2} \left[-(n-1)q_r + 1 - q_r \right]$$

$$\frac{dQ_r(1, n)}{dq_r} = n(1 - q_r)^{n-2} (1 - q_r n) \quad (3.22)$$

Επειδή πρέπει:

$$\frac{dQ_r(1, n)}{dq_r} = 0, \quad \forall n > 1 \quad (3.23)$$

από την (3.22) προκύπτει:

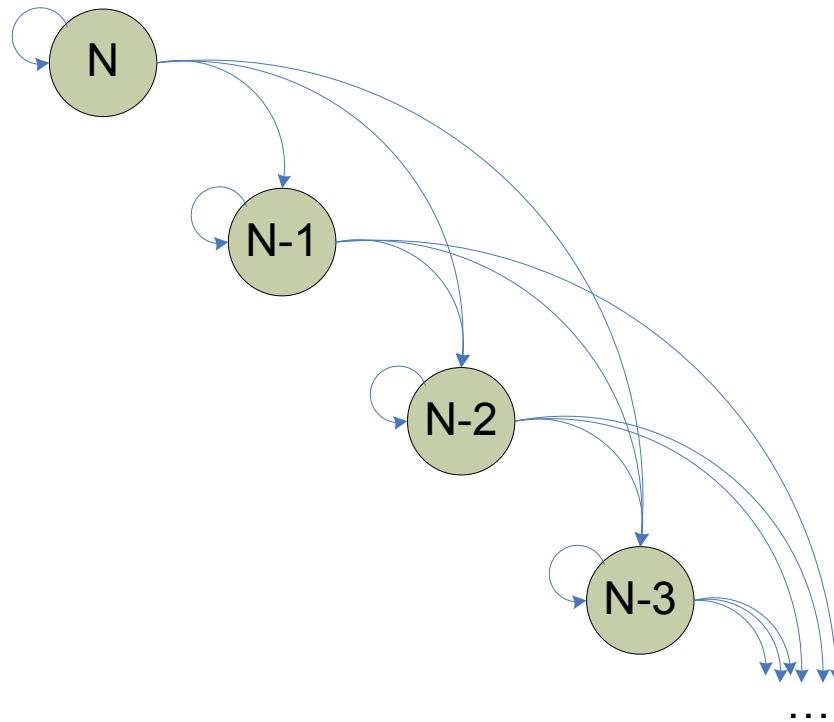
$$1 - q_r n = 0$$

$$q_r(n) = \frac{1}{n} \quad (3.24)$$

Η (3.24) υποδεικνύει τη βέλτιστη λύση όταν επιτρέπεται μία μόνο μετάδοση ανά χρονοσχισμή και αποτελεί τη μαθηματική απόδειξη της διαισθητικής λύσης που συχνά εφαρμόζεται μεταξύ n όμοιων ανταγωνιστών, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι μεταξύ τους συγκρούσεις. Σύμφωνα με την (3.24), η πιθανότητα

της πολιτικής επαναμεταδόσεων πρέπει να είναι αντιστρόφως ανάλογη του αριθμού των τερματικών επαίσθησης που εκκρεμούν.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η επέκταση του συγκεκριμένου μοντέλου για την περίπτωση που επιτρέπονται $k > 1$ ταυτόχρονες εκπομπές (π.χ., $k=2$, $k=3$, κ.λπ.). Σε μια τέτοια περίπτωση ακολουθείται η μοντελοποίηση που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-5, που συνιστά την επέκταση εκείνης που παρατέθηκε στο Σχήμα 3-4.



Σχήμα 3-5. Μοντέλο των αλυσιδωτών δυναμικών κατανομών, όταν επιτρέπονται περισσότερες της μιας ταυτόχρονες μεταδόσεις ανά χρονοσχιμή

Όπως γίνεται φανερό από αυτό το σχήμα, οι δυνατότητες που υπάρχουν τώρα σε κάθε κατάσταση είναι $k+1$, όπου k το (μέγιστο) πλήθος των επιτρεπόμενων ταυτόχρονων μεταδόσεων: Η πρώτη είναι η παραμονή στην τρέχουσα κατάσταση n (όπου n το πλήθος των τερματικών επαίσθησης που δεν έχουν ολοκληρώσει επιτυχώς τη μετάδοσή τους). Οι υπόλοιπες είναι να συμβούν $1, 2, \dots, k$ ταυτόχρονες εκπομπές.

Αυτήν τη φορά, η πιθανότητα παραμονής στην τρέχουσα κατάσταση, n , εκφράζεται από τη σχέση:

$$Q_p(k, n) = 1 - \sum_{s=1}^k Q_r(s, n) \quad (3.25)$$

Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της παραπάνω πιθανότητας, συνεπώς πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη:

$$\frac{d}{dq_r} \left\{ 1 - \sum_{s=1}^k Q_r(s, n) \right\} = 0, \quad \forall n > 1, \text{ με } q_r = q_r(n) \in (0, 1) \quad (3.26)$$

Ζητούμενη είναι, δεδομένου του k , η πολιτική $q_r = q_r(n)$ η οποία ικανοποιεί την (3.26). Ισχύει διαδοχικά με βάση την (3.26):

$$\frac{d}{dq_r} \left\{ \sum_{s=1}^k Q_r(s, n) \right\} = 0 \quad (3.27)$$

$$\sum_{s=1}^k \frac{d}{dq_r} \{ Q_r(s, n) \} = 0 \quad (3.28)$$

Συνεπώς, πρέπει να βρεθεί η παράγωγος $\frac{d}{dq_r} \{ Q_r(s, n) \}$. Ισχύουν διαδοχικά τα ακόλουθα:

$$Q_r(s, n) = \binom{n}{s} (1 - q_r)^{n-s} q_r^s \quad (3.29)$$

$$\frac{dQ_r(s, n)}{dq_r} = \binom{n}{s} \left\{ (1 - q_r)^{n-s} q_r^s \right\}'$$

$$\frac{dQ_r(s, n)}{dq_r} = \binom{n}{s} \left[-(n-s)(1 - q_r)^{n-s-1} q_r^s + (1 - q_r)^{n-s} s q_r^{s-1} \right]$$

$$\frac{dQ_r(s, n)}{dq_r} = \binom{n}{s} (1 - q_r)^{n-s-1} \left[-(n-s) q_r^s + s(1 - q_r) q_r^{s-1} \right]$$

$$\frac{dQ_r(s, n)}{dq_r} = \binom{n}{s} (1 - q_r)^{n-s-1} q_r^{s-1} \left[-(n-s) q_r + s(1 - q_r) \right]$$

$$\frac{dQ_r(s, n)}{dq_r} = \binom{n}{s} (1 - q_r)^{n-s-1} q_r^{s-1} (s - n q_r) \quad (3.30)$$

Λόγω της (3.30), από την (3.28) προκύπτει:

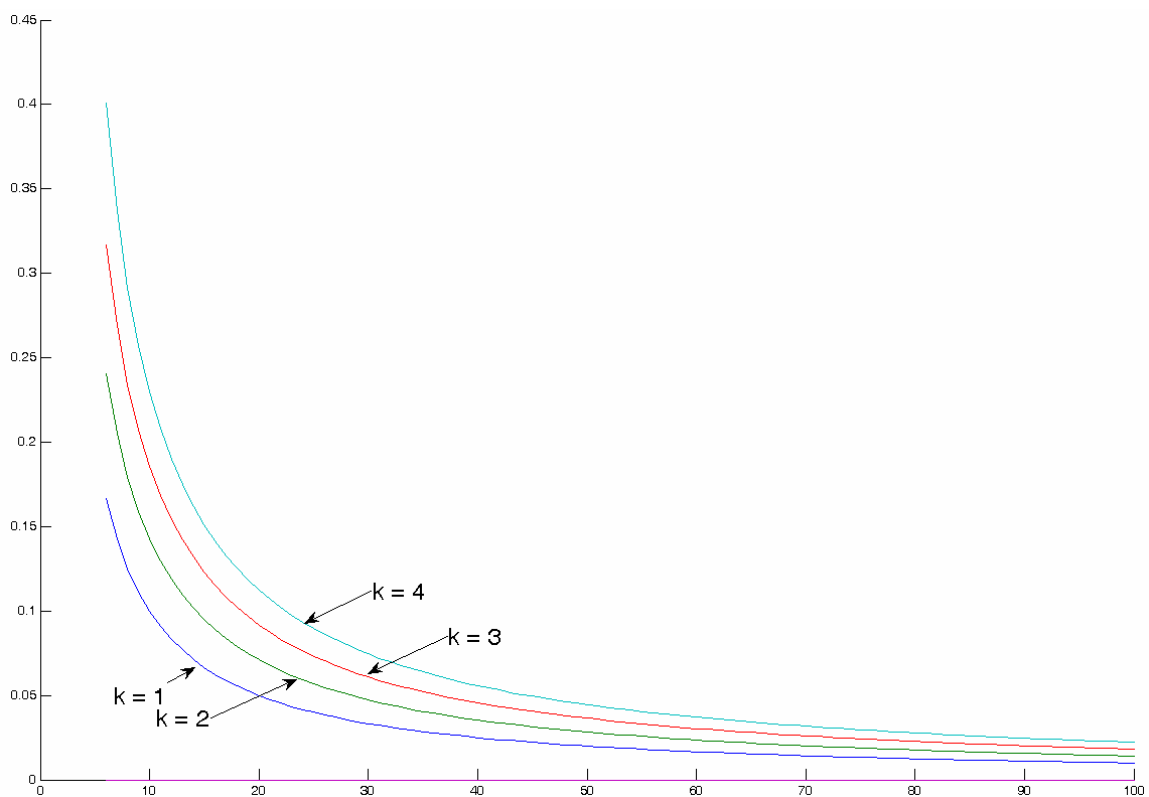
$$\sum_{s=1}^k \binom{n}{s} (1 - q_r)^{n-s-1} q_r^{s-1} (s - n q_r) = 0 \quad (3.31)$$

από όπου λαμβάνεται ισοδύναμα:

$$(1 - q_r)^{n-s-k} \sum_{s=1}^k \binom{n}{s} (1 - q_r)^{k-s} q_r^{s-1} (s - n q_r) = 0$$

$$\sum_{s=1}^k \binom{n}{s} (1 - q_r)^{k-s} q_r^{s-1} (s - n q_r) = 0 \quad (3.32)$$

Στο Σχήμα 3-6 σκιαγραφούνται οι λύσεις για διάφορες τιμές του k ($k=1,2,3,4$). Ο οριζόντιος άξονας αναπαριστά το πλήθος των τερματικών επαίσεων των οποίων η μετάδοση εκκρεμεί, ενώ ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στην πιθανότητα επαναμετάδοσης. Όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει, όσο μειώνεται ο αριθμός των τερματικών επαίσεων τόσο αυξάνεται και η πιθανότητα της βέλτιστης πολιτικής επαναμετάδοσης, κάτι που είναι και το αναμενόμενο. Επιπλέον, όταν επιτρέπονται περισσότερες ταυτόχρονες μεταδόσεις, παρατηρείται «μετατόπιση» της αντίστοιχης καμπύλης βέλτιστης πολιτικής επαναμετάδοσης προς τα πάνω, με άλλα λόγια οι αντίστοιχες πιθανότητες επαναμετάδοσης ενισχύονται.



Σχήμα 3-6. Μοντέλο αλυσιδωτών δυνωυμικών κατανομών – Αποτελέσματα για διάφορες τιμές των επιτρεπόμενων ταυτόχρονων μεταδόσεων ανά χρονοσχιμή

3.4 Μοντέλο χρονοπρογραμματισμού βασισμένο στη θεωρία παιγνίων

3.4.1 Γενικά

Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι η ανάπτυξη ενός εναλλακτικού αποτελεσματικού μοντέλου χρονοπρογραμματισμού των αναφορών των τερματικών επαίσθησης σε δίκτυα TDMA, το οποίο θα είναι σε θέση να επιδιώκει το βέλτιστο δυνατό συνδυασμό συνολικής καθυστέρησης και προκαλούμενης στους ραδιοπόρους επιβάρυνσης. Η λύση που προτείνεται στην ενότητα αυτή υιοθετεί μια πιθανοτική προσέγγιση η οποία βασίζεται στη θεωρία παιγνίων.

3.4.2 Θεωρία παιγνίων

3.4.2.1 Εισαγωγή

Η θεωρία παιγνίων, προτάθηκε αρχικά ως μια μέθοδος προσέγγισης της ανθρώπινης συμπεριφοράς, βασισμένη σε αρχές επιστημών, όπως τα μαθηματικά, η οικονομική επιστήμη και η κοινωνιολογία. Θεμελιωτής αυτής της θεωρίας υπήρξε ο διάσημος μαθηματικός John von Neumann, στον οποίο η επιστημονική κοινότητα χρωστά, μεταξύ άλλων, τη θεμελίωση και της θεωρίας υπολογισμού (computational theory). Ο von Neumann, συνέγραψε το 1944 μαζί με τον επίσης σπουδαίο μαθηματικό οικονομολόγο Oskar Morgenstern, το βιβλίο «Θεωρία Παιγνίων και Οικονομικής Συμπεριφοράς» [12], το οποίο έθεσε τις βάσεις για περαιτέρω μελέτες στον τομέα αυτό.

Ο όρος «παίγνια» αποτελεί μια επιστημονική μεταφορά για ένα πολύ ευρύτερο πλήθος ανθρώπινων αλληλεπιδράσεων, όπου το τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται από τις αλληλεπιδραστικές στρατηγικές δύο ή περισσότερων «παικτών» που έχουν αντικρουόμενα ή, στην καλύτερη περίπτωση, μεικτά κίνητρα. Κάποια από τα κύρια ζητήματα που συζητούνται στη θεωρία παιγνίων είναι τα εξής [13]:

- Τι σημαίνει η επιλογή «λογικής» στρατηγικής, όταν τα αποτελέσματα εξαρτώνται από τις στρατηγικές που επιλέγονται από τους άλλους παίκτες ή όταν η πληροφόρηση είναι ελλιπής;
- Σε παιχνίδια που είναι δυνατό το αμοιβαίο όφελος ή αντίστοιχα η αμοιβαία ήττα είναι λογική η συνεργασία προκειμένου να επιτευχθεί το αμοιβαίο

όφελος (ή να αποφευχθεί η αμοιβαία ήττα) ή είναι πιο λογική μια «επιθετική» συμπεριφορά αναζήτησης του ατομικού κέρδους;

- Σε ποιες περιπτώσεις και υπό ποιες συνθήκες είναι προτιμητέα μια επιθετική ή μια συνεργατική συμπεριφορά;
- Διαφέρουν οι συμπεριφορές των παικτών όταν αυτοί έχουν μια διαρκή σχέση αντί μιας μοναδικής αναμέτρησης;
- Μπορούν να αναδυθούν ηθικοί κανόνες αυθόρμητα κατά την αλληλεπίδραση παικτών με εγωιστική συμπεριφορά;
- Πώς αντιστοιχεί η πραγματική ανθρώπινη συμπεριφορά με τη λογική συμπεριφορά των παικτών;

Συνεπώς, κάποιες από τις εφαρμογές που εξετάζονται από τη θεωρία παιγνίων είναι τα τελεσίγραφα, η χρεωκοπία, ο κανόνας της πλειοψηφίας, η αμοιβαία άμυνα, η συνεργασία καθώς και πλήθος άλλων προβλημάτων που για λόγους κατανόησης περιγράφονται μέσω παραστατικών καταστάσεων όπως είναι «το δίλλημα των φυλακισμένων», «οι βάρβαροι στην πύλη», «η μάχη των δικτύων», η «απόδραση και εκκένωση», και το «γεράκι εναντίον περιστεριού» [14].

3.4.2.2 Χαρακτηριστικά παιγνίου

Ένα παίγνιο αποτελείται από τρία στοιχεία:

- Το σύνολο P των παικτών. Αν και μεγάλο μέρος των παιγνίων αναφέρεται στην ύπαρξη δύο παικτών, μια γενικευμένη λύση αφορά παίγνιο N παικτών.

Ένας παίκτης αναφέρεται ως παίκτης i , με $i \in P \in P$.

- Το σύνολο των στρατηγικών κάθε παίκτη. Το σύνολο των στρατηγικών που είναι διαθέσιμες στον παίκτη i συμβολίζεται ως S_i ενώ μια γενική επιλογή στρατηγικής του παίκτη i συμβολίζεται ως $s_i \in S_i$. Οι παίκτες μπορεί να έχουν είτε το ίδιο είτε διαφορετικό σύνολο στρατηγικών S_i S_i . Έστω S η κλάση όλων των συνόλων στρατηγικών όλων των παικτών και s το προφίλ στρατηγικών για όλους τους N παίκτες, όπου το i -οστό στοιχείο του s είναι η επιλογή στρατηγικής του παίκτη i . Ισχύει δηλαδή, $s = (s_1, s_2, \dots, s_N)$. Η επιλογή στρατηγικής των $N-1$ παικτών εκτός του i συμβολίζεται ως s_{-i} . Σε ένα παίγνιο δύο παικτών το προφίλ στρατηγικής συμβολίζεται συχνά ως $\langle s_A, s_B \rangle$, όπου s_A η στρατηγική που επιλέγεται από τον παίκτη A και s_B η στρατηγική

που επιλέγεται από τον παίκτη B αντίστοιχα. Το προφίλ στρατηγικής που αναφέρθηκε παραπάνω, συχνά αναφέρεται και ως «αποτέλεσμα».

- Τα κέρδη (payoffs) κάθε παίκτη για κάθε προφίλ στρατηγικής. Σε κάθε προφίλ στρατηγικής αντιστοιχεί και ένα κέρδος για κάθε παίκτη. Το σύνολο των κερδών που μπορούν να επιτευχθούν για κάθε παίκτη i συμβολίζεται με U_i , όπου $U_i = \{u_{i(s)}\}$, $\forall s \in S$. Το σύνολο όλων των συνόλων κερδών U_i συμβολίζεται με U .

Συνεπώς, φορμαλιστικά ένα παίγνιο είναι ο χώρος $\langle P, S, U \rangle$.

3.4.2.3 Το δίλημμα των φυλακισμένων

Στο τμήμα που ακολουθεί, θα παρουσιαστεί ένα από τα πλέον γνωστά παίγνια το λεγόμενο «δίλημμα των φυλακισμένων». Το παίγνιο αυτό παρουσιάστηκε από τον διάσημο μαθηματικό Albert Tucker, κατά τη διάρκεια μιας διάλεξης του στο πανεπιστήμιο Stanford, ενώπιον ενός ακροατηρίου ψυχολόγων. Η περιγραφή του παιγνίου είναι η εξής:

Δυο ληστές συλλαμβάνονται κοντά σε σημείο όπου διαπράχθηκε ληστεία και ανακρίνονται χωριστά από την αστυνομία. Κάθε ένας από αυτούς πρέπει να επιλέξει αν θα ομολογήσει εμπλέκοντας τον άλλο ή όχι. Αν κανένας από τους δύο δε ομολογήσει θα εκτίσουν και οι δύο ποινή φυλάκισης ενός χρόνου για παράνομη οπλοκατοχή. Στην περίπτωση που ομολογήσουν και οι δύο εμπλέκοντας ο ένας τον άλλον θα καταδικαστούν και οι δύο σε 10 χρόνια φυλάκισης. Σε περίπτωση, όμως, που ένας από τους δύο ομολογήσει εμπλέκοντας το συνεργάτη του, ενώ αυτός δεν έχει ομολογήσει, τότε ο ληστής που ομολόγησε θα αφεθεί ελεύθερος, ενώ ο άλλος θα λάβει τη μέγιστη ποινή φυλάκισης των 20 χρόνων. Οι στρατηγικές σε αυτό το παίγνιο είναι δύο: ομολογία ή όχι. Τα κέρδη (σε αυτήν την περίπτωση ποινές) είναι τα χρόνια φυλάκισης. Εποπτικά, τα παραπάνω μπορούν να αναπαρασταθούν με τον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 3-1).

Πίνακας 3-1. Πίνακας στρατηγικών για το παίγνιο «Δίλημμα των φυλακισμένων»

		Ληστής Β	
		Ομολογία	Άρνηση
Ληστής Α	Ομολογία	10, 10	0, 20
	Άρνηση	20, 0	1, 1

Ο παίκτης Α επιλέγει μεταξύ των δύο γραμμών και ο παίκτης Β επιλέγει μεταξύ των δύο στηλών. Σε κάθε κελί αναγράφονται τα κέρδη (ποινές) για τους δύο παίκτες. Ο πρώτος αριθμός είναι το κέρδος του παίκτη Α και ο δεύτερος το κέρδος του παίκτη Β. Τα παίγνια αυτού του τύπου, όπου κάθε παίκτης επιλέγει τη στρατηγική του χωρίς να γνωρίζει τις κινήσεις του αντιπάλου αναφέρονται ως *Παίγνια Κανονικής Μορφής (Normal Form Games)* ή *Παίγνια Ταυτόχρονων Κινήσεων (Simultaneous-move Games)* ή *Στατικά παίγνια (Static Games)*.

Πίσω στο «δίλημμα των φυλακισμένων», στην προσπάθεια του να ελαχιστοποιήσει το χρόνο φυλάκισης του, κάθε ληστής πραγματοποιεί πιθανώς τον εξής συλλογισμό: «Δύο πράγματα μπορεί να συμβούν. Ο άλλος θα ομολογήσει ή θα αρνηθεί κάθε ανάμειξη. Σε περίπτωση που ομολογήσει, θα καταδικαστώ σε 20 χρόνια αν δεν ομολογήσω ή σε 10 χρόνια αν ομολογήσω και εγώ, οπότε είναι προτιμότερο να ομολογήσω. Σε περίπτωση που ο άλλος δεν ομολογήσει, θα καταδικαστώ σε 1 χρόνο αν δεν ομολογήσω ή θα αφεθώ ελεύθερος αν ομολογήσω. Σε κάθε περίπτωση, λοιπόν, είναι καλύτερο να ομολογήσω. Και οι δύο ληστές κάνουν τον ίδιο «λογικό» συλλογισμό και ομολογούν, με αποτέλεσμα να καταδικαστούν σε 10 χρόνια φυλάκισης, τη στιγμή που η «μη λογική» επιλογή της άρνησης θα τους οδηγούσε στη φυλακή για 1 χρόνο μόνο.

3.4.2.4 Επικρατούσα στρατηγική – Nash Equilibrium

Στο παραπάνω παράδειγμα, οι παίκτες επέλεξαν μια στρατηγική που ήταν προτιμότερη για αυτούς ανεξάρτητα από την επιλογή του αντιπάλου. Μια τέτοια στρατηγική αναφέρεται ως *επικρατούσα στρατηγική*. Φορμαλιστικά, μια στρατηγική s_i^d είναι επικρατούσα στρατηγική για τον παίκτη i αν

$$u_i(s_i^d, s_{-i}) \geq u_i(s_i, s_{-i}), \forall s_i \in S_i, \forall s_{-i} \in S_{-i}$$

δηλαδή η στρατηγική s_i^d παράγει μεγαλύτερο κέρδος για τον παίκτη i από κάθε άλλη πιθανή στρατηγική για κάθε δυνατό συνδυασμό στρατηγικών των άλλων παικτών.

Ένα παίγνιο είναι δυνατό να μη διαθέτει κάποια επικρατούσα στρατηγική. Στην περίπτωση, όμως που διαθέτει είναι πολύ πιθανό αυτή να επιλεγεί από τους παίκτες.

Η έννοια της λύσης στη θεωρία παιγνίων καλείται *Nash Equilibrium* (Σημείο ισορροπίας Nash). Ενστικτωδώς, ένα Nash Equilibrium προκύπτει όταν ένας παίκτης επιλέγει ως στρατηγική του αυτή που μεγιστοποιεί το κέρδος του δεδομένων των επιλογών των υπολοίπων παικτών, και κάθε παίκτης ακολουθεί επίσης αυτή τη συμπεριφορά. Η στρατηγική αυτή καλείται *βέλτιστη απόκριση* (*best response*). Το Nash Equilibrium είναι ένα προφίλ στρατηγικών όπου η επιλογή κάθε παίκτη είναι η βέλτιστη απόκριση στις βέλτιστες αποκρίσεις των άλλων παικτών. Φορμαλιστικά μια στρατηγική $s^* = (s_1^*, s_{-1}^*)$ είναι Nash Equilibrium αν ισχύει

$$u_i(s_1^*, s_{-1}^*) \geq u_i(s_i', s_{-1}^*), \forall s_i' \in S_i, \forall i$$

Αν ισχύει το ακόλουθο

$$u_i(s_1^*, s_{-1}^*) \geq u_i(s_i', s_{-1}^*), \forall s_i' \in S_i$$

τότε το κέρδος που αποκομίζει ο παίκτης i από την επιλογή της στρατηγικής s_i^* , δεδομένου ότι οι άλλοι παίκτες επιλέγουν τις στρατηγικές s_{-i}^* είναι μεγαλύτερο από αυτό κάθε άλλης στρατηγικής που θα μπορούσε να επιλέξει ο παίκτης i . Αν η συνθήκη αυτή ισχύει για κάθε παίκτη, τότε προκύπτει Nash Equilibrium.

Στο παράδειγμα των ληστών, ισχύουν τα όσα παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 3-2):

Πίνακας 3-2. Πίνακας παραμέτρων για το παίγνιο «Δίλημμα των φυλακισμένων»

$P = \{A, B\}$
$S_A = S_B = \{\text{ομολογία}, \text{άρνηση}\}$
$u_A(\text{ομολογία}, \text{ομολογία}) = u_B(\text{ομολογία}, \text{ομολογία}) = 10$
$u_A(\text{ομολογία}, \text{άρνηση}) = u_B(\text{άρνηση}, \text{ομολογία}) = 0$
$u_A(\text{άρνηση}, \text{άρνηση}) = u_B(\text{άρνηση}, \text{άρνηση}) = 1$
$u_A(\text{άρνηση}, \text{ομολογία}) = u_B(\text{ομολογία}, \text{άρνηση}) = 20$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι το «κέρδος» σε αυτήν την περίπτωση έχει αρνητική έννοια αφού αφορά τα χρόνια φυλάκισης, και ορίζοντας ένα πραγματικό «κέρδος»

$u^* = 1/u$ $u^* = \frac{1}{u}$, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η στρατηγική (άρνηση, άρνηση) (άρνηση, άρνηση) αποτελεί Nash Equilibrium.

3.4.2.5 Τεχνικές προσδιορισμού του Nash Equilibrium

Υπάρχει μια πληθώρα τεχνικών που μπορούν να εφαρμοστούν για την εύρεση Nash Equilibria σε Παίγνια Κανονικής Μορφής. Μια ευθεία μέθοδος είναι η μέθοδος «επιλογής-ελέγχου» που περιγράφηκε παραπάνω. Αρχικά, επιλέγεται ένα προφίλ στρατηγικής. Εν συνεχεία, επιλέγεται ένας παίκτης και συγκρίνεται το κέρδος του παίκτη από την επιλεγείσα στρατηγική με τα κέρδη του παίκτη από κάθε άλλη δυνατό συνδυασμό. Σε παίγνιο με δύο παίκτες αυτό απλά σημαίνει τη σύγκριση του κέρδους με αυτό της εναλλακτικής στρατηγικής διατηρώντας σταθερή την επιλογή του άλλου παίκτη. Κατόπιν, αν έχει επιλεγεί η βέλτιστη απόκριση για αυτόν τον παίκτη, επαναλαμβάνεται η διαδικασία για άλλον παίκτη έως ότου γίνει έλεγχος όλων των παικτών. Στη συνέχεια, αν υπάρχει κάποιος πιο επικερδής συνδυασμός για τον παίκτη η διαδικασία σταματά, καθώς το προφίλ στρατηγικής που επιλέχθηκε δεν αποτελεί Nash Equilibrium. Αν και αλάθητη, η παραπάνω μέθοδος μπορεί να αποδειχθεί εξαιρετικά χρονοβόρα καθώς πρέπει να εξεταστούν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί παικτών και στρατηγικών.

Μια δεύτερη τεχνική εύρεσης Nash Equilibria σχετίζεται με τη δημιουργία ενός πίνακα και το «μαρκάρισμα» συγκεκριμένων κελιών. Αρχικά επιλέγεται ένας παίκτης. Κατόπιν, επιλέγεται ένα προφίλ στρατηγικών για τους υπόλοιπους παίκτες. Εν συνεχεία απαντάται το ερώτημα «Αν εγώ είμαι αυτός ο παίκτης και οι υπόλοιποι επιλέξουν αυτές τις στρατηγικές ποια είναι η βέλτιστη απόκριση μου;» και σημειώνεται με ένα “x” κάτω από το κελί με το μεγαλύτερο κέρδος. Σε περίπτωση που ισοδυναμούν δυο αποκρίσεις σημειώνονται και οι δύο. Κατόπιν, επιλέγεται ένα διαφορετικό προφίλ στρατηγικών για τους άλλους παίκτες και επαναλαμβάνεται η ερώτηση με αντίστοιχη σημείωση κελιών. Αφού ολοκληρωθεί αυτή η διαδικασία για τις βέλτιστες αποκρίσεις ενός παίκτη σε κάθε συνδυασμό στρατηγικών των άλλων παικτών, επαναλαμβάνεται για άλλον παίκτη, έως ότου καθοριστούν οι βέλτιστες αποκρίσεις όλων των παικτών. Κάθε κελί στο οποίο κάθε αριθμός έχει ένα “x” είναι το αποτέλεσμα ενός Nash Equilibrium. Αν και αυτή η μέθοδος είναι εξαιρετικά αποδοτική σε παίγνια κανονικής μορφής με δύο παίκτες, αποδεικνύεται υπολογιστικά ασύμφορη στην περίπτωση πολλών παικτών.

Μια τρίτη τεχνική είναι γνωστή με το ευφάνταστο όνομα «Σέρλοκ Χόλμς». Η μέθοδος αυτή είναι πιο ιδιαίτερη, αλλά είναι η μόνη αποδοτική σε περιπτώσεις πολλών παικτών ή μεγάλων συνόλων στρατηγικών. Η βασική ιδέα είναι ο

αποκλεισμός κάθε συνδυασμού που δεν μπορεί να είναι Nash Equilibrium. Αν είναι δυνατός ο επαναληπτικός αποκλεισμός αυτών που δεν μπορεί να αποτελούν λύση, τότε ό,τι απομένει πρέπει να είναι λύση. Αυτή η στρατηγική αρχικά αναγνωρίζει τα σύνολα των προφίλ στρατηγικών που παρουσιάζουν μια κοινή ιδιότητα που πάντα θα έχει μια επικερδή απόκλιση. Η απόδειξη αυτού αποκλείει το σύνολο αυτών των στρατηγικών. Η συνέχιση αυτής της διαδικασίας καταλήγει σε λίγα προφίλ τα οποία δε μπορούν να αποκλειστούν. Με εφαρμογή της πρώτης τεχνικής επί αυτών των συνόλων προκύπτει το Nash Equilibrium.

Η τέταρτη τεχνική που θα παρουσιαστεί εδώ αφορά τη χρήση άλγεβρας. Σε ορισμένα παίγνια ο χώρος των στρατηγικών είναι ένα διάστημα του πραγματικού άξονα. Επιπρόσθετα, τα κέρδη μπορούν να περιγραφούν ως συνάρτηση των τιμών των στρατηγικών από τα προαναφερθέντα διαστήματα. Αν αυτά τα κέρδη είναι παραγωγίσιμα, τότε η επίλυση της εξίσωσης της πρώτης παραγώγου τους με το μηδέν παρέχει τη συνάρτηση βέλτιστη απόκρισης. Μια συνάρτηση βέλτιστης απόκρισης μπορεί να προσδιοριστεί για κάθε παίκτη, καταλήγοντας σε ένα σύστημα εξισώσεων όπου κάθε μια είναι συνάρτηση των επιλογών στρατηγικής κάθε παίκτη. Αν και η εύρεση ενός προφίλ στρατηγικών που ικανοποιεί όλες τις εξισώσεις μπορεί να είναι εξαιρετικά απλή, όπως στην περίπτωση γραμμικών συναρτήσεων βέλτιστης απόκρισης, μπορεί να αποδειχτεί επίπονη σε περιπτώσεις όπου οι συναρτήσεις κέρδους είναι ασυνεχείς ή δεν υπάρχει μέγιστο εντός του προκαθορισμένου διαστήματος.

3.4.2.6 Σύνθετες στρατηγικές

Αντί ένας παίκτη να επιλέξει μια στρατηγική, μπορεί να επιλέξει την πιθανότητα να επιλεγεί μια στρατηγική. Έστω ότι οι στρατηγικές από το σύνολο ενός παίκτη ονομάζονται «αγνές» στρατηγικές. Όταν παίζεται μια αγνή στρατηγική τότε γίνεται μια επιλογή με βεβαιότητα, δηλαδή με πιθανότητα ίση με 1. Μια σύνθετη στρατηγική είναι μια κατανομή πιθανότητας επί του συνόλου των αγνών στρατηγικών ενός παίκτη. Έστω $\sigma_i(s_i)$ η πιθανότητα ο παίκτης i να επιλέξει τη στρατηγική $s_i \in S_i$. Αφού μια σύνθετη στρατηγική είναι μια κατανομή πιθανότητας ισχύει

$$\sum_{s_i \in S_i} \sigma_i(s_i) = 1, \forall i$$

Μια σύνθετη στρατηγική, λοιπόν, για τον παίκτη i συμβολίζεται ως $\sigma_i = [\sigma_i(s_i)]$, $\forall s_i \in S_i$. Το σύνολο όλων των σύνθετων στρατηγικών του παίκτη i συμβολίζεται ως Δ_i .

Τα παίγνια κανονικής μορφής μπορούν να επεκταθούν ώστε να επιτρέπουν τη χρήση σύνθετων στρατηγικών. Αν οι παίκτες επιλέγουν αγνές στρατηγικές με πιθανότητες, τότε κάθε παίκτης υπολογίζει το αναμενόμενο κέρδος από την επιλογή κάθε στρατηγικής. Το αναμενόμενο κέρδος είναι, στην ουσία, το μέσο αναμενόμενο κέρδος από την επιλογή μιας συγκεκριμένης αγνής στρατηγικής. Για τον υπολογισμό του αναμενόμενου κέρδους απλά πολλαπλασιάζοντας την πιθανότητα ενός συγκεκριμένου προφίλ στρατηγικών των άλλων παικτών με το κέρδος που αποκομίζει ο παίκτης σε αυτήν την περίπτωση και προσθέτοντας τα για κάθε προφίλ.

Επιστρέφοντας στο παίγνιο των ληστών, έστω, για λόγους απλότητας, q η πιθανότητα ο ληστής B να επιλέξει να ομολογήσει. Τότε, $\sigma_B(\text{ομολογία}) = q$ και $\sigma_B(\text{άρνηση}) = 1-q$. Το αναμενόμενο «κέρδος» τότε για τον A επιλέγοντας $s_A = \text{ομολογία}$ είναι $Eu_A(\text{ομολογία}) = qu_A(\text{ομολογία, ομολογία}) + (1-q)u_A(\text{ομολογία, άρνηση})$

Επιπρόσθετα,

$$Eu_A(\text{άρνηση}) = qu_A(\text{άρνηση, ομολογία}) + (1-q)u_A(\text{άρνηση, άρνηση})$$

Η έννοια του Nash Equilibrium μπορεί να επεκταθεί και στην περίπτωση των σύνθετων στρατηγικών. Το Nash Equilibrium είναι σε αυτήν την περίπτωση ένα προφίλ σύνθετων στρατηγικών όπου κάθε παίκτης επιλέγει τη βέλτιστη απόκριση στο προφίλ σύνθετων στρατηγικών των άλλων παικτών. Φορμαλιστικά, το προφίλ σ^* είναι Nash Equilibrium αν ισχύει

$$u_i(\sigma_i^*, \sigma_{-i}^*) \geq u_i(\sigma_i', \sigma_{-i}^*), \forall \sigma_i' \in \Delta_i, \forall i$$

$$\sum_{s_i \in S_i} \sigma_i(s_i) = 1, \forall i$$

Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι αγνές στρατηγικές αποτελούν στην ουσία μια ειδική περίπτωση των σύνθετων στρατηγικών με όλο το βάρος πιθανότητας σε μια στρατηγική, δηλαδή $\sigma_i(s_i') = 1$ και $\sigma_i(s_i'') = 0 \forall s_i'' \neq s_i'$.

3.4.2.7 Τεχνικές προσδιορισμού του Nash Equilibrium στην περίπτωση σύνθετων στρατηγικών

Υπάρχουν και εδώ διάφορες τεχνικές για την επίλυση Nash Equilibrium σε σύνθετη στρατηγική. Για λόγους απλούστευσης αυτές θα παρουσιαστούν εδώ για παίγνια δύο παικτών, 2×2 , όπως είναι το παίγνιο των ληστών. Η βασική τεχνική είναι ο ορισμός του p σαν τη πιθανότητα ο παίκτης που επιλέγει από τις γραμμές να επιλέξει την πρώτη γραμμή και q η πιθανότητα ο παίκτης που επιλέγει από τις στήλες να επιλέξει τη αριστερή στήλη. Στη συνέχεια, για τον πρώτο παίκτη υπολογίζεται το αναμενόμενο κέρδος κάθε στρατηγικής. Κατόπιν, προσδιορίζεται η τιμή του q που εξισώνει τα δύο αναμενόμενα κέρδη. Ο ίδιος υπολογισμός γίνεται και για τον δεύτερο παίκτη. Οι πιθανότητες που προσδιορίζονται με αυτόν τον τρόπο ορίζουν το Nash Equilibrium σύνθετων στρατηγικών. Αν προκύψει τιμή μικρότερη του μηδενός ή μεγαλύτερη της μονάδας τότε δεν υπάρχει Nash Equilibrium. Η λογική πίσω από αυτήν την τεχνική είναι η εξής: Ο παίκτης B επιλέγει το q^* που καθιστά τον άλλο παίκτη αδιάφορο για οποιαδήποτε από τις αγνές στρατηγικές του και κατ' επέκταση για κάθε τυχαίο συνδυασμό αυτών. Συνεπώς, η σύνθετη στρατηγική που καθιστά τον παίκτη B αδιάφορα είναι μια βέλτιστη απόκριση.

Μια δεύτερη, παρόμοια, τεχνική, είναι η χρήση των μεταβλητών p και q για τον υπολογισμό αυτή τη φορά του κέρδους του παίκτη A, αντί μόνο του αναμενόμενου κέρδους από την επιλογή μιας αγνής στρατηγικής. Αυτό το κέρδος θα είναι συνάρτηση τόσο της p όσο και της q μεταβλητής. Εξισώνοντας την παράγωγο ως προς p της συνάρτησης αυτής με το μηδέν προσδιορίζεται η τιμή του p που μεγιστοποιεί το κέρδος. Αυτή είναι και η συνάρτηση βέλτιστης απόκρισης για τον παίκτη A. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τον προσδιορισμό της συνάρτησης βέλτιστης απόκρισης για τον παίκτη B. Προκύπτουν, με αυτόν τον τρόπο, δύο εξισώσεις με δύο μεταβλητές, οπότε και είναι δυνατή η αλγεβρική επίλυση του συστήματος και ο προσδιορισμός των p^* και q^* που ικανοποιούν και τις δύο εξισώσεις.

Μια τρίτη μέθοδος προβλέπει και πάλι τη χρήση των p και q , αλλά αυτήν τη φορά για τον παίκτη A απαιτείται ο προσδιορισμός των τιμών της μεταβλητής q για τις οποίες η πρώτη στρατηγική είναι αυστηρά καλύτερη από τη δεύτερη, ο προσδιορισμός των τιμών για τις οποίες ο A είναι αδιάφορος προς τις δυο στρατηγικές και, τέλος, ο προσδιορισμός των τιμών για τις οποίες είναι αυστηρά καλύτερη η δεύτερη στρατηγική. Στη συνέχεια, αναπαριστώνται γραφικά οι τιμές της

μεταβλητής p στον x άξονα και οι τιμές της μεταβλητής q στον y άξονα, καθώς και η αμφιμονοσήμαντη αντιστοιχία τους. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για τον παίκτη B . Τα σημεία τομής στη γραφική παράσταση αποτελούν τα Nash Equilibria.

3.4.3 Ανάλυση του μοντέλου και αποτελέσματα

Έστω σύστημα τύπου TDMA στο οποίο λειτουργούν n τερματικά επαίσθησης. Κάθε τερματικό καθορίζει από μόνο του, αυτόνομα, τη δική του πολιτική (στρατηγική) επαναμετάδοσης, όπως ακριβώς ίσχυε και για τη μέθοδο αλυσιδωτών δυωνυμικών κατανομών. Το πρόβλημα θα μοντελοποιηθεί αυτήν τη φορά χρησιμοποιώντας τη θεωρία παιγνίων.

Έστω $G(n)$ το παίγνιο στο οποίο n τερματικά επαίσθησης δεν έχουν ακόμα μεταδώσει επιτυχώς την αναφορά επαίσθησής τους. Υποτίθεται, στο σημείο αυτό, ότι ανά πάσα στιγμή τα τερματικά επαίσθησης έχουν γνώση του αριθμού n των τερματικών των οποίων η μετάδοση εκκρεμεί. Σε κάθε στάδιο του παίγνιου $G(n)$, καθένα από τα n τερματικά πρέπει να αποφασίσει αν θα εκπέμψει (Transmit - T) ή θα περιμένει (Wait - W). Εφόσον ένας εκ των παικτών αποφασίσει να εκπέμψει και οι υπόλοιποι αποφασίσουν να περιμένουν, τότε ο παίκτης που εξέπεμψε θα λάβει ανταμοιβή (ωφέλεια) ίση με 1, ενώ οι υπόλοιποι $(n-1)$ παίκτες θα κληθούν να συμμετάσχουν στο παίγνιο $G(n-1)$ στην επόμενη χρονική περίοδο (χρονοσχισμή). Εάν εκπέμψουν ταυτόχρονα παραπάνω του ενός παίκτες ή δεν εκπέμψει κανένας παίκτης, τότε όλοι οι παίκτες θα κληθούν να συμμετάσχουν εκ νέου στο παίγνιο $G(n)$ κατά την επόμενη χρονική περίοδο. Επιπλέον, όμως, οι παίκτες τείνουν να αποδίδουν μεγαλύτερη ωφέλεια σε επιτυχείς μεταδόσεις που γίνονται όσο το δυνατό νωρίτερα και μικρότερες όταν αυτές έρχονται αργότερα. Αυτό αναπαρίσταται χάρη στην εισαγωγή ενός παράγοντα «μείωσης» ή «έκπτωσης» $\delta < 1$.

Έστω $u_{i,n}$ η ωφέλεια του τερματικού i όταν παίζει το παίγνιο $G(n)$ και έστω K μια τυχαία μεταβλητή η οποία υποδεικνύει τον αριθμό των υπόλοιπων χρηστών οι οποίοι εκπέμπουν σε μια δεδομένη χρονοσχισμή. Για $n=1$, ο παίκτης θα πρέπει και εκπέμψει, επιτυχάνοντας ωφέλεια ίση με $u_{i,1}=1$. Για $n>1$, η ωφέλεια $u_{i,n}$ μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της ενέργειας (T ή W) του παίκτη i , αναδρομικά, ως εξής:

$$u_{i,n}(T) = P[K=0] + \delta u_{i,n} P[K>0] \quad (3.33)$$

$$u_{i,n}(W) = \delta u_{i,n-1} P[K=1] + \delta u_{i,n} P[K \neq 1] \quad (3.34)$$

Συνεπώς, για $n > I$:

$$u_{i,n}(T) = \frac{P[K=0]}{1 - \delta P[K > 0]} \quad (3.35)$$

$$u_{i,n}(W) = \frac{\delta P[K=1]}{1 - \delta P[K \neq 1]} u_{i,n-1} \quad (3.36)$$

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι συμμετρικές στρατηγικές ισορροπίας για το παίγνιο $G(n)$, αν και μπορούν να εφαρμοστούν και μη-συμμετρικές στρατηγικές. Όταν αναζητείται μια συμμετρική ισορροπία, υποτίθεται ότι όλοι οι παίκτες ακολουθούν την ίδια στρατηγική. Συνεπώς, για την πιθανότητα $p_{i,n}$ ένας παίκτης i να εκπέμψει εντός μιας χρονικής περιόδου κατά την οποία παίζεται το $G(n)$, θα ισχύει:

$$p_{i,n} = p_n, \quad \forall i \quad (3.37)$$

και επιπλέον:

$$u_{i,n}(T) = u_n(T), \quad \forall i \quad (3.38)$$

$$u_{i,n}(W) = u_n(W), \quad \forall i \quad (3.39)$$

Η μοντελοποίηση του προβλήματος σύμφωνα με τις σχέσεις (3.35) και (3.36) λαμβάνει υπόψη της την επιθυμία των παικτών να επιτύχουν τη μετάδοσή τους κατά το δυνατό νωρίτερα. Ωστόσο, κατ' αυτόν τον τρόπο, κάποια στιγμή οι παίκτες θα αρχίσουν να αυξάνουν τις πιθανότητες εκπομπής τους, όσο το πλήθος n αυξάνει, κάτι που δεν αποτελεί την επιθυμητή συμπεριφορά, καθώς θα οδηγήσει σε πολλαπλές συγκρούσεις και, επομένως, σε ένα μη σταθερό και μη βιώσιμο σύστημα. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο αυτό, εισάγεται και ένας επιπλέον παράγοντας στο μοντέλο, αυτός του κόστους μετάδοσης. Πράγματι, μια διαδικασία εκπομπής, είτε επιτυχής είτε όχι, θα έχει και ένα κόστος εκπομπής, ειδικά εφόσον γίνεται λόγος, εν προκειμένω, για ασύρματα τερματικά με πεπερασμένη διάρκεια μπαταρίας. Ως εκ τούτου, το ως άνω μοντέλο μπορεί να επεκταθεί με την εισαγωγή ενός νέου, σταθερού παράγοντα κόστους, c . Έτσι, το παίγνιο $G(n)$ μπορεί να οριστεί τώρα ως εξής:

$$u_n(T) = \frac{P[K=0] - c}{1 - \delta P[K > 0]} \quad (3.40)$$

$$u_n(W) = \frac{\delta P[K=1]}{1 - \delta P[K \neq 1]} u_{i,n-1} \quad (3.41)$$

Στη σχέση (3.40), η πιθανότητα $P[K = 0]$ εκφράζει την πιθανότητα κανείς εκ των υπολοίπων χρηστών (πλην του i) να μην εκπέμψει στην υπό θεώρηση χρονοσχισμή. Από την άλλη, η πιθανότητα $P[K > 0]$ εκφράζει το ακριβώς αντίθετο (δηλαδή, ένας τουλάχιστον από τους υπόλοιπους χρήστες να εκπέμψει και αυτός). Κατά συνέπεια, οι δύο ανωτέρω πιθανότητες ισούνται με:

$$P[K = 0] = (1 - p_n)^{n-1} \quad (3.42)$$

$$P[K > 0] = 1 - (1 - p_n)^{n-1} \quad (3.43)$$

Επιπλέον, στη σχέση (3.41), η πιθανότητα $P[K = 1]$ εκφράζει την πιθανότητα ένας ακριβώς εκ των υπολοίπων χρηστών να εκπέμψει στην υπό θεώρηση χρονοσχισμή. Από την άλλη, η πιθανότητα $P[K \neq 1]$ εκφράζει το ακριβώς αντίθετο (δηλαδή, είτε κανείς είτε περισσότεροι του ενός να εκπέμψουν στη συγκεκριμένη χρονική περίοδο). Κατά συνέπεια, οι δύο ανωτέρω πιθανότητες ισούνται με:

$$P[K = 1] = np_n (1 - p_n)^{n-2} \quad (3.44)$$

$$P[K \neq 1] = 1 - np_n (1 - p_n)^{n-2} \quad (3.45)$$

Έτσι, λόγω των (3.42)-(3.45), οι (3.40)-(3.41) γίνονται:

$$u_n(T) = \frac{(1 - p_n)^{n-1} - c}{1 - \delta + \delta(1 - p_n)^{n-1}} \quad (3.46)$$

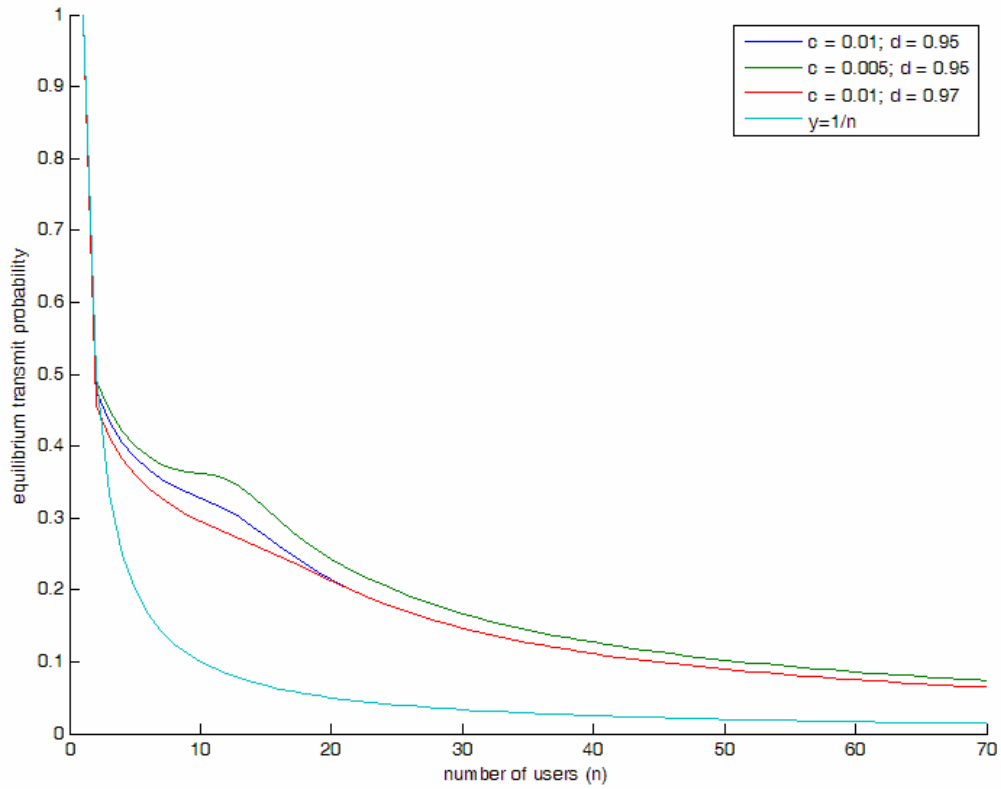
$$u_n(W) = \frac{np_n (1 - p_n)^{n-2}}{1 - \delta + \delta np_n (1 - p_n)^{n-2}} u_{i,n-1} \quad (3.47)$$

Σε κατάσταση ισορροπίας, για $n > 1$, θα πρέπει να ισχύει $p_n \in (0, 1)$. Δηλαδή, οι παίκτες θα πρέπει να επιλέγουν κατά τα τυχαία τρόπο μεταξύ της εκπομπής και της αναμονής. Προκειμένου να μεγιστοποιείται η συνολική ωφέλεια κάθε παίκτη για κάθε $n > 1$, θα πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη:

$$u_n(T) = u_n(W) \quad (3.48)$$

Μέσω των σχέσεων (3.46)-(3.48), προκύπτει η στρατηγική ισορροπίας, δεδομένων των τιμών των παραγόντων έκπτωσης και κόστους, δ και c αντίστοιχα. Το Σχήμα 3-7 παρουσιάζει τη στρατηγική ισορροπίας για διάφορες περιπτώσεις τιμών των παραγόντων δ και c . Το σχήμα δείχνει ότι το μοντέλο που περιγράφηκε επιτυγχάνει

την επιθυμητή συμπεριφορά της ελάττωσης της πιθανότητας μετάδοσης ενόσω το πλήθος n των παικτών αυξάνει.



Σχήμα 3-7. Μοντέλο θεωρίας παιγνίων – Αποτελέσματα για διάφορες τιμές του παράγοντα κόστους c και του παράγοντα έκπτωσης d

3.5 Παραπομπές

- [1] P. Diaconis and F. Mosteller, “Methods for Studying Coincidences”, *Journal of the American Statistical Association*, vol. 84, pp. 853-861, 1989.
- [2] E. H. McKinney, “Generalized Birthday Problem”, *American Mathematical Monthly*, vol. 73, pp. 385-387, 1966.
- [3] K. Suzuki, D. Tonien, K. Kurosawa, and K. Toyota, “Birthday Paradox for Multi-collisions”, *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 4296, pp. 29-40, 2006.
- [4] W. Feller, *An Introduction to Probability Theory and Its Applications*, Vol. 1, 3rd ed. New York: Wiley, 1968; 31-32.
- [5] M. Sayrafiezadeh, “The Birthday Problem Revisited”, *Mathematics Magazine*, vol. 67, pp. 220-223, 1994.
- [6] H. Holma and A. Toskala, eds., *WCDMA for UMTS*, 3rd ed. West Sussex, England: John Wiley & Sons, 2004; ch. 8.
- [7] M. Nawrocki, M. Dohler, and A. H. Aghvami, eds., *Understanding UMTS Radio Network Modelling, Planning and Automated Optimisation: Theory and Practice*. West Sussex, England: John Wiley & Sons, 2006.
- [8] H. W. Beyer, *CRC Standard Mathematical Tables*, 28th ed. Boca Raton, FL: CRC Press, p. 531, 1987.
- [9] A. Papoulis, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, pp. 102-103, 1984.
- [10] M. R. Spiegel, *Theory and Problems of Probability and Statistics*, New York: McGraw-Hill, pp. 108-109, 1992.
- [11] H. Steinhaus, *Mathematical Snapshots*, 3rd ed. New York: Dover, 1999.
- [12] J. von Neumann and O. Morgenstern, *The Theory of Games and Economic Behavior*, Princeton University Press, 1944.
- [13] R. McCain, *Game Theory: A Nontechnical Introduction to the Analysis of Strategy*, South-Western College Publications, 2003.
- [14] R. Gardner, *Games for Business and Economics*, John Wiley & Sons, 1994.

Κεφάλαιο 4

Βέλτιστες αποφάσεις αναδιάρθρωσης

4 Βέλτιστες αποφάσεις αναδιάρθρωσης

4.1 Εισαγωγή

Η αναδιάρθρωση ενός γνωστικού σταθμού βάσης συνίσταται στη διαδικασία τροποποίησης των διαρθρώσεων ενός ή περισσότερων εκ των πομποδεκτών του, με στόχο την παροχή καλύτερης ποιότητας υπηρεσίας προς τους χρήστες της περιοχής κάλυψης. Σε ένα γνωστικό δίκτυο, οι αναδιρθρώσεις 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.

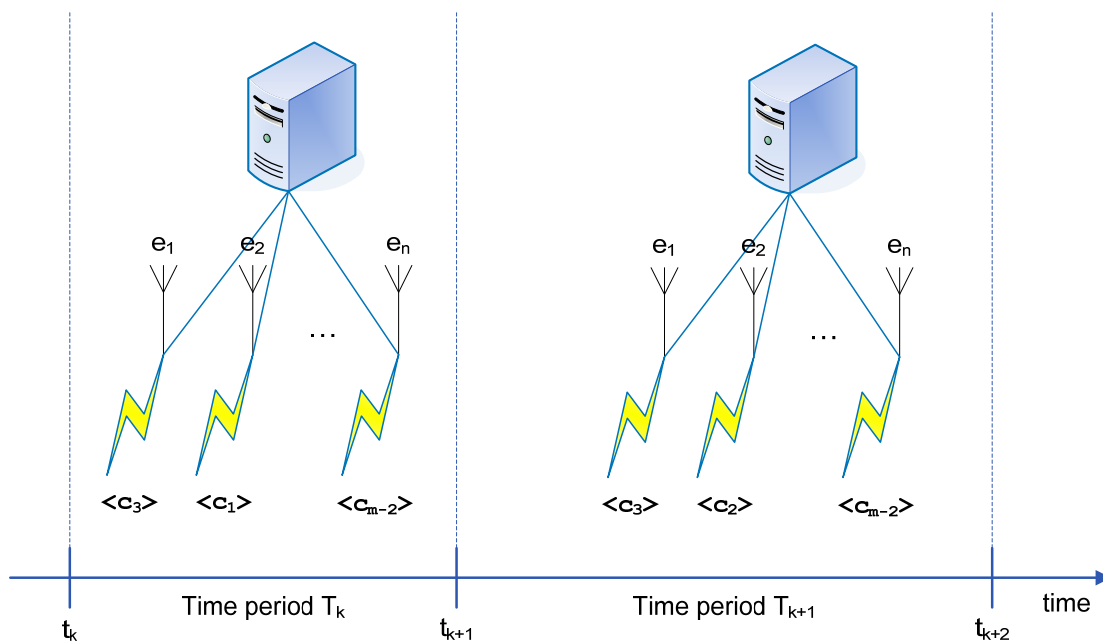
Η διαδικασία λήψης μιας απόφασης αναδιάρθρωσης ενός σταθμού βάσης έχει ως στόχο την εύρεση της βέλτιστης κατανομής διαρθρώσεων, μέσα από ένα σύνολο δυνατών κατανομών, σύμφωνα με τα ακόλουθα κριτήρια βελτιστοποίησης:

- 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 4-1, 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 4-1. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αναδιάρθρωσης γνωστικού σταθμού βάσης

4.2 Η αναγκαιότητα ευφυών αλγορίθμων επιλογής διαρθρώσεων

Το πρόβλημα εύρεσης της βέλτιστης κατανομής διαρθρώσεων, που περιγράφηκε στα παραπάνω, έχει τύχει επί του παρόντος επιφανειακής μόνο αντιμετώπισης από τη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία. Οι έως σήμερα προσεγγίσεις μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε εκείνες που:

- Αγνοούν τη δυνατότητα αναδιάρθρωσης της δικτυακής υποδομής και εστιάζονται μόνο σε αυτήν των τερματικών συσκευών. Τούτο έχει ως συνέπεια να εξετάζουν μόνο συγκεκριμένα και προκαθορισμένα στιγμιότυπα μιας κατά τα άλλα δυναμικά μεταβαλλόμενης δικτυακής τοπολογίας.
- Επιχειρούν να επιτύχουν μια βέλτιστη ανακατανομή του τρέχοντος φορτίου, θεωρώντας και πάλι ένα πιθανώς ετερογενές, αλλά σε κάθε περίπτωση σταθερό και προκαθορισμένο, δίκτυο πρόσβασης.
- Λαμβάνουν υπόψη τη δυνατότητα αναδιάρθρωσης του δικτύου, αλλά περιορίζονται στην περιγραφή μιας υψηλού επιπέδου λειτουργικής αρχιτεκτονικής, καθορίζοντας στρώματα και οντότητες λειτουργιών, χωρίς, όμως, να παρέχουν λεπτομέρειες για τους αλγορίθμους βάσει των οποίων θα λαμβάνονται οι αποφάσεις αναδιάρθρωσης.
- Υιοθετούν διαδικασίες λήψης αποφάσεων αναδιάρθρωσης βασισμένες αμιγώς σε προκαθορισμένες και ανελαστικές πολιτικές, χωρίς προσπάθεια πραγματικής βελτιστοποίησης της απόδοσης του δικτύου και της εξυπηρέτησης των χρηστών (π.χ., μετάπτωση σε άλλη συχνότητα λειτουργίας οποτεδήποτε η παρεμβολή ξεπεράσει ένα καθορισμένο όριο).
- Εστιάζονται σε περιορισμένες αναδιαρθρώσεις των υψηλών στρωμάτων (π.χ., μέγεθος παραθύρου TCP), αντί στη μελέτη των αναδιαρθρώσεων του δικτύου ραδιοπρόσβασης.

Η παρούσα διατριβή σκοπεύει στην κάλυψη των κενών των μέχρι σήμερα ερευνητικών προσπαθειών προτείνοντας έναν ευφυή αλγόριθμο βέλτιστης επιλογής διαρθρώσεων πολλαπλών παραμέτρων εισόδου.

Σε αντιδιαστολή, μια μη-ευφυής μέθοδος εξονυχιστικής αναζήτησης της βέλτιστης απόφασης αναδιάρθρωσης θα απαιτούσε απαγορευτικό χρόνο υπολογισμών, όπως φαίνεται από την ανάλυση που ακολουθεί:

Έστω n το πλήθος των πιθανών διαρθρώσεων του πομποδέκτη ενός γνωστικού σταθμού βάσης. Έστω, επίσης, r ο αριθμός των πιθανών τύπων ραδιοδιεπαφής και n_{r_i} το πλήθος των συχνοτήτων στις οποίες επιτρέπεται να λειτουργήσει η ραδιοδιεπαφή r_i , δηλαδή μία από τις r ραδιοδιεπαφές. Τότε, για το πλήθος n των πιθανών διαρθρώσεων, ισχύει:

$$n = \sum_r n_{r_i} \leq r \cdot \max_{r_i} (n_{r_i}) \quad (4.1)$$

Στην ειδική περίπτωση όπου το πλήθος n_{r_i} δε διαφέρει από ραδιοδιεπαφή σε ραδιοδιεπαφή, έχουμε:

$$n_{r_i} = f, \quad \forall r_i \quad (4.2)$$

όπου f ο συνολικός αριθμός υποψήφιων συχνοτήτων, οπότε και ισχύει:

$$n = r \cdot f \quad (4.3)$$

δηλαδή το πλήθος των διαρθρώσεων ισούται με το γινόμενο του αριθμού των υποψήφιων τύπων ραδιοδιεπαφής και του πλήθους των υποψήφιων συχνοτήτων.

Έστω τώρα ότι ο υπό εξέταση γνωστικός σταθμός βάσης είναι εξοπλισμένος με t αναδιαρθρώσιμους πομποδέκτες. Το συνολικό πλήθος των δυνατών κατανομών των διαρθρώσεων στους διαθέσιμους πομποδέκτες είναι τότε:

$$C(n, t) = \frac{n!}{t!(n-t)!} \quad (4.4)$$

αφού ισοδυναμεί με το πρόβλημα εύρεσης των συνδυασμών με τους οποίους μπορούν να επιλεγούν t μη-διατεταγμένα αντικείμενα μέσα από n πιθανά αντικείμενα.

Εν συνεχεία, ας υποτεθεί ότι ο αριθμός των χρηστών στο κελί ισούται με N . Ας θεωρηθεί, στο σημείο αυτό, χωρίς βλάβη της γενικότητας, ότι κάθε χρήστης μπορεί να είναι συνδεδεμένος μόνο με έναν πομποδέκτη, δηλαδή ένα σημείο πρόσβασης. Εξάλλου, τερματικά που μπορούν να συνδεθούν ταυτόχρονα σε άνω των μία δικτυακών διεπαφών, μπορούν να μοντελοποιηθούν σαν πολλαπλοί χρήστες. Εύκολα μπορεί να διαπιστωθεί ότι οι τρόποι με τους οποίους μπορούν να κατανεμηθούν οι N αυτοί χρήστες στους t πομποδέκτες είναι:

$$A(N, t) = N^t \quad (4.5)$$

Σε κάθε μία από αυτές τις κατανομές των χρηστών στα διαθέσιμα σημεία πρόσβασης, προκύπτει και διαφορετικό όφελος (utility) για κάθε χρήστη. Θεωρώντας μία αυθαίρετη τέτοια κατανομή και συμβολίζοντας με u_i το όφελος ενός χρήστη i εκ

των N χρηστών, προκύπτει ότι το συνολικό όφελος στην εν λόγω κατανομή είναι ίσο με:

$$u_{tot} = \sum_{i=1}^N u_i \quad (4.6)$$

Βέλτιστη είναι εκείνη η κατανομή διαρθρώσεων σε πομποδέκτες η οποία είναι ικανή να επιτύχει το υψηλότερο συνολικό όφελος, διερευνώντας όλες τις πιθανές κατανομές χρηστών σε πομποδέκτες. Λαμβάνοντας ως μονάδα στοιχειώδους πράξης τον υπολογισμό του οφέλους u_i ενός χρήστη i , προκύπτει ότι η συνολική πολυπλοκότητα της μεθόδου εξονυχιστικής διερεύνησης είναι ίση με:

$$Cpx_{exhaust} = C(n,t) \cdot A(N,t) \cdot N = \frac{n!}{t!(n-t)!} \cdot N^t \cdot N \Rightarrow$$

$$Cpx_{exhaust} = \frac{n!}{t!(n-t)!} \cdot N^{t+1} \quad (4.7)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην παραπάνω ανάλυση θεωρήθηκε ως αμελητέος ο χρόνος υπολογισμού του κόστους αναδιάρθρωσης. Όπως εύλογα προκύπτει από τη σχέση (4.7), η υπέρογκη πολυπλοκότητα μιας τέτοιας εξαντλητικής μεθόδου καθιστά την εφαρμογή της απαγορευτική, φανερώνοντας την ανάγκη καθορισμού και ανάπτυξης ευφυέστερων αλγορίθμων διαχείρισης.

4.3 Γενική περιγραφή της προτεινόμενης μεθόδου

Η παρούσα διατριβή σκοπεύει στην κάλυψη των κενών των μέχρι σήμερα ερευνητικών προσπαθειών προτείνοντας έναν ευφυή αλγόριθμο βέλτιστης επιλογής διαρθρώσεων για τους γνωστικούς σταθμούς βάσης. Συνοπτικά, ο προτεινόμενος αλγόριθμος κάνει χρήση των ακόλουθων παραμέτρων εισόδου:

- πλήθος αναδιαρθρώσιμων πομποδεκτών του γνωστικού σταθμού βάσης
- δυνατότητες των υποψήφιων διαρθρώσεων ως προς την προσδοκώμενη χωρητικότητα μετάδοσης και ακτίνα κάλυψης (προϊόντα του στρώματος της συλλογιστικής)
- πλήθος χρηστών
- χωρική κατανομή των χρηστών
- βαθμός κινητικότητας
- αναμενόμενο φορτίο κίνησης

- είδος αιτούμενων υπηρεσιών
- τρέχουσα κατανομή διαρθρώσεων και κόστος αναδιάρθρωσης
- ειδικές παράμετροι μοντελοποίησης, όπως η αποδεκτή πιθανότητα αποκλεισμού
- κανόνες και πολιτικές

Όλα τα παραπάνω στοιχεία μπορούν να επηρεάσουν την τελική απόφαση αναδιάρθρωσης.

Η προσέγγιση της προτεινόμενης μεθόδου συνίσταται στον προσδιορισμό της ωφέλειας ή χρησιμότητας (utility) που παρέχουν οι υποψήφια κατανομές διαρθρώσεων σε πέντε βασικούς τομείς επιδόσεων:

- *Κάλυψη*: Αναφέρεται στο βαθμό κάλυψης που παρέχει συνδυαστικά η υποψήφια κατανομή διαρθρώσεων.
- *Χωρητικότητα χρηστών*: Αφορά το ποσοστό του τρέχοντος φορτίου, μετρούμενου σε Erlang, που είναι σε θέση να καλύψει συνδυαστικά η υποψήφια κατανομή διαρθρώσεων.
- *Χωρητικότητα μετάδοσης*: Σχετίζεται με τους προσφερόμενους συνολικούς ρυθμούς μετάδοσης σε σύγκριση με τις τρέχουσες απαιτήσεις των χρηστών.
- *Κινητικότητα*: Υποδεικνύει το βαθμό κινητικότητας των χρηστών ο οποίος μπορεί να υποστηριχτεί από την υποψήφια κατανομή.
- *Κόστος αναδιάρθρωσης*: Μια ριζικά διαφορετική ή περισσότερο ενεργοβόρα, σε σχέση με την τρέχουσα, κατανομή διαρθρώσεων είναι λιγότερο πιθανό να επιλεγεί εν συγκρίσει με μια χαμηλού κόστους συνυποψήφιά της.

Η ωφέλεια, ή χρησιμότητα (utility), που απορρέει, σε καθέναν από τους παραπάνω τομείς, για το σύστημα διαχείρισης του γνωστικού σταθμού βάσης από την επιλογή μιας συγκεκριμένης κατανομής διαρθρώσεων αποτιμάται από κατάλληλα επιλεγμένες αντικειμενικές συναρτήσεις ή, αλλιώς, συναρτήσεις ωφέλειας/χρησιμότητας (objective or utility functions). Εν γένει, η ωφέλεια, ως οικονομικός όρος, είναι περισσότερο μια αφηρημένη έννοια παρά μια απτή και παρατηρήσιμη ποσότητα. Κατά συνέπεια, οι μονάδες στις οποίες μετράται μια «ποσότητα» ωφέλειας είναι μάλλον αυθαίρετες και αναπαριστούν μια σχετική μόνο τιμή. Στην παρούσα διατριβή, η ωφέλεια έχει θεωρηθεί ως ένα αδιάστατο μέγεθος, το οποίο αποτελεί ένα μέτρο της επίδοσης μιας υποψήφιας κατανομής διαρθρώσεων στους προαναφερθέντες τομείς.

4.4 Μαθηματική μοντελοποίηση των παραμέτρων του προβλήματος

Στην ενότητα αυτή, μοντελοποιούνται μαθηματικά οι παράμετροι του προβλήματος της βέλτιστης επιλογής διαρθρώσεων, κάτι που διευκολύνει τη φορμαλιστική διατύπωση της προτεινόμενης λύσης. Η λίστα που ακολουθεί περιεκλείει, με λεπτομερή τρόπο, όλες τις παραμέτρους του προβλήματος.

- Υπό θεώρηση αυτόνομος γνωστικός βάση: $bs \in BS$, όπου με BS συμβολίζεται το σύνολο των αυτόνομων γνωστικών βάσης του δικτύου.
- Σύνολο πομποδεκτών ενός γνωστικού σταθμού βάσης: $T_{bs} = \{t_{bs,1}, t_{bs,2}, \dots, t_{bs,n_t}\}$, όπου $bs \in BS$ ο υπό θεώρηση γνωστικός σταθμός βάσης και n_t (με $n_t = n_t(bs) = |T_{bs}|$) το συνολικό πλήθος πομποδεκτών με τους οποίους είναι εξοπλισμένος ο σταθμός bs .
- Σύνολο υποστηριζόμενων τεχνολογιών ραδιοπρόσβασης: R , όπου με $r \in R$ συμβολίζεται μια από τις υποστηριζόμενες τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης (τύποι ραδιοδιεπαφής), π.χ. GERAN, UTRAN, κ.λπ.
- Σύνολο εναλλακτικών ζωνών συχνοτήτων: B , όπου με $b \in B$ συμβολίζεται μια από τις εναλλακτικές ζώνες συχνοτήτων. Ισχύει $b = (f_c, w)$, δηλαδή κάθε ζώνη συχνοτήτων αποτελεί ένα διακριτό διατεταγμένο ζεύγος κεντρικής συχνότητας $f_c \in F = \{f_{c1}, f_{c2}, \dots, f_{c|F|}\}$ και εύρους ζώνης $w \in W = \{w_1, w_2, \dots, w_{|W|}\}$.
- Σύνολο δυνατών διαρθρώσεων: $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$, όπου με $c_i \in C, i = 1, 2, \dots, n$ συμβολίζεται μια από τις εναλλακτικές διαρθρώσεις ενός πομποδέκτη και με $n = |C|$ το συνολικό πλήθος των δυνατών διαρθρώσεων. Ισχύει $c = (r, b)$, με $r \in R$ και $b \in B$, δηλαδή κάθε διάρθρωση συνιστά ένα διακριτό διατεταγμένο ζεύγος τεχνολογίας ραδιοπρόσβασης και ζώνης συχνοτήτων. Η συνάρτηση $r = rat(c)$ επιστρέφει την τεχνολογία ραδιοπρόσβασης (τύπο ραδιοδιεπαφής) που χρησιμοποιεί η διάρθρωση c , ενώ η συνάρτηση $b = frb(c)$ επιστρέφει τη ζώνη συχνοτήτων την οποία χρησιμοποιεί.

- *Κατανομή διαρθρώσεων*: $\tilde{c}_{T_{bs}} \in (C_{cmb}(C, n_t) \subseteq C^{n_t})$. Πρόκειται για ένα συνδυασμό n_t διαφορετικών διαρθρώσεων μέσα από το σύνολο C (μία διάρθρωση για κάθε πομποδέκτη). Το σύνολο $C_{cmb}(C, n_t)$ υποδεικνύει το σύνολο των διαφορετικών συνδυασμών με τους οποίους μπορούν να επιλεγούν n_t διαρθρώσεις μέσα από τις n δυνατές διαρθρώσεις του συνόλου C . Για το μέγεθος του συνόλου $C_{cmb}(C, n_t)$, που αποτελεί υποσύνολο του

$$C^{n_t}, \text{ ισχύει: } |C_{cmb}(C, n_t)| = \frac{n!}{n_t!(n-n_t)!}, \text{ όπου } n = |C|. \text{ Φορμαλιστικά, η}$$

κατανομή $\tilde{c}_{T_{bs}}$ ορίζεται ως εξής:

$$\tilde{c}_{T_{bs}} = (c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{in_t}) = \{c_{ii} \mid c_{ii} \in C, i \leq n_t, c_{-ii} \neq c_{ii}\},$$

όπου ως c_{ii} νοείται η (υποψήφια) διάρθρωση του i -οστού πομποδέκτη, δηλαδή του πομποδέκτη $t_{bs,i} \in T_{bs}$, του γνωστικού σταθμού βάσης. Τέλος, η συνάρτηση $curd(C_{cmb}(C, n_t))$ επιστρέφει την τρέχουσα κατανομή διαρθρώσεων.

- *Διαδικασία ανάθεσης διαρθρώσεων σε πομποδέκτες*: $A_{C \rightarrow T_{bs}}$.
- *Ενεργός χωρητικότητα μετάδοσης*: $cap_{eff}(c), c \in C$.
- *Ενεργός ακτίνα κάλυψης*: $con_{eff}(c), c \in C$.
- *Σύνολο χρηστών*: U . Ένας μεμονωμένος χρήστης συμβολίζεται με $u \in U$.
- *Πλήθος χρηστών*: N_u , όπου προφανώς ισχύει $N_u = |U|$.
- *Χωρική κατανομή χρηστών*: $L(U) = \{\ell(u) \mid u \in U\}$, με τη συνάρτηση $\ell(u)$ να παρέχει τη θέση του χρήστη u . Αναλόγως της υλοποίησης, μπορεί να απαιτείται η γνώση της ακριβούς θέσης ενός χρήστη ή απλώς κάποια περιορισμένη πληροφόρηση επ' αυτής (π.χ., ενδεικτική απόσταση από το σταθμό βάσης).
- *Κατανομή βαθμών κινητικότητας χρηστών*: $Mob(U) = \{mob(u) \mid u \in U\}$.
- *Σύνολο υποστηριζόμενων υπηρεσιών*: S . Κάθε μεμονωμένη υπηρεσία συμβολίζεται με $s \in S$.

- *Σύνολο αιτούμενων υπηρεσιών:* $Srv(U) = \{srv(u) | u \in U\}$, όπου η συνάρτηση $srv(u) \in S$ επιστρέφει την υπηρεσία που αιτείται ο χρήστης $u \in U$.
- *Συνάρτηση φορτίου χρήστη:* $dem(u) = (srv(u), q(u, srv(u)))$, η οποία επιστρέφει το αιτούμενο φορτίο του χρήστη $u \in U$. Πρόκειται για ένα διατεταγμένο ζεύγος της αιτούμενης υπηρεσίας $srv(u)$ και του επιπέδου ποιότητας $q(u, srv(u))$ στην οποία αυτή ζητείται από τον εν λόγω χρήστη. Η συνάρτηση $br(dem(u))$ επιστρέφει την απαίτηση του χρήστη ως προς το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων (Kbps).
- *Σύνολο φορτίου:* $D(U) = \{dem(u) | u \in U\}$, το οποίο αντιπροσωπεύει το αιτούμενο φορτίο επί όλων των χρηστών.
- *Κόστος αναδιάρθρωσης:* $cost(\tilde{c}_i, \tilde{c}_j)$, το οποίο αντιπροσωπεύει το κόστος αναδιάρθρωσης από την κατανομή διαρθρώσεων \tilde{c}_i στην κατανομή \tilde{c}_j , με $\tilde{c}_i, \tilde{c}_j \in C_{cmb}(C, n_t)$. Το εν λόγω κόστος μπορεί να διαχωριστεί σε στατικό κόστος της νέας κατανομής \tilde{c}_j και σε κόστος μετάβασης από τη \tilde{c}_i στη \tilde{c}_j , δηλαδή $cost(\tilde{c}_i, \tilde{c}_j) = cost_{stat}(\tilde{c}_j) + cost_{trans}(\tilde{c}_i, \tilde{c}_j)$.
- *Πλαίσιο χρήσης:* $ctx = \left(\begin{array}{l} \xi, curd(C_{cmb}(C, n_t)), time, N_u, \\ L(U), Mob(U), D(U) \end{array} \right)$, το οποίο αποτυπώνει ένα στιγμιότυπο των κυριότερων παραμέτρων της τρέχουσας κατάστασης (π.χ., υποψήφια κατανομή, τρέχουσα κατανομή, χρονική στιγμή, αριθμός χρηστών, χωρική κατανομή χρηστών, κ.λπ.).
- *Πολιτική επί πλαισίου χρήσης:* $pol(ctx)$, που αναπαριστά έναν προκαθορισμένο κανόνα διαχείρισης εφαρμοστέο όταν το τρέχον πλαίσιο χρήσης συμπίπτει με το πλαίσιο χρήσης ctx .

Ο πίνακας που ακολουθεί συνοψίζει τις παραμέτρους του προβλήματος και τα σύμβολά τους.

Σύμβολο	Περιγραφή
Παράμετροι σταθμών βάσης	
BS	Σύνολο γνωστικών σταθμών βάσης του δικτύου
$bs \in BS$	Ο υπό θεώρηση γνωστικός σταθμός βάσης
T_{bs}	Σύνολο πομποδεκτών του bs
$t_{bs,i} \in T_{bs}$	i -οστός πομποδέκτης του bs
$n_t = n_t(bs)$	Πλήθος πομποδεκτών του bs
Παράμετροι διαρθρώσεων	
R	Σύνολο υποστηριζόμενων τεχνολογιών ραδιοπρόσβασης
$r \in R$	Τεχνολογία ραδιοπρόσβασης
B	Σύνολο εναλλακτικών ζωνών συχνοτήτων
$f_c \in F$	Κεντρική συχνότητα
$w \in W$	Εύρος ζώνης
$b = (f_c, w) \in B$	Ζώνη συχνοτήτων
C	Σύνολο δυνατών διαρθρώσεων
$c = (r, b) \in C$	Διάρθρωση
$r = rat(c)$	Τεχνολογία ραδιοπρόσβασης της διάρθρωσης c
$b = frb(c)$	Ζώνη συχνοτήτων της διάρθρωσης c
n	Πλήθος δυνατών διαρθρώσεων
$C_{cmb}(C, n_t) \subseteq C^{n_t}$	Σύνολο υποψήφιων κατανομών διαρθρώσεων (Σύνολο των συνδυασμών με τους οποίους μπορούν να επιλεγούν n_t διαρθρώσεις μέσα από τις n διαρθρώσεις του συνόλου C)
$\tilde{c}_{T_{bs}} \in C_{cmb}(C, n_t)$	Υποψήφια κατανομή διαρθρώσεων
$A_{C \rightarrow T_{bs}}$	Διαδικασία ανάθεσης διαρθρώσεων σε πομποδέκτες

$curd(C_{cmb}(C, n_i))$	Συνάρτηση υπόδειξης της τρέχουσας κατανομής διαρθρώσεων
$cov_{eff}(c)$	Ενεργός ακτίνα κάλυψης της διάρθρωσης c
$cap_{eff}(c)$	Ενεργός χωρητικότητα μετάδοσης της διάρθρωσης c

Παράμετροι κατανομής χρηστών

U	Σύνολο χρηστών
N_u	Πλήθος χρηστών
$L(U)$	Χωρική κατανομή των χρηστών
$Mob(U)$	Κατανομή βαθμών κινητικότητας των χρηστών

Παράμετροι φορτίου

S	Σύνολο υποστηριζόμενων υπηρεσιών
$Srv(U)$	Σύνολο αιτούμενων υπηρεσιών
$dem(u)$	Συνάρτηση φορτίου του χρήστη u
$br(dem(u))$	Συνάρτηση απαιτούμενου ρυθμού δεδομένων του χρήστη u
$D(U)$	Σύνολο φορτίου

Παράμετροι αξιολόγησης επιδόσεων

$u(\tilde{c})$	Συνάρτηση ωφέλειας της κατανομής \tilde{c}
$u_{cov}(\tilde{c})$	Ωφέλεια κάλυψης της κατανομής \tilde{c}
$u_{ucap}(\tilde{c})$	Ωφέλεια χωρητικότητας χρηστών της κατανομής \tilde{c}
$u_{icap}(\tilde{c})$	Ωφέλεια χωρητικότητας μετάδοσης της κατανομής \tilde{c}
$u_{mob}(\tilde{c})$	Ωφέλεια κινητικότητας της κατανομής \tilde{c}
$u_{cost}(\tilde{c})$	Ωφέλεια κόστους αναδιάρθρωσης της κατανομής \tilde{c}
$cost(\tilde{c}_i, \tilde{c}_j)$	Κόστος αναδιάρθρωσης από την κατανομή \tilde{c}_i στην κατανομή \tilde{c}_j

ctx	Πλαίσιο χρήσης
$pol(ctx)$	Πολιτική επί του πλαισίου χρήσης ctx

4.5 Μαθηματική επίλυση του προβλήματος

Όπως γίνεται φανερό, η παρούσα διατριβή καλείται να επιλύσει ένα πρόβλημα πολλαπλών παραμέτρων εισόδου. Η βελτιστοποίηση που πρέπει να επιτευχθεί έγκειται στην καλύτερη δυνατή εξυπηρέτηση των χρηστών του συστήματος, από πλευράς κάλυψης, χωρητικότητας σε χρήστες και χωρητικότητας μετάδοσης, κινητικότητας και κόστους. Τούτο προϋποθέτει την αποτελεσματική αξιολόγηση των πιθανών κατανομών διαρθρώσεων, των εναλλακτικών λύσεων, δηλαδή, που έχει στη διάθεσή του το σύστημα διαχείρισης του γνωστικού σταθμού βάσης. Η βελτιστοποίηση καθίσταται αναγκαία εξαιτίας της δυναμικής φύσης των συνθηκών που επικρατούν στο γνωστικό δίκτυο.

Προκειμένου να επιλυθεί ένα τόσο σύνθετο και πολύπλοκο πρόβλημα βελτιστοποίησης, είναι απαραίτητη η κατάτμησή του. Για το σκοπό αυτό, καθορίζονται πέντε διαφορετικοί τομείς (κάλυψη, χωρητικότητα χρηστών, χωρητικότητα μετάδοσης, κινητικότητα, κόστος αναδιάρθρωσης) στους οποίους αξιολογείται η ωφέλεια που προσφέρει καθεμιά από τις υποψήφιες κατανομές διαρθρώσεων.

Έστω \tilde{c} μια υποψήφια κατανομή και $u(\tilde{c})$ η συνολική ωφέλειά της. Σκοπός της μεθόδου είναι η εύρεση εκείνης της κατανομής \tilde{c}_{opt} που μεγιστοποιεί την προσφερόμενη ωφέλεια, δηλαδή:

$$\tilde{c}_{opt} = \arg \max_{\forall \tilde{c} \in C_{cmb}(C, N_t)} \{u(\tilde{c})\} \quad (4.8)$$

Προκειμένου να καθοριστεί η συνάρτηση συνολικής ωφέλειας $u(\tilde{c})$, πρέπει πρώτα να οριστούν κατάλληλες επιμέρους συναρτήσεις ωφέλειας, για κάθε έναν από τους προαναφερθέντες τομείς επιδόσεων:

1. Κάλυψη: Σε αυτόν τον τομέα, κάθε υποψήφια κατανομή διαρθρώσεων αξιολογείται ως προς το ποσοστό των χρηστών που προβλέπεται να βρίσκονται εντός κάλυψης, εφόσον επιλεγεί και εφαρμοστεί. Η αντίστοιχη συνάρτηση ωφέλειας ορίζεται ως εξής:

$$u_{\text{cov}}(\tilde{c}) = \sum_{\forall c \in \tilde{c}} u_{\text{cov}}(c) \quad (4.9)$$

όπου $u_{\text{cov}}(c)$ είναι η συνάρτηση ωφέλειας της διάρθρωσης c ως προς την παρεχόμενη κάλυψη. Η τιμή της $u_{\text{cov}}(c)$ εξαρτάται από το ποσοστό των χρηστών, $p_{\text{cov}}(c, L(U))$, που είναι σε θέση να καλύψει η διάρθρωση c . Επομένως:

$$u_{\text{cov}}(c) = u_{\text{cov}}(p_{\text{cov}}(c, L(U))) \quad (4.10)$$

Κατά συνέπεια:

$$u_{\text{cov}}(\tilde{c}) = u_{\text{cov}}(P_{\text{cov}}(\tilde{c}, L(U))) = \sum_{\forall c \in \tilde{c}} u_{\text{cov}}(p_{\text{cov}}(c, L(U))) \quad (4.11)$$

όπου

$$P_{\text{cov}}(\tilde{c}, L(U)) = \{p_{\text{cov}}(c, L(U)) \mid c \in \tilde{c}\} \quad (4.12)$$

2. Χωρητικότητα χρηστών: Σε αυτόν τον τομέα, κάθε υποψήφια κατανομή διαρθρώσεων αξιολογείται ως προς το ποσοστό των χρηστών που προβλέπεται να βρίσκονται εντός χωρητικότητας, εφόσον επιλεγεί και εφαρμοστεί. Προκειμένου να προσδιοριστεί το ποσοστό αυτό, γίνονται στο συγκεκριμένο τομέα οι εξής δύο παραδοχές:

- Οι χρήστες εξυπηρετούνται στο ελάχιστο αποδεκτό επίπεδο ποιότητας.
- Όλοι οι χρήστες υποτίθεται ότι βρίσκονται εντός της ακτίνας κάλυψης των διαρθρώσεων μιας κατανομής. Με τον τρόπο αυτό, απομονώνεται η συνεισφορά κάθε διάρθρωσης στη διαμόρφωση της χωρητικότητας χρηστών της κατανομής από την επίδοσή της ως προς τις δυνατότητες κάλυψης, η οποία αποτιμάται στον προηγούμενο τομέα.

Η αντίστοιχη συνάρτηση ωφέλειας ορίζεται ως εξής:

$$u_{\text{ucap}}(\tilde{c}) = \sum_{\forall c \in \tilde{c}} u_{\text{ucap}}(c) \quad (4.13)$$

όπου $u_{\text{ucap}}(c)$ είναι η συνάρτηση ωφέλειας της διάρθρωσης c ως προς την παρεχόμενη χωρητικότητα χρηστών. Η τιμή της $u_{\text{ucap}}(c)$ εξαρτάται από το

ποσοστό των χρηστών, $p_{ucap}(c, D(U))$, που βρίσκονται εντός χωρητικότητας της διάρθρωσης c . Επομένως:

$$u_{ucap}(c) = u_{ucap}(p_{ucap}(c, D(U))) \quad (4.14)$$

όπου το ποσοστό χρηστών $p_{ucap}(c, D(U))$ εξαρτάται από φορτίο των χρηστών $D(U)$, καθώς και από τα ειδικά χαρακτηριστικά της διάρθρωσης c (τεχνολογία πρόσβασης και ζώνη συχνοτήτων που χρησιμοποιεί), δηλαδή:

$$p_{ucap}(c, D(U)) = p_{ucap}(rat(c), frb(c), D(U)) \quad (4.15)$$

Κατά συνέπεια:

$$u_{ucap}(\tilde{c}) = u_{cov}(P_{ucap}(\tilde{c}, D(U))) = \sum_{\forall c \in \tilde{c}} u_{ucap}(p_{ucap}(c, D(U))) \quad (4.16)$$

όπου:

$$P_{ucap}(\tilde{c}, D(U)) = \{p_{ucap}(c, D(U)) | c \in \tilde{c}\} \quad (4.17)$$

3. Χωρητικότητα μετάδοσης: Σε αυτόν τον τομέα, κάθε υποψήφια κατανομή διαρθρώσεων αξιολογείται ως προς τους ρυθμούς μετάδοσης που μπορεί να προσφέρει, εφόσον επιλεγεί και εφαρμοστεί. Η αντίστοιχη συνάρτηση ωφέλειας ορίζεται ως εξής:

$$u_{icap}(\tilde{c}) = u_{icap} \left(\frac{\sum_{\forall c \in \tilde{c}} p_{cov}(c, L(U)) \cdot cap_{eff}(c)}{\sum_{\forall u \in U} br(dem(u))} \right) \quad (4.18)$$

Δηλαδή, η $u_{icap}(\tilde{c})$ εξαρτάται από το ποσοστό κάλυψης του αιτούμενου φορτίου εκ της κατανομής \tilde{c} . Το ποσοστό αυτό εκφράζεται ως ο λόγος του σταθμισμένου αθροίσματος των ενεργών χωρητικοτήτων μετάδοσης των διαρθρώσεων της κατανομής, με βάρη τα ποσοστά (χωρικής) κάλυψης των χρηστών, προς το συνολικό άθροισμα των αιτούμενων ρυθμών μετάδοσης των χρηστών. Επομένως, συμβολίζοντας με $p_{icap}(\tilde{c}, L(U), D(U))$ το ποσοστό αυτό, ισχύει:

$$p_{icap}(\tilde{c}, L(U), D(U)) = \frac{\sum_{\forall c \in \tilde{c}} p_{cov}(c, L(U)) \cdot cap_{eff}(c)}{\sum_{\forall u \in U} br(dem(u))} \quad (4.19)$$

και

$$u_{icap}(\tilde{c}) = u_{icap}(p_{icap}(\tilde{c}, L(U), D(U))) \quad (4.20)$$

4. Κινητικότητα: Σε αυτόν τον τομέα, κάθε υποψήφια κατανομή διαρθρώσεων αξιολογείται ως προς το βαθμό κινητικότητας που μπορεί συνολικά να υποστηρίξει, εφόσον επιλεγεί και εφαρμοστεί. Η αντίστοιχη συνάρτηση ωφέλειας ορίζεται ως εξής:

$$u_{mob}(\tilde{c}) = u_{mob}(p_{mob}(\tilde{c}), Mob(U)) \quad (4.21)$$

όπου με $p_{mob}(\tilde{c})$ συμβολίζεται ο κανονικοποιημένος αθροιστικός βαθμός κινητικότητας των διαρθρώσεων της κατανομής. Δηλαδή, η τιμή της συνάρτησης $u_{mob}(\tilde{c})$ εξαρτάται από το βαθμό αυτό και από την κατανομή κινητικότητας των χρηστών. Για το βαθμό $p_{mob}(\tilde{c})$, ισχύει:

$$p_{mob}(\tilde{c}) = \frac{\sum_{\forall c \in \tilde{c}} mob(c)}{n_t \cdot \max_{c \in C} \{mob(c)\}} \quad (4.22)$$

5. Κόστος αναδιάρθρωσης: Σε αυτόν τον τομέα, κάθε υποψήφια κατανομή διαρθρώσεων αξιολογείται ως προς το κόστος αναδιάρθρωσης το οποίο θα επέλθει, εφόσον επιλεγεί και εφαρμοστεί, αντί της τρέχουσας κατανομής. Θέτοντας:

$$\tilde{c}_{cur} = curd(C_{mb}(C, n_t)) \quad (4.23)$$

η αντίστοιχη συνάρτηση κόστους ορίζεται ως εξής:

$$\text{cost}(\tilde{c}_{cur}, \tilde{c}) = \text{cost}_{stat}(\tilde{c}) + \text{cost}_{trans}(\tilde{c}_{cur}, \tilde{c}) \quad (4.24)$$

όπου η συνάρτηση $\text{cost}(\tilde{c}_{cur}, \tilde{c})$ αντιπροσωπεύει το κόστος αναδιάρθρωσης από την τρέχουσα κατανομή διαρθρώσεων \tilde{c}_{cur} στην κατανομή \tilde{c} . Το εν λόγω κόστος διαχωρίζεται σε στατικό κόστος της νέας κατανομής \tilde{c} (συνάρτηση $\text{cost}_{stat}(\tilde{c})$) και σε κόστος μετάβασης από τη \tilde{c}_{cur} στη \tilde{c} (συνάρτηση $\text{cost}_{trans}(\tilde{c}_{cur}, \tilde{c})$).

Συνεπώς, η αντίστοιχη συνάρτηση αρνητικής «ωφέλειας», μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$u_{cost}(\tilde{c}) = -\text{cost}(\tilde{c}_{cur}, \tilde{c}) \quad (4.25)$$

Βάσει των παραπάνω, η συνάρτηση συνολικής ωφέλειας, $u(\tilde{c})$, της υποψήφιας κατανομής \tilde{c} μπορεί να οριστεί ως σταθμισμένος μέσος των επιμέρους ωφελειών που παρουσιάστηκαν. Δηλαδή:

$$u(\tilde{c}) = \frac{\left(w_{cov} \cdot u_{cov}(\tilde{c}) + w_{ucap} \cdot u_{ucap}(\tilde{c}) + w_{icap} \cdot u_{icap}(\tilde{c}) + w_{mob} \cdot u_{mob}(\tilde{c}) + w_{cost} \cdot u_{cost}(\tilde{c}) \right)}{\left(w_{cov} + w_{ucap} + w_{icap} + w_{mob} + w_{cost} \right)} \quad (4.26)$$

όπου $w_{cov}, w_{ucap}, w_{icap}, w_{mob}, w_{cost}$ είναι τα βάρη των επιμέρους συναρτήσεων ωφέλειας.

Οι τιμές των βαρών αυτών εξαρτώνται από τους στόχους του συστήματος και ο διαχειριστής του συστήματος μπορεί να θέσει τις τιμές που επιθυμεί, αναλόγως της σπουδαιότητας που θέλει να προσδώσει σε καθέναν από τους πέντε τομείς επιδόσεων.

Θέτοντας, χάριν κομψότητας των συμβολισμών:

$$\begin{aligned} w_1 &= w_{cov}, w_2 = w_{ucap}, \\ w_3 &= w_{icap}, w_4 = w_{mob}, \\ w_5 &= w_{cost} \end{aligned} \quad (4.27)$$

$$\begin{aligned} u_1(\tilde{c}) &= u_{cov}(\tilde{c}), u_2(\tilde{c}) = u_{ucap}(\tilde{c}), \\ u_3(\tilde{c}) &= u_{icap}(\tilde{c}), u_4(\tilde{c}) = u_{mob}(\tilde{c}), \\ u_5(\tilde{c}) &= u_{cost}(\tilde{c}) \end{aligned} \quad (4.28)$$

η συνάρτηση συνολικής ωφέλειας μπορεί να γραφεί:

$$u(\tilde{c}) = \frac{\sum_{i=1}^5 w_i \cdot u_i(\tilde{c})}{\sum_{i=1}^5 w_i} \quad (4.29)$$

Τέλος, αν το σύστημα διαχείρισης περιλαμβάνει και συγκεκριμένες πολιτικές που πρέπει να εφαρμόζονται αναλόγως του πλαισίου χρήσης, τότε ο παραπάνω ορισμός γίνεται:

$$u(\tilde{c}) = pol(ctx) \cdot \frac{\sum_{i=1}^5 w_i \cdot u_i(\tilde{c})}{\sum_{i=1}^5 w_i} \quad (4.30)$$

όπου $ctx = (\tilde{c}, curd(C_{cmb}(C, n_t)), time, N_u, L(U), Mob(U), D(U))$ το πλαίσιο χρήσης και $pol(ctx)$ η πολιτική επί του πλαισίου, η οποία επιδρά ως πολλαπλασιαστικός παράγοντας ενίσχυσης ή αποδυνάμωσης του σταθμισμένου μέσου όρου των επιμέρους ωφελειών.

Η πολυπλοκότητα της προτεινόμενης μεθόδου είναι ίση με το πλήθος των δυνατών κατανομών των διαρθρώσεων στους διαθέσιμους πομποδέκτες, δηλαδή ίση με:

$$C(n, t) = \frac{n!}{t!(n-t)!} \quad (4.31)$$

όπως προκύπτει και από την (4.4), σαφώς χαμηλότερη από εκείνη της σχέσης (4.7) (που αντιστοιχεί στην εξονυχιστική αναζήτηση).

4.6 Επιλογή συναρτήσεων ωφέλειας

4.6.1 Η έννοια της ωφέλειας

Η ωφέλεια (utility) αποτελεί ένα αριθμητικό χαρακτηριστικό διάκρισης που ανατίθεται σε κάθε δυνατή επιλογή απόφασης, έτσι ώστε μεταξύ διάφορων εναλλακτικών επιλογών να προτιμάται αυτή με τη μεγαλύτερη ωφέλεια. Προκειμένου, όμως, να εκπληρώνει το ρόλο της ως πραγματικό διακριτικό ωφέλειας, η διάκριση αυτή πρέπει να είναι τέτοια ώστε η ωφέλεια κάθε αβέβαιης εναλλακτικής να ισούται με την προσδοκώμενη τιμή των ωφελειών όλων των πιθανών της εκβάσεων, τα οποία μπορεί να είναι είτε τελικές καταστάσεις είτε με τη σειρά τους αβέβαιες εναλλακτικές.

Στην περίπτωση που οι αποφάσεις λαμβάνονται μέσω μιας λογικής σχέσης, παραδείγματος χάριν αν το Α είναι προτιμότερο από το Β, και το Β είναι προτιμότερο από το Γ, τότε το Α πρέπει να προτιμηθεί και από το Γ, είναι προφανές ότι μπορεί να γίνει χρήση μιας αριθμητικής διάκρισης για την ιεράρχηση κάθε δυνατού αποτελέσματος, με απλή σύγκριση και κατάταξη τους. Ο καθορισμός μιας ισοδυναμίας σε όρους «χρήματος», αν και μπορεί να αποδειχθεί χρήσιμος σε μια τέτοια συστηματική διαδικασία, δεν είναι θεωρητικά απαραίτητος. Αυτό που αποδεικνύεται πιο δύσκολο είναι η εύρεση ενός τέτοιου συστήματος ιεράρχησης που θα ικανοποιεί τη θεμελιώδη απαίτηση για την ωφέλεια μιας αβέβαιης εναλλακτικής που αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

Ένας θεωρητικός τρόπος να επιτευχθεί αυτό είναι η σύγκριση των εναλλακτικών και/ή των τελικών αποτελεσμάτων με λαχνούς που επιτρέπουν στον ιδιοκτήτη τους τη διεκδίκηση ενός βραβείου. Ένας λαχνός με ονομαστική αξία 75%, δηλώνει ότι η πιθανότητα να κερδίσει το βραβείο είναι 0.75 και συνεπώς ανατίθεται σε αυτόν

ωφέλεια ίση με 0.75. Οτιδήποτε εκτιμάται ως ίσης αξίας με αυτό το λαχνό, λαμβάνει, επίσης, βαθμό ωφέλειας 0.75.

Το παραπάνω σύστημα ιεράρχησης πληροί τους όρους ενός συστήματος εκτίμησης ωφέλειας. Ας θεωρηθεί, για παράδειγμα, μια περίπτωση η οποία μπορεί να έχει ένα εκ των ακόλουθων δύο δυνατών αποτελεσμάτων:

- Το πρώτο αποτέλεσμα έχει πιθανότητα 0.3 και ωφέλεια ίση με 0.6 (θα μπορούσε να είναι ένας λαχνός με ονομαστική αξία 60%)
- Το δεύτερο αποτέλεσμα έχει πιθανότητα 0.7 και ωφέλεια ίση με 0.2 (ομοίως θα μπορούσε να είναι ένας λαχνός με ονομαστική αξία 20%)

Όταν τα δύο αυτά αποτελέσματα αναφέρονται σε λαχνούς, η διαμορφωθείσα κατάσταση είναι απολύτως ισοδύναμη με την πιθανότητα κατάκτησης του βραβείου ίση με $0.3 \times 0.6 + 0.7 \times 0.2 = 0.32$. Η περίπτωση αυτή, δηλαδή, έχει εξ' ορισμού ωφέλεια ίση με 0.32, υπολογισμένη σύμφωνα με τον κανόνα υπολογισμού της προσδοκώμενης τιμής. Το ίδιο εφαρμόζεται σε κάθε άλλη περίπτωση που αφορά είτε λαχνούς είτε αντικείμενα ή καταστάσεις στα οποία έχει ανατεθεί μια ωφέλεια (με άμεση ή έμμεση σύγκριση με αντίστοιχους λαχνούς).

Ο τύπος ωφέλειας που παρουσιάστηκε στα παραπάνω λαμβάνει τιμές εντός του διαστήματος $[0, 1]$, αν και αυτός ο περιορισμός δεν είναι στην ουσία απαραίτητος. Η βασική αρχή είναι ότι είναι δυνατή η μετάφραση ή η προσαρμογή μιας κλίμακας ωφέλειας χωρίς να επηρεάζονται με κανέναν τρόπο οι προκύπτουσες αποφάσεις. Αυτό συμβαίνει διότι κάθε πλευρά μιας σύγκρισης μεταφράζεται ή προσαρμόζεται με τον ίδιο τρόπο και δεν επηρεάζει τις ανισότητες, εφόσον, φυσικά, ο παράγοντας προσαρμογής είναι θετικός. Συγκεκριμένα, μπορεί να διατηρηθεί η ίδια κλίμακα ωφέλειας αν προκύψει ένα αποτέλεσμα περισσότερο πολύτιμο από κάθε βραβείο που αρχικά θεωρήθηκε. Αν αυτό το βραβείο εκτιμάται ότι είναι τόσο επιθυμητό όσο η πιθανότητα κέρδους του μεγαλύτερου βραβείου με πιθανότητα ίση με p , είναι δυνατή η ανάθεση ωφέλειας ίσης με $1/p$ σε αυτό το μεγαλύτερο βραβείο (η ωφέλεια αυτή είναι προφανώς μεγαλύτερη από ένα). Ομοίως, η αρχική κλίμακα μπορεί να επεκταθεί ώστε να συμπεριλάβει και αρνητικές ωφέλειες που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες ανεπιθύμητες καταστάσεις. Θεωρώντας μια τέτοια κατάσταση ως αποτέλεσμα μιας περίπτωσης, της οποίας τα υπόλοιπα αποτελέσματα είναι αρκετά θετικά, καθίσταται δυνατή η ημι-απευθείας χρήση της κλίμακας του λαχνού για εκτίμηση της αρνητικής αυτής ωφέλειας.

Ακόμη και στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει «μέγιστο βραβείο», οι ωφέλειες όλων των περιπτώσεων πρέπει να οριοθετηθούν. Οι ωφέλειες δηλαδή θα πρέπει να έχουν ένα ανώτατο όριο, αλλά όχι αναγκαστικά ένα μέγιστο. Αυτό μπορεί να γίνει περισσότερο κατανοητό θεωρώντας τη συνάρτηση ωφέλειας του χρήματος, η οποία είναι συνήθως μη φθίνουσα, και έχει είτε μια ασύμπτωτη είτε είναι σταθερή πάνω από ένα συγκεκριμένο σημείο. Η θεωρητική απόδειξη της ανάγκης οριοθέτησης της ωφέλειας μπορεί να βρεθεί στις εργασίες [1]-[2].

Στην πραγματική ζωή, οι ωφέλειες δεν συνδέονται γραμμικά με χρηματικές αξίες, γεγονός το οποίο αποδεικνύει ότι η μαθηματική προσδοκία του νομισματικού ρίσκου δεν είναι κατ' ανάγκη το πλέον σωστό μέτρο ωφέλειας. Η νομισματική προσδοκία είναι ένα ειδικό παράδειγμα ωφέλειας, το οποίο είναι μεν μαθηματικά αποδεκτό αλλά σε καμία περίπτωση δεν είναι ρεαλιστικό.

Υποθέτοντας, τώρα, ότι η συμπεριφορά ενός ατόμου απέναντι στα χρήματα δεν εξαρτάται από το ποσό που διαθέτει τη δεδομένη στιγμή (κάτι που είναι ορθό σε λογικά πλαίσια), τότε το χρηματικό τμήμα της συνάρτησης ωφέλειας του u πρέπει να είναι εκθετική συνάρτηση του πλούτου του. Θα μπορούσε να είναι, επίσης, γραμμική αλλά αυτό συνήθως είναι ανεπίτρεπτο δεδομένου ότι μια κατάλληλη συνάρτηση ωφέλειας θα πρέπει να είναι οριοθετημένη όταν αυτά που διακυβεύονται είναι πιθανώς μη οριοθετημένα). Πράγματι, η υπόθεση αυτή δηλώνει ότι η συνάρτηση ωφέλειας u αυτού του ατόμου είναι τέτοια ώστε η ποσότητα h δεν επηρεάζει την απόφαση μεταξύ μιας κατάστασης με ωφέλεια $pu(a+h) + (1-p)u(b+h)$ και μιας κατάστασης με ωφέλεια $qu(c+h) + (1-q)u(d+h)$. Μια συνάρτηση ωφέλειας που ικανοποιεί τα παραπάνω είναι η $u(x) = 1 - \exp(-x/r)$.

Αν και η παράμετρος x συνήθως ισούται με ολόκληρη την περιουσία ενός ατόμου, η αλλαγή του σημείου αναφοράς απλά προσαρμόζει γραμμικά μια εκθετική συνάρτηση και, επομένως, δεν επηρεάζει τις αποφάσεις. Έχει, συνεπώς, επικρατήσει όταν γίνεται χρήση της εκθετικής συνάρτησης ωφέλειας να θεωρείται ότι η παράμετρος x είναι το ποσό που κερδίζεται ή χάνεται σε δεδομένο ρίσκο. Ξεχωριστές περιπτώσεις ρίσκου μπορούν να αναλυθούν χωριστά με μια εκθετική συνάρτηση ωφέλειας, κάτι που δεν ισχύει με οποιαδήποτε άλλο τύπο συνάρτησης. Στην παραπάνω έκφραση της εκθετικής συνάρτησης ωφέλειας χρήματος, η σταθερά r (με μονάδες ίδιες με αυτές της μεταβλητής x) ονομάζεται ανοχή ρίσκου (risk tolerance). Σε περισσότερο γενικές συναρτήσεις ωφέλειας η ανοχή ρίσκου δεν είναι σταθερή και

ορίζεται σε κάθε σημείο x της καμπύλης ωφέλειας ίση με $-\frac{u'(x)}{u''(x)}$. Ο ορισμός αυτός είναι ανεξάρτητος από την επιτρεπόμενη γραμμική μετατροπή της συνάρτησης ωφέλειας.

Οι διαχειριστές χαρτοφυλακίων συχνά ισχυρίζονται ότι η ανοχή ρίσκου των επενδυτών είναι κατά προσέγγιση ανάλογη με τα οικονομικά τους στοιχεία. Αυτό μπορεί να ερμηνευθεί με έναν από τους εξής τρόπους:

- Όταν αναλύονται οι προοπτικές, η ανοχή ρίσκου που χρησιμοποιείται στην ανάλυση της μελλοντικής αβεβαιότητας είναι η σταθερά που αντιστοιχεί στην τρέχουσα κατάσταση. Στο επόμενο βήμα, όταν έχουν πλέον συμβεί συγκεκριμένα γεγονότα, μια διαφορετική σταθερά χρησιμοποιείται για μια ελαφρώς διαφορετική ανάλυση, με ανοχή ρίσκου που αντιστοιχεί στη νέα κατάσταση.
- Η συνάρτηση ωφέλειας που χρησιμοποιείται για τη λήψη στρατηγικών αποφάσεων ενσωματώνει τη μελλοντική μεταβολή της ανοχής ρίσκου του επενδυτή. Για παράδειγμα, αν η ανοχή ρίσκου είναι πράγματι ανάλογη του πλούτου ($r = kx$), η συνάρτηση ωφέλειας είναι τότε η λύση της διαφορικής εξίσωσης $kxu''(x) + u'(x) = 0$. Η λύση αυτής θέτοντας $y = u'(x)$, έτσι ώστε $k \frac{dy}{y} + \frac{dx}{x} = 0$, δείχνει ότι το y είναι ανάλογο του $x^{-1/k}$. Συνεπώς, μέχρι κάποια μετατροπή κλίμακας, η ωφέλεια u είναι, επίσης, δύναμη του x ; $x^{1-1/k}$. Προκειμένου η συνάρτηση να είναι άνω φραγμένη, θα πρέπει ο εκθέτης να είναι αρνητικός, δηλαδή $k < 1$.

4.6.2 Κατάλληλες συναρτήσεις ωφέλειας

Για να αποτελεί καλή επιλογή συνάρτησης ωφέλειας, μια συνάρτηση $u(x)$ πρέπει να παρουσιάζει τα εξής χαρακτηριστικά:

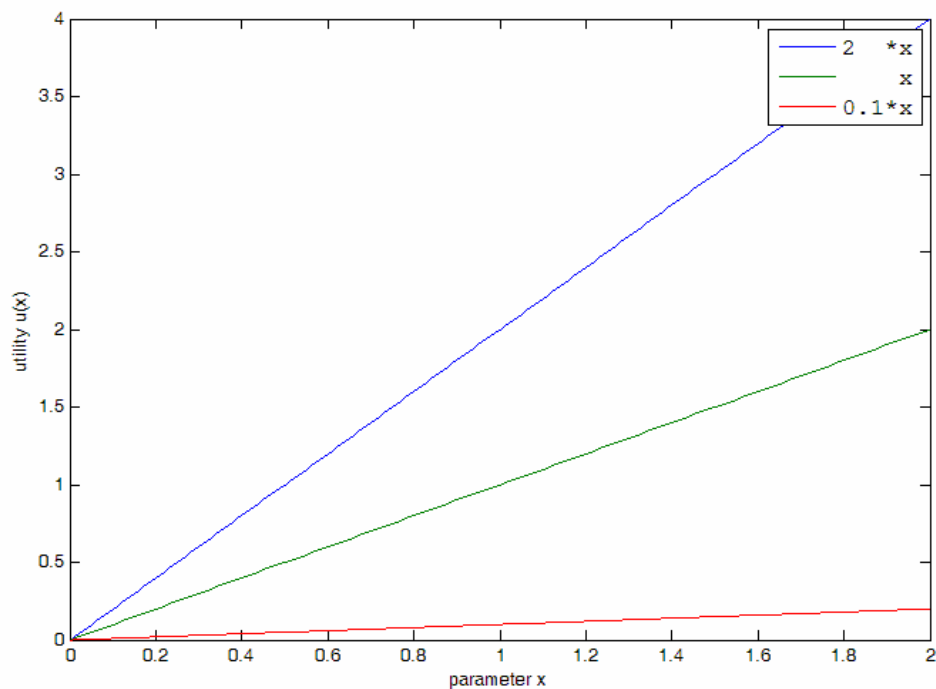
- μονοτονία
- κυρτότητα
- άνω φράγμα

Τυπικές συναρτήσεις ωφέλειας που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία είναι οι ακόλουθες:

- Γραμμική συνάρτηση:

$$u(x) = a + bx \quad (4.32)$$

Η $u(x)$ είναι γνησίως αύξουσα αν $b > 0$, γνησίως φθίνουσα αν $b < 0$, και σταθερή αν $b = 0$. Δείγματα της εν λόγω συνάρτησης απεικονίζονται γραφικά στο Σχήμα 4-2.

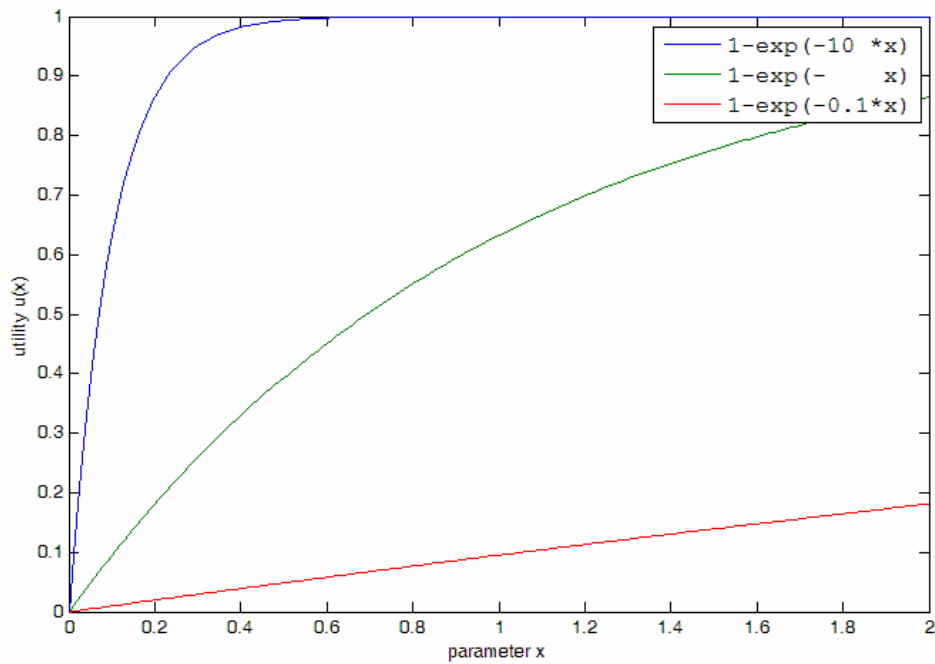


Σχήμα 4-2. Γραμμικές συναρτήσεις ωφέλειας

- Εκθετική συνάρτηση:

$$u(x) = 1 - e^{-kx} \quad (4.33)$$

με $k > 0$. Δείγματα της εν λόγω συνάρτησης απεικονίζονται γραφικά στο Σχήμα 4-3.

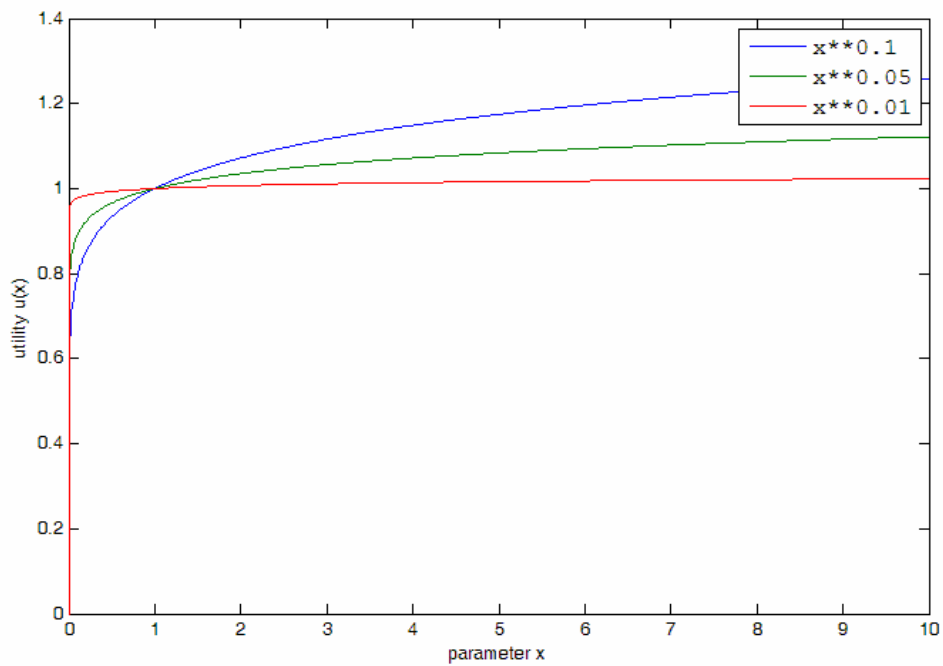


Σχήμα 4-3. Εκθετικές συναρτήσεις ωφέλειας

- Συνάρτηση ισχύος:

$$u(x) = \frac{x^a - b}{c} \quad (4.34)$$

με $0 < a \leq 1$, $b > 0$, $c > 0$. Δείγματα της εν λόγω συνάρτησης απεικονίζονται γραφικά στο Σχήμα 4-4.

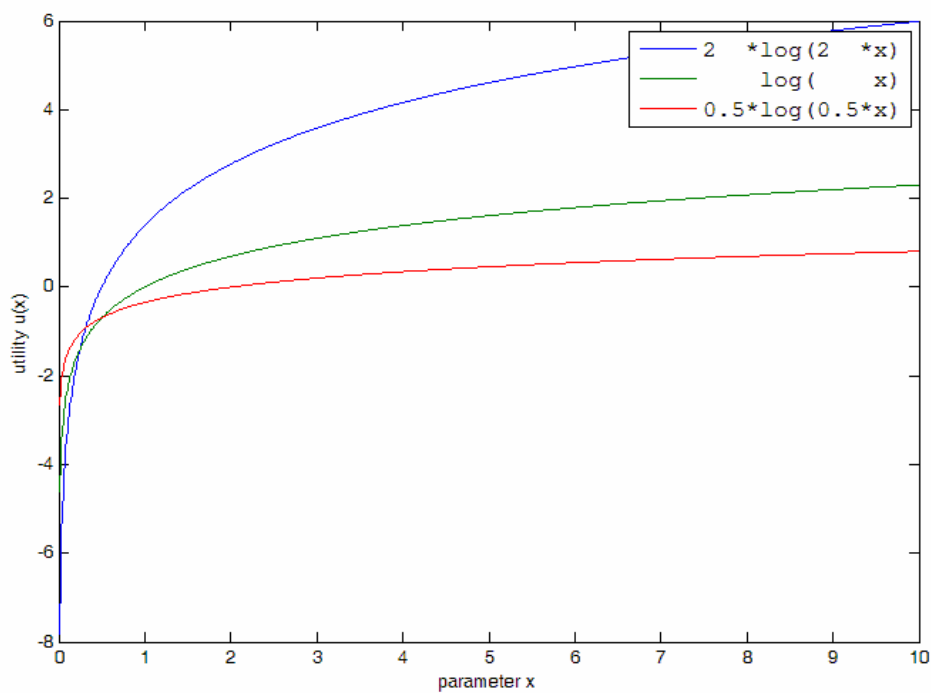


Σχήμα 4-4. Συναρτήσεις ισχύος

- Λογαριθμική συνάρτηση:

$$u(x) = a \ln(bx) + c \quad (4.35)$$

με $a > 0$, $b > 0$. Δείγματα της εν λόγω συνάρτησης απεικονίζονται γραφικά στο Σχήμα 4-5.

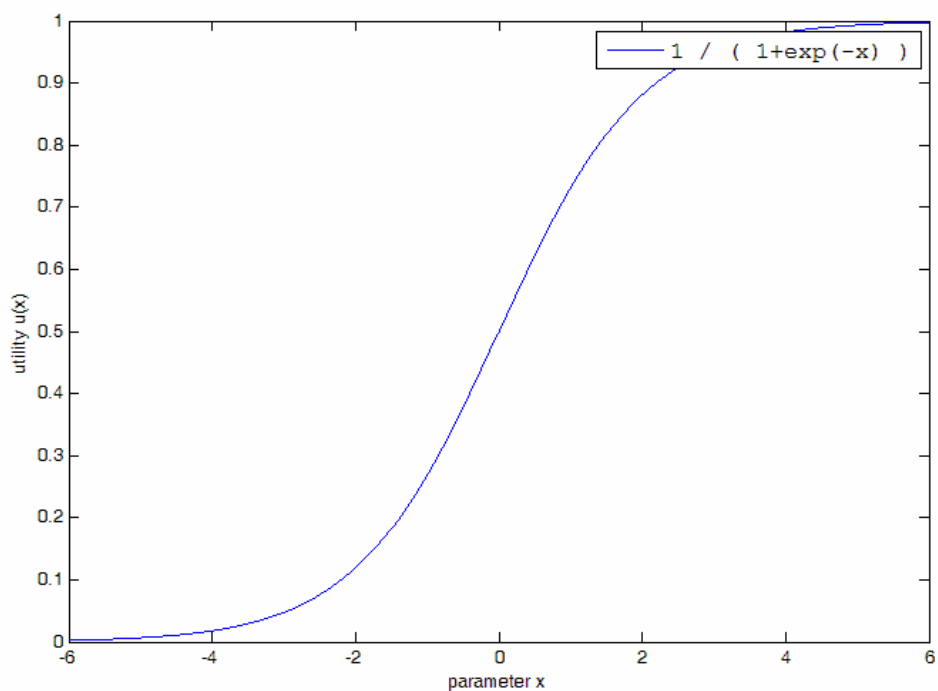


Σχήμα 4-5. Λογαριθμικές συναρτήσεις ωφέλειας

- Λογιστική συνάρτηση:

$$u(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (4.36)$$

η οποία αποτελεί την πιο συνηθισμένη μορφή μιας σιγμοειδούς καμπύλης. Η λόγω συνάρτηση απεικονίζεται γραφικά στο Σχήμα 4-6.



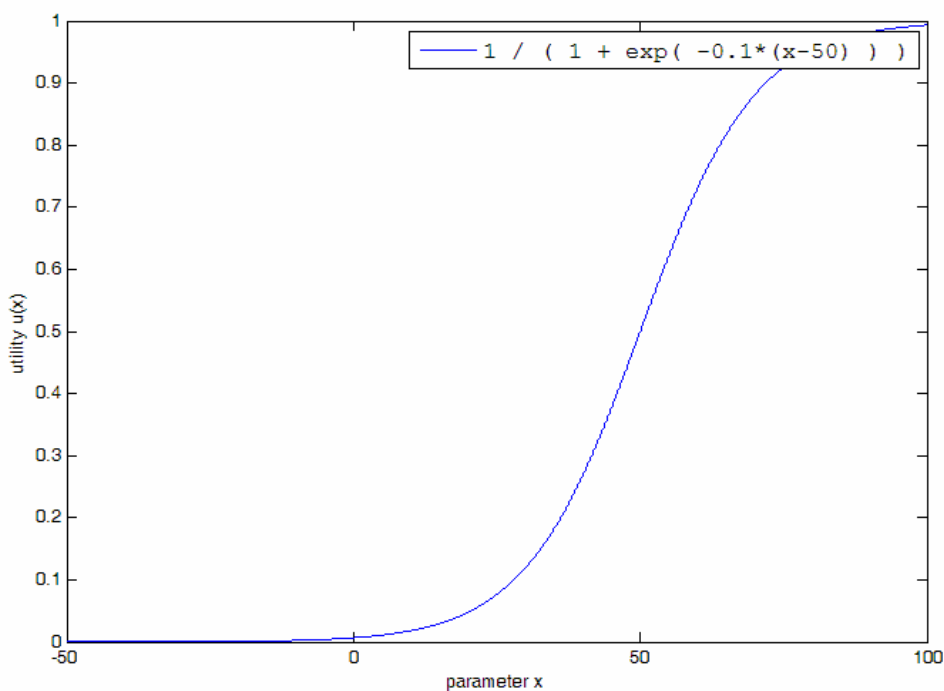
Σχήμα 4-6. Λογιστική συνάρτηση ωφέλειας

- Γενικευμένη λογιστική συνάρτηση:

$$u(x) = A + \frac{K}{\left(1 + Qe^{-B(x-M)}\right)^{1/\nu}} \quad (4.37)$$

Η εν λόγω συνάρτηση, η οποία απεικονίζεται γραφικά στο Σχήμα 4-7, αποτελεί τη γενίκευση της λογιστικής συνάρτησης και για τις παραμέτρους της ισχύουν τα εξής:

- A : Εκφράζει το κάτω όριο (κάτω ασύμπτωτη).
- K : Εκφράζει το άνω φράγμα (άνω ασύμπτωτη) αν προστεθεί και η τιμή του A . Αν $A=0$, τότε το K καλείται χωρητικότητα μεταφοράς.
- B : Αντιπροσωπεύει το ρυθμό αύξησης.
- $\nu > 0$: Επηρεάζει το σημείο (ασύμπτωτη) επί του οποίου συμβαίνει η μέγιστη αύξηση.
- Q : Η τιμή της επηρεάζεται από την τιμή $u(0)$.
- M : Αντιπροσωπεύει την τετμημένη του σημείου της μέγιστης αύξησης, εφόσον $Q=\nu$.



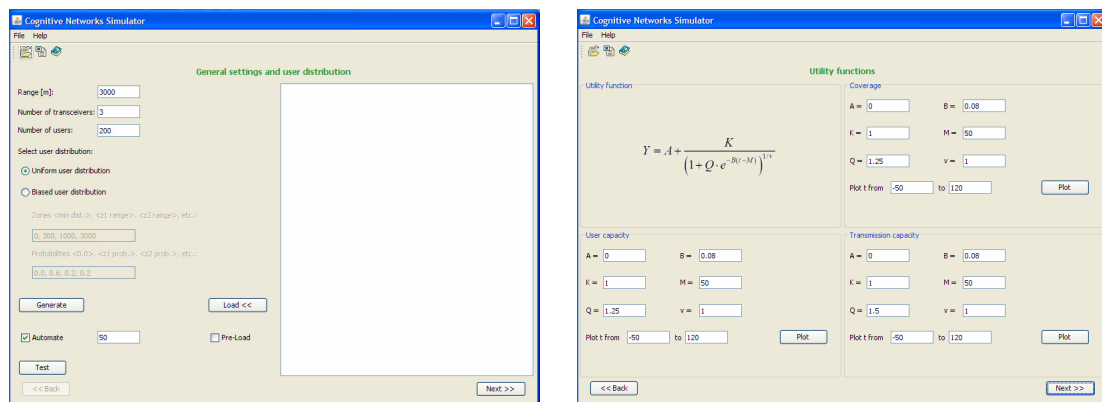
Σχήμα 4-7. Γενικευμένη λογιστική συνάρτηση ωφέλειας

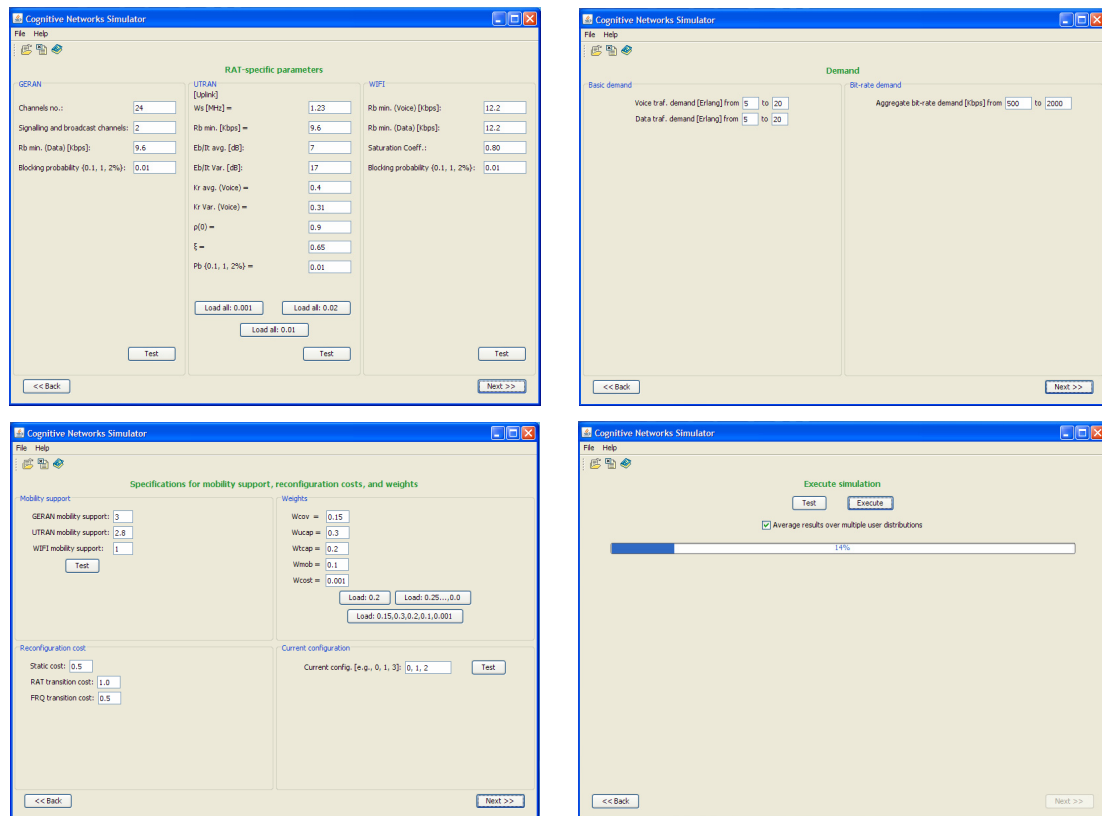
Εκ των παραπάνω υποψήφιων συναρτήσεων, επελέγη ως περισσότερο ενδεδειγμένη λύση η γενικευμένη λογιστική συνάρτηση, καθώς:

- είναι γνησίως αύξουσα
- παρουσιάζει και άνω αλλά και κάτω φράγμα
- παρέχει μεγάλους βαθμούς ελευθερίας, καθώς περιλαμβάνει μια πλειάδα παραμέτρων
- μπορεί να χρησιμεύσει ως συνάρτηση κατωφλίου
- παρουσιάζει δύο σημαντικά σημεία καμπής: ένα το οποίο σηματοδοτεί την απαρχή της ραγδαίας αύξησης της ωφέλειας και ένα το οποίο σηματοδοτεί την απαρχή του κορεσμού της ωφέλειας

4.7 Πλατφόρμα διαχείρισης της επιλογής βέλτιστων κατανομών διαρθρώσεων

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, κατασκευάστηκε μια πλατφόρμα προσομοίωσης της διαδικασίας επιλογής βέλτιστων κατανομών διαρθρώσεων. Η πλατφόρμα (Σχήμα 4-8) δίνει τη δυνατότητα καθορισμού μιας πλειάδας παραμέτρων εισόδου και μελέτης των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθόδου βελτιστοποίησης. Η πλατφόρμα κατασκευάστηκε σε γλώσσα Java (J2SE – Java 2 Standard Edition 6.0) και περιλαμβάνει μια σειρά από οθόνες (μενού) μέσα από τις οποίες μπορεί ο διαχειριστής να θέσει τις παραμέτρους του σεναρίου ή των σεναρίων που θέλει να εκτελέσει.





Σχήμα 4-8. Γραφικό περιβάλλον πλατφόρμας διαχείρισης

■ Οθόνη 1: Επιλογή γενικών παραμέτρων και κατανομής χρηστών.

Στην οθόνη αυτή (Σχήμα 4-9), εισάγονται οι βασικές παράμετροι της υπό εξέταση τοπολογίας και κατανομής των χρηστών. Οι παράμετροι αυτοί είναι:

- *Εμβέλεια της περιοχής κάλυψης:* Δηλώνει τη μέγιστη ακτίνα κάλυψης που θα πρέπει να παρέχει ο υπό μελέτη γνωστικός σταθμός βάσης.
- *Αριθμός πομποδεκτών:* Αντιστοιχεί στο πλήθος των αναδιαρθρώσιμων πομποδεκτών τους οποίους διαθέτει ο σταθμός βάσης.
- *Αριθμός χρηστών:* Δηλώνει τον αριθμό των χρηστών που καλείται να εξυπηρετήσει ο σταθμός βάσης.
- *Τύπος χωρικής κατανομής των χρηστών:* Στο σημείο αυτό, ο χρήστης της πλατφόρμας μπορεί να επιλέξει μεταξύ διαφορετικών τύπων χωρικής κατανομής των χρηστών. Δύο είναι τα κύρια είδη κατανομών που μπορούν να παραχθούν: «ομοιόμορφη» και «μη-ομοιόμορφη» (ή «πολωμένη»).

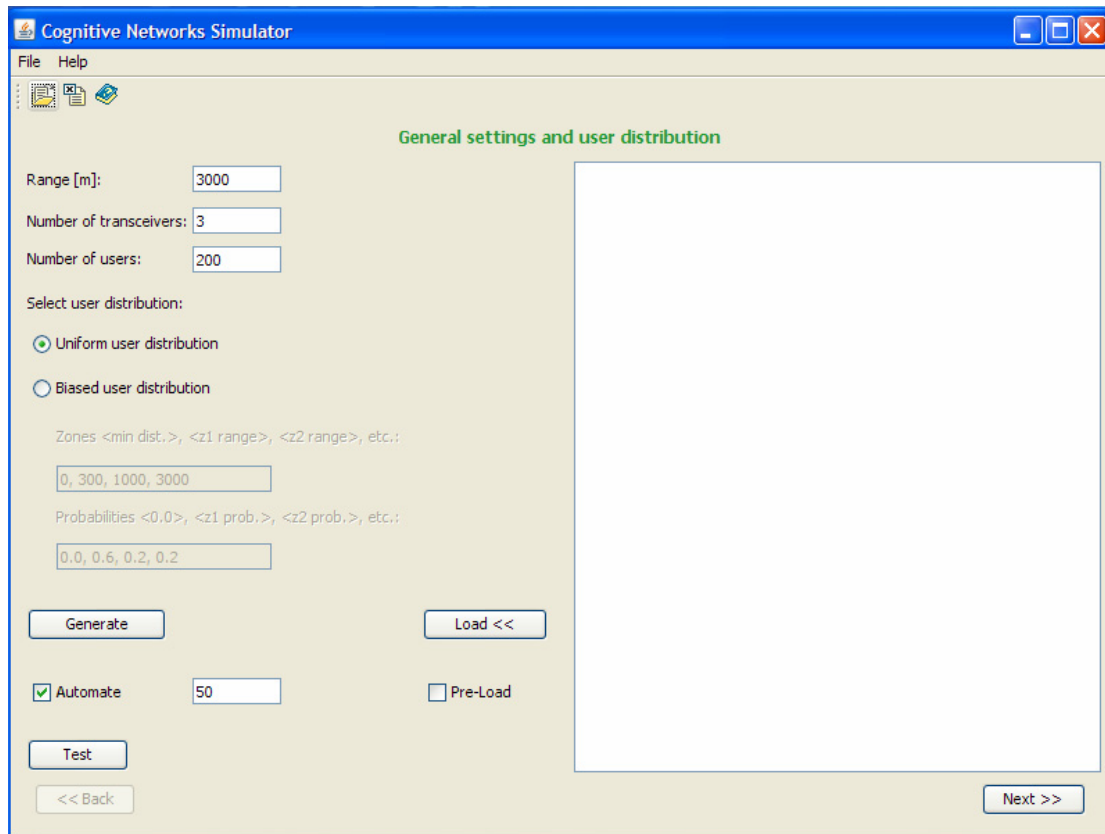
Εν γένει, οι χωρικές κατανομές παράγονται από το σύστημα προσομοίωσης κατά τυχαίο τρόπο. Στην περίπτωση που επιλεγεί ομοιόμορφη κατανομή, κάθε χρήστης «τοποθετείται» με την ίδια πιθανότητα μακριά ή κοντά στο σταθμό βάσης, καθώς και τριγύρω από αυτόν (δηλαδή, με την ίδια πιθανότητα ως προς την αζιμούθια γωνία).

Στην περίπτωση που επιλεγεί μη-ομοιόμορφη κατανομή, τότε κάθε χρήστης να μην «τοποθετείται» με την ίδια πιθανότητα ως προς την αζιμούθια γωνία αλλά όχι και με την ίδια πιθανότητα ως προς την απόστασή του από το σταθμό βάσης.

Συγκεκριμένα, όταν χρησιμοποιείται μη-ομοιόμορφη χωρική κατανομή, η περιοχή κάλυψης χωρίζεται σε ζώνες (τις οποίες μπορεί να ορίσει ο ίδιος ο χρήστης της πλατφόρμας) και σε κάθε ζώνη ανατίθεται και μια ξεχωριστή πιθανότητα, η οποία αντιπροσωπεύει και την πιθανότητα ένας χρήστης να βρίσκεται εντός της συγκεκριμένης ζώνης. Με τον τρόπο αυτό, δίδεται η δυνατότητα μελέτης ειδικών τύπων κατανομών, όπως, για παράδειγμα, μιας κατανομής στην οποία οι περισσότεροι χρήστες είναι συγκεντρωμένοι κοντά στο σταθμό βάσης (η οποία θα καλείται επίσημα στο εξής «χωρική κατανομή χρηστών με υψηλή πυκνότητα στο κέντρο») ή μιας κατανομής στην οποία οι περισσότεροι χρήστες είναι συγκεντρωμένοι στα άκρα της περιοχής κάλυψης (η οποία θα καλείται επίσημα στο εξής «χωρική κατανομή χρηστών με υψηλή πυκνότητα στα άκρα»).

Επιπρόσθετα, η πλατφόρμα που κατασκευάστηκε, παρέχει τις εξής δύο δυνατότητες:

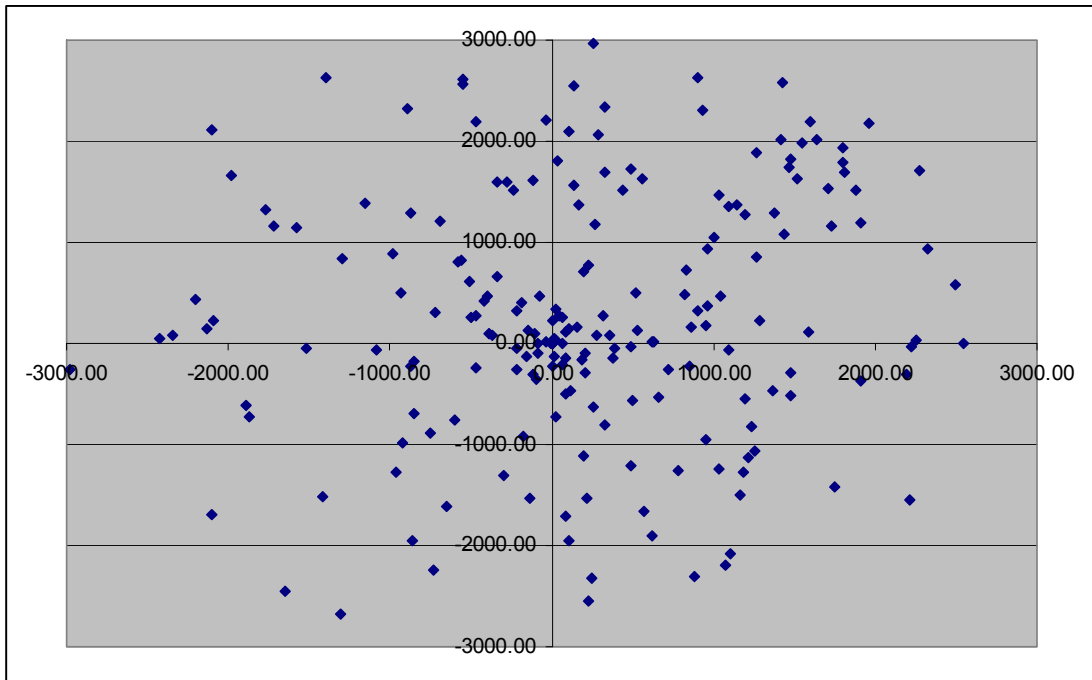
- Να φορτωθεί μια προκαθορισμένη χωρική κατανομή και να χρησιμοποιηθεί αυτή κατά την προσομοίωση.
- Να παραχθούν και να χρησιμοποιηθούν κατά την προσομοίωση πολλαπλές χωρικές κατανομές του τύπου που καθορίστηκε (π.χ., ομοιόμορφη). Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατή η αυτόματη παραγωγή και ταυτόχρονη μελέτη πολλαπλών κατανομών του ίδιου τύπου. Δίδεται, επίσης, και η δυνατότητα εξαγωγής του μέσου όρου των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από όλες τις κατανομές.



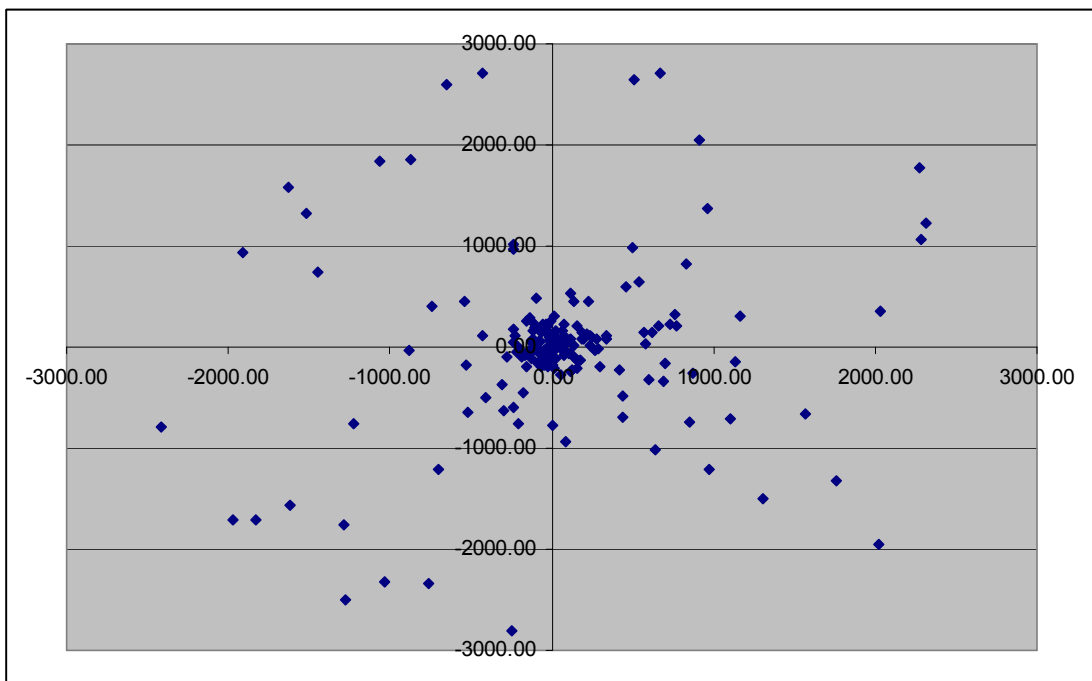
Σχήμα 4-9. Οθόνη 1: Επιλογή γενικών παραμέτρων και κατανομής χρηστών

Στα σχήματα που ακολουθούν, παρατίθενται ενδεικτικές μορφές για τρεις βασικούς τύπους χωρικών κατανομών:

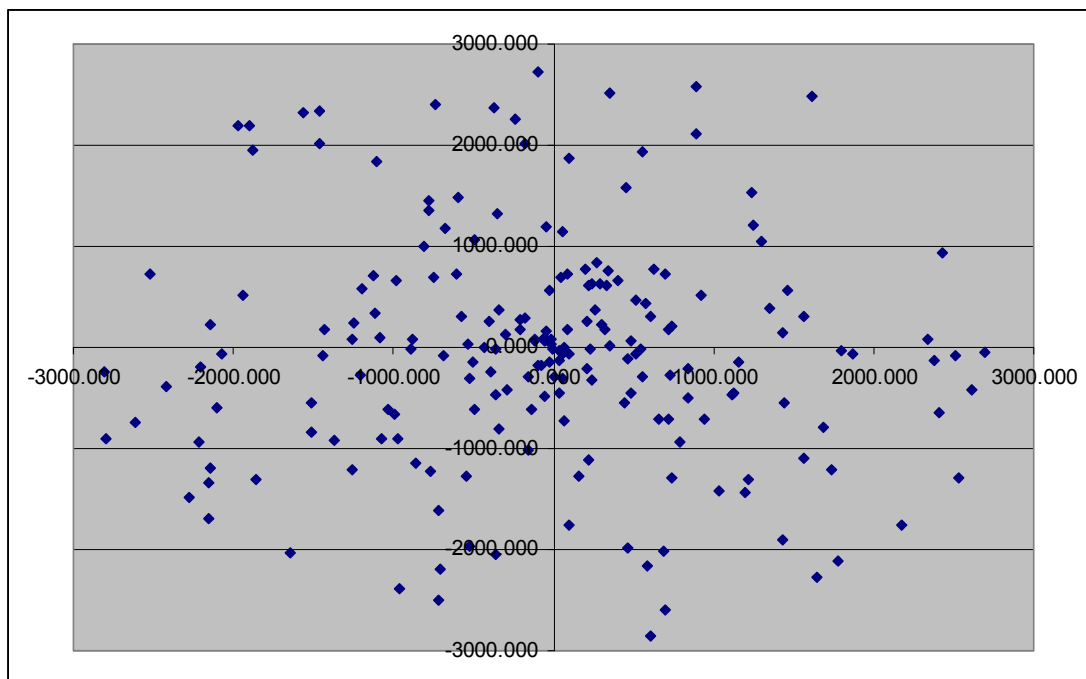
- ομοιόμορφη κατανομή χρηστών (Σχήμα 4-10)
- κατανομή χρηστών με υψηλή πυκνότητα στο κέντρο (Σχήμα 4-11)
- κατανομή χρηστών με υψηλή πυκνότητα στα άκρα (Σχήμα 4-12)



Σχήμα 4-10. Ενδεικτικό παράδειγμα ομοιόμορφης κατανομής χρηστών



Σχήμα 4-11. Ενδεικτικό παράδειγμα κατανομής χρηστών με υψηλή πυκνότητα στο κέντρο



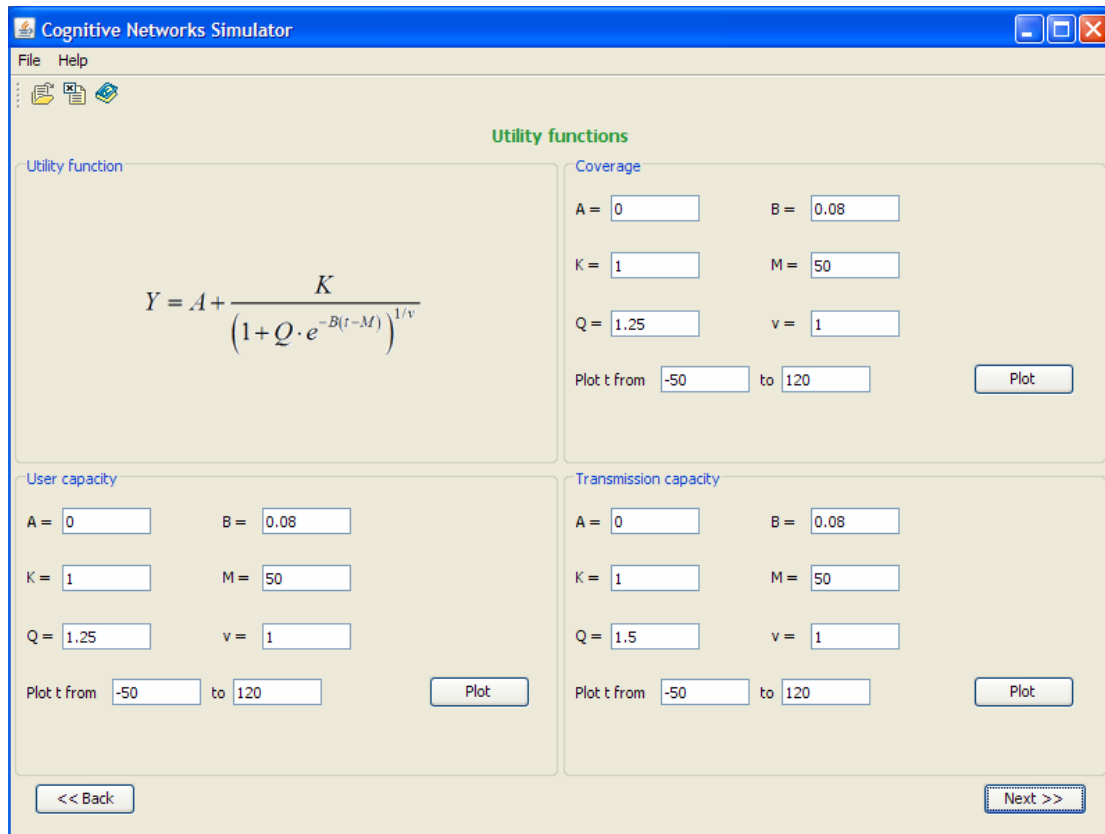
Σχήμα 4-12. Ενδεικτικό παράδειγμα κατανομής χρηστών με υψηλή πυκνότητα στα άκρα

▪ Οθόνη 2: Καθορισμός συναρτήσεων ωφέλειας.

Στην οθόνη αυτή (Σχήμα 4-13), καθορίζεται η μορφή των συναρτήσεων ωφέλειας που θα χρησιμοποιηθούν κατά την προσομοίωση. Συγκεκριμένα, καθορίζεται η ακριβής μορφή των εξής τριών συναρτήσεων:

- συνάρτηση ωφέλειας κάλυψης
- συνάρτηση ωφέλειας χωρητικότητας χρηστών
- συνάρτηση ωφέλειας χωρητικότητας μετάδοσης

Η γενική μορφή των παραπάνω συναρτήσεων δίδεται από τη σχέση (4.37), ενώ η ακριβής μορφή καθορίζεται από το χρήστη της πλατφόρμας, ο οποίος καλείται να θέσει τις επιθυμητές τιμές στις παραμέτρους της κάθε συνάρτησης, δηλαδή στις παραμέτρους A , B , K , M , Q και ν . Οι υπόλοιπες δύο χρησιμοποιούμενες συναρτήσεις ωφέλειας, δηλαδή η ωφέλεια κινητικότητας και η ωφέλεια κόστους αναδιάρθρωσης, έχουν απλούστερη μορφή, γι' αυτό και δε συμπεριλαμβάνονται στις επιλογές της Οθόνης 2.



Σχήμα 4-13. Οθόνη 2: Καθορισμός συναρτήσεων ωφέλειας

- Οθόνη 3: Καθορισμός ειδικών παραμέτρων των τεχνολογιών ραδιοπρόσβασης.

Στην οθόνη αυτή (Σχήμα 4-14), προσδιορίζονται οι τιμές ειδικών παραμέτρων των υποστηριζόμενων τεχνολογιών ραδιοπρόσβασης, οι οποίες πρόκειται να χρησιμοποιηθούν κατά την προσομοίωση. Η πλατφόρμα προσφέρει υποστήριξη για τρεις διαφορετικές τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης, αλλά εύκολα μπορούν να προστεθούν περισσότερες:

- τύπου GERAN (GSM EDGE Radio Access Network)
- τύπου UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network)
- τύπου WiFi (Wireless Fidelity)

Για την τεχνολογία τύπου GERAN, ο χρήστης της πλατφόρμας καλείται να καθορίσει τις εξής παραμέτρους:

- *Αριθμός καναλιών:* Πρόκειται για το συνολικό αριθμό καναλιών που παρέχει η υπό εξέταση τεχνολογία GERAN. Για παράδειγμα, αν χρησιμοποιούνται 3 κανάλια συχνοτήτων και 8 χρονοσχισμές ανά κανάλι συχνοτήτων, τότε ο συνολικός αριθμός καναλιών είναι 24.

- *Αριθμός καναλιών σηματοδοσίας και ευρείας εκπομπής:* Πρόκειται για τα κανάλια που δεν είναι κανάλια χρηστών αλλά κανάλια είτε σηματοδοσίας είτε ευρείας εκπομπής. Ως εκ τούτου, ο αριθμός των καναλιών που διατίθενται για την εξυπηρέτηση των χρηστών προκύπτει ως διαφορά του αριθμού καναλιών σηματοδοσίας και ευρείας εκπομπής από το συνολικό αριθμό καναλιών.
- *Πιθανότητα αποκλεισμού:* Δηλώνει τη μέγιστη αποδεκτή πιθανότητα αποκλεισμού ενός χρήστη από την αιτούμενη υπηρεσία (φωνής ή δεδομένων).

Για την τεχνολογία τύπου UTRAN, ο χρήστης της πλατφόρμας καλείται να καθορίσει τις εξής παραμέτρους:

- *Εύρος ζώνης:* Δηλώνει το εύρος ζώνης συχνοτήτων που χρησιμοποιεί το υπό εξέταση σύστημα UTRAN σε MHz.
- *Βασικός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων χρήστη:* Αντιστοιχεί στον ελάχιστο αποδεκτό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων χρήστη και εκφράζεται σε Kbps.
- *Μέση τιμή του λόγου E_b/I_t στη ζεύξη ανόδου:* Αναφέρεται στη μέση τιμή που θα θεωρηθεί για το λόγο E_b/I_t στη ζεύξη ανόδου, όπου E_b είναι η ενέργεια ανά bit μεταδιδόμενης πληροφορίας και I_t η φασματική πυκνότητα παρεμβολής, συμπεριλαμβανομένου και του θερμικού θορύβου.
- *Διακύμανση του λόγου E_b/I_t στη ζεύξη ανόδου:* Αναφέρεται στην τιμή της διακύμανσης (variance) που θα θεωρηθεί για το λόγο E_b/I_t στη ζεύξη ανόδου.
- *Συντελεστής δραστηκότητας:* Πρόκειται για τη μέση τιμή του συντελεστή δραστηκότητας των αιτούμενων υπηρεσιών.
- *Μεταβλητότητα του συντελεστή δραστηκότητας:* Αναφέρεται στην τιμή της διακύμανσης του παραπάνω συντελεστή δραστηκότητας.
- *Κατώφλι φορτίου:* Η τιμή του κατωφλίου αυτού επηρεάζεται από τη στάθμη φασματικής πυκνότητας ισχύος για την ολική ισχύ παρεμβολής συμπεριλαμβανομένου και του θορύβου. Λαμβάνει τιμές στην περιοχή από 0 έως 1.
- *Κλάσμα παρεμβολής από γειτονικές κυψέλες:* Αντιπροσωπεύει το λόγο της συνολικής ισχύος που λαμβάνεται από τις άλλες κυψέλες προς τη συνολική ισχύ που λαμβάνεται από την ίδια την κυψέλη και ονομάζεται κλάσμα επαναχρησιμοποίησης ή κλάσμα παρεμβολής από γειτονικές κυψέλες.
- *Πιθανότητα αποκλεισμού:* Δηλώνει τη μέγιστη αποδεκτή πιθανότητα αποκλεισμού ενός χρήστη από την αιτούμενη υπηρεσία (φωνής ή δεδομένων).

Για την τεχνολογία τύπου WiFi, ο χρήστης της πλατφόρμας καλείται να καθορίσει τις εξής παραμέτρους:

- *Βασικός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων χρήστη (υπηρεσία φωνής):* Αντιστοιχεί στον ελάχιστο αποδεκτό ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας χρήστη, για την περίπτωση υπηρεσίας φωνής, και εκφράζεται σε Kbps.
- *Βασικός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων χρήστη (υπηρεσία δεδομένων):* Αντιστοιχεί στον ελάχιστο αποδεκτό ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας χρήστη, για την περίπτωση υπηρεσίας δεδομένων, και εκφράζεται σε Kbps.
- *Στάθμη κορεσμού:* Αναφέρεται στο ποσοστό της μέγιστης χωρητικότητας που μπορεί να προσεγγίσει το σύστημα σε κατάσταση κορεσμού. Εν γένει, η συνύπαρξη πολλαπλών ενεργών κόμβων στο σύστημα προκαλεί όξυνση του ανταγωνισμού για τους ραδιοπόρους, ο οποίος οδηγεί σε ελαφρά κάμψη της επιτευκτής διαπερατότητας (π.χ., 80% της μέγιστης δυνατής).

The screenshot displays the 'Cognitive Networks Simulator' window with a 'RAT-specific parameters' section. It is divided into three columns: GERAN, UTRAN [Uplink], and WIFI. Each column contains several input fields for parameters and a 'Test' button at the bottom.

GERAN	UTRAN [Uplink]	WIFI
Channels no.: 24	Ws [MHz] = 1.23	Rb min. (Voice) [Kbps]: 12.2
Signalling and broadcast channels: 2	Rb min. [Kbps] = 9.6	Rb min. (Data) [Kbps]: 12.2
Rb min. (Data) [Kbps]: 9.6	Eb/It avg. [dB]: 7	Saturation Coeff.: 0.80
Blocking probability {0.1, 1, 2%}: 0.01	Eb/It Var. [dB]: 17	Blocking probability {0.1, 1, 2%}: 0.01
	Kr avg. (Voice) = 0.4	
	Kr Var. (Voice) = 0.31	
	$\rho(0)$ = 0.9	
	ξ = 0.65	
	Pb {0.1, 1, 2%} = 0.01	
	Load all: 0.001 Load all: 0.02	
Test	Load all: 0.01 Test	Test

Navigation buttons: << Back (left), Next >> (right).

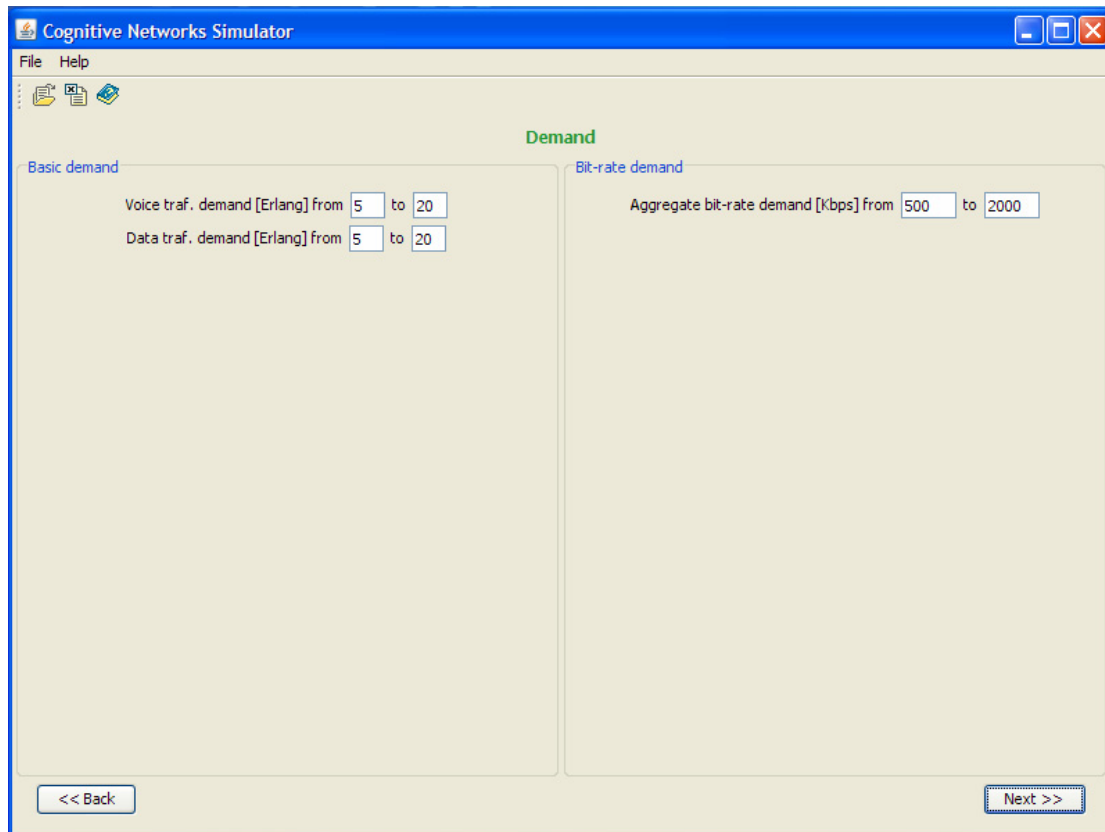
Σχήμα 4-14. Οθόνη 3: Καθορισμός ειδικών παραμέτρων των τεχνολογιών ραδιοπρόσβασης

▪ Οθόνη 4: Προσδιορισμός του φορτίου κίνησης.

Στην οθόνη αυτή (Σχήμα 4-15), καθορίζεται το ύψος του φορτίου κίνησης που θα πρέπει να εξυπηρετηθεί από τον υπό εξέταση γνωστικό σταθμό βάσης. Συγκεκριμένα, οι παράμετροι που καθορίζονται είναι οι εξής:

- φορτίο φωνής (σε Erlang)
- αιτούμενο φορτίο δεδομένων (σε Erlang)
- αιτούμενο φορτίο δεδομένων (σε Kbps)

Ο χρήστης της πλατφόρμας είναι σε θέση να καθορίσει είτε απλώς μία και μόνο τιμή για κάθε μια από τις παραμέτρους αυτές είτε ένα εύρος τιμών. Στη δεύτερη περίπτωση, του δίδεται η δυνατότητα να εκτελέσει μία δέσμη διαφορετικών σεναρίων, με διαφοροποιημένες τιμές φορτίου κίνησης σε καθένα, αντί ενός μεμονωμένου σεναρίου προσομοίωσης. Έτσι, στη δεύτερη αυτή περίπτωση, για κάθε μια από τις παραπάνω παραμέτρους, ο χρήστης της πλατφόρμας είναι σε θέση να καθορίσει μια ελάχιστη και μια μέγιστη τιμή, ενώ το σύστημα χρησιμοποιεί ως προκαθορισμένα βήματα μεταβολής από την ελάχιστη προς τη μέγιστη τιμή το 1 Erlang και τα 100 Kbps. Επίσης, είναι δυνατή, μέσα από τον κώδικα της πλατφόρμας, η τροποποίηση των τιμών των βημάτων. Έτσι, επί παραδείγματι, με τις τιμές που φαίνονται συμπληρωμένες στο Σχήμα 4-15 και χρησιμοποιώντας τις προκαθορισμένες τιμές βημάτων, εκτελούνται αυτομάτως $16 \times 16 \times 16 = 4096$ διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης (από 5 Erlang έως και 20 Erlang για το φορτίο φωνής με βήμα 1 Erlang, ομοίως για το φορτίο δεδομένων σε Erlang, και από 500 Kbps έως και 2000 Kbps για το φορτίο δεδομένων με βήμα 100 Kbps).



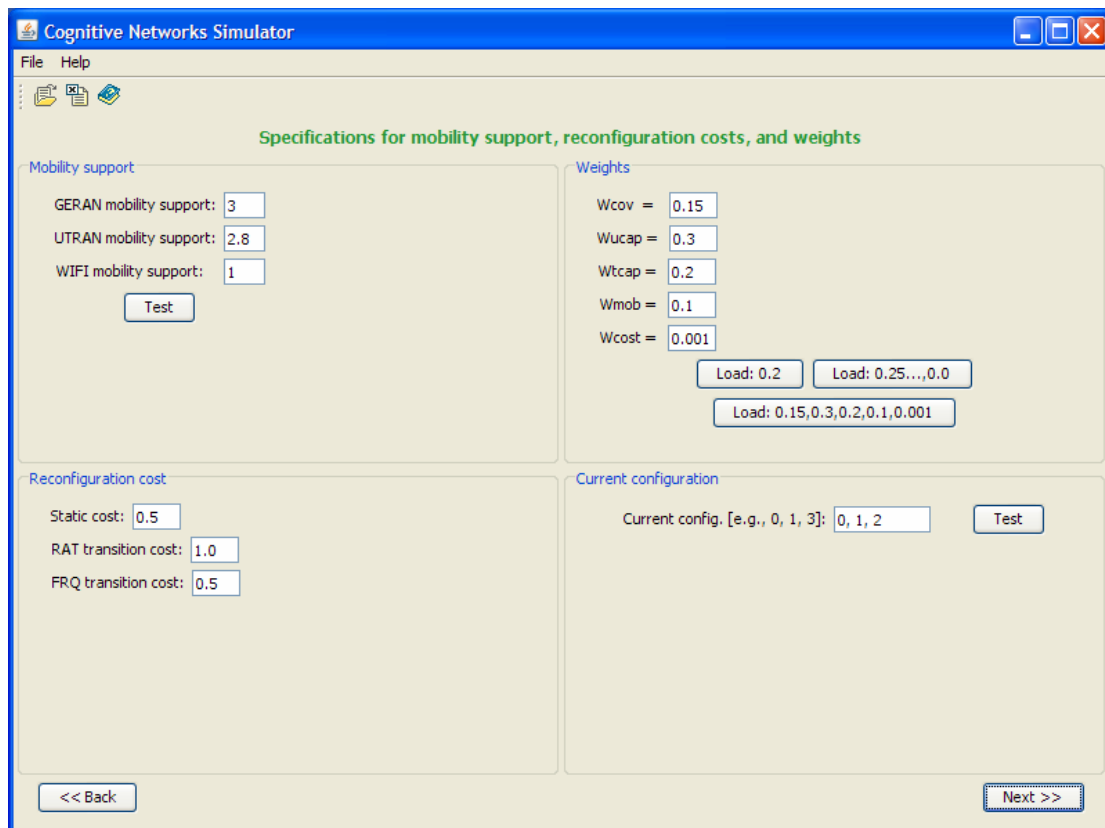
Σχήμα 4-15. Οθόνη 4: Προσδιορισμός του φορτίου κίνησης

- Οθόνη 5: Καθορισμός προδιαγραφών υποστήριξης κινητικότητας, κόστους αναδιάρθρωσεων και βαρών.

Στην οθόνη αυτή (Σχήμα 4-16), καθορίζονται οι τιμές παραμέτρων που σχετίζονται με:

- *την υποστήριξη κινητικότητας*: Εδώ εισάγονται τιμές που αντανακλούν το βαθμό υποστήριξης κινητικότητας της κάθε υποστηριζόμενης τεχνολογίας ραδιοπρόσβασης. Σημασία δεν έχουν οι απόλυτες τιμές των παραμέτρων αυτών αλλά οι σχετικές τους τιμές, δηλαδή το αν και κατά πόσο διαφοροποιούνται από τεχνολογία σε τεχνολογία.
- *το κόστος αναδιάρθρωσης*: Εδώ εισάγονται τιμές που αντανακλούν τόσο το στατικό κόστος όσο και το κόστος μετάβασης. Ιδιαίτερη σημασία έχουν οι τιμές που αντιπροσωπεύουν το κόστος αλλαγής τεχνολογίας και το κόστος αλλαγής συχνότητας. Επιπρόσθετα, ο χρήστης της πλατφόρμας καθορίζει ποια είναι η τρέχουσα κατανομή διαρθρώσεων, ώστε αυτή να χρησιμοποιηθεί ως σημείο αναφοράς για τον υπολογισμό του κόστους μετάβασης.

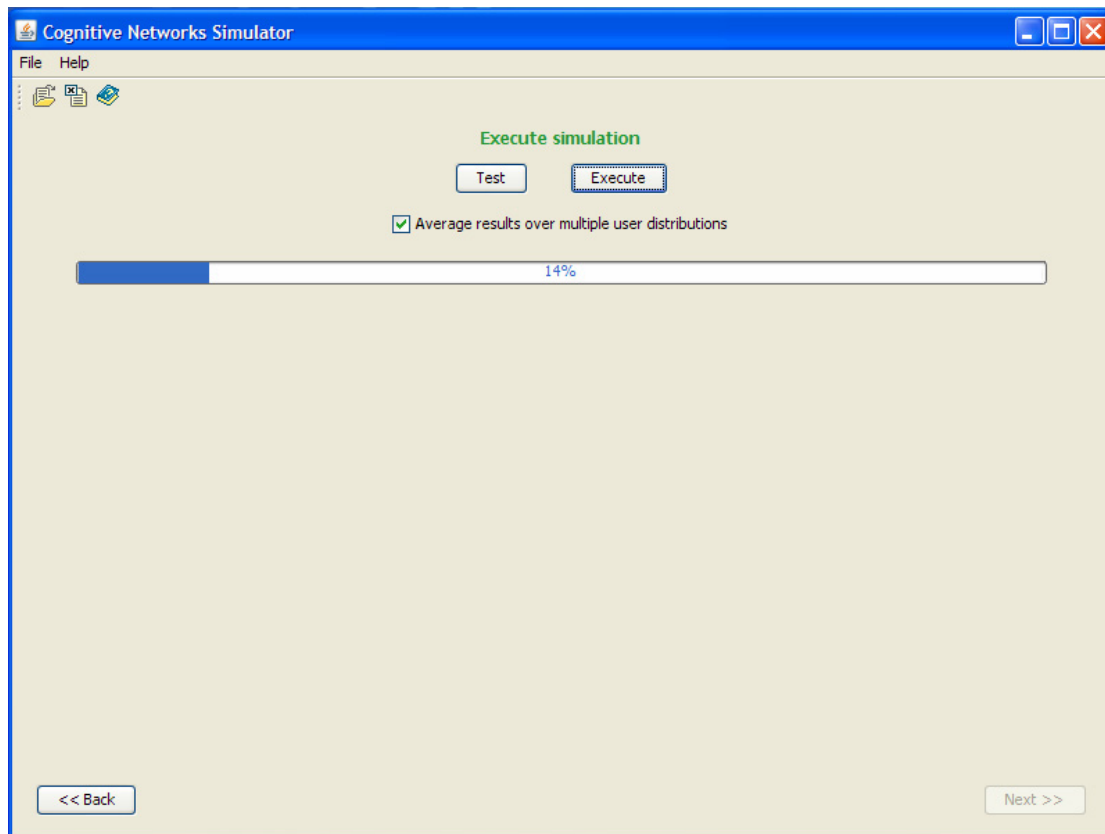
- ο τα βάρη των επιμέρους συναρτήσεων ωφέλειας: Πρόκειται για τα βάρη των επιμέρους συναρτήσεων ωφέλειας (ωφέλειες κάλυψης, χωρητικότητας χρηστών, χωρητικότητας μετάδοσης, κινητικότητας και κόστους). Ο διαχειριστής είναι σε θέση να τροποποιήσει τις τιμές των βαρών αυτών, αναλόγως με τη σημασία που επιθυμεί να αποδώσει σε καθέναν από τους πέντε τομείς επιδόσεων. Σημασία δεν έχουν οι απόλυτες αλλά οι σχετικές τιμές των βαρών.



Σχήμα 4-16. Οθόνη 5: Καθορισμός προδιαγραφών υποστήριξης κινητικότητας, κόστους αναδιαρθρώσεων και βαρών

- Οθόνη 6: Εκτέλεση προσομοίωσης.

Στην οθόνη αυτή (Σχήμα 4-17), ο χρήστης της πλατφόρμας διαλέγει αν επιθυμεί την εξαγωγή του μέσου όρου των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από πολλαπλές χωρικές κατανομές (βλ. και Οθόνη 1) ή απλώς την εξαγωγή μεμονωμένων για κάθε χωρική κατανομή αποτελεσμάτων. Οποτεδήποτε είναι έτοιμος, μπορεί να εκκινήσει την εκτέλεση των σεναρίων προσομοίωσης.



Σχήμα 4-17. Οθόνη 6: Εκτέλεση προσομοίωσης

4.8 Εξαγωγή αποτελεσμάτων

Κάνοντας χρήση της πλατφόρμας διαχείρισης που παρουσιάστηκε, διευκολύνεται σε μεγάλο βαθμό η εξαγωγή και η μελέτη των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθόδου εύρεσης της βέλτιστης κατανομής διαρθρώσεων. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, εκτελούνται μια σειρά σεναρίων που έχουν ως σκοπό την επίδειξη και την επικύρωση των αποτελεσμάτων της μεθόδου.

4.8.1 Παράμετροι εισόδου

4.8.1.1 Γενικές ρυθμίσεις

Ο γνωστικός σταθμός βάσης ο οποίος θα μελετηθεί έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- 3 αναδιαρθρώσιμους πομποδέκτες
- περιοχή κάλυψης με εμβέλεια 3000 m
- 200 χρήστες προς εξυπηρέτηση

Δύο είναι τα είδη υπηρεσιών που εξετάζονται: υπηρεσίες φωνής και υπηρεσίες δεδομένων. Ο γνωστικός σταθμός βάσης καλείται να επιλέξει το βέλτιστο συνδυασμό μέσα από τις εξής διαρθρώσεις (σύνολο C):

Πίνακας 4-1. Λίστα δυνατών διαρθρώσεων πομποδεκτών

Cfg.	Configurations		
	RAT	Eff. Cov.	Eff. Cap.
C0	GERAN	2900	110
C1	GERAN	2800	100
C2	UTRAN	2700	800
C3	UTRAN	2500	120
C4	WIFI	210	1500
C5	WIFI	230	2000
C6	WIFI	240	2200

Οι τιμές της ενεργού χωρητικότητας (effective capacity) είναι εκφρασμένες σε Kbps, ενώ της ενεργού ακτίνας κάλυψης (effective coverage) σε m. Όπως είναι φανερό, υπάρχουν δύο δυνατές διαρθρώσεις τύπου GERAN, δύο τύπου UTRAN και τρεις τύπου WiFi.

4.8.1.2 Παράμετροι συναρτήσεων ωφέλειας

Για τις επιμέρους συναρτήσεις ωφέλειας μιας διάρθρωσης, χρησιμοποιούνται οι παράμετροι που φαίνονται στο Σχήμα 4-18. Συγκεντρωτικά, λοιπόν, οι εν λόγω συναρτήσεις έχουν την ακόλουθη μορφή:

1. Κάλυψη:

$$u_{\text{cov}}(c) = \frac{1}{1 + 1.25e^{-0.08(p_{\text{cov}}(c, L(U)) - 50)}} \quad (4.38)$$

$$u_{\text{cov}}(\tilde{c}) = \sum_{\forall c \in \tilde{c}} u_{\text{cov}}(c) \quad (4.39)$$

όπου $p_{\text{cov}}(c, L(U))$ είναι το ποσοστό των χρηστών που είναι σε θέση να καλύψει η διάρθρωση c .

2. Χωρητικότητα χρηστών:

$$u_{\text{icap}}(c) = \frac{1}{1 + 1.25e^{-0.08(p_{\text{icap}}(c, D(U)) - 50)}} \quad (4.40)$$

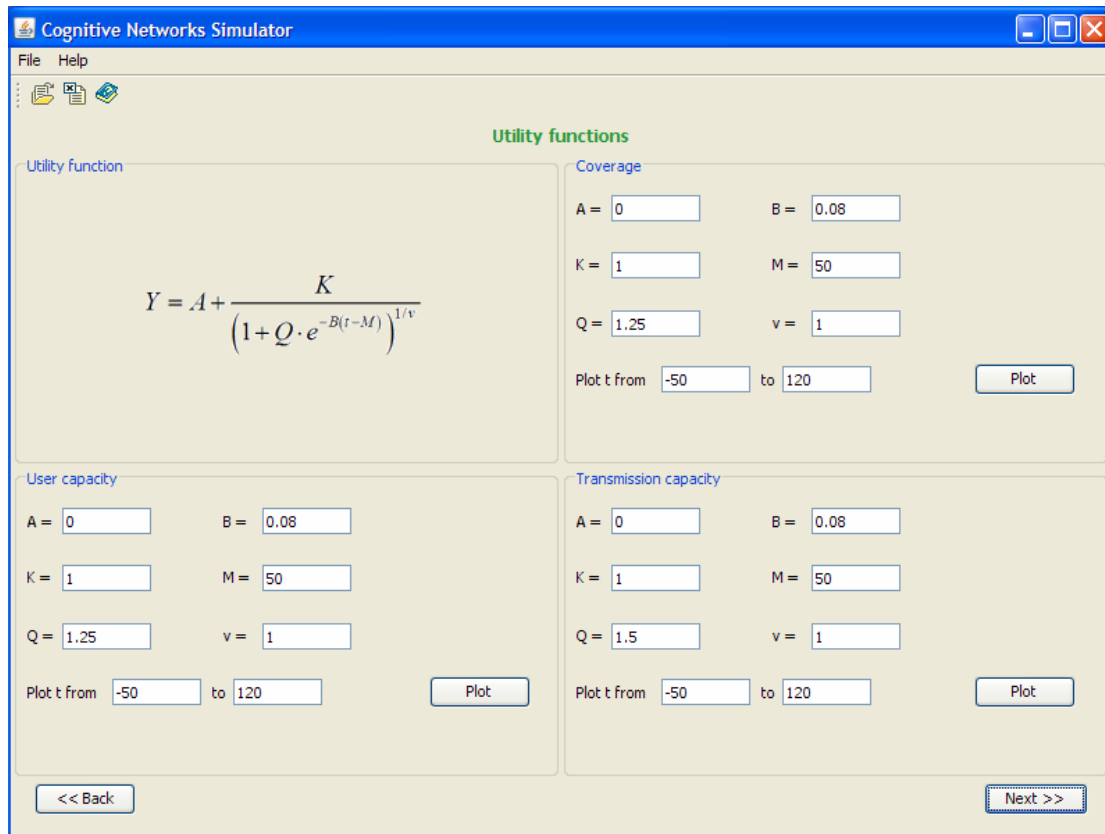
$$u_{\text{icap}}(\tilde{c}) = \sum_{\forall c \in \tilde{c}} u_{\text{icap}}(c) \quad (4.41)$$

όπου $p_{\text{icap}}(c, D(U))$ είναι το ποσοστό των χρηστών που βρίσκονται εντός χωρητικότητας της διάρθρωσης c .

3. Χωρητικότητα μετάδοσης:

$$u_{\text{icap}}(\tilde{c}) = \frac{1}{1 + 1.5e^{-0.08(p_{\text{icap}}(\tilde{c}, L(U), D(U)) - 50)}} \quad (4.42)$$

όπου $p_{\text{icap}}(\tilde{c}, L(U), D(U))$ είναι ο λόγος του σταθμισμένου αθροίσματος των ενεργών χωρητικοτήτων μετάδοσης των διαρθρώσεων της κατανομής \tilde{c} , με βάρη τα ποσοστά χωρικής κάλυψης των χρηστών, προς το συνολικό άθροισμα των αιτούμενων ρυθμών μετάδοσης των χρηστών και δίδεται από τη σχέση (4.19).

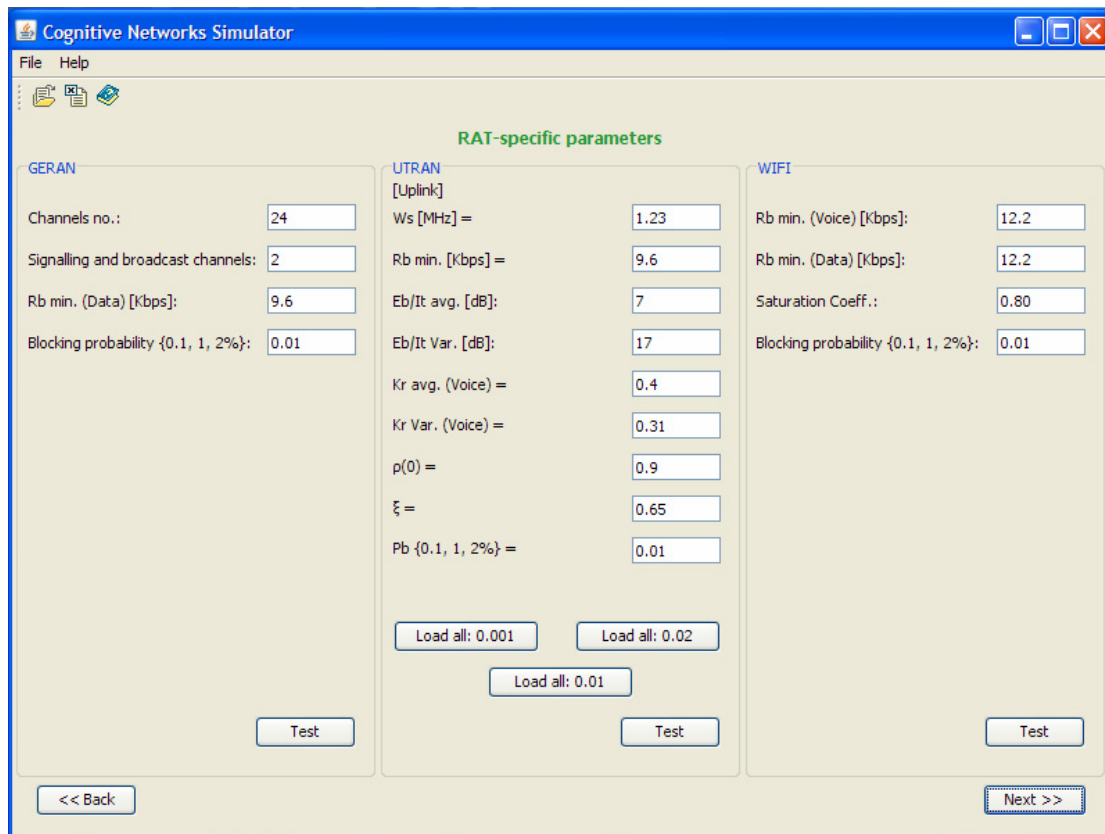


Σχήμα 4-18. Παράμετροι συναρτήσεων ωφέλειας

4.8.1.3 Ειδικές παράμετροι των τεχνολογιών πρόσβασης

Τρεις είναι οι διαφορετικές τεχνολογίες πρόσβασης που εξετάζονται στα πλαίσια της παρούσας διατριβής: GERAN, UTRAN και WiFi. Οι παράμετροι αναφορικά με κάθε τύπο τεχνολογίας ραδιοπρόσβασης τίθενται όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-19. Εξαίρεση αποτελεί η μέγιστη αποδεκτή πιθανότητα αποκλεισμού, P_b , η οποία εξετάζεται για τρεις διαφορετικές τιμές:

- $P_b = 1\%$
- $P_b = 2\%$
- $P_b = 0.1\%$



Σχήμα 4-19. Ειδικές παράμετροι των τεχνολογιών πρόσβασης

Προσδιορισμός της χωρητικότητας χρηστών:

Για τον προσδιορισμό της εν λόγω χωρητικότητας, προτεραιότητα δίδεται πάντα από το σύστημα στην ικανοποίηση των χρηστών φωνής, ενώ οι χρήστες δεδομένων θεωρείται ότι αρκεί να ικανοποιηθούν στο βασικό (ελάχιστο αποδεκτό) επίπεδο ποιότητας.

▪ Σύστημα GERAN:

Η χωρητικότητα Erlang ενός συστήματος τύπου GERAN υπολογίζεται από την πλατφόρμα διαχείρισης χρησιμοποιώντας το μοντέλο Erlang B:

$$P_b = \frac{\frac{A^C}{C!}}{\sum_{k=0}^C \frac{A^k}{k!}} \quad (4.43)$$

όπου C είναι ο αριθμός των καναλιών του συστήματος και A η κίνηση σε Erlang που μπορεί να εξυπηρετηθεί.

- Σύστημα UTRAN:

Αντίθετα, σε ένα σύστημα τύπου UTRAN η χωρητικότητα Erlang δεν μπορεί να υπολογιστεί με άμεση εφαρμογή του μοντέλου Erlang B, καθώς ο αριθμός των καναλιών που διατίθενται δεν είναι σταθερός, αλλά κυμαίνεται, λόγω του γεγονότος του ότι η ζεύξη ανόδου περιορίζεται από τις παρεμβολές. Όπως μπορεί να αποδειχτεί [1]-[6], στην περίπτωση αυτή, η χωρητικότητα Erlang μπορεί να προσδιοριστεί με επίλυση της σχέσης:

$$P_b = Q\left(\frac{G_S \rho_0 - \bar{M} \bar{\kappa}_r \bar{a} K}{\sqrt{\bar{M} K \text{Var}\{\kappa_{ri}\} \text{Var}\{a_i}\}}\right) \quad (4.44)$$

όπου G_S το κέρδος εξάπλωσης, ρ_0 το κατώφλι φορτίου, \bar{M} η χωρητικότητα Erlang, $\bar{\kappa}_r$ και $\text{Var}\{\kappa_{ri}\}$ η μέση τιμή και η διακύμανση του συντελεστή δραστηριότητας, αντίστοιχα, \bar{a} και $\text{Var}\{a_i\}$ η μέση τιμή και η διακύμανση του λόγου E_b/I_t στη ζεύξη ανόδου, K ο συντελεστής επαναχρησιμοποίησης, ενώ με $Q(\dots)$ συμβολίζεται η προσέγγιση Gauss της συμπληρωματικής σωρευτικής συνάρτησης κατανομής. Ισχύουν, δηλαδή, συμπληρωματικά τα εξής:

$$G_S = \frac{W_S}{R_b} \quad (4.45)$$

$$a_i = \frac{E_{bi}}{I'_t} \quad (4.46)$$

$$K = 1 + \xi \quad (4.47)$$

$$Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} dt \quad (4.48)$$

όπου W_S είναι το εύρος ζώνης του συστήματος, R_b ο βασικός ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας χρήστη, I'_t η στάθμη φασματικής πυκνότητας ισχύος για την ολική ισχύ παρεμβολής συμπεριλαμβανομένου και του θορύβου, και ξ το κλάσμα παρεμβολής από γειτονικές κυψέλες.

Υπολογιστικά, η επίλυση της σχέσης (4.44) ως προς \bar{M} γίνεται διαδοχικά ως εξής: Αρχικά, εισάγεται ο ακόλουθος συμβολισμός:

$$q = Q^{-1}(P_b) \quad (4.49)$$

Κατόπιν, η (4.44) ξαναγράφεται ισοδύναμα:

$$\frac{G_s \rho_0 - \bar{M} \bar{\kappa}_r \bar{a} K}{\sqrt{\bar{M} K \text{Var}\{\kappa_{ri}\} \text{Var}\{a_i\}}} = q \quad (4.50)$$

Υψώνοντας στο τετράγωνο τα δύο μέλη της εξίσωσης και εκτελώντας τις πράξεις, προκύπτει:

$$(\bar{\kappa}_r \bar{a} K)^2 \bar{M}^2 - (2G_s \rho_0 \bar{\kappa}_r \bar{a} + q^2 \text{Var}\{\kappa_{ri}\} \text{Var}\{a_i\}) K \bar{M} + G_s^2 \rho_0^2 = 0 \quad (4.51)$$

που πρόκειται για μια απλή δευτεροβάθμια εξίσωση, η οποία είναι εύκολο να επιλυθεί. Εκ των δύο λύσεων που προκύπτουν προκρίνεται εκείνη που ικανοποιεί την ανίσωση:

$$G_s \rho_0 - \bar{M} \bar{\kappa}_r \bar{a} K > 0 \quad (4.52)$$

▪ *Σύστημα WiFi:*

Τέλος, η χωρητικότητα χρηστών ενός συστήματος τύπου WiFi υπολογίζεται θεωρώντας ότι οι ενεργοί χρήστες διαμοιράζονται τη διαθέσιμη ενεργό χωρητικότητα και λαμβάνοντας υπόψη τη στάθμη κορεσμού και τους βασικούς ρυθμούς μετάδοσης πληροφορίας. Η μέση χωρητικότητα χρηστών \bar{M} μπορεί να προσδιοριστεί ως:

$$\bar{M} = \frac{2A_{sat} cap_{eff}(c)}{R_b^{voice} + R_b^{data}} \quad (4.53)$$

όπου A_{sat} η στάθμη κορεσμού, $cap_{eff}(c)$ η ενεργός χωρητικότητα, R_b^{voice} και R_b^{data} οι βασικοί ρυθμοί μετάδοσης φωνής και δεδομένων, αντίστοιχα. Στην πράξη, ο αλγόριθμος υπολογισμού της χωρητικότητας δίδει προτεραιότητα στους χρήστες φωνής.

4.8.1.4 Παράμετροι φορτίου κίνησης

Στις παραμέτρους για το αιτούμενο φορτίο κίνησης αποδίδονται οι εξής τιμές:

- φορτίο φωνής (Erlang): {5, 10, 20} Erlang
- φορτίο δεδομένων (Erlang): {5, 10, 20} Erlang
- φορτίο δεδομένων (Kbps): {500, 1000, 2000} Kbps

4.8.1.5 Παράμετροι υποστήριξη κινητικότητας, κόστους αναδιάρθρωσεων και βαρών

Για τις συγκεκριμένες παραμέτρους, χρησιμοποιούνται οι τιμές που φαίνονται συμπληρωμένες στο Σχήμα 4-20. Σημειωτέον ότι, προκειμένου να μην επηρεαστούν σε μεγάλο βαθμό τα τελικά αποτελέσματα από το ύψος του κόστους αναδιάρθρωσης, τέθηκε πολύ μικρή βαρύτητα στον τομέα αυτόν. Ως τρέχουσα κατανομή διαρθρώσεων επελέγη η C0-C1-C2 (Πίνακας 4-1).

Αναφορικά με τις επιμέρους συναρτήσεις ωφέλειας της κινητικότητας και του κόστους αναδιάρθρωσης, η πλατφόρμα διαχείρισης χρησιμοποιεί εσωτερικά τους ακόλουθους τύπους:

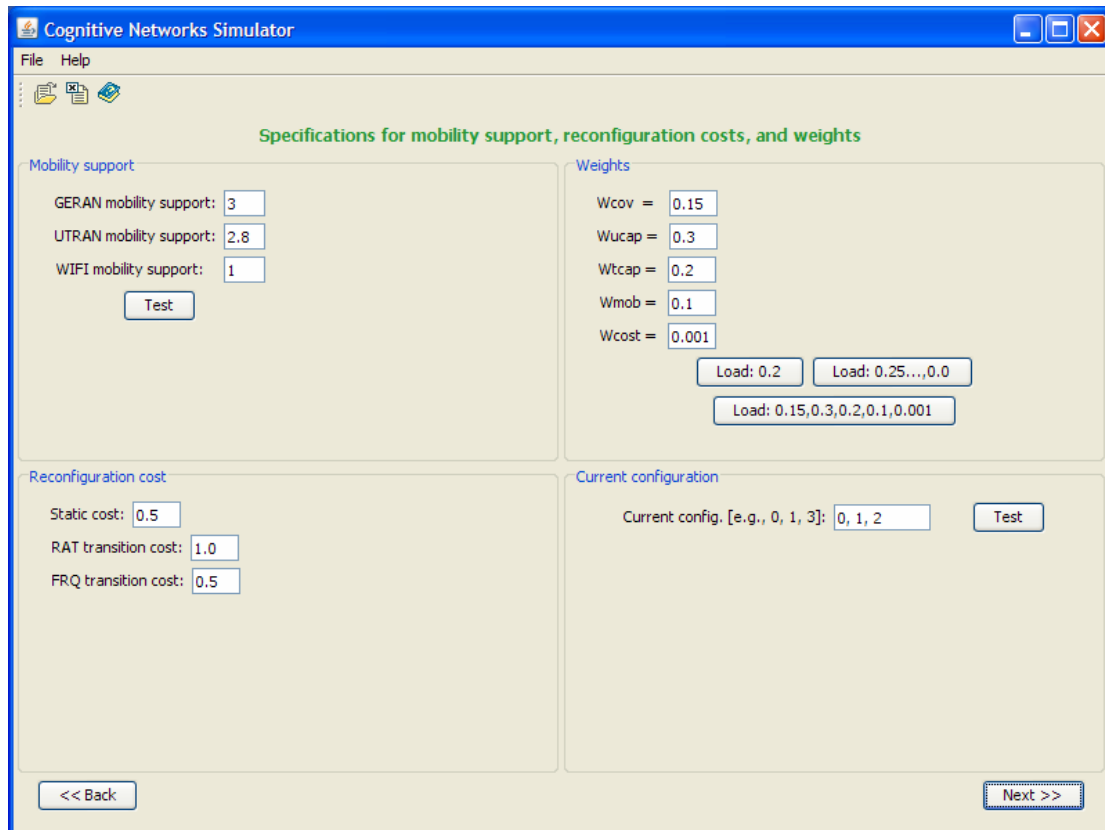
- Κινητικότητα:

$$u_{mob}(\tilde{c}) = \frac{\sum_{\forall c \in \tilde{c}} mob(c)}{\max_{c \in C} \{mob(c)\}} \quad (4.54)$$

- Κόστος αναδιάρθρωσης:

$$u_{cost}(\tilde{c}) = -cost(\tilde{c}_{cur}, \tilde{c}) \quad (4.55)$$

όπου η συνάρτηση $cost(\tilde{c}_{cur}, \tilde{c})$ δίδεται από τη σχέση (4.24).



Σχήμα 4-20. Παράμετροι υποστήριξη κινητικότητας, κόστους αναδιαρθρώσεων και βαρών

4.8.2 Διαμόρφωση σεναρίων

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, κατασκευάστηκαν και θα παρουσιαστούν σενάρια προσομοιώσεων που διαφοροποιούνται μεταξύ τους ως προς τις εξής βασικές παραμέτρους:

- την πιθανότητα αποκλεισμού
- το ύψος και τη σύνθεση του αιτούμενου φορτίου κίνησης
- τον τύπο της χωρικής κατανομής των χρηστών

Συγκεκριμένα, οι προαναφερθείσες τρεις χαρακτηριστικές παράμετροι λαμβάνουν τις ακόλουθες τιμές:

- πιθανότητα αποκλεισμού: 1%, 2%, 0.1%
- ύψος και σύνθεση του αιτούμενου φορτίου κίνησης:
 - φορτίο φωνής (Erlang): {5, 10, 20} Erlang
 - φορτίο δεδομένων (Erlang): {5, 10, 20} Erlang
 - φορτίο δεδομένων (Kbps): {500, 1000, 2000} Kbps
- τύπος της χωρικής κατανομής των χρηστών:

- ομοιόμορφη κατανομή χρηστών
- κατανομή χρηστών με υψηλή πυκνότητα στο κέντρο
- κατανομή χρηστών με υψηλή πυκνότητα στα άκρα

Ως προς την τελευταία παράμετρο, εξετάζονται κάθε φορά 50 διαφορετικές, τυχαία παραγόμενες, κατανομές του εκάστοτε τύπου και τα αποτελέσματα (επιμέρους ωφέλειες και συνολική ωφέλεια της κάθε υποψήφιας διάρθρωσης) κανονικοποιούνται, εξάγονται, δηλαδή, οι μέσοι όροι.

Συνολικά, λοιπόν, εξετάζονται και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για $3 \times (3 \times 3 \times 3) \times 3 = 243$ διαφορετικά σενάρια. Τα σενάρια αυτά οργανώνονται ως εξής: Κάθε επιμέρους σενάριο διακρίνεται από ένα μοναδικό αναγνωριστικό, το οποίο έχει την ακόλουθη γενική μορφή:

$$\text{Σενάριο } \langle 1,2,3 \rangle \{D1,D2,D3\} \langle U,N,F \rangle$$

όπου:

- το πρώτο κατά σειρά τμήμα του αναγνωριστικού είναι ένας αριθμητικός χαρακτήρας (1, 2 ή 3) που λαμβάνει τιμές σύμφωνα με την εξής αντιστοιχία:
 - $1 \rightarrow P_b = 1\%$
 - $2 \rightarrow P_b = 2\%$
 - $3 \rightarrow P_b = 0.1\%$
- το δεύτερο κατά σειρά τμήμα του αναγνωριστικού είναι μια διατεταγμένη τριάδα αριθμών D1, D2, D3, για την οποία ισχύει η εξής αντιστοιχία:
 - D1 \rightarrow τιμή φορτίου δεδομένων σε Kbps (δυνατές τιμές: 500, 1000, 2000)
 - D2 \rightarrow τιμή φορτίου φωνής σε Erlang (δυνατές τιμές: 5, 10, 20)
 - D3 \rightarrow τιμή φορτίου δεδομένων σε Erlang (δυνατές τιμές: 5, 10, 20)
- το τρίτο κατά σειρά τμήμα του αναγνωριστικού είναι ένας αλφαβητικός χαρακτήρας (U, N ή F) που λαμβάνει τιμές σύμφωνα με την εξής αντιστοιχία:
 - U \rightarrow ομοιόμορφη κατανομή χρηστών («Uniform»)
 - N \rightarrow κατανομή χρηστών με υψηλή πυκνότητα στο κέντρο («Near»)
 - F \rightarrow κατανομή χρηστών με υψηλή πυκνότητα στα άκρα («Far»)

Έτσι, λοιπόν, το Σενάριο 1{500,5,10}U είναι ένα σενάριο το οποίο εκτελέστηκε θεωρώντας πιθανότητα αποκλεισμού ίση με 1%, φορτίο δεδομένων 500 Kbps και 10 Erlang, φορτίο φωνής 5 Erlang και ομοιόμορφη κατανομή χρηστών. Επίσης, για να καταδειχθεί μια δέσμη σεναρίων συγκεκριμένου τύπου θα χρησιμοποιείται το

σύμβολο X στη θέση του κατάλληλου τμήματος του αναγνωριστικού, π.χ. ένα σενάριο τύπου $X\{500,5,10\}U$ θα είναι το εξής σύνολο σεναρίων: $\{ 1\{500,5,10\}U, 2\{500,5,10\}U, 3\{500,5,10\}U \}$. Τέλος, η δέσμη σεναρίων $\langle 1,2,3 \rangle - D1 - \langle U,N,F \rangle$ θα ισοδυναμεί με τη δέσμη $\langle 1,2,3 \rangle \{ D1, X, X \} \langle U, N, F \rangle$, π.χ. η δέσμη σεναρίων $1-500-U$ θα ισοδυναμεί με τη δέσμη $1\{500, X, X\}U$.

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρατίθενται και αναλύονται τα αποτελέσματα των εν λόγω σεναρίων προσομοίωσης.

4.8.3 Λίστα υποψήφιων κατανομών διαρθρώσεων

Ο πίνακας που ακολουθεί παρουσιάζει τη λίστα των υποψήφιων κατανομών διαρθρώσεων (σύνολο $C_{cmb}(C, n_i)$), όλων, δηλαδή, των δυνατών συνδυασμών διαρθρώσεων που πρέπει να εξεταστούν από το σύστημα διαχείρισης.

Πίνακας 4-2. Συγκεντρωτικός πίνακας υποψήφιων κατανομών διαρθρώσεων

α/α	Κατανομή
1	C0-C1-C2
2	C0-C1-C3
3	C0-C1-C4
4	C0-C1-C5
5	C0-C1-C6
6	C0-C2-C3
7	C0-C2-C4
8	C0-C2-C5
9	C0-C2-C6
10	C0-C3-C4
11	C0-C3-C5
12	C0-C3-C6
13	C0-C4-C5
14	C0-C4-C6
15	C0-C5-C6
16	C1-C2-C3
17	C1-C2-C4
18	C1-C2-C5
19	C1-C2-C6
20	C1-C3-C4
21	C1-C3-C5
22	C1-C3-C6
23	C1-C4-C5
24	C1-C4-C6
25	C1-C5-C6
26	C2-C3-C4
27	C2-C3-C5
28	C2-C3-C6
29	C2-C4-C5
30	C2-C4-C6
31	C2-C5-C6
32	C3-C4-C5
33	C3-C4-C6
34	C3-C5-C6
35	C4-C5-C6

Configurations			
Cfg.	RAT	Eff. Cov.	Eff. Cap.
C0	GERAN	2900	110
C1	GERAN	2800	100
C2	UTRAN	2700	800
C3	UTRAN	2500	120
C4	WIFI	210	1500
C5	WIFI	230	2000
C6	WIFI	240	2200

4.8.4 1η σειρά σεναρίων

Στα σενάρια της ενότητας αυτής, η πιθανότητα αποκλεισμού έχει καθοριστεί ίση με 1%, πρόκειται, δηλαδή, για σενάρια της μορφής 1-X-X.

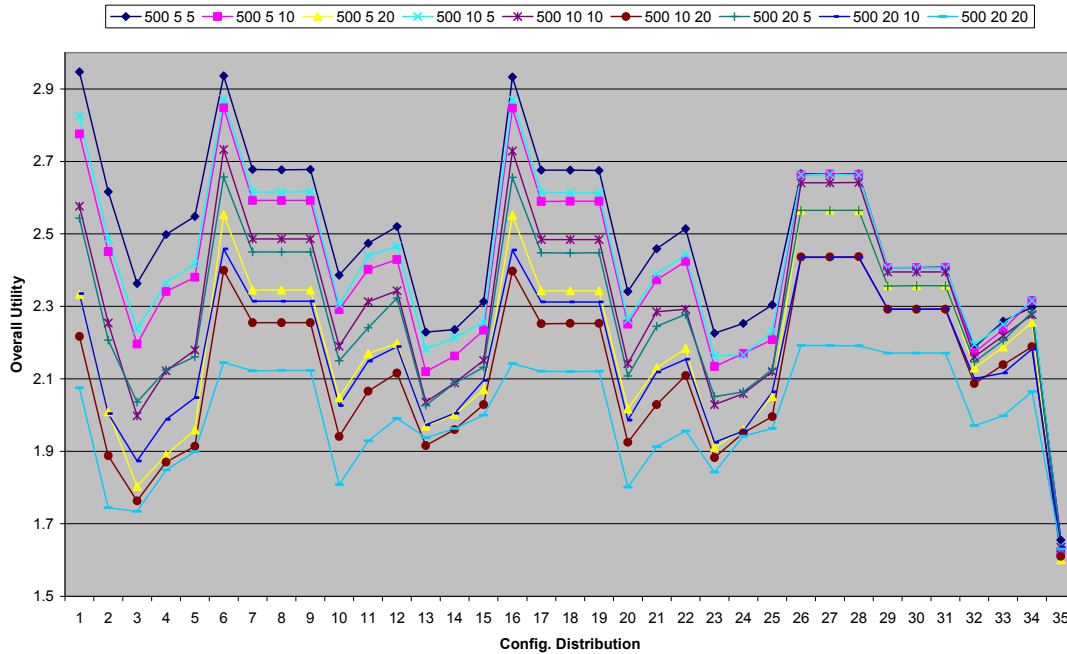
4.8.4.1 Ομοιόμορφη κατανομή χρηστών

- Σενάρια της μορφής 1-500-U

Το Σχήμα 4-21 παρουσιάζει τη συνολική ωφέλεια (κατακόρυφος άξονας) καθεμιάς από τις υποψήφιες κατανομές διαρθρώσεων (οριζόντιος άξονας). Το σχήμα περιλαμβάνει 9 συνολικά καμπύλες, καθεμιά από τις οποίες αντιστοιχεί και σε μια διαφορετική σύνθεση αιτούμενου φορτίου. Πρόκειται για τις εξής περιπτώσεις φορτίου {D1,D2,D3}:

- {500, 5, 5}
- {500, 5, 10}
- {500, 5, 20}
- {500, 10, 5}
- {500, 10, 10}
- {500, 10, 20}
- {500, 20, 5}
- {500, 20, 10}
- {500, 20, 20}

Έτσι, δίδεται η δυνατότητα μελέτης της συμπεριφοράς του συστήματος για διάφορους τύπους και διάφορες ποσότητες φορτίου κίνησης. Τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στο Σχήμα 4-21 προκύπτουν από πίνακες όπως ο Πίνακας 4-3, ο οποίος συγκεντρώνει τα αποτελέσματα του Σεναρίου 1 {500,5,5}U. Οι πίνακες αυτοί κατασκευάζονται αυτόματα από την πλατφόρμα διαχείρισης και περικλείουν πληροφορίες για τις επιμέρους ωφέλειες κάθε υποψήφιας διάρθρωσης, τις σταθμισμένες επιμέρους ωφέλειες και τη συνολική ωφέλεια.



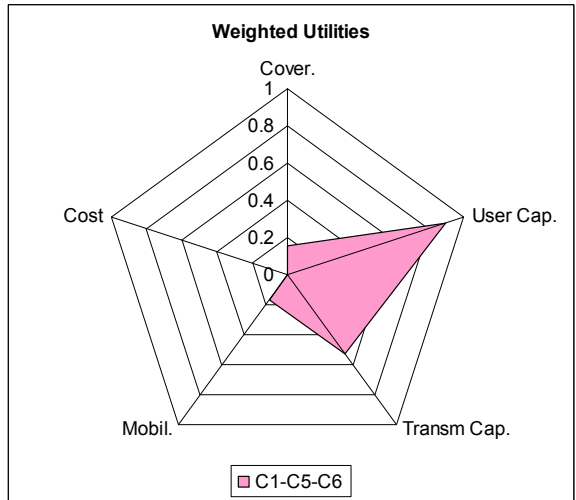
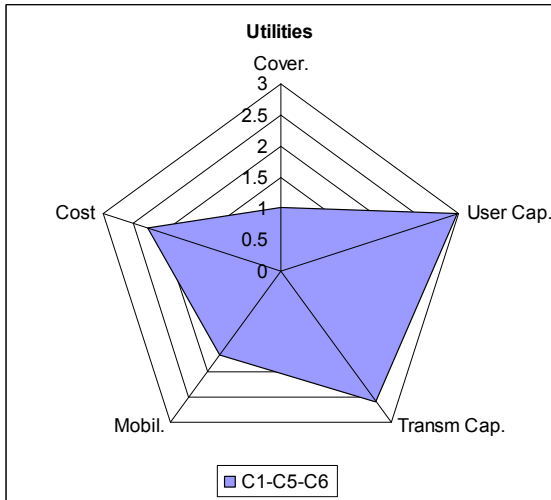
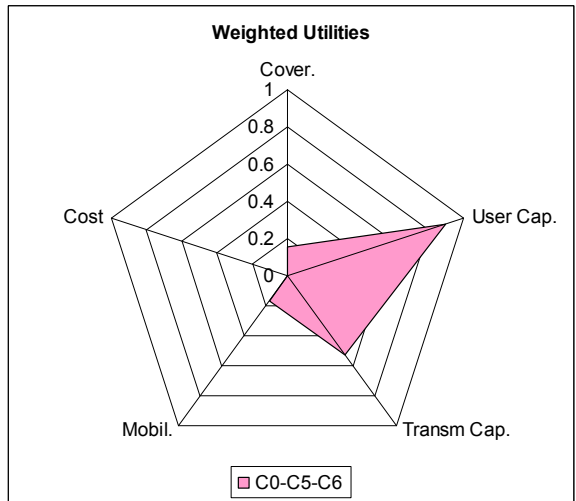
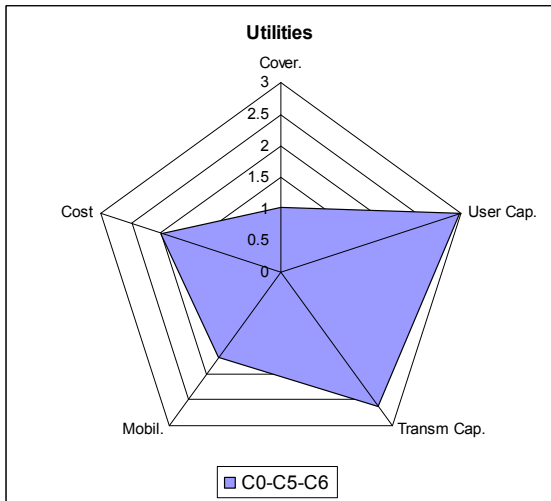
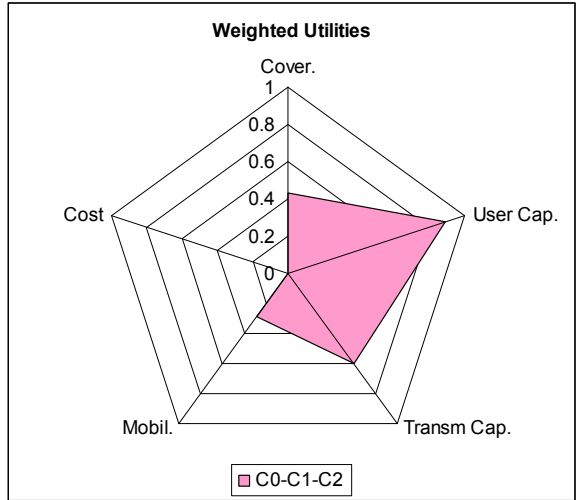
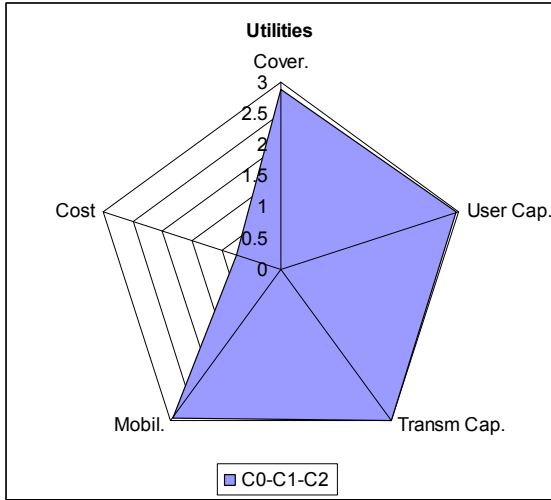
Σχήμα 4-21. Σενάρια της μορφής 1-500-U – Αποτελέσματα

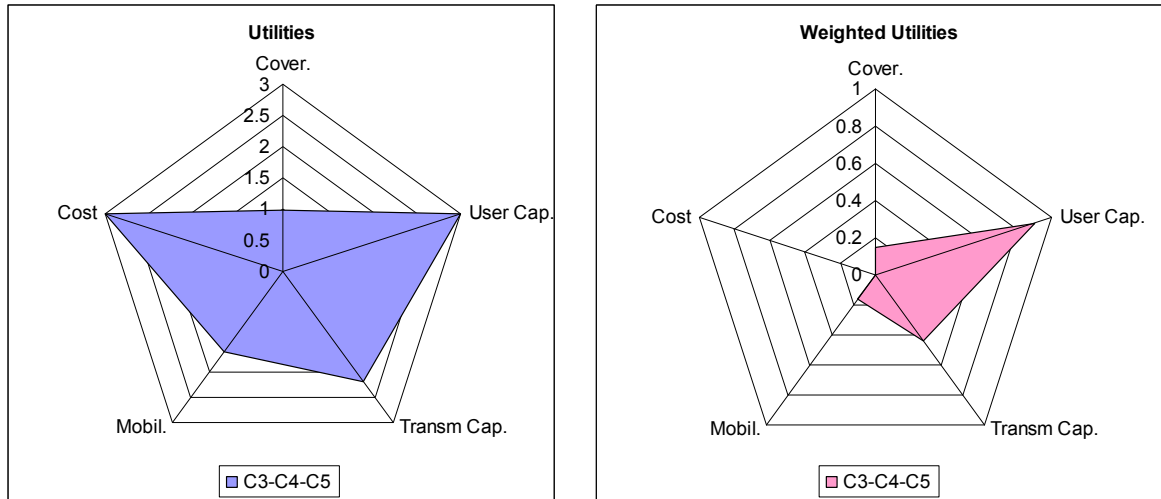
Πίνακας 4-3. Πίνακας αποτελεσμάτων του Σεναρίου 1{500,5,5}U

Demand			Config.	Utilities					Weighted				Total	
Data (Kbps)	Voice (Erl.)	Data (Erl.)		Cover.	User Cap.	Transm. Cap.	Mobil.	Cost	Cover.	User Cap.	Transm. Cap.	Mobil.		Cost
500	5	5	C0-C1-C2	2.882	2.96	3	2.933	0.75	0.432	0.888	0.6	0.293	0.001	2.947
			C0-C1-C3	2.851	2.96	1.783	2.933	1	0.428	0.888	0.357	0.293	0.001	2.616
			C0-C1-C4	1.958	2.961	1.804	2.333	1.25	0.294	0.888	0.361	0.233	0.001	2.363
			C0-C1-C5	1.96	2.961	2.311	2.333	1.5	0.294	0.888	0.462	0.233	0.002	2.498
			C0-C1-C6	1.96	2.961	2.498	2.333	1.5	0.294	0.888	0.5	0.233	0.002	2.548
			C0-C2-C3	2.839	2.98	3	2.867	1.75	0.426	0.894	0.6	0.287	0.002	2.936
			C0-C2-C4	1.949	2.98	3	2.267	2	0.292	0.894	0.6	0.227	0.002	2.678
			C0-C2-C5	1.947	2.98	3	2.267	2.25	0.292	0.894	0.6	0.227	0.002	2.677
			C0-C2-C6	1.949	2.98	3	2.267	2.25	0.292	0.894	0.6	0.227	0.002	2.678
			C0-C3-C4	1.919	2.98	1.924	2.267	1.75	0.288	0.894	0.385	0.227	0.002	2.386
			C0-C3-C5	1.915	2.98	2.26	2.267	2	0.287	0.894	0.452	0.227	0.002	2.474
			C0-C3-C6	1.914	2.98	2.432	2.267	2	0.287	0.894	0.486	0.227	0.002	2.52
			C0-C4-C5	1.023	2.98	2.31	1.667	2.25	0.153	0.894	0.462	0.167	0.002	2.229
			C0-C4-C6	1.024	2.98	2.335	1.667	2.25	0.154	0.894	0.467	0.167	0.002	2.236
			C0-C5-C6	1.025	2.98	2.623	1.667	2	0.154	0.894	0.525	0.167	0.002	2.313
			C1-C2-C3	2.828	2.98	3	2.867	2	0.424	0.894	0.6	0.287	0.002	2.933
			C1-C2-C4	1.942	2.98	3	2.267	2.25	0.291	0.894	0.6	0.227	0.002	2.676
			C1-C2-C5	1.942	2.98	3	2.267	2.5	0.291	0.894	0.6	0.227	0.002	2.676
			C1-C2-C6	1.938	2.98	3	2.267	2.5	0.291	0.894	0.6	0.227	0.002	2.675
			C1-C3-C4	1.903	2.98	1.771	2.267	2	0.285	0.894	0.354	0.227	0.002	2.341
			C1-C3-C5	1.905	2.98	2.211	2.267	2.25	0.286	0.894	0.442	0.227	0.002	2.459
			C1-C3-C6	1.913	2.98	2.413	2.267	2.25	0.287	0.894	0.483	0.227	0.002	2.514
			C1-C4-C5	1.016	2.98	2.307	1.667	2.5	0.152	0.894	0.461	0.167	0.002	2.226
			C1-C4-C6	1.015	2.98	2.407	1.667	2.5	0.152	0.894	0.481	0.167	0.002	2.253
			C1-C5-C6	1.016	2.98	2.598	1.667	2.25	0.152	0.894	0.52	0.167	0.002	2.304

C2-C3-C4	1.894	3	3	2.2	2.25	0.284	0.9	0.6	0.22	0.002	2.666
C2-C3-C5	1.895	3	3	2.2	2.5	0.284	0.9	0.6	0.22	0.002	2.665
C2-C3-C6	1.896	3	3	2.2	2.5	0.284	0.9	0.6	0.22	0.002	2.666
C2-C4-C5	0.999	3	3	1.6	2.75	0.15	0.9	0.6	0.16	0.003	2.406
C2-C4-C6	1.004	3	3	1.6	2.75	0.151	0.9	0.6	0.16	0.003	2.407
C2-C5-C6	1.006	3	3	1.6	2.5	0.151	0.9	0.6	0.16	0.002	2.408
C3-C4-C5	0.973	3	2.196	1.6	3	0.146	0.9	0.439	0.16	0.003	2.187
C3-C4-C6	0.965	3	2.474	1.6	3	0.145	0.9	0.495	0.16	0.003	2.259
C3-C5-C6	0.973	3	2.612	1.6	2.75	0.146	0.9	0.522	0.16	0.003	2.298
C4-C5-C6	0.08	3	2.721	1	2.5	0.012	0.9	0.544	0.1	0.002	1.655

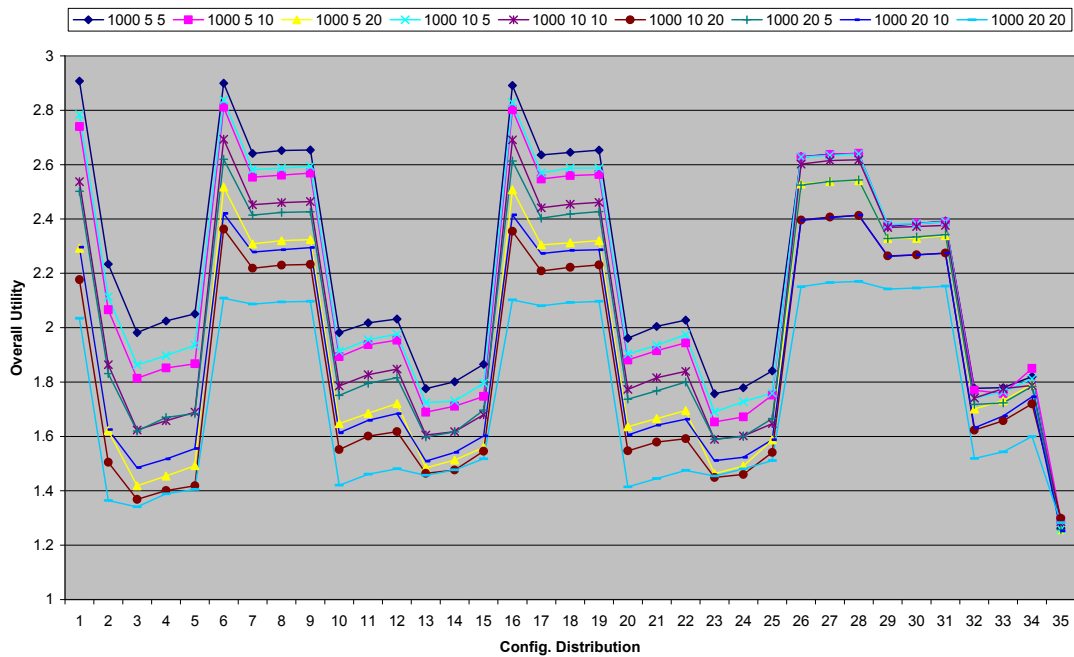
Μέσα από τον παραπάνω πίνακα, καθίσταται δυνατή η μελέτη και η σύγκριση των διαφόρων κατανομών μεταξύ τους. Προκειμένου η σύγκριση να καταστεί ακόμα ευκολότερη, οι πληροφορίες του πίνακα μπορούν να απεικονιστούν με τη βοήθεια διαγραμμάτων τύπου «ραντάρ» (αραχνοειδή διαγράμματα). Τέτοιου είδους διαγράμματα απεικονίζονται στο Σχήμα 4-22 για 4 από τις υποψήφιες κατανομές διαρθρώσεων, τις C0-C1-C2, C0-C5-C6, C1-C5-C6 και C3-C4-C5. Στην αριστερή στήλη του σχήματος, περιλαμβάνονται τα διαγράμματα με τις επιμέρους ωφέλειες, ενώ στη δεξιά στήλη τα διαγράμματα με τις σταθμισμένες επιμέρους ωφέλειες. Όσο περισσότερο εκτενές είναι ένα διάγραμμα ως προς τους τομείς της κάλυψης, της χωρητικότητας χρηστών, της χωρητικότητας μετάδοσης και της κινητικότητας, και όσο πιο περιορισμένο ως προς τον τομέα του κόστους αναδιάρθρωσης, τόσο μεγαλύτερη είναι η συνολική ωφέλεια που προσφέρει η αντίστοιχη υποψήφια κατανομή. Έτσι, για παράδειγμα, γίνεται εμφανές με μια ματιά από το Σχήμα 4-22 ότι η ωφέλεια της κατανομής C0-C1-C2 είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη των υπολοίπων, οι ωφέλειες των C0-C5-C6 και C1-C5-C6 είναι παραπλήσιες, ενώ η ωφέλεια της κατανομής C3-C4-C5 είναι η μικρότερη εκ των τεσσάρων. Συγκρίνοντας τα διαγράμματα δύο διαφορετικών κατανομών, μπορεί κανείς να κατανοήσει πιο άμεσα σε ποια σημεία υστερεί και σε ποια υπερτερεί η μία έναντι της άλλης. Για παράδειγμα, συγκρίνοντας την κατανομή C0-C5-C6 με την C1-C5-C6, εύκολα διαπιστώνει κανείς ότι παρέχουν ίσες επιμέρους ωφέλειες, με εξαίρεση τον τομέα του κόστους αναδιάρθρωσης, στον οποίο η κατανομή C1-C5-C6 εμφανίζει αυξημένο κόστος.





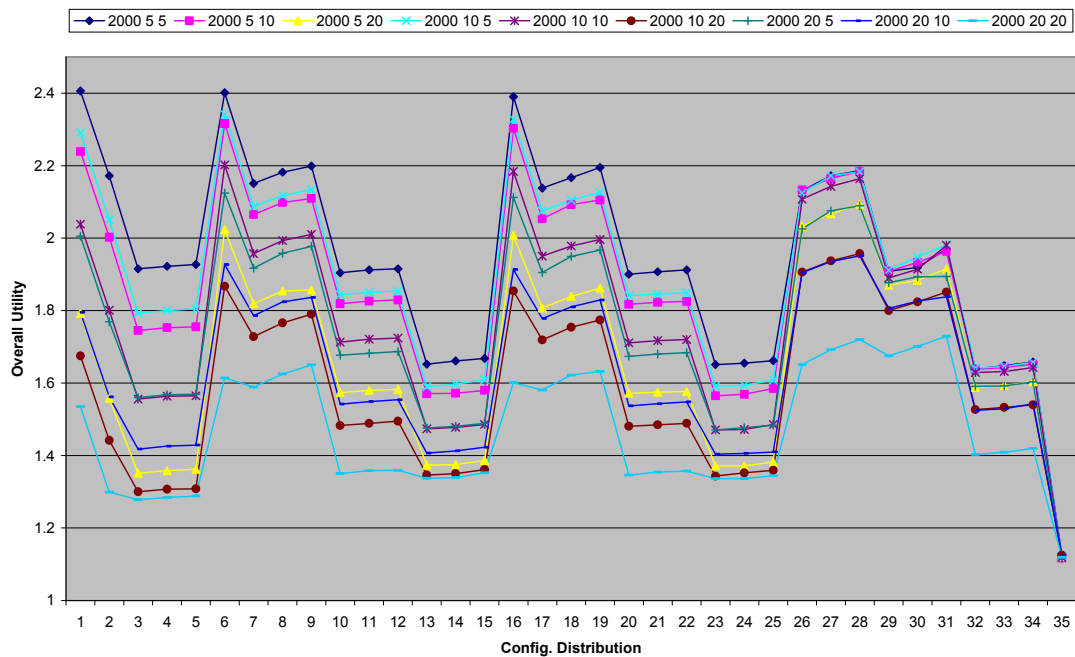
Σχήμα 4-22. Σύγκριση των ωφελειών διαφορετικών κατανομών μέσω διαγραμμάτων τύπου «ραντάρ»

- Σενάρια της μορφής 1-1000-U



Σχήμα 4-23. Σενάρια της μορφής 1-1000-U – Αποτελέσματα

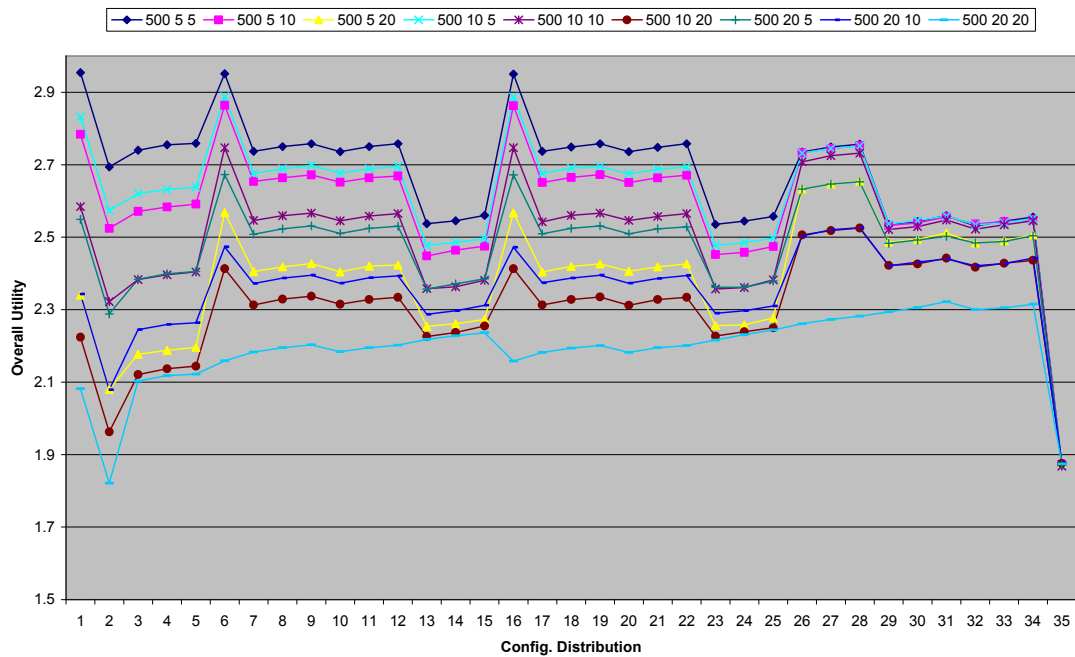
- Σενάρια της μορφής 1-2000-U



Σχήμα 4-24. Σενάρια της μορφής 1-2000-U – Αποτελέσματα

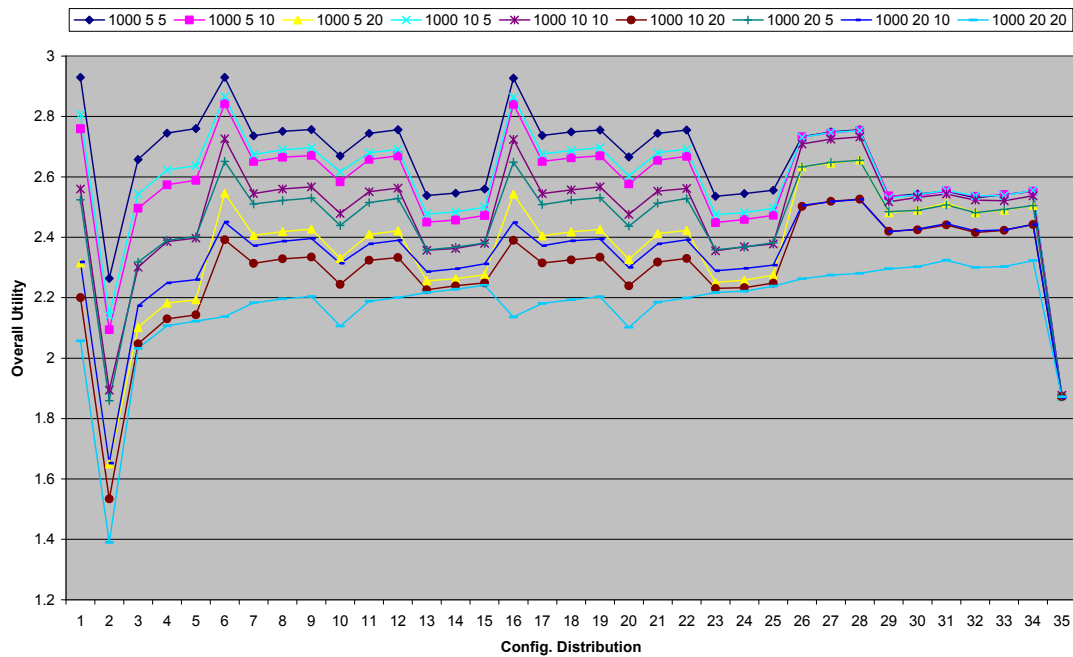
4.8.4.2 Κατανομή χρηστών με υψηλή πυκνότητα στο κέντρο

- Σενάρια της μορφής 1-500-N



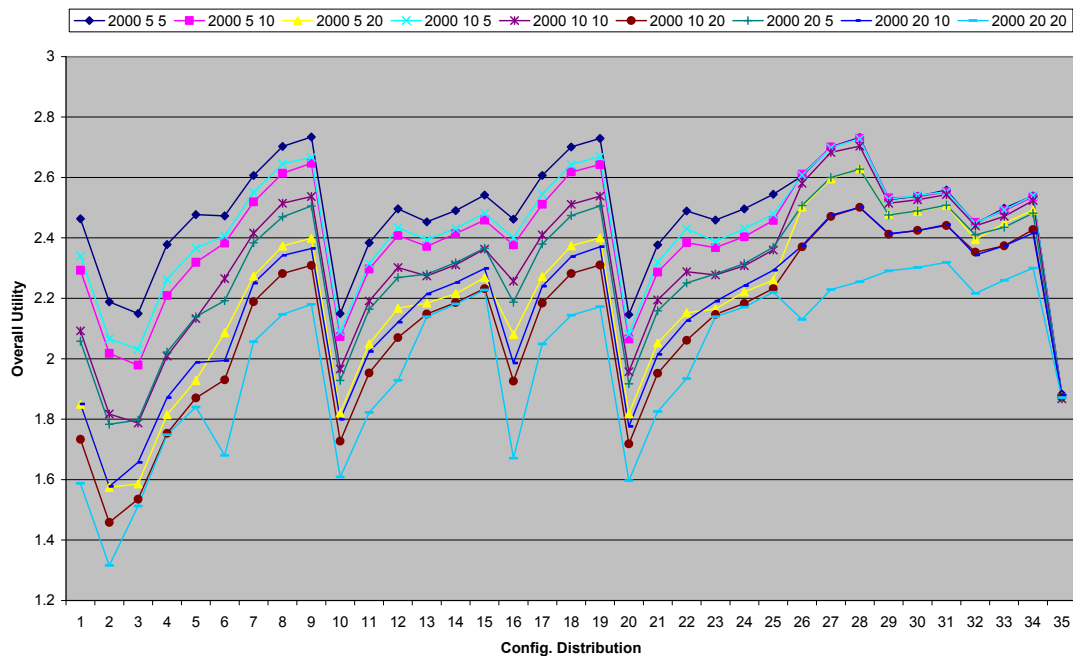
Σχήμα 4-25. Σενάρια της μορφής 1-500-N – Αποτελέσματα

- Σενάρια της μορφής 1-1000-N



Σχήμα 4-26. Σενάρια της μορφής 1-1000-N – Αποτελέσματα

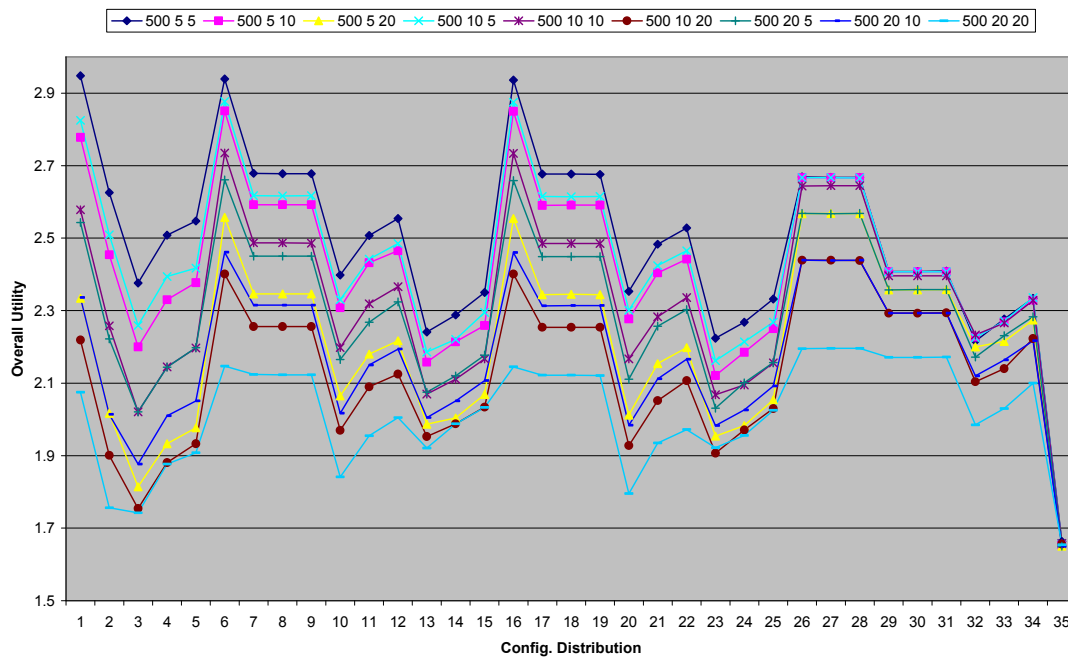
- Σενάρια της μορφής 1-2000-N



Σχήμα 4-27. Σενάρια της μορφής 1-2000-N – Αποτελέσματα

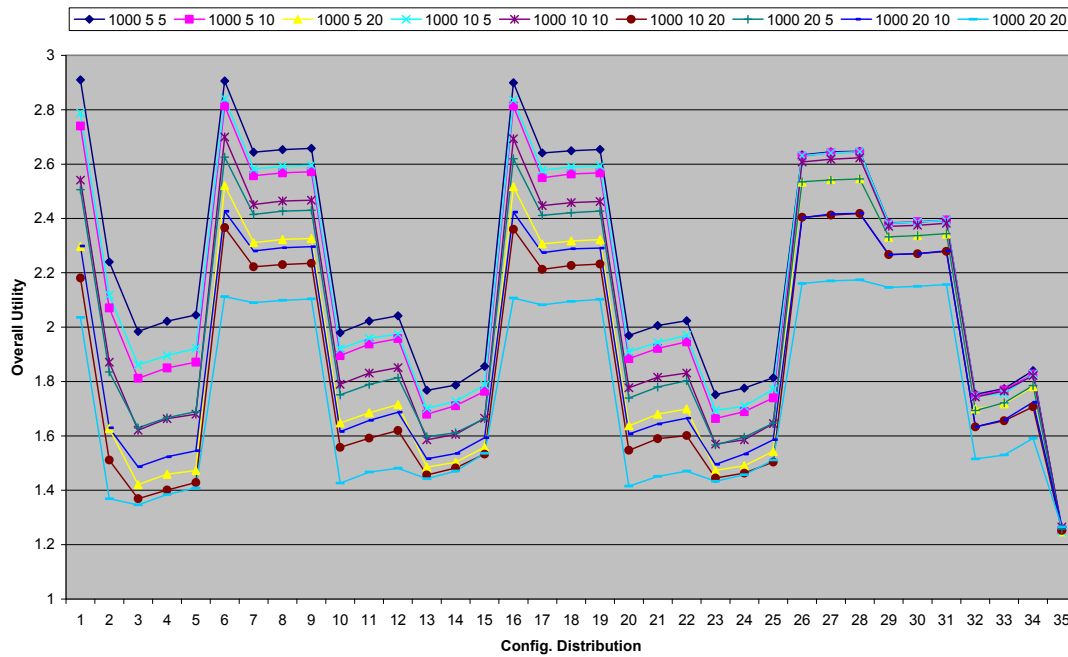
4.8.4.3 Κατανομή χρηστών με υψηλή πυκνότητα στα άκρα

- Σενάρια της μορφής 1-500-F



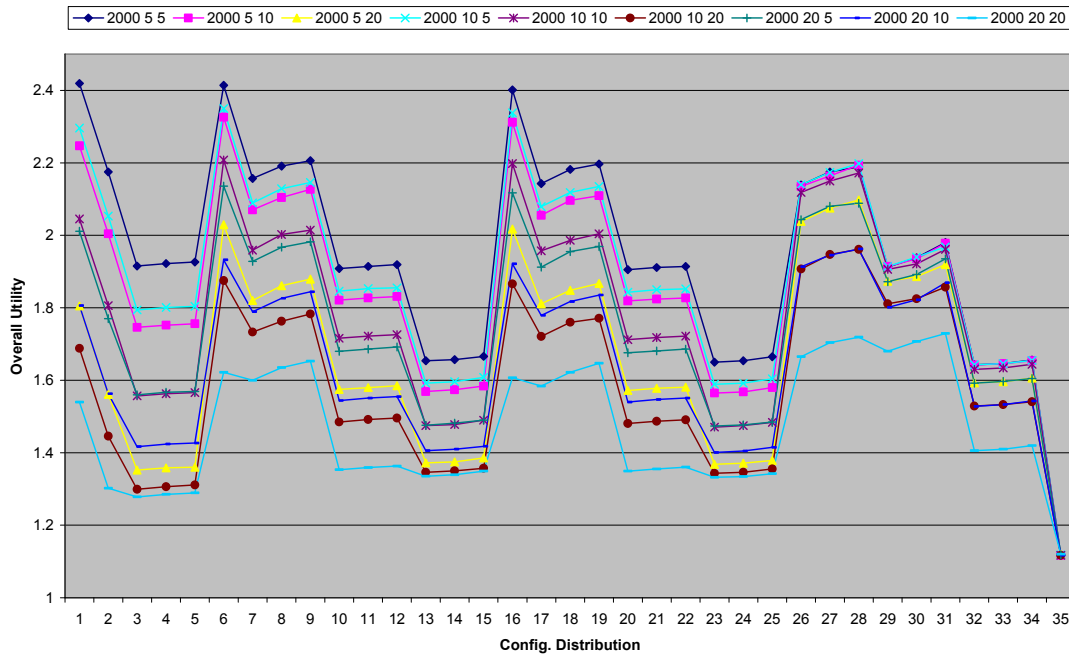
Σχήμα 4-28. Σενάρια της μορφής 1-500-F – Αποτελέσματα

- Σενάρια της μορφής 1-1000-F



Σχήμα 4-29. Σενάρια της μορφής 1-1000-F – Αποτελέσματα

■ Σενάρια της μορφής 1-2000-F



Σχήμα 4-30. Σενάρια της μορφής 1-2000-F – Αποτελέσματα

4.8.4.4 Συγκεντρωτικοί πίνακες αποτελεσμάτων

Πίνακας 4-4. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα 1^{ης} σειράς σεναρίων

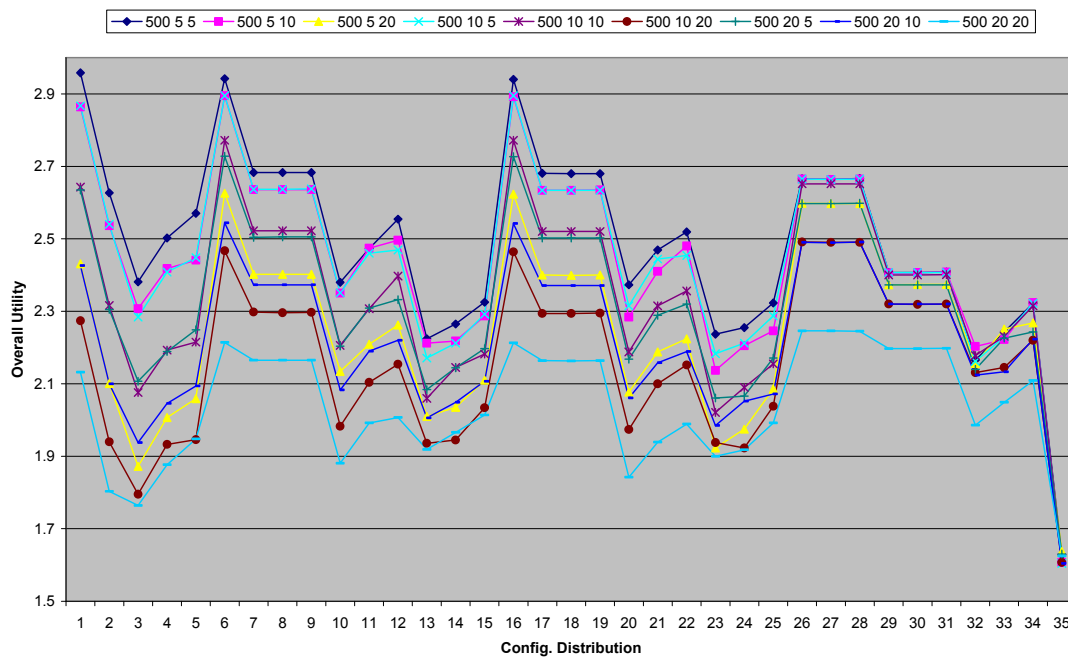
Voice	Data			Data			Data			Kbps
	5	10	20	5	10	20	5	10	20	
5	C0-C1-C2	C0-C2-C3	C2-C3-C5	C0-C1-C2	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C0-C1-C2	C0-C2-C3	C2-C3-C5	500
10	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C4	
20	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C5	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C2-C5-C6	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C6	
5	C0-C1-C2	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C0-C1-C2	C0-C2-C3	C2-C3-C6	1000
10	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C2-C3-C6	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C6	
20	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C2-C3-C6	C2-C3-C6	C2-C5-C6	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C6	
5	C0-C1-C2	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C0-C2-C6	C2-C3-C6	C2-C3-C6	C0-C1-C2	C0-C2-C3	C2-C3-C6	2000
10	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C2-C3-C6	C2-C3-C6	C2-C3-C6	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C6	
20	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C2-C5-C6	C2-C3-C6	C2-C3-C6	C2-C5-C6	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C2-C5-C6	
	ομοιόμορφη			κοντά			μακριά			

4.8.5 2η σειρά σεναρίων

Στα σενάρια της ενότητας αυτής, η πιθανότητα αποκλεισμού έχει καθοριστεί ίση με 2%, πρόκειται, δηλαδή, για σενάρια της μορφής 2-X-X.

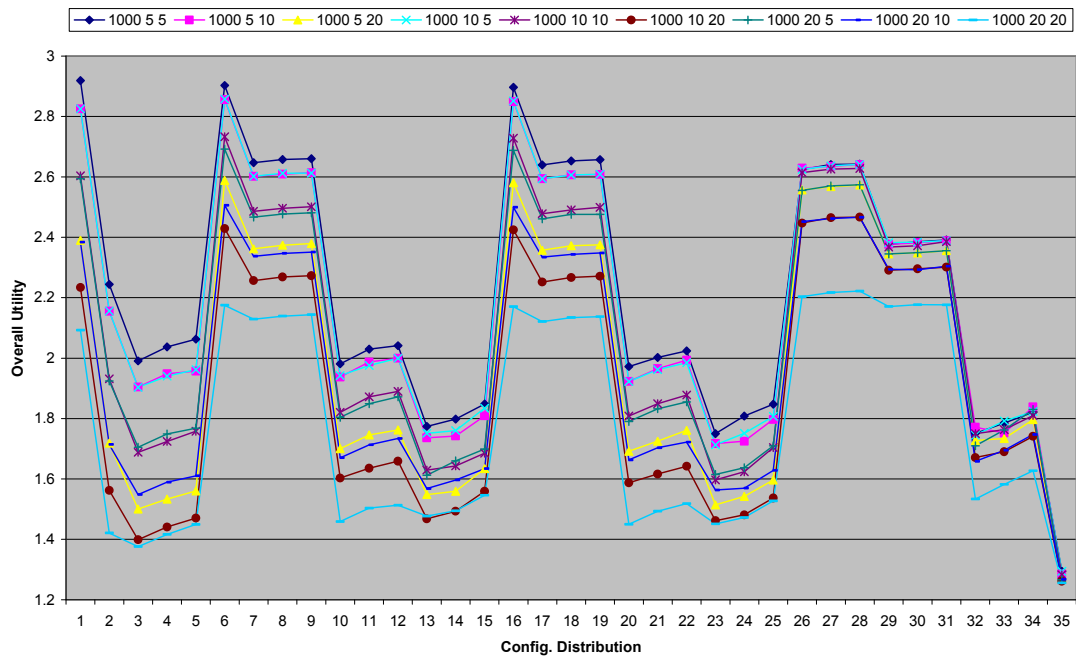
4.8.5.1 Ομοιόμορφη κατανομή χρηστών

- Σενάρια της μορφής 2-500-U



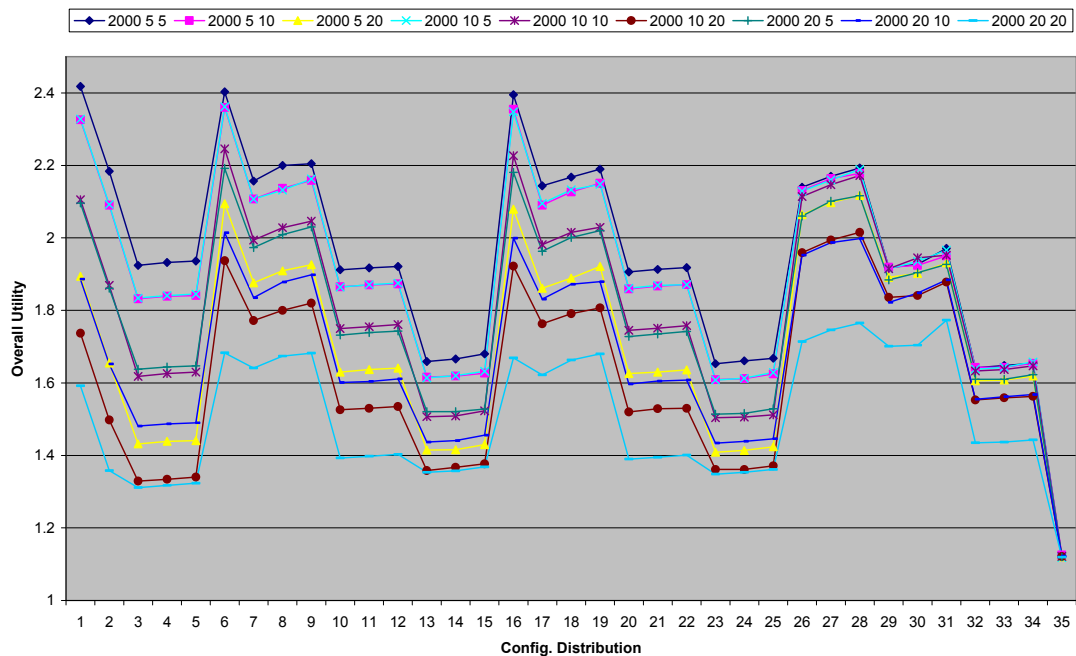
Σχήμα 4-31. Σενάρια της μορφής 2-500-U – Αποτελέσματα

- Σενάρια της μορφής 2-1000-U



Σχήμα 4-32. Σενάρια της μορφής 2-1000-U – Αποτελέσματα

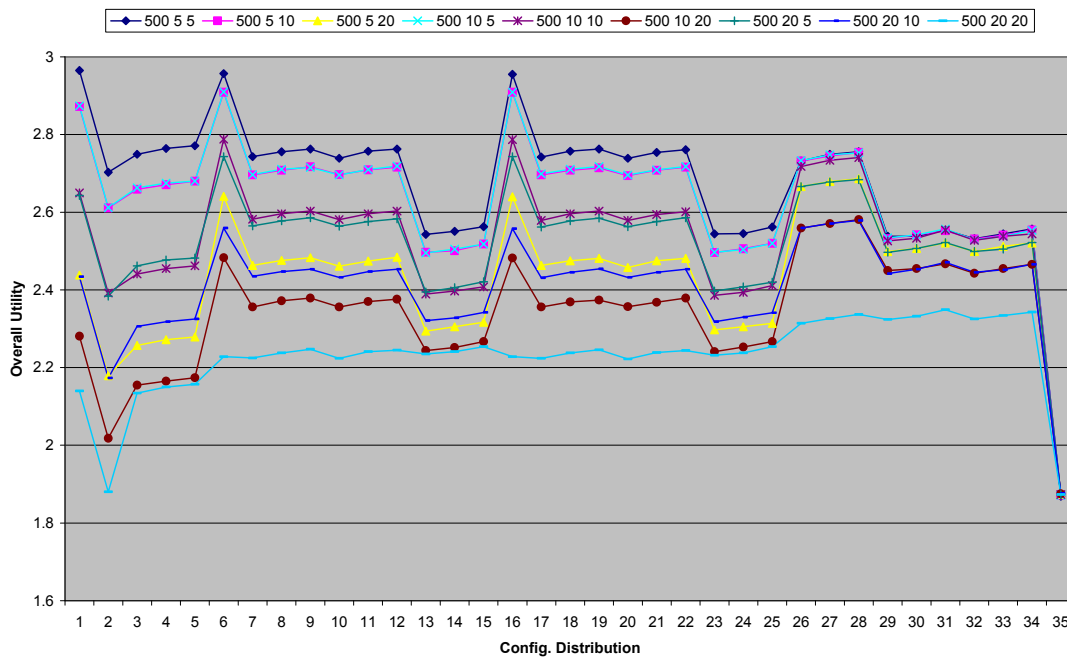
- Σενάρια της μορφής 2-2000-U



Σχήμα 4-33. Σενάρια της μορφής 2-2000-U – Αποτελέσματα

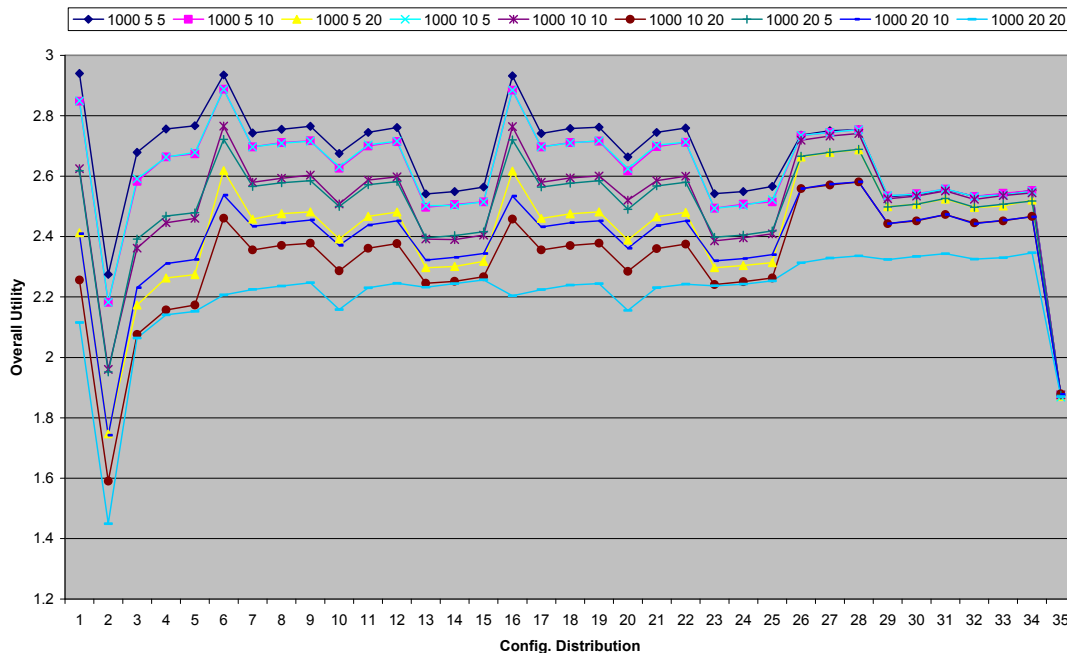
4.8.5.2 Κατανομή χρηστών με υψηλή πυκνότητα στο κέντρο

- Σενάρια της μορφής 2-500-N



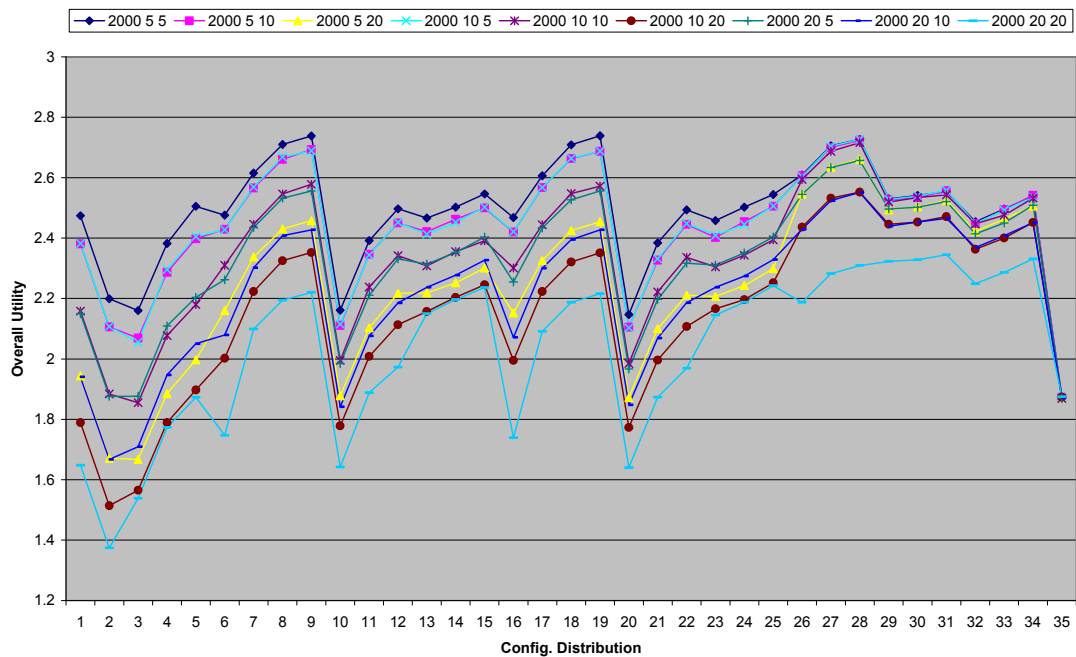
Σχήμα 4-34. Σενάρια της μορφής 2-500-N – Αποτελέσματα

- Σενάρια της μορφής 2-1000-N



Σχήμα 4-35. Σενάρια της μορφής 2-1000-N – Αποτελέσματα

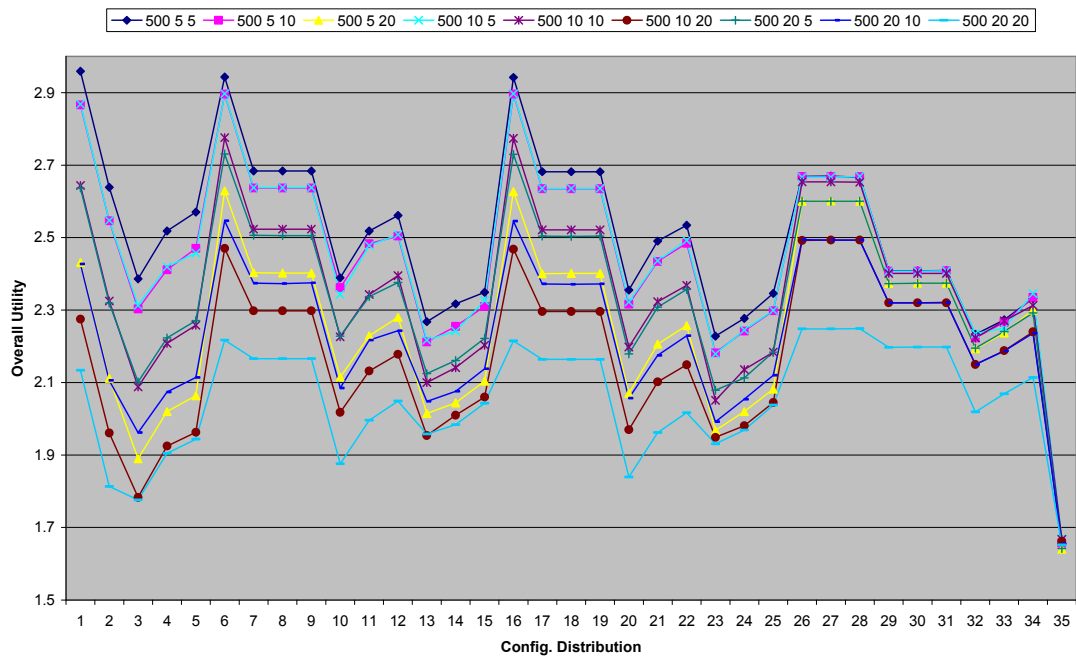
- Σενάρια της μορφής 2-2000-N



Σχήμα 4-36. Σενάρια της μορφής 2-2000-N – Αποτελέσματα

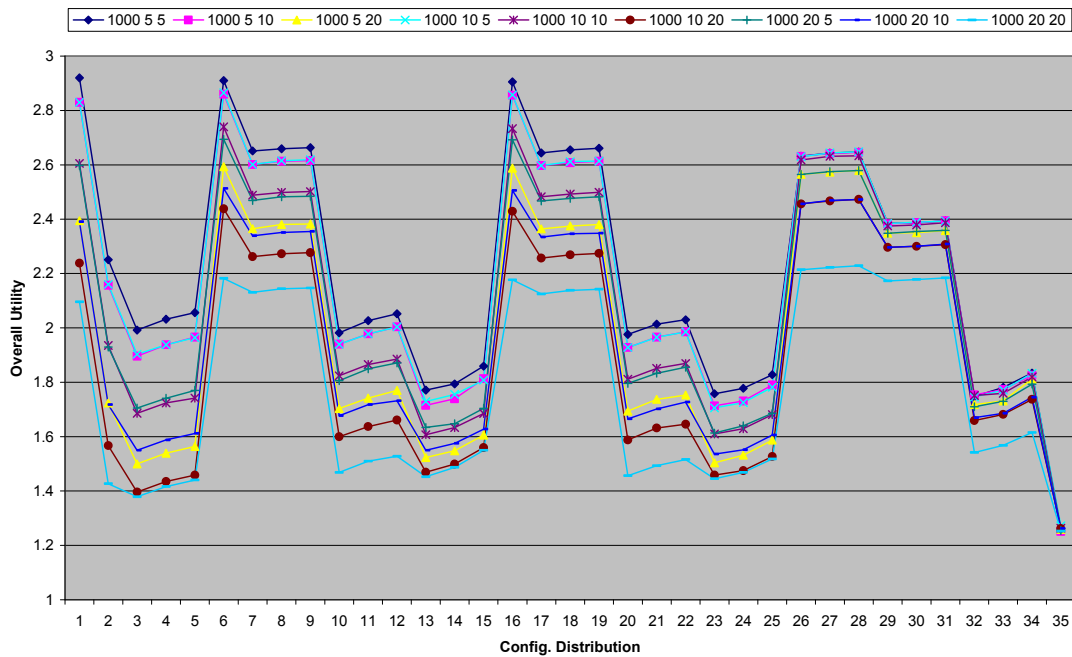
4.8.5.3 Κατανομή χρηστών με υψηλή πυκνότητα στα άκρα

- Σενάρια της μορφής 2-500-F



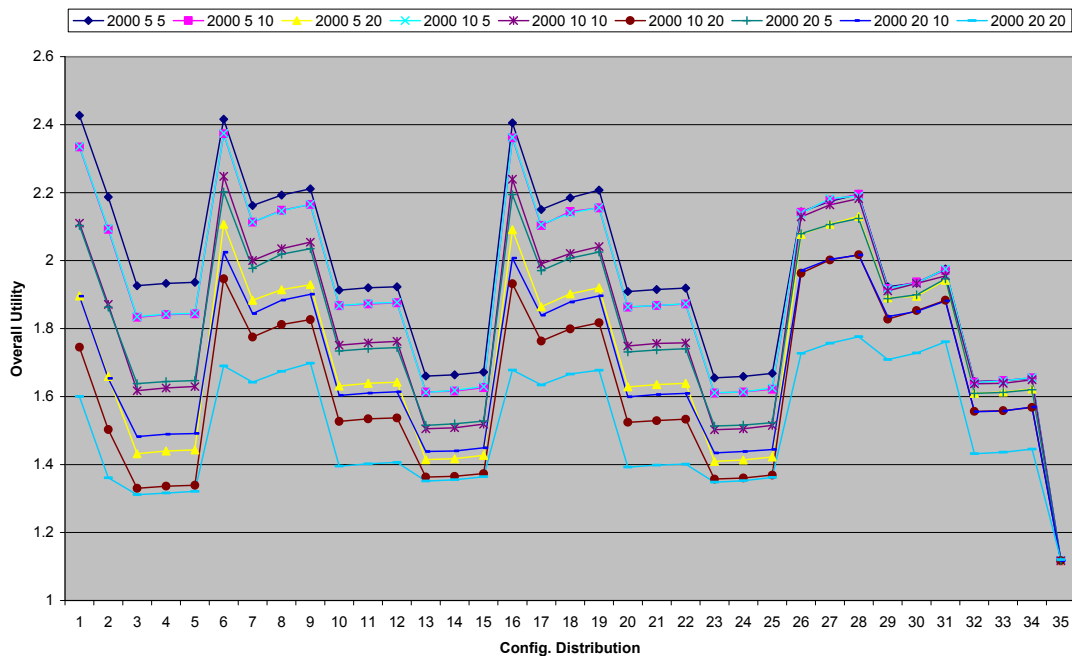
Σχήμα 4-37. Σενάρια της μορφής 2-500-F – Αποτελέσματα

- Σενάρια της μορφής 2-1000-F



Σχήμα 4-38. Σενάρια της μορφής 2-1000-F – Αποτελέσματα

- Σενάρια της μορφής 2-2000-F



Σχήμα 4-39. Σενάρια της μορφής 2-2000-F – Αποτελέσματα

4.8.5.4 Συγκεντρωτικοί πίνακες αποτελεσμάτων

Πίνακας 4-5. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα 2^{ης} σειράς σεναρίων

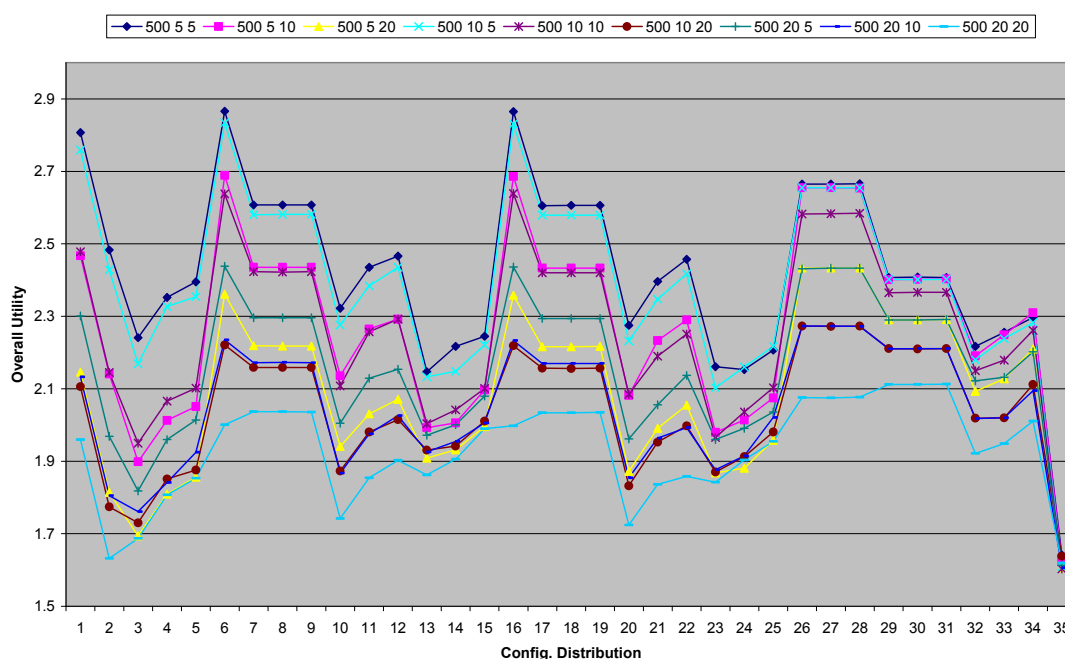
		Data			Data			Data						
		5	10	20	5	10	20	5	10	20				
Voice	5	C0-C1-C2	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C0-C1-C2	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C0-C1-C2	C0-C2-C3	C0-C2-C3	Kbps	500		
	10	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C4	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C6				
	20	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C4	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C2-C5-C6	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C6				
Voice	5	C0-C1-C2	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C0-C1-C2	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C0-C1-C2	C0-C2-C3	C0-C2-C3	Kbps		1000	
	10	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C6				
	20	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C3-C5-C6	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C6				
Voice	5	C0-C1-C2	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C1-C2-C6	C2-C3-C6	C2-C3-C6	C0-C1-C2	C0-C2-C3	C2-C3-C6	Kbps			2000
	10	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C2-C3-C6	C2-C3-C6	C2-C3-C6	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C6				
	20	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C5-C6	C2-C3-C6	C2-C3-C6	C2-C5-C6	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C6				
		ομοιόμορφη			κοντά			μακριά						

4.8.6 3η σειρά σεναρίων

Στα σενάρια της ενότητας αυτής, η πιθανότητα αποκλεισμού έχει καθοριστεί ίση με 0.1%, πρόκειται, δηλαδή, για σενάρια της μορφής 3-X-X.

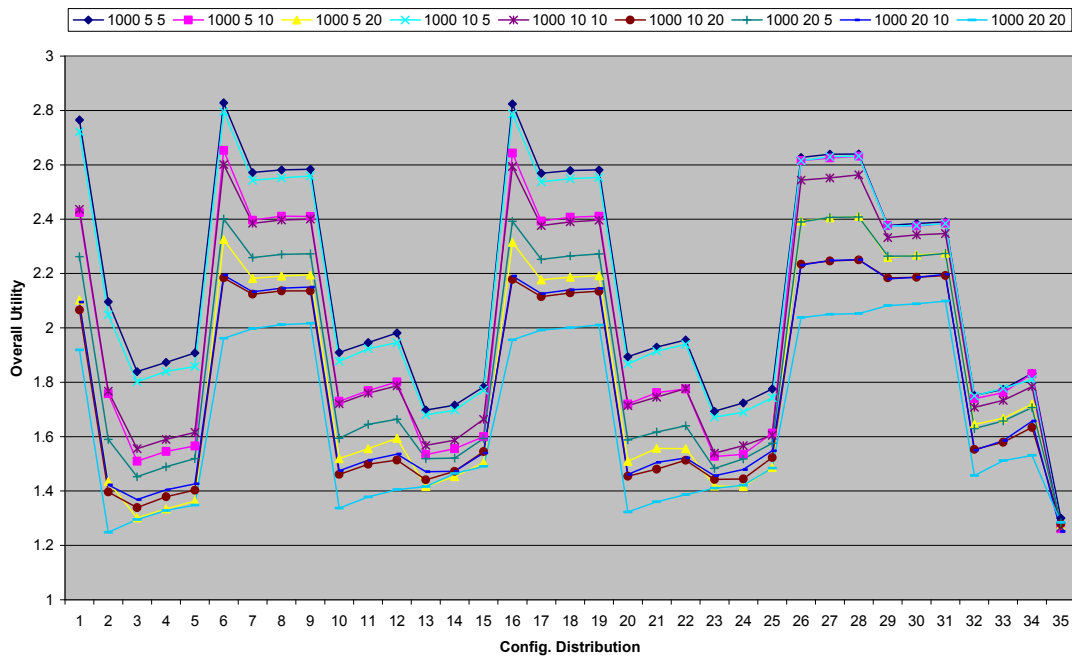
4.8.6.1 Ομοιόμορφη κατανομή χρηστών

- Σενάρια της μορφής 3-500-U



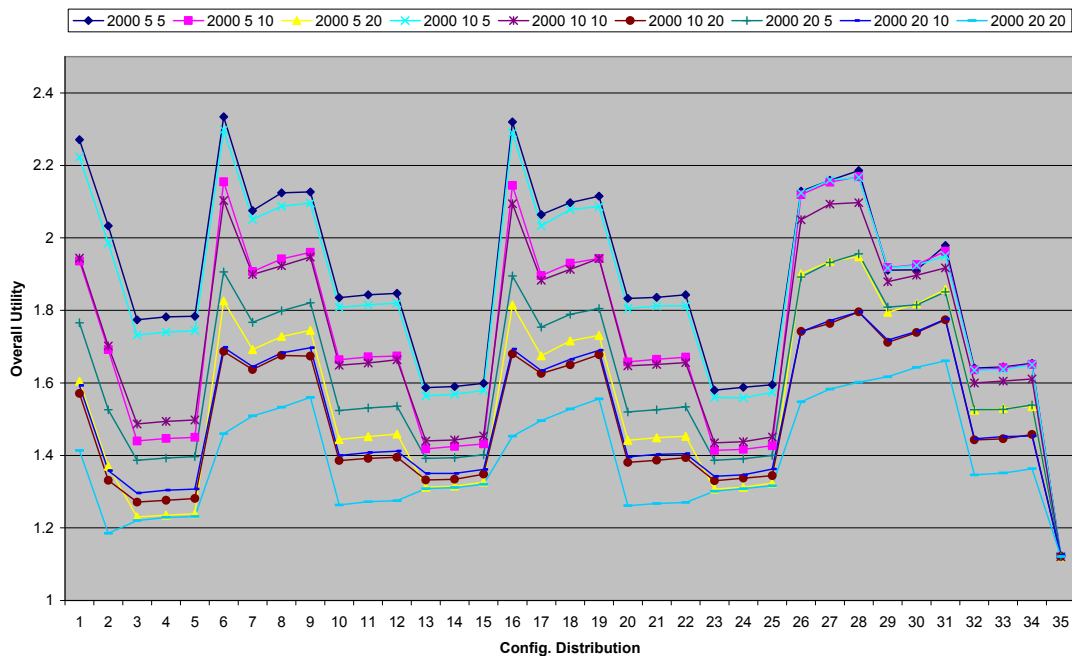
Σχήμα 4-40. Σενάρια της μορφής 3-500-U – Αποτελέσματα

- Σενάρια της μορφής 3-1000-U



Σχήμα 4-41. Σενάρια της μορφής 3-1000-U – Αποτελέσματα

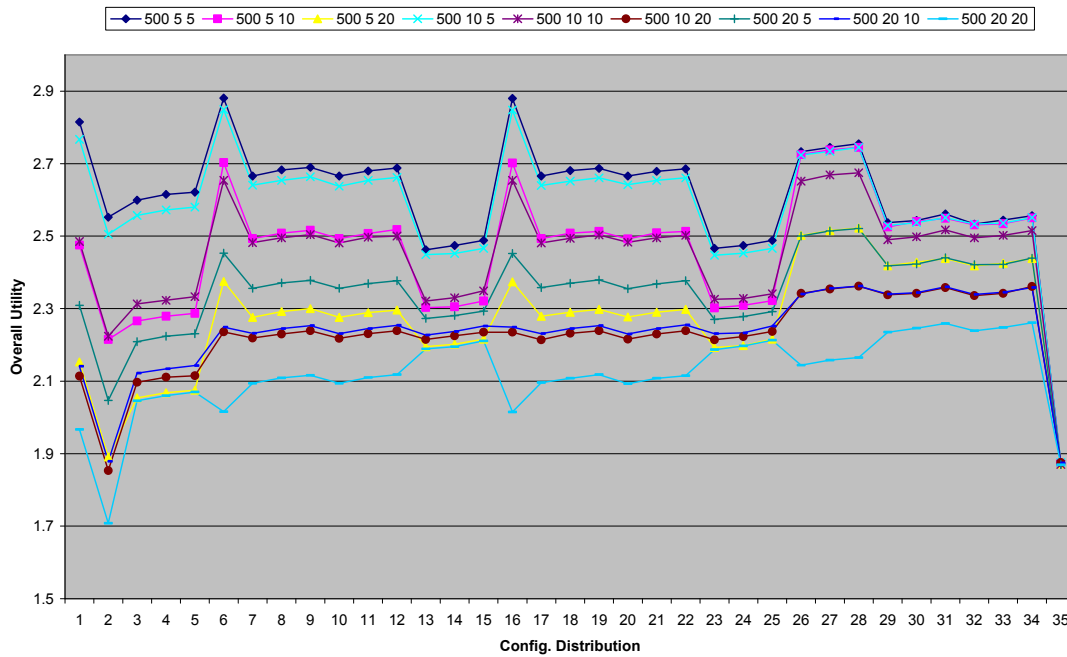
- Σενάρια της μορφής 3-2000-U



Σχήμα 4-42. Σενάρια της μορφής 3-2000-U – Αποτελέσματα

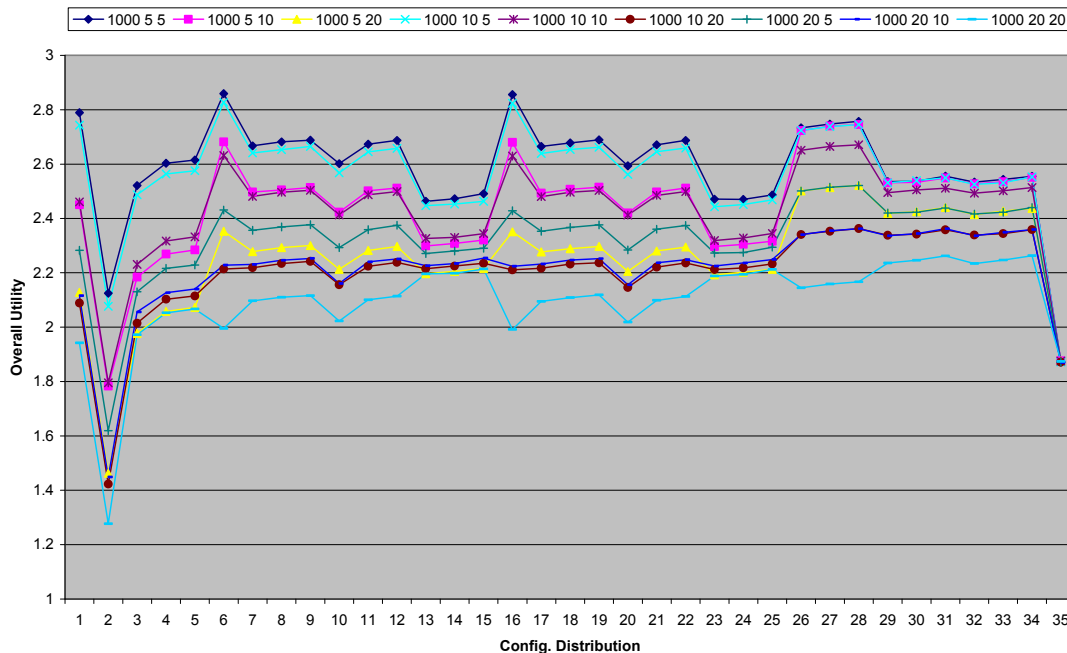
4.8.6.2 Κατανομή χρηστών με υψηλή πυκνότητα στο κέντρο

- Σενάρια της μορφής 3-500-N



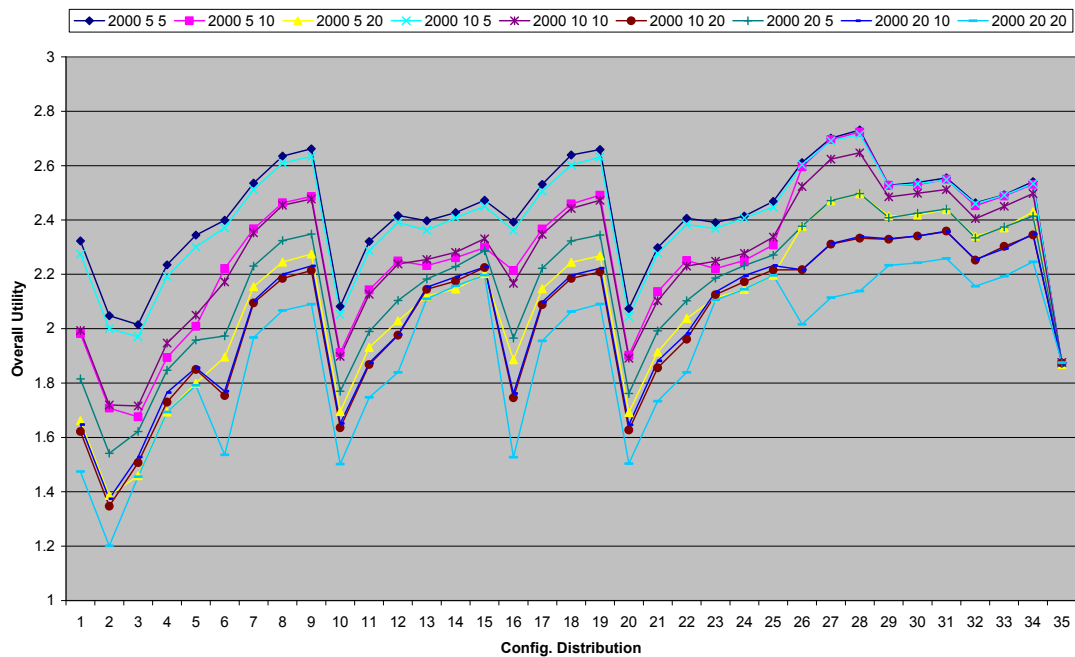
Σχήμα 4-43. Σενάρια της μορφής 3-500-N – Αποτελέσματα

- Σενάρια της μορφής 3-1000-N



Σχήμα 4-44. Σενάρια της μορφής 3-1000-N – Αποτελέσματα

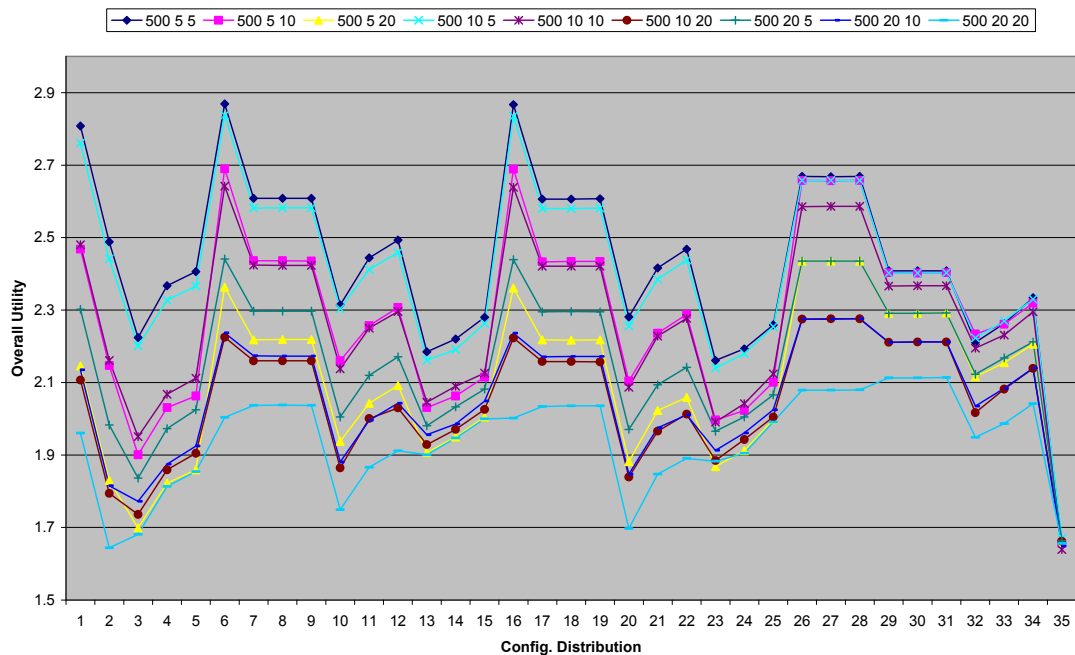
■ Σενάρια της μορφής 3-2000-N



Σχήμα 4-45. Σενάρια της μορφής 3-2000-N – Αποτελέσματα

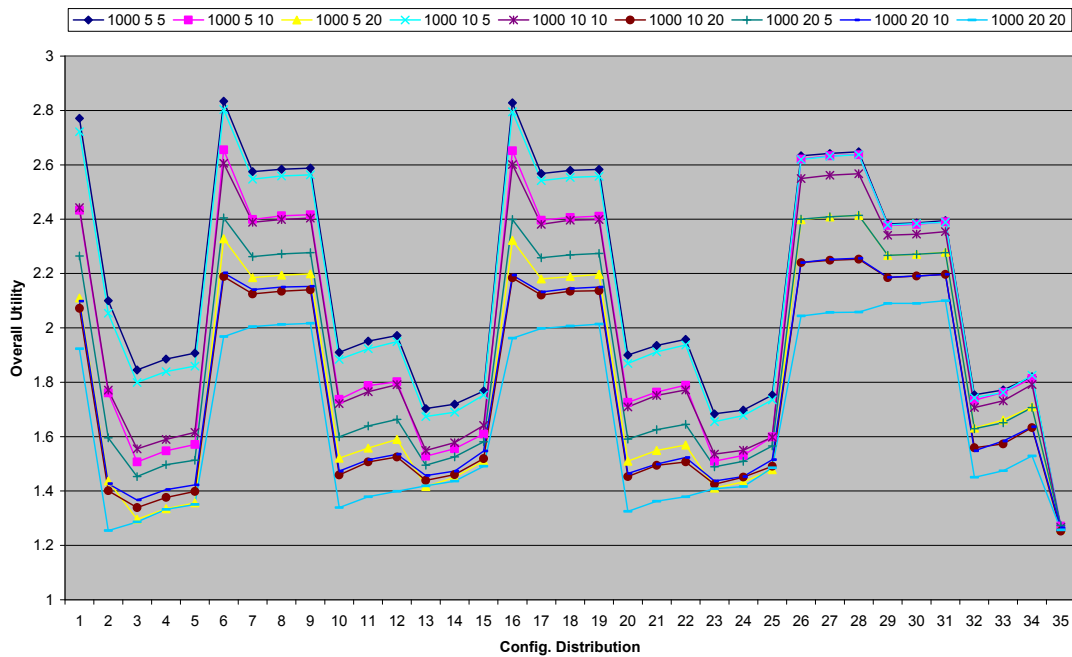
4.8.6.3 Κατανομή χρηστών με υψηλή πυκνότητα στα άκρα

■ Σενάρια της μορφής 3-500-F



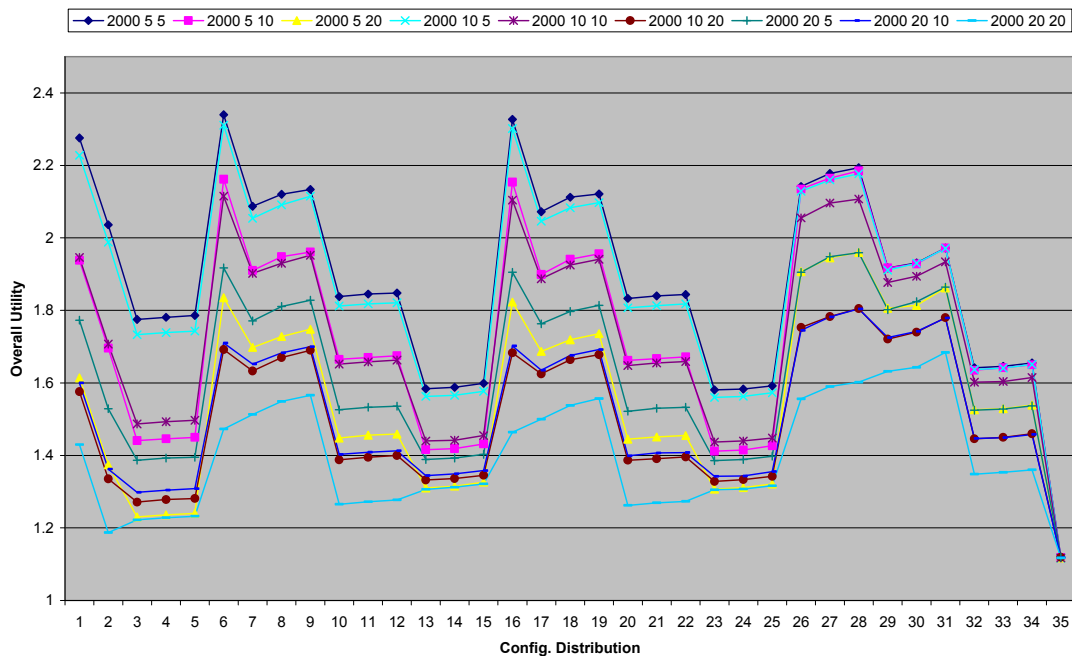
Σχήμα 4-46. Σενάρια της μορφής 3-500-F – Αποτελέσματα

- Σενάρια της μορφής 3-1000-F



Σχήμα 4-47. Σενάρια της μορφής 3-1000-F – Αποτελέσματα

- Σενάρια της μορφής 3-2000-F



Σχήμα 4-48. Σενάρια της μορφής 3-2000-F – Αποτελέσματα

4.8.6.4 Συγκεντρωτικοί πίνακες αποτελεσμάτων

Πίνακας 4-6. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα 3^{ης} σειράς σεναρίων

		Data			Data			Data						
		5	10	20	5	10	20	5	10	20				
Voice	5	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C2-C3-C6	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C5	Kbps	500		
	10	C0-C2-C3	C1-C2-C3	C2-C3-C6	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C2-C3-C6	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C5				
	20	C0-C2-C3	C2-C3-C5	C2-C5-C6	C2-C3-C6	C2-C3-C6	C3-C5-C6	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C2-C5-C6				
Voice	5	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C2-C3-C6	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C6	Kbps		1000	
	10	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C2-C3-C6	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C6				
	20	C2-C3-C6	C2-C3-C6	C2-C5-C6	C2-C3-C6	C2-C5-C6	C3-C5-C6	C2-C3-C6	C2-C3-C6	C2-C5-C6				
Voice	5	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C2-C3-C6	C2-C3-C6	C2-C3-C6	C2-C3-C6	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C2-C3-C6	Kbps			2000
	10	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C6	C2-C3-C6	C2-C3-C6	C2-C5-C6	C0-C2-C3	C0-C2-C3	C2-C3-C6				
	20	C2-C3-C6	C2-C3-C6	C2-C5-C6	C2-C3-C6	C2-C5-C6	C2-C5-C6	C2-C3-C6	C2-C3-C6	C2-C5-C6				
		ομοιόμορφη			κοντά			μακριά						

4.8.7 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Παρατηρώντας τα ανωτέρω αποτελέσματα, την ακριβή τιμή, δηλαδή, της συνολικής ωφέλειας για κάθε δυνατή κατανομή διαρθρώσεων, αλλά και τις επιμέρους ωφέλειες ως προς καθένα από τα χαρακτηριστικά επίδοσης, καθώς και την επικρατέστερη κατανομή διαρθρώσεων, για διάφορους συνδυασμούς πιθανότητας αποκλεισμού, προσφερόμενου φορτίου φωνής και δεδομένων και χωρικής κατανομής χρηστών, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Οι τιμές των επιμέρους ωφελειών αντικατοπτρίζουν ορθά τις ιδιαιτερότητες κάθε τεχνολογίας πρόσβασης ως προς την κάλυψη, την υποστήριξη κινητικότητας, τους προσφερόμενους ρυθμούς δεδομένων και την χωρητικότητα σε χρήστες. Τα ιδιαίτερα αυτά χαρακτηριστικά κάθε τεχνολογίας επηρεάζουν με σαφή τρόπο τόσο τις επιμέρους ωφέλειες όσο και τη συνολική ωφέλεια της κατανομής που την περιλαμβάνει. Έτσι, παραδείγματος χάριν, οι κατανομές που περιλαμβάνουν δύο διαρθρώσεις που υποστηρίζουν WLAN (WiFi), όπως οι C0-C5-C6, C1-C5-C6, C3-C4-C5, υστερούν σημαντικά ως προς την κάλυψη και την υποστήριξη κινητικότητας

από κατανομές που περιέχουν μία ή καμία διάρθρωση WLAN, όπως είναι οι C0-C1-C2, C1-C2-C3 και C0-C1-C6. Από την άλλη πλευρά, όμως, οι κατανομές διαρθρώσεων που υποστηρίζουν WLAN παρουσιάζουν συγκριτικό πλεονέκτημα όσον αφορά τους παρεχόμενους ρυθμούς δεδομένων και την υποστήριξη πολλών χρηστών, γι' αυτό και αναδεικνύονται ως επικρατέστερες σε συνθήκες υψηλού φορτίου κίνησης.

- Όσον αφορά τη μεταβολή του προσφερόμενου φορτίου κίνησης, τόσο για φωνή όσο και για δεδομένα, παρατηρείται ότι αύξηση αυτού οδηγεί στην επικράτηση κατανομών με μία ή παραπάνω διαρθρώσεις που υποστηρίζουν WLAN. Αυτό, λογικά, συμβαίνει, διότι η συγκεκριμένη τεχνολογία πρόσβασης έχει την ικανότητα να προσφέρει στους χρήστες, ή τουλάχιστον σε ποσοστό αυτών που βρίσκεται εντός της ακτίνας κάλυψής της, υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων. Έτσι, για παράδειγμα, στην περίπτωση ομοιόμορφης κατανομής χρηστών με πιθανότητα αποκλεισμού 1%, δηλαδή σε σενάρια της μορφής 1-X-U, παρατηρείται ότι, στην περίπτωση χαμηλού προσφερόμενου φορτίου, όπως η περίπτωση 1{500,5,5}U, επικρατέστερη εμφανίζεται η κατανομή C0-C1-C2, αποτελούμενη από διαρθρώσεις με υποστηριζόμενες τεχνολογίες GERAN και UTRAN, στην περίπτωση υψηλότερου φορτίου, όπως η 1{1000,20,20}U, υποδεικνύεται ως βέλτιστη κατανομή η C2-C3-C6 με μια διάρθρωση WLAN, ενώ, στην περίπτωση πολύ υψηλού φορτίου, όπως η 1{2000,20,20}U, επικρατεί η κατανομή C2-C5-C6 με δύο διαρθρώσεις WLAN.
- Δύο κατανομές διαρθρώσεων, ακόμα και αν υποστηρίζουν τις ίδιες τεχνολογίες πρόσβασης ενδέχεται να διαφέρουν ως προς την ενεργό χωρητικότητα μετάδοσης ή την ενεργό ακτίνα κάλυψης. Αυτό οφείλεται στην ευκαιριακή χρήση συχνοτήτων και τη συνεπακόλουθη διαφορά του επιπέδου παρεμβολών σε κάθε ζώνη. Στο συγκεκριμένο σενάριο, για παράδειγμα, οι διαρθρώσεις C2 και C3 υποστηρίζουν μεν και οι δύο την τεχνολογία UMTS, διαφέρουν ριζικά, όμως, στους παρεχόμενους ρυθμούς δεδομένων. Οι προαναφερθείσες διαφορές αντικατοπτρίζονται στις επιμέρους ωφέλειες της χωρητικότητας μετάδοσης και της ακτίνας κάλυψης, αντίστοιχα.
- Όσον αφορά τη χωρική κατανομή των χρηστών, τα αποτελέσματα των σεναρίων επιβεβαιώνουν την «ενστικτώδη» προτίμηση κατανομών με διαρθρώσεις WLAN σε περίπτωση που η πλειοψηφία των χρηστών βρίσκεται

συγκεντρωμένη πλησίον του σταθμού βάσης. Έτσι, για ίδιες τιμές προσφερόμενου φορτίου, επικρατούν, συνήθως, για χωρική κατανομή κοντά στο σταθμό βάσης, κατανομές με παραπάνω της μιας διάρθρωσης WLAN. Για παράδειγμα, στην περίπτωση $2\{1000,20,20\}N$ επικρατεί η κατανομή C3-C5-C6 με δύο διαρθρώσεις WLAN, ενώ υπό ίδιες συνθήκες σε ομοιόμορφη κατανομή χρηστών, περίπτωση $2\{1000,20,20\}U$, επικρατεί η C2-C3-C6 με μια διάρθρωση WLAN. Φυσικά, σε περιπτώσεις υψηλού προσφερόμενου φορτίου, όπως εξηγήθηκε παραπάνω, επικρατούν και πάλι κατανομές με δύο διαρθρώσεις WLAN, ανεξάρτητα από την κατανομή των χρηστών. Πιθανόν, εγείρει απορίες η ταύτιση, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, της επικρατούσας διάρθρωσης στην περίπτωση ομοιόμορφης κατανομής και κατανομής με πυκνότητα συγκεντρωμένη στα όρια της περιοχής κάλυψης. Αυτό συμβαίνει, διότι, τόσο οι επιμέρους όσο και η συνολική ωφέλεια υπολογίζονται επί του συνόλου των διαρθρώσεων που απαρτίζουν μια κατανομή. Συνεπώς, η παρουσία διαρθρώσεων WLAN σε περίπτωση που οι χρήστες βρίσκονται συγκεντρωμένοι στα άκρα, δικαιολογείται ως εξής: οι διαρθρώσεις με υποστηριζόμενες τεχνολογίες GERAN και UTRAN επαρκούν για την εξυπηρέτηση αυτών των απομακρυσμένων χρηστών, με τη διάρθρωση WLAN να εξασφαλίζει υψηλούς ρυθμούς στους χρήστες που βρίσκονται πλησίον του σταθμού βάσης. Αύξηση του αριθμών των απομακρυσμένων χρηστών, θα οδηγούσε, συνεπώς, στην υποτίμηση αυτών των κατανομών.

- Η πιθανότητα αποκλεισμού χρηστών αποτελεί μια βαρύνουσα παράμετρο καθώς αντανακλά την απαίτηση για υψηλή χωρητικότητα του συστήματος σε χρήστες. Εκφράζει τη μέγιστη αποδεκτή πιθανότητα αποκλεισμού χρήστη που αιτείται υπηρεσίες φωνής ή δεδομένων και υπολογίζεται με ειδικό τρόπο για κάθε τεχνολογία ραδιοπρόσβασης. Όπως παρατηρείται από την εκτέλεση των σεναρίων, στην περίπτωση απαίτησης μικρής πιθανότητας αποκλεισμού, και συγκεκριμένα στην περίπτωση πιθανότητας ίσης με 0.1%, ευνοούνται οι κατανομές με διαρθρώσεις WLAN, καθώς υπερτερούν σε συνθήκες μεγάλου αριθμού χρηστών, έναντι, για παράδειγμα, των διαρθρώσεων που υποστηρίζουν την τεχνολογία UTRAN, οι επιδόσεις της οποίας επηρεάζονται από την ενδοκυβελική παρεμβολή. Ενισχύεται, λοιπόν, με αυτόν τον τρόπο, η επιμέρους ωφέλεια της χωρητικότητας χρηστών, με αποτέλεσμα η συνολική ωφέλεια των κατανομών αυτών να αγγίζει ή και, σε ορισμένες περιπτώσεις, να

ξεπερνά την ωφέλεια κατανομών με τεχνολογίες διαφορετικού τύπου. Παραδείγματος χάριν, υπό ίδιες συνθήκες προσφερόμενου φορτίου και χωρικής κατανομής χρηστών, στην περίπτωση πιθανότητας αποκλεισμού ίσης με 0.1%, όπως στην περίπτωση 3{500,5,20}U, υποδεικνύεται ως επικρατέστερη η κατανομή C2-C3-C6, με μια διάρθρωση WLAN, ενώ στην περίπτωση αρκετά μεγαλύτερης πιθανότητας, και συγκεκριμένα ίσης με 2%, όπως στην περίπτωση 2{500,5,20}U, επικρατεί η κατανομή C0-C2-C3, με δυο διαρθρώσεις UTRAN και μια διάρθρωση GERAN.

- Φυσικά, οι παραπάνω παρατηρήσεις εφαρμόζονται όταν οι επιδόσεις μιας διάρθρωσης συμπίπτουν με τα γενικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας που αυτή υποστηρίζει. Οι δυναμικές επιδόσεις των διαρθρώσεων, όμως, λόγω της ευκαιριακής χρήσης συχνοτήτων και των κυμαινόμενων επιπέδων παρεμβολών, ενδέχεται να αλλοιώσουν αυτήν την συμπεριφορά, επηρεάζοντας ανάλογα την τελική απόφαση αναδιάρθρωσης.

4.8.8 Σύγκριση με προκαθορισμένες πολιτικές

Όπως διαφαίνεται τόσο από την περιγραφή της όσο και από τα εκτενή αποτελέσματα που παρατέθηκαν, η προτεινόμενη μέθοδος προχωρά σε μια πολύπλευρη βελτιστοποίηση της διαδικασίας εντοπισμού του κατάλληλου συνδυασμού διαρθρώσεων. Συγκρινόμενη με μια μέθοδο βασισμένη σε προκαθορισμένες πολιτικές, όπως αυτές που χρησιμοποιούνται σήμερα, η προτεινόμενη μέθοδος βελτιστοποίησης υπερτερεί ξεκάθαρα, καθώς είναι σε θέση να αντεπεξέλθει επιτυχώς σε οποιαδήποτε κατάσταση συναντήσει, σε οποιονδήποτε, δηλαδή, συνδυασμό εισόδων. Αυτό οφείλεται στη δυνατότητά της να ζυγίσει ορθά όλα τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μιας υποψήφιας λύσης, δεδομένης της τρέχουσας κατάστασης και των απαιτήσεων που διαμορφώνονται.

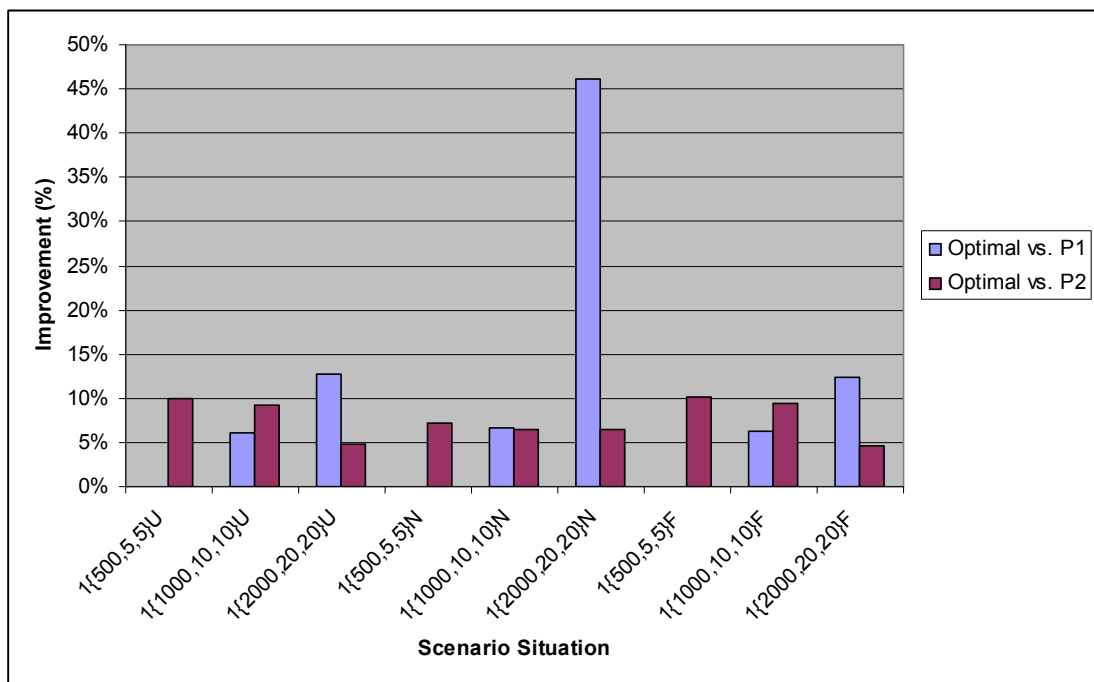
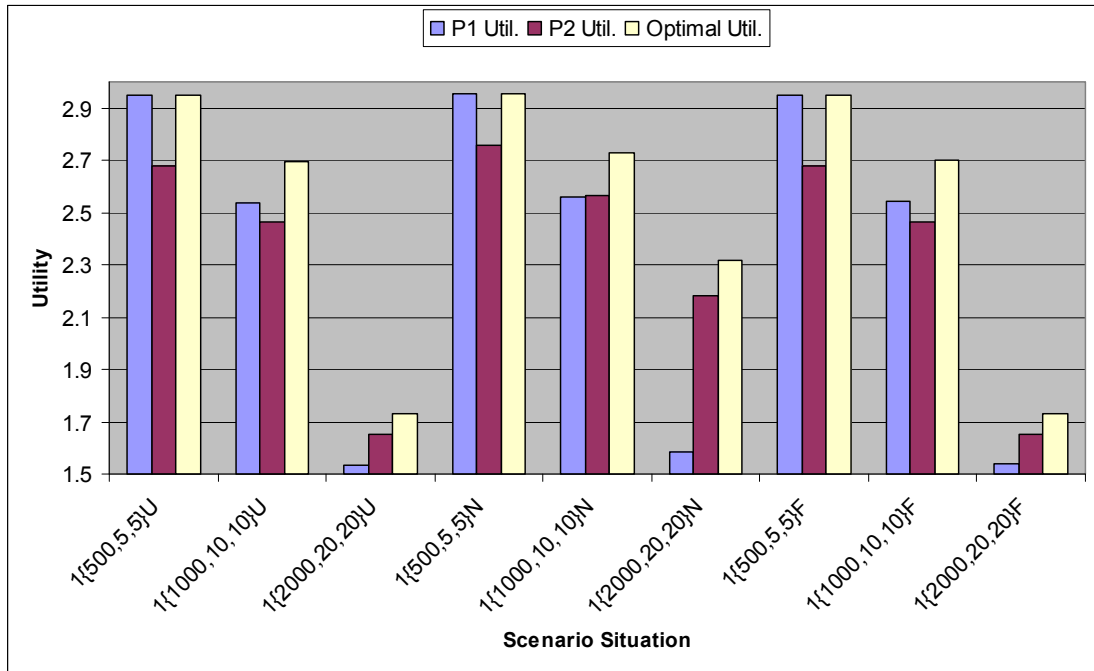
Στη συνέχεια, προκειμένου να δοθεί και ποσοτική αίσθηση της ανωτερότητας της προτεινόμενης μεθόδου, θα γίνει σύγκριση της προτεινόμενης μεθόδου με τις επιδόσεις δύο ενδεικτικών μεθόδων βασισμένων σε πολιτικές. Η πρώτη εξ αυτών θα καλείται *μέθοδος ή πολιτική «P1»* και ορίζεται ως εξής: «Η επιλεγείσα κατανομή διαρθρώσεων θα απαρτίζεται από εκείνες τις διαρθρώσεις οι οποίες επιτυγχάνουν, βάσει των εκτιμήσεων, τις καλύτερες ενεργές ακτίνες κάλυψης».

Η δεύτερη θα καλείται *μέθοδος ή πολιτική «P2»* και ορίζεται ως εξής: «Η επιλεγείσα κατανομή διαρθρώσεων θα απαρτίζεται από εκείνες τις διαρθρώσεις οι οποίες επιτυγχάνουν τόσο την καλύτερη ενεργό ακτίνα κάλυψης (με βαρύτητα 50%) όσο και την καλύτερη ενεργό χωρητικότητα μετάδοσης (με βαρύτητα πάλι 50%). Επιπλέον, οι διαρθρώσεις της επιλεγείσας κατανομής θα πρέπει να χρησιμοποιούν, κατά το δυνατό, διαφορετικές τεχνολογίες πρόσβασης. Αν τούτο δεν είναι εφικτό, επειδή οι τεχνολογίες πρόσβασης είναι λιγότερες σε πλήθος από τους πομποδέκτες του σταθμού βάσης, τότε επιλέγεται εκείνη η καλύτερη, ως προς την επιτευχθείσα ακτίνα κάλυψης και χωρητικότητα μετάδοσης, κατανομή από εκείνες τις κατανομές με τη μεγαλύτερη ετερογένεια (ως προς τη χρησιμοποιούμενη ασύρματη τεχνολογία πρόσβασης)».

Στα πλαίσια των σεναρίων που εξετάζονται, οι ανωτέρω πολιτικές οδηγούν στις ακόλουθες λύσεις:

- η P1 υποδεικνύει ως λύση την κατανομή C0-C1-C2
- η P2 υποδεικνύει ως λύση την κατανομή C0-C2-C6

Το Σχήμα 4-49 συγκρίνει τα αποτελέσματα των τριών μεθόδων, της P1, της P2 και της προτεινόμενης, για μια δέσμη αντιπροσωπευτικών σεναρίων της 1^{ης} σειράς (πιθανότητα αποκλεισμού 1%). Τα σεναρία καλύπτουν καταστάσεις χαμηλού, μέσου αλλά και υψηλού φορτίου, καθώς, επίσης, και όλους τους τύπους χωρικών κατανομών που έχουν προαναφερθεί. Όπως γίνεται φανερό, η προτεινόμενη μέθοδος υπερτερεί συστηματικά των δύο άλλων, προσφέροντας ωφέλειες κατά 5%-10% μεγαλύτερες, που μπορούν, κατά περιπτώσεις, να είναι φτάσουν και σε πολύ υψηλότερα επίπεδα (π.χ., 46% στο Σενάριο 1{2000,20,20}N). Φαίνεται, λοιπόν, ξεκάθαρα ότι μια μέθοδος βασισμένη σε πολιτικές δεν μπορεί να λειτουργήσει το ίδιο καλά σε όλες τις καταστάσεις με τις οποίες θα βρεθεί αντιμέτωπη. Αντίθετα, η προτεινόμενη μέθοδος είναι σε θέση να προσαρμοστεί στις συνθήκες που διαμορφώνονται (παραδείγματος χάριν, διαφοροποίηση του αιτούμενου φορτίου, της χωρικής κατανομής των χρηστών, μέρους των δυνητικών επιδόσεων των διαρθρώσεων, κ.λπ.) και γι' αυτό το λόγο επιτυγχάνει υψηλότερη συνολική ωφέλεια και, επομένως, αποτελεσματικότερες επιδόσεις.



Σχήμα 4-49. Σύγκριση της προτεινόμενης μεθόδου («optimal») με τις βασισμένες σε πολιτικές μεθόδους («P1» και «P2»)

4.9 Παραπομπές

- [1] P. Samuelson, “The St. Petersburg Paradox as a Divergent Double Limit”, *International Economic Review*, vol. 1, no. 1, pp. 443-445, Jan 1960.
- [2] R. Aumann, “The St. Petersburg paradox: A discussion of some recent comments”, *Journal of Economic Theory*, vol. 14, no. 2, Apr 1977.
- [3] R. Padovani, “Reverse link performance of IS-95 based cellular systems”, *IEEE Personal Communications Magazine*, vol. 1, no. 3, pp. 28-34, 3rd Quarter of 1994.
- [4] J. Lee and L. Miller, *CDMA Systems Engineering Handbook*, Artech House, 1998.
- [5] A. M. Viterbi and A. J. Viterbi, “Erlang capacity of a power controlled CDMA system”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 11, no. 6, pp. 892-900, Aug. 1993.
- [6] Μ. Θεολόγου, *Δίκτυα Κινητών και Προσωπικών Επικοινωνιών*, Εκδ. Τζιόλα, 2008.

Κεφάλαιο 5

*Ευφυής ιεράρχηση των κριτηρίων
επίδοσης*

5 Ευφυής ιεράρχηση των κριτηρίων επίδοσης

5.1 Ανάγκη ευφυούς ιεράρχησης των κριτηρίων επίδοσης

Στην προσομοίωση των σεναρίων που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4, οι συντελεστές στάθμισης των επιμέρους χαρακτηριστικών μιας υποψήφιας διάρθρωσης κατανομών, όπως η κάλυψη, η χωρητικότητα χρηστών, η χωρητικότητα μετάδοσης κ.ά., επιλέχθηκαν a priori και παρέμειναν σταθερές καθ' όλη την εκτέλεση των σεναρίων. Η επιλογή των τιμών για τους προαναφερθέντες συντελεστές πραγματοποιείται από το διαχειριστή του γνωστικού δικτύου και οφείλει να αντανακλά τη βαρύτητα που αυτός δίνει, την εκάστοτε χρονική στιγμή, σε καθένα από τα χαρακτηριστικά επίδοσης μιας κατανομής διαρθρώσεων. Παραδείγματος χάριν, ενδέχεται, υπό ορισμένες συνθήκες, ο διαχειριστής να δίνει προτεραιότητα στη δυνατότητα κάλυψης μιας κατανομής, ενώ υπό διαφορετικές συνθήκες να επιθυμεί τη μεγιστοποίηση της χωρητικότητας μετάδοσης.

Συνεπώς, μέσω της πλατφόρμας διαχείρισης που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4, υπολογίζονται δύο διαφορετικού τύπου μεγέθη:

- *Οι επιμέρους ωφέλειες ως προς κάποιο χαρακτηριστικό επίδοσης μιας υποψήφιας κατανομής διαρθρώσεων.* Ο υπολογισμός των μεγεθών αυτών γίνεται κατά τρόπο «αντικειμενικό», καθώς όλες οι παράμετροι που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς, αφορούν είτε φυσικά μεγέθη, π.χ. θέση χρηστών, ακτίνα κάλυψης, είτε σαφώς ορισμένα μεγέθη, όπως ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων, προσφερόμενο φορτίο, κόστος αναδιάρθρωσης κτλ.
- *Η συνολική ωφέλεια μιας υποψήφιας κατανομής διαρθρώσεων.* Η τιμή αυτού του μεγέθους προκύπτει ως σταθμισμένο άθροισμα των επιμέρους ωφελειών και, επομένως, εξαρτάται άρρηκτα από τη βαρύτητα που ο διαχειριστής προσδίδει σε κάθε κριτήριο επίδοσης. Η δυνατότητα απόδοσης διαφορετικού συντελεστή βαρύτητας σε κάθε κριτήριο επιτρέπει στο διαχειριστή να ιεραρχεί τις προτεραιότητές του και να επιλέγει την κατανομή εκείνη η οποία, τη δεδομένη στιγμή και υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες, ικανοποιεί τις απαιτήσεις του.

Συνεπώς, κατά τη φάση αξιολόγησης του συνόλου των υποψήφιων κατανομών ο διαχειριστής υπολογίζει «αντικειμενικά» τις επιμέρους ωφέλειες και, εν συνεχεία, καλείται να ιεραρχήσει τη βαρύτητα των επιμέρους κριτηρίων επίδοσης.

Συχνά, όμως, η απόδοση τιμής στους συντελεστές βαρύτητας, κατά ευθύ τρόπο, π.χ. 20% στον παράγοντα κάλυψης, 15% στη χωρητικότητα χρηστών κτλ., αποδεικνύεται αρκετά δύσκολη και ενέχει τον κίνδυνο μη σαφούς αποτύπωσης της επιθυμητής συμπεριφοράς. Αυτό συμβαίνει, διότι, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, ο διαχειριστής ενεργεί με γνώμονα το αποτέλεσμα που επιθυμεί να έχει σε μια δεδομένη κατάσταση. Με άλλα λόγια, αποδεικνύεται πιο εύκολο για το διαχειριστή του δικτύου να ορίσει την επιθυμητή κατανομή υπό συγκεκριμένες συνθήκες παρά να επιχειρήσει να προσεγγίσει την κατανομή αυτή μέσω ιεράρχησης των κριτηρίων επίδοσης.

Κατά συνέπεια, η εφαρμογή ενός μοντέλου κατανόησης αυτής της εσωτερικής λογικής που διέπει τις προτιμήσεις και αποφάσεις του διαχειριστή θα προσέδιδε στο σύστημα τη δυνατότητα προσαρμογής κατά πιο ακριβή τρόπο, ενώ, παράλληλα, θα εξομάλωνε τις επιπτώσεις μιας λανθασμένης επιλογής συντελεστών κατά ευθύ τρόπο. Για το σκοπό αυτό, στο παρόν κεφάλαιο, προτείνεται η χρήση ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου, το οποίο αναλαμβάνοντας τη «μετάφραση» των κατευθυντήριων οδηγιών του διαχειριστή για την ιεράρχηση των κριτηρίων επίδοσης, θα αποφαινεται περί της τελικής βαθμολόγησης μιας υποψήφιας κατανομής διαρθρώσεων.

Στις παραγράφους που ακολουθούν, θα γίνει μια σύντομη περιγραφή της λειτουργίας των νευρωνικών δικτύων ως τεχνικής μηχανικής μάθησης. Στόχος αυτής της εισαγωγής είναι η παρουσίαση των βασικών χαρακτηριστικών και αρχών λειτουργίας των νευρωνικών δικτύων, η οποία θα διευκολύνει, εν τέλει, την κατανόηση του προτεινόμενου, για το συγκεκριμένο πρόβλημα, μοντέλου.

5.2 Νευρωνικά δίκτυα

5.2.1 Εισαγωγή

Τα νευρωνικά δίκτυα είναι προγνωστικά μοντέλα επεξεργασίας πληροφοριών μοντελοποιημένα ως δίκτυα σταθμισμένων, προσθετικών τιμών με μη γραμμικές συναρτήσεις μεταφοράς. Έμπνευση για την εμφάνιση και την ονομασία τους στάθηκε το βιολογικό νευρικό σύστημα, το οποίο αποτελείται από τρισεκατομμύρια ισχυρά διασυνδεδεμένων επεξεργαστικών μονάδων, τους νευρώνες. Η δομή αυτή, καθώς και η δυνατότητα μάθησης, υιοθετήθηκε από τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Networks – ANN). Όπως και στα βιολογικά συστήματα, η μάθηση στα νευρωνικά δίκτυα επιτυγχάνεται μέσω κατάλληλων τροποποιήσεων των συναπτικών συνδέσεων μεταξύ των νευρώνων. Παρά τις ομοιότητες, όμως, με τα βιολογικά νευρικά συστήματα, τα νευρωνικά δίκτυα απέχουν πολύ από το να χαρακτηριστούν «σκεπτόμενες μηχανές» ή «τεχνητοί εγκέφαλοι», καθώς συνήθως αποτελούνται από κάποιες δεκάδες νευρώνων.

5.2.2 Ιστορική εξέλιξη

Το αρχικό μοντέλο του «αισθητήρα» (perceptron) αναπτύχθηκε από τον Frank Rosenblatt το 1958 [1]. Το μοντέλο του Rosenblatt αποτελείτο από τρία στρώματα:

- έναν κόμβο που μετέδιδε τις εισόδους στο δεύτερο στρώμα
- τις «μονάδες σύνδεσης» που συνδυάζοντας τις εισόδους με σταθμισμένο τρόπο πυροδοτούσαν μια βηματική συνάρτηση κατωφλίου, η οποία τροφοδοτούσε το στρώμα εξόδου
- το στρώμα εξόδου που συνδύαζε τις τιμές

Δυστυχώς, η χρήση βηματικής συνάρτησης στους νευρώνες καθιστούσε την εκπαίδευση τους δύσκολη ή ακόμα και αδύνατη. Μια κριτική ανάλυση των perceptrons που δημοσιεύθηκε το 1969 από τους Marvin Minsky και Seymour Papert [2] επεσήμανε πλήθος σημαντικών αδυναμιών των perceptrons και για μια μακρά περίοδο το ενδιαφέρον για αυτά υποχώρησε.

Η επανεμφάνιση των νευρωνικών δικτύων στο προσκήνιο έγινε το 1986, όταν οι Rumelhart, Hinton και Williams δημοσίευσαν ένα άρθρο με τίτλο “Learning Internal Representations by Error Propagation” [3]. Στο άρθρο αυτό πρότειναν ένα

πολυστρωματικό νευρωνικό δίκτυο (Multilayer Neural Network – MNN) με μη γραμμικές αλλά παραγωγίσιμες συναρτήσεις μεταφοράς, αποφεύγοντας τις αδυναμίες των αρχικών βηματικών συναρτήσεων των perceptrons. Επιπλέον, πρότειναν ένα αρκετά αποτελεσματικό αλγόριθμο εκπαίδευσης των δικτύων αυτών.

Σήμερα τα νευρωνικά δίκτυα, σε πολλές εκδοχές τους, όπως είναι τα «Πιθανοτικά Νευρωνικά Δίκτυα» (Probabilistic Neural Networks – PNN), τα «Νευρωνικά Δίκτυα Γενικής Οπισθοδρόμησης» (General Regression Neural Network), τα δίκτυα Kohonen και άλλα, βρίσκουν πλήθος εφαρμογών σε τομείς όπως η πρόβλεψη πωλήσεων, η έρευνα πελατών, ο έλεγχος βιομηχανικών διαδικασιών, η επαλήθευση δεδομένων, η διαχείριση κινδύνου, η διάγνωση ασθενειών, η αναγνώριση λόγου, η αναγνώριση γραφής και πλήθος άλλων [4]-[6].

5.2.3 Δυνατότητα μάθησης νευρωνικών δικτύων

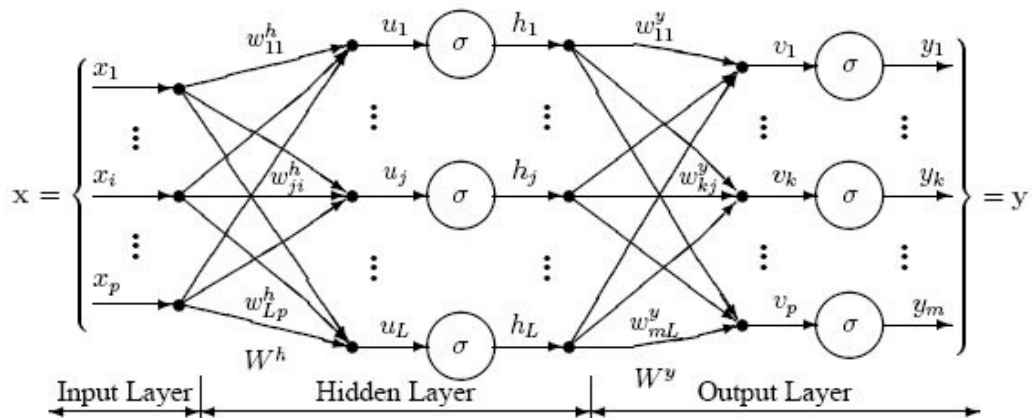
Τα νευρωνικά δίκτυα υλοποιούν τη μέθοδο της «επιτηρούμενης» μάθησης (supervised learning), μαθαίνουν δηλαδή μέσω ενός συνόλου κατάλληλα επιλεγμένων δεδομένων μάθησης με απώτερο στόχο να αποκτήσουν τη δυνατότητα να ανιχνεύουν πρότυπα και τάσεις μέσα από ένα πλήθος σύνθετων και πιθανών ανακριβών δεδομένων, που είναι δύσκολο να ανιχνευθούν από τον άνθρωπο ή από άλλες υπολογιστικές τεχνικές. Τα νευρωνικά δίκτυα, λοιπόν, δρουν ως «ειδικοί» στον τύπο των πληροφοριών που τους έχει δοθεί να αναλύσουν. Οι «ειδικοί» αυτοί μπορούν να προβλέπουν, εν συνεχεία, νέες καταστάσεις και να απαντούν σε ερωτήσεις τύπου «Τι θα γίνει εάν...». Άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα των τεχνητών νευρωνικών δικτύων είναι τα εξής:

- Προσαρμοσμένη μάθηση, δυνατότητα δηλαδή να μάθουν μέσω δεδομένων εκπαίδευσης ή αρχικής εμπειρίας
- Αυτό-οργάνωση, δυνατότητα δηλαδή προσαρμογής της οργάνωσής τους ή του τρόπου αναπαράστασης των πληροφοριών βάσει των δεδομένων εκπαίδευσης
- Λειτουργία σε πραγματικό χρόνο. Οι υπολογισμοί των νευρωνικών δικτύων μπορεί να λάβουν χώρα παράλληλα, κάνοντας χρήση του ειδικού υλικού που επιτρέπει αυτή τη δυνατότητα
- Ανοχή σφαλμάτων μέσω της δυνατότητας κωδικοποίησης πλεονάζουσας πληροφορίας. Μερική καταστροφή του δικτύου οδηγεί σε αντίστοιχη

επιδείνωση της επίδοσης του. Παρ' όλα αυτά, ακόμα και στην περίπτωση αυτή είναι δυνατή η ανάκτηση αρκετών δικτυακών ικανοτήτων.

5.2.4 Το μοντέλο πολυστρωματικού νευρωνικού δικτύου

Το Σχήμα 5-1 παρουσιάζει ένα τυπικό νευρωνικό δίκτυο τριών στρωμάτων.



Σχήμα 5-1. Τυπικό νευρωνικό δίκτυο τριών στρωμάτων

Στρώμα εισόδου: Το στρώμα αυτό λαμβάνει ως είσοδο ένα διάνυσμα τιμών των προγνωστικών μεταβλητών ($x_1 \dots x_p$). Εν συνεχεία, πραγματοποιείται κανονικοποίηση των τιμών αυτών και μεταβίβαση τους σε καθέναν από τους νευρώνες του κρυφού στρώματος. Επιπλέον των τιμών των προγνωστικών μεταβλητών, σε κάθε κόμβο του κρυφού στρώματος τροφοδοτείται μια σταθερή είσοδος ίση με 1.0, η οποία καλείται «πόλωση» (bias). Η πόλωση πολλαπλασιάζεται με ένα συντελεστή βαρύτητας και προστίθεται στο άθροισμα που εισάγεται στο νευρώνα.

Κρυφό στρώμα: Φτάνοντας σε έναν νευρώνα του κρυφού στρώματος, η τιμή από κάθε νευρώνα εισόδου πολλαπλασιάζεται με ένα συντελεστή βαρύτητας (w_{ji}) και οι προκύπτουσες σταθμισμένες τιμές προστίθενται μεταξύ τους παράγοντας μια συνδυασμένη τιμή u_j . Το σταθμισμένο αυτό άθροισμα εισάγεται, κατόπιν, σε μια συνάρτηση μεταφοράς σ , η οποία παράγει ως έξοδο μια τιμή h_j . Εν συνεχεία, οι έξοδοι του κρυφού στρώματος τροφοδοτούνται στο στρώμα εξόδου.

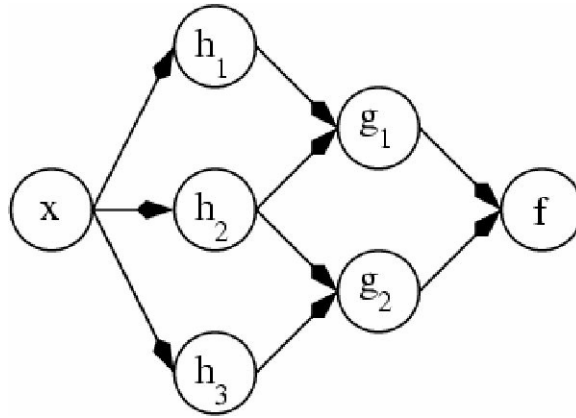
Στρώμα εξόδου: Φτάνοντας σε έναν νευρώνα του στρώματος εξόδου, η τιμή από κάθε νευρώνα του κρυφού στρώματος πολλαπλασιάζεται με έναν συντελεστή βαρύτητας (w_{kj}) και οι προκύπτουσες σταθμισμένες τιμές προστίθενται μεταξύ τους παράγοντας μια συνδυασμένη τιμή v_j . Το σταθμισμένο αυτό άθροισμα εισάγεται, κατόπιν, σε μια συνάρτηση μεταφοράς σ , η οποία παράγει ως έξοδο μια τιμή y_k . Οι τιμές y αποτελούν την έξοδο του νευρωνικού δικτύου.

Σε περίπτωση που πραγματοποιείται ανάλυση οπισθοδρόμησης με μια συνεχή μεταβλητή-στόχο, τότε το στρώμα εξόδου απαρτίζεται από ένα μεμονωμένο νευρώνα παράγοντας μια τιμή y . Σε προβλήματα ταξινόμησης με διακριτές μεταβλητές-στόχους, το στρώμα εξόδου αποτελείται από N νευρώνες, παράγοντας N τιμές, μια για κάθε μια από τις N κατηγορίες της μεταβλητής-στόχου.

5.2.5 Αρχιτεκτονική πολυστρωματικού νευρωνικού δικτύου

Το δίκτυο που απεικονίζεται στο Σχήμα 5-1 είναι ένα πλήρως συνδεδεμένο, ευθείας τροφοδότησης νευρωνικό δίκτυο τριών στρωμάτων. Ο όρος «πλήρως συνδεδεμένο» χρησιμοποιείται για να δηλώσει ότι η έξοδος από κάθε νευρώνα του στρώματος εισόδου και του κρυφού στρώματος διανέμεται σε όλους τους νευρώνες του επόμενου στρώματος. Ο χαρακτηρισμός «ευθείας τροφοδότησης» δηλώνει ότι η πορεία των τιμών πραγματοποιείται μόνο στην κατεύθυνση στρώμα εισόδου - κρυφό στρώμα- στρώμα εξόδου, δηλαδή δε γίνεται τροφοδότηση τιμών σε προγενέστερο στρώμα. Μια τέτοια τροφοδότηση επιτρέπεται, αντίθετα, στα Αναδρομικά Νευρωνικά Δίκτυα (Recurrent Neural Networks)

Όλα τα νευρωνικά δίκτυα έχουν ένα στρώμα εισόδου και ένα στρώμα εξόδου, αλλά ο αριθμός των κρυφών στρωμάτων μπορεί να ποικίλει. Στο Σχήμα 5-2 παρουσιάζεται ένα νευρωνικό δίκτυο με δύο κρυφά στρώματα δηλαδή, συνολικά, ένα δίκτυο τεσσάρων στρωμάτων.



Σχήμα 5-2. Παράδειγμα νευρωνικού δικτύου με δύο κρυφά στρώματα

Σε αυτήν την περίπτωση, η έξοδος από το πρώτο κρυφό στρώμα τροφοδοτείται στο επόμενο κρυφό στρώμα με διαφορετικούς συντελεστές βαρύτητας να εφαρμόζονται στο άθροισμα που εισάγεται σε κάθε στρώμα.

5.2.6 Εκπαίδευση πολυστρωματικών νευρωνικών δικτύων

Ο στόχος της διαδικασίας εκπαίδευσης είναι η εύρεση του συνόλου των συντελεστών βαρύτητας που θα διαμορφώσει την τιμή εξόδου με τέτοιο τρόπο ώστε να προσεγγίζει όσο το δυνατόν καλύτερα τις πραγματικές τιμές. Υπάρχουν πολλές παράμετροι οι οποίες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό και την εκπαίδευση ενός πολυστρωματικού δικτύου:

- η επιλογή του αριθμού κρυφών στρωμάτων του δικτύου
- η επιλογή του πλήθους νευρώνων κάθε κρυφού στρώματος
- η εύρεση μιας ολικά βέλτιστης λύσης που αποφεύγει τα τοπικά ελάχιστα
- η σύγκλιση σε μια βέλτιστη λύση σε ικανοποιητικό χρονικό διάστημα
- η επικύρωση του νευρωνικού δικτύου ώστε να αποφευχθεί το πρόβλημα της υπερβολικής προσαρμογής στα δεδομένα εκπαίδευσης

Στις παραγράφους που ακολουθούν, θα αναλυθεί με λεπτομέρεια καθεμία από τις προαναφερθείσες παραμέτρους.

Επιλογή του αριθμού κρυφών στρωμάτων του δικτύου

Για το σύνολο σχεδόν των προβλημάτων, ένα κρυφό στρώμα αποδεικνύεται επαρκές. Η ύπαρξη δύο κρυφών στρωμάτων απαιτείται για τη μοντελοποίηση

δεδομένων με ασυνέχειες, όπως είναι η πριονωτή κυματομορφή. Η χρήση δύο κρυφών στρωμάτων σπάνια βελτιώνει την απόδοση του μοντέλου, ενώ παράλληλα εισάγει μεγαλύτερο κίνδυνο σύγκλισης σε ένα ολικό ελάχιστο. Επιπλέον, δεν υπάρχει κάποιος θεωρητικός λόγος ή απόδειξη υπέρ της κατασκευής νευρωνικών δικτύων με παραπάνω των δύο στρωμάτων.

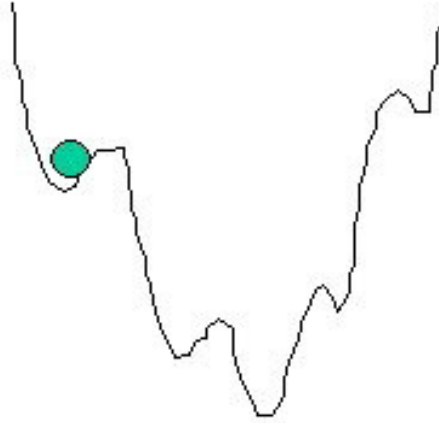
Επιλογή πλήθους νευρώνων στο κρυφό στρώμα

Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά ενός πολυστρωματικού δικτύου είναι το πλήθος των νευρώνων του κρυφού ή των κρυφών στρωμάτων. Σε περίπτωση που το εν λόγω πλήθος είναι ανεπαρκές, το νευρωνικό δίκτυο δε θα αποδειχθεί ικανό να μοντελοποιήσει σύνθετα δεδομένα και η προκύπτουσα εφαρμογή θα είναι μη ικανοποιητική. Στην αντίθετη περίπτωση, αν χρησιμοποιηθεί ένας μεγάλος αριθμός νευρώνων, ο χρόνος εκπαίδευσης θα καταστεί υπερβολικά μεγάλος ενώ θα ενισχυθεί η πιθανότητα υπερβολικής προσαρμογής στα δεδομένα εκπαίδευσης. Αν συμβεί αυτό το δίκτυο θα αρχίσει να μοντελοποιεί θόρυβο στα δεδομένα. Ως αποτέλεσμα, το μοντέλο θα προσαρμοστεί στα δεδομένα εκπαίδευσης πολύ καλά αλλά θα προβεί σε μη ικανοποιητικές γενικεύσεις σε νέα δεδομένα. Προκειμένου, να αποφευχθεί αυτός ο κίνδυνος θα πρέπει να εφαρμοστούν διαδικασίες επικύρωσης είτε με τη μέθοδο διασταυρωμένης επικύρωσης (cross validation) είτε κρατώντας κάποια από τα δεδομένα εκπαίδευσης για τους σκοπούς της επικύρωσης.

Εύρεση μιας ολικά βέλτιστης λύσης – Διαφορική εξέλιξη

Ένα τυπικό νευρωνικό δίκτυο μπορεί να κληθεί να προσεγγίσει την τιμή μερικών εκατοντάδων συντελεστών βαρύτητας προκειμένου να παραχθεί μια βέλτιστη λύση. Το γεγονός ότι η έξοδος του δικτύου συναρτήσκει των συντελεστών βαρύτητας είναι σε μεγάλο βαθμό μη γραμμική καθιστά την διαδικασία βελτιστοποίησης ακόμα πιο σύνθετη.

Η γραφική παράσταση του σφάλματος ως συνάρτηση των συντελεστών στάθμισης έχει μορφή σαν αυτή που απεικονίζεται στο Σχήμα 5-3 με πλήθος τοπικών ελαχίστων. Η μορφή αυτή είναι μάλιστα άκρως απλοποιημένη καθώς αναπαριστά ένα μεμονωμένο συντελεστή στάθμισης τη στιγμή που σε ένα τυπικό νευρωνικό δίκτυο το αντίστοιχο διάγραμμα είναι μια επιφάνεια περίπου 200 διαστάσεων με ακόμα περισσότερες τοπικές «κοιλιάδες».



Σχήμα 5-3. Γραφική παράσταση σφάλματος συναρτήσεως ενός συντελεστή στάθμισης

Αρκετές μέθοδοι βελτιστοποίησης, όπως αυτή της μέγιστης κλίσης ή της συζυγούς κλίσης (conjugate gradient) [7]-[9], είναι σε μεγάλο βαθμό ευάλωτες στην σύγκλιση σε τοπικά ελάχιστα, ειδικά σε περίπτωση που η έρευνα ξεκινήσει από κοιλάδα κοντά σε ένα τέτοιο ελάχιστο. Αυτό συμβαίνει διότι οι μέθοδοι αυτές αδυνατούν να αποκτήσουν μια ευρύτερη εικόνα της διαμορφωμένης κατάστασης και να συγκλίνουν σε ένα ολικό ελάχιστο.

Πολλές μέθοδοι έχουν προταθεί για την αντιμετώπιση της προαναφερθείσας αδυναμίας. Η πιο απλή από αυτές έγκειται στην δοκιμή ενός πλήθους σημείων εκκίνησης και στην επιλογή αυτού με την καλύτερη συμπεριφορά. Μια πιο περίτεχνη τεχνική προσπαθεί να παρουσιάσει βελτιωμένη συμπεριφορά σε αυτό το θέμα δοκιμάζοντας ευρέως διαχωρισμένες, τυχαίες τιμές με σταδιακή μείωση των τυχαίων αλμάτων ελπίζοντας ότι προσεγγίζει το ολικό ελάχιστο. Η τεχνική αυτή ονομάζεται «προσομοιωμένη απόπτωση» (simulated annealing) [10]-[11].

Η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα διατριβή προκειμένου να βρεθούν οι βέλτιστες τιμές εκκίνησης της αναζήτησης ονομάζεται «Διαφορική Εξέλιξη» (Differential Evolution) [12]-[13]. Πρόκειται για έναν γενετικό αλγόριθμο [14]-[16] που χρησιμοποιεί προσομοιωμένη εξέλιξη προκειμένου να καταλήξει σε βέλτιστους αρχικούς συντελεστές στάθμισης.

Η βασική ιδέα πίσω από τον αλγόριθμο της διαφορικής εξέλιξης, και άλλους γενετικούς αλγόριθμους, είναι η παραγωγή απογόνων από ένα γονικό πληθυσμό με χαρακτηριστικά κληρονομούμενα μεν από τους γονείς, αλλά συγχρόνως τροποποιημένα από τυχαίες μεταλλάξεις. Οι μεταλλάξεις αυτές ενδέχεται να έχουν θετική ή αρνητική επίδραση στον πληθυσμό των απογόνων. Μια διαδικασία,

παρόμοια με αυτή τη φυσικής επιλογής, καθιστά πιο πιθανή τη μεταβίβαση στην επόμενη γενιά των χαρακτηριστικών των πιο υγιών γονέων. Η προσέγγιση αυτή 'χει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε πολλές συνάρτηση με μη υγιή συμπεριφορά για τις οποίες δεν είναι δυνατή η βελτιστοποίηση μέσω παραδοσιακών μεθόδων σύγκλισης.

Η διαδικασία ξεκινά με τη δημιουργία ενός αρχικού πληθυσμού. Αρχικά επιλέγονται τυχαίες τιμές για τους συντελεστές στάθμισης καθώς δεν υπάρχει προηγούμενη γνώση για το σύνολο των βέλτιστων τιμών. Αν η επιλογή για «υπερπληθυσμό» είναι επιτρεπτή, δημιουργείται ένα μεγάλο αρχικό σύνολο τιμών και επιλέγεται το βέλτιστο υποσύνολο αυτού ως αρχικός πληθυσμός. Στο επόμενο βήμα, δημιουργούνται ζεύγη συνόλων συντελεστών, επιλέγοντας ορισμένες τιμές από κάθε γονέα. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται τυχαία μετάλλαξη στους συντελεστές στάθμισης του παραγόμενου απογόνου. Κάθε σύνολο απόγονος εκτιμάται προκειμένου να διαπιστωθεί ο βαθμός στον οποίο βελτιστοποιεί τη συνάρτηση. Οι απόγονοι με τα καλύτερα βάρη, ως προς το προαναφερθέν κριτήριο, έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να επιλεγούν για αναπαραγωγή στην επόμενη γενιά. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου βρεθεί ένα σύνολο συντελεστών που ελαχιστοποιεί ικανοποιητικά το σφάλμα ή όταν έχει παραχθεί ένας αριθμός γενεών χωρίς βελτίωση ή όταν ένας συγκεκριμένος αριθμός γενεών έχουν εξελιχθεί.

Δοθέντες ικανοποιητικού χρονικού διαστήματος και αρκετών παραγόμενων γενιών, η διαφορική εξέλιξη δύναται να καταλήξει στο τελικό, βέλτιστο σύνολο συντελεστών που ελαχιστοποιούν το σφάλμα. Παρόλα αυτά, η εξελικτική διαδικασία δεν κάνει χρήση πληροφοριών σχετικών με τη μορφή της επιφάνειας σφάλματος προκειμένου να κατευθύνει την πρόοδο της, και ενδέχεται να απαιτήσει ένα εξαιρετικά μεγάλο διάστημα προοδευτικά μικρότερων μεταλλάξεων προκειμένου να καταλήξει τελικά σε μια βέλτιστη λύση. Εξαιτίας αυτού, η διαφορική εξέλιξη χρησιμοποιείται μόνο για την εύρεση προσεγγιστικών τιμών στην περιοχή του ολικού ελάχιστου. Οι προσεγγιστικές αυτές τιμές, εν συνεχεία χρησιμοποιούνται ως τιμές εκκίνησης από ταχύτερους αλγόριθμους σύγκλισης.

Σύγκλιση στη βέλτιστη λύση – Συζυγής κλίση

Μόλις ο αλγόριθμος της διαφορικής εξέλιξης καταλήξει κατά προσεγγιστικό τρόπο σε βέλτιστες τιμές των συντελεστών στάθμισης στην περιοχή του ολικού ελάχιστου, μια ταχύτερη μέθοδος χρησιμοποιείται για να επεξεργαστεί περισσότερο τις τιμές αυτές.

Οι περισσότεροι αλγόριθμοι εκπαίδευσης, προκειμένου να προσεγγίσουν τις τιμές των συντελεστών με μεγαλύτερη ακρίβεια ακολουθούν τον ακόλουθο κύκλο βημάτων:

1. Τροφοδοτείται το νευρωνικό δίκτυο με τις τιμές πρόγνωσης για ένα παράδειγμα χρησιμοποιώντας ένα υποψήφιο σύνολο συντελεστών.
2. Υπολογίζεται η διαφορά μεταξύ της προβλεπόμενης τιμής-στόχου και της πραγματικής τιμής-στόχου για αυτό το παράδειγμα. Η διαφορά αυτή αποτελεί το σφάλμα της πρόβλεψης.
3. Υπολογίζεται η μέση τιμή του σφάλματος επί ολόκληρου του συνόλου των παραδειγμάτων εκπαίδευσης.
4. Το σφάλμα αυτό διαδίδεται προς τα πίσω, μέσω του νευρωνικού δικτύου, και υπολογίζεται η κλίση (διάνυσμα παραγώγων) της μεταβολής του σφάλματος, αναφορικά με τις μεταβολές των συντελεστών βαρύτητας.
5. Οι συντελεστές τροποποιούνται προκειμένου να επιτευχθεί μείωση του σφάλματος

Τα παραπάνω βήματα συνθέτουν ένα κύκλο, ο οποίος ενδέχεται να επαναληφθεί μερικές δεκάδες ή εκατοντάδες φορές πριν το σύστημα συγκλίνει ικανοποιητικά σε ένα σύνολο συντελεστών.

Η μέθοδος εκπαίδευσης που περιγράφηκε παραπάνω καλείται μέθοδος «οπισθοδιάδοσης» (backpropagation) καθώς η πληροφορία σφάλματος διαδίδεται προς τα πίσω στο νευρωνικό δίκτυο. Ο αλγόριθμος Backpropagation περιγράφηκε για πρώτη φορά από τους Rumelhart και McClelland το 1986 [3] και αποτέλεσε την πρώτη πρακτική μέθοδο εκπαίδευσης νευρωνικών δικτύων. Η αρχική μέθοδος έκανε χρήση του αλγορίθμου «κατάβασης κλίσης» (gradient descent) για την προσαρμογή των συντελεστών προς τη σύγκλιση. Για ιστορικούς, λοιπόν, λόγους ο όρος «οπισθοδιάδοσης» χρησιμοποιείται, συχνά, για να χαρακτηρίσει έναν αλγόριθμο εκπαίδευσης νευρωνικού δικτύου που χρησιμοποιεί ως πυρήνα τον αλγόριθμο κατάβασης κλίσης. Η παραπάνω σύμβαση όμως είναι αρκετά ατυχής καθώς η οπισθοδιάδοση σφάλματος στο νευρωνικό δίκτυο χρησιμοποιείται από όλους σχεδόν τους αλγορίθμους εκπαίδευσης, κάποιιοι από τους οποίους είναι πολύ καλύτεροι από τον αλγόριθμο κατάβασης κλίσης.

Ο αλγόριθμος οπισθοδιάδοσης κατάβασης κλίσης συγκλίνει, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, είτε πολύ αργά είτε καθόλου. Σε προβλήματα μεγάλης κλίμακας, η επιτυχία του εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις παραμέτρους του «ρυθμού

μάθησης» και της «ορμής» [17]-[18]. Οι παράμετροι αυτοί ορίζονται από το χρήστη και λανθασμένη επιλογή τους μπορεί να οδηγήσει σε εξαιρετικά αργή ή ακόμα και ανέφικτη σύγκλιση. Συνεπώς, αν και εξακολουθεί να χρησιμοποιείται σε πολλά προγράμματα νευρωνικών δικτύων, ο αλγόριθμος κατάβασης κλίσης έχει πάψει να θεωρείται η καλύτερη ή ταχύτερη λύση.

Στην παρούσα υλοποίηση η προσαρμογή των συντελεστών στάθμισης χρησιμοποιώντας την κλίση μέσω της οπισθοδιάδοσης του σφάλματος πραγματοποιείται με εφαρμογή του αλγορίθμου συζυγούς κλίσης. Συγκρινόμενος με τον αλγόριθμο κατάβασης κλίσης, ο αλγόριθμος συζυγούς κλίσης πραγματοποιεί μια περισσότερο ευθεία πορεία προς το βέλτιστο σύνολο των συντελεστών στάθμισης και αποδεικνύεται, συχνά, σημαντικά ταχύτερος και περισσότερο εύρωστος. Επιπλέον, ο αλγόριθμος συζυγούς κλίσης δεν απαιτεί από το χρήστη τον ορισμό των παραμέτρων ορμής και ρυθμού μάθησης.

Ο παραδοσιακός αλγόριθμος κατάβασης κλίσης χρησιμοποιεί την κλίση για να υπολογίσει μια κατεύθυνση έρευνας. Στη συνέχεια, κάνει χρήση κάποιου αλγορίθμου γραμμικής αναζήτησης, όπως παραδείγματος χάριν τη μέθοδο Brent [19], για να καταλήξει στο βέλτιστο μέγεθος βήματος κατά μήκος μιας γραμμής στην κατεύθυνση έρευνας. Η γραμμική αναζήτηση αποφεύγει την ανάγκη υπολογισμού της Hessian μήτρας των δευτέρων παραγώγων [20], αλλά απαιτεί τον υπολογισμό του σφάλματος σε πολλαπλά σημεία κατά μήκος της γραμμής. Ο αλγόριθμος συζυγούς κλίσης με γραμμική αναζήτηση χρησιμοποιείται με επιτυχία σε μεγάλος πλήθος προγραμμάτων νευρωνικών δικτύων και θεωρείται μια από τις πιο αποδοτικές μεθόδους που έχουν προταθεί.

Στην παρούσα υλοποίηση χρησιμοποιείται μια νεότερη εκδοχή του αλγορίθμου συζυγούς κλίσης, ο αλγόριθμος κλιμακοθετημένης συζυγούς κλίσης (scaled conjugate algorithm) [21]-[22]. Ο αλγόριθμος κλιμακοθετημένης συζυγούς κλίσης χρησιμοποιεί μια αριθμητική προσέγγιση των δευτέρων παραγώγων (Hessian matrix), αλλά αποφεύγει την αστάθεια συνδυάζοντας την προσέγγιση του αλγορίθμου Levenberg-Marquardt [23]-[24] περί περιοχής εμπιστοσύνης με την προσέγγιση του αλγορίθμου συζυγούς κλίσης. Αυτό επιτρέπει στον αλγόριθμο κλιμακοθετημένης συζυγούς κλίσης να υπολογίσει το βέλτιστο μέγεθος βήματος στην κατεύθυνση αναζήτησης χωρίς να απαιτείται η υπολογιστικά ακριβή γραμμική αναζήτηση του αλγορίθμου συζυγούς κλίσης. Φυσικά, και σε αυτήν την περίπτωση υπεισέρχεται ένα κόστος που δεν είναι άλλο από το κόστος υπολογισμού των δευτέρων παραγώγων.

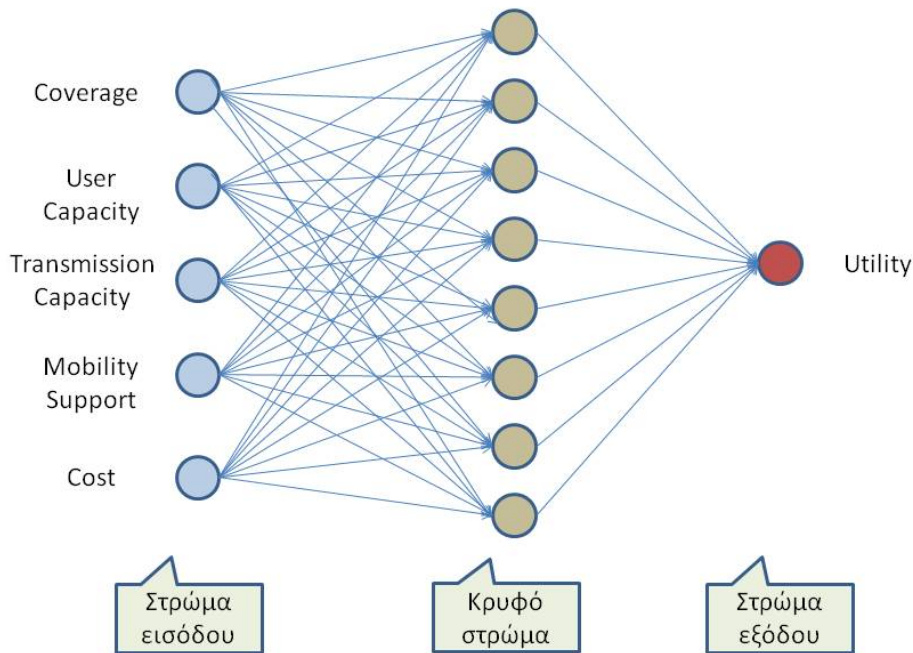
Δοκιμές που διεξήχθησαν από το Moller [22] έδειξαν ότι ο αλγόριθμος κλιμακοθετημένης συζυγούς κλίσης συγκλίνει δύο φορές πιο γρήγορα από τον παραδοσιακό αλγόριθμο συζυγούς κλίσης και μέχρι είκοσι φορές πιο γρήγορα από τον αλγόριθμο κατάβασης κλίσης. Οι ίδιες δοκιμές έδειξαν, επίσης, ότι ο αλγόριθμος κλιμακοθετημένης συζυγούς κλίσης αποτύγχανε να συγκλίνει σε πολύ μικρότερο αριθμό περιπτώσεων από αυτόν τον δύο άλλων αλγορίθμων.

5.3 Προτεινόμενο μοντέλου νευρωνικού δικτύου

5.3.1 Κατασκευή και εκπαίδευση νευρωνικού δικτύου

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, σκοπός του μοντέλου νευρωνικού δικτύου είναι η σύλληψη της λογικής που διέπει την επιθυμία του διαχειριστή, ως προς την ιεράρχηση των κριτηρίων επίδοσης μιας υποψήφιας κατανομής διαρθρώσεων.

Για το σκοπό αυτό, ως είσοδοι του προτεινόμενου μοντέλου νευρωνικού δικτύου θεωρούνται οι επιμέρους ωφέλειες για καθένα από τα κριτήρια επίδοσης, και συγκεκριμένα ο επιμέρους βαθμός ωφέλειας ως προς την κάλυψη, την χωρητικότητα χρηστών, την χωρητικότητα μετάδοσης, την υποστήριξη κινητικότητας και το κόστος αναδιάρθρωσης. Έξοδος του νευρωνικού δικτύου θεωρείται ο συνολικός βαθμός ωφέλειας, δηλαδή το άθροισμα των επιμέρους ωφελειών, σταθμισμένων με συντελεστές βαρύτητας που προκύπτουν μέσω του νευρωνικού δικτύου. Το Σχήμα 5-4 απεικονίζει το προτεινόμενο μοντέλου νευρωνικού δικτύου για το πρόβλημα της ευφυούς ιεράρχησης των κριτηρίων επίδοσης.



Σχήμα 5-4. Προτεινόμενο μοντέλο νευρωνικού δικτύου

Πρόκειται για ένα πλήρως συνδεδεμένο, ευθείας τροφοδότησης νευρωνικό δίκτυο, με ένα κρυφό στρώμα, πέντε νευρώνες εισόδου και έναν νευρώνα εξόδου. Το πλήθος των νευρώνων του κρυφού στρώματος, επιλέγεται έτσι ώστε να βελτιστοποιεί την προσαρμογή στα δεδομένα εισόδου.

Τα νευρωνικά δίκτυα, όπως αναφέρθηκε, ανήκουν στις μεθόδους επιτηρούμενης μηχανικής μάθησης, καθώς η κατασκευή και ουσιαστικά, η εκπαίδευση τους απαιτούν την χρήση παραδειγμάτων εκπαίδευσης, δηλαδή κατάλληλα επιλεγμένων στιγμιότυπων του προβλήματος, που καθοδηγούν το δίκτυο προς τη σωστή κατεύθυνση χειρισμού των δεδομένων εισόδου. Ο Πίνακας 5-1 περιέχει τα παραδείγματα εκπαίδευσης που χρησιμοποιήθηκαν στην περίπτωση του συγκεκριμένου μοντέλου.

Πίνακας 5-1. Σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης νευρωνικού δικτύου

Coverage	User Capacity	Transmission Capacity	Mobility Support	Cost	Utility
2,884	2,987	3	2,933	0,75	2,958
0,078	3	2,481	1	2,5	1,604
1,024	2,88	0,665	1,667	2,25	1,751
1,023	2,376	0,165	1,667	2,25	1,416
1,006	2,982	1,289	1,6	2,75	1,945
2,83	1,999	0,961	2,867	2	1,999
1,913	1,698	0,124	2,267	1,75	1,393
2,917	2,754	2,025	2,933	1	2,611
2,3	2,998	3	2,2	2,5	2,745
1,081	3	3	1	2,5	1,875
2,312	2,879	1,625	2,267	2	2,344
2,917	1,656	0,127	2,933	1	1,667
2,863	2,987	1,819	2,933	1	2,639
1,006	2,982	3	1,6	2,75	2,401
1,92	2,59	0,118	2,267	2	1,749
1,919	2,98	1,924	2,267	1,75	2,386
2,841	1,783	3	2,867	1,75	2,458
0,97	2,998	0,53	1,6	3	1,741
0,08	3	0,214	1	2,5	1,121
2,88	1,133	0,968	2,933	0,75	1,675
1,939	2,071	1,115	2,267	2,5	1,81
1,757	2,98	3	1,667	2	2,56
2,332	1,717	3	2,333	1,5	2,259
2,251	2,535	2,721	2,333	1,25	2,496
1,636	2,183	2,999	1,667	2,25	2,217
1,63	2,97	2,699	1,6	3	2,44
2,917	1,429	0,127	2,933	1	1,577
0,983	3	2,741	1,6	2,75	2,334
1,025	2,183	2,765	1,667	2	2,033
1,92	2,826	0,5	2,267	2,25	1,944
0,978	2,713	0,545	1,6	3	1,633
1,926	2,98	0,124	2,267	1,75	1,908
1,964	2,961	0,159	2,333	1,5	1,926
1,947	2,41	1,198	2,267	2,5	1,969
2,836	2,805	3	2,867	2	2,865

1,003	3	3	1,6	2,5	2,407
1,96	1,245	0,385	2,333	1,25	1,301
0,079	3	0,211	1	2,5	1,12
1,905	1,716	0,117	2,267	2	1,396
1,074	3	3	1	2,5	1,873
2,912	2,359	3	2,867	2	2,702
2,351	2,026	3	2,267	2,5	2,376
1,052	3	3	1	2,5	1,87
2,309	2,026	1,588	2,267	2,25	1,992
1,929	2,805	2,401	2,267	2	2,444
0,08	3	2,794	1	2,5	1,671
1,925	2,739	0,641	2,267	2	1,949
0,982	2,508	0,663	1,6	3	1,584
2,892	0,489	1,006	2,933	0,75	1,43
1,01	2,713	1,405	1,6	2,5	1,869

Τα παραδείγματα αυτά, και συγκεκριμένα ο τελικός βαθμός ωφέλειας, αντικατοπτρίζουν την επιθυμία ενός τυπικού διαχειριστή, ο οποίος

- θεωρεί ως πιο σημαντικό κριτήριο επίδοσης τη χωρητικότητα επίδοσης
- θεωρεί ως λιγότερο σημαντικό κριτήριο επίδοσης το κόστος αναδιάρθρωσης
- έχει μια σαφή αντίληψη των στόχων που πρέπει να εκπληρώνει το σύστημα απόφασης σε συγκεκριμένα στιγμιότυπα
- έχει, μόνο, μια γενική και αφηρημένη αίσθηση για το σύνολο των υπολοίπων πιθανών στιγμιότυπων εισόδου

Ο Πίνακας 5-2 αναφέρει τις παραμέτρους κατασκευής του μοντέλου νευρωνικού δικτύου, ενώ ο Πίνακας 5-3 παρουσιάζει χρήσιμα στατιστικά στοιχεία για το μοντέλο που προέκυψε βάσει του άνωθεν συνόλου εκπαίδευσης.

Πίνακας 5-2. Παράμετροι κατασκευής μοντέλου νευρωνικού δικτύου

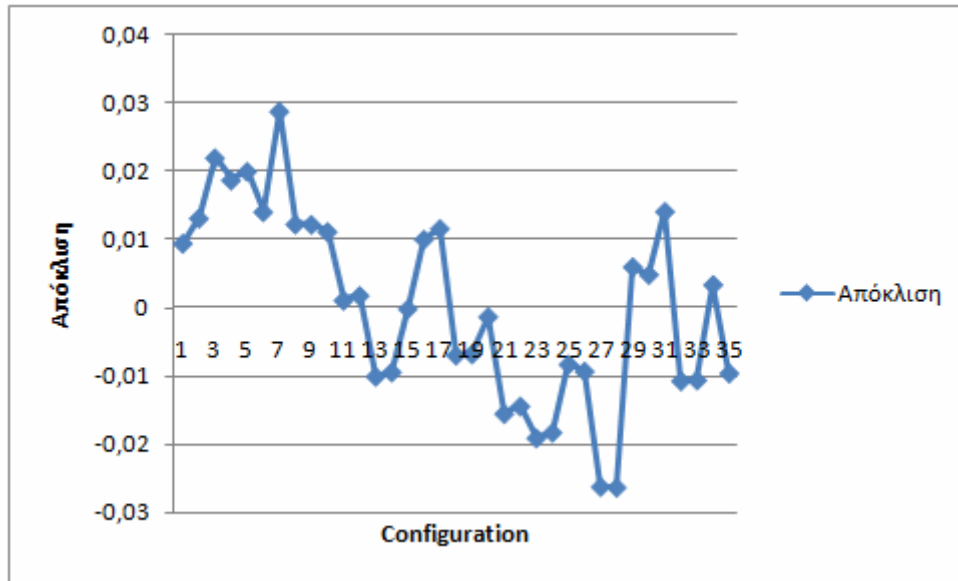
Τύπος μοντέλου	Πολυστρωματικό νευρωνικό δίκτυο
Αριθμός στρωμάτων	3
Αριθμός κρυφών στρωμάτων	1
Αριθμός μεταβλητών πρόγνωσης	5
Αναζήτηση βέλτιστου αριθμού νευρώνων κρυφού στρώματος στο διάστημα	[0, 20]
Συνάρτηση ενεργοποίησης νευρώνων κρυφού στρώματος	Σιγμοειδής
Συνάρτηση ενεργοποίησης νευρώνων στρώματος εξόδου	Σιγμοειδής
Τύπος ανάλυσης	Ταξινόμηση
Μέθοδος επικύρωσης	Διασταυρωμένη επικύρωση (cross validation)
Αριθμός αναδιπλώσεων διασταυρωμένης επικύρωσης	10
Μέθοδος εκπαίδευσης	Κλιμακοθετημένη συζυγής κλίσης
Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων κατά την εκπαίδευση	10000
Ανόχη σύγκλισης	10^{-3}
Ελάχιστη βελτίωση στην προσέγγιση	10^{-6}
Ελάχιστη τιμή κλίσης	10^{-6}
Επιλεχθέν πλήθος νευρώνων κρυφού στρώματος	8

Πίνακας 5-3. Στατιστικά στοιχεία της διαδικασίας κατασκευής και επικύρωσης του νευρωνικού δικτύου

	Δεδομένα εκπαίδευσης	Δεδομένα επικύρωσης
Μέση τιμή μεταβλητής στόχου στα δεδομένα εισόδου	2.00866	2.00866
Μέση τιμή προβλεπόμενης τιμής στόχου	2.0083915	2.0070378
Μεταβλητότητα δεδομένων εισόδου	0.2066927	0.2066927
Εναπομείνουσα μεταβλητότητα μετά την εφαρμογή του μοντέλου	0.0002037	0.0014362
Ποσοστό μεταβλητότητας εξηγούμενης από το μοντέλο	99.901%	99.305%
Συντελεστής μεταβολής	0.007105	0.018867
Κανονικοποιημένο μέσο τετραγωνικό σφάλμα	0.000985	0.006948
Συσχέτιση μεταξύ πραγματικής και προβλεπόμενης τιμής	0.999517	0.996573
Μέγιστο σφάλμα	0.0449133	0.1354319
Μέσο τετραγωνικό σφάλμα	0.0002037	0.0014362
Μέσο απόλυτο σφάλμα	0.0104727	0.0245788
Μέσο σφάλμα απόλυτου ποσοστού	0.5208704	1.222499

5.3.2 Ενδεικτικά αποτελέσματα εξόδου νευρωνικού δικτύου

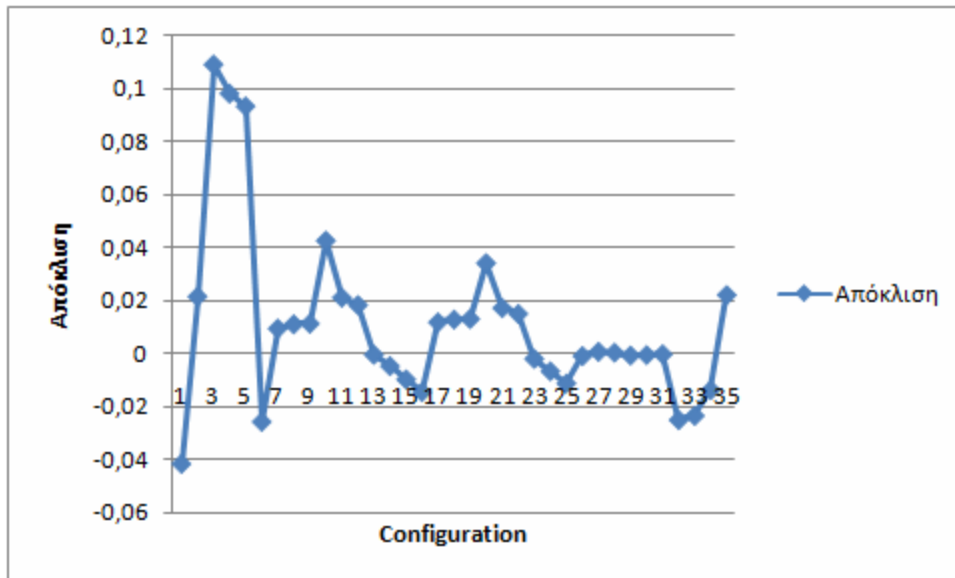
Στο τμήμα που ακολουθεί, θα παρουσιαστεί ενδεικτικά η έξοδος του μοντέλου νευρωνικού δικτύου για τρεις συνδυασμούς εισόδου. Κάθε συνδυασμός εισόδου χαρακτηρίζεται από την πιθανότητα αποκλεισμού, το φορτίο δεδομένων σε Kbps και Erlang, το φορτίο φωνής καθώς και τη χωρική κατανομή των χρηστών. Σε κάθε περίπτωση, θα εξεταστεί η απόκλιση ωφέλειας μεταξύ του μοντέλου σταθερών συντελεστών που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4 και του μοντέλου νευρωνικού δικτύου για κάθε υποψήφια κατανομή διαρθρώσεων και θα υποδειχθεί η επικρατέστερη από αυτές, σύμφωνα με τις εξόδους κάθε μοντέλου.



Σχήμα 5-5. Απόκλιση ωφέλειας μεταξύ μοντέλου σταθερών συντελεστών και μοντέλου νευρωνικού δικτύου για την περίπτωση όπου blocking probability=2%, data demand=1000 Kbps, voice demand=10 Erlang, data demand=10 Erlang, χωρική κατανομή χρηστών: συγκέντρωση στα άκρα

Πίνακας 5-4. Στατιστικά στοιχεία για την απόκλιση ωφέλειας μεταξύ μοντέλου σταθερών συντελεστών και μοντέλου νευρωνικού δικτύου για την περίπτωση όπου blocking probability=2%, data demand=1000 Kbps, voice demand=10 Erlang, data demand=10 Erlang, χωρική κατανομή χρηστών: συγκέντρωση στα άκρα

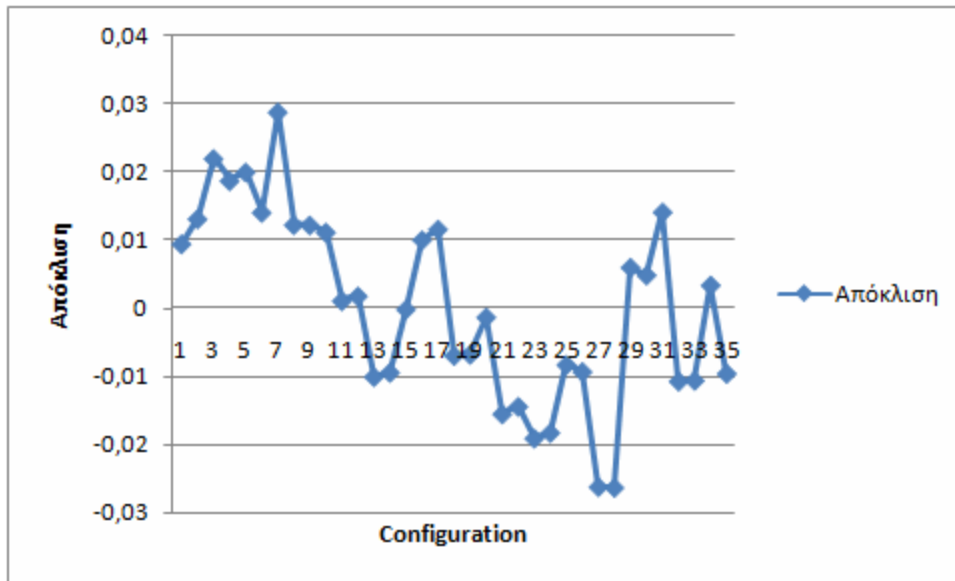
Μέση απόκλιση μεταξύ μοντέλου σταθερών συντελεστών και μοντέλου νευρωνικού δικτύου	0,0078793
Μέση απόλυτη απόκλιση μεταξύ μοντέλου σταθερών συντελεστών και μοντέλου νευρωνικού δικτύου	0,0089256
Μέση τετραγωνική απόκλιση μεταξύ μοντέλου σταθερών συντελεστών και μοντέλου νευρωνικού δικτύου	0,0003739
Επικρατέστερη διάρθρωση σύμφωνα με το μοντέλο σταθερών συντελεστών	C0-C2-C3
Επικρατέστερη διάρθρωση σύμφωνα με το μοντέλο νευρωνικού δικτύου	C0-C2-C3



Σχήμα 5-6. Απόκλιση ωφέλειας μεταξύ μοντέλου σταθερών συντελεστών και μοντέλου νευρωνικού δικτύου για την περίπτωση όπου blocking probability=1%, data demand=500 Kbps, voice demand=5 Erlang, data demand=20 Erlang, χωρική κατανομή χρηστών: ομοιόμορφη

Πίνακας 5-5. Στατιστικά στοιχεία για την απόκλιση ωφέλειας μεταξύ μοντέλου σταθερών συντελεστών και μοντέλου νευρωνικού δικτύου για την περίπτωση όπου blocking probability=1%, data demand=500 Kbps, voice demand=5 Erlang, data demand=20 Erlang, χωρική κατανομή χρηστών: ομοιόμορφη

Μέση απόκλιση μεταξύ μοντέλου σταθερών συντελεστών και μοντέλου νευρωνικού δικτύου	0,010906
Μέση απόλυτη απόκλιση μεταξύ μοντέλου σταθερών συντελεστών και μοντέλου νευρωνικού δικτύου	0,0212477
Μέση τετραγωνική απόκλιση μεταξύ μοντέλου σταθερών συντελεστών και μοντέλου νευρωνικού δικτύου	0,0011562
Επικρατέστερη διάρθρωση σύμφωνα με το μοντέλο σταθερών συντελεστών	C2-C3-C4
Επικρατέστερη διάρθρωση σύμφωνα με το μοντέλο νευρωνικού δικτύου	C0-C2-C3



Σχήμα 5-7. Απόκλιση οφέλειας μεταξύ μοντέλου σταθερών συντελεστών και μοντέλου νευρωνικού δικτύου για την περίπτωση όπου blocking probability=0.1%, data demand=2000 Kbps, voice demand=10 Erlang, data demand=10 Erlang, χωρική κατανομή χρηστών: συγκέντρωση στα άκρα

Πίνακας 5-6. Στατιστικά στοιχεία για την απόκλιση οφέλειας μεταξύ μοντέλου σταθερών συντελεστών και μοντέλου νευρωνικού δικτύου για την περίπτωση όπου blocking probability=0.1%, data demand=2000 Kbps, voice demand=10 Erlang, data demand=10 Erlang, χωρική κατανομή χρηστών: συγκέντρωση στα άκρα

Μέση απόκλιση μεταξύ μοντέλου σταθερών συντελεστών και μοντέλου νευρωνικού δικτύου	0,0002951
Μέση απόλυτη απόκλιση μεταξύ μοντέλου σταθερών συντελεστών και μοντέλου νευρωνικού δικτύου	0,0119654
Μέση τετραγωνική απόκλιση μεταξύ μοντέλου σταθερών συντελεστών και μοντέλου νευρωνικού δικτύου	0,00019374
Επικρατέστερη διάρθρωση σύμφωνα με το μοντέλο σταθερών συντελεστών	C0-C2-C3
Επικρατέστερη διάρθρωση σύμφωνα με το μοντέλο νευρωνικού δικτύου	C2-C3-C6

Όπως παρατηρείται, το νευρωνικό δίκτυο κατατάσσει στιγμιότυπα, συνδυασμούς δηλαδή, δεδομένων εισόδου που εξετάζονται για πρώτη φορά κατά τρόπο που ικανοποιεί τις γενικές επιθυμίες του διαχειριστή που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Σε δύο, μάλιστα, εκ των τριών περιπτώσεων, το μοντέλο υποδεικνύει διαφορετικές κατανομές ως επικρατέστερες, με μικρή παρ' όλα αυτά απόκλιση από το μοντέλο σταθερών συντελεστών.

5.4 Παραπομπές

- [1] F. Rosenblatt, “The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain”, *Psychological Review*, vol. 65, no. 6, pp. 386-408, Cornell Aeronautical Laboratory, Nov. 1958.
- [2] M. Minsky and S. Papert, *Perceptrons*, Cambridge, MIT Press, 1969.
- [3] D. Rumelhart, G. Hinton, and R. Williams, “Learning internal representations by error propagation”, *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*, vol. 1: Foundations, in Computational Models Of Cognition And Perception Series, Cambridge, MIT Press, pp. 318-362, 1986.
- [4] 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.
- [5] Y. Yan, M. Fanty, and R. Cole, “Speech Recognition Using Neural Networks with Forward-backward Probability Generated Targets”, *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 4, 1997.
- [6] 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.
- [7] A. Mordecai, *Nonlinear Programming: Analysis and Methods*, Dover Publishing, 2003.
- [8] J. Snyman, *Practical Mathematical Optimization: An Introduction to Basic Optimization Theory and Classical and New Gradient-Based Algorithms*, Springer Publishing, 2005.
- [9] M. Hestenes, E. Stiefel, “Methods of Conjugate Gradients for Solving Linear Systems”, *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, vol. 49, no. 6, pp. 409-436, Dec. 1952.
- [10] K. Atkinson, *An introduction to numerical analysis*, John Wiley and Sons, 1988.
- [11] S. Kirkpatrick, C. Gelatt, and M. Vecchi, “Optimization by Simulated Annealing”, *Science*, vol. 220, no. 4598, pp. 671-680, May 1983.
- [12] K. Price, R. Storn, and J. Lampinen, *A Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization*, Springer Publishing, 2005.

- [13] V. Feoktistov, *Differential Evolution: In Search of Solutions*, Springer Publishing, 2006.
- [14] D. T. Pham and D. Karaboga, *Intelligent optimisation techniques: genetic algorithms, simulated annealing and neural networks*, Springer, 2000.
- [15] D. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Kluwer Academic Publishers, 1989.
- [16] M. Mitchell, *An Introduction to Genetic Algorithms*, Cambridge, MIT Press, 1996.
- [17] E. Alpaydin, *Introduction to Machine Learning*, MIT Press, 2004.
- [18] T. Mitchell, *Machine Learning*, McGraw Hill, 1997.
- [19] R. Brent, *Algorithms for Minimization without Derivatives*, Prentice-Hall, 1973.
- [20] H. Neudecker and J. Magnus, *Matrix differential calculus with applications in statistics and econometrics*, New York, John Wiley & Sons, 1988.
- [21] N. Andrei, “Scaled conjugate gradient algorithms for unconstrained optimization”, *Computational Optimization and Applications*, vol. 38, no. 3, pp. 401-416, Dec. 2007.
- [22] M. Moller, “A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning”, *Neural Networks*, vol. 6, pp. 525-533, Nov. 1993.
- [23] K. Levenberg, “A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares”, *The Quarterly of Applied Mathematics*, vol. 2, pp. 164–168, 1944.
- [24] D. Marquardt, “An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters”, *SIAM Journal on Applied Mathematics*, vol. 11, no. 2, pp. 431-441, Jun. 1963.

Κεφάλαιο 6

*Ανακεφαλαίωση – Μελλοντικές
επεκτάσεις*

6 Ανακεφαλαίωση – Μελλοντικές επεκτάσεις

6.1 Ανακεφαλαίωση

Τα γνωστικά δίκτυα συνιστούν μία νέα πρόταση για την εξέλιξη των συστημάτων ασύρματων επικοινωνιών, από ετερογενή σύνολα διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης σε ενοποιημένα, αυτόνομα συστήματα επικοινωνιών με επίγνωση περιβάλλοντος, ικανά να αντιλαμβάνονται, να προσαρμόζονται, να δρουν, να αντιδρούν και να μαθαίνουν. Η βασική αρχή λειτουργίας τους κινείται σε δύο άξονες: την αυτόνομη διαχείριση και την ευκαιριακή χρήση συχνοτήτων που μένουν αχρησιμοποίητες στο χώρο και στο χρόνο.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, χρησιμοποιείται ένα μοντέλο λειτουργίας των γνωστικών δικτύων, το οποίο αποτελείται από τρεις θεμελιώδεις λειτουργικές διαδικασίες:

- **Λειτουργία επαίσθησης:** Στα πλαίσια της λειτουργίας αυτής, το γνωστικό σύστημα παρακολουθεί τις συνθήκες που διαμορφώνονται στο ραδιοπεριβάλλον του, όπως ακριβώς ένας βιολογικός οργανισμός παρατηρεί και «διαισθάνεται» το δικό του περιβάλλον. Έτσι, καθίσταται δυνατή η προσαρμογή του συστήματος στις παρατηρούμενες μεταβολές.
- **Λειτουργία συλλογιστικής:** Σκοπός της εν λόγω λειτουργίας είναι η επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων που συλλέγονται μέσω της διαδικασίας της επαίσθησης, προκειμένου να προσδιοριστούν οι προσδοκώμενες επιδόσεις των υποψήφιων διαρθρώσεων, σε περίπτωση εφαρμογής τους. Παραδείγματα τέτοιων επιδόσεων είναι η αναμενόμενη χωρητικότητα μετάδοσης και η αναμενόμενη ακτίνα κάλυψης. Ένα πραγματικά γνωστικό σύστημα οφείλει να αξιοποιεί όχι μόνο τις τρέχουσες μετρήσεις αλλά και την πρότερη εμπειρία του, για τον αξιόπιστο προσδιορισμό των εν λόγω προσδοκώμενων επιδόσεων.
- **Λειτουργία λήψης απόφασης:** Ο απώτερος σκοπός ενός γνωστικού συστήματος είναι η επιλογή της καταλληλότερης διάρθρωσης για τη βέλτιστη ικανοποίηση των χρηστών του. Οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη σε μια τέτοια διαδικασία βελτιστοποίησης είναι τα δευτερογενή δεδομένα της

συλλογιστικής λειτουργίας, η διάταξη των τερματικών, ο βαθμός κινητικότητάς τους και το φορτίο κίνησής τους, το κόστος αναδιάρθρωσης, καθώς και οι προδιαγεγραμμένοι κανόνες και πολιτικές.

Η παρούσα διατριβή ασχολήθηκε με το πρώτο και το τρίτο στρώμα του γνωστικού μοντέλου αναφοράς, δηλαδή με τις λειτουργίες της επαίσθησης και της λήψης απόφασης. Σκοπός της ήταν να παραδώσει πρωτότυπες μεθόδους και αλγορίθμους και στους δύο αυτούς τομείς, καλύπτοντας τα κενά της σημερινής επιστημονικής βιβλιογραφίας.

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής, περιγράφηκαν οι στόχοι και οι βασικές αρχές λειτουργίας των γνωστικών συστημάτων επικοινωνιών, προσδιορίστηκαν οι αδυναμίες και ελλείψεις των σχετικών ερευνητικών εργασιών και καθορίστηκε το αντικείμενο της διατριβής και οι καινοτομίες που αυτή εισάγει. Αντικείμενο του δεύτερου κεφαλαίου αποτέλεσε η εκτίμηση και αξιολόγηση της κλιμακωσιμότητας της λειτουργίας της επαίσθησης σε γνωστικά συστήματα επικοινωνιών. Στο πλαίσιο αυτό, διεξήχθη μια εκτενής μελέτη, η οποία κάλυψε διάφορους τύπους ασύρματων διεπαφών μεταξύ των τερματικών-αισθητήρων και του γνωστικού σταθμού βάσης. Κεντρικός στόχος ήταν η αποκάλυψη των παραμέτρων που επιδρούν στις δυνατότητες κλιμάκωσης, καθώς και του τρόπου και του βαθμού με τον οποίο αυτό επιτελείται.

Στο τρίτο κεφάλαιο, η διατριβή προχώρησε ένα βήμα παραπέρα, προτείνοντας συγκεκριμένους ευφυείς αλγορίθμους χρονοπρογραμματισμού της διαδικασίας της επαίσθησης, οι οποίοι επεδίωξαν την εύρεση της χρυσής τομής ανάμεσα στη συνολική καθυστέρηση συλλογής των πρωτογενών δεδομένων και στην προκαλούμενη επιβάρυνση των ραδιοπόρων. Οι αλγόριθμοι αυτοί βρίσκουν εφαρμογή σε συστήματα πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης κώδικα ή διαίρεσης χρόνου. Το κεφάλαιο παρείχε, για κάθε προτεινόμενο αλγόριθμο, την αναλυτική μοντελοποίηση του προβλήματος, τη μαθηματική περιγραφή της λύσης, καθώς και αποτελέσματα εφαρμογής.

Το τέταρτο κεφάλαιο ασχολήθηκε με το στρώμα λήψης απόφασης και επικεντρώθηκε στο πρόβλημα της εύρεσης της βέλτιστης επιλογής διαρθρώσεων, για τους γνωστικούς σταθμούς βάσης. Το κεφάλαιο παρουσίασε τη θεμελίωση και περιγραφή του προβλήματος, όπως και την εκτενή μαθηματική διατύπωση της προτεινόμενης λύσης. Η μέθοδος που προτάθηκε λαμβάνει υπόψη της μια πλειάδα

παραμέτρων εισόδου, συμπεριλαμβανομένων των δυνατοτήτων των διαφόρων υποψήφιων διαρθρώσεων, του αιτούμενου φορτίου κίνησης, της χωρικής κατανομής των χρηστών και του κόστους αναδιάρθρωσης, και παράγει ως έξοδο την ωφέλεια που προσφέρει κάθε πιθανός συνδυασμός διαρθρώσεων. Η αξιολόγηση των υποψήφιων διαρθρώσεων γίνεται επί τη βάση πολλαπλών κριτηρίων, συμπεριλαμβανομένων των δυνατικών επιδόσεων ως προς το ποσοστό κάλυψης, τη χωρητικότητα χρηστών, τη χωρητικότητα μετάδοσης, την υποστήριξη κινητικότητας και το κόστος. Σε αυτό το πλαίσιο, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε μια πλατφόρμα διαχείρισης γνωστικών δικτύων, η οποία προσφέρει ένα πλήρες και φιλικό προς το χρήστη περιβάλλον καθορισμού των παραμέτρων και εκτέλεσης του αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Με τη βοήθεια του συγκεκριμένου εργαλείου, εξήχθησαν και μελετήθηκαν εκτενή αποτελέσματα, τα οποία, εν συνεχεία, και συγκρίθηκαν με αντιπροσωπευτικές μεθόδους προκαθορισμένων πολιτικών διαχείρισης. Το πέμπτο κεφάλαιο αποτέλεσε συμπλήρωμα και επέκταση του προηγούμενου, καθώς εισήγαγε και ενσωμάτωσε μια νέα λειτουργία ευφυούς ιεράρχησης των κριτηρίων επίδοσης. Σκοπός υπήρξε η εφαρμογή ενός μοντέλου ανίχνευσης και μάθησης των προτεραιοτήτων που πρέπει να δοθούν σε ορισμένα από τα κριτήρια επίδοσης των διαρθρώσεων έναντι άλλων. Η συγκεκριμένη λειτουργία υλοποιήθηκε μέσω ενός νευρωνικού δικτύου το οποίο κατασκευάστηκε για το σκοπό αυτό.

Συνοψίζοντας, η παρούσα διατριβή συνεισφέρει στη λειτουργική διαδικασία της επαίσθησης και της λήψης απόφασης των γνωστικών δικτύων.

Συγκεκριμένα, στο στάδιο της επαίσθησης, η παρούσα διατριβή

- Υιοθέτησε την ιδέα της αξιοποίησης των κινητών τερματικών ως κατανεμημένων αισθητήρων λήψης μετρήσεων επαίσθησης, με το γνωστικό σταθμό βάσης να λειτουργεί ως σημείο συγκέντρωσης και επεξεργασίας των επαισθητικών δεδομένων.
- Προσδιόρισε και οριοθέτησε το πρόβλημα της κλιμακωσιμότητας της λειτουργίας της επαίσθησης, ειδικά ως προς τη διαδικασία συγκέντρωσης των επαισθητικών μετρήσεων στο γνωστικό σταθμό βάσης.
- Προχώρησε στην ενδελεχή μελέτη της δυνατότητας κλιμάκωσης της διαδικασίας της επαίσθησης, για διάφορους τύπους ραδιοδιεπαφών μεταξύ

τερματικών και σταθμού βάσης και εξέτασε την επίδραση μιας σειράς διαφορετικών παραμέτρων.

- Πρότεινε καινοτόμους αλγόριθμους χρονοπρογραμματισμού της διαδικασίας ενημέρωσης του σταθμού βάσης, εφαρμόσιμους στις περιπτώσεις που συμμετέχουν σε αυτήν πολλαπλά τερματικά, με απώτερο στόχο την επίτευξη ενός ικανοποιητικού συμβιβασμού μεταξύ του βαθμού χρησιμοποίησης των διαθέσιμων ραδιοπόρων και της ταχύτητας συλλογής των επαισθητικών δεδομένων.

Όσον αφορά το στάδιο της λήψης απόφασης, η παρούσα διατριβή

- Πρότεινε έναν ευφυή αλγόριθμο βέλτιστης επιλογής διαρθρώσεων για τους γνωστικούς σταθμούς βάσης, ο οποίος συνυπολογίζει το είδος και τις δυνατότητες των υποψήφιων διαρθρώσεων, το αιτούμενο φορτίο κίνησης, τη χωρική διάταξη των τερματικών, το κόστος αναδιάρθρωσης και άλλες παραμέτρους, επιτυγχάνοντας μια πολύπλευρη αξιολόγηση των υποψήφιων διαρθρώσεων σε τομείς όπως το ποσοστό κάλυψης, η χωρητικότητα χρηστών, η χωρητικότητα μετάδοσης, η υποστήριξη κινητικότητας και το κόστος.
- Επέκτεινε τον προτεινόμενο αλγόριθμο βελτιστοποίησης ενσωματώνοντας μια λειτουργία ευφυούς ιεράρχησης των κριτηρίων επίδοσης, η οποία υλοποιήθηκε με τη χρήση νευρωνικών δικτύων.
- Προχώρησε στην εξαγωγή, το σχολιασμό και την αξιολόγηση αποτελεσμάτων εκτέλεσης του προτεινόμενου αλγορίθμου. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, υλοποιήθηκε μια πλατφόρμα διαχείρισης της επιλογής βέλτιστων διαρθρώσεων, ενώ, επίσης, έγινε σύγκριση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων με εκείνα που προκύπτουν από την εφαρμογή προκαθορισμένων πολιτικών διαχείρισης.

6.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Η παρούσα διατριβή επιχείρησε να συμπληρώσει κάποια από τα βασικότερα κενά της υπάρχουσας επιστημονικής βιβλιογραφίας στο πεδίο των γνωστικών δικτύων επικοινωνιών, το οποίο μόλις πρόσφατα έχει αρχίσει να συγκεντρώνει με ραγδαίους ρυθμούς τα βλέμματα της παγκόσμιας επιστημονικής κοινότητας. Η παρούσα διατριβή πρότεινε καινοτόμες λύσεις για τις λειτουργικές διαδικασίες της επαίσθησης

και της λήψης απόφασης των γνωστικών δικτύων. Η συνέχιση της παρούσας διατριβής μπορεί να εστιαστεί στα ακόλουθα σημεία:

- Στην υποστήριξη επιπρόσθετων τεχνολογιών πρόσβασης από την πλατφόρμα διαχείρισης, όπως, επί παραδείγματι, της τεχνολογίας ψηφιακής εκπομπής βίντεο (Digital Video Broadcasting - DVB).
- Στην εκτίμηση πρόσθετων κριτηρίων επίδοσης, για την ιεράρχηση των υποψήφιων κατανομών διαρθρώσεων, οι οποίες ανήκουν σε ένα ευρύτερο πλαίσιο επίγνωσης περιβάλλοντος, όπως είναι οι προτιμήσεις των χρηστών και οι δυνατότητες των τερματικών συσκευών τους, το χρονικό πλαίσιο χρήσης (ημέρα και ώρα της ημέρας) κ.ά.
- Στην εφαρμογή της θεωρίας παιγνίων, για την αναζήτηση των στρατηγικών ισορροπίας μεταξύ πολλαπλών αυτόνομων, ανταγωνιστικών μεταξύ τους, γνωστικών σταθμών βάσης.
- Στον καθορισμό πρωτοκόλλων συνεννόησης και συνδιαλλαγής μεταξύ γειτονικών γνωστικών σταθμών βάσης. Η ύπαρξη των πρωτοκόλλων αυτών θα έχει ως στόχο την ομαλή συνύπαρξη και την επίλυση διαφορών των σταθμών σε ένα ομορτουριστικό και ανταγωνιστικό ραδιοπεριβάλλον.

6.3 Δημοσιεύσεις

6.3.1 Δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά

- [1] 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.
- [2] 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*.
- [3] 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)

- [4] 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.
- [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, vol. 32, no. 1, Jan. 2009.
- [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.

Αρκτικόλεξα

Αρκτικόλεξο	Απόδοση στην Αγγλική	Απόδοση στην Ελληνική
ABC	Always Best Connected	Συνεχώς Βέλτιστα Συνδεδεμένος
ADC	Analogue to Digital Converters	Μετατροπείς Ψηφιακού Σήματος σε Αναλογικό
ANN	Artificial Neural Network	Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο
B3G	Beyond the Third Generation	Πέραν της 3ης Γενιάς
BPS	Birthday Paradox Scheduler	Χρονοπρογραμματιστής Βασισμένος στο "Παράδοξο των Γενεθλίων"
CBDS	Chained Binomial Distribution Scheduler	Χρονοπρογραμματιστής Αλυσιδωτών Διωνυμικών Κατανομών
CDMA	Code Division Multiple Access	Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Κώδικα
CS	Coding Scheme	Σχήμα Κωδικοποίησης
DAC	Digital to Analogue Converters	Μετατροπείς Αναλογικού Σήματος σε Ψηφιακό
DSP	Digital Signal Processors	Επεξεργαστές Ψηφιακού Σήματος
DVB	Digital Video Broadcasting	Ψηφιακή Μετάδοση Video
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution	Ενισχυμένοι Ρυθμοί Δεδομένων για την Εξέλιξη του GSM
FCC	Federal Communication Commision	Ομοσπονδιακή Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών
FPGA	Field Programmable Gate Arrays	Μήτρες Προγραμματιζόμενων Πυλών Πεδίου
FTP	File Transfer Protocol	Πρωτόκολλο Μεταφοράς Αρχείων
GERAN	GSM EDGE Radio Access Network	Δίκτυο Ραδιοπρόσβασης τύπου GSM EDGE
GPP	General Purpose Processors	Επεξεργαστές Γενικής Χρήσης
GPRS	General Packet Radio Service	Γενική Ασύρματη Υπηρεσία Πακέτου
GSM	Global System for Mobile Communications	Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών
GTS	Game Theoretic Scheduler	Χρονοπρογραμματιστής Βασισμένος στη Θεωρία Παιγνίων
HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access	Υψηλής Ταχύτητας Πρόσβαση Πακέτου στη Ζεύξη Καθόδου
IT	Interference Temperature	Θερμοκρασία Παρεμβολών
J2SE	Java 2 Standard Edition	Έκδοση της Γλώσσας Java
MIMO	Multiple Input - Multiple Output	Σύστημα Πολλαπλών Εισόδων

		- Πολλαπλών Εξόδων
MNN	Multilayer Neural Network	Πολυστρωματικό Νευρωνικό Δίκτυο
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing	Ορθογωνική Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access	Ορθογωνική Πολλαπλή Πρόσβασης Διαίρεσης Συχνότητας
OSI	Open Systems Interconnection	Διασύνδεση Ανοιχτών Συστημάτων
PDCH	Packet Data Channel	Δίαυλος Πακέτων Δεδομένων
PNN	Probabilistic Neural Network	Πιθανοτικό Νευρωνικό Δίκτυο
RAT	Radio Access Technology	Τεχνολογία Ραδιοπρόσβασης
RMP	Reconfiguration Management Plane	Επίπεδο Διαχείρισης Αναδιαρθρώσεων
SDCCH	Stand-alone Dedicated Control Channel	Ανεξάρτητος Αποκλειστικός Δίαυλος Ελέγχου
SDR	Software Defined Radio	Λογισμικώς Καθορισμένα Συστήματα Ασύρματων Επικοινωνιών
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio	Λόγος Σήματος προς Παρεμβολή και Θόρυβο
SMS	Short Message Service	Υπηρεσία Σύντομων Μηνυμάτων
SNR	Signal-to-Noise Ratio	Λόγος Σήματος προς Θόρυβο
TCP	Transmission Control Protocol	Πρωτόκολλο Ελέγχου Μετάδοσης
TDMA	Time Division Multiple Access	Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Χρόνου
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System	Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Τηλεπικοινωνιών
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network	Επίγειο Δίκτυο Ραδιοπρόσβασης τύπου UMTS
Wi-fi	Wireless Fidelity	Ασύρματη Πιστότητα
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
Αρτικόλεξο	Απόδοση στην Αγγλική	Απόδοση στην Ελληνική
ABC	Always Best Connected	Συνεχώς Βέλτιστα Συνδεδεμένος
ADC	Analogue to Digital Converters	Μετατροπείς Ψηφιακού Σήματος σε Αναλογικό
ANN	Artificial Neural Network	Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο
B3G	Beyond the Third Generation	Πέραν της 3ης Γενιάς
BPS	Birthday Paradox Scheduler	Χρονοπρογραμματιστής Βασισμένος στο "Παράδοξο των Γενεθλίων"

CBDS	Chained Binomial Distribution Scheduler	Χρονοπρογραμματιστής Αλυσιδωτών Διωνυμικών Κατανομών
CDMA	Code Division Multiple Access	Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Κώδικα
CS	Coding Scheme	Σχήμα Κωδικοποίησης
DAC	Digital to Analogue Converters	Μετατροπείς Αναλογικού Σήματος σε Ψηφιακό
DSP	Digital Signal Processors	Επεξεργαστές Ψηφιακού Σήματος
DVB	Digital Video Broadcasting	Ψηφιακή Μετάδοση Video
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution	Ενισχυμένοι Ρυθμοί Δεδομένων για την Εξέλιξη του GSM
FCC	Federal Communication Commission	Ομοσπονδιακή Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών
FPGA	Field Programmable Gate Arrays	Μήτρες Προγραμματιζόμενων Πυλών Πεδίου
FTP	File Transfer Protocol	Πρωτόκολλο Μεταφοράς Αρχείων
GERAN	GSM EDGE Radio Access Network	Δίκτυο Ραδιοπρόσβασης τύπου GSM EDGE
GPP	General Purpose Processors	Επεξεργαστές Γενικής Χρήσης
GPRS	General Packet Radio Service	Γενική Ασύρματη Υπηρεσία Πακέτου
GSM	Global System for Mobile Communications	Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών
GTS	Game Theoretic Scheduler	Χρονοπρογραμματιστής Βασισμένος στη Θεωρία Παιγνίων
HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access	Υψηλής Ταχύτητας Πρόσβαση Πακέτου στη Ζεύξη Καθόδου
IT	Interference Temperature	Θερμοκρασία Παρεμβολών
J2SE	Java 2 Standard Edition	Έκδοση της Γλώσσας Java
MIMO	Multiple Input - Multiple Output	Σύστημα Πολλαπλών Εισόδων - Πολλαπλών Εξόδων
MNN	Multilayer Neural Network	Πολυστρωματικό Νευρωνικό Δίκτυο
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing	Ορθογωνική Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access	Ορθογωνική Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Συχνότητας
OSI	Open Systems Interconnection	Διασύνδεση Ανοιχτών Συστημάτων
PDCH	Packet Data Channel	Δίαυλος Πακέτων Δεδομένων
PNN	Probabilistic Neural Network	Πιθανοτικό Νευρωνικό Δίκτυο
RAT	Radio Access Technology	Τεχνολογία Ραδιοπρόσβασης
RMP	Reconfiguration Management Plane	Επίπεδο Διαχείρισης Αναδιαρθρώσεων

SDCCH	Stand-alone Dedicated Control Channel	Ανεξάρτητος Αποκλειστικός Δίαυλος Ελέγχου
SDR	Software Defined Radio	Λογισμικώς Καθορισμένα Συστήματα Ασύρματων Επικοινωνιών
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio	Λόγος Σήματος προς Παρεμβολή και Θόρυβο
SMS	Short Message Service	Υπηρεσία Σύντομων Μηνυμάτων
SNR	Signal-to-Noise Ratio	Λόγος Σήματος προς Θόρυβο
TCP	Transmission Control Protocol	Πρωτόκολλο Ελέγχου Μετάδοσης
TDMA	Time Division Multiple Access	Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Χρόνου
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System	Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Τηλεπικοινωνιών
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network	Επίγειο Δίκτυο Ραδιοπρόσβασης τύπου UMTS
Wi-fi	Wireless Fidelity	Ασύρματη Πιστότητα
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