



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΙΝΗΤΩΝ ΤΕΡΜΑΤΙΚΩΝ
ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΠΕΡΑΝ ΤΗΣ 3^{ΗΣ} ΓΕΝΙΑΣ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Αρτέμιδος Αναστασίου-Αριστεΐδη Κουτσορόδη

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

Αθήνα, Ιούνιος 2006



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

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Αρτέμιδος Α. Κουτσορόδη

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΙΝΗΤΩΝ ΤΕΡΜΑΤΙΚΩΝ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΠΕΡΑΝ ΤΗΣ 3^{ΗΣ} ΓΕΝΙΑΣ

Συμβουλευτική Επιτροπή:

Μ. Θεολόγου, Καθηγητής ΕΜΠ

Ε. Συκάς, Καθηγητής ΕΜΠ

Γ. Στασινόπουλος, Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την επταμελή Εξεταστική Επιτροπή την 22^η Ιουνίου 2006,

.....
Μ. Θεολόγου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ε. Συκάς
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Γ. Στασινόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Μ. Αναγνώστου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Φ. Κωνσταντίνου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ν. Μήτρου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Π. Δεμέστιχας
Επικ. Καθηγητής Παν. Πειραιώς

.....
Άρτεμις Α. Κουτσορόδη
Διδάκτωρ Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

Copyright © Άρτεμις Α. Κουτσορόδη, 2006.
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Στο περιβάλλον των ετερογενών συστημάτων επικοινωνιών τέταρτης γενιάς προκύπτουν νέες απαιτήσεις για τη διαχείριση των κινητών τερματικών: Αυτά θα πρέπει να ενσωματώνουν μηχανισμούς για τη διαχείριση της διαδικασίας επιλογής πρόσβασης, καθώς και για την ανίχνευση και την αξιοποίηση πληροφορίας που σχετίζεται με το εκάστοτε πλαίσιο χρήσης (usage context), με τελικό στόχο την κατάλληλη διαμόρφωση των υπηρεσιών που λαμβάνονται στο τερματικό.

Η εκπλήρωση αυτών των απαιτήσεων εισάγει την ανάγκη περιγραφής ενός νέου Συστήματος Διαχείρισης Κινητού Τερματικού, ικανού να ανιχνεύει τη διαθεσιμότητα σημείων πρόσβασης στην περιοχή του τερματικού, να λαμβάνει τη βέλτιστη απόφαση σχετικά με την ανάθεση των τρεχουσών και των ζητούμενων υπηρεσιών σε δικτυακές διεπαφές και σε επίπεδα ποιότητας, και να επιτρέπει το δυναμικό επανακαθορισμό των προτιμήσεων του χρήστη ανάλογα με την υπηρεσία και το πλαίσιο χρήσης. Σε αυτό το πλαίσιο, η συνεισφορά της παρούσας διατριβής έγκειται στη γενική περιγραφή μιας αρχιτεκτονικής για ένα τέτοιο σύστημα διαχείρισης και στην ανάπτυξη ειδικών μηχανισμών που αποτελούν λειτουργικές συνιστώσες αυτού του συστήματος.

Ειδικότερα, η μελέτη εστιάζεται στα εξής δύο προβλήματα: Πρώτον, στο πολυ-παραμετρικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, το οποίο αφορά τον προσδιορισμό του καταλληλότερου δικτύου πρόσβασης και επιπέδου ποιότητας για κάθε υπηρεσία που λαμβάνεται στο κινητό τερματικό. Το πρόβλημα αυτό λαμβάνει σαν είσοδο τις παραμέτρους που αφορούν τη διαθεσιμότητα των σημείων πρόσβασης στην περιοχή του τερματικού, τις προτιμήσεις του χρήστη και τις απαιτήσεις των υπό εξέταση υπηρεσιών, και αντιμετωπίζεται με τον ορισμό μιας συνάρτησης χρησιμότητας, η οποία μεγιστοποιείται με τη βοήθεια ενός άπληστου αλγορίθμου αναζήτησης. Δεύτερον, στο πρόβλημα μοντελοποίησης, αναπαράστασης και μάθησης των αιτιωδών σχέσεων και των βαθμών συσχέτισης που χαρακτηρίζουν τις προτιμήσεις του χρήστη. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με την κατασκευή ενός δικτυακού πιθανοτικού μοντέλου, αποτελούμενου από ένα μπεϋζιανό δίκτυο δύο επιπέδων. Στόχος είναι η προσαρμογή και η μάθηση μιας τοπολογίας άγνωστων, αρχικά, παραμέτρων και δομής, με χρήση ενός συνόλου παραδειγμάτων εκπαίδευσης, το

οποίο παρέχει ο χρήστης στο σύστημα, επιχειρώντας έτσι εξόρυξη γνώσης σχετικά με τις προτιμήσεις του χρήστη σε οποιοδήποτε πλαίσιο χρήσης, δεδομένων των προτιμήσεών του σε κάποια *στιγμιότυπα* πλαισίου χρήσης. Η λύση που προτείνεται κάνει χρήση ενός κατάλληλου κριτηρίου για την αξιολόγηση των δυνατών δικτυακών δομών και ενός άπληστου αλγορίθμου αναζήτησης νέων δομών που χαρακτηρίζονται από υψηλή αποτίμηση με βάση αυτό το κριτήριο.

Λέξεις κλειδιά: επιλογή πρόσβασης, διαμόρφωση υπηρεσιών, επίγωση περιβάλλοντος, πέραν της 3^{ης} γενιάς, μοντελοποίηση προτιμήσεων, πιθανολογικά μοντέλα, μπεϋζιανά δίκτυα, μάθηση παραμέτρων, μάθηση δομής, εξόρυξη γνώσης, επιλογή μοντέλου

Abstract

New requirements emerge for mobile terminal management in the context of heterogeneous, fourth generation communication systems: terminals should incorporate mechanisms for managing the access network selection process, and for detecting and exploiting contextual information, for the purpose of appropriately configuring the services running on the mobile terminal.

The fulfillment of these requirements introduces the need for defining a new Mobile Terminal Management System, capable of detecting the availability of access points in the terminal's neighbourhood, of making the optimal decision regarding the allocation of both running and requested services to network interfaces and quality levels, and of allowing the dynamic determination of the user's preferences according to the usage context and the service under consideration. In this context, the contribution of the present thesis lies in the generic description of such a management system and in the development of specific mechanisms that constitute functional components of this system.

More specifically, the study focuses on the following two problems: First, on the multi-variable optimisation problem which involves the determination of the most suitable access network and quality level for each service running on the mobile terminal. This problem receives as input the parameters that involve the availability of access points in the terminal's neighbourhood, the user's preferences and the requirements of the services under consideration, and is handled by defining a utility function that is maximised using a greedy search algorithm. Second, on the problem of modelling, representing and learning the causal relationships and the degrees of dependence that characterize the user's preferences. This problem is handled by constructing a network-based probabilistic model, comprising a two-level Bayesian network. The goal is the adaptation and the learning of a topology of, initially, unknown parameters and structure, using a training set that the user provides to the system, thus attempting to extract knowledge concerning the user's preferences in *any* context, given his preferences in some *instances* of context. The proposed solution makes use of an appropriate criterion for evaluating possible network structures and

of a greedy search algorithm for finding new structures that receive high scores by this criterion.

Keywords: access selection, service configuration, context-awareness, beyond 3G, preference modelling, probabilistic models, Bayesian networks, parameter learning, structure learning, knowledge extraction, model selection

Πρόλογος

Η διατριβή είναι προϊόν της σχεδόν τετραετούς ερευνητικής μου εργασίας στο εργαστήριο τηλεπικοινωνιών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, και εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Θεολόγου. Τον ευχαριστώ για την καθοδήγηση, τις συμβουλές και την πολύπλευρη υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της παρουσίας μου στο εργαστήριο, και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε.

Σημαντική ήταν επίσης η βοήθεια που έλαβα κατά τη διάρκεια της ερευνητικής μου εργασίας από τους καθηγητές κ. Συκά και κ. Στασινόπουλο, οι οποίοι μαζί με τον κ. Θεολόγου συγκροτούν την τριμελή συμβουλευτική επιτροπή για τη διατριβή αυτή. Χρωστώ ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη στον καθηγητή κ. Αναγνώστου, για τις πολύτιμες συμβουλές του, για το χρόνο, την ενέργεια και τις σκέψεις που αφιέρωσε στις τόσο ενδιαφέρουσες συζητήσεις μας. Ευχαριστώ θερμά τον κ. Παναγιώτη Δεμέστιχα, επίκουρο καθηγητή του Πανεπιστημίου Πειραιώς, για την ανεκτίμητη βοήθειά του σε όλα τα βήματα εκπόνησης της διατριβής, για την προθυμία με την οποία ήταν πάντα έτοιμος να με συμβουλευσει και να υποστηρίξει τη δουλειά μου. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Κωνσταντίνου και τον κ. Μήτρου για την τιμή που μου έκαναν να είναι μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής της διατριβής.

Ευχαριστώ θερμά τον Κώστα Δεμέστιχα και τη Τζένη Αδαμοπούλου, με τους οποίους είχα την εξαιρετική τύχη να συνεργαστώ και χωρίς τους οποίους η ολοκλήρωση της εργασίας αυτής θα είχε καταστεί ασύγκριτα πιο επίπονη.

Ευχαριστώ όλους τους φίλους και συνεργάτες που με βοήθησαν να νικώ κάθε μέρα το άγχος και τις αμφιβολίες μου.

Αφιερώνω τη διατριβή στην οικογένειά μου, στο μοναδικό και μόνιμο σημείο αναφοράς, με την ελπίδα να φανώ αντάξια των προσδοκιών τους.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	27
1.1. Σημερινά και μελλοντικά συστήματα ασύρματης επικοινωνίας	29
1.1.1. Συστήματα 4 ^{ης} γενιάς	29
1.1.2. Εφαρμογές 4 ^{ης} γενιάς	31
1.1.3. Η έννοια της ‘διαρκώς καλύτερης σύνδεσης’ (<i>Always Best Connected – ABC</i>).....	32
1.2. Λειτουργία συστημάτων 4^{ης} γενιάς στο πλαίσιο ‘ABC’ – δικτυακές και τερματικές υποδομές.....	35
1.2.1. Δικτυακές υποδομές και λειτουργίες	36
1.2.2. Τερματικές υποδομές και λειτουργίες	42
1.2.3. Απαιτήσεις συστήματος διαχείρισης κινητού τερματικού	45
1.3. Αντικείμενο διατριβής	46
1.3.1. Διαχείριση επιλογών πρόσβασης (<i>access discovery and selection</i>).....	47
1.3.1.1. Επιλογή δικτύου πρόσβασης	47
1.3.1.2. Σχετικές εργασίες	47
1.3.2. Διαχείριση προφίλ χρήστη (<i>profile handling</i>).....	49
1.3.2.1. Context-aware συστήματα.....	49
1.3.2.2. Σχετικές εργασίες	51
1.4. Διάρθρωση διατριβής	52
1.4.1. Αρχιτεκτονική διαχείρισης κινητού τερματικού.....	52
1.4.2. Ευφυής επιλογή πρόσβασης	53
1.4.3. Μοντελοποίηση και προσαρμογή στις προτιμήσεις του χρήστη.....	54
Παραπομπές.....	57
2. Σύστημα Διαχείρισης Κινητού Τερματικού	63
2.1. Εισαγωγή	65
2.2. Απαιτήσεις συστήματος.....	66
2.3. Επισκόπηση αρχιτεκτονικής	67
2.3.1. Συνιστώσα προσαρμογής στους οδηγούς δικτύου (<i>NIAM</i>)	68
2.3.2. Συνιστώσα προτιμήσεων χρήστη (<i>UPM</i>)	69
2.3.3. Συνιστώσα διαχείρισης κινητικότητας (<i>MMM</i>).....	69

2.3.4.	<i>Λειτουργία συστήματος</i>	71
2.3.5.	<i>Υλοποίηση</i>	72
2.4.	Συνιστώσα προσαρμογής στους οδηγούς δικτύου (NIAM)	73
2.4.1.	<i>Επικοινωνία με τις δικτυακές διεπαφές</i>	73
2.4.1.1.	Έλεγχος της σύνδεσης	73
2.4.1.2.	Συγκέντρωση μετρήσεων	74
2.4.2.	<i>Ανακάλυψη υποψηφίων δρομολογητών πρόσβασης για διαπομπή (Candidate Access Router Discovery for Handoff – CARD)</i>	76
2.4.2.1.	Γενικά	77
2.4.2.2.	Το πρωτόκολλο CARD.....	78
2.5.	Συνιστώσα προτιμήσεων χρήστη (UPM)	82
2.5.1.	<i>Βασική λειτουργία</i>	82
2.5.2.	<i>Γραφική διεπαφή χρήστη</i>	84
2.5.2.1.	Διαμόρφωση προφίλ, γενικές & ειδικές ρυθμίσεις.....	84
2.5.2.2.	Αποθήκευση και ενεργοποίηση προφίλ.....	88
2.5.3.	<i>Μοντελοποίηση και προσαρμογή στις προτιμήσεις του χρήστη</i>	89
2.5.3.1.	Γενικά για τη μοντελοποίηση μέσω μπεϋζιανών μετα-δικτύων	89
2.5.3.2.	Ταξινόμηση χαρακτηριστικών του κινητού περιβάλλοντος.....	91
2.5.3.3.	Σχετικές εργασίες	94
2.6.	Συνιστώσα διαχείρισης κινητικότητας (MMM)	96
2.6.1.	<i>Βασική λειτουργία</i>	96
2.6.2.	<i>Λειτουργικότητα SIP / Mobile IP</i>	97
2.6.3.	<i>Ευφύης επιλογή πρόσβασης</i>	97
2.7.	Ροή πληροφορίας στο κινητό τερματικό	100
2.7.1.	<i>Εκκίνηση λόγω τροποποίησης προφίλ</i>	100
2.7.2.	<i>Εκκίνηση λόγω υποβάθμισης λαμβανόμενου σήματος</i>	101
	Παραπομπές	103
3.	Ευφύης Επιλογή Πρόσβασης	107
3.1.	Εισαγωγή	109
3.2.	Περιγραφή προβλήματος	110
3.2.1.	<i>Γενική περιγραφή</i>	110
3.2.2.	<i>Συμβολική περιγραφή</i>	111
3.2.2.1.	Στοιχεία εισόδου.....	111
3.2.2.2.	Στοιχεία εξόδου – αντικειμενικοί σκοποί.....	112

3.2.2.3.	Περιορισμοί	113
3.3.	Μαθηματική διατύπωση προβλήματος.....	115
3.4.	Λύση προβλήματος.....	118
3.5.	Αποτελέσματα.....	121
3.5.1.	Γενικά.....	121
3.5.2.	Σενάριο 1.....	123
3.5.2.1.	Περιγραφή σεναρίου.....	123
3.5.2.2.	Εκτέλεση σεναρίου	125
3.5.2.3.	Αποτελέσματα - συζήτηση	127
3.5.3.	Σενάριο 2.....	131
3.5.3.1.	Περιγραφή σεναρίου.....	131
3.5.3.2.	Εκτέλεση σεναρίου	133
3.5.3.3.	Αποτελέσματα - συζήτηση	134
3.6.	Ανακεφαλαίωση – συμπεράσματα.....	137
	Παραπομπές.....	138
4.	Μπεϋζιανές Μέθοδοι: Θωρία, Μάθηση και Εφαρμογές.....	141
4.1.	Μπεϋζιανός συμπερασμός	143
4.1.1.	Μπεϋζιανά δίκτυα.....	145
4.1.2.	Μπεϋζιανά μετα-δίκτυα	154
4.2.	Μοντελοποίηση επίδρασης του πλαισίου χρήσης	155
4.2.1.	Επίδραση του πλαισίου χρήσης στη δεσμευμένη πιθανότητα	155
4.2.2.	Επίδραση του πλαισίου χρήσης στη μη δεσμευμένη πιθανότητα	158
4.3.	Μπεϋζιανά μετα-δίκτυα για τη διαχείριση κατανομών πιθανότητας	161
4.3.1.	C-μετα-δίκτυο: διαχείριση δεσμευμένης εξάρτησης.....	161
4.3.2.	R-μετα-δίκτυο: μοντελοποίηση επιλογής σχετικών χαρακτηριστικών.....	165
4.3.3.	Συζήτηση	167
4.4.	Μάθηση στα μπεϋζιανά δίκτυα.....	168
4.4.1.	Γενικά.....	168
4.4.2.	Μάθηση παραμέτρων.....	168
4.4.3.	Μάθηση δομής.....	169
4.4.3.1.	Γενικά	169
4.4.3.2.	Κριτήρια και εκ-των-προτέρων πιθανότητες.....	170
4.4.3.3.	Μέθοδοι αναζήτησης.....	171
4.4.4.	Μάθηση μετα-δικτύων	172

4.4.5. Συζήτηση	173
4.5. Εφαρμογή.....	174
 Παραπομπές.....	175
5. Μοντελοποίηση και Προσαρμογή στις Προτιμήσεις του	
Χρήστη	179
5.1. Εισαγωγή	181
5.2. Περιγραφή προβλήματος.....	183
5.2.1. Γενική περιγραφή	183
5.2.1.1. Δομή	183
5.2.1.2. Συλλογιστική	185
5.2.1.3. Μάθηση	186
5.2.2. Συμβολική περιγραφή	187
5.2.2.1. Προσδιορισμός πλαισίου χρήσης	187
5.2.2.2. Προσδιορισμός παραμέτρων προφίλ.....	189
5.2.2.3. Μάθηση παραμέτρων μοντέλου	190
5.2.2.4. Μάθηση δομής μοντέλου	193
5.3. Μαθηματική διατύπωση προβλήματος.....	194
5.3.1. Μάθηση παραμέτρων.....	194
5.3.2. Μάθηση δομής.....	195
5.4. Λύση προβλήματος.....	198
5.4.1. Μάθηση παραμέτρων.....	198
5.4.2. Μάθηση δομής.....	201
5.4.2.1. Κριτήριο επιλογής	202
5.4.2.2. Αλγόριθμος αναζήτησης.....	203
5.4.2.3. Συνολική λύση.....	204
5.5. Αποτελέσματα.....	205
5.5.1. Γενικά.....	205
5.5.2. Σενάριο 1.....	208
5.5.2.1. Περιγραφή σεναρίου.....	208
5.5.2.2. Αποτελέσματα – συζήτηση.....	210
5.5.3. Σενάριο 2.....	220
5.5.3.1. Περιγραφή σεναρίου.....	220
5.5.3.2. Εκτέλεση σεναρίου	224
5.5.3.3. Αποτελέσματα – συζήτηση.....	230

5.6. Ανακεφαλαίωση – συμπεράσματα	238
Παραπομπές.....	240
6. Συμπεράσματα & Ανακεφαλαίωση	243
6.1. Ανακεφαλαίωση – συνεισφορά διατριβής	245
6.2. Κατευθύνσεις για μελλοντικές επεκτάσεις της διατριβής.....	247

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1-1. Λειτουργικές συνιστώσες σ' ένα περιβάλλον πολλαπλών τεχνολογιών πρόσβασης ([11])	33
Σχήμα 1-2. Μοντελο αναφοράς Always Best Connected ([11])	34
Σχήμα 1-3. Συμβατικό επιχειρησιακό μοντέλο.....	36
Σχήμα 1-4. Νέο επιχειρησιακό μοντέλο για δίκτυα 4 ^{ης} γενιάς	37
Σχήμα 1-5. Βασικές λειτουργίας της Υποστήριξης Υπηρεσίας.....	37
Σχήμα 1-6. Αρχιτεκτονική αναφοράς για συστήματα 4 ^{ης} γενιάς.....	38
Σχήμα 1-7. Άποψη του τελικού χρήστη.....	39
Σχήμα 1-8. Συνεισφορά εργασίας με αναφορά στο μοντέλο Always Best Connected	46
Σχήμα 1-9. Διαχείριση κινητικότητας στο κινητό τερματικό	54
Σχήμα 1-10. Διαχείριση προφίλ χρήστη στο κινητό τερματικό.....	56
Σχήμα 2-1. Αρχιτεκτονική Συστήματος Διαχείρισης Κινητού Τερματικού (MTMS)	68
Σχήμα 2-2. Γενική περιγραφή της λειτουργίας του MTMS	71
Σχήμα 2-3. Λειτουργία συνιστώσας NIAM.....	76
Σχήμα 2-4. Λειτουργία του πρωτοκόλλου CARD.....	81
Σχήμα 2-5. Λειτουργία συνιστώσας UPM.....	83
Σχήμα 2-6. Μπεϋζιανό μετα-δίκτυο για τη μοντελοποίηση των προτιμήσεων του χρήστη.....	93
Σχήμα 2-7. Μάθηση και προσαρμογή του μπεϋζιανού μετα-δικτύου	94
Σχήμα 2-8. Λειτουργία συνιστώσας MMM.....	96
Σχήμα 2-9. Διαδικασία βελτιστοποίησης του αλγορίθμου IAS.....	98
Σχήμα 2-10. Ακολουθιακό διάγραμμα – εκκίνηση IAS λόγω τροποποίησης προφίλ χρήστη.....	100
Σχήμα 2-11. Ακολουθιακό διάγραμμα – εκκίνηση IAS λόγω υποβάθμισης σήματος	101
Σχήμα 3-1. Διάγραμμα φάσεων της λύσης του προβλήματος IAS.....	120
Σχήμα 3-2. Αποτελέσματα σεναρίου 1: γραφική αναπαράσταση του λόγου R	128
Σχήμα 3-3. Αποτελέσματα σεναρίου 1: γραφική αναπαράσταση της χρησιμότητας U	130
Σχήμα 3-4. Αποτελέσματα σεναρίου 2: γραφική αναπαράσταση του λόγου R	135

Σχήμα 3-5. Αποτελέσματα σεναρίου 2: γραφική αναπαράσταση της χρησιμότητας U	136
Σχήμα 4-1. Μπεϋζιανό δίκτυο που αναπαριστά την κατανομή.....	146
Σχήμα 4-2. Παράδειγμα ενός απλού μπεϋζιανού δικτύου.....	147
Σχήμα 4-3. Γραφική απεικόνιση και πίνακες δεσμευμένων πιθανοτήτων στο παράδειγμα.....	149
Σχήμα 4-4. Απλό μοντέλο επίδρασης πλαισίου χρήσης στη δεσμευμένη πιθανότητα	155
Σχήμα 4-5. Απλό μοντέλο επίδρασης πλαισίου χρήσης στη μη δεσμευμένη πιθανότητα.....	158
Σχήμα 4-6. Μπεϋζιανό μετα-δίκτυο δύο επιπέδων για τη δειξίριση δεσμευμένων πιθανοτήτων.....	161
Σχήμα 4-7. Παράδειγμα μπεϋζιανού μετα-δικτύου, προβολή σε 2 διαστάσεις.....	162
Σχήμα 4-8. Παραδείγματα C-μετα-δικτύων.....	164
Σχήμα 4-9. Μπεϋζιανό R-μετα-δίκτυο για τη μοντελοποίηση επιλογής σχετικών χαρακτηριστικών.....	165
Σχήμα 4-10. Ορισμός συνάφειας για το μπεϋζιανό R-μετα-δίκτυο.....	166
Σχήμα 5-1. Μπεϋζιανό δίκτυο επιπέδου πλαισίου χρήσης (contextual level).....	183
Σχήμα 5-2. Μπεϋζιανό δίκτυο προγνωστικού επιπέδου (predictive level).....	184
Σχήμα 5-3. Μπεϋζιανό μετα-δίκτυο 2 επιπέδων.....	185
Σχήμα 5-4. Απλοποιημένο μπεϋζιανό δίκτυο επιπέδου πλαισίου χρήσης (contextual level).....	187
Σχήμα 5-5. Απλοποιημένο μπεϋζιανό δίκτυο προγνωστικού επιπέδου (predictive level).....	189
Σχήμα 5-6. Χώρος συμφωνίας παραμέτρων w_i - παράδειγμα σε 2 διαστάσεις.....	192
Σχήμα 5-7. Τυχαία δομή του γράφου στο προγνωστικό επίπεδο.....	193
Σχήμα 5-8. Χρήση πιθανολογικού νευρωνικού δικτύου.....	199
Σχήμα 5-9. Αρχιτεκτονική του χρησιμοποιούμενου PNN.....	200
Σχήμα 5-10. Διάγραμμα φάσεων της λύσης του προβλήματος μάθησης παραμέτρων	201
Σχήμα 5-11. Διάγραμμα φάσεων της λύσης του προβλήματος μάθησης δομής.....	205
Σχήμα 5-12. Άγνωστη δομή του γράφου στο προγνωστικό επίπεδο.....	209
Σχήμα 5-13. Αποτελέσματα σεναρίου 1: υπολογιζόμενες δικτυακές δομές.....	212
Σχήμα 5-14. Αποτελέσματα σεναρίου 1: υπολογιζόμενες δικτυακές δομές.....	212

Σχήμα 5-15. Αποτελέσματα σεναρίου 1: γραφική αναπαράσταση της G_{norm}	213
Σχήμα 5-16. Αποτελέσματα σεναρίου 1: υπολογιζόμενες δικτυακές δομές για το σύνολο D'	218
Σχήμα 5-17. Αποτελέσματα σεναρίου 1: υπολογιζόμενες δικτυακές δομές για το σύνολο D'	218
Σχήμα 5-18. Αποτελέσματα σεναρίου 1: γραφική αναπαράσταση της G_{norm} για το σύνολο D'	219
Σχήμα 5-19. Αποτελέσματα σεναρίου 2: γραφική αναπαράσταση της χρησιμότητας U που προκύπτει από το υπολογιζόμενο κατά BN και RBS προφίλ χρήστη ...	233
Σχήμα 5-20. Αποτελέσματα σεναρίου 2: γραφική αναπαράσταση των παραμέτρων του προφίλ του χρήστη που προκύπτουν από επίλυση κατά BN και RBS.....	234
Σχήμα 5-21. Αποτελέσματα σεναρίου 2: γραφική αναπαράσταση των παραμέτρων του προφίλ του χρήστη που προκύπτουν από επίλυση κατά BN και eRBS.....	235
Σχήμα 5-22. Γραφική αναπαράσταση των παραμέτρων του προφίλ του χρήστη που προκύπτουν από επίλυση κατά BN και exRBS	237

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 2-1. Γραφικό περιβάλλον τερματικού, κύρια οθόνη	84
Εικόνα 2-2. Γραφικό περιβάλλον τερματικού, προ-διαμορφωμένα προφίλ.....	85
Εικόνα 2-3. Γραφικό περιβάλλον τερματικού, διαμόρφωση προφίλ	86
Εικόνα 2-4. Διαμόρφωση προφίλ, γεικές ρυθμίσεις.....	87
Εικόνα 2-5. Διαμόρφωση προφίλ, καθορισμός επιπέδων ποιότητας υπηρεσιών	88
Εικόνα 3-1. Παράδειγμα XML αρχείου μετρήσεων.....	122
Εικόνα 3-2. Γραφική διεπαφή κατασκευής σεναρίων	122
Εικόνα 5-1. Παράδειγμα XML αρχείου για τη δεσμευμένη πιθανότητα $P(C|T, L, CP)$	188

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2-1. Δομή πληροφορίας κόστους	75
Πίνακας 3-1. Πρόβλημα IAS: πίνακας συμβόλων για τη μαθηματική διατύπωση ...	113
Πίνακας 3-2. Αξιολόγηση ένδειξης ισχύος λαμβανόμενου σήματος	116
Πίνακας 3-3. Παράδειγμα απαιτήσεων μιας υπηρεσίας σε εύρος ζώνης	116
Πίνακας 3-4. Απαιτήσεις υπηρεσιών <i>voice</i> και <i>video call</i> σε εύρος ζώνης, ανά επίπεδο ποιότητας	123
Πίνακας 3-5. Απαιτήσεις υπηρεσιών <i>web browsing</i> και <i>video streaming</i> σε εύρος ζώνης,.....	123
Πίνακας 3-6. Προφίλ χρήστη στο σενάριο 1	124
Πίνακας 3-7. Δικτυακή διαθεσιμότητα στο σενάριο 1	124
Πίνακας 3-8. Υπολογιζόμενες κατά IAS αναθέσεις στο βήμα 1	125
Πίνακας 3-9. Υπολογιζόμενες κατά IAS αναθέσεις στο βήμα 2.....	125
Πίνακας 3-10. Υπολογιζόμενες κατά IAS αναθέσεις στο βήμα 3	126
Πίνακας 3-11. Υπολογιζόμενες κατά IAS αναθέσεις στο βήμα 4.....	126
Πίνακας 3-12. Ενδεικτικοί χρόνοι εκτέλεσης του αλγορίθμου IAS στο σενάριο 1 ..	126
Πίνακας 3-13. Αναθέσεις υπολογιζόμενες από IAS και BSS στο σενάριο 1	127
Πίνακας 3-14. Υπολογισμός του λόγου $R = \frac{QoS_{aggr.}}{\#HO_{aggr.}}$ για τις αναθέσεις IAS και BSS	128
Πίνακας 3-15. Χρησιμότητες αναθέσεων IAS και BSS στο σενάριο 1.....	129
Πίνακας 3-16. Προφίλ χρήστη (αρχικό) στο σενάριο 2.....	131
Πίνακας 3-17. Δικτυακή διαθεσιμότητα στο σενάριο 2	131
Πίνακας 3-18. Προφίλ χρήστη (τελικό) στο σενάριο 2	132
Πίνακας 3-19. Υπολογιζόμενη κατά IAS ανάθεση στο βήμα 1	133
Πίνακας 3-20. Υπολογιζόμενες κατά IAS αναθέσεις στο βήμα 2.....	133
Πίνακας 3-21. Υπολογιζόμενη κατά IAS ανάθεση στο βήμα 3	133
Πίνακας 3-22. Υπολογιζόμενη κατά IAS ανάθεση στο βήμα 4	133
Πίνακας 3-23. Αναθέσεις υπολογιζόμενες από IAS και BSS στο σενάριο 2	134
Πίνακας 3-24. Υπολογισμός του λόγου $R = \frac{QoS_{aggr.}}{\#HO_{aggr.}}$ για τις αναθέσεις IAS και BSS	134

Πίνακας 3-25. Χρησιμότητες αναθέσεων IAS και BSS στο σενάριο 2.....	136
Πίνακας 4-1. Από κοινού συνάρτηση κατανομής πιθανότητας $P(R, S, G, N)$	151
Πίνακας 4-2. Κατανομή της πιθανότητας $P(Y | X)$ στο παράδειγμα	157
Πίνακας 4-3. Δεσμευμένη εξάρτηση μεταξύ πλαισίου χρήσης Z και δεσμευμένης πιθανότητας $P(Y | X)$ στο παράδειγμα	157
Πίνακας 4-4. Διαφορετικές κατανομές πιθανότητες για τη μεταβλητή X στο παράδειγμα.....	160
Πίνακας 4-5. Κατανομή δεσμευμένης πιθανότητας $P(Y | X)$ στο παράδειγμα.....	160
Πίνακας 4-6. Δεσμευμένη εξάρτηση μεταξύ πλαισίου χρήσης Z και δεσμευμένης πιθανότητας $P(X)$ στο παράδειγμα.....	160
Πίνακας 5-1. Πίνακας δεσμευμένης πιθανότητας $P(C | T, L, CP)$	188
Πίνακας 5-2. Πίνακας δεσμευμένης πιθανότητας $P(w_i | S)$	190
Πίνακας 5-3. Σύνολο παραδειγμάτων εκπαίδευσης D	191
Πίνακας 5-4. Πλήθος κατευθυνόμενων μη κυκλικών γράφων για μικρά n	196
Πίνακας 5-5. Αναπαράσταση της κατανομής $P(w_g, w_c, w_i, w_o, S)$	206
Πίνακας 5-6. Αναπαράσταση της εξόδου του στρώματος αναγνώρισης προτύπων του PNN.....	207
Πίνακας 5-7. Αντιστοιχία παραδειγμάτων εκπαίδευσης προς κλάσεις ταξινόμησης στο PNN.....	207
Πίνακας 5-8. Αναπαράσταση της εξόδου του στρώματος αθροίσματος του PNN ...	207
Πίνακας 5-9. Κανονικοποιημένη αναπαράσταση της εξόδου του στρώματος αθροίσματος του PNN	207
Πίνακας 5-10. Σύνολο παραδειγμάτων εκπαίδευσης D για το σενάριο 1	209
Πίνακας 5-11. Προσαρμοσμένος πίνακας κατανομής πιθανότητας $P(w_g, w_c, w_i, w_o, S)$	210
Πίνακας 5-12. Αποτελέσματα σεναρίου 1: αποτίμηση δικτυακών δομών	213
Πίνακας 5-13. Σύνολο παραδειγμάτων εκπαίδευσης D' για το σενάριο 1	215
Πίνακας 5-14. Προσαρμοσμένος πίνακας κατανομής πιθανότητας $P(w_g, w_c, w_i, w_o, S)$	216
Πίνακας 5-15. Αποτελέσματα σεναρίου 1: αποτίμηση δικτυακών δομών για το σύνολο D'	219
Πίνακας 5-16. Προτιμήσεις χρήση στο σενάριο 2 (υποκρύπτουσα γνώση).....	220

Πίνακας 5-17. Απαντήσεις του χρήστη σε τυχαία επιλεγμένες ερωτήσεις	221
Πίνακας 5-18. Σύνολο παραδειγμάτων εκπαίδευσης D για το σενάριο 2	221
Πίνακας 5-19. Δικτυακή διαθεσιμότητα στο σενάριο 2	223
Πίνακας 5-20. Πίνακες δεσμευμένης πιθανότητας $P(C|T, L, CP)$, για $L = l_1$	224
Πίνακας 5-21. Πίνακες δεσμευμένης πιθανότητας $P(C|T, L, CP)$, για $L = l_2$	224
Πίνακας 5-22. Πίνακες δεσμευμένης πιθανότητας $P(C|T, L, CP)$, για $L = l_3$	225
Πίνακας 5-23. Αρχικός πίνακας δεσμευμένης πιθανότητας $P(w_i | S)$ στο σενάριο 2	225
Πίνακας 5-24. Προσαρμοσμένος πίνακας δεσμευμένης πιθανότητας $P(w_q | S)$, για $C = c_1$	226
Πίνακας 5-25. Προσαρμοσμένος πίνακας δεσμευμένης πιθανότητας $P(w_c | S)$, για $C = c_1$	226
Πίνακας 5-26. Προσαρμοσμένος πίνακας δεσμευμένης πιθανότητας $P(w_r | S)$, για $C = c_1$	226
Πίνακας 5-27. Προσαρμοσμένος πίνακας δεσμευμένης πιθανότητας $P(w_o | S)$, για $C = c_1$	226
Πίνακας 5-28. Προσαρμοσμένος πίνακας δεσμευμένης πιθανότητας $P(w_q | S)$, για $C = c_2$	227
Πίνακας 5-29. Προσαρμοσμένος πίνακας δεσμευμένης πιθανότητας $P(w_c | S)$, για $C = c_2$	227
Πίνακας 5-30. Προσαρμοσμένος πίνακας δεσμευμένης πιθανότητας $P(w_r | S)$, για $C = c_2$	227
Πίνακας 5-31. Προσαρμοσμένος πίνακας δεσμευμένης πιθανότητας $P(w_o | S)$, για $C = c_2$	227
Πίνακας 5-32. Υπολογιζόμενες κατά MAUP και IAS παράμετροι και ανάθεση στο βήμα 1	228
Πίνακας 5-33. Υπολογιζόμενες κατά MAUP και IAS παράμετροι και ανάθεση στο βήμα 2	228
Πίνακας 5-34. Υπολογιζόμενες κατά MAUP και IAS παράμετροι και αναθέσεις στο βήμα 3	229
Πίνακας 5-35. Υπολογιζόμενες κατά MAUP και IAS παράμετροι και ανάθεση στο βήμα 4	229

Πίνακας 5-36. Ενδεικτικοί χρόνοι εκτέλεσης των αλγορίθμων MAUP και IAS στο σενάριο 2.....	230
Πίνακας 5-37. Απλό σύστημα κανόνων (RBS) για την αναπαράσταση	231
Πίνακας 5-38. Παράμετροι προφίλ υπολογιζόμενες κατά BN και RBS στο σενάριο 2	231
Πίνακας 5-39. Αναθέσεις σχετιζόμενες με BN και RBS στο σενάριο 2	231
Πίνακας 5-40. Χρησιμότητες αναθέσεων με προφίλ χρήστη κατά BN και RBS στο σενάριο 2.....	232
Πίνακας 5-41. Βελτιωμένο σύστημα κανόνων (eRBS).....	234
Πίνακας 5-42. Σύνολο παραδειγμάτων εκπαίδευσης D για το διευρυμένο προφίλ χρήστη.....	236
Πίνακας 5-43. Εκτεταμένο σύστημα κανόνων (exRBS) για το διευρυμένο προφίλ χρήστη.....	236

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1. Σημερινά και μελλοντικά συστήματα ασύρματης επικοινωνίας

1.1.1. Συστήματα 4^{ης} γενιάς

Η σημερινή εικόνα στο χώρο της πληροφορικής και της τεχνολογίας της επικοινωνίας χαρακτηρίζεται από τη ραγδαία εξέλιξη των συστημάτων κινητών και ασύρματων επικοινωνιών, καθώς νέες τεχνολογίες και νέες υπηρεσίες παρουσιάζονται στο προσκήνιο.

Από την πλευρά των χρηστών, το ενδιαφέρον για ασύρματη πρόσβαση σε υπηρεσίες διαδικτύου και πολυμέσων είναι διαρκώς αυξανόμενο. Εξελιγμένες υπηρεσίες όπως εξατομικευμένη ενημέρωση, διασκέδαση και διαφήμιση αναμένεται να κορυφώσουν τη χρήση και τη διείσδυσή τους στο ευρύ κοινό.

Από τεχνολογικής πλευράς, η εξέλιξη των υπαρχόντων κυψελωτών συστημάτων 2^{ης} γενιάς σε συστήματα 3^{ης} γενιάς συνδυάζεται με μια ταυτόχρονη ευρεία διάδοση των ασύρματων τοπικών δικτύων και με την εμφάνιση συστημάτων σταθερής πρόσβασης, διασυνδεδεμένων με ασύρματα τοπικά δίκτυα. Αξιοσημείωτη είναι η ετερογένεια όλων αυτών των νέων τεχνολογιών, καθώς και των αντίστοιχων αναπτυσσόμενων υποδομών. Πιο συγκεκριμένα, μερικές από τις σπουδαιότερες τεχνολογικές εξελίξεις αφορούν:

- Τη μετάβαση από τα κυψελωτά συστήματα 2^{ης} γενιάς και ‘2.5 γενιάς’ (Global System for Mobile Communications – GSM ([1],[2]) και General Packet Radio Service – GPRS ([3],[4]) αντίστοιχα) στα κυψελωτά συστήματα 3^{ης} γενιάς, με τη σταδιακή εισαγωγή και επικράτηση του Universal Mobile Telecommunications System – UMTS ([5],[6]).
- Την εγκατάσταση και την εξάπλωση ασύρματων τοπικών δικτύων (Wireless Local Area Networks – WLANs) σε γραφεία, αεροδρόμια, ξενοδοχεία, πανεπιστήμια, συνεδριακά κέντρα, τα οποία παρέχουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης για επικοινωνία κοντινής απόστασης και αποτελούν μια πολύ καλή λύση για την εξυπηρέτηση περιοχών αυξημένης ζήτησης (*hot spots*) ([7]).
- Την εμφάνιση συστημάτων ψηφιακής μετάδοσης, όπως είναι το ευρωπαϊκό πρότυπο Digital Video Broadcasting – DVB, τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγάλες τυπικές ταχύτητες μετάδοσης και μπορούν να καλύψουν γεωγραφικές περιοχές μεγάλου εύρους ([8]).
- Την τάση από κοινού εκμετάλλευσης των ετερογενών αυτών δικτύων πρόσβασης, προκειμένου για τη βελτίωση της παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσίας, της

διαθεσιμότητας και της προσβασιμότητας. Η τάση αυτή συχνά αναφέρεται ως ‘συστήματα κινητών επικοινωνιών πέραν της τρίτης γενιάς (*Beyond 3G – B3G*)’ ή ‘τέταρτη γενιά συστημάτων κινητών επικοινωνιών (4G)’ και έχει απασχολήσει εκτεταμένα την ευρωπαϊκή χρηματοδοτούμενη έρευνα ([9],[10],[20],[34],[36]), και τη σχετική βιβλιογραφία εν γένει ([11],[12],[15],[19],[21],[22],[23])

Εκτός από την πολλαπλότητα των τεχνολογιών πρόσβασης, ένα άλλο κύριο χαρακτηριστικό των εξελισσόμενων συστημάτων 3^{ης} και 4^{ης} γενιάς, είναι και η ύπαρξη μιας ποικιλίας τερματικών συσκευών, που περιλαμβάνει κινητά τηλέφωνα, PDAs (Personal Digital Assistants) και φορητούς υπολογιστές, και που θα επιτρέπει σε χρήστες εν κινήσει να απολαμβάνουν αρραγείς (*seamless*) και υψηλής ποιότητας ασύρματες υπηρεσίες, ανεξάρτητα από τη γεωγραφική τους θέση, την ταχύτητα ή την κίνησή τους οποιαδήποτε χρονική στιγμή της ημέρας. Αυτή η συνύπαρξη ετερογενών τεχνολογιών πρόσβασης και ποικιλίας τερματικών, σε συνδυασμό με κατάλληλους μηχανισμούς πρόσβασης, συνθέτουν την έννοια της ‘διαρκώς βέλτιστης σύνδεσης’ (*Always Best Connected – ABC*): σύνδεσης δηλαδή με το καλύτερο διαθέσιμο δίκτυο οποιαδήποτε χρονική στιγμή ([11]). Το καλύτερο διαθέσιμο δίκτυο ορίζεται ως εκείνο το δίκτυο που ανταποκρίνεται καλύτερα στις ανάγκες του χρήστη τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή και μπορεί να αποτελεί συνάρτηση των δυνατοτήτων του τερματικού και των προσωπικών προτιμήσεων του χρήστη, των διαφόρων πολιτικών των παρόχων δικτύου και των διαθέσιμων πόρων της δικτυακής υποδομής. Η εφαρμογή της έννοιας της διαρκώς καλύτερης σύνδεσης σ’ ένα περιβάλλον πολλαπλών τεχνολογιών πρόσβασης επιτρέπει έναν ωφέλιμο συνδυασμό της κάλυψης κυψελοειδών συστημάτων και συστημάτων μετάδοσης με την ευελιξία και το υψηλό εύρος ζώνης των WLAN συστημάτων και συμπληρώνει την εικόνα του οράματος των συστημάτων πέραν της τρίτης γενιάς.

Η συνύπαρξη τόσων ετερογενών τεχνολογιών πρόσβασης σε μια κοινή αρχιτεκτονική καθιστά εμφανή την ανάγκη ανάπτυξης μιας πλατφόρμας, η οποία θα ενοποιεί διαφανώς τις παραπάνω τεχνολογίες. Η πλατφόρμα αυτή θα παρέχει τη βασική λειτουργικότητα διαχείρισης του σύνθετου δικτύου, καθώς επίσης και μία αφαιρετική εικόνα των υποκείμενων τμημάτων – ραδιο-δικτύων. Με αυτόν τον τρόπο, τόσο στην πλευρά των υπηρεσιών όσο και στην πλευρά του χρήστη, θα δημιουργείται η ‘ψευδαίσθηση’ ενός ενιαίου εικονικού δικτύου, που θα λειτουργεί ανεξάρτητα από τον τύπο των υποστηριζόμενων τεχνολογιών.

Εδώ ακριβώς έγκειται και ο σύνθετος στόχος των συστημάτων 4^{ης} γενιάς: όχι μόνο στην από κοινού αξιοποίηση όλων των παραπάνω τεχνολογιών για την παροχή υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης δεδομένων, αλλά κυρίως στη διαφανή ενοποίησή τους, καθώς επίσης και στην αξιοποίηση ενός συνόλου πληροφοριών πλαισίου χρήσης (*contextual information*), όπως η γεωγραφική θέση του χρήστη, πληροφορίες κατάστασης του χρήστη και χαρακτηριστικά της επικοινωνίας και του τερματικού, για την ανάπτυξη νέων, εξατομικευμένων υπηρεσιών (*personalized services*).

Ένα ενδιαφέρον θέμα που συνδέεται με τα παραπάνω είναι η ανάπτυξη κατάλληλων πλαισίων διαχείρισης, τόσο για το τερματικό όσο και για το δίκτυο, τα οποία θα επιτρέπουν αδιάλειπτη, χρονικά και χωρικά, παροχή υπηρεσιών ανεξαρτήτως του δικτύου στο οποίο ο χρήστης είναι συνδεδεμένος. Έτσι, ο χρήστης θα μπορεί να επωφεληθεί από τη δυνατότητα πρόσβασης στις υπηρεσίες που τον ενδιαφέρουν σε οποιοδήποτε σημείο και σε οποιαδήποτε στιγμή.

Μια ακόμη σημαντική διάσταση αφορά το γεγονός ότι ο χρήστης θα χρειαστεί να ελέγξει τη χρήση των διαθέσιμων δικτύων, ειδικά όταν η χρήση αυτή συνεπάγεται κι ένα κόστος. Αυτό το θέμα συνιστά μια πιθανά σύνθετη διαδικασία λήψης απόφασης, η οποία μπορεί να καθοδηγηθεί από εργαλεία πολιτικής διαχείρισης (*policy-based management tools*), με υποστήριξη τόσο από τις συσκευές των χρηστών όσο κι από το δίκτυο. Γεννάται έτσι το ουσιώδες ζήτημα της βέλτιστης κατανομής αρμοδιότητας και ευφυΐας μεταξύ του δικτύου και του κινητού τερματικού προκειμένου για την υποστήριξη της διαφανούς κινητικότητας και παροχής υπηρεσιών.

1.1.2. Εφαρμογές 4^{ης} γενιάς

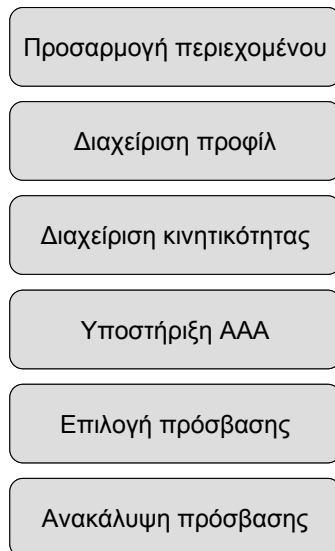
Μια από τις κύριες απαιτήσεις για την ανάπτυξη και την παροχή νέων κινητών εφαρμογών είναι η *προσαρμοστικότητα*. Ορισμένες πολλά υποσχόμενα τεχνικές είναι οι εξής ([12]):

- Η κινητή εφαρμογή θα πρέπει να σχετίζεται με το προφίλ του χρήστη, έτσι ώστε να μπορεί να παρασχεθεί με το βέλτιστο για το συνδρομητή τρόπο, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των εξατομικευμένων, και βασισμένων στο πλαίσιο χρήσης (*context-based*) εφαρμογών. Αυτό σημαίνει επίσης προσαρμοστικότητα των εφαρμογών σε τερματικά που κινούνται με διάφορες ταχύτητες και σε διάφορα περιβάλλοντα. Μικρο-αισθητήρες και δέκτες GPS (Global Positioning System) αποτελούν τις κύριες ερευνητικές προοπτικές στον τομέα αυτό.

- Τεχνικές όπως προσαρμοστικά πολυμέσα και ενοποιημένες υπηρεσίες μηνυμάτων θα λαμβάνουν υπόψη τα χαρακτηριστικά του τερματικού και θα διασφαλίζουν ότι η εκάστοτε υπηρεσία μπορεί να ληφθεί και να εκτελεστεί σε ένα τερματικό με την καταλληλότερη μορφή.
- Οι εφαρμογές θα μπορούν να διαπραγματεύονται σχετικές παραμέτρους με τα δίκτυα, έτσι ώστε να μπορούν να μεταφέρονται διαμέσου του πιο αποδοτικού διαύλου, π.χ. WLAN ή κυψελωτά συστήματα. Οι υπηρεσίες θα μπορούν να προσαρμόζονται σε διάφορα δικτυακά περιβάλλοντα και σε ποικίλλες συνθήκες τηλεπικοινωνιακής κίνησης.
- Οι υπηρεσίες θα μπορούν να λαμβάνονται ανεμπόδιστα πάνω από ένα σύμπλεγμα πολλαπλών παρόχων δικτύου και υπηρεσιών.

1.1.3. Η έννοια της 'διαρκώς βέλτιστης σύνδεσης' (*Always Best Connected – ABC*)

Σε ένα περιβάλλον όπου συνυπάρχουν πολλαπλές τεχνολογίες, όπου ο χρήστης είναι συνδεδεμένος μέσω της καλύτερης διαθέσιμης τεχνολογίας πρόσβασης και έχει τη δυνατότητα να μετακινείται αρραγώς μεταξύ αυτών των τεχνολογιών, διατηρώντας παράλληλα συνδέσεις με εξυπηρετητές εφαρμογών, οι διάφορες λειτουργίες συχνά διαχωρίζονται σε διακριτές μονάδες ([11]). Αυτές περιλαμβάνουν την ανακάλυψη πρόσβασης (*access discovery*), την επιλογή πρόσβασης (*access selection*), την υποστήριξη λειτουργιών πιστοποίησης, εξουσιοδότησης και λογιστικής (*authentication, authorization and accounting support*), τη διαχείριση κινητικότητας (*mobility management*), τη διαχείριση προφίλ χρήστη (*profile handling*) και την προσαρμογή περιεχομένου (*content adaptation*), όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1-1, το οποίο βασίζεται σε μια προσέγγιση που παρουσιάζεται στην παραπομπή [11].



Σχήμα 1-1. Λειτουργικές συνιστώσες σ' ένα περιβάλλον πολλαπλών τεχνολογιών πρόσβασης (11)

Η ανακάλυψη πρόσβασης αφορά την εύρεση των διαθέσιμων δικτύων πρόσβασης και την περιοδική επανάληψη της διαδικασίας ανακάλυψης πρόσβασης προκειμένου να διαπιστωθεί αν υπάρχει κάποια καλύτερη εναλλακτική διαθέσιμη. Ένα σημαντικό ζήτημα που αφορά αυτές τις διεργασίες είναι η συλλογή στατιστικών στοιχείων των διαφόρων δικτύων πρόσβασης.

Η επιλογή πρόσβασης, όπως υπονοεί και η ονομασία, είναι η διαδικασία καθορισμού της ασύρματης τεχνολογίας στην οποία θα πρέπει να συνδεθεί το τερματικό. Στην περίπτωση όπου το τερματικό είναι εκείνο που επιλέγει την τεχνολογία πρόσβασης, θα πρέπει να ενημερωθεί για τις δυνατότητες των δικτύων πρόσβασης. Στην περίπτωση που η λειτουργία επιλογής πρόσβασης στηρίζεται στο δίκτυο, απαιτείται ένα σύστημα διαχείρισης δικτύων για την παροχή πληροφοριών δικτύου, την εξισορρόπηση του φορτίου καθώς και τη μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού απόδοσης του συστήματος.

Η υποστήριξη λειτουργιών πιστοποίησης, εξουσιοδότησης και λογιστικής περιλαμβάνει την επαλήθευση της ταυτότητας του χρήστη, την εξακρίβωση των υπηρεσιών που δικαιούται ο χρήστης να χρησιμοποιήσει, καθώς και τη συλλογή όλων των απαραίτητων πληροφοριών για τη χρέωσή του για τις υπηρεσίες αυτές.

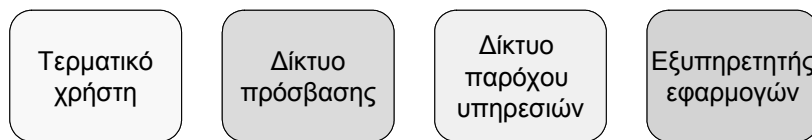
Η διαχείριση κινητικότητας αναφέρεται στην ικανότητα διατήρησης μιας συνόδου όταν το τερματικό κινείται μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης, καθώς και στη διατήρηση της επικοινωνίας με το χρήστη στο τρέχον δίκτυο οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Η διαχείριση κινητικότητας μπορεί επίσης να επαυξηθεί ώστε να

περιλαμβάνει και την ικανότητα διατήρησης μιας συνόδου όταν ο χρήστης εναλλάσσει διαφορετικές συσκευές. Σε αυτήν την περίπτωση ένα βασικό ζήτημα που προκύπτει είναι η κατάλληλη προσαρμογή του περιεχομένου των εφαρμογών.

Η διαχείριση του προφίλ περιλαμβάνει όλες τις λειτουργίες προσπέλασης, ανανέωσης και αποθήκευσης του προφίλ του χρήστη, το οποίο διαμορφώνεται όταν ο χρήστης εγγράφεται σε μία ή περισσότερες υπηρεσίες και περιέχει πληροφορίες όπως είναι οι προσωπικές του προτιμήσεις, τα διαπιστευτήριά του για την επικύρωση και λογιστικά δεδομένα.

Η προσαρμογή περιεχομένου αναφέρεται στην υποστήριξη δυναμικής διαμόρφωσης και επαναδιαμόρφωσης κάθε συνόδου επικοινωνίας με βάση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις κάθε συνόδου, και με γνώμονα μια σειρά από εξωτερικούς παράγοντες όπως είναι οι μορφότυποι μέσων (*media formats*), η κινητικότητα, και η αντιστοίχιση των επιπέδων ποιότητας υπηρεσίας στα χαρακτηριστικά του δικτύου πρόσβασης.

Οι λειτουργικές συνιστώσες που περιγράφηκαν παραπάνω, καθώς και οι τεχνικές λύσεις που σχετίζονται με αυτές, θα πρέπει να κατανεμηθούν μεταξύ των διαφορετικών οντοτήτων της αρχιτεκτονικής αναφοράς που απεικονίζεται στο Σχήμα 1-2.



Σχήμα 1-2. Μοντελο αναφοράς Always Best Connected ([11])

Οι συνιστώσες αυτής της αρχιτεκτονικής είναι:

- Το κινητό τερματικό (*user terminal*) (π.χ. φορητός υπολογιστής ή PDA) το οποίο εκτελεί εφαρμογές, προϋποθέτει IP συνδεσιμότητα και ενσωματώνει φυσικές διεπαφές για να συνδέεται στις διαφορετικές τεχνολογίες πρόσβασης.
- Το δίκτυο πρόσβασης (*access network*) (π.χ. 3^{ης} γενιάς, WLAN ή DSL) το οποίο παρέχει πρόσβαση στο διαδίκτυο (*internet*), στο δίκτυο ενός παρόχου ή σε ένα ενδοδίκτυο (*intranet*).
- Το δίκτυο του παρόχου υπηρεσιών (*service provider network*).
- Ο εξυπηρετητής εφαρμογών (*application server*).

Η ανάπτυξη λύσεων πρωτοκόλλου για την ανακάλυψη πρόσβασης και την επιλογή πρόσβασης αποτελεί θέμα τρέχουσας έρευνας (π.χ. [13]), καθώς δεν έχει αναπτυχθεί

ακόμη κάποιο συγκεκριμένο πρότυπο που να καλύπτει τις δύο αυτές λειτουργίες με ένα μεθοδικό τρόπο. Το σύστημα διαχείρισης τερματικού που αναλύεται στην παρούσα εργασία, προτείνει τη μεταφορά της λειτουργικότητας ανακάλυψης και επιλογής πρόσβασης στο ίδιο το κινητό τερματικό – τουλάχιστον στις περιπτώσεις εκείνες όπου οι αποφάσεις που λαμβάνονται τοπικά δεν έρχονται σε αντίθεση με το συνολικό πλάνο διαχείρισης πόρων του σύνθετου δικτύου – απαλλάσσοντας έτσι το δίκτυο από σημαντικό υπολογιστικό φορτίο που σχετίζεται με την παρακολούθηση και τη διαπομπή καθενός τερματικού ξεχωριστά, και ταυτόχρονα εισάγοντας τοπικά βελτιωμένη αυτονομία και ανεξαρτησία.

Όσον αφορά τις λύσεις για υποστήριξη λειτουργιών πιστοποίησης, εξουσιοδότησης, λογιστικής, η Ομάδα Εργασίας Εφαρμοσμένης Μηχανικής Διαδικτύου (*Internet Engineering Task Force – IETF*) αναπτύσσει το πρότυπο για το πρωτόκολλο νέας γενιάς AAA, που ονομάζεται Diameter. Αυτό το πρωτόκολλο παρέχει ένα σημαντικό αριθμό αναβαθμίσεων σε σχέση με το υπάρχον πρωτόκολλο (RADIUS).

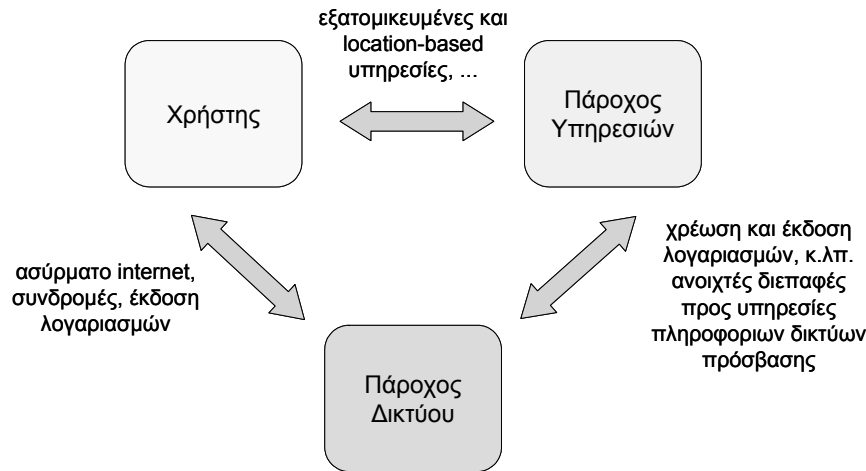
Σε ό,τι αφορά τη διαχείριση της κινητικότητας, η συνέχεια της συνόδου (η ικανότητα δηλαδή διατήρησης μιας συνόδου όταν το τερματικό κινείται μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών) μπορεί να παρασχεθεί με τη χρήση του Mobile IP, μια λύση επιπέδου IP που στοχεύει στο να κάνει τις κινήσεις στο IP επίπεδο διαφανείς (*transparent*) στα υψηλότερα επίπεδα πρωτοκόλλου. Η δυνατότητα επαφής οποιαδήποτε χρονική στιγμή με το χρήστη στο τρέχον δίκτυο και τερματικό του, μπορεί να παρασχεθεί με τη χρήση του Πρωτοκόλλου Έναρξης Συνόδου (*Session Initiation Protocol – SIP*). Πιο συγκεκριμένα, το SIP είναι ένα πρωτόκολλο ελέγχου του επιπέδου εφαρμογών, οι κύριες λειτουργίες του οποίου είναι θέση / εντοπισμός χρήστη (*user location*), διαθεσιμότητα χρήστη (*user availability*), ικανότητες χρήστη (*user capabilities*), σύσταση συνόδου επιπέδου εφαρμογών (*application level session set-up*) και διαχείριση συνόδου επιπέδου εφαρμογών (*application level session management*) ([14]).

1.2. Λειτουργία συστημάτων 4^{ης} γενιάς στο πλαίσιο ‘ABC’ – δικτυακές και τερματικές υποδομές

Στην παράγραφο αυτή θα ασχοληθούμε με τις απαραίτητες υποδομές και λειτουργίες, τόσο από την πλευρά του δικτύου όσο και από την πλευρά του τερματικού, για τη βιώσιμη λειτουργία του μοντέλου συστημάτων 4^{ης} γενιάς στο πλαίσιο της ‘διαρκώς βέλτιστης σύνδεσης’.

1.2.1. Δικτυακές υποδομές και λειτουργίες

Το τυπικό τηλεπικοινωνιακό επιχειρησιακό μοντέλο περιλαμβάνει συνήθως τρεις συνιστώσες: το χρήστη, τον πάροχο υπηρεσιών και τον πάροχο δικτύου, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1-3.

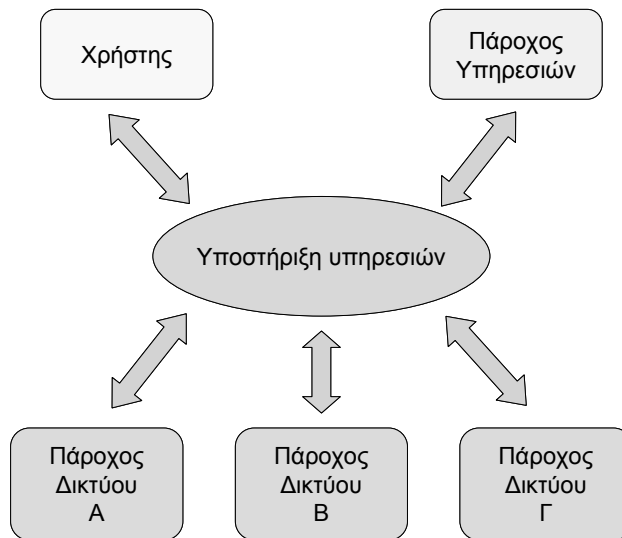


Σχήμα 1-3. Συμβατικό επιχειρησιακό μοντέλο

Στο μοντέλο αυτό ο χρήστης έχει συνάψει εμπορική συμφωνία (π.χ. συνδρομή) με:

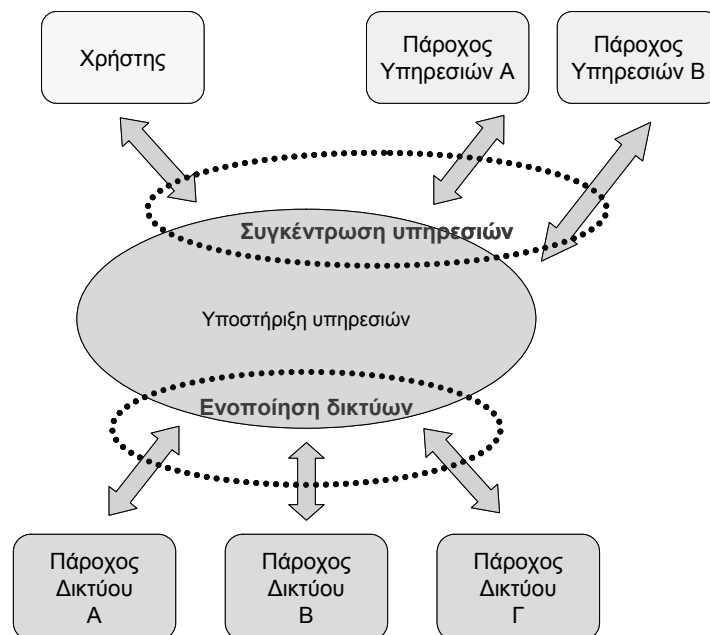
- Τον πάροχο δικτύου, προκειμένου να αποκτήσει συνδεσιμότητα με τα διάφορα δίκτυα (GSM, UMTS, WLAN, DVB κ.λπ.).
- Τον πάροχο υπηρεσιών, προκειμένου να αποκτήσει πρόσβαση σε υπηρεσίες και εφαρμογές (ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, τραπεζικές συναλλαγές, ενημέρωση κ.λπ.).

Έτσι, το μοντέλο αυτό υποθέτει ότι υπάρχουν εμπορικές συμφωνίες μεταξύ του χρήστη, του παρόχου δικτύου και του παρόχου υπηρεσιών ([15]). Στα συστήματα 4^{ης} γενιάς, το πλήθος των δικτύων πρόσβασης καθώς και των παρόχων δικτύου θα αυξηθεί αισθητά. Ειδικά η κατασκευή των επονομαζόμενων θερμών κηλίδων (*hot spots*), περιοχών, δηλαδή, με κάλυψη ασύρματου τοπικού δικτύου, θα συνεισφέρει στην ραγδαία αυτή αύξηση. Τόσο όμως ο χρήστης όσο και ο πάροχος υπηρεσιών δεν ενδιαφέρονται για τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε τεχνολογίας πρόσβασης. Για παράδειγμα, ο χρήστης επιθυμεί να λαμβάνει τις υπηρεσίες που προσφέρονται από τους παρόχους υπηρεσιών, ανεξάρτητα από τον τύπο του δικτύου στο οποίο είναι συνδεδεμένος. Αυτό, λοιπόν, απαιτεί μια καινούρια προσέγγιση, με επίκεντρο την υπηρεσία, όπου ο τελικός χρήστης, ο πάροχος υπηρεσιών και ο πάροχος δικτύου βρίσκονται χαλαρά συζευγμένοι δια μέσου ενός στρώματος 'Υποστήριξης Υπηρεσίας', όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1-4.



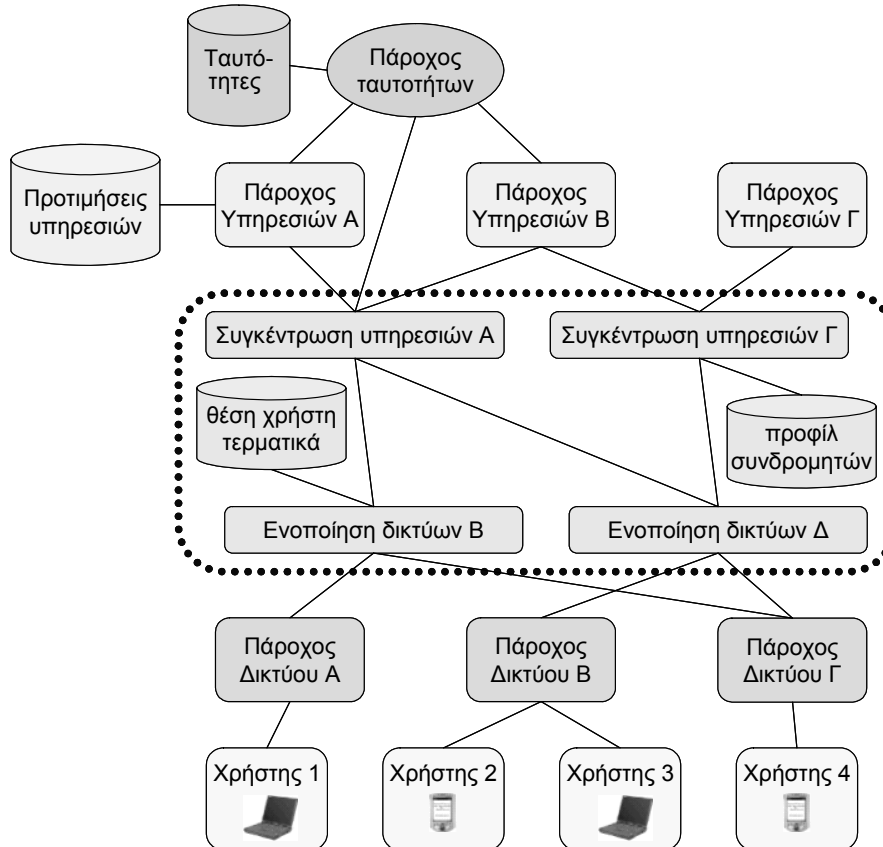
Σχήμα 1-4. Νέο επιχειρησιακό μοντέλο για δίκτυα 4^{ης} γενιάς

Η επονομαζόμενη Υποστήριξη Υπηρεσίας συνίσταται σε δύο κύριες λειτουργίες: τη συγκέντρωση υπηρεσιών (*service aggregation*) και την ενοποίηση δικτύων (*network integration*). Η πρώτη επιτρέπει την αδιάλειπτη παροχή υπηρεσιών στον τελικό χρήστη, ενώ η δεύτερη εξασφαλίζει ότι αυτό πραγματοποιείται ανεξάρτητα από το δίκτυο στο οποίο ο χρήστης είναι συνδεδεμένος. Το όφελος για το χρήστη είναι ότι μπορεί να έχει πρόσβαση στις υπηρεσίες στις οποίες είναι συνδρομητής, σε οποιοδήποτε σημείο και οποιαδήποτε στιγμή ([15]). Πρέπει να σημειωθεί ότι ο ρόλος της Υποστήριξης Υπηρεσίας ενδέχεται να υλοποιείται από πολλές συνεργαζόμενες μονάδες, οι οποίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 1-5.



Σχήμα 1-5. Βασικές λειτουργίες της Υποστήριξης Υπηρεσίας

Στη συνέχεια δίνουμε μια πιο λεπτομερή εικόνα του μοντέλου αυτού για δίκτυα 4^{ης} γενιάς. Στο Σχήμα 1-6 συμπεριλαμβάνονται τόσο οι σχετικοί επιχειρησιακοί ρόλοι όσο και τα αφηρημένα στρώματα λειτουργικότητας. Ως απτό παράδειγμα, ας αναφερθεί ότι υπάρχουν αρκετές επιχειρήσεις των οποίων η δραστηριότητα αποτελεί ένδειξη της χρήσης αυτής της αρχιτεκτονικής αναφοράς στην πράξη: Το Yahoo ([16]) και το MSN ([17]) αποτελούν τυπικά παραδείγματα δραστηριοποίησης στον τομέα της συγκέντρωσης υπηρεσιών.



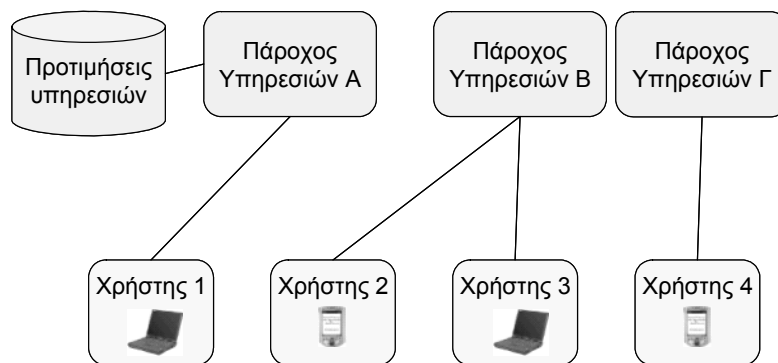
Σχήμα 1-6. Αρχιτεκτονική αναφοράς για συστήματα 4^{ης} γενιάς

Παρακάτω, αναφερόμαστε εν συντομία σε κάθε μια από τις συνιστώσες της αρχιτεκτονικής αυτής.

(α) Εφαρμογές και ταυτότητες τελικού χρήστη

Έως τώρα έχουμε θεωρήσει ότι οι υπηρεσίες παρέχονται στο χρήστη μέσω των παρόχων υπηρεσιών. Οι πάροχοι αυτοί έχουν συνάψει μια εμπορική συμφωνία ή μια Συμφωνία Επιπέδου Υπηρεσίας (*Service Level Agreement – SLA*) με μία ή περισσότερες μονάδες συγκέντρωσης υπηρεσιών (*service aggregators*). Με αυτόν τον τρόπο, οι πάροχοι υπηρεσιών μπορούν όχι μόνο να επωφεληθούν από μια ευρεία πελατειακή βάση, αλλά επίσης να προσαρμόσουν τις υπηρεσίες τους βασισμένοι σε

δικτυακές πληροφορίες, οι οποίες τους παρέχονται μέσω των μονάδων ενοποίησης δικτύων. Για παράδειγμα, αναμένεται ότι η ακριβής θέση του χρήστη θα γίνεται διαθέσιμη από τη μονάδα ενοποίησης δικτύων – δηλαδή από το δίκτυο πρόσβασης – επιτρέποντας έτσι την ανάπτυξη εφαρμογών βασισμένων στη θέση του χρήστη (*Location-Based Services – LBS*). Στην πληροφορία αυτή, η μονάδα συγκέντρωσης υπηρεσιών μπορεί να προσθέσει τις προτιμήσεις του χρήστη και να χρησιμοποιήσει μηχανισμούς προστασίας προσωπικών δεδομένων για να περιορίσει τη χρήση της. Επιπλέον, η υπηρεσία μπορεί ακόμη να προσαρμοστεί στο μεταβαλλόμενο περιβάλλον και στο μεταβαλλόμενο πλαίσιο χρήσης: για παράδειγμα, ο χρήστης μπορεί να αλλάξει τερματικό, να μεταβεί σε ένα διαφορετικό δίκτυο όπου υπάρχει περισσότερο εύρος ζώνης διαθέσιμο, κ.λπ. Το Σχήμα 1-7 απεικονίζει το πώς ο χρήστης αντιλαμβάνεται την πρόσβαση στις διάφορες υπηρεσίες: δεν έχει – ούτε επιθυμεί να έχει – εικόνα των υποκείμενων τεχνολογιών και λειτουργιών.



Σχήμα 1-7. Άποψη του τελικού χρήστη

Είναι εμφανές ότι η έννοια της ‘ταυτότητας χρήστη’ διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στην ενοποιημένη παροχή των υπηρεσιών. Η έννοια αυτή περιλαμβάνει από την ταυτοποίηση και τον έλεγχο πρόσβασης στην υπηρεσία, μέχρι τη χρέωση και την έκδοση του λογαριασμού του χρήστη. Στο πλαίσιο των δικτύων και υπηρεσιών επόμενης γενιάς, η έννοια της ταυτότητας του χρήστη εμπεριέχει, επίσης, και το προφίλ των προτιμήσεών του. Η χρήση των πληροφοριών ταυτοποίησης με έναν ενοποιημένο τρόπο θα ενισχύσει την εδραίωση ενός τρόπου διαχείρισης που θα περιστρέφεται γύρω από τις προτιμήσεις του χρήστη.

(β) Συγκέντρωση υπηρεσιών

Ο ρόλος της μονάδας συγκέντρωσης υπηρεσιών είναι διττός: Από τη μια πλευρά, δρα ως μεσάζουσα μεταξύ του τελικού χρήστη – συνδρομητή και των προσφερόμενων υπηρεσιών. Από την άλλη, για τον πάροχο υπηρεσιών η μονάδα

συγκέντρωσης δρα ως μεσάζουσα μεταξύ αυτού και των πολλαπλών διαφορετικών παρόχων δικτύου, έτσι ώστε οι εφαρμογές να μη χρειάζεται να μεριμνούν για θέματα όπως ο προσδιορισμός του δικτύου στο οποίο βρίσκεται ο χρήστης μία δεδομένη στιγμή. Σε αυτό το μοντέλο, οι χρήστες αποκτούν μία και μόνο συνδρομή, με τη μονάδα συγκέντρωσης υπηρεσιών. Η μονάδα διαχειρίζεται αυτές τις συνδρομές και, επίσης, αναλαμβάνει την έκδοση του ενιαίου λογαριασμού, βασιζόμενη σε πληροφορίες χρεώσεων που λαμβάνει από τις υπηρεσίες, τους παρόχους δικτύου, αλλά και που διατηρεί η ίδια. Με αυτόν τον τρόπο, δεν παρέχει απλά τη διευκόλυνση της μιας και μοναδικής διαδικασίας ταυτοποίησης του χρήστη αλλά και, γενικότερα, ένα μοναδικό σημείο επαφής.

Στα συμβατικά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα η ταυτοποίηση του τερματικού (τηλεφωνικός αριθμός ή ταυτότητα) συχνά εξυπηρετούσε την ταυτοποίηση του χρήστη. Σε ετερογενή δίκτυα όμως, όπου οι χρήστες μπορούν να έχουν πρόσβαση σε πολλαπλά δίκτυα και, πιθανώς και σε πολλά διαφορετικά είδη τερματικών, κάτι τέτοιο δεν είναι πλέον εφικτό. Συνεπώς, υπάρχει η ανάγκη για ένα υψηλότερου επιπέδου αναγνωριστικό (ταυτότητα) που θα καθορίζει το πλαίσιο χρήσης μιας συνδρομής (*subscription context*). Οι πληροφορίες αυτές αποτελούν ένα προσωπικό περιβάλλον, χάρη στο οποίο ένας συνδρομητής μπορεί να έχει πρόσβαση σε υπηρεσίες μέσω διαφορετικών δικτύων πρόσβασης και τερματικών. Ένα τέτοιο περιβάλλον ανήκει σε ένα συγκεκριμένο χρήστη, παρ' όλα αυτά ένας χρήστης μπορεί να έχει πολλά τέτοια περιβάλλοντα (π.χ. ένα που θα του παραχωρηθεί από τον εργοδότη του και ένα προσωπικό), για τα οποία και θα λάβει τελικά έναν ξεχωριστό λογαριασμό. Τέτοια αναγνωριστικά μπορούν να δίνονται από την ίδια τη μονάδα συγκέντρωσης υπηρεσιών ή από τρίτους παρόχους ταυτοτήτων. Η παροχή ταυτοτήτων και, ενδεχομένως, σχετικών προφίλ πληροφοριών, είναι μια υπηρεσία όπως όλες οι άλλες, ενώ τεχνικές υλοποίησής της εφαρμόζονται ήδη στο χώρο του διαδικτύου. Πρόκειται για τεχνικές τύπου ιστού, που στηρίζονται, δηλαδή, στο πρωτόκολλο HTTP.

(γ) Ενοποίηση δικτύων

Η ενοποίηση δικτύων επιτρέπει στους χρήστες να μεταβαίνουν διαφανώς μεταξύ ετερογενών δικτύων και των αντίστοιχων διαχειριστικών περιοχών. Το σημείο κλειδί της λειτουργίας αυτής είναι η διαφάνεια.

Η ενοποίηση δικτύων παρέχει τη βασική λειτουργία διαχείρισης του σύνθετου δικτύου (παρακολούθηση κατάστασης, έλεγχος και συνολική διαχείριση πόρων με κατανομή της κίνησης πάνω στις διάφορες δικτυακές συνιστώσες) καθώς και μια αφαιρετική εικόνα των υποκείμενων δικτύων. Παρέχεται μ' αυτόν τον τρόπο, τόσο στα ανώτερα στρώματα υπηρεσιών όσο και στους χρήστες, η ψευδαίσθηση ενός και μόνο εικονικού δικτύου. Για παράδειγμα, παρέχεται διαφανής και ενοποιημένη ταυτοποίηση, έτσι ώστε οι χρήστες να μη χρειάζεται να καταχωρούνται (*login*) κάθε φορά που αλλάζουν δίκτυο πρόσβασης. Όσον αφορά τις υπηρεσίες, η ενοποίηση δικτύων αναλαμβάνει το θέμα της συνδεσιμότητας, δηλαδή της δυνατότητας πρόσβασης στο τερματικό κάθε τελικού χρήστη. Η διαδικασία αυτή εμπλέκει θέματα διευθυνσιοδότησης δικτύου και τεχνολογίες όπως το Mobile IP.

Παράλληλα, η ενοποίηση δικτύων μεταφέρει συγκεκριμένες πληροφορίες και λειτουργίες από το υποκείμενο δίκτυο στο ανώτερο στρώμα, π.χ. πληροφορίες για την τοποθεσία του χρήστη, μέσω ανοικτών και προκαθορισμένων διεπαφών. Για παράδειγμα, σε ένα δίκτυο UMTS, η γεωγραφική θέση του χρήστη μπορεί να ληφθεί χρησιμοποιώντας OSA/Parlay, αλλά ένα δημόσιο ασύρματο τοπικό δίκτυο μπορεί να παρέχει μια διαφορετική διεπαφή για την απόκτηση αυτής της πληροφορίας.

Συνοψίζοντας, θα λέγαμε ότι από τη μεριά του δικτύου απαιτούνται λειτουργίες οι οποίες αφορούν τη συνεχή παρακολούθηση του συνολικού τηλεπικοινωνιακού φορτίου, της κατάστασης και των αιτήσεων για υπηρεσία καθενός χρήστη ξεχωριστά, τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την ανακατανομή της συνολικής κίνησης στα διαφορετικά τμήματα της σύνθετης δικτυακής υποδομής (*traffic distribution*) και την αναδιάταξη καθενός από τα υποκείμενα δίκτυα (*network configuration*), για παράδειγμα έλεγχος ισχύος εκπομπής, δυναμική επιλογή συχνοτήτων κ.λπ. Έτσι, παρέχεται συνολικά, τόσο στα ανώτερα στρώματα υπηρεσιών όσο και στους χρήστες, η ψευδαίσθηση ενός και μόνο εικονικού δικτύου ([15],[18],[19]). Ως ένα ακόμη παράδειγμα δικτυακής λειτουργίας για την επίτευξη του στόχου 'ABC' αναφέρουμε αυτό της διαφανούς και ενοποιημένης ταυτοποίησης.

1.2.2. Τερματικές υποδομές και λειτουργίες

Ας εξετάσουμε τώρα από την πλευρά του τερματικού το ρόλο και τις λειτουργίες που αυτό θα πρέπει να αναλάβει σε ένα περιβάλλον ενοποιημένων υπηρεσιών και δικτύων. Τα σύγχρονα κινητά τερματικά αποτελούν μικρά, αλλά ολοένα και πιο ισχυρά, ανοικτά υπολογιστικά συστήματα, τα οποία μπορούν να εκτελέσουν υπηρεσίες διαφόρων τύπων. Είναι εφοδιασμένα με ένα λειτουργικό σύστημα γενικής χρήσης καθώς και με μία στοίβα IP, η οποία επιτρέπει την επικοινωνία με άλλους χρήστες και υπηρεσίες, μέσω του διαδικτύου. Ενσωματώνουν μια ισχυρή κεντρική μονάδα επεξεργασίας, μια αρκετά μεγάλη και έγχρωμη οθόνη, και αρκετή μνήμη ώστε να αποθηκεύουν και να εκτελούν επιπλέον εγκατεστημένο λογισμικό. Επιπλέον, το κινητό τερματικό μπορεί να είναι εφοδιασμένο με πολλές δικτυακές διεπαφές, έτσι ώστε να μπορεί να αποκτά πρόσβαση σε υπηρεσίες χρησιμοποιώντας διαφορετικούς τύπους δικτύων πρόσβασης. Οι αυξημένες αυτές δυνατότητες του τερματικού (υπολογιστική ισχύς, μνήμη, κ.λπ.) έχουν εισάγει την ιδέα επέκτασης της ευφυΐας από το δίκτυο προς το κινητό τερματικό.

Η ιδέα αυτή δεν είναι πρωτόγνωρη. Οι τηλεφωνικές συσκευές, για παράδειγμα, έχουν βελτιωθεί με την προσθήκη μνήμης που επιτρέπει την αποθήκευση συχνά καλούμενων αριθμών, την κλήση του τελευταίου αριθμού (*redial*), κ.λπ. Τελευταία, κι άλλες λειτουργίες έχουν προστεθεί στα κινητά τερματικά, όπως είναι η ενσωμάτωση προσωπικού τηλεφωνητή, πλοηγού ιστού και διακομιστή ηλεκτρονικού ταχυδρομείου.

Η εξέλιξη αυτή όμως δεν υπονοεί απαραίτητα ότι η απαιτούμενη ευφυΐα θα μετακινηθεί ολοκληρωτικά από το δίκτυο στο τερματικό. Αντίθετα, κάποιες υπηρεσίες μπορούν να υλοποιηθούν μόνο με τον συνδυασμό λειτουργικότητας τερματικού και δικτύου. Ένα απλό παράδειγμα της περίπτωσης αυτής είναι η υπηρεσία αναγνώρισης κλήσης, η οποία προϋποθέτει αφενός τη μεταφορά από το δίκτυο του καλούντος αριθμού μέσω σηματοδότησης, και αφετέρου τον εξοπλισμό του τερματικού με κάποιου είδους λογική και με μια μικρή οθόνη, προκειμένου να μεταφράσει αυτήν την πληροφορία και να την παρουσιάσει στον χρήστη. Με άλλα λόγια, η ευφυΐα των τερματικών δεν αντικαθιστά, αλλά είναι συμπληρωματική εκείνης του δικτύου ([18]).

Στο πλαίσιο αυτής της επέκτασης της ευφυΐας από το δίκτυο προς την πλευρά του τερματικού, ολοένα πιο σύνθετες εφαρμογές και καθήκοντα ανατίθενται στο

τερματικό. Σε ένα περιβάλλον 4G, ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα είναι η επιλογή δικτύου πρόσβασης.

Μέχρι τώρα, στα συστήματα 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς οι χρήστες σπάνια ενδιαφέρονται για την επιλογή δικτύων που ανήκουν σε διαφορετικούς παρόχους, και σχεδόν πάντα χρησιμοποιούν την προκαθορισμένη ‘αυτόματη επιλογή’ (*default setting*) του τερματικού τους. Συνεπώς, οι χρήστες συχνά καταλήγουν (π.χ. σε κατάσταση περιαγωγής) σε ένα ακριβό δίκτυο GSM ή UMTS, εξαιτίας αυτής της αυτόματης επιλογής. Οι πάροχοι των δικτύων μπορούν, έμμεσα ή άμεσα, να καθορίσουν τις προεπιλεγμένες ρυθμίσεις των τερματικών σχετικά με την επιλογή δικτύου και τις παραμέτρους μιας διαπομπής, ελέγχοντας έτσι πλήρως τις επιλογές των συνδρομητών τους. Για το λόγο αυτό, κατά πολλούς, η μελλοντική επικράτηση των παρόχων δικτύου θα εξαρτηθεί από το κατά πόσον οι πάροχοι θα μπορέσουν να ελέγξουν τις προεπιλεγμένες ρυθμίσεις των τερματικών ([19]).

Ωστόσο, σε ένα δικτυακά ετερογενές περιβάλλον, με πλήθος εναλλακτικών επιλογών, η επιλογή δικτύου πρόσβασης είναι προτιμότερο να μην παραμείνει αποκλειστικά στην πλευρά του δικτύου, αλλά να μεταφερθεί κυρίως προς στην πλευρά του τερματικού. Με τις ολοένα αυξανόμενες δυνατότητες των σύγχρονων τερματικών, κάτι τέτοιο είναι απόλυτα εφικτό.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της μετάβασης είναι πολλά και εστιάζονται τόσο στις τεχνικές όσο και στις εμπορικές διαστάσεις του προβλήματος:

- Το τερματικό γνωρίζει πόσες και ποιές δικτυακές διεπαφές διαθέτει και άρα ποιές τεχνολογίες πρόσβασης μπορεί να αξιοποιήσει και σε ποια δίκτυα μπορεί να συνδεθεί.
- Το τερματικό γνωρίζει πόσες και ποιές εφαρμογές ήδη εκτελούνται σε αυτό καθώς και ποιές ακόμη μπορεί να υποστηρίξει από άποψη δυνατοτήτων συσκευής, π.χ. ανάλυση εικόνας, μνήμη κ.λπ.
- Σε ένα ετερογενές περιβάλλον με πολλά υποστηριζόμενα δίκτυα πρόσβασης, οι πληροφορίες για τα δίκτυα μεταβάλλονται με γρήγορο ρυθμό. Τα κινητά τερματικά, όντας υπεύθυνα για το συνεχή έλεγχο εμφάνισης και εξαφάνισης δικτύων – όπως αυτές γίνονται αντιληπτές από τις δικτυακές διεπαφές του – έχουν άμεση πρόσβαση στα χαρακτηριστικά κάθε δικτύου, όπως είναι η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος, το διαθέσιμο εύρος ζώνης στα κοντινά σημεία πρόσβασης, κ.λπ.

- Ο χρήστης είναι σε άμεση επαφή με το τερματικό και άρα οι προτιμήσεις του μπορούν να αποθηκευτούν και να γνωστοποιηθούν πιο εύκολα και πιο γρήγορα σε αυτό.
- Ο χρήστης τελικά αποκτά σημαντική αυτονομία έναντι του δικτύου, και αποφασίζει ο ίδιος για αυτό που πιστεύει ότι είναι το πιο συμφέρον.

Ας σημειωθεί εδώ ότι αναμένεται η κεντρική διαχειριστική μονάδα του συστήματος πολλαπλών τεχνολογιών πρόσβασης να ενημερωθεί ή να ερωτηθεί σχετικά με την επιλογή του τερματικού, καθώς το τελευταίο είναι ενήμερο μόνο για την τοπική διαθεσιμότητα των πόρων (διαθέσιμοι πόροι στα σημεία πρόσβασης που βρίσκονται στην εμβέλειά του) και δεν έχει μια συνολική εικόνα της σύνθετης υποδομής ή πιθανών καταστάσεων συμφόρησης σε ορισμένες περιοχές. Παρά ταύτα, η αυτονομία που εισάγει στο κινητό τερματικό μια τέτοια προσέγγιση είναι σημαντική, καθώς απαλλάσσει τη μονάδα διαχείρισης του συστήματος από μεγάλο υπολογιστικό φορτίο.

Η ανάθεση της επιλογής δικτύου πρόσβασης στο τερματικό εγείρει, όπως διαφαίνεται και από τα παραπάνω, ορισμένα σημαντικά ζητήματα και απαιτήσεις:

- Η διαδικασία της επιλογής πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο διαφανής προς το χρήστη: να μην απαιτεί δηλαδή τη διαρκή προσοχή και παρέμβασή του. Έτσι, ο χρήστης θα μπορεί να απολαμβάνει ανενόχλητος τις υπηρεσίες που επιθυμεί.
- Οι προτιμήσεις του χρήστη πρέπει να γνωστοποιούνται στο κινητό τερματικό. Ο χρήστης πρέπει να είναι σε θέση να καθορίζει τις προτιμήσεις εύκολα και γρήγορα. Διαφορετικά, ενδέχεται η πλειοψηφία των χρηστών να διατηρεί τις προεπιλεγμένες από τους παρόχους ρυθμίσεις και μόνο μια μικρή μειοψηφία να μπορεί να εκμεταλλεύεται πλήρως τις δυνατότητες της συσκευής της. Προφανώς, ο καθορισμός ενός πολύπλοκου συνόλου κανόνων που να ρυθμίζουν τις κατάλληλες μεταβάσεις (διαπομπές) δεν είναι ο καλύτερος τρόπος για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο, καθώς είναι και σύνθετος και χρονοβόρος. Αντίθετα, η χρήση μιας λειτουργικής και φιλικής προς το χρήστη γραφικής διεπαφής (*Graphical User Interface – GUI*) είναι η πιο ενδεδειγμένη λύση.
- Η διαδικασία επιλογής δικτύου πρόσβασης πρέπει να καταλήγει σε ένα αποτέλεσμα (ανάθεση) που να είναι πάντα προς το συμφέρον του χρήστη, ικανοποιώντας στο ακέραιο τις ανάγκες και τις προτιμήσεις του.
- Τέλος, επιθυμητό θα ήταν το κινητό τερματικό να ενσωματώνει τέτοια ευφυΐα ώστε να προσαρμόζεται αυτόματα στις προτιμήσεις του χρήστη, ανάλογα με το

εκάστοτε πλαίσιο χρήσης (τοποθεσία χρήστη, ώρα της ημέρας, τύπος τερματικού που χρησιμοποιείται, τύπος περιεχομένου που ζητείται κ.λπ.), και να κατευθύνεται προς τη βέλτιστη επιλογή δικτύου πρόσβασης με ελάχιστη παρέμβαση του χρήστη.

1.2.3. Απαιτήσεις συστήματος διαχείρισης κινητού τερματικού

Τα παραπάνω καθιστούν αναγκαία την ανάπτυξη ενός διαχειριστικού πλαισίου για κινητά τερματικά το οποίο θα είναι σε θέση να υποστηρίζει μια σειρά από λειτουργίες του τερματικού, από την ανίχνευση και αξιολόγηση των διαθέσιμων σημείων πρόσβασης στη γειτονιά του, έως τη διαχείριση και την ανανέωση του προφίλ του χρήστη και την κατάλληλη επιλογή των δικτυακών διεπαφών μέσω των οποίων θα ληφθούν οι ζητούμενες υπηρεσίες με τον πιο αποδοτικό και οικονομικό τρόπο. Πιο συγκεκριμένα, το Σύστημα Διαχείρισης Κινητού Τερματικού (*Mobile Terminal Management System – MTMS*) θα πρέπει να επιτελεί τις ακόλουθες λειτουργίες:

- (α) Να ανιχνεύει τα διαθέσιμα σημεία πρόσβασης στην ευρύτερη περιοχή του.
- (β) Να λαμβάνει και να επεξεργάζεται μετρήσεις που αφορούν στις παραμέτρους και τις δυνατότητες αυτών των διαθέσιμων σημείων πρόσβασης (π.χ. υποστηριζόμενη τεχνολογία, ισχύς λαμβανόμενου σήματος, διαθέσιμο εύρος ζώνης, κ.λπ.).
- (γ) Να επεξεργάζεται το προφίλ του χρήστη.
- (δ) Να παρέχει έναν εύχρηστο μηχανισμό μέσω του οποίου ο χρήστης θα μπορεί να προσδιορίζει ποιός παράγοντας είναι για αυτόν ο πιο σημαντικός τη δεδομένη στιγμή, προκειμένου για την επιλογή δικτύου πρόσβασης, ποιός ο δεύτερος κατά σειρά προτεραιότητας, κ.ο.κ. Τέτοιοι παράγοντες είναι η προτιμώμενη τεχνολογία πρόσβασης, ο προτιμώμενος πάροχος δικτύου, το κόστος το οποίο ο χρήστης προτίθεται να πληρώσει και το επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας στο οποίο επιθυμεί να λάβει κάθε υπηρεσία. Εναλλακτικά, το MTMS θα πρέπει να ενσωματώνει έναν μηχανισμό αυτόματης προσαρμογής στις προτιμήσεις του χρήστη ανάλογα με το εκάστοτε πλαίσιο χρήσης. Να διαθέτει δηλαδή ένα σύστημα που να είναι σε θέση να ανιχνεύει τις διάφορες παραμέτρους που καθορίζουν το πλαίσιο χρήσης (π.χ. ώρα της ημέρας, θέση χρήστη, τύπος περιεχομένου εφαρμογής, συμβαλλόμενος συνόδου επικοινωνίας κ.λπ.) και βάσει αυτού καθώς και της ζητούμενης υπηρεσίας να προσδιορίζει αυτόματα την πιθανότερη διάταξη (κατά σειρά προτεραιότητας) των προτιμήσεων του χρήστη.

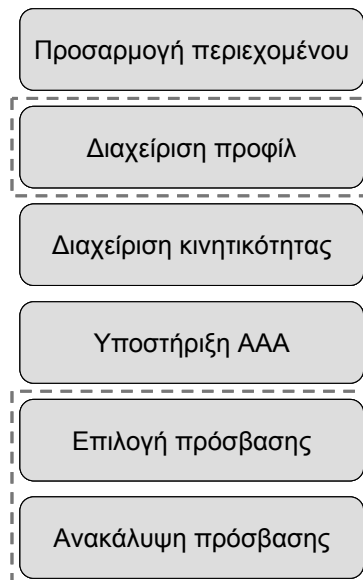
(ε) Να λαμβάνει τη βέλτιστη απόφαση σχετικά με την ανάθεση των υπηρεσιών σε σημεία πρόσβασης και σε επίπεδα ποιότητας, συνυπολογίζοντας τις δυνατότητες των διαθέσιμων σημείων πρόσβασης, τις προτιμήσεις του χρήστη και τις απαιτήσεις των υπηρεσιών στο κινητό τερματικό.

1.3. Αντικείμενο διατριβής

Με βάση τις απαιτήσεις αυτές, εντοπίζονται οι ακόλουθες περιοχές έρευνας σε ό,τι αφορά τη διαχείριση τερματικών σε περιβάλλοντα 4^{ης} γενιάς:

- Διαχείριση επιλογών πρόσβασης (ανακάλυψη και επιλογή βέλτιστης πρόσβασης - *access discovery and selection*) – αλγόριθμοι επιλογής βέλτιστου σημείου πρόσβασης, κατανομής υπηρεσιών σε δικτυακές επαφές και σε επίπεδα ποιότητας.
- Διαχείριση προφίλ χρήστη (*profile handling*) – τεχνικές μοντελοποίησης προτιμήσεων χρήστη, τεχνικές συμπερασμού και μάθησης των προτιμήσεων του χρήστη με βάση το πλαίσιο χρήσης.

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται δύο προβλήματα που εμπίπτουν στις ερευνητικές αυτές περιοχές. Με αναφορά το λειτουργικό διάγραμμα *Always Best Connected* του Σχήματος 1-1, η συνεισφορά της παρούσας εργασίας εστιάζεται στις περιοχές ανακάλυψης και επιλογής πρόσβασης και διαχείρισης προφίλ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-8.



Σχήμα 1-8. Συνεισφορά εργασίας με αναφορά στο μοντέλο *Always Best Connected*

Στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικότερα οι ανοιχτές αυτές περιοχές έρευνας, οι σχετικές εργασίες και λύσεις που έχουν προταθεί μέχρι σήμερα στη διεθνή

βιβλιογραφία, καθώς και η προσέγγιση που προτείνεται στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής.

1.3.1. Διαχείριση επιλογών πρόσβασης (*access discovery and selection*)

1.3.1.1. Επιλογή δικτύου πρόσβασης

Μια βασική συνιστώσα της λειτουργικότητας των συστημάτων πέραν της τρίτης γενιάς αφορά τη διαχείριση των επιλογών πρόσβασης των χρηστών της σύνθετης αρχιτεκτονικής. Η λειτουργικότητα αυτή μπορεί να θεωρηθεί ότι εντάσσεται στο γενικότερο πρόβλημα της διαχείρισης της κινητικότητας, η οποία περιλαμβάνει θέματα όπως η ικανότητα διατήρησης μιας συνόδου όταν το τερματικό κινείται μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης, η διατήρηση της επικοινωνίας με το χρήστη στο τρέχον δίκτυο οποιαδήποτε χρονική στιγμή, καθώς και η ικανότητα διατήρησης μιας συνόδου όταν ο χρήστης εναλλάσσει συσκευές.

Από αυτή την ομάδα προβλημάτων, ένα από τα σημαντικότερα, τόσο από ερευνητική / θεωρητική όσο και από πρακτική σκοπιά, εμφανίζεται το πρόβλημα ανίχνευσης των εναλλακτικών επιλογών πρόσβασης του τερματικού καθώς και της πραγματοποίησης της σύνδεσής του στην επιλογή εκείνη που εγγυάται τη βέλτιστη παροχή υπηρεσίας. Αυτό σημαίνει ότι όλες οι υλοποιήσεις συστημάτων πολλαπλών τεχνολογιών πρόσβασης περιλαμβάνουν κάποια λειτουργικότητα υπεύθυνη για την οδήγηση των τερματικών των χρηστών στο κατάλληλο επίπεδο ποιότητας καθώς και στο κατάλληλο δίκτυο για κάθε υπηρεσία, κατά τρόπο διαφανή.

Αυτό συνιστά ένα βραχυπρόθεσμο / μεσοπρόθεσμο πρόβλημα βελτιστοποίησης, το οποίο στο εξής θα ονομάζουμε πρόβλημα *Ευφυούς Επιλογής Πρόσβασης (Intelligent Access Selection – IAS)*, που στοχεύει στην ανάθεση του τερματικού σε ένα συγκεκριμένο δίκτυο, και η λύση του οποίου επιτρέπει την επιλογή της κατάλληλης ασύρματης τεχνολογίας μέσω της οποίας το τερματικό θα λαμβάνει τις υπηρεσίες αποτελεσματικά από άποψη κόστους και ποιότητας υπηρεσίας, με προσέγγιση πραγματικού χρόνου. Η λύση δηλαδή του προβλήματος συνίσταται σε μια βέλτιστη ανάθεση υπηρεσιών σε δίκτυα πρόσβασης και σε επίπεδα ποιότητας.

1.3.1.2. Σχετικές εργασίες

Η προσέγγιση που έχει ακολουθηθεί, τόσο στο πλαίσιο της ευρωπαϊκής επιδοτούμενης έρευνας όσο και σε ανεξάρτητες εργασίες, αφορά, ως επί το πλείστον, την ενσωμάτωση του προβλήματος ανακάλυψης και επιλογής βέλτιστης πρόσβασης του κινητού τερματικού στο συνολικότερο πρόβλημα της (ανα)κατανομής του

συνολικού τηλεπικοινωνιακού φορτίου που επιβαρύνει το σύστημα, και μάλιστα σε μια πιο μακροπρόθεσμη / μακροσκοπική κλίμακα.

Στο IST project MONASIDRE ([9]) 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 (κάθετες διαπομπές – *vertical handovers*), μέσω της συνεργασίας των διαχειριστικών μονάδων κάθε δικτύου.

Στις παραπομπές [23],[24],[25] αναλύονται οι τεχνικές που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο του προγράμματος αυτού, για κατανομή κίνησης και διαμόρφωση υπηρεσιών.

Στο IST project CREDO ([20]) ακολουθήθηκε η ίδια λογική διαχείρισης της σύνθετης δικτυακής υποδομής (GPRS, WLAN, DVB-T), αυτή 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 προκειμένου για την οδήγηση του πρώτου στο καλύτερο δίκτυο για κάθε αιτούμενη υπηρεσία ([21],[26],[27],[28]), χωρίς όμως να γίνεται ιδιαίτερη αναφορά και χρήση του προφίλ και των προτιμήσεων του χρήστη, παρά μόνο σε επίπεδο υψηλής – χαμηλής ποιότητας υπηρεσίας.

Το IST project DAIDALOS (Phase I) ([10]) επιχειρεί να ενοποιήσει ένα μεγάλο πλήθος τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης (WLAN, DVB-T, TD-CDMA, Bluetooth, κ.λπ.) ενσωματώνοντας ιδέες της διεισδυτικής υπολογιστικής (*pervasive computing*) στο επίπεδο των υπηρεσιών, και κάνοντας εκτεταμένη χρήση του IPv6 και τεχνικών εξασφάλισης της ποιότητας υπηρεσίας με σκοπό τη βελτιστοποίηση παραμέτρων της κάθετης διαπομπής ([29],[30],[31]). Εδώ, το κινητό τερματικό θεωρείται ότι ενσωματώνει ένα μηχανισμό λήψης απόφασης σχετικά με το βέλτιστο σημείο πρόσβασης, ο οποίος όμως δε λαμβάνει υπόψη τις τρέχουσες υπηρεσίες αλλά μόνο τη διαθεσιμότητα των γειτονικών σημείων πρόσβασης και ένα προφίλ χρήστη το οποίο προσδιορίζει τη σχετική προτίμηση του χρήστη για υψηλή–χαμηλή ποιότητα υπηρεσίας, υψηλό–χαμηλό κόστος και τύπο τεχνολογίας πρόσβασης ([32],[33]).

Σε παρόμοιες κατευθύνσεις κινούνται και άλλες επιστημονικές εργασίες, δίνοντας έμφαση σε διάφορες πτυχές του προβλήματος της ανακάλυψης και της επιλογής

πρόσβασης σε ετερογενή δίκτυα: Στις παραπομπές [34],[35] γίνεται εφαρμογή τη έννοιας της επαναδιαμόρφωσης (*reconfigurability*), η οποία αφορά τη δυνατότητα των στοιχείων του δικτύου να επιλέγουν δυναμικά και να προσαρμόζονται στις πιο κατάλληλες τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης, προκειμένου να χειριστούν συνθήκες που προκύπτουν σε συγκεκριμένα τμήματα της περιοχής εξυπηρέτησης και σε συγκεκριμένες χρονικές ζώνες της ημέρας. Στις παραπομπές [36],[37],[38],[39] το πρόβλημα της επιλογής πρόσβασης αντιμετωπίζεται σε συνάρτηση με συγκεκριμένες απαιτήσεις των υπηρεσιών και στο πλαίσιο συνεργαζόμενων πλατφορμών υπηρεσιών (*federating service platforms*). Στις παραπομπές [21],[22] παρουσιάζεται και επιλύεται το πρόβλημα της διαμόρφωσης υπηρεσιών και της (ανα)κατανομής της τηλεπικοινωνιακής κίνησης (*traffic distribution*) σε σύνθετες δικτυακές υποδομές, ορίζοντας κατάλληλες λειτουργικές συνιστώσες στο δίκτυο. Τέλος, στις παραπομπές [40],[41],[42] προτείνονται δικτυακές διαχειριστικές πλατφόρμες οι οποίες αντιμετωπίζουν το πρόβλημα επιλογής πρόσβασης του τερματικού σε μακροσκοπική κλίμακα, ενώ δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη βελτίωση των παραμέτρων της κάθετης διαπομπής ([43]). Ένα βασικό μειονέκτημα που χαρακτηρίζει τις περισσότερες από τις λύσεις που συζητήθηκαν στα παραπάνω είναι η λογική συγκέντρωσης ολόκληρου, ή του μεγαλύτερου μέρους, του υπολογιστικού φορτίου που αφορά τις κάθετες διαπομπές των τερματικών στην κεντρική διαχειριστική μονάδα του συστήματος, με προφανή προβλήματα υπερφόρτωσης, καθυστέρησης και κινδύνου δυσλειτουργίας. Ένα δεύτερο μειονέκτημα αφορά τη λογική που συχνά υιοθετείται και η οποία δεν θεωρεί κάθε υπηρεσία που λαμβάνεται στο τερματικό ως ξεχωριστό αντικείμενο διαπομπής, παρά εξυπηρετεί όλες τις υπηρεσίες μέσω μιας μοναδικής ενεργούς δικτυακής διεπαφής στο τερματικό, γεγονός που καθιστά την ταυτόχρονη χρήση πολλών υπηρεσιών στο ίδιο τερματικό μη συμφέρουσα. Τρίτον, το προφίλ και οι προτιμήσεις του χρήστη δεν αξιολογούνται στη διαδικασία επιλογής πρόσβασης παρά μόνο σε επίπεδο υψηλής – χαμηλής ποιότητας υπηρεσίας.

1.3.2. Διαχείριση προφίλ χρήστη (*profile handling*)

1.3.2.1. Context-aware συστήματα

Μια από τις βασικές συνιστώσες και προκλήσεις που καλούνται να ικανοποιήσουν τα εξελισσόμενα συστήματα πέραν της τρίτης γενιάς αφορά την ικανότητα ανίχνευσης και αξιοποίησης ενός ευρύτατου συνόλου πληροφοριών που χαρακτηρίζουν το λεγόμενο ‘πλαίσιο χρήσης’ (*context*) μιας υπηρεσίας από ένα

χρήστη. Ο όρος πλαίσιο χρήσης αναφέρεται σε χαρακτηριστικά του χρήστη και της εμπειρίας του κατά τη χρήση του συστήματος (συμπεριλαμβανομένων των συνθηκών, των προτιμήσεων και του προφίλ του χρήστη, και σχετικών ιστορικών και άλλων στοιχείων), τα οποία αξιοποιούμενα από το τηλεπικοινωνιακό σύστημα το υποβοηθούν στην εκπλήρωση των στόχων του ([44],[45],[46]).

Η κινητικότητα των χρηστών δημιουργεί καταστάσεις όπου το πλαίσιο χρήσης αποκτά δυναμική φύση: οι ανάγκες αλληλεπίδρασης και χρήσης μεταβάλλονται με γρήγορους ρυθμούς. Αυτό σημαίνει ότι τα συστήματα διαχείρισης των συστημάτων 4^{ης} γενιάς θα πρέπει να ενσωματώνουν ένα μηχανισμό προσαρμογής των υπηρεσιών και των επιλογών των τερματικών συσκευών σε αυτό το διαρκώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον ([47],[48],[49]).

Επιπλέον, ένα από τα βασικά κριτήρια που επηρεάζει τον καθορισμό σημείου / δικτύου πρόσβασης του τερματικού, σε ένα περιβάλλον πολλαπλών τεχνολογιών πρόσβασης, είναι το προφίλ και οι προτιμήσεις του χρήστη, τα οποία μπορούν επίσης να αποτελούν συναρτήσεις του εκάστοτε πλαισίου χρήσης. Για παράδειγμα, άλλη προτεραιότητα ενδέχεται να έχει η ποιότητα υπηρεσίας έναντι του κόστους σε ένα επαγγελματικό πλαίσιο χρήσης (*business context*) και άλλη σε ένα πλαίσιο χρήσης ελεύθερου χρόνου (*leisure context*).

Μπορούμε να επισημάνουμε δύο κύριες περιοχές έρευνας γύρω από την αξιοποίηση πληροφορίας πλαισίου χρήσης για τη διαχείριση κινητικότητας τερματικών σε περιβάλλοντα 4^{ης} γενιάς:

- Επεξεργασία και ‘αποκωδικοποίηση’ της πληροφορίας πλαισίου χρήσης (θέση του χρήστη, ώρα και ημέρα, τύπος εφαρμογής που χρησιμοποιείται κ.λπ.) με σκοπό τον καθορισμό του πλαισίου χρήσης.
- Αξιοποίηση της γνώσης του πλαισίου χρήσης για τη χρήση των αντίστοιχων προτιμήσεων του χρήστη στη διαδικασία επιλογής δικτύου / σημείου πρόσβασης.

Αυτές οι δύο λειτουργίες συνιστούν τις δύο πτυχές του προβλήματος *Μοντελοποίησης και Προσαρμογής στις Προτιμήσεις του Χρήστη (Modelling and Adaptation to User Preferences – MAUP)*, το οποίο αποτελεί μια από τις βασικές ενότητες της παρούσας εργασίας. Η επίλυση του προβλήματος MAUP δίνει τη δυνατότητα στο κινητό τερματικό να οδηγείται κάθε στιγμή στις αναθέσεις εκείνες

των υπηρεσιών σε δίκτυα και σε επίπεδα ποιότητας που ικανοποιούν τις προτιμήσεις του χρήστη με ορισμένη προτεραιότητα, ανάλογα με το πλαίσιο χρήσης.

1.3.2.2. Σχετικές εργασίες

Η κατάστρωση προφίλ χρήστη (*user profiling*) και πιο συγκεκριμένα η μοντελοποίηση των προτιμήσεων του χρήστη (*user preference modelling*) με σκοπό τη χρήση τους ως παραμέτρων στη διαδικασία επιλογής δικτύου / σημείου πρόσβασης έχει μελετηθεί σε πολύ λίγα άρθρα.

Στις παραπομπές [55] και [56] παρουσιάζονται τα προφίλ επικοινωνίας για τερματικά Software Defined Radio (SDR [52]), και χρησιμοποιείται μια XML δομή για την αναπαράσταση των διαφορετικών προφίλ επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένων αυτών του τερματικού, του χρήστη, της υπηρεσίας και του δικτύου. Οι προτιμήσεις του χρήστη μοντελοποιούνται ως γνωρίσματα (*attributes*): για παράδειγμα, η προτίμηση 'κόστος', η οποία αποτελεί μια από τις παραμέτρους του στατικού προφίλ χρήστη, υποδηλώνει εάν ο χρήστης ενδιαφέρεται περισσότερο για το κόστος ή την ταχύτητα των συναλλαγών του.

Οι παραπομπές [57] και [58] προτείνουν τα 'προσαρμοστικά προφίλ χρήστη' ως λύση για την αντιμετώπιση της πολυπλοκότητας που εισάγουν οι πολλαπλές επιλογές δικτύου πρόσβασης και οι πληροφορίες που αφορούν τη θέση του χρήστη. Στην προσέγγιση αυτή έχει χρησιμοποιηθεί η συλλογιστική βασισμένη σε περιπτώσεις (*case-based reasoning*). Με χρήση της τεχνικής αυτής, όπως και άλλων τεχνικών μηχανικής μάθησης (*machine learning*), όπως είναι τα νευρωνικά δίκτυα, τα πιθανολογικά μοντέλα κ.α., μια εφαρμογή λογισμικού μπορεί να 'μάθει' τις προτιμήσεις του χρήστη αυτόματα από μελέτη της συμπεριφοράς του ([59]).

Στο χώρο της ανάκτησης πληροφορίας (*information retrieval*), έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως τα μπεϋζιανά δίκτυα, με στόχο την κατασκευή προφίλ και τη μοντελοποίηση των προτιμήσεων του χρήστη ([50],[59],[60],[61]). Στην παραπομπή [50] επεκτείνονται τα παραδοσιακά μπεϋζιανά δίκτυα σε πολυ-επίπεδα πιθανολογικά μοντέλα, τα οποία ονομάζονται μπεϋζιανά μετα-δίκτυα (*Bayesian meta-networks*). Στην παραπομπή [59] προτείνεται μια τεχνική που συνδυάζει τη συλλογιστική βασισμένη σε περιπτώσεις με τα μπεϋζιανά δίκτυα, με σκοπό την κατασκευή προφίλ χρηστών που θα τους υποβοηθήσουν στην προσπέλαση μιας βάσης δεδομένων.

Ένα κενό που εντοπίζεται στην έρευνα γύρω από τη διαχείριση προφίλ χρηστών σε περιβάλλοντα ασύρματων επικοινωνιών και πολλαπλών τεχνολογιών πρόσβασης

αφορά τη συνδυασμένη θεώρηση αυτού του προβλήματος με το πρόβλημα επιλογής βέλτιστης πρόσβασης των τερματικών. Η παρούσα εργασία θα συνεισφέρει σε αυτό ακριβώς το σημείο, στην αντιμετώπιση δηλαδή των ανοιχτών θεμάτων γύρω από τη διαχείριση των προτιμήσεων του χρήστη – όπως αυτά αναλύθηκαν στα παραπάνω – με σκοπό τη χρησιμοποίησή τους στη διαδικασία επιλογής του βέλτιστου δικτύου πρόσβασης.

1.4. Διάρθρωση διατριβής

Η παρούσα διατριβή είναι δομημένη ως εξής: το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί μια εισαγωγή στις πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις στο χώρο των ασύρματων τηλεπικοινωνιών, στα χαρακτηριστικά που συνθέτουν την εικόνα των B3G/4G συστημάτων και στις απαιτήσεις που προκύπτουν για τη διαχείριση κινητών τερματικών. Στη συνέχεια (Κεφάλαιο 2), παρουσιάζεται ένα *Σύστημα Διαχείρισης Κινητού Τερματικού (MTMS)* και αναλύονται οι επί μέρους συνιστώσες του, συγκεκριμένα η συνιστώσα *Προσαρμογής στους Οδηγούς Δικτύου*, η συνιστώσα *Προτιμήσεων Χρήστη* και η συνιστώσα *Διαχείρισης Κινητικότητας*, καθώς και οι αντίστοιχες λειτουργίες τους. Στο Κεφάλαιο 3 δίνεται η αναλυτική περιγραφή και μια λύση στο πρόβλημα *Ευφυούς Επιλογής Πρόσβασης (IAS)* και παρουσιάζονται σχετικά αποτελέσματα. Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται μια εισαγωγή στις μευζιανές μεθόδους μοντελοποίησης και μάθησης οι οποίες θα αποτελέσουν το θεωρητικό υπόβαθρο της αντιμετώπισης του προβλήματος *Μοντελοποίησης και Προσαρμογής στις Προτιμήσεις του Χρήστη (MAUP)*, του οποίου η μαθηματική περιγραφή και η λύση δίνονται στο Κεφάλαιο 5. Η διατριβή κλείνει συνοψίζοντας τα συμπεράσματα που προκύπτουν.

Στη συνέχεια παρατίθενται πιο αναλυτικά τα περιεχόμενα των κεφαλαίων που συνιστούν το βασικό κορμό της διατριβής.

1.4.1. Αρχιτεκτονική διαχείρισης κινητού τερματικού

Σε αυτό το κεφάλαιο προτείνεται μια αρχιτεκτονική διαχείρισης του κινητού τερματικού η οποία ενσωματώνει λειτουργικότητα για τη δυναμική και αυτόνομη επιλογή δικτύου / σημείου πρόσβασης καθώς και για την αυτόματη προσαρμογή του προφίλ χρήστη στο εκάστοτε πλαίσιο χρήσης.

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική αναλύεται σε τρεις συνιστώσες:

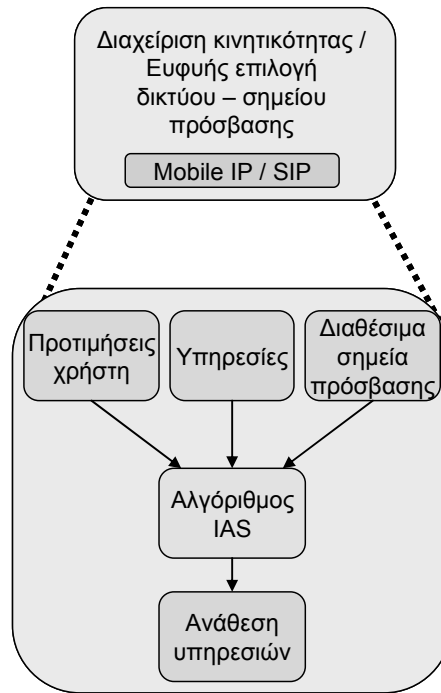
- *Προσαρμογής στους Οδηγούς Δικτύου (Network Interface Adaptation Module – NIAM)*, υπεύθυνη για την ανίχνευση των διαφορετικών διεπαφών που είναι

παρούσες στο τερματικό, για την παρακολούθηση της κατάστασης των αντίστοιχων δικτύων, για τη συλλογή πληροφοριών από κάθε διεπαφή και για την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση της κατάλληλης διεπαφής.

- *Προτιμήσεων Χρήστη (User Preferences Module – UPM)*, υπεύθυνη για την αποθήκευση, επεξεργασία και πρόσβαση στο προφίλ του χρήστη, καθώς και για την επίλυση του προβλήματος MAUP.
- *Διαχείρισης Κινητικότητας (Mobility Management Module – MMM)*, υπεύθυνη για τη διαχείριση όλων των ενεργειών που σχετίζονται με την επιλογή δικτύου / σημείου πρόσβασης, και κυρίως για την επίλυση του προβλήματος IAS.

1.4.2. Ευφυής επιλογή πρόσβασης

Σε ό,τι αφορά την ανακάλυψη και την επιλογή βέλτιστης πρόσβασης του κινητού τερματικού σε περιβάλλον πολλαπλών τεχνολογιών πρόσβασης, προτείνεται στην παρούσα εργασία η υλοποίηση μιας διαχειριστικής μονάδας στο κινητό τερματικό η οποία θα ενσωματώνει λειτουργικότητα τόσο για τη διαχείριση της κινητικότητας στο στρώμα ζεύξης δεδομένων (υπολογισμός βέλτιστου σημείου πρόσβασης και ανάθεση υπηρεσιών σε επίπεδα ποιότητας, έλεγχος εγκατάστασης και απόλυσης συνδέσεων στο επίπεδο της δικτυακής διεπαφής) όσο και σε υψηλότερα στρώματα (διαφάνεια διαπομπών στο επίπεδο IP, έλεγχος εφαρμογών). Η μεν πρώτη πτυχή της διαχείρισης κινητικότητας θα εξυπηρετείται από τη λειτουργία ενός κατάλληλου αλγορίθμου που θα επιλύει το πρόβλημα IAS, η δε δεύτερη από την ενσωμάτωση κατάλληλων λύσεων πρωτοκόλλων όπως είναι το Mobile IP ([63],[64],[65],[66]) και το SIP ([62]). Θεωρούμε δηλαδή ότι το κινητό τερματικό υλοποιεί την έννοια της πολυεστιακότητας (*multihoming*), την ικανότητα ταυτόχρονης χρήσης πολλών δικτυακών διεπαφών, διατηρώντας διαφορετική διεύθυνση δικτύου πάνω από κάθε διεπαφή. Οι λειτουργίες αυτές παρουσιάζονται στο Σχήμα 1-9.



Σχήμα 1-9. Διαχείριση κινητικότητας στο κινητό τερματικό

Η λειτουργία (αλγόριθμος) IAS είναι υπεύθυνη για τη βέλτιστη ανάθεση των υπηρεσιών που λαμβάνονται στο τερματικό σε επίπεδα ποιότητας και σε σημεία πρόσβασης. Αυτό σημαίνει ότι ο αλγόριθμος IAS είναι σε θέση να προσδιορίζει για κάθε υπηρεσία τόσο την τοπική διεπαφή (τεχνολογία) όσο και το δικτυακό σημείο πρόσδεσης (σημείο / δρομολογητής πρόσβασης) μέσω των οποίων αυτή θα πρέπει να παρασχεθεί. Αυτό ισχύει και για τις διαπομπές του τερματικού που αφορούν τη μετακίνηση εντός της ίδιας τεχνολογίας πρόσβασης (οριζόντια διαπομπή – *horizontal handover*) αλλά και για τις διαπομπές που αφορούν τη μετακίνηση μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης (κάθετη διαπομπή – *vertical handover*) ([67],[68]).

Στο σχετικό κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά το πρόβλημα IAS: δίνεται η πλήρης μαθηματική του διατύπωση καθώς και ο προτεινόμενος ευριστικός αλγόριθμος για την επίλυσή του. Εξετάζεται η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου αυτού και, τέλος, παρουσιάζονται αποτελέσματα προσομοιώσεων ενδεικτικά της λειτουργίας του.

1.4.3. Μοντελοποίηση και προσαρμογή στις προτιμήσεις του χρήστη

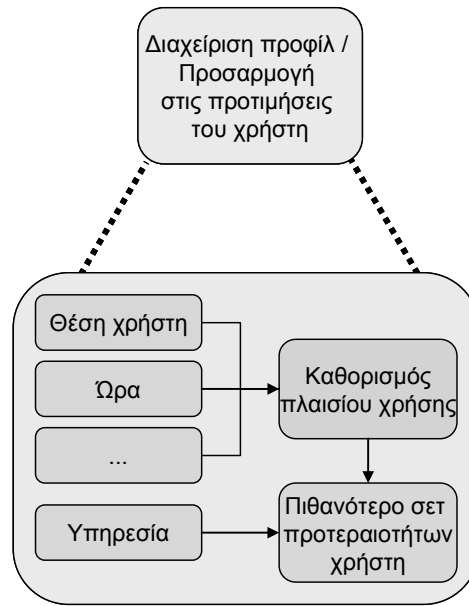
Σε ό,τι αφορά τη διαχείριση του προφίλ του χρήστη και την προσέγγιση του προβλήματος MAUP, προτείνονται στην παρούσα διατριβή δύο εναλλακτικές υλοποιήσεις: η πρώτη αφορά το σχεδιασμό μιας γραφικής διεπαφής, μέσω της οποίας

ο χρήστης θα μπορεί να προσδιορίζει τις προτιμήσεις του, και η οποία θα του δίνει τη δυνατότητα να αναθέτει διαφορετικές προτεραιότητες σε παραμέτρους οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν τη διαδικασία επιλογής δικτύου πρόσβασης (κόστος, ποιότητα υπηρεσίας, προτιμώμενος πάροχος δικτύου, προτιμώμενος τύπος τεχνολογίας). Η δεύτερη υλοποίηση που προτείνεται αφορά την αυτόματη ανάθεση προτεραιοτήτων στις προαναφερθείσες παραμέτρους, από ένα σύστημα που θα συνδυάζει για αυτό το σκοπό τις πληροφορίες που αφορούν το πλαίσιο χρήσης και τον τύπο της εκάστοτε εφαρμογής.

Στο πλαίσιο της τελευταίας αυτής υλοποίησης, παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5 μια προσέγγιση του προβλήματος MAUP βασισμένη σε ένα σύστημα μοντελοποίησης των προτιμήσεων του χρήστη και των μεταξύ τους σχέσεων με χρήση μπεϋζιανών μετα-δικτύων ([51],[53],[54]). Στόχος του συστήματος αυτού είναι να μπορεί, κάθε φορά που θα εκκινείται ο αλγόριθμος IAS, να προβλέπει το πιθανότερο σετ των προτιμήσεων του χρήστη. Στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου παρουσιάζονται κατάλληλες διαδικασίες μέσω των οποίων:

- Συμπεραίνεται το εκάστοτε πλαίσιο χρήσης, δεδομένων των πληροφοριών πλαισίου χρήσης (θέση του χρήστη, ώρα και ημέρα, τύπος εφαρμογής που χρησιμοποιείται, τύπος του χρησιμοποιούμενου τερματικού, τύπος του περιεχομένου στο οποίο ζητείται πρόσβαση – π.χ. ιστοσελίδα με επαγγελματικό περιεχόμενο, κλήση σε οικογενειακό τηλεφωνικό αριθμό κ.λπ.).
- Συμπεραίνεται το προφίλ και οι προτιμήσεις του χρήστη δεδομένου του πλαισίου χρήσης.

Οι λειτουργίες αυτές παρουσιάζονται στο Σχήμα 1-10.



Σχήμα 1-10. Διαχείριση προφίλ χρήστη στο κινητό τερματικό

Πιο συγκεκριμένα, η επίλυση του προβλήματος MAUP πραγματοποιείται σε τρεις φάσεις:

- Προσδιορισμός του πλαισίου χρήσης, δεδομένων των διαθέσιμων πληροφοριών πλαισίου χρήσης.
- Προσδιορισμός των παραμέτρων προφίλ χρήστη, δεδομένης της υπό εξέταση υπηρεσίας και του πλαισίου χρήσης.
- Μάθηση των παραμέτρων και της δομής του δικτυακού πιθανολογικού μοντέλου, με τη βοήθεια ενός συνόλου παραδειγμάτων εκπαίδευσης (*training set*) που παρέχει στο σύστημα ο χρήστης και μέσω του οποίου αποκαλύπτει τις προτιμήσεις για κάποιους συνδυασμούς υπηρεσίας – πλαισίου χρήσης.

Παραπομπές

- [1] M. Mouly, M.-B. Pautet, *The GSM system for mobile communications*, Telecom Publishing, 1992.
- [2] S. Redl, M. Weber, M. Oliphant, *An introduction to GSM*, Artech House Publishers, 1995.
- [3] H. Granbohm, J. Wiklund, “GPRS – General packet radio service”, *Ericsson Review*, vol. 6, no. 1, 1999.
- [4] R. Kalden, I. Meirick, M. Meyer, “Wireless Internet access based on GPRS”, *IEEE Personal Communications*, vol. 7, no. 2, April 2000.
- [5] “Third generation mobile systems in Europe”, Special issue in *IEEE Personal Communications*, vol. 5, no. 2, April 1998.
- [6] “Wideband CDMA”, Feature topic in *IEEE Communications Magazine*, vol. 36, no. 9, Sept. 1998.
- [7] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 802 LAN/MAN Standards Committee web site, www.ieee802.org, 2005.
- [8] Digital Video Broadcasting web site, www.dvb.org, June 2005.
- [9] IST project MONASIDRE (Management of Networks and Services in a Diversified Radio Environment) web site, www.monasidre.com, Nov. 2002.
- [10] IST project DAIDALOS (Designing Advanced Network Interfaces for the Delivery and Administration of Location Independent, Optimized Personal Services) web site, www.ist-daidalos.org, June 2005.
- [11] E. Gustafsson, A. Jonsson, ‘Always Best Connected’, *IEEE Wireless Communications*, Feb. 2003.
- [12] J-Z. Sun, J. Sauvola, D. Howie, “Features in Future: 4G Visions from a Technical Perspective”, in *Proceedings of the IEEE Global Communications Conference*, 2001.
- [13] E. Njedjou, P. Bertin, P. Reynolds, “Motivation for Network Controlled Handoffs using IP Mobility between heterogeneous Wireless Access Networks”, IETF draft-njedjou-inter-an-handoffs-00.txt, June 2003, work in progress.
- [14] J. Rosenberg, H. Schulzrinne, G. Camarillo, A. Johnston, J. Peterson, R. Sparks, M. Handley, E. Schooler, “SIP: Session Initiation Protocol”, RFC 3261, June 2002.

- [15] J. van Bommel, H. Teunissen, D.-J. Plas, A. Peddemors, “A Reference Architecture for 4G Services”, presented at the 7th WWRF Meeting in Eindhoven, The Netherlands, Dec. 2002.
- [16] Yahoo web site, www.yahoo.com, June 2005
- [17] MSN web site, www.msn.com, June 2005.
- [18] D. Chantrain, K. Handekyn, H. Vanderstraeten, “The Soft Terminal: Extending Service Intelligence from the Network to the Terminal”, *Alcatel Telecommunications Review*, 2nd Quarter 2000.
- [19] B. Busropan, J. van Loon, F. Vervuurt, R. van Eijk, “Access network selection in heterogeneous networks and the role of the operator”, presented at the 9th WWRF Meeting in Zurich, Switzerland, July 2003.
- [20] IST project CREDO (Composite Radio and Enhanced service Delivery for the Olympics) web site, www.credo.nal.motlabs.com, March 2004.
- [21] P. Demestichas, V. Stavroulaki, L. Papadopoulou, A. Vasilakos, M. Theologou, “Service configuration and traffic distribution in composite radio environments”, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 33, no. 4, pp. 69-81, Nov. 2003.
- [22] P. Demestichas, L. Papadopoulou, V. Stavroulaki, M. Theologou, G. Vivier, G. Martinez, F. Galliano, “Wireless beyond 3G: managing services and network resources”, *IEEE Computer Magazine*, vol. 35, no.8, pp. 80-82, Aug. 2002.
- [23] L.-M. Papadopoulou, V. Stavroulaki, P. Demestichas, M. Theologou, “A framework to service and network resource management in composite radio environments”, *Lecture Notes in Computer Science, Networking 2002*, pp. 1190-1195, Springer, 2002.
- [24] P. Demestichas, G. Vivier, G. Martinez, F. Galliano, L. Papadopoulou, V. Stavroulaki, M. Theologou, “An approach for managing networks and services in a diversified radio environment”, *Multiaccess, Mobility and Teletraffic for Wireless Communications*, vol. 6, Kluwer, 2002.
- [25] P. Demestichas, N. Koutsouris, G. Koundourakis, L. Papadopoulou, V. Stavroulaki, M. Theologou, “Brokerage of wireless systems’ resources in a composite radio context”, *Challenges and Achievements in E-business and E-work*, pp. 1010-1017, IOS Press, 2002.
- [26] A. Koutsorodi, V. Stavroulaki, P. Demestichas, L. Papadopoulou, N. Koutsouris, G. Koundourakis, D. Kouis, N. Mitrou, “A management

- architecture for enabling reconfigurable terminal operation in the B3G/ABC context”, presented at the 10th WWRF Meeting in New York, USA, Oct. 2003.
- [27] P. Demestichas, V. Stavroulaki, A. Koutsorodi, L. Papadopoulou, G. Koundourakis, N. Koutsouris, D. Kouis, “QoS management framework for heterogeneous wireless access networks”, *B3G report*, IST Systems Beyond 3G Cluster, pp. 30-39, Oct. 2003.
- [28] A. Koutsorodi, V. Stavroulaki, P. Demestichas, N. Koutsouris, G. Koundourakis, D. Kouis, N. Mitrou, “A management architecture for enabling wireless system operation in the B3G context and exploitation of the ABC concept”, presented at the 5th European Wireless Conference, Mobile and Wireless Systems beyond 3G, Barcelona, Spain, Feb. 2004.
- [29] Deliverable 211 of IST-2002-506997 DAIDALOS Project, “Requirements and architecture, including initial interface specifications”, April 2004.
- [30] Deliverable 221 of IST-2002-506997 DAIDALOS Project, “Detailed specifications including complete interface specifications”, Jan. 2005.
- [31] Deliverable 221 of IST-2002-506997 DAIDALOS Project, “Simulation Results”, June 2005.
- [32] A. Koutsorodi, O. Tirla, P. Demestichas, M. Theologou, “Terminal management system in B3G wireless access environments”, presented at the IST-MAGNET Workshop on “My Personal Adaptive Global Net: Visions and Beyond”, Shanghai, China, Nov. 2004.
- [33] 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.
- [34] IST project E2R (End-to-End Reconfigurability) web site, e2r.motlabs.com, June 2005.
- [35] K. Moessner, P. Leaves, D. Grandblaise, F. Capar, E. Mohyeldin, P. Demestichas, G. Dimitrakopoulos, J. Luo, R. Tafazolli, “Reconfiguration techniques to enhance network efficiency”, *Frequenz* 58, pp. 132-135, May-June 2004.
- [36] IST project 4GPLUS (4th Generation Platform Launching Ubiquitous Services) web site, 4gplus.freeband.nl, April 2004.

- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] P. Demestichas, G. Vivier, K. El-Khazen, M. Theologou, “Evolution in wireless systems management concepts: from composite radio environments to reconfigurability”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 5, pp. 90-98, May 2004.
- [41] P. Demestichas, V. Stavroulaki, “Issues in introducing resource brokerage functionality in B3G composite radio environments”, *IEEE Wireless Communications Magazine*, vol. 11, no. 5, pp. 32-40, Oct. 2004.
- [42] G. Carneiro, J. Ruela, M. Ricardo, “Cross-layer design in 4G wireless terminals”, *IEEE Wireless Communications Magazine*, vol. 11, no. 2, April 2004.
- [43] M. Veith, O. Menzel, K. Jonas, I. Miloucheva, J. F. Placido, H. Santos, E. Guainella, “Dynamic learning for efficient multicast handover”, presented at the International conference on Cybernetics and Information Technologies, Systems and Applications, Orlando, USA, April 2005.
- [44] M. Esler, J. Hightower, T. Anderson, G. Borriello, “Next century challenges: Data-centric networking for invisible computing”, in *Proceedings of the 5th ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 256-262, Aug. 1999.
- [45] M. Weiser, “The computer for the 21st century”, *Scientific American*, vol. 265(3), pp. 94-104, September 1991; reprinted in: *IEEE Pervasive Computing*, pp. 19-25, Jan.-Mar. 2002.
- [46] R. Grimm, T. Anderson, B. Bershad, D. Wetherall, “A system architecture for pervasive computing”, in *Proceedings of the 9th Workshop on ACM SIGOPS European workshop: beyond the PC: new challenges for the operating system*, pp. 177-182, 2000.

- [47] M. Weiser, "Some computer science issues in ubiquitous computing", *Communications of the ACM*, vol. 36, no.7, pp. 75-84, July 1993.
- [48] J. Pascoe, N. Ryan and D. Morse, "Issues in developing context-aware computing," in *Lecture Notes in Computer Science, Proceedings of the International Symposium on Handheld and Ubiquitous Computing*, vol. 1707, pp. 208-221, Springer, 1999.
- [49] K. Henriksen, J. Indulska, A. Rakotonirainy, "Modelling context information in pervasive computing systems", in *Lecture Notes in Computer Science, Proceedings of Pervasive 2002*, vol. 2414, pp. 167-180, Springer, 2002.
- [50] V. Terziyan, "A Bayesian Metanetwork", *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, vol. 14, 2004.
- [51] D. Heckerman, "A Tutorial on Learning with Bayesian Networks", *Technical Report MSR-TR-95-06*, Microsoft Research, 1996.
- [52] M. Dillinger, K. Madani and N. Alonistioti, *Software Defined Radio: Architectures, Systems and Functions*, Wiley, 2003.
- [53] V. Terziyan and O. Vitko, "Bayesian Metanetworks for Modelling User Preferences in Mobile Environment", *Lecture Notes in Artificial Intelligence, Advances in Artificial Intelligence*, vol. 2812, Springer, 2003.
- [54] E. Homayounvala, S. A. Ghorashi, A. H. Aghvami, "A Bayesian approach to modelling user preferences for reconfiguration", presented at the E2R Workshop on Reconfigurable Mobile Systems and Networks Beyond 3G, Barcelona, Spain, 2004.
- [55] E. Mohyeldin, M. Dillinger, J. Luo, P. Dornbusch, M. Fahmair, C. Salzmann, "Communication Profiles for SDR Equipment", presented at the IST Mobile and Wireless Telecommunications Summit, Thessaloniki, Greece, June 2002.
- [56] E. Mohyeldin, M. Dillinger, J. Luo, P. Dornbusch, M. Fahmair, C. Salzmann, "Structure and Management of SDR System Profiles", presented at the Software Defined Radio Technical Conference, San Diego, USA, Nov. 2003.
- [57] D. J. Allsopp, T. Kalus, "Smart 4G Mobiles: A User-Centric Approach", presented at the 23rd SGAI International Conference on Innovative Techniques and Applications of Artificial Intelligence, Cambridge, UK, 2003.
- [58] A. Klaus, "Adaptive User Profiles for SDR", presented at the IST Mobile and Wireless Telecommunications Summit, Aveiro, Portugal, June 2003.

- [59] S. N. Schiaffino and A. Amandi, “User Profiling with Case Based Reasoning and Bayesian Networks”, in *Open Discussion Proceedings IBERAMIA-SBIA 2000*, Atibaia, Brazil, Nov. 2000.
- [60] S. K. M. Wong and C. J. Butz, “A Bayesian Approach to User Profiling in Information Retrieval”, *Technology Letters*, vol. 4, 2000.
- [61] M. Pazzani and D. Billsus, “Learning and Revising User Profiles: The Identification of Interesting Web Sites”, *Machine Learning*, vol. 27, 1997.
- [62] J. Rosenberg, H. Schulzrinne, G. Camarillo, A. Johnston, J. Peterson, R. Sparks, M. Handley, E. Schooler, "SIP: Session Initiation Protocol", IETF RFC 3261, June 2002.
- [63] C. Perkins, “IP Mobility Support for IPv4”, IETF RFC 3220, Jan. 2002.
- [64] D. B. Johnson, “Mobility Support in IPv6”, IETF RFC 3775, June 2004.
- [65] R. Koodli (editor), “Fast Handovers for Mobile IPv6”, IETF draft-ietf-mipshop-fast-mipv6-03.txt, Oct. 2004.
- [66] K. El Malki (editor), “Low Latency Handoffs in Mobile IPv4”, Dec. 2004.
- [67] A. Koutsorodi, E. Adamopoulou, K. Demestichas, M. Theologou, “Terminal-Controlled Access Network Selection in Heterogeneous Networks”, presented at the 14th WWRF Meeting in San Diego, USA, July 2005.
- [68] A. Koutsorodi, E. Adamopoulou, K. Demestichas, M. Theologou, “Terminal Management and Intelligent Access Network Selection in Heterogeneous Environments”, accepted for publication in *Mobile Networks and Applications*, special issue on Reconfigurable Radio Technologies in Support of Ubiquitous Seamless Computing, Springer.

Κεφάλαιο 2

Σύστημα Διαχείρισης Κινητού Τερματικού

2.1. Εισαγωγή

Το κινητό τερματικό αποτελεί πλέον ένα μικρό, όμως πλήρως εξοπλισμένο και ισχυρό, ανοικτό υπολογιστικό σύστημα, το οποίο μπορεί να εκτελεί εφαρμογές προερχόμενες από διάφορες πηγές. Είναι διαμορφωμένο με ένα λειτουργικό σύστημα γενικής χρήσης (Windows CE ή XP tablet PC, Symbian, Linux, κ.λπ.) και με μια τυπική στοίβα IP ώστε να υποστηρίζει την επικοινωνία με άλλους χρήστες και υπηρεσίες μέσω του Internet. Ενδέχεται να διαθέτει επίσης περισσότερες από μια δικτυακές διεπαφές, ώστε να επιτρέπει δικτυακή συνδεσιμότητα χρησιμοποιώντας διαφορετικούς τύπους δικτύων πρόσβασης και επιτρέποντας σε όλες τις δικτυακές διεπαφές να είναι συνεχώς ενεργές. Οι αυξημένες δυνατότητες των σημερινών τερματικών έχουν δώσει στους παρόχους δικτύου και υπηρεσιών την ευκαιρία να απομακρύνουν μέρος του υπολογιστικού διαχειριστικού φορτίου από το δικτυακό εξοπλισμό και τους εξυπηρετητές τους και να τον διανείμουν στα τερματικά.

Από τη σκοπιά του κινητού τερματικού, υπάρχουν αρκετές υποδομές στα δίκτυα IP οι οποίες είναι στενά συνδεδεμένες με τα δίκτυα πρόσβασης και οι οποίες υποστηρίζουν διαχείριση της κινητικότητας (*mobility management*) και έλεγχο συνόδου (*session control*), οι οποίες βασίζονται σε πρωτόκολλα όπως το Mobile IP και το Session Initiation Protocol – SIP. Για τη διαφανή διαπομπή όμως από το ένα δίκτυο πρόσβασης στο άλλο, η λειτουργικότητα στο κινητό τερματικό παίζει σπουδαίο ρόλο. Το κινητό τερματικό είναι εκείνο που εντοπίζει ότι κάποιο δίκτυο προσφέρει καλύτερη συνδεσιμότητα στο επίπεδο ζεύξης από κάποιο άλλο, και ότι έχει έρθει η στιγμή να ‘μετακινηθούν’ οι συνδέσεις που έχουν πραγματοποιηθεί πάνω από το ‘ασθενέστερο’ πια δίκτυο στο δυνατότερο.

Υπάρχουν αρκετοί λόγοι για τους οποίους το κινητό τερματικό θα πρέπει να ενσωματώνει λειτουργικότητα για την επιλογή δικτύου πρόσβασης: (α) το κινητό τερματικό είναι εκείνο που γνωρίζει ποιές δικτυακές διεπαφές έχει εγκατεστημένες, (β) το κινητό τερματικό είναι εκείνο που μπορεί να εντοπίσει τη διαθεσιμότητα των διαφόρων δικτύων πρόσβασης στο φυσικό του περιβάλλον και (γ) το κινητό τερματικό μπορεί να έχει ταχύτερη πρόσβαση στο προφίλ του χρήστη καθώς και να παρέχει στον τελευταίο τη δυνατότητα να καθορίζει δυναμικά τις προτιμήσεις του. Αναμένεται ότι η κεντρική διαχειριστική μονάδα του συστήματος πολλαπλών τεχνολογιών πρόσβασης θα ενημερωθεί ή θα ερωτηθεί σχετικά με την επιλογή του τερματικού, καθώς το τελευταίο είναι ενήμερο μόνο για την τοπική διαθεσιμότητα

των πόρων (διαθέσιμοι πόροι στα σημεία πρόσβασης που βρίσκονται στην εμβέλειά του) και δεν έχει μια συνολική εικόνα της σύνθετης υποδομής ή πιθανών καταστάσεων συμφόρησης σε ορισμένες περιοχές. Παρά ταύτα, η αυτονομία που εισάγει στο κινητό τερματικό μια τέτοια προσέγγιση είναι σημαντική, καθώς απαλλάσσει τη μονάδα διαχείρισης του συστήματος από ένα σημαντικό υπολογιστικό φορτίο, ενώ ταυτόχρονα παρέχει την ισχυρότερη και πλέον αμερόληπτη εγγύηση εφαρμογής της έννοιας της ‘διαρκώς βέλτιστης σύνδεσης’. Σε κάθε περίπτωση, επισημαίνεται ότι το γενικότερο πρόβλημα προσδιορισμού του βέλτιστου αντισταθμίσιματος (*trade-off*) ανάμεσα στην ανάθεση αρμοδιοτήτων στο δίκτυο και στο κινητό τερματικό αποτελεί ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Σε αυτό το πλαίσιο, η αξιοποίηση μιας σύνθετης ασύρματης υποδομής από ένα τερματικό απαιτεί ένα καινοτόμο Σύστημα Διαχείρισης Κινητού Τερματικού (*Mobile Terminal Management System – MTMS*). Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει την περιγραφή της αρχιτεκτονικής και της γενικής λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος.

Συγκεκριμένα, το παρόν κεφάλαιο είναι δομημένο ως εξής: Η παράγραφος 2.2 παρουσιάζει τις απαιτήσεις ενός συστήματος διαχείρισης τερματικού σε ένα περιβάλλον σύνθεσης ασύρματων δικτύων. Η παράγραφος 2.3 προτείνει μια αρχιτεκτονική για το MTMS ενώ οι παράγραφοι 2.4, 2.5 και 2.6 παρουσιάζουν με περισσότερες λεπτομέρειες τις επιμέρους συνιστώσες της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής. Τέλος, στην παράγραφο 2.7 αναλύεται η ροή της πληροφορίας στο κινητό τερματικό.

2.2. Απαιτήσεις συστήματος

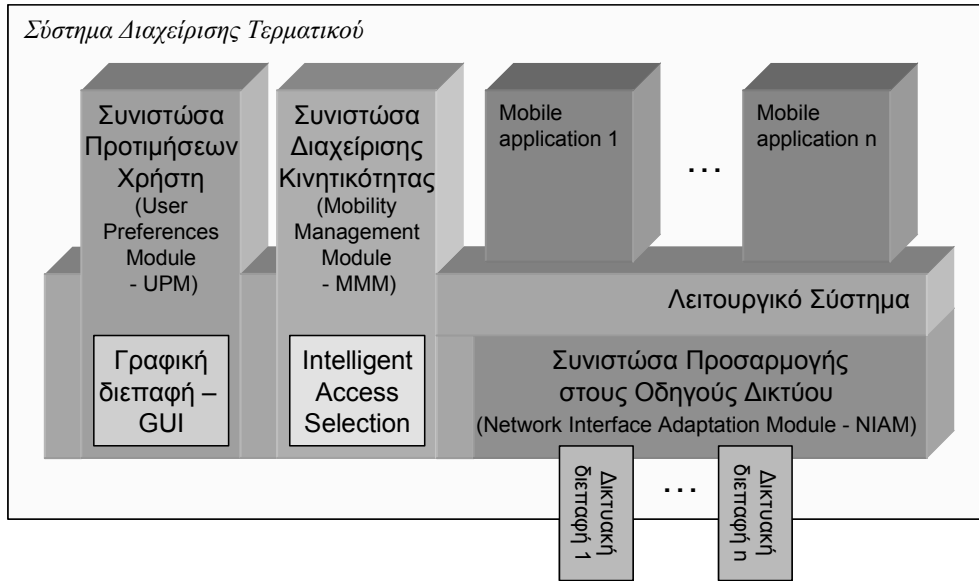
Η αξιοποίηση μιας σύνθετης ασύρματης υποδομής από ένα κινητό τερματικό, όπως προαναφέρθηκε, απαιτεί ένα Σύστημα Διαχείρισης Κινητού Τερματικού (*Mobile Terminal Management System – MTMS*) που θα πρέπει να είναι ικανό:

- Να ανιχνεύει τη διαθεσιμότητα των σημείων πρόσβασης στην ευρύτερη περιοχή του.
- Να λαμβάνει και να επεξεργάζεται μετρήσεις που αφορούν τις παραμέτρους και τις δυνατότητες των διαθέσιμων σημείων πρόσβασης (αναγνωριστικό σημείου πρόσβασης, υποστηριζόμενη τεχνολογία, πάροχος δικτύου στον οποίο ανήκει, ισχύς λαμβανόμενου σήματος, διαθέσιμο εύρος ζώνης, κόστος για την παροχή συγκεκριμένης υπηρεσίας σε συγκεκριμένο επίπεδο ποιότητας).
- Να έχει πρόσβαση, να επεξεργάζεται και να αποθηκεύει το προφίλ του χρήστη.

- Να επιτρέπει στο χρήστη το δυναμικό επανακαθορισμό των προτιμήσεών του. Να του παρέχει δηλαδή έναν εύχρηστο μηχανισμό μέσω του οποίου ο χρήστης θα μπορεί να προσδιορίζει ποιός παράγοντας είναι για αυτόν ο πιο σημαντικός τη δεδομένη στιγμή, προκειμένου για την επιλογή δικτύου πρόσβασης, ποιός ο δεύτερος κατά σειρά προτεραιότητας, κ.ο.κ. Τέτοιοι παράγοντες είναι η προτιμώμενη τεχνολογία πρόσβασης, ο προτιμώμενος πάροχος δικτύου, το κόστος το οποίο ο χρήστης προτίθεται να πληρώσει και το επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας το οποίο επιθυμεί να λάβει για κάθε υπηρεσία.
- Εναλλακτικά προς την προηγούμενη απαίτηση, το MTMS θα πρέπει να ενσωματώνει ένα μηχανισμό αυτόματης προσαρμογής στις προτιμήσεις του χρήστη ανάλογα με το εκάστοτε πλαίσιο χρήσης (π.χ. *business context* ή *leisure context*). Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται ένα σύστημα που να είναι σε θέση να ανιχνεύει τις διάφορες παραμέτρους που καθορίζουν το πλαίσιο χρήσης (π.χ. ώρα της ημέρας, θέση χρήστη, τύπος περιεχομένου εφαρμογής, συμβαλλόμενος συνόδου επικοινωνίας κ.λπ.) και βάσει αυτού καθώς και της ζητούμενης υπηρεσίας να προσδιορίζει αυτόματα την πιθανότερη διάταξη (κατά σειρά προτεραιότητας) των προτιμήσεων του χρήστη.
- Να λαμβάνει τη βέλτιστη απόφαση σχετικά με την ανάθεση των τρεχουσών και των ζητούμενων υπηρεσιών σε δικτυακές διεπαφές και σε σημεία πρόσβασης καθώς και σε επίπεδα ποιότητας. Αυτή η διαδικασία βελτιστοποίησης θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τη διαθεσιμότητα και τις παραμέτρους των διαθέσιμων σημείων πρόσβασης, τις προτιμήσεις του χρήστη και το σύνολο των ζητούμενων και των τρεχουσών υπηρεσιών στο κινητό τερματικό.

2.3. Επισκόπηση αρχιτεκτονικής

Στο Σχήμα 2-1 απεικονίζονται οι βασικές μονάδες του προτεινόμενου MTMS, οι οποίες ενσωματώνουν λειτουργικότητα για την ικανοποίηση όλων των παραπάνω απαιτήσεων. Αυτές είναι η *Συνιστώσα Προσαρμογής στους Οδηγούς Δικτύου (Network Interface Adaptation Module – NIAM)*, η *Συνιστώσα Προτιμήσεων Χρήστη (User Preferences Module – UPM)* και η *Συνιστώσα Διαχείρισης Κινητικότητας (Mobility Management Module – MMM)*. Η λειτουργικότητα κάθε μιας από τις μονάδες αυτές, καθώς και η μεταξύ τους επικοινωνία περιγράφονται αναλυτικότερα στις επόμενες παραγράφους.



Σχήμα 2-1. Αρχιτεκτονική Συστήματος Διαχείρισης Κινητού Τερματικού (MTMS)

2.3.1. Συνιστώσα προσαρμογής στους οδηγούς δικτύου (NIAM)

Η συνιστώσα αυτή είναι υπεύθυνη για την ανίχνευση των διαφορετικών διεπαφών που είναι παρούσες στο τερματικό, για την παρακολούθηση της κατάστασης των αντίστοιχων δικτύων, για τη συλλογή πληροφοριών από κάθε διεπαφή και για την ενεργοποίηση και την απενεργοποίηση της κατάλληλης διεπαφής.

Πιο συγκεκριμένα, η συνιστώσα NIAM εξυπηρετεί δύο σκοπούς: (α) τη σύνδεση και την αποσύνδεση της κατάλληλης διεπαφής από το επιλεγμένο σημείο πρόσβασης, τόσο κατά την ενεργοποίηση του κινητού τερματικού όσο και κατά την εκτέλεση διαπομπών, και (β) την ανάκτηση μετρήσεων στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων, από τη δικτυακή διεπαφή, κατόπιν αιτήσεων από τη μονάδα MMM.

Αυτό σημαίνει ότι η συνιστώσα NIAM μπορεί να παρέχει στο τερματικό μετρήσεις που έχει ανακτήσει από τους διάφορους οδηγούς δικτύου και που αντικατοπτρίζουν την ποιότητα του σήματος ή την κατάσταση της σύνδεσης σε κάθε μια από αυτές τις διεπαφές, με έναν αφηρημένο τρόπο (για παράδειγμα ‘υψηλή’, ‘μέτρια’, ‘χαμηλή’ ένταση λαμβανόμενου σήματος).

Συνολικά, η συνιστώσα NIAM θα μπορεί να παρέχει στο τερματικό μια λίστα για κάθε ένα από τα διαθέσιμα σημεία πρόσβασης στη γειτονιά του. Κάθε τέτοια λίστα θα περιέχει πληροφορίες σχετικά με την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος από το εν λόγω σημείο πρόσβασης και τη διαθεσιμότητά του σε εύρος ζώνης, τον υποστηριζόμενο τύπο τεχνολογίας πρόσβασης, τον πάροχο δικτύου στον οποίο

ανήκει και το κόστος στο οποίο μπορεί να προσφέρει κάθε υπηρεσία σε κάθε ένα από τα επιτρεπτά επίπεδα ποιότητας της υπηρεσίας αυτής.

Αυτό το σύνολο παραμέτρων, συνδυασμένο και με επιπλέον πληροφορίες που αφορούν τις προτιμήσεις του χρήστη, συνιστά ένα ελάχιστο σύνολο, πάνω στο οποίο μπορεί να βασιστεί η ευφυής επιλογή δικτύου πρόσβασης από το κινητό τερματικό, σε ένα περιβάλλον πολλαπλών τεχνολογιών.

2.3.2. Συνιστώσα προτιμήσεων χρήστη (UPM)

Η συνιστώσα αυτή είναι υπεύθυνη για την αποθήκευση, επεξεργασία και πρόσβαση στο προφίλ του χρήστη. Μια γραφική διεπαφή μέσω της οποίας ο χρήστης θα μπορεί να προσδιορίζει τις προτιμήσεις του, θα του δίνει τη δυνατότητα να αναθέτει διαφορετικές προτεραιότητες σε παραμέτρους οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν τη διαδικασία επιλογής δικτύου πρόσβασης. Εναλλακτικά, αυτή η ανάθεση μπορεί να πραγματοποιείται αυτόματα, από ένα σύστημα που θα συνδυάζει για αυτό το σκοπό τις πληροφορίες που αφορούν το πλαίσιο χρήσης και τον τύπο της εκάστοτε εφαρμογής, επιλύοντας, δηλαδή, το πρόβλημα *Μοντελοποίησης και Προσαρμογής στις Προτιμήσεις του Χρήστη (Modelling and Adaptation to User Preferences – MAUP)*.

Αυτή η ανάθεση προτεραιοτήτων είναι ισοδύναμη με τον προσδιορισμό τιμών για διαφορετικούς συντελεστές w_q , w_o , w_t και w_c , οι οποίοι αντιστοιχούν στις παραμέτρους ‘ποιότητα’, προτιμώμενος ‘πάροχος δικτύου’, προτιμώμενος ‘τύπος τεχνολογίας’ και ‘κόστος’ αντίστοιχα. Οι συντελεστές αυτοί αναπαριστούν ένα μέτρο του βάρους που τους αποδίδεται στην αντικειμενική συνάρτηση την οποία μεγιστοποιεί ο αλγόριθμος εύρεσης του βέλτιστου σημείου πρόσβασης. Για παράδειγμα, εάν ο χρήστης αποφασίσει μια ορισμένη στιγμή να προσδιορίσει ότι η παράμετρος ‘ποιότητα’ είναι για αυτόν ο πιο σημαντικός παράγοντας στον υπολογισμό του βέλτιστου σημείου πρόσβασης, ότι ο ‘τύπος τεχνολογίας’ έρχεται δεύτερος, το ‘κόστος’ τρίτο και τελευταίος ο ‘πάροχος δικτύου’, τότε στους αντίστοιχους συντελεστές θα ανατεθούν τιμές τέτοιες ώστε να ισχύει: $w_q > w_t > w_c > w_o$.

2.3.3. Συνιστώσα διαχείρισης κινητικότητας (MMM)

Η συνιστώσα αυτή είναι υπεύθυνη για τη διαχείριση όλων των ενεργειών που σχετίζονται με την επιλογή δικτύου / σημείου πρόσβασης. Αυτή η λειτουργικότητα πραγματοποιείται από έναν αλγόριθμο που επιλύει το πρόβλημα *Ευφυούς Επιλογής*

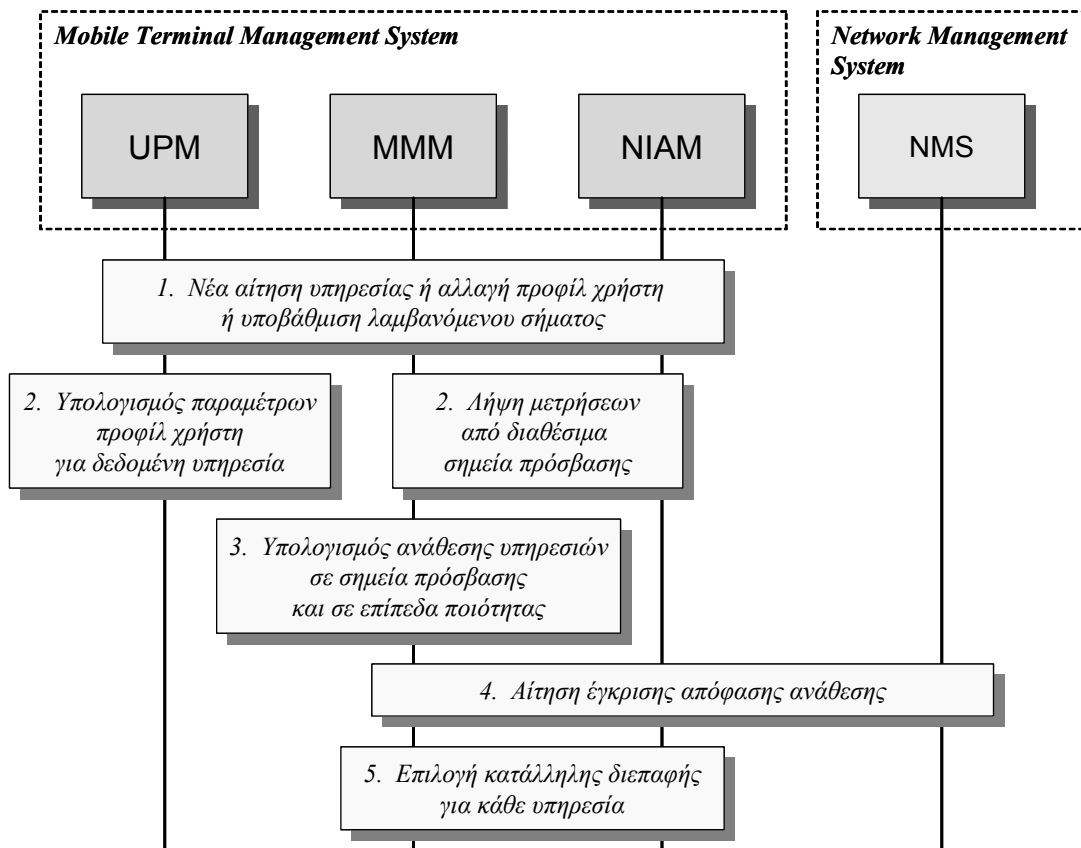
Πρόσβασης (*Intelligent Access Selection – IAS*). Ο αλγόριθμος αυτός θα είναι υπεύθυνος για τη βέλτιστη, κάθε φορά, επιλογή της τοπικής διεπαφής του κινητού τερματικού (τύπος τεχνολογίας πρόσβασης) και του δικτυακού σημείου πρόσδεσης (δρομολογητής πρόσβασης - *access router*, σημείο πρόσβασης - *access point*), τόσο στην περίπτωση διαπομπής μεταξύ σημείων πρόσβασης της ίδιας τεχνολογίας (οριζόντια διαπομπή), όσο και στην περίπτωση διαπομπής μεταξύ σημείων πρόσβασης που ανήκουν σε διαφορετικές τεχνολογίες (κάθετη διαπομπή).

Η συνιστώσα MMM βρίσκεται σε συνεχή επικοινωνία με τη συνιστώσα NIAM, με σκοπό τη λήψη των μετρήσεων που αφορούν τα διαθέσιμα σημεία πρόσβασης και την επακόλουθη χρήση τους ως εισόδων στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης που εκτελεί. Η επικοινωνία αυτή επιτρέπει επίσης στη συνιστώσα MMM να υπαγορεύει στη συνιστώσα NIAM την αποσύνδεση ή τη σύνδεση μιας δικτυακής διεπαφής στο επιλεγμένο σημείο πρόσβασης, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου IAS.

Επιπλέον, η συνιστώσα MMM βρίσκεται σε συνεχή επικοινωνία και με τη συνιστώσα UPM, με σκοπό τη λήψη του διατεταγμένου συνόλου των προτιμήσεων του χρήστη (w_q , w_o , w_i και w_c) και την επακόλουθη χρήση του ως εισόδου στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης IAS.

Τέλος, η συνιστώσα MMM έχει κάθε στιγμή πρόσβαση στις υπηρεσίες που λαμβάνονται στο κινητό τερματικό και στις σχετικές απαιτήσεις αυτών, καθώς και στις νέες αιτήσεις που υποβάλλει ο χρήστης για εξυπηρέτηση.

2.3.4. Λειτουργία συστήματος



Σχήμα 2-2. Γενική περιγραφή της λειτουργίας του MTMS

Η παράγραφος αυτή εξηγεί τη λειτουργία του MTMS που προσδιορίστηκε γενικά στις προηγούμενες παραγράφους. Το Σχήμα 2-2 απεικονίζει ένα σενάριο της λειτουργίας του MTMS, το οποίο εξελίσσεται ως εξής:

- Η συνιστώσα UPM αναγνωρίζει μια νέα αίτηση υπηρεσίας ή μια αλλαγή στο προφίλ του χρήστη και ενημερώνει ανάλογα τη συνιστώσα MMM (βήμα 1). Αντίστοιχα, βήμα εκκίνησης του σεναρίου μπορεί να αποτελέσει η αναγνώριση από μέρος της συνιστώσας NIAM μιας υποβάθμισης του λαμβανόμενου σήματος από ένα σημείο πρόσβασης στο οποίο το τερματικό είναι συνδεδεμένο.
- Η MMM ζητά από τη NIAM τη λήψη νέων μετρήσεων από τις δικτυακές διεπαφές, οι οποίες να αντανακλούν τις δυνατότητες των διαθέσιμων σημείων πρόσβασης τη στιγμή ακριβώς πριν από την εκτέλεση του αλγορίθμου IAS. Παράλληλα, η συνιστώσα UPM προσδιορίζει το πλαίσιο χρήσης και τις παραμέτρους του προφίλ του χρήστη για κάθε υπό εξέταση υπηρεσία (βήμα 2).

- Εκτελείται ο αλγόριθμος IAS και προσδιορίζονται, για κάθε υπηρεσία, το σημείο πρόσβασης και το επίπεδο ποιότητας στα οποία μπορεί να υποστηριχθεί η ζητούμενη κίνηση κατά βέλτιστο τρόπο (βήμα 3).
- Η ανάθεση των υπηρεσιών σε σημεία πρόσβασης και σε επίπεδα ποιότητας που προσδιορίστηκε στο βήμα 3 υποβάλλεται στη δικτυακή διαχειριστική μονάδα (π.χ. του οικείου παρόχου δικτύου του χρήστη) για έγκριση. Ιδανικά, η λύση βρίσκεται αποδεκτή (βήμα 4).
- Η MMM ζητά από τη NIAM να πραγματοποιήσει τις συνδέσεις που απαιτούνται για την εφαρμογή της απόφασης διαμόρφωσης υπηρεσιών που προσδιορίστηκε στο βήμα 3 από τον αλγόριθμο IAS.

2.3.5. Υλοποίηση

Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει μια υλοποίηση του MTMS ως πλατφόρμας μεσισμικού (*middleware platform*) στη γλώσσα προγραμματισμού Java. Υλοποιούνται όλες οι συνιστώσες της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής, με ιδιαίτερη βαρύτητα στις συνιστώσες MMM και UPM, η υλοποίηση των οποίων περιγράφεται αναλυτικότερα σε επόμενες ενότητες. Πιο συγκεκριμένα, στο πλαίσιο της παρουσίασης μιας ολοκληρωμένης πλατφόρμας διαχείρισης του κινητού τερματικού γίνεται διατύπωση και μελέτη των αντίστοιχων μαθηματικών προβλημάτων, IAS και MAUP, και κατάστρωση κατάλληλων μεθόδων επίλυσής τους. Τελικός σκοπός είναι η κατασκευή ενός συστήματος που να παρουσιάζει την εικόνα ενός ολοκληρωμένου οικοδομήματος, ικανού να εκτελέσει σύνθετες προσομοιώσεις.

Η χρήση της Java ως γλώσσας υλοποίησης του προτεινόμενου συστήματος είναι η πλέον ενδεδειγμένη. Η γλώσσα αυτή παρέχει ένα ελκυστικό περιβάλλον για την κατασκευή κινητών και κατανεμημένων εφαρμογών. Παρέχει μεταφερσιμότητα, μέσω της λεγόμενης Εικονικής Μηχανής Java (*Java Virtual Machine – JVM*), η οποία εγκαθίσταται πάνω από τις πραγματικές αρχιτεκτονικές. Με αυτόν τον τρόπο, οι εφαρμογές Java καθίστανται ανεξάρτητες της πλατφόρμας του συστήματος στο οποίο εκτελούνται, αφού η JVM επιλύει θέματα συμβατότητας και μεταφερσιμότητας. Κατά συνέπεια, η επιλογή της Java επιτρέπει μια υλοποίηση του συστήματος διαχείρισης τερματικού ανεξάρτητη τόσο του είδους του τερματικού όσο και του λειτουργικού συστήματος που αυτό χρησιμοποιεί.

2.4. Συνιστώσα προσαρμογής στους οδηγούς δικτύου (NIAM)

2.4.1. Επικοινωνία με τις δικτυακές διεπαφές

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο ρόλος της συνιστώσας NIAM του MTMS είναι να παρέχει ένα επίπεδο αφαίρεσης προς τη μεριά του υπόλοιπου συστήματος διαχείρισης, πράγμα που σημαίνει ότι αποκρύπτει λεπτομέρειες αναφορικά με τις διαφορετικές δικτυακές διεπαφές που είναι διαθέσιμες, παρέχοντας μια απλή και σαφώς καθορισμένη διεπαφή προς το υπόλοιπο τερματικό. Ταυτόχρονα, προσφέρει την αναγκαία λειτουργικότητα για τη σύνδεση και την αποσύνδεση του τερματικού από τα επιλεγμένα σημεία πρόσβασης.

Πιο συγκεκριμένα, η λειτουργικότητα της NIAM αναλύεται σε δύο μέρη: (α) στον έλεγχο της σύνδεσης του τερματικού προς τα επιλεγμένα σημεία πρόσβασης και (β) στη συγκέντρωση μετρήσεων από κάθε διαθέσιμο σημείο πρόσβασης στην εμβέλεια του κινητού τερματικού. Οι δύο αυτές λειτουργίες περιγράφονται αναλυτικότερα στις επόμενες παραγράφους.

2.4.1.1. Έλεγχος της σύνδεσης

Η συνιστώσα NIAM είναι υπεύθυνη για την πραγματοποίηση της σύνδεσης του τερματικού με ένα επιλεγμένο σημείο πρόσβασης καθώς και για την πραγματοποίηση της αποσύνδεσής του από ένα σημείο πρόσβασης το οποίο έχει κριθεί ότι δεν ικανοποιεί πλέον τις απαιτήσεις του χρήστη, του δικτύου και των εφαρμογών. Και οι δύο αυτές λειτουργίες τίθενται σε εφαρμογή κατόπιν ρητής εντολής της MMM, η οποία διαβιβάζεται στη NIAM μέσω κατάλληλων μηνυμάτων:

- **CONNECT**
 - σκοπός μηνύματος: ειδοποιεί τη NIAM σχετικά με το σημείο πρόσβασης στο οποίο πρέπει να συνδεθεί το τερματικό
 - παράμετροι μηνύματος: IP διεύθυνση σημείου πρόσβασης
MAC διεύθυνση αντίστοιχης δικτυακής διεπαφής
- **DISCONNECT**
 - σκοπός μηνύματος: ειδοποιεί τη NIAM να τερματίσει τη σύνδεση με το συγκεκριμένο σημείο πρόσβασης
 - παράμετροι μηνύματος: IP διεύθυνση σημείου πρόσβασης
MAC διεύθυνση αντίστοιχης δικτυακής διεπαφής

Η συνιστώσα NIAM με τη σειρά της, ενημερώνει τη MMM σχετικά με την κατάσταση της σύνδεσης του τερματικού, μετά τη λήψη ενός από τα παραπάνω μηνύματα. Η ενημέρωση αυτή γίνεται μέσω κατάλληλου μηνύματος:

- **CONNECTIVITY_STATUS**

σκοπός μηνύματος: ειδοποιεί τη MMM σχετικά με τα επιλεγμένα σημεία πρόσβασης

παράμετροι μηνύματος: IP διευθύνσεις σημείων πρόσβασης

MAC διευθύνσεις αντίστοιχων δικτυακών διεπαφών

2.4.1.2. Συγκέντρωση μετρήσεων

Η NIAM είναι ακόμη υπεύθυνη για τη συνεχή παρακολούθηση και τη συγκέντρωση μετρήσεων από τις διάφορες δικτυακές διεπαφές, κατόπιν σχετικής αίτησης από τη MMM. Η λειτουργία αυτή πραγματοποιείται μέσω ερωταποκρίσεων της ακόλουθης μορφής:

- **MEASUREMENT_REQUEST**

σκοπός μηνύματος: ζητά τη συγκέντρωση μετρήσεων για τα διαθέσιμα σημεία πρόσβασης

- **MEASUREMENT_REPLY**

σκοπός μηνύματος: μεταφέρει την πληροφορία των μετρήσεων που συγκεντρώθηκαν

παράμετροι μηνύματος: MAC διευθύνσεις σημείων πρόσβασης

MAC διευθύνσεις αντίστοιχων δικτυακών διεπαφών

τύπος υποστηριζόμενης τεχνολογίας

επίπεδο ισχύος λαμβανόμενου σήματος

αναγνωριστικό παρόχου δικτύου

Η συνιστώσα NIAM μπορεί επίσης να ειδοποιήσει αυτόκλητα τη MMM σχετικά με μια ξαφνική υποβάθμιση του λαμβανόμενου σήματος από κάποιο επιλεγμένο σημείο πρόσβασης, ή ακόμη σχετικά με την ολοκληρωτική απώλεια του σήματος από ένα επιλεγμένο σημείο πρόσβασης:

- **SIGNAL_DEGRADATION**

σκοπός μηνύματος: ειδοποιεί σχετικά με μια σημαντική υποβάθμιση του λαμβανόμενου σήματος από ένα επιλεγμένο σημείο πρόσβασης

▪ SIGNAL_LOSS

σκοπός μηνύματος: ειδοποιεί σχετικά με μια ολοκληρωτική απώλεια του σήματος από κάποιο επιλεγμένο σημείο πρόσβασης

Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, η λήψη ενός τέτοιου μηνύματος από τη MMM εκκινεί έναν καινούριο κύκλο MEASUREMENT_REQUEST και MEASUREMENT_REPLY με σκοπό τη λήψη καινούριων μετρήσεων που να αντανακλούν την κατάσταση των διαθέσιμων σημείων πρόσβασης εκείνη τη στιγμή. Επιπλέον, σκανδαλίζεται ο αλγόριθμος IAS καθώς είναι προφανές ότι υπάρχει ανάγκη μεταφοράς αφ' ενός των υπηρεσιών που μέχρι πρότινος λαμβάνονταν από το πλέον 'απωλεσθέν' σημείο πρόσβασης (SIGNAL_LOSS), αφ' ετέρου κι εκείνων οι οποίες εξακολουθούν να λαμβάνονται μέσω ενός σημείου πρόσβασης του οποίου η 'απώλεια' επίκειται (SIGNAL_DEGRADATION). Σε κάθε περίπτωση, ο αλγόριθμος εκκινείται λαμβάνοντας σαν είσοδο το νεότερο σετ μετρήσεων που έχει ληφθεί από τη NIAM.

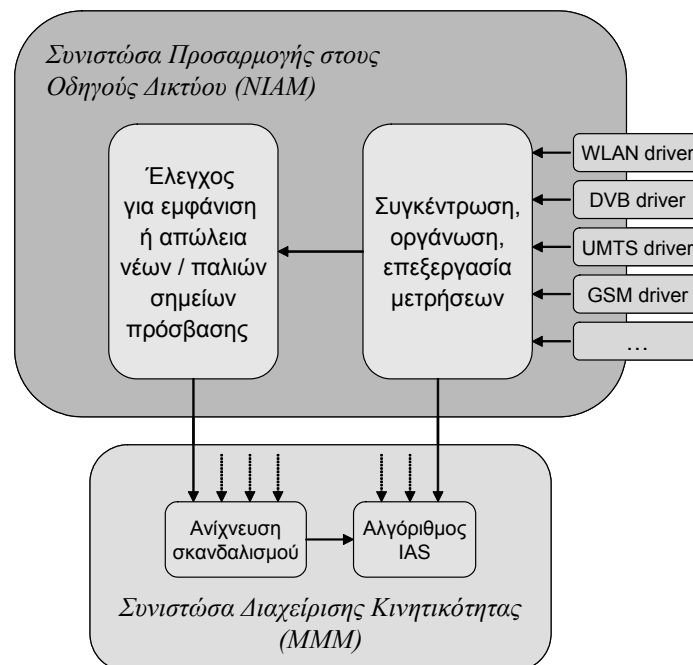
Τέλος, η NIAM είναι υπεύθυνη για τη συλλογή πληροφοριών κόστους από τους διάφορους παρόχους δικτύου, οι οποίες χαρακτηρίζουν κάθε υποψήφιο σημείο πρόσβασης και χρησιμοποιούνται στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης που εκτελεί η MMM. Η πληροφορία αυτή είναι δομημένη ανά πάροχο δικτύου, ανά τύπο τεχνολογίας που αυτός υποστηρίζει, ανά παρεχόμενη υπηρεσία και ανά διαθέσιμο επίπεδο ποιότητας της κάθε υπηρεσίας, όπως απεικονίζεται στον Πίνακα 2-1:

Πίνακας 2-1. Δομή πληροφορίας κόστους

Υπηρεσία	QoS	Πάροχος δικτύου #1				Πάροχος δικτύου #2		Πάροχος δικτύου #3	
		GSM	UMTS	WLAN	DVB	GSM	UMTS	WLAN	DVB
Service #1	1								
	2								
	3								
	4								
Service #2	1								
	2								
	3								
Service #3	1								
	2								
...	...								

Θεωρείται ότι το τερματικό είναι σε θέση να λαμβάνει την πληροφορία αυτή από κάποια δικτυακή οντότητα, υπό μορφήν ‘τιμολογίου’ υπηρεσιών ανά πάροχο δικτύου, και να την ανανεώνει κάθε φορά που τίθεται σε λειτουργία, ή ανά τακτά (αραιά) χρονικά διαστήματα, για παράδειγμα μια φορά την ημέρα. Μια χρονική σφραγίδα μπορεί να καθορίζει για πόσο χρόνο οι ληφθείσες πληροφορίες θεωρούνται έγκυρες, ενώ με την παρέλευση αυτού του χρονικού διαστήματος το τερματικό λαμβάνει εκ νέου τη δομή αυτή από το δίκτυο και ανανεώνει τη δομή που διατηρεί αποθηκευμένη στη μνήμη του.

Στο Σχήμα 2-3 αποδίδεται σχηματικά η λειτουργία της συνιστώσας NIAM. Εκτός από τις βασικές λειτουργίες της συνιστώσας αυτής, διακρίνονται και οι διεπαφές της προς τους διαθέσιμους οδηγούς δικτύου και τη MMM.



Σχήμα 2-3. Λειτουργία συνιστώσας NIAM

2.4.2. Ανακάλυψη υποψηφίων δρομολογητών πρόσβασης για διαπομπή (Candidate Access Router Discovery for Handoff – CARD)

Στην παράγραφο αυτή θα εξεταστούν τεχνικές μέσω των οποίων το κινητό τερματικό μπορεί να αποκτήσει πρόσβαση σε πληροφορίες που αφορούν τα χαρακτηριστικά και τις δυνατότητες των διαθέσιμων σημείων πρόσβασης στην ευρύτερη περιοχή του.

2.4.2.1. Γενικά

Η διαπομπή που εκτελείται από ένα πρωτόκολλο κινητικότητας IP, όπως είναι το Mobile IP, αφορά τη μετακίνηση του σημείου επαφής στρώματος 3 ενός κινητού τερματικού από ένα δρομολογητή πρόσβασης σε έναν άλλο, πριν ή μετά από την εγκατάσταση μιας σύνδεσης στρώματος 2 με ένα καινούριο σημείο πρόσβασης, το οποίο συνδέεται με το νέο δρομολογητή πρόσβασης. Επιπλέον, συμπληρωματικές πληροφορίες που αφορούν τη σύνοδο του τερματικού μπορούν να μεταφερθούν από τον παλιό δρομολογητή πρόσβασης στον καινούριο προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η ‘διαταραχή’ της παροχής υπηρεσίας κατά την εκτέλεση της διαπομπής. Αν και οι ακριβείς λεπτομέρειες αυτής της διαδικασίας διαφέρουν από πρωτόκολλο σε πρωτόκολλο, μια κοινή λειτουργία που απαιτείται για την αρραγή διαπομπή ενός τερματικού είναι η αναγνώριση υποψήφιων δρομολογητών πρόσβασης ως προορισμών του κινητού τερματικού ([1]).

Έτσι, απαιτείται ένα πρωτόκολλο το οποίο θα επιτρέπει σε έναν κόμβο (τερματικό ή δρομολογητή πρόσβασης) να ανακαλύπτει τους γειτονικούς δρομολογητές πρόσβασης των οποίων οι δυνατότητες ικανοποιούν τις απαιτήσεις του τερματικού, και οι οποίοι έτσι μετατρέπονται σε πιθανούς στόχους μιας διαπομπής. Πώς θα ξεπεραστεί όμως το πρόβλημα ανάκτησης πληροφοριών στρώματος 3 από γειτονικούς δρομολογητές (π.χ. IP διευθύνσεις, διαθέσιμο εύρος ζώνης κ.λπ.) ενώ δεν υφίσταται μεταξύ αυτών και του τερματικού παρά μόνο συνδεσιμότητα στρώματος 2?

Ως παράδειγμα αναφέρουμε την περίπτωση εκτέλεσης από το τερματικό μιας εφαρμογής βιντεορρεύματος (*streaming video*), η οποία απαιτεί υψηλές ταχύτητες και πιθανόν και άλλου είδους υποστήριξη από το δρομολογητή πρόσβασης που εξυπηρετεί το τερματικό. Όταν αυτό βρεθεί στην περιοχή κάλυψης ενός νέου δρομολογητή πρόσβασης, ενδέχεται ο τελευταίος να μην είναι σε θέση να υποστηρίξει την τρέχουσα εφαρμογή. Τότε το τερματικό πρέπει να πληροφορηθεί τον περιορισμό αυτό, ενόσω βρίσκεται ακόμη συνδεδεμένο στον τρέχοντα δρομολογητή πρόσβασης. Είναι προφανές ότι για να πραγματοποιηθεί αυτό πρέπει ο τρέχων δρομολογητής πρόσβασης να διαθέτει πληροφορίες σχετικά με τις δυνατότητες των ‘γειτόνων’ του, κι αυτό μέσω ενός κατάλληλου πρωτοκόλλου ανακάλυψης υποψήφιων δρομολογητών πρόσβασης (*Candidate Access Router Discovery protocol – CARD*).

2.4.2.2. Το πρωτόκολλο CARD

Το πρωτόκολλο CARD ([2]) εκτελεί τις εξής δύο λειτουργίες:

- Αντιστοίχιση της MAC διεύθυνσης ενός σημείου πρόσβασης στην IP διεύθυνση του δρομολογητή πρόσβασης που σχετίζεται με αυτό (*reverse address translation*), μέσω της επικοινωνίας του τερματικού με τον τρέχοντα δρομολογητή πρόσβασης. Σε περιπτώσεις όπου το κινητό τερματικό μπορεί να αποκτήσει IP συνδεσιμότητα με τους υποψήφιους δρομολογητές πρόσβασης πριν τη λήψη της απόφασης διαπομπής, η λειτουργία αυτή καθίσταται ιδιαίτερα απλή, αφού το κινητό τερματικό μπορεί να ζητήσει ενημέρωση από τα ίδιους τους δρομολογητές για τις δυνατότητες τους.
- Παροχή πληροφοριών σχετικά με τις δυνατότητες των διαθέσιμων σημείων πρόσβασης, τις οποίες χρησιμοποιεί το τερματικό για τη λήψη των βέλτιστων αποφάσεων διαπομπής. Κάποιες από αυτές τις πληροφορίες είναι στατικές, ενώ κάποιες άλλες είναι χρονικά μεταβαλλόμενες.

Υπάρχουν δύο τρόποι προσέγγισης που μπορεί να ακολουθήσει το τερματικό προκειμένου για την ανάκτηση των IP διευθύνσεων και των παραμέτρων των διαθέσιμων σημείων και δρομολογητών πρόσβασης (στο εξής θα σημειώνουμε AR – Access Router για δρομολογητή πρόσβασης, AP – Access Point για σημείο πρόσβασης και MT – Mobile Terminal για κινητό τερματικό).

Σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο, το MT στέλνει μια απλή αίτηση στον τρέχοντα AR, ο οποίος με τη σειρά του ενημερώνει το MT σχετικά με τις IPs γειτονικών του ARs και τις δυνατότητές τους, καθώς και τις δυνατότητες των APs που συνδέονται με αυτά. Σύμφωνα με το δεύτερο τρόπο, κάθε AR ενημερώνει περιοδικά όλα τα MTs που βρίσκονται συνδεδεμένα με αυτόν για τις διευθύνσεις και τις δυνατότητες γειτονικών του ARs, μέσω καναλιών κατερχόμενων ζεύξεων (*downlink*), χωρίς να έχει λάβει εκ των προτέρων μια αίτηση που να αφορά κάποια συγκεκριμένη ομάδα APs. Σε κάθε περίπτωση, κάθε AR πρέπει να διατηρεί και να ανανεώνει κατάλληλους πίνακες όπου θα καταχωρούνται οι IP διευθύνσεις και οι δυνατότητες των γειτόνων του.

Το CARD χρησιμοποιεί ένα μηχανισμό μηνυμάτων CARD Request και CARD Reply, που ανταλλάσσονται μεταξύ του MT και του AR που τον εξυπηρετεί, καθώς και μεταξύ ARs. Τα μηνύματα CARD Request και CARD Reply που ανταλλάσσονται μεταξύ ενός MT και του τρέχοντος AR του, περιέχουν τις MAC διευθύνσεις ενός ή

περισσότερων APs και τις IP διευθύνσεις τους, αντίστοιχα. Προαιρετικά, τα μηνύματα CARD Reply μπορούν να περιέχουν, επίσης, πληροφορίες για τις δυνατότητες των APs που είναι συνδεδεμένα με τον εκάστοτε AR. Οι δυνατότητες αυτές καθορίζονται ως μια λίστα παραμέτρων της μορφής ‘γνώρισμα – τιμή’ (*attribute – value*), η οποία μετατρέπεται σε κατάλληλη μορφή και εμπερικλείεται στο CARD Reply μήνυμα.

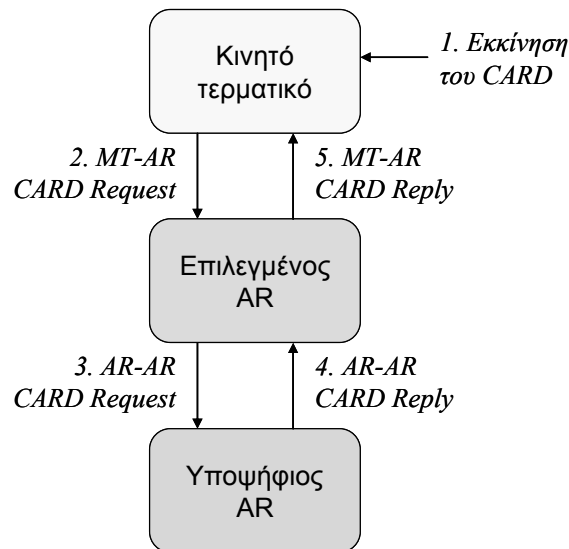
Ο επιλεγμένος AR εκκινεί την ανταλλαγή πληροφοριών δυνατοτήτων με έναν υποψήφιο AR είτε όταν λαμβάνει ένα μήνυμα CARD Request από ένα MT το οποίο περιέχει πιθανόν MAC διευθύνσεις νέων APs, είτε όταν διαπιστώνει ότι κάποιος από τους πίνακες με τις δυνατότητες γειτονικών ARs που διατηρεί περιέχουν παρωχημένες πλέον πληροφορίες. Μετά την ολοκλήρωση της ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ του επιλεγμένου AR και των υπολοίπων ARs, ο πρώτος οφείλει να ενημερώσει το MT για τις αιτούμενες δυνατότητες μέσω ενός CARD Reply μηνύματος, που περιέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες. Ο επιλεγμένος AR μπορεί επίσης να στέλνει περιοδικά, με δική του πρωτοβουλία, CARD Reply μηνύματα σε όλα τα συνδεδεμένα MTs. Η συμπεριφορά αυτή των ARs καθορίζεται από πολιτικές των παρόχων δικτύων και οφείλει να ελέγχεται κεντρικά. Τα CARD Reply μηνύματα που αποστέλλονται με πρωτοβουλία του επιλεγμένου AR πρέπει να στέλνονται σε όλα ανεξαιρέτως τα MTs που είναι συνδεδεμένα με αυτόν και να περιέχουν αναγνωριστικά που θα τα διακρίνουν από τα μηνύματα CARD Reply που αποστέλλονται κατόπιν αιτήσεως του MT.

Υπάρχει επίσης η δυνατότητα το MT να δηλώνει προαιρετικά στον επιλεγμένο AR τις προτιμήσεις του, όσον αφορά τις δυνατότητες των ARs για τις οποίες επιθυμεί να ενημερωθεί, εμπερικλείοντας την παράμετρο προτιμήσεων στο CARD Request μήνυμα. Ο επιλεγμένος AR μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιήσει την πληροφορία αυτή προκειμένου να εκτελέσει ένα φιλτράρισμα, για λόγους βελτιστοποίησης, και να επιστρέψει μόνο εκείνα τα χαρακτηριστικά τα οποία ενδιαφέρουν το αντίστοιχο MT. Επιπλέον, το MT μπορεί να παρέχει στον επιλεγμένο AR μια λίστα δυνατοτήτων της μορφής ‘γνώρισμα – τιμή’, δηλώνοντας όχι μόνο κάποιες παραμέτρους, όπως στην περίπτωση του απλού φιλτραρίσματος, αλλά και συγκεκριμένες τιμές για κάθε μία παράμετρο. Με αυτόν τον τρόπο, δίνεται η δυνατότητα στον AR να κάνει ένα επιπλέον φιλτράρισμα των υποψηφίων ARs και να επιστρέψει στο MT τις IP διευθύνσεις και τα χαρακτηριστικά μόνο όσων ARs ικανοποιούν επακριβώς τις προτιμήσεις του.

Για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας την προαιρετική παράμετρο προτιμήσεων του CARD Request μηνύματος, το MT μπορεί να δηλώσει στον επιλεγμένο AR του ότι ενδιαφέρεται μόνο για τις παραμέτρους δυνατοτήτων της IEEE 802.11 διεπαφής, αφού αυτή είναι η μοναδική διεπαφή που το MT υποστηρίζει. Συνεπώς, ο AR θα επιστρέψει στο MT μόνο τις δυνατότητες που αφορούν σε IEEE 802.11 ARs. Κατά παρόμοιο τρόπο, χρησιμοποιώντας την προαιρετική παράμετρο απαιτήσεων του CARD Request μηνύματος, ένα MT μπορεί να δηλώσει στον επιλεγμένο AR ότι ενδιαφέρεται μόνο για υποψήφιους ARs που μπορούν να ικανοποιήσουν κάποιον συγκεκριμένο περιορισμό επιπέδου ποιότητας. Στην περίπτωση αυτή, το MT στέλνει τον αντίστοιχο περιορισμό στον τρέχοντα AR χρησιμοποιώντας την προαιρετική παράμετρο προτιμήσεων του CARD Request μηνύματος. Ο περιορισμός επιπέδου ποιότητας διατυπώνεται ως ένας ζεύγος ‘γνώρισμα – τιμή’ και ενσωματώνεται στην παράμετρο απαιτήσεων, η οποία, με τη σειρά της, προστίθεται στο αρχικό CARD Request μήνυμα. Βασιζόμενος στη ληφθείσα λίστα χαρακτηριστικών της παραμέτρου προτιμήσεων ή σε μια λίστα ζευγών ‘γνώρισμα – τιμή’ στην παράμετρο απαιτήσεων του μηνύματος, ο επιλεγμένος AR μπορεί να χρησιμοποιήσει αυτά τα στοιχεία για να διαμορφώσει κατάλληλα το περιεχόμενο του CARD Reply μηνύματος που θα σταλεί πίσω στο MT.

Η λειτουργία του πρωτοκόλλου CARD, όπως περιγράφηκε παραπάνω, διακρίνει τα μηνύματα που ανταλλάσσονται μεταξύ MT και AR από αυτά που ανταλλάσσονται μεταξύ δύο διαφορετικών ARs. Γι’ αυτό το λόγο τα μηνύματα αυτά θα σημειώνονται στο εξής MT-AR και AR-AR μηνύματα αντίστοιχα.

Το Σχήμα 2-4 απεικονίζει τη λειτουργία του πρωτοκόλλου CARD, όταν αυτή εκκινείται από την πλευρά του MT.



Σχήμα 2-4. Λειτουργία του πρωτοκόλλου CARD

Με την πυροδότηση της λειτουργίας του CARD (βήμα 1), το MT μεταδίδει μία ή περισσότερες MAC διευθύνσεις APs στον τρέχοντα AR του, χρησιμοποιώντας ένα MT-AR CARD Request μήνυμα (βήμα 2). Στην περίπτωση που το MT επιθυμεί ο AR να πραγματοποιήσει και ανάκτηση δυνατοτήτων από τους γειτονικούς ARs, εκτός από την αντίστροφη μετάφραση διευθύνσεων, αυτό πρέπει να δηλωθεί στο MT-AR CARD Request μήνυμα, μέσω κατάλληλου δείκτη. Η απουσία τέτοιου δείκτη θα έχει σαν αποτέλεσμα ο AR που λαμβάνει το CARD Request μήνυμα να εκτελέσει μόνο αντίστροφη μετάφραση διευθύνσεων. Ο επιλεγμένος AR του MT αντιστοιχεί τις MAC διευθύνσεις των APs σε μια IP διευθύνσεις ARs, ή, σε περίπτωση που το τερματικό δεν έχει συμπεριλάβει στην αίτησή του καμία MAC διεύθυνση, ο AR μεταβιβάζει ολόκληρο τον πίνακα αντιστοίχισης MAC-IP διευθύνσεων που διατηρεί τοπικά. Σε περίπτωση που μία ή περισσότερες εγγραφές δυνατοτήτων είναι παρωχημένες στον πίνακα υποψηφίων APs του τρέχοντος AR, ο τελευταίος επικοινωνεί απευθείας με κάθε υποψήφιο AR και ανακτά από αυτόν τις απαιτούμενες πληροφορίες μέσω μια χειραψίας AR-AR CARD Request (βήμα 3) – AR-AR CARD Reply (βήμα 4) μηνυμάτων. Ο επιλεγμένος AR τότε ανανεώνει τον τοπικό πίνακα πληροφοριών του και στη συνέχεια μεταβιβάζει στο MT την IP διεύθυνση και τις δυνατότητες κάθε υποψηφίου AR, εφόσον αυτές έχουν ζητηθεί, μέσω ενός MT-AR CARD Reply μηνύματος (βήμα 5).

2.5. Συνιστώσα προτιμήσεων χρήστη (UPM)

2.5.1. Βασική λειτουργία

Η συνιστώσα αυτή είναι υπεύθυνη για την αποθήκευση, επεξεργασία και πρόσβαση στο προφίλ του χρήστη. Αυτό σημαίνει ότι η UPM είναι σε θέση κάθε στιγμή να παρέχει στη MMM το διατεταγμένο σύνολο των συντελεστών w_q , w_o , w_i και w_c , οι οποίοι αντιστοιχούν στις παραμέτρους ‘ποιότητα’, προτιμώμενος ‘πάροχος δικτύου’, προτιμώμενος ‘τύπος τεχνολογίας’ και ‘κόστος’ αντίστοιχα. Κάθε ένας από τους συντελεστές αυτούς αναπαριστά ένα μέτρο του ενδιαφέροντος του χρήστη για την αντίστοιχη παράμετρο, και άρα ένα μέτρο του βάρους που τους αποδίδεται στην αντικειμενική συνάρτηση την οποία μεγιστοποιεί ο αλγόριθμος εύρεσης του βέλτιστου σημείου πρόσβασης που εκτελείται από τη MMM.

Για παράδειγμα, εάν μια ορισμένη στιγμή η παράμετρος ‘ποιότητα’ είναι για το χρήστη ο πιο σημαντικός παράγοντας στον υπολογισμό του σημείου πρόσβασης, ο ‘τύπος τεχνολογίας’ έρχεται δεύτερος, το ‘κόστος’ τρίτο και τελευταίος ο ‘πάροχος δικτύου’, τότε στους αντίστοιχους συντελεστές θα ανατεθούν τιμές $w_q > w_i > w_c > w_o$, που θα αντανakλούν αυτήν ακριβώς την ιεράρχηση.

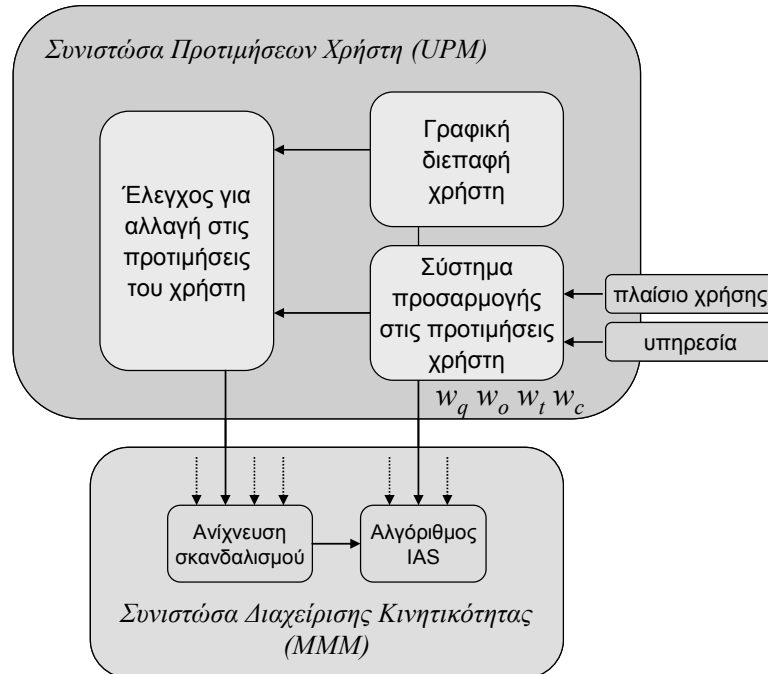
Για τους σκοπούς της εργασίας θα παρουσιαστούν δύο εναλλακτικές υλοποιήσεις της συνιστώσας UPM. Η πρώτη αφορά την κατασκευή μιας γραφικής διεπαφής χρήστη, μέσω της οποίας ο χρήστης θα μπορεί να προσδιορίζει ο ίδιος τις προτιμήσεις του, αναθέτοντας διαφορετικές προτεραιότητες στις παραμέτρους ‘ποιότητα’, προτιμώμενος ‘πάροχος δικτύου’, προτιμώμενος ‘τύπος τεχνολογίας’ και ‘κόστος’, με κατάλληλο χειρισμό του γραφικού περιβάλλοντος.

Η δεύτερη υλοποίηση αφορά τη σχεδίαση ενός συστήματος μοντελοποίησης των παραμέτρων αυτών και των μεταξύ τους σχέσεων, βασισμένο σε μπεϋζιανά μεταδίκτυα (*Bayesian meta-networks*). Στόχος του συστήματος αυτού είναι να μπορεί να προβλέπει τις πιθανότερες τιμές των τυχαίων μεταβλητών w_q , w_o , w_i και w_c , και συνεπώς και την πιθανότερη, κατά σειρά προτεραιότητας, διάταξη αυτών, δεδομένων του τρέχοντος πλαισίου χρήσης και της αιτούμενης υπηρεσίας.

Τα μπεϋζιανά πιθανολογικά δίκτυα, ή *Bayesian belief networks* όπως συναντώνται συχνά στη βιβλιογραφία, αποτελούνται από έναν κατευθυνόμενο μη-κυκλικό γράφο (*directed acyclic graph*) ο οποίος περιλαμβάνει ως κόμβους όλες τις τυχαίες μεταβλητές του πιθανολογικού μοντέλου, και από ένα σύνολο δεσμευμένων κατανομών πιθανότητας για κάθε μεταβλητή δεδομένων των γονέων της στο γράφο.

Αυτά τα δύο χαρακτηριστικά του μπεϋζιανού δικτύου προσδιορίζουν τόσο τις αιτιακές σχέσεις (γραφική δομή) όσο και το βαθμό εξάρτησης (κατανομές πιθανότητας) μεταξύ των μεταβλητών. Στόχος είναι η προσαρμογή και η μάθηση της δομής και των παραμέτρων αυτής της τοπολογίας, με χρήση ενός συνόλου παραδειγμάτων εκπαίδευσης (*training set*) το οποίο παρέχει ο χρήστης στο σύστημα, και μέσω του οποίου δηλώνει τις προτεραιότητές του για κάποιους συνδυασμούς υπηρεσίας και πλαισίου χρήσης. Ειδικά για το πρόβλημα της μάθησης της δομής του μπεϋζιανού δικτύου, διατυπώνεται ένα κατάλληλο κριτήριο για την αξιολόγηση των δυνατών δικτυακών δομών και σχεδιάζεται ένας άπληστος αλγόριθμος αναζήτησης νέων δομών που χαρακτηρίζονται από υψηλή αποτίμηση με βάση αυτό το κριτήριο. Οι τιμές των w_q , w_o , w_t και w_c , και άρα και των παραμέτρων του προφίλ του χρήστη, στις οποίες καταλήγει το προτεινόμενο πιθανολογικό μοντέλο, χρησιμοποιούνται εν συνεχεία σαν είσοδος στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης που εκτελείται από την MMM.

Στο Σχήμα 2-5 αποδίδεται σχηματικά η λειτουργία της συνιστώσας UPM. Εκτός από τη βασική λειτουργία της συνιστώσας αυτής και τις δύο εναλλακτικές υλοποιήσεις της, διακρίνονται και οι διεπαφές της προς τη MMM.



Σχήμα 2-5. Λειτουργία συνιστώσας UPM

Στις παραγράφους που ακολουθούν, παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι δύο προαναφερθείσες υλοποιήσεις.

2.5.2. Γραφική διεπαφή χρήστη

2.5.2.1. Διαμόρφωση προφίλ, γενικές & ειδικές ρυθμίσεις

Η ανάπτυξη ενός GUI προσφέρει στο χρήστη ένα εύχρηστο και φιλικό περιβάλλον μέσω του οποίου αυτός μπορεί να διαμορφώσει το προφίλ του. Στο σχεδιασμό που ακολουθείται, το τμήμα της γραφικής διεπαφής που αφορά τον καθορισμό των προτιμήσεων του χρήστη εντάσσεται στο πλαίσιο ενός ευρύτερου γραφικού περιβάλλοντος το οποίο προσομοιώνει τη λειτουργία και την εμφάνιση ενός σύγχρονου κινητού τερματικού. Με περιήγηση στο περιβάλλον αυτό, ο χρήστης μπορεί να εκκινήσει ή να τερματίσει μια υπηρεσία καθώς επίσης και να ενημερωθεί για το σύνολο των τρεχουσών υπηρεσιών κάθε στιγμή και για τα χαρακτηριστικά της κάθε σύνδεσης.

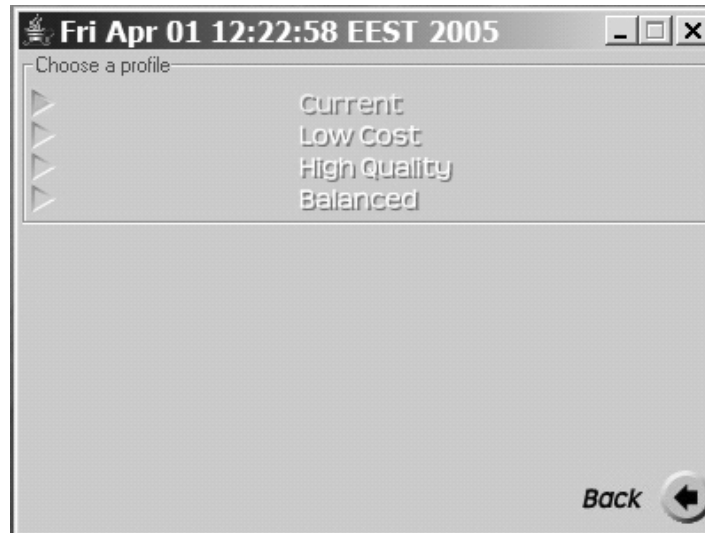
Στην Εικόνα 2-1 απεικονίζεται η κύρια οθόνη του γραφικού αυτού περιβάλλοντος, από την οποία ο χρήστης μπορεί να επιλέξει να εκκινήσει ή να τερματίσει κάποια υπηρεσία, να τροποποιήσει τα χαρακτηριστικά της, και να διαμορφώσει το προφίλ του.



Εικόνα 2-1. Γραφικό περιβάλλον τερματικού, κύρια οθόνη

Κάθε εικονίδιο της κύριας οθόνης αντιστοιχεί και σε μια υπηρεσία (δεξιόστροφα από επάνω αριστερά: φωνητική κλήση – *voice call*, υπηρεσία σύντομων μηνυμάτων – *SMS*, υπηρεσία μηνυμάτων πολυμέσων – *MMS*, βιντεο-κλήση – *video call*, περιήγηση στον παγκόσμιο ιστό – *web browsing*, υπηρεσία λήψης και αναπαραγωγής βίντεο σε πραγματικό χρόνο – *video streaming*, υπηρεσία ηλεκτρονικού ταχυδρομείου – *e-mail*), ενώ το κεντρικό εικονίδιο αντιστοιχεί στη διαμόρφωση του προφίλ χρήστη.

Με την επιλογή του εικονιδίου που αντιστοιχεί στην επεξεργασία του προφίλ, ο χρήστης εισάγεται σε μια νέα οθόνη όπου παρουσιάζεται μια ομάδα προ-διαμορφωμένων προφίλ (χαμηλού κόστους – *low cost*, υψηλής ποιότητας – *high quality*, εξισορροπημένο – *balanced*) καθώς και το τρέχον προφίλ, διαθέσιμα για ενεργοποίηση ή τροποποίηση (Εικόνα 2-2).



Εικόνα 2-2. Γραφικό περιβάλλον τερματικού, προ-διαμορφωμένα προφίλ

Στο προ-διαμορφωμένο προφίλ χαμηλού κόστους οι συντελεστές w_i παίρνουν τις τιμές: $w_c = 0,9$, $w_t = 0,7$, $w_o = 0,5$, $w_q = 0,3$. Στο προ-διαμορφωμένο προφίλ υψηλής ποιότητας οι συντελεστές w_i παίρνουν τις τιμές: $w_q = 0,9$, $w_t = 0,7$, $w_o = 0,5$, $w_c = 0,3$. Τέλος, στο προ-διαμορφωμένο εξισορροπημένο προφίλ οι τιμές των συντελεστών w_i είναι: $w_q = 0,5$, $w_o = 0,5$, $w_t = 0,3$, $w_c = 0,3$. Σε κάθε περίπτωση, η ανάθεση τιμών στους συντελεστές w_i αντανακλά το βάρος που τους αποδίδεται στην αντικειμενική συνάρτηση την οποία μεγιστοποιεί ο αλγόριθμος εύρεσης του βέλτιστου σημείου πρόσβασης που εκτελείται από τη MMM.

Με την επιλογή τροποποίησης του προφίλ, ο χρήστης εισάγεται σε μια ακόμη οθόνη (Εικόνα 2-3), μέσα από την οποία μπορεί να τροποποιήσει τις επιμέρους παραμέτρους κάθε επιλεγμένου προφίλ. Αυτές αφορούν την προτεραιότητα που ανατίθεται σε κάθε μια από τις παραμέτρους ‘ποιότητα’, προτιμώμενος ‘πάροχος δικτύου’, προτιμώμενος ‘τύπος τεχνολογίας’ και ‘κόστος’, τα ανώτατα επιτρεπτά επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας που ο χρήστης επιθυμεί να λάβει για κάθε υπηρεσία, καθώς και τον προτιμώμενο πάροχο δικτύου και τύπο τεχνολογίας.

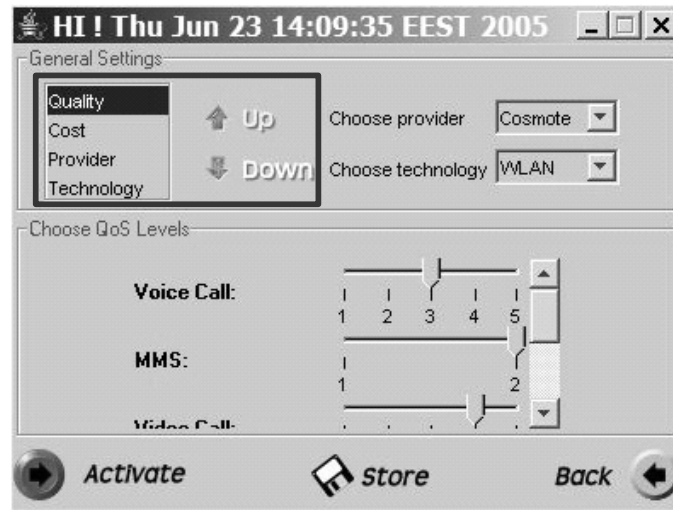


Εικόνα 2-3. Γραφικό περιβάλλον τερματικού, διαμόρφωση προφίλ

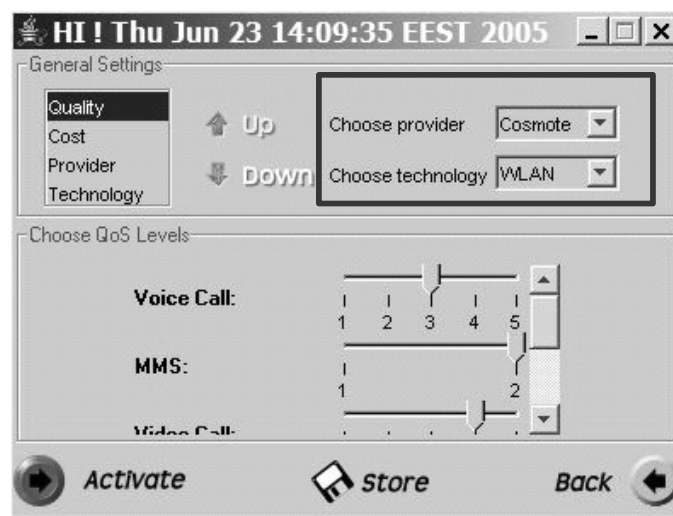
Η οθόνη αυτή χωρίζεται (στην κατακόρυφη διάσταση) σε δύο τμήματα: το τμήμα των γενικών ρυθμίσεων (*'General Settings'*) και το τμήμα καθορισμού του επιπέδου ποιότητας κάθε μιας υπηρεσίας χωριστά (*'Choose QoS Levels'*).

Στα αριστερά του τμήματος γενικών ρυθμίσεων (Εικόνα 2-4 (α)), ο χρήστης καλείται να ιεραρχήσει τη βαρύτητα που έχουν για αυτόν οι παράμετροι 'ποιότητα', 'κόστος', 'πάροχος δικτύου' και 'τύπος τεχνολογίας'. Ταξινομώντας τους τέσσερις αυτούς παράγοντες με τη βοήθεια των κουμπιών *'Up'* και *'Down'*, τους αποδίδει και την αντίστοιχη βαρύτητα: για την πρώτη επιλογή $w_i = 0,8$, για τη δεύτερη επιλογή $w_i = 0,6$, για την τρίτη επιλογή $w_i = 0,4$ και για την τελευταία $w_i = 0,2$, $i: q, c, o, t$, ανάλογα με την περίπτωση. Έτσι, για παράδειγμα, στην εικονιζόμενη περίπτωση, ο πιο σημαντικός παράγοντας για το χρήστη είναι η ποιότητα, έπονται το κόστος, ο πάροχος δικτύου και τέλος ο τύπος τεχνολογίας.

Η συμπερίληψη του παρόχου δικτύου καθώς και του τύπου τεχνολογίας ως δύο εκ των τεσσάρων παραμέτρων γίνεται προκειμένου να δοθεί στο χρήστη η δυνατότητα να δηλώσει την προτίμησή του όσον αφορά τη λήψη υπηρεσιών από κάποιον συγκεκριμένο πάροχο δικτύου ή τύπο τεχνολογίας. Ο προτιμώμενος αυτός πάροχος δικτύου και τύπος τεχνολογίας προσδιορίζονται στο δεξιά του τμήματος γενικών ρυθμίσεων (Εικόνα 2-4 (β)) με επιλογή του εκάστοτε ονόματος.



(α)



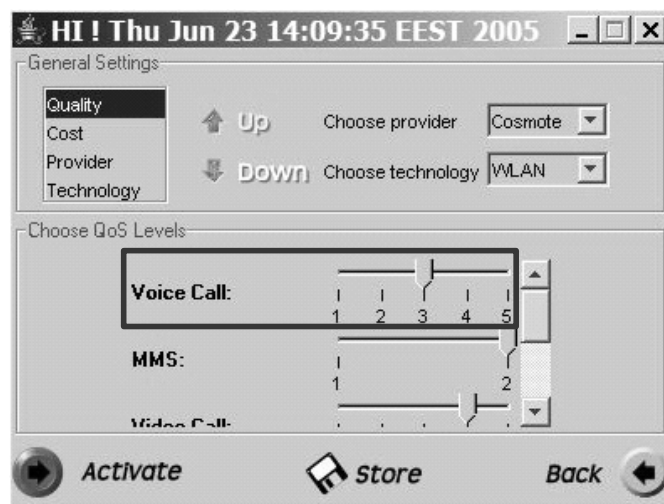
(β)

Εικόνα 2-4. Διαμόρφωση προφίλ, γεικές ρυθμίσεις

Πέραν από τους προτεινόμενους παρόχους δικτύου και τύπους τεχνολογίας παρέχεται στο χρήστη και η επιπλέον επιλογή του να μην προσδιορίσει κανέναν προτιμώμενο πάροχο ή τεχνολογία, στην οποία περίπτωση κανείς από τους δύο αυτούς παράγοντες δεν λαμβάνεται υπόψη κατά την επιλογή του βέλτιστου σημείου πρόσβασης.

Στο τμήμα καθορισμού των επιπέδων ποιότητας υπηρεσιών (Εικόνα 2-5), ο χρήστης καλείται να καθορίσει το μέγιστο επίπεδο ποιότητας που επιθυμεί να λάβει για κάθε μια υπηρεσία ξεχωριστά, για τις υπηρεσίες εκείνες που διαθέτουν περισσότερα από ένα επίπεδα ποιότητας. Η δυνατότητα καθορισμού του μέγιστου επιπέδου ποιότητας προκύπτει από την ανάγκη του χρήστη να εκφράσει, αλλά και να ελέγξει, το μέγιστο κόστος το οποίο προτίθεται να πληρώσει για κάθε υπηρεσία, και το οποίο είναι ανάλογο του αντίστοιχου επιπέδου ποιότητας. Η ιδέα εδώ είναι ότι η

παροχή μιας υπηρεσίας σε οποιοδήποτε – κάτω του μεγίστου – επίπεδο ποιότητας που ικανοποιεί όλα τα υπόλοιπα κριτήρια που έχει θέσει ο χρήστης, είναι προτιμότερη από την άρνηση παροχής της υπηρεσίας αυτής λόγω κάποιου πιθανού αυστηρού ελάχιστου περιορισμού στο επίπεδο ποιότητας.



Εικόνα 2-5. Διαμόρφωση προφίλ, καθορισμός επιπέδων ποιότητας υπηρεσιών

Για παράδειγμα, στην Εικόνα 2-5 το μέγιστο επιλεγμένο επίπεδο ποιότητας για την υπηρεσία φωνητικής κλήσης είναι το επίπεδο 3. Αυτό σημαίνει ότι αποκλείεται η παροχή της υπηρεσίας αυτής σε κάποιο υψηλότερο επίπεδο ποιότητας, χωρίς ωστόσο να αποκλείεται η παροχή της σε κάποιο χαμηλότερο επίπεδο, αν κάτι τέτοιο επιβληθεί από τις συνθήκες του δικτύου τη δεδομένη στιγμή ή από τη διαδικασία βελτιστοποίησης που ακολουθεί η συνιστώσα MMM προκειμένου να λάβει την τελική απόφαση ανάθεσης. Έτσι, ο χρήστης μπορεί να λαμβάνει την υπηρεσία φωνητικής κλήσης σε επίπεδο ποιότητας 1, 2 ή 3 ανάλογα με το τι θεωρείται βέλτιστο εκείνη τη στιγμή.

2.5.2.2. Αποθήκευση και ενεργοποίηση προφίλ

Αφού ο χρήστης ολοκληρώσει τη διαμόρφωση του προφίλ του, μπορεί να επιλέξει είτε να ενεργοποιήσει το τροποποιημένο προφίλ (*'Activate'*) είτε να το αποθηκεύσει απλώς (*'Store'*) για μελλοντική χρήση. Στην πρώτη περίπτωση, η ενεργοποίηση των τρεχουσών ρυθμίσεων οδηγεί στην εκκίνηση της διαδικασίας βελτιστοποίησης που εκτελεί η MMM, με σκοπό την εύρεση της βέλτιστης ανάθεσης υπηρεσιών σε σημεία πρόσβασης και σε επίπεδα ποιότητας, ενώ στη δεύτερη περίπτωση οι αλλαγές που πραγματοποίησε ο χρήστης αποθηκεύονται σε ένα αρχείο ιδιοτήτων (*properties file*) στο οποίο κάθε καταχώρηση είναι ένα ζεύγος της μορφής 'όνομα = τιμή'.

Για παράδειγμα, για την περίπτωση της Εικόνας 2-5, το αντίστοιχο αρχείο ιδιοτήτων θα έχει ως εξής:

```
#The 4 main factors
#factor1 is the most important one, factor4 is the least important
factor1=Quality
factor2=Cost
factor3=Provider
factor4=Technology
#Specify the provider
providerName=Cosmote
providerCode=1
#Specify the technology
technologyName=WLAN
#QoS Settings
#Max QoS for Voice Call Service = 3
1=3
#Max QoS for SMS Service = 1 – Not Editable
2=1
#Max QoS for MMS Service = 2
3=2
#Max QoS for Email Service = 1 – Not Editable
4=1
#Max QoS for Video Call Service = 4
5=4
#Max QoS for Voice Stream Service = 3
6=3
#Max QoS for Web Browsing Service = 4
7=4
```

2.5.3. Μοντελοποίηση και προσαρμογή στις προτιμήσεις του χρήστη

2.5.3.1. Γενικά για τη μοντελοποίηση μέσω μπεϋζιανών μετα-δικτύων

Εναλλακτικά προς τη χρήση μιας γραφικής διεπαφής μέσω της οποίας ο χρήστης μπορεί ο ίδιος να καθορίζει ποιές παράμετροι και με ποιά βαρύτητα επιθυμεί να επηρεάσουν την απόφαση ανάθεσης υπηρεσιών σε σημεία πρόσβασης και σε επίπεδα ποιότητας, η συνιστώσα UPM του MTMS ενσωματώνει ένα σύστημα μοντελοποίησης των παραμέτρων αυτών και των μεταξύ τους σχέσεων, βασισμένο σε μπεϋζιανά δίκτυα ([3],[4]). Στόχος του συστήματος αυτού είναι να μπορεί να προβλέπει τις πιθανότερες τιμές των τυχαίων μεταβλητών w_q , w_o , w_t και w_c , και συνεπώς και την πιθανότερη, κατά σειρά προτεραιότητας, διάταξη αυτών, δεδομένων του τρέχοντος πλαισίου χρήσης και της αιτούμενης υπηρεσίας. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη το γεγονός ότι ο χρήστης ενδέχεται να έχει διαφορετικές προτιμήσεις σε διαφορετικά πλαίσια χρήσης. Για παράδειγμα, για ένα χρήστη σε επαγγελματικό ταξίδι το κόστος μπορεί να μην αποτελεί τόσο σημαντικό παράγοντα όσο η ποιότητα υπηρεσίας, αλλά ο ίδιος χρήστης μπορεί να επιθυμεί να ελαχιστοποιήσει το κόστος στον ελεύθερο χρόνο του ([5]). Δηλαδή, οι προτιμήσεις του χρήστη ενδέχεται να αλλάζουν ανάλογα με την ώρα της ημέρας, την κατάσταση

στην οποία βρίσκεται, τη θέση του και ακόμη ανάλογα με τους διαφορετικούς ρόλους τους οποίους ο χρήστης μπορεί να αναλάβει.

Είναι πολύ δύσκολο, έως αδύνατο, για ένα χρήστη να μπορέσει να λάβει υπόψη του όλους αυτούς τους διαφορετικούς παράγοντες σε όλες τις περιπτώσεις όπου θα χρειάζεται ανακατανομή των υπηρεσιών σε σημεία πρόσβασης και σε επίπεδα ποιότητας. Αυτή η λειτουργία μπορεί να ανατεθεί σε ένα ξεχωριστό τμήμα του MTMS το οποίο θα βοηθά το χρήστη να προσδιορίζει τους παράγοντες που θα επηρεάσουν τη διαμόρφωση των υπηρεσιών, σύμφωνα με προηγούμενες εμπειρίες και προτιμήσεις.

Στην παρούσα εργασία προτείνεται μια μοντελοποίηση της εξάρτησης των συντελεστών w_i από την υπηρεσία και το πλαίσιο χρήσης βασισμένη στη λογική των μπεϋζιανών μετα-δικτύων, τα οποία αποτελούν μια επέκταση των κλασικών μπεϋζιανών δικτύων σε πολυ-επίπεδα πιθανολογικά μοντέλα. Κάθε συντελεστής w_i θεωρείται μια τυχαία μεταβλητή και ταυτόχρονα κόμβος ενός κατευθυνόμενου γράφου του οποίου η δομή καθορίζεται από τις αιτιακές σχέσεις μεταξύ των διαφόρων παραμέτρων. Η κατασκευή και η χρήση μπεϋζιανών μετα-δικτύων υποθέτει ότι η διαλειτουργικότητα μεταξύ στοιχειωδών μπεϋζιανών δικτύων μπορεί να μοντελοποιηθεί μέσω ενός άλλου μπεϋζιανού δικτύου. Τα στοιχειώδη αυτά μπεϋζιανά δίκτυα ορίζουν τα διαφορετικά επίπεδα του συνολικού μετα-δικτύου (π.χ. επίπεδο πλαισίου χρήσης, προγνωστικό επίπεδο). Τέτοια μοντέλα ενδείκνυνται για εφαρμογές που σχετίζονται με προφίλ χρηστών, όπου πιθανοτικές σχέσεις μεταξύ των στοιχείων του προφίλ ελέγχονται από πιθανοτικές σχέσεις μεταξύ χαρακτηριστικών του πλαισίου χρήσης. Τα μπεϋζιανά δίκτυα έχουν αποδειχθεί πολύτιμα εργαλεία για την κωδικοποίηση, μάθηση και συλλογιστική πιθανοτικών σχέσεων, και από τη στιγμή που θα 'μάθουν' τη σωστή δομή και τις σωστές παραμέτρους, θα μπορούν να υποστηρίξουν τον πιθανοτικό συμπερασμό, συμπεριλαμβανομένης της πρόβλεψης των προτιμήσεων του χρήστη ([6]).

Υπό μια ευρύτερη έννοια, η διαμόρφωση του προφίλ χρήστη μπορεί να θεωρηθεί μια διαδικασία εξόρυξης γνώσης, με στόχο την αποδοτική και αυτοματοποιημένη κατασκευή και παρουσίαση των φιλτραρισμένων προτιμήσεων του χρήστη. Προσωπικά δεδομένα τα οποία ο χρήστης παρέχει ο ίδιος κατά την εγγραφή του (*registration*), η συμπεριφορά και το ιστορικό του συνδυάζονται για την κατασκευή του προσωπικού του προφίλ, το οποίο χρησιμοποιείται εν συνεχεία για να

υποβοηθήσει την επιλογή δικτύου πρόσβασης σε ετερογενή περιβάλλοντα, όταν αυτή ελέγχεται από το κινητό τερματικό.

2.5.3.2. Ταξινόμηση χαρακτηριστικών του κινητού περιβάλλοντος

Ένα από τα χαρακτηριστικότερα γνωρίσματα του κινητού περιβάλλοντος είναι η κινητικότητα. Η αξιολόγηση της κινητικότητας έγκειται στην ικανοποίηση των αναγκών για αμεσότητα και γνώση της θέσης ([7]). Το στοιχείο ‘θέση του κινητού χρήστη’ μεταβάλλει διαρκώς τις τιμές του. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι πρόκειται για ένα στοιχείο που σχετίζεται με το πλαίσιο χρήσης (*contextual attribute*). Η θέση του χρήστη, καθώς και μια σειρά άλλων ταχέως μεταβαλλόμενων χαρακτηριστικών, όπως ο χρόνος, διαμορφώνει ένα πλαίσιο χρήσης μέσα στο οποίο ο χρήστης λαμβάνει αποφάσεις.

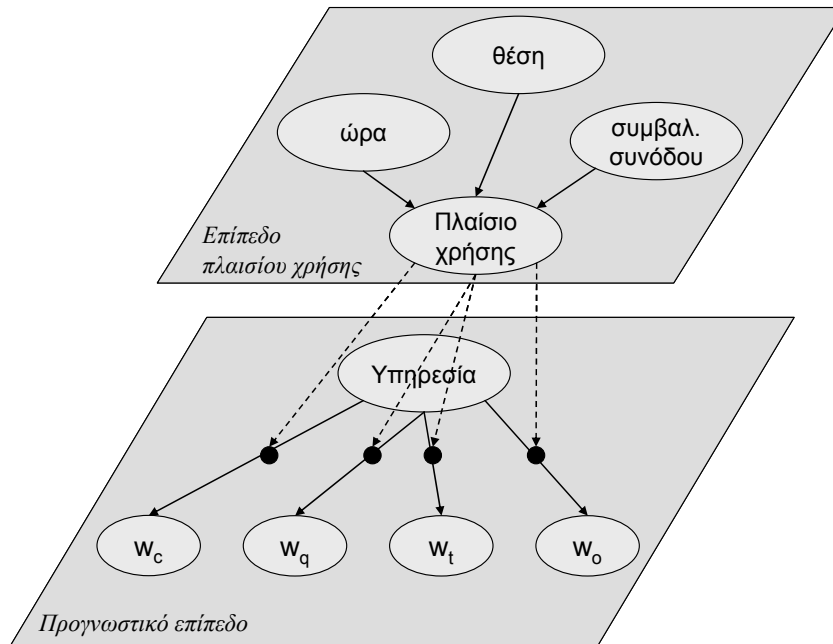
Διακρίνουμε τις ακόλουθες κλάσεις των χαρακτηριστικών του κινητού περιβάλλοντος ([6]):

- Κλάση 1: *Χαρακτηριστικά-στόχοι (target attributes)*
 - Πιθανά μέλη: η βαρύτητα που αποδίδει ο χρήστης σε παράγοντες που επηρεάζουν τη διαμόρφωση υπηρεσιών, όπως ποιότητα υπηρεσίας, κόστος, πάροχος δικτύου και τύπος τεχνολογίας, για μια δεδομένη υπηρεσία και πλαίσιο χρήσης, η ομάδα στην οποία ανήκει ο χρήστης, η επόμενη αίτηση για υπηρεσία που θα πραγματοποιήσει, κ.λπ.
 - Γνωρίσματα: κοινοί κόμβοι-στόχοι του μπεϋζιανού δικτύου.
- Κλάση 2: *Προγνωστικά χαρακτηριστικά (predictive attributes)*
 - Πιθανά μέλη: προσωπικά δεδομένα που αφορούν το χρήστη (ηλικία, επάγγελμα, φύλο κ.λπ.), παρατηρήσεις πάνω στη συμπεριφορά του (προηγούμενα επιλεγμένα χαρακτηριστικά-στόχοι).
 - Γνωρίσματα: κοινοί κόμβοι του μπεϋζιανού δικτύου, οι οποίοι μπορούν να διαμορφώνουν κάποια δομή με βάση τις αιτιώδεις σχέσεις μεταξύ τους.
- Κλάση 3: *Χαρακτηριστικά πλαισίου χρήσης (contextual attributes)*
 - Πιθανά μέλη: η εκάστοτε θέση του χρήστη, η ώρα, ο καιρός, οι συμβαλλόμενοι της συνόδου επικοινωνίας του χρήστη, κ.λπ.
 - Γνωρίσματα: αυτά τα χαρακτηριστικά είναι ανεξάρτητα από τα προγνωστικά χαρακτηριστικά. Επηρεάζουν τις εξαρτήσεις στο προγνωστικό επίπεδο καθώς και τη συνάφεια των προγνωστικών χαρακτηριστικών. Η γνώση της κατάστασης των μεταβλητών στο

προγνωστικό επίπεδο δεν έχει καμία επίδραση στη βεβαιότητα με την οποία μπορεί να είναι γνωστές οι τιμές των χαρακτηριστικών πλαισίου χρήσης. Τα χαρακτηριστικά πλαισίου χρήσης ενδέχεται να εξαρτώνται από άλλες μεταβλητές πλαισίου χρήσης.

- Κλάση 4: *Μετα-χαρακτηριστικά πλαισίου χρήσης (meta-contextual attributes)*
 - Πιθανά μέλη: παράμετροι οι οποίες ορίζουν την αδυναμία ή την ισχύ κάποιων αιτιακών σχέσεων μεταξύ προγνωστικών χαρακτηριστικών και χαρακτηριστικών πλαισίου χρήσης, όπως η συνάφεια των μεταβλητών θέσης ή χρόνου, κ.λπ.
 - Γνωρίσματα: αυτά τα χαρακτηριστικά είναι ανεξάρτητα από τα προγνωστικά χαρακτηριστικά και από τα χαρακτηριστικά πλαισίου χρήσης. Επηρεάζουν τις εξαρτήσεις στο επίπεδο πλαισίου χρήσης ή τις συνάφειες των χαρακτηριστικών πλαισίου χρήσης.

Στην παρούσα εργασία θεωρείται ένα μπεύζιανό δίκτυο δύο επιπέδων (βασισμένο σε μια προσέγγιση που παρουσιάζεται στην παραπομπή [8]) (Σχήμα 2-6). Το μπεύζιανό δίκτυο του πρώτου επιπέδου (προγνωστικό επίπεδο) περιλαμβάνει πέντε κόμβους: έναν για την υπηρεσία (προγνωστικό χαρακτηριστικό) και τέσσερις ακόμη κόμβους, έναν για κάθε έναν από τους συντελεστές w_q , w_o , w_i και w_c (χαρακτηριστικά-στόχοι). Το μπεύζιανό δίκτυο του δεύτερου επιπέδου (επίπεδο πλαισίου χρήσης) περιλαμβάνει τέσσερις κόμβους: έναν για τη θέση του χρήστη, έναν για την ώρα, έναν για τον συμβαλλόμενο της συνόδου επικοινωνίας του χρήστη (χαρακτηριστικά πλαισίου χρήσης με αναφορά στο πρώτο επίπεδο, αλλά προγνωστικά χαρακτηριστικά με αναφορά στο δεύτερο επίπεδο) κι έναν για το πλαίσιο χρήσης (χαρακτηριστικό-στόχος με αναφορά στο δεύτερο επίπεδο).

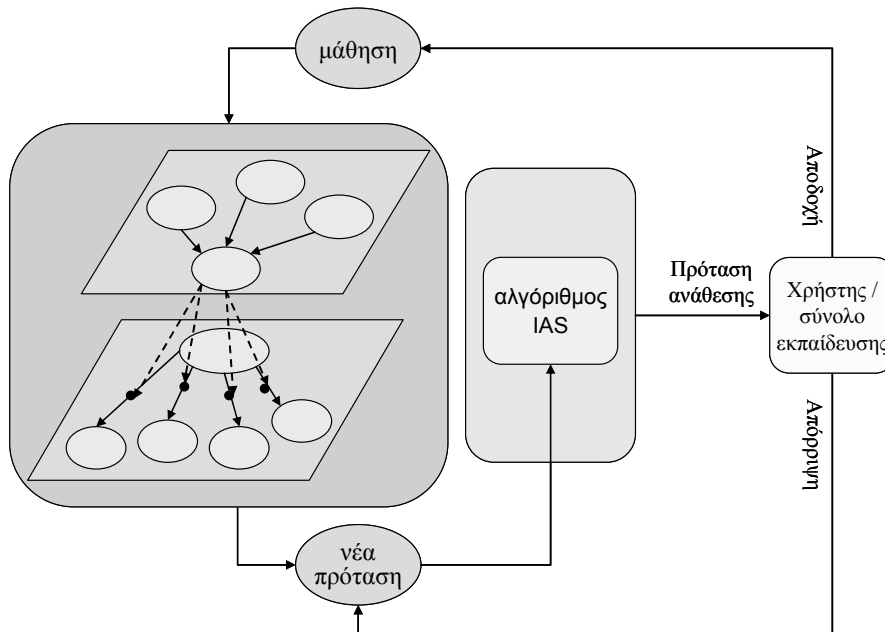


Σχήμα 2-6. Μπεϋζιανό μετα-δίκτυο για τη μοντελοποίηση των προτιμήσεων του χρήστη

Κάθε κόμβος αναπαριστά μια τυχαία μεταβλητή. Οι τιμές των τυχαίων μεταβλητών ‘θέση’, ‘ώρα’ και ‘συμβαλλόμενος επικοινωνίας’ καθορίζουν την πιθανότερη τιμή της μεταβλητής ‘πλαίσιο χρήσης’. Αυτή με τη σειρά της επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο οι τιμές των w_q , w_o , w_t , w_c εξαρτώνται από την τιμή της μεταβλητής ‘υπηρεσία’. Γνωρίζοντας τις επιμέρους δεσμευμένες πιθανότητες και εφαρμόζοντας βασικές αρχές του μπεϋζιανού συμπερασμού, το σύστημα παράγει τελικά τις πιθανότερες τιμές των w_i .

Οι τιμές αυτές των w_q , w_o , w_t και w_c χρησιμοποιούνται εν συνεχεία σαν είσοδος στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης που εκτελείται από το MMM. Η απόφαση στην οποία καταλήγει ο αλγόριθμος αυτός, ενδέχεται να ικανοποιεί ή να μην ικανοποιεί τις απαιτήσεις του χρήστη, δεδομένου ότι οι προτιμήσεις του καθορίστηκαν αυτόματα, χωρίς δική του παρέμβαση. Απώτερος στόχος είναι η ‘εκπαίδευση’ του συστήματος ώστε να προσαρμόσει τελικά, ποιοτικά και ποσοτικά, τις αιτιακές σχέσεις που θεωρεί ότι υφίστανται μεταξύ των διαφόρων κόμβων του μετα-δικτύου και να προβλέπει όσο το δυνατόν ακριβέστερα τις προτιμήσεις του χρήστη κάθε στιγμή. Αυτή η διαδικασία προϋποθέτει τη χρήση ενός κατάλληλου συνόλου παραδειγμάτων εκπαίδευσης το οποίο παρέχει ο χρήστης στο σύστημα, δίνοντας έτσι πληροφορίες σχετικά με τις προσωπικές του προτεραιότητες σε κάποιες περιστάσεις (υπηρεσία – πλαίσιο χρήσης). Ο στόχος μας λοιπόν έγκειται στην εξόρυξη γνώσης σε σχέση με τις προτιμήσεις του χρήστη σε οποιοδήποτε πλαίσιο χρήσης, δεδομένων των

προτιμήσεών του σε κάποια *στιγμιότυπα* πλαισίου χρήσης, ή ο προσδιορισμός μοτίβων συμπεριφοράς μέσα από παραδείγματα συμπεριφοράς (Σχήμα 2-7).



Σχήμα 2-7. Μάθηση και προσαρμογή του μπεϋζιανού μετα-δικτύου

2.5.3.3. Σχετικές εργασίες

Η δημιουργία προφίλ χρήστη και η μοντελοποίηση των προτιμήσεών του για τους σκοπούς της επιλογής δικτύου πρόσβασης έχει μελετηθεί σε πολύ λίγα αρθρα. Στις παραπομπές [9] και [10] παρουσιάζονται τα προφίλ επικοινωνίας για τερματικά Software Defined Radio (SDR), και χρησιμοποιείται μια XML δομή για την αναπαράσταση των διαφορετικών προφίλ επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένων αυτών του τερματικού, του χρήστη, της υπηρεσίας και του δικτύου. Οι παραπομπές [11] και [12] προτείνουν τα 'προσαρμοστικά προφίλ χρήστη' ως λύση για την αντιμετώπιση της πολυπλοκότητας που εισάγουν οι πολλαπλές επιλογές δικτύου πρόσβασης και οι πληροφορίες βασισμένες στη θέση του χρήστη (*location-based information*). Στην προσέγγιση αυτή έχει χρησιμοποιηθεί η συλλογιστική βασισμένη σε περιπτώσεις (*case-based reasoning*). Με χρήση της τεχνικής αυτής, όπως και άλλων τεχνικών μηχανικής μάθησης (νευρωνικά δίκτυα, μπεϋζιανά δίκτυα) ένας πράκτορας λογισμικού μπορεί να 'μάθει' τις προτιμήσεις του χρήστη αυτόματα από μελέτη της συμπεριφοράς του ([13]). Στο χώρο της ανάκτησης πληροφορίας (*information retrieval*), τα μπεϋζιανά δίκτυα έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για τη δημιουργία προφίλ χρήστη και τη μοντελοποίηση προτιμήσεων ([3],[8],[13],[14],[15]).

Γενικά, η μάθηση των μπεϋζιανών δικτύων από δεδομένα συνίσταται σε δύο ξεχωριστά προβλήματα: τη μάθηση της δομής και τη μάθηση των παραμέτρων του δικτύου. Υπάρχουν διαφορετικοί τρόποι σύμφωνα με τους οποίους μπορούμε να θεωρήσουμε ένα μπεϋζιανό δίκτυο, καθένας από τους οποίους υπαγορεύει και μια διαφορετική προσέγγιση στο πρόβλημα της μάθησης ([16]): για παράδειγμα, ένα μπεϋζιανό δίκτυο μπορεί να θεωρηθεί ως μια δομή η οποία κωδικοποιεί την από κοινού συνάρτηση πιθανότητας κάποιων παραμέτρων. Αυτή η προσέγγιση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το καλύτερο μπεϋζιανό δίκτυο είναι εκείνο που ταιριάζει καλύτερα στα δεδομένα, και στους αλγορίθμους μάθησης που βασίζονται στη βαθμολογία (*scoring-based algorithms*), οι οποίοι αναζητούν δομές που μεγιστοποιούν κάποιου είδους βαθμολογική συνάρτηση ([17],[18]). Εναλλακτικά, το μπεϋζιανό δίκτυο μπορεί να θεωρηθεί ως μια δομή η οποία κωδικοποιεί ένα σύνολο σχέσεων ανεξαρτησίας μεταξύ των κόμβων, σύμφωνα με την αρχή του *d-διαχωρισμού* (*d-separation*) ([19]). Αυτή η προσέγγιση οδηγεί σε μεθόδους μάθησης οι οποίες επιχειρούν να εντοπίσουν σχέσεις ανεξαρτησίας μεταξύ των διαφόρων κόμβων, και οι οποίες συχνά αναφέρονται ως *CI-based* ή *constraint-based algorithms* ([20],[21]).

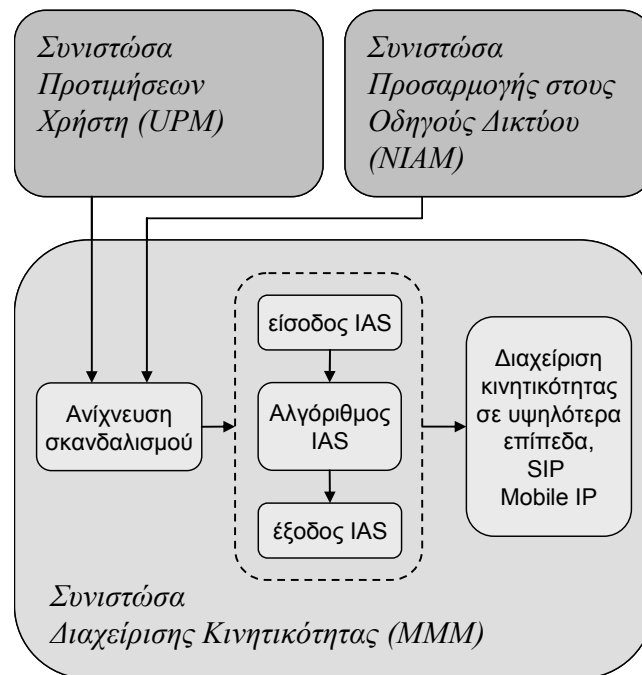
Το πρόβλημα του εντοπισμού ενός μπεϋζιανού δικτύου (μεταξύ αυτών όπου κάθε κόμβος έχει μέχρι έναν ορισμένο αριθμό γονέων), το οποίο χαρακτηρίζεται από μια εκ-των-υστερών (*posterior*) πιθανότητα σύγκλισης στα δεδομένα μεγαλύτερη ορισμένης σταθεράς, είναι NP-hard ([22],[23]). Η μάθηση, ή εκπαίδευση, ενός μπεϋζιανού δικτύου μπορεί να επιτευχθεί με χρήση πολλών διαφορετικών μεθόδων, όπως είναι η γραμμική παλινδρόμηση (*linear regression*) ([24],[25],[26],[27],[28]), τα πιθανολογικά νευρωνικά δίκτυα (*probabilistic neural networks*) ([29],[30],[31],[32]) και τα πιθανολογικά δένδρα απόφασης (*probabilistic decision trees*) ([33],[34]). Στην παρούσα εργασία προτείνεται η κατασκευή ενός πιθανολογικού νευρωνικού δικτύου για τη μάθηση των παραμέτρων του δικτύου, και προτείνεται ένα κριτήριο αξιολόγησης σε συνδυασμό με έναν ευριστικό αλγόριθμο αναζήτησης για τη μάθηση τη δομής.

2.6. Συνιστώσα διαχείρισης κινητικότητας (MMM)

2.6.1. Βασική λειτουργία

Η συνιστώσα MMM είναι υπεύθυνη για τη διεκπεραίωση όλων των ενεργειών που σχετίζονται με τη διαχείριση κινητικότητας του τερματικού. Ενσωματώνει λειτουργικότητα τόσο για τη διαχείριση της κινητικότητας στο στρώμα ζεύξης δεδομένων (υπολογισμός βέλτιστου σημείου πρόσβασης και ανάθεση υπηρεσιών σε επίπεδα ποιότητας, έλεγχος εγκατάστασης και απόλυσης συνδέσεων στο επίπεδο της δικτυακής διεπαφής) όσο και σε υψηλότερα στρώματα (διαφάνεια διαπομπών στο επίπεδο IP, έλεγχος εφαρμογών). Η μεν πρώτη πτυχή της διαχείρισης κινητικότητας εξυπηρετείται από τη λειτουργία του αλγορίθμου *Ευφυούς Επιλογής Πρόσβασης* (*Intelligent Access Selection – IAS*), η δε δεύτερη από την ενσωμάτωση κατάλληλων λύσεων πρωτοκόλλων όπως είναι το Mobile IP και το SIP.

Στο Σχήμα 2-8 αποδίδεται σχηματικά η λειτουργία του MMM. Εκτός από τη βασική λειτουργία της συνιστώσας αυτής διακρίνονται και οι διεπαφές της προς τη UPM και τη NIAM.



Σχήμα 2-8. Λειτουργία συνιστώσας MMM

Στις παραγράφους που ακολουθούν, παρουσιάζονται εκτενέστερα και οι δύο προαναφερθείσες πτυχές της λειτουργίας της MMM.

2.6.2. Λειτουργικότητα SIP / Mobile IP

Από τη σκοπιά του κινητού τερματικού, υπάρχουν αρκετές υποδομές στα δίκτυα IP οι οποίες είναι στενά συνδεδεμένες με τα δίκτυα πρόσβασης και οι οποίες υποστηρίζουν διαχείριση της κινητικότητας και έλεγχο συνόδου, και οι οποίες βασίζονται κυρίως στο Mobile IP και στο Πρωτόκολλο Έναρξης Συνόδου (*Session Initiation Protocol – SIP*).

Η δυνατότητα επαφής οποιαδήποτε χρονική στιγμή με το χρήστη στο τρέχον δίκτυο και τερματικό του (*user reachability*) μπορεί να παρασχεθεί από το SIP. Πιο συγκεκριμένα, το SIP είναι ένα πρωτόκολλο ελέγχου του επιπέδου εφαρμογών, οι κύριες λειτουργίες του οποίου είναι θέση / εντοπισμός χρήστη (*user location*), διαθεσιμότητα χρήστη (*user availability*), δυνατότητες χρήστη (*user capabilities*), σύσταση συνόδου επιπέδου εφαρμογών (*application level session set-up*) και διαχείριση συνόδου επιπέδου εφαρμογών (*application level session management*) ([35])

Σε ό,τι αφορά τη συνέχεια της συνόδου (*session continuity*), την ικανότητα δηλαδή διατήρησης μιας συνόδου όταν το τερματικό κινείται μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών, αυτή μπορεί να εξασφαλιστεί με τη χρήση ενός πρωτοκόλλου κινητικότητας IP, όπως είναι το Mobile IP ([36],[37]). Ένα τέτοιο πρωτόκολλο επιτρέπει στο κινητό τερματικό να εκτελεί διαπομπές επιπέδου IP μεταξύ δρομολογητών πρόσβασης. Επιπλέον, βρίσκεται σε εξέλιξη έρευνα ([38],[39]) η οποία αφορά την επέκταση των υπάρχοντων πρωτοκόλλων κινητικότητας ώστε να επιτρέπουν την εκτέλεση αρραγούς διαπομπής στο επίπεδο IP.

Προαπαιτούμενο για τα πρωτόκολλα αρραγούς IP διαπομπής θεωρείται η ικανότητα του κινητού τερματικού να επιλέγει έναν κατάλληλο στόχο διαπομπής, βασιζόμενο στην αντιστοίχιση των δυνατοτήτων και των απαιτήσεων του τερματικού (και του χρήστη) με αυτές του στόχου της διαπομπής. Ακριβώς αυτή η λειτουργία επιτελείται από τον αλγόριθμο *Ευφούς Επιλογής Πρόσβασης* που αναλύεται στην επόμενη παράγραφο.

2.6.3. Ευφούς επιλογή πρόσβασης

Ο λειτουργία IAS είναι υπεύθυνη για τη βέλτιστη ανάθεση των υπηρεσιών που λαμβάνονται στο τερματικό σε επίπεδα ποιότητας και σε σημεία πρόσβασης. Αυτό σημαίνει ότι ο αλγόριθμος IAS είναι σε θέση να προσδιορίζει για κάθε υπηρεσία τόσο

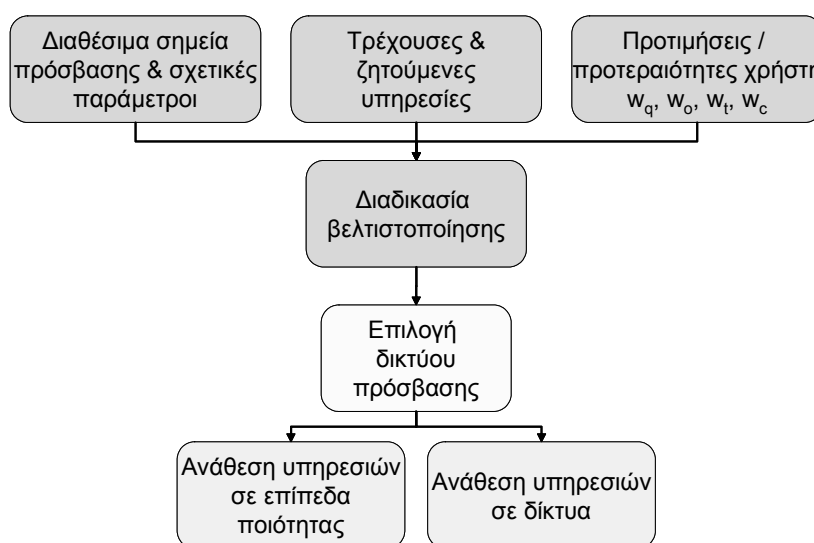
την τοπική διεπαφή (τεχνολογία) όσο και το δικτυακό σημείο πρόσδεσης (σημείο / δρομολογητής πρόσβασης) μέσω των οποίων αυτή θα πρέπει να παρασχεθεί. Αυτό ισχύει και για τις διαπομπές του τερματικού που αφορούν τη μετακίνηση εντός της ίδιας τεχνολογίας πρόσβασης αλλά και για τις διαπομπές που αφορούν τη μετακίνηση μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης.

Ανάγκη για υπολογισμό καινούριας ανάθεσης υπηρεσιών σε επίπεδα ποιότητας και σε σημεία πρόσβασης υπάρχει στις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Όταν ο χρήστης εκδίδει ένα αίτημα εξυπηρέτησης, που αποσκοπεί στην έναρξη χρήσης κάποιων υπηρεσιών.
- Όταν ο χρήστης τροποποιεί το προφίλ του, και συνεπώς οι τιμές των συντελεστών w_q , w_o , w_i και w_c μεταβάλλονται.
- Όταν παρατηρείται σοβαρή υποβάθμιση του λαμβανόμενου σήματος από κάποιο σημείο πρόσβασης στο οποίο το τερματικό είναι συνδεδεμένο, ή ακόμη και πλήρης απώλεια του σήματος.
- Όταν παρατηρείται η εμφάνιση στην εμβέλεια του τερματικού ενός καινούριου σημείου πρόσβασης ή η εξαφάνιση ενός υπάρχοντος.

Με την εμφάνιση οποιουδήποτε από τα παραπάνω γεγονότα, ο αλγόριθμος IAS σκανδαλίζεται και εκτελείται με σκοπό την εύρεση της βέλτιστης ανάθεσης τόσο για την καινούρια αιτούμενη υπηρεσία (πρώτη από τις προαναφερθείσες περιπτώσεις) όσο και για τις ήδη τρέχουσες.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης που επιτελείται από τον αλγόριθμο IAS αποδίδεται σχηματικά στο Σχήμα 2-9.



Σχήμα 2-9. Διαδικασία βελτιστοποίησης του αλγορίθμου IAS

Αυτό το πρόβλημα βελτιστοποίησης βασίζεται στα εξής δεδομένα εισόδου:

- Ένα σύνολο μετρήσεων που αντανακλά τις δυνατότητες των διαθέσιμων σημείων πρόσβασης. Πιο συγκεκριμένα, οι μετρήσεις αυτές περιλαμβάνουν για κάθε σημείο πρόσβασης ξεχωριστά: τη διαθεσιμότητά του σε εύρος ζώνης, την ισχύ του σήματος που λαμβάνει το τερματικό από το σημείο αυτό, τον τύπο της υποστηριζόμενης τεχνολογίας του, τον πάροχο δικτύου στον οποίο ανήκει και τέλος τα αναγνωριστικά του ίδιου του σημείου πρόσβασης καθώς και της διεπαφής στο κινητό τερματικό με την οποία επικοινωνεί.
- Το σύνολο των υπηρεσιών που ήδη λαμβάνονται στο τερματικό και το σύνολο των υπηρεσιών τις οποίες ζητά ο χρήστης να λάβει, καθώς και τα αντίστοιχα επίπεδα ποιότητας και για τα δύο αυτά σύνολα.
- Το σύνολο των προτιμήσεων του χρήστη, δηλαδή τη σειρά προτεραιότητας των παραμέτρων ‘ποιότητα’, ‘κόστος’, ‘πάροχος δικτύου’ και ‘τύπος τεχνολογίας’, η οποία και καθορίζει το εκάστοτε χρησιμοποιούμενο προφίλ.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης θα πρέπει να παράγει τα ακόλουθα αποτελέσματα:

- Ανάθεση όλων των υπηρεσιών των δύο προαναφερθέντων συνόλων σε επίπεδα ποιότητας.
- Ανάθεση όλων των υπηρεσιών σε σημεία πρόσβασης.

Οι αναθέσεις αυτές θα πρέπει να βελτιστοποιούν μια αντικειμενική συνάρτηση η οποία σχετίζεται με το επίπεδο ποιότητας και με το κόστος στα οποία παρέχεται κάθε υπηρεσία, με τον τύπο της τεχνολογίας και με τον πάροχο δικτύου μέσω των οποίων πραγματοποιείται η παροχή αυτή, καθώς και με το ενδιαφέρον που αποδίδει ο χρήστης τη δεδομένη στιγμή σε κάθε έναν από τους παράγοντες αυτούς.

Οι περιορισμοί που οφείλουν να ικανοποιούν οι υπολογιζόμενες αναθέσεις κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

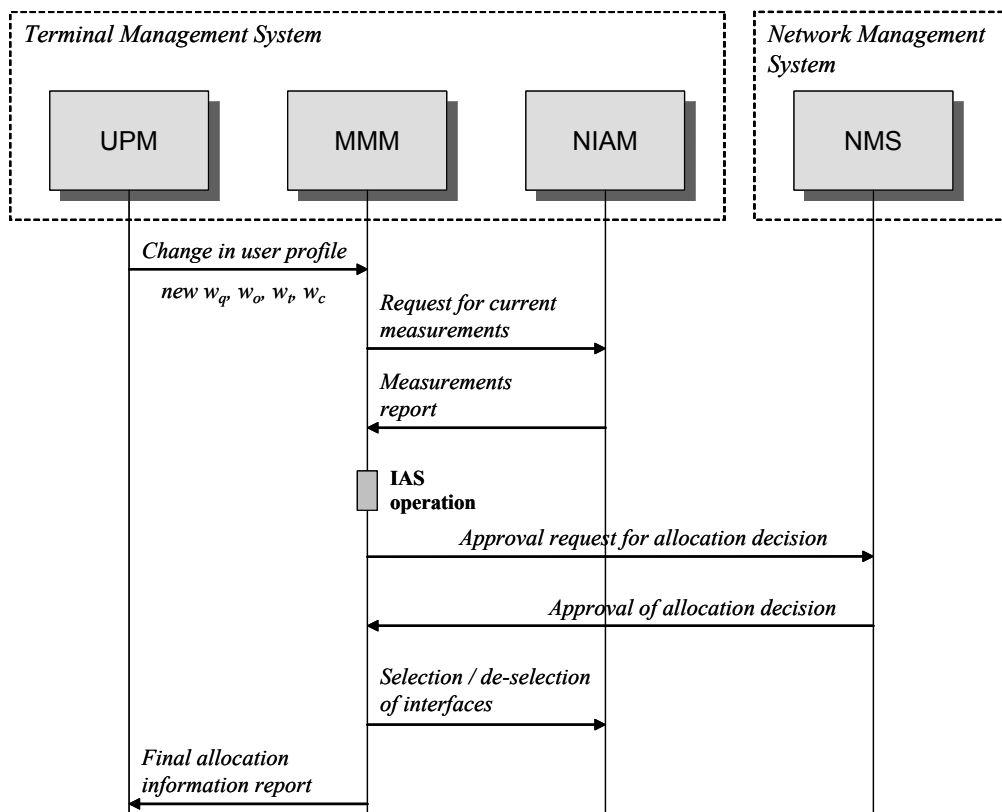
- Κάθε υπηρεσία θα πρέπει να ανατίθεται σε ένα αποδεκτό επίπεδο ποιότητας.
- Τα μέγιστα επίπεδα ποιότητας που προσδιορίζει ο χρήστης για κάθε υπηρεσία θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.
- Οι προτιμήσεις του χρήστη θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη με τη σειρά προτεραιότητας που έχει οριστεί στο προφίλ του.

2.7. Ροή πληροφορίας στο κινητό τερματικό

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται σχηματικά η ροή των διαφόρων δομών πληροφορίας στο κινητό τερματικό, για δύο διαφορετικές περιπτώσεις εκκίνησης του αλγορίθμου IAS. Στην πρώτη περίπτωση (παράγραφος 2.7.1) ο σκανδαλισμός του IAS προέρχεται από την επικοινωνία της MMM με τη UPM, ενώ στη δεύτερη περίπτωση (παράγραφος 2.7.2) από την επικοινωνία της MMM με τη NIAM.

2.7.1. Εκκίνηση λόγω τροποποίησης προφίλ

Στο Σχήμα 2-10 απεικονίζεται η επικοινωνία μεταξύ των διαφορετικών συνιστωσών του MTMS, στην περίπτωση σκανδαλισμού του αλγορίθμου IAS μετά από τροποποίηση του προφίλ του χρήστη.



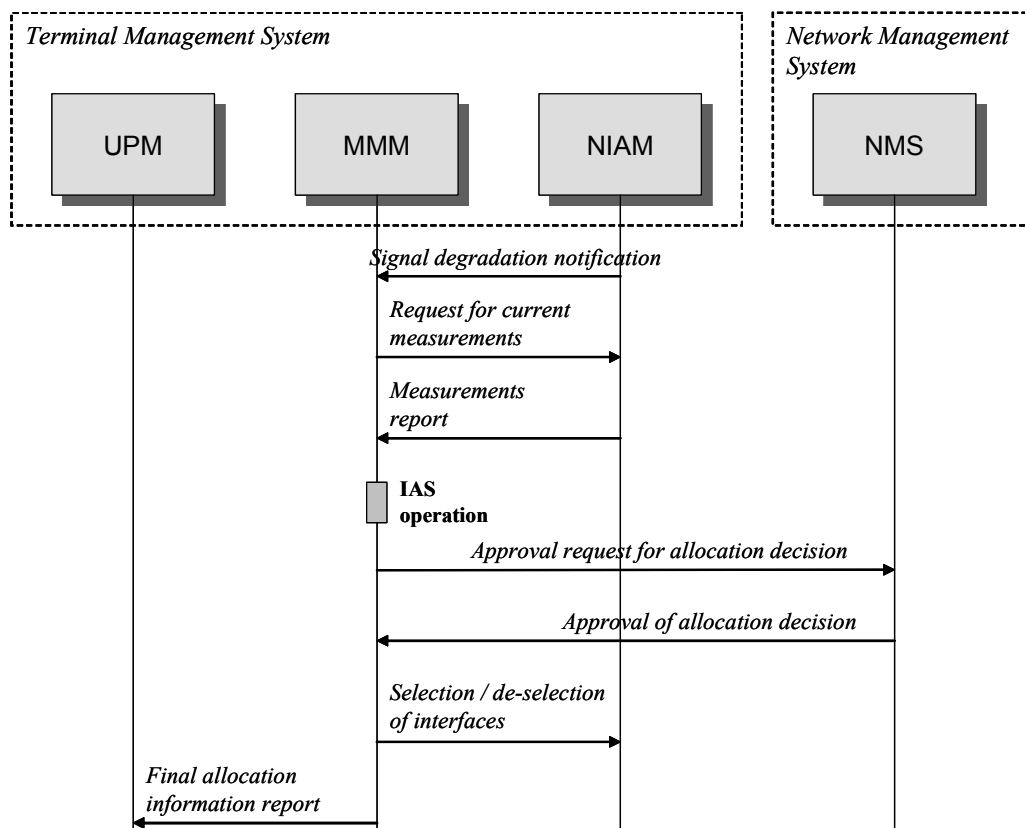
Σχήμα 2-10. Ακολουθιακό διάγραμμα – εκκίνηση IAS λόγω τροποποίησης προφίλ χρήστη

Αρχικά, η UPM ενημερώνει τη MMM σχετικά με τις νέες τιμές των συντελεστών w_q, w_o, w_i και w_c , οι οποίες έχουν προκύψει μετά από αποθήκευση αλλαγών στο προφίλ χρήστη. Στη συνέχεια, η MMM ζητά από τη NIAM τη συγκέντρωση καινούριων μετρήσεων που αντανακλούν την κατάσταση των διαθέσιμων σημείων πρόσβασης εκείνη τη στιγμή, μέσω ενός MEASUREMENT_REQUEST μηνύματος, και η NIAM με τη σειρά της παρέχει τις ζητούμενες πληροφορίες μέσω ενός

MEASUREMENT_REPLY μηνύματος. Αμέσως μετά τη λήψη των μετρήσεων αυτών, η MMM εκκινεί τον αλγόριθμο IAS και υποβάλλει (προαιρετικά) την απόφασή της για έγκριση στο σύστημα διαχείρισης δικτύου (NMS). Αφού η MMM λάβει την αντίστοιχη έγκριση, πραγματοποιεί μέσω της NIAM την αποσύνδεση και τη σύνδεση των διεπαφών στα κατάλληλα σημεία πρόσβασης, ενώ, τέλος, η UPM αναλαμβάνει την απεικόνιση των πληροφοριών σύνδεσης στη γραφική διεπαφή του τερματικού.

2.7.2. Εκκίνηση λόγω υποβάθμισης λαμβανόμενου σήματος

Το ακολουθιακό διάγραμμα του Σχήματος 2-11 απεικονίζει την επικοινωνία μεταξύ των UPM, MMM και NIAM στην περίπτωση σκανδαλισμού του αλγορίθμου IAS μετά από ανίχνευση σοβαρής υποβάθμισης του λαμβανόμενου σήματος απο κάποιο επιλεγμένο σημείο πρόσβασης.



Σχήμα 2-11. Ακολουθιακό διάγραμμα – εκκίνηση IAS λόγω υποβάθμισης σήματος

Στην περίπτωση αυτή, η αρχική ειδοποίηση της MMM προέρχεται από τη NIAM. Και πάλι, ακολουθεί μια ανταλλαγή μηνυμάτων MEASUREMENT_REQUEST και MEASUREMENT_REPLY, η εκτέλεση του αλγορίθμου IAS και ο υπολογισμός των κατάλληλων αναθέσεων, και η (προαιρετική) υποβολή των αποφάσεων αυτών στο

δίκτυο προς έγκριση. Τέλος, η NIAM αποσυνδέει και συνδέει τις δικτυακές διεπαφές με σημεία πρόσβασης, όπως υπαγορεύεται από τις αποφάσεις του IAS, και η UPM ενημερώνει τη γραφική διεπαφή χρήστη με τις ανανεωμένες πληροφορίες σύνδεσης.

Παραπομπές

- [1] D. Trossen, G. Krishnamurthi, H. Chaskar, J. Kempf, “Issues in candidate access router discovery for seamless IP-level handoffs”, IETF draft-ietf-seamoby-cardiscovery-issues-02.txt, Sept. 2001, work in progress.
- [2] M. Liebsch, A. Singh (editors), “Candidate Access Router Discovery”, Internet Draft, Sept. 2004.
- [3] V. Terziyan, “A Bayesian Metanetwork”, *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, vol. 14, 2004.
- [4] D. Heckerman, “A Tutorial on Learning with Bayesian Networks”, *Technical Report MSR-TR-95-06*, Microsoft Research, 1996.
- [5] M. Dillinger, K. Madani and N. Alonistioti, *Software Defined Radio: Architectures, Systems and Functions*, Wiley, 2003.
- [6] V. Terziyan and O. Vitko, “Bayesian Metanetworks for Modelling User Preferences in Mobile Environment”, *Advances in Artificial Intelligence, Lecture Notes in Artificial Intelligence*, vol. 2812, Springer, 2003.
- [7] B. Wassum, “Mobile Data Service Models for Mobile Network Operators”, presented at the Mobile Internet and Information Services 2000 Conference, San Diego, USA, 2000.
- [8] E. Homayounvala, S. A. Ghorashi, A. H. Aghvami, “A Bayesian approach to modelling user preferences for reconfiguration”, presented at the E2R Workshop on Reconfigurable Mobile Systems and Networks Beyond 3G, Barcelona, Spain, Sept. 2004.
- [9] E. Mohyeldin, M. Dillinger, J. Luo, P. Dornbusch, M. Fahmair, C. Salzmann, “Communication Profiles for SDR Equipment”, presented at the IST Mobile and Wireless Telecommunications Summit, Thessaloniki, Greece, June 2002.
- [10] E. Mohyeldin, M. Dillinger, J. Luo, P. Dornbusch, M. Fahmair, C. Salzmann, “Structure and Management of SDR System Profiles”, presented at the Software Defined Radio Technical Conference, San Diego, USA, Nov. 2003.
- [11] D. J. Allsopp, T. Kalus, “Smart 4G Mobiles: A User-Centric Approach”, presented at the 23rd SGAI International Conference on Innovative Techniques and Applications of Artificial Intelligence, Camnbridge, UK, 2003.
- [12] A. Klaus, “Adaptive User Profiles for SDR”, presented at the IST Mobile and Wireless Telecommunications Summit, Aveiro, Portugal, June 2003.

- [13] S. N. Schiaffino and A. Amandi, “User Profiling with Case Based Reasoning and Bayesian Networks”, in *Open Discussion Proceedings IBERAMIA-SBIA 2000*, Atibaia, Brazil, Nov. 2000.
- [14] S. K. M. Wong and C. J. Butz, “A Bayesian Approach to User Profiling in Information Retrieval”, *Technology Letters*, vol. 4, 2000.
- [15] M. Pazzani and D. Billsus, “Learning and Revising User Profiles: The Identification of Interesting Web Sites”, *Machine Learning*, vol. 27, 1997.
- [16] J. Cheng, R. Greiner, “Learning Bayesian belief network classifiers: algorithms and system”, in *Lecture Notes in Computer Science, Proceedings of the 14th Biennial Conference of the Canadian Society for Computational Studies of Intelligence*, vol. 2056, pp. 141-151, Springer 2001.
- [17] D. Heckerman, “A Tutorial on Learning with Bayesian Networks”, *Technical Report MSR-TR-95-06*, Microsoft Research, 1996.
- [18] G. F. Cooper, “Computational complexity of probabilistic inference using Bayesian belief networks”, *Artificial Intelligence*, vol. 42, no. 2-3, pp. 393-405, March 1999.
- [19] J. Pearl, *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*, Morgan Kauffman, 1988.
- [20] G. F. Cooper, “Computational complexity of probabilistic inference using Bayesian belief networks”, *Artificial Intelligence*, vol. 42, no. 2-3, pp. 393-405, March 1999.
- [21] P. Spirtes, C. Glymour, R. Scheines, *Causation, Prediction and Search*, MIT Press, 2001.
- [22] D. M. Chickering, “Learning Bayesian networks is NP-complete”, in D. Fischer, H.-J. Lenz (editors), *Lecture Notes in Statistics, Learning from Data – Artificial Intelligence and Statistics V*, vol. 112, pp. 121–130, Springer, 1996.
- [23] D. M. Chickering, D. Geiger, D. Heckerman, “Learning Bayesian networks is NP-hard”, *Technical Report MSR-TR-94-17*, Microsoft Research, Nov. 1994.
- [24] W. Buntine, “A guide to the literature on learning probabilistic networks from data”, *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 8, pp.195-210, 1996.
- [25] D. Heckerman, D. Geiger, “Likelihoods and priors for Bayesian networks”, *Technical Report MSR-TR-95-54*, Microsoft Research, 1995.

- [26] D. MacKay, “Bayesian interpolation”, *Neural Computation*, vol. 4, pp. 415-447, 1992.
- [27] D. MacKay, “A practical Bayesian framework for backpropagation networks”, *Neural Computation*, vol. 4, pp. 448-472, 1992.
- [28] R. Neal, “Probabilistic inference using Markov chain Monte Carlo methods”, *Technical Report, CRG-TR-93-1*, Department of Computer Science, University of Toronto, 1993.
- [29] S. Haykin, *Neural networks, a comprehensive foundation*, Prentice Hall, 1998.
- [30] D. Specht, “Probabilistic neural networks”, *Neural Networks*, vol. 3, pp. 109-118, Elsevier, 1990.
- [31] C. M. Bishop, *Neural networks for pattern recognition*, Clarendon Press, 1998.
- [32] G. D. Garson, *Neural networks, an introductory guide for social scientists*, SAGE Publications, 1998.
- [33] W. Buntine, “Learning classification trees”, in *Artificial Intelligence Frontiers in Statistics: AI and Statistics III*, Chapman and Hall, 1993.
- [34] N. Friedman, M. Goldszmidt, “Building classifiers using Bayesian networks”, in *Proceedings of the Thirteenth National Conference on Artificial Intelligence*, pp. 1277-1284, AAAI Press, 1996.
- [35] J. Rosenberg, H. Schulzrinne, G. Camarillo, A. Johnston, J. Peterson, R. Sparks, M. Handley, E. Schooler, "SIP: Session Initiation Protocol", IETF RFC 3261, June 2002.
- [36] C. Perkins, “IP Mobility Support for IPv4”, IETF RFC 3220, January 2002.
- [37] D. B. Johnson, “Mobility Support in IPv6”, IETF RFC 3775, June 2004.
- [38] R. Koodli (editor), “Fast Handovers for Mobile IPv6”, IETF RFC 4068, July 2005.
- [39] K. El Malki (editor), “Low Latency Handoffs in Mobile IPv4”, IETF Experimental RFC, January 2006.

Κεφάλαιο 3

Ευφυής Επιλογή Πρόσβασης

3.1. Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάστηκε η αρχιτεκτονική και η γενική λειτουργία ενός καινοτόμου *Συστήματος Διαχείρισης Κινητού Τερματικού (Mobile Terminal Management System – MTMS)* για συσκευές που λειτουργούν σε σύνθετα δικτυακά περιβάλλοντα τέταρτης γενιάς. Μια από τις βασικές απαιτήσεις που αφορούν τη λειτουργία του MTMS, όπως παρουσιάστηκε, είναι η ικανότητα διαμόρφωσης των υπηρεσιών που λαμβάνονται στο κινητό τερματικό και διαχείρισης των αιτημάτων του χρήστη για λήψη νέων υπηρεσιών. Ο χειρισμός αυτός συνίσταται στον προσδιορισμό των κατάλληλων δικτυακών διεπαφών και σημείων πρόσβασης καθώς και των κατάλληλων επιπέδων ποιότητας για κάθε μια από τις ήδη τρέχουσες και τις νέες υπηρεσίες που ο χρήστης ζητά να λάβει.

Στο πλαίσιο της διαμόρφωσης υπηρεσιών στο κινητό τερματικό, και πιο συγκεκριμένα της ανίχνευσης των εναλλακτικών επιλογών πρόσβασης του τερματικού καθώς και της πραγματοποίησης της σύνδεσής του στην επιλογή εκείνη που εγγυάται τη βέλτιστη παροχή υπηρεσίας, πρωταρχικής σημασίας είναι το πρόβλημα της *Ευφυούς Επιλογής Πρόσβασης (Intelligent Access Selection – IAS)*. Σε αυτό το κεφάλαιο δίνεται η αναλυτική περιγραφή του προβλήματος αυτού, η μαθηματική του διατύπωση καθώς και η επίλυση που επιχειρείται στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής.

Το πρόβλημα IAS συνιστά μια βραχυπρόθεσμη / μεσοπρόθεσμη διαδικασία βελτιστοποίησης, η λύση της οποίας επιτρέπει την επιλογή της κατάλληλης ασύρματης τεχνολογίας μέσω της οποίας το τερματικό θα λαμβάνει τις υπηρεσίες αποτελεσματικά από άποψη κόστους και ποιότητας υπηρεσίας, με προσέγγιση πραγματικού χρόνου.

Η εργασία που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο αυτό σχετίζεται άμεσα με διάφορες ευρείες περιοχές έρευνας, όπως: α) τη βέλτιστη επέκταση των παραδοσιακών δομών διαχείρισης των κινητών τερματικών, με σκοπό την ενσωμάτωση σε αυτά κατάλληλης λειτουργικότητας και ευφυΐας ώστε να διαχειρίζονται τα αιτήματα υπηρεσίας του χρήστη και τις διαρκώς μεταβαλλόμενες συνθήκες σ ένα σύνθετο δικτυακό περιβάλλον ([1],[2],[3]). β) την αξιολόγηση διαφόρων παραγόντων (δικτυακών, προσωπικών του χρήστη, κ.α.) οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν τη

διαδικασία επιλογής πρόσβασης, και τη συμπερίληψη αυτών στη διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης που προκύπτει. ([4],[5],[6],[7],[8])

Η προσέγγιση του τρέχοντος κεφαλαίου για την εξέταση του προβλήματος IAS είναι η ακόλουθη: Στην παράγραφο 3.2 δίνεται η γενική και η συμβολική περιγραφή του προβλήματος. Στην παράγραφο 3.3 δίνεται η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος. Η παράγραφος 3.4 μελετά τον αλγόριθμο επίλυσης, και τέλος, οι παράγραφοι 3.5 και 3.6 περιλαμβάνουν αποτελέσματα και κάποιες τελικές παρατηρήσεις αντίστοιχα.

3.2. Περιγραφή προβλήματος

3.2.1. Γενική περιγραφή

Τα δεδομένα εισόδου του προβλήματος IAS εμπίπτουν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Ένα σύνολο μετρήσεων που αντανακλούν τις δυνατότητες των διαθέσιμων σημείων πρόσβασης, όπως τα αντιλαμβάνεται το κινητό τερματικό. Πιο συγκεκριμένα, οι μετρήσεις αυτές περιλαμβάνουν, για κάθε σημείο πρόσβασης στην περιοχή του τερματικού: (i) τη διαθεσιμότητά του σε εύρος ζώνης, (ii) την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος από αυτό το σημείο, (iii) τον τύπο της υποστηριζόμενης τεχνολογίας πρόσβασης, (iv) τον πάροχο δικτύου στον οποίο ανήκει, (v) το αναγνωριστικό του, καθώς και το αναγνωριστικό της δικτυακής διεπαφής στο κινητό τερματικό η οποία επικοινωνεί με αυτό το σημείο.
- Το σύνολο των υπηρεσιών που ήδη λαμβάνονται στο τερματικό και το σύνολο των υπηρεσιών τις οποίες ζητά ο χρήστης να λάβει, καθώς και τα αντίστοιχα επίπεδα ποιότητας και για τα δύο αυτά σύνολα.
- Το σύνολο των προτιμήσεων του χρήστη, δηλαδή τη σειρά προτεραιότητας των παραμέτρων ‘ποιότητα’, ‘κόστος’, ‘πάροχος δικτύου’ και ‘τύπος τεχνολογίας’, η οποία και καθορίζει το εκάστοτε χρησιμοποιούμενο προφίλ.

Η λύση του προβλήματος IAS είναι το αποτέλεσμα μιας διαδικασίας βελτιστοποίησης η οποία θα πρέπει να παράγει τα ακόλουθα αποτελέσματα:

- Ανάθεση όλων των υπηρεσιών των δύο προαναφερθέντων συνόλων σε επίπεδα ποιότητας.
- Ανάθεση όλων των υπηρεσιών των δύο προαναφερθέντων συνόλων σε σημεία πρόσβασης.

Οι αναθέσεις αυτές θα πρέπει να βελτιστοποιούν μια αντικειμενική συνάρτηση η οποία σχετίζεται με το επίπεδο ποιότητας και με το κόστος στα οποία παρέχεται κάθε υπηρεσία, με τον τύπο της τεχνολογίας και με τον πάροχο δικτύου μέσω των οποίων πραγματοποιείται η παροχή αυτή, καθώς και με το ενδιαφέρον που αποδίδει ο χρήστης τη δεδομένη στιγμή σε κάθε έναν από τους παράγοντες αυτούς μέσω του προφίλ του.

Οι περιορισμοί που οφείλουν να ικανοποιούν οι υπολογιζόμενες αναθέσεις κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Κάθε υπηρεσία θα πρέπει να ανατίθεται σε ένα αποδεκτό επίπεδο ποιότητας.
- Το μέγιστο επίπεδο ποιότητας που προσδιορίζει ο χρήστης για κάθε υπηρεσία δεν πρέπει να παραβιάζεται.
- Οι προτιμήσεις του χρήστη θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη με τη σειρά προτεραιότητας που έχει οριστεί στο προφίλ του.

Ο αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος IAS θα πρέπει να σκανδαλίζεται στις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Όταν ο χρήστης εκδίδει ένα αίτημα εξυπηρέτησης, που αποσκοπεί στην έναρξη χρήσης κάποιων υπηρεσιών.
- Όταν ο χρήστης τροποποιεί το προφίλ του.
- Όταν παρατηρείται σοβαρή υποβάθμιση του λαμβανόμενου σήματος από κάποιο σημείο πρόσβασης στο οποίο το τερματικό είναι συνδεδεμένο, ή ακόμη και πλήρης απώλεια του σήματος.
- Όταν παρατηρείται η εμφάνιση στην εμβέλεια του τερματικού ενός καινούριου σημείου πρόσβασης.

3.2.2. Συμβολική περιγραφή

Σε αυτή την παράγραφο το πρόβλημα IAS περιγράφεται μαθηματικά.

3.2.2.1. Στοιχεία εισόδου

Συμβολίζουμε το σύνολο των διαθέσιμων σημείων πρόσβασης στην περιοχή του κινητού τερματικού ως $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}, n \in \mathbb{N}$. Οι πληροφορίες που περιλαμβάνονται στο σύνολο των μετρήσεων που αντανακλούν τις δυνατότητες των διαθέσιμων σημείων πρόσβασης μπορούν να παρασταθούν συμβολικά ως εξής:

- Το διαθέσιμο εύρος ζώνης ενός σημείου πρόσβασης p_i συμβολίζεται ως $BW_{Av}(p_i)$.
- Η ένδειξη της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος από το σημείο αυτό συμβολίζεται ως $SS(p_i)$.
- Ο τύπος της τεχνολογίας που υποστηρίζεται από το σημείο αυτό συμβολίζεται ως $T(p_i)$.
- Ο πάροχος δικτύου στον οποίο ανήκει συμβολίζεται ως $Op(p_i)$.

Συμβολίζουμε το σύνολο των υπηρεσιών οι οποίες ήδη λαμβάνονται στο τερματικό ή τις οποίες ζητά ο χρήστης να λάβει με νέα αίτηση ως $S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}, k \in \mathbb{N}$, και ως $Q_s(p) = \{q_1, q_2, \dots, q_m\}, m \in \mathbb{N}$ το σύνολο των επιπέδων ποιότητας στα οποία το σημείο πρόσβασης p , $p \in P$, μπορεί να προσφέρει την υπηρεσία s , $s \in S$. Το μέγεθος του συνόλου $Q_s(p)$ εξαρτάται τόσο από τη διαθεσιμότητα σε εύρος ζώνης του σημείου p όσο και από τον τύπο (ειδικά χαρακτηριστικά) της υπηρεσίας s . Οι πληροφορίες που αφορούν το σύνολο των υπηρεσιών αυτών μπορούν να παρασταθούν συμβολικά ως εξής:

- Η υπό εξέταση υπηρεσία συμβολίζεται ως s_j .
- Το επίπεδο ποιότητας στο οποίο εξετάζεται / ανατίθεται η υπηρεσία s_j συμβολίζεται ως $ql(s_j)$. Το μέγιστο επίπεδο ποιότητας στο οποίο μπορεί να ανατεθεί η υπηρεσία s_j , και το οποίο προσδιορίζει ο χρήστης, συμβολίζεται ως $ql_{s_j, max}$.

Οι πληροφορίες που αφορούν τις προτιμήσεις του χρήστη μπορούν να παρασταθούν συμβολικά ως εξής:

- Η προτίμηση του χρήστη για (υψηλή) ποιότητα, για κάποιο συγκεκριμένο πάροχο δικτύου, για κάποιον συγκεκριμένο τύπο τεχνολογίας και για (χαμηλό) κόστος συμβολίζονται ως w_q , w_o , w_t , w_c , αντίστοιχα. Οι συντελεστές αυτοί w_i αναπαριστούν ένα μέτρο του βάρους που τους αποδίδεται από τον αλγόριθμο επίλυσης του προβλήματος IAS.

3.2.2.2. Στοιχεία εξόδου – αντικειμενικοί σκοποί

Το πρόβλημα IAS έχει δύο αντικειμενικούς σκοπούς:

- Τον υπολογισμό της ανάθεσης των υπηρεσιών του συνόλου S σε επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας. Αυτή η ανάθεση μπορεί να σημειωθεί ως εξής:

$$A_{S-Q_L} = \{ql(s) | \forall s \in S\}$$

- Τον υπολογισμό της ανάθεσης των υπηρεσιών του συνόλου S σε σημεία πρόσβασης. Αυτή η ανάθεση μπορεί να σημειωθεί ως εξής:

$$A_{S-AP} = \{p(s) | \forall s \in S\}$$

Κάθε στοιχείο της ανάθεσης A_{S-AP} , $ap(s)$, ανήκει στο σύνολο P και κάθε στοιχείο της ανάθεσης A_{S-Q_L} , $ql(s)$, ανήκει σε κάποιο $Q_s(p)$. Αυτό σημαίνει ότι κάθε υπηρεσία ανατίθεται σε κάποιο από τα διαθέσιμα σημεία πρόσβασης και σε κάποιο από το επιτρεπτά επίπεδα ποιότητας.

Οι αναθέσεις A_{S-AP} και A_{S-Q_L} θα πρέπει να βελτιστοποιούν μια αντικειμενική συνάρτηση $OF(A_{S-Q_L}, A_{S-AP})$, η οποία σχετίζεται με το επίπεδο ποιότητας και με το κόστος στα οποία παρέχεται κάθε υπηρεσία, με τον τύπο της τεχνολογίας και με τον πάροχο δικτύου μέσω των οποίων πραγματοποιείται η παροχή αυτή, καθώς και με το ενδιαφέρον που αποδίδει ο χρήστης τη δεδομένη στιγμή σε κάθε έναν από τους παράγοντες αυτούς μέσω του προφίλ του.

3.2.2.3. Περιορισμοί

Οι αναθέσεις A_{S-AP} και A_{S-Q_L} θα πρέπει να ικανοποιούν ένα σύνολο από περιορισμούς. Η ανάθεση A_{S-AP} πρέπει να αναθέτει όλες τις υπηρεσίες του συνόλου S σε διαθέσιμα σημεία πρόσβασης, ενώ η ανάθεση A_{S-Q_L} πρέπει να αναθέτει όλες τις υπηρεσίες του συνόλου S σε επίπεδα ποιότητας που υποστηρίζονται από τα εξεταζόμενα σημεία πρόσβασης και που δεν υπερβαίνουν το μέγιστο επίπεδο που έχει ορίσει ο χρήστης.

Στον Πίνακα 3-1 δίνονται οι ερμηνείες των συμβόλων που χρησιμοποιούνται για τη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος IAS.

Πίνακας 3-1. Πρόβλημα IAS: πίνακας συμβόλων για τη μαθηματική διατύπωση

<i>Σύμβολο</i>	<i>Ερμηνεία</i>
$p, p \in P$	Διαθέσιμο σημείο πρόσβασης στην περιοχή του κινητού τερματικού
$s, s \in S$	Υπηρεσία που εξετάζεται – είτε λαμβανόμενη στο τερματικό είτε ζητούμενη από τον χρήστη
$q, q \in Q_s(p)$	Επίπεδο ποιότητας στο οποίο ένα σημείο πρόσβασης p μπορεί να προσφέρει την υπηρεσία s

<i>Σύμβολο</i>	<i>Ερμηνεία</i>
$ql(s)$	Επίπεδο ποιότητας στο οποίο ανατίθεται η υπηρεσία s
$ql_{s,max}$	Μέγιστο επιτρεπτό επίπεδο ποιότητας στο οποίο μπορεί να ανατεθεί η υπηρεσία s
$BW_{Av}(p)$	Διαθέσιμο εύρος ζώνης στο σημείο πρόσβασης p
$BW(s,q)$	Εύρος ζώνης που δεσμεύει η υπηρεσία s όταν ανατίθεται στο επίπεδο ποιότητας q
$SS(p)$	Ένδειξη ισχύος του λαμβανόμενου σήματος από το σημείο πρόσβασης p
$T(p)$	Τύπος υποστηριζόμενης τεχνολογίας από το σημείο πρόσβασης p
$Op(p)$	Πάροχος δικτύου στον οποίο ανήκει το σημείο πρόσβασης p
w_q, w_o, w_t, w_c	Ενδείξεις της προτίμησης του χρήστη για (υψηλή) ποιότητα υπηρεσίας, για κάποιο συγκεκριμένο πάροχο δικτύου ή τύπο τεχνολογίας, και για (χαμηλό) κόστος αντίστοιχα.
$F_Q(p,s)$	Παράγοντας που αποτιμά την ποιότητα υπηρεσίας που απολαμβάνει ο χρήστης όταν η υπηρεσία s ανατίθεται στο σημείο πρόσβασης p
$F_T(p)$	Παράγοντας που αποτιμά κατά πόσον ο τύπος της τεχνολογίας που υποστηρίζει το σημείο πρόσβασης p είναι συμβατός με την προτίμηση του χρήστη για κάποιον συγκεκριμένο τύπο τεχνολογίας
$F_O(p)$	Παράγοντας που αποτιμά κατά πόσον ο πάροχος δικτύου στον οποίο ανήκει το σημείο πρόσβασης p είναι συμβατός με την προτίμηση του χρήστη για κάποιον συγκεκριμένο πάροχο δικτύου
$F_C(p,q,s)$	Παράγοντας που αποτιμά το κόστος που επιβαρύνει τον χρήστη όταν η υπηρεσία s ανατίθεται στο σημείο πρόσβασης p και στο επίπεδο ποιότητας q
$A_S - AP$	Ανάθεση υπηρεσιών σε σημεία πρόσβασης
$A_S - QL$	Ανάθεση υπηρεσιών σε επίπεδα ποιότητας

3.3. Μαθηματική διατύπωση προβλήματος

Σε αυτήν την παράγραφο δίνεται η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος IAS. Προκειμένου να περιγραφούν οι αναθέσεις $AS-AP$ και $AS-QL$ εισάγονται οι μεταβλητές $y_s(p)$ και $x_s(q)$, οι οποίες παίρνουν την τιμή 1 στην περίπτωση που η υπηρεσία s ανατεθεί στο επίπεδο ποιότητας q και στο σημείο πρόσβασης p αντίστοιχα, και διαφορετικά την τιμή 0.

Επιζητούμε μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης

$$OF(AS-QL, AS-AP) = \sum_{s \in S} x_s(q) \cdot y_s(p) \cdot \left\{ F(p, q, s) + \sum_{s' \neq s} F'(p, q, s') \right\} \quad (1)$$

$$\text{όπου } F(p, q, s) = w_q \cdot F_Q(p, s) + w_t \cdot F_T(p) + w_o \cdot F_O(p) - w_c \cdot F_C(p, q, s) \quad (2),$$

$$F'(p, q, s') = w_q \cdot F'_Q(p, s') + w_t \cdot F_T(p) + w_o \cdot F_O(p) - w_c \cdot F_C(p, q, s') \quad (3) \text{ και}$$

$$F'_Q(p, s') = f(BW_{Av}(p) - BW(s, q)) \quad (4)$$

υπό τους περιορισμούς:

$$\sum_{q \in Q(p)} x_s(q) = 1, \quad \forall s \in S \quad (5)$$

$$\sum_{p \in P} y_s(p) = 1, \quad \forall s \in S \quad (6)$$

$$ql(s) \leq ql_{s, max}, \quad \forall s \in S \quad (7)$$

Η σχέση (1) εκφράζει τον αντικειμενικό σκοπό εύρεσης εκείνων των αναθέσεων $AS-QL$ και $AS-AP$ οι οποίες βελτιστοποιούν μια αντικειμενική συνάρτηση που σχετίζεται με την ικανοποίηση των προτιμήσεων του χρήστη, με τη σειρά που αυτές προσδιορίζονται στο προφίλ του. Η αντικειμενική συνάρτηση $OF(AS-QL, AS-AP)$ μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτιμά την ωφέλεια, ή χρησιμότητα (*utility*), που απορρέει για τον χρήστη από τις συγκεκριμένες αναθέσεις των υπηρεσιών του συνόλου S . Η χρησιμότητα, ως οικονομικός όρος, είναι περισσότερο μια αφηρημένη έννοια παρά μια απτή και παρατηρήσιμη ποσότητα. Κατά συνέπεια, οι μονάδες στις οποίες μετράμε μια 'ποσότητα' χρησιμότητας είναι αυθαίρετες και αναπαριστούν μια σχετική μόνο τιμή. Στην παρούσα υλοποίηση η χρησιμότητα έχει θεωρηθεί ένα αδιάστατο μέγεθος, το οποίο αποτελεί ένα μέτρο της ικανοποίησης του χρήστη.

Ο παράγοντας $F_Q(p, s)$ εκφράζει την ποιότητα στην οποία το σημείο πρόσβασης p προσφέρει την υπηρεσία s , και αποτελεί συνάρτηση τόσο του διαθέσιμου εύρους

ζώνης του σημείου p , $BW_{Av}(p)$, όσο και της ένδειξης της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος από το p , $SS(p)$:

$$F_Q(p, s) = q \cdot \sigma$$

όπου q το επίπεδο ποιότητας που ορίζεται από το $BW_{Av}(p)$, και σ ένας πολλαπλασιαστικός παράγοντας που εξαρτάται από το $SS(p)$ ως εξής (Πίνακας 3-2):

Πίνακας 3-2. Αξιολόγηση ένδειξης ισχύος λαμβανόμενου σήματος

$SS(p)$	σ
1	0,40
2	0,60
3	0,80
4	0,95
5	1,00

Σαν παράδειγμα προσδιορισμού του επιπέδου ποιότητας q από το διαθέσιμο εύρος ζώνης $BW_{Av}(p)$, ας θεωρήσουμε μια υπηρεσία η οποία έχει τις ακόλουθες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης, ανάλογα με το επίπεδο ποιότητας στο οποίο παρέχεται (Πίνακας 3-3):

Πίνακας 3-3. Παράδειγμα απαιτήσεων μιας υπηρεσίας σε εύρος ζώνης

<i>Bitrate (kbps)</i>	<i>QoS level - q</i>
32	1
64	2
128	3
256	4
384	5

Αν υποθέσουμε ότι εξετάζεται η ανάθεση της υπηρεσίας αυτής σε ένα σημείο p με $BW_{Av}(p) = 70 \text{ kbps}$, τότε θα έχουμε $q = 2$, ενώ εάν $BW_{Av}(p) = 62 \text{ kbps}$ τότε $q = 1$.

Οι παράγοντες $F_T(p)$ και $F_Q(p)$ αντιστοιχούν στον πάροχο δικτύου και στον τύπο τεχνολογίας που χαρακτηρίζουν το σημείο p . Σε περίπτωση που αυτά τα χαρακτηριστικά του σημείου p ταυτίζονται με αυτά που έχει ορίσει ο χρήστης ως προτιμώμενα, τότε οι παράγοντες $F_T(p)$ και $F_Q(p)$ αποτιμώνται ως ένα ποσοστό της διαφοράς μεταξύ $F_Q(p, s)$ και $F_C(p, q, s)$:

$$F_Q(p) = \begin{cases} 0,5 \cdot [F_Q(p, q) - F_C(p, q, s)], & \text{εάν ταυτίζονται} \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

$$F_T(p) = \begin{cases} 0,5 \cdot [F_Q(p,q) - F_C(p,q,s)], & \text{εάν ταυτίζονται} \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

Ο παράγοντας $F_C(p,q,s)$ εκφράζει μια κανονικοποιημένη ένδειξη του κόστους στο οποίο το σημείο p μπορεί να προσφέρει την υπηρεσία s στο επίπεδο ποιότητας q , και υπολογίζεται ως εξής: Έστω $c(p,q)$ το ονομαστικό κόστος ανά μονάδα χρόνου ή όγκου δεδομένων για μια υπηρεσία που προσφέρεται από ένα σημείο p στο επίπεδο ποιότητας q . Έστω c_{max} το μέγιστο κόστος ανά μονάδα για αυτή την υπηρεσία (από όλα τα διαθέσιμα σημεία πρόσβασης και όλα τα δυνατά επίπεδα ποιότητας) και $n_{q,lev.}$ το πλήθος των διαφορετικών επιπέδων ποιότητας στα οποία μπορεί να προσφερθεί η υπηρεσία αυτή. Ορίζουμε:

$$F_C(p,q,s) = c(p,q) \cdot \frac{n_{q,lev.}}{c_{max}}$$

Ο παράγοντας $F'(p,q,s')$ εκφράζει το γεγονός ότι κάθε ανάθεση μιας επόμενης υπηρεσίας s' θα λαμβάνει υπόψη το μειωμένο πλεόν (κατά $BW(s,q)$ που αντιστοιχεί στο εύρος ζώνης που ανατέθηκε στη υπηρεσία s στο επίπεδο ποιότητας q) διαθέσιμο εύρος ζώνης που χαρακτηρίζει τον παράγοντα $F'_Q(p,q,s')$. Κατά συνέπεια, το διπλό άθροισμα της σχέσης (1) εκφράζει τον συνυπολογισμό και της διάταξης των αναθέσεων AS_{-QL} και AS_{-AP} . Δηλαδή, επιθυμούμε να μεγιστοποιήσουμε, εκτός από το άθροισμα των 'πλεονεκτημάτων' κάθε ανάθεσης, και το άθροισμα των πλεονεκτημάτων που κάθε συνιστώσα της ανάθεσης αυτής μπορεί να συνεπάγεται για τις υπόλοιπες υπηρεσίες.

Οι περιορισμοί (5) και (6) εξασφαλίζουν ότι κάθε υπηρεσία s ανατίθεται σε ένα επίπεδο ποιότητας q και σε ένα σημείο πρόσβασης p . Ο περιορισμός (7) εξασφαλίζει ότι κάθε υπηρεσία s ανατίθεται σε ένα επίπεδο ποιότητας q το οποίο δεν υπερβαίνει το μέγιστο επιτρεπτό επίπεδο ποιότητας ($q_{ls,max}$) στο οποίο μπορεί να ανατεθεί η υπηρεσία αυτή. Το $q_{ls,max}$ προσδιορίζεται για κάθε υπηρεσία από το χρήστη και αποθηκεύεται στο προφίλ του.

3.4. Λύση προβλήματος

Στην παράγραφο αυτή εξετάζονται υπολογιστικά αποτελεσματικές λύσεις για το πρόβλημα IAS. Καθώς ο καθορισμός της συνολικά βέλτιστης λύσης ενδέχεται να απαιτεί σημαντικό αριθμό υπολογισμών, κρίνεται απαραίτητος ο σχεδιασμός ενός αποδοτικού αλγορίθμου ο οποίος θα καταλήγει σε σχεδόν βέλτιστες (*near-optimal*) λύσεις του προβλήματος σε λογικά χρονικά πλαίσια. Η υπολογιστική νοημοσύνη προσφέρει διάφορες προσεγγίσεις ([9],[10]). Συγκεκριμένα παραδείγματα περιλαμβάνουν τις μεθόδους *simulated annealing* (η οποία αφορά τη δοκιμή τυχαίων παραλλαγών της τρέχουσας λύσης του προβλήματος με σκοπό την εύρεση της βέλτιστης λύσης – μια χειρότερη παραλλαγή γίνεται αποδεκτή ως η νέα λύση με μια πιθανότητα η οποία μειώνεται όσο εξελίσσεται ο υπολογισμός – [11],[12]), *tabu search* (η οποία βελτιώνει την επίδοση μιας μεθόδου τοπικής αναζήτησης χρησιμοποιώντας διάφορες δομές μνήμης – [13],[14]), *γενετικούς (genetic) αλγορίθμους* (οι οποίοι υιοθετούν το ανάλογο της φυσικής επιλογής, ‘διασταυρώνοντας’ μεταξύ τους διαφορετικές λύσεις με σκοπό τη δημιουργία νέων παραλλαγών οι οποίες θα δώσουν καλύτερες επιδόσεις σε μια ‘επιβίωση των ικανότερων’ – [15],[16],[17]) και *άπληστους (greedy) αλγορίθμους* (οι οποίοι επιλέγουν τη βέλτιστη λύση σε κάθε στάδιο του προβλήματος με την ελπίδα ότι αυτός ο συνδυασμός των ‘τοπικών’ βελτίσεων θα οδηγήσει και στην εύρεση του συνολικού (*global*) μεγίστου – [18],[19],[20]).

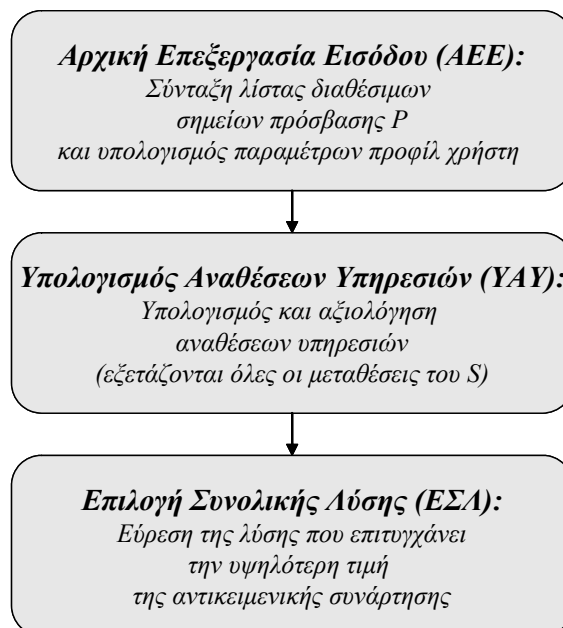
Καθώς το επίκεντρο της συγκεκριμένης μελέτης αφορά το επίπεδο της διαχείρισης η ταχύτητα του αλγόριθμου επίλυσης είναι σημαντική. Στη συνέχεια αυτής της παραγράφου παρουσιάζεται ένας άπληστος αλγόριθμος. Η παρουσίαση αυτή δείχνει πως μπορούν να υπάρξουν απλές και αποτελεσματικές λύσεις σε, κατά βάση, δύσκολα συνδυαστικά προβλήματα.

Ο αλγόριθμος εξελίσσεται σε τρεις κύριες φάσεις (Σχήμα 3-1). Η πρώτη φάση (βήματα 0 και 1 στην περιγραφή που ακολουθεί) ονομάζεται *Αρχική Επεξεργασία Εισόδου (AEE)*, και παράγει τη λίστα των διαθέσιμων σημείων πρόσβασης και ανιχνεύει τις προτιμήσεις του χρήστη για κάθε υπηρεσία. Η δεύτερη φάση (βήμα 2) ονομάζεται *Υπολογισμός Αναθέσεων Υπηρεσιών (YAY)* και παράγει διαφορετικές εφικτές αναθέσεις υπηρεσιών και αξιολογεί κάθε μια από αυτές. Η τρίτη φάση (βήμα 3), ονομάζεται *Επιλογή Συνολικής Λύσης (ΕΣΛ)* και εντοπίζει τη συνολική λύση η οποία αντιστοιχεί στην υψηλότερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

- Βήμα 0: Οι μετρήσεις που αφορούν τις δυνατότητες και τα χαρακτηριστικά των διαθέσιμων σημείων πρόσβασης συλλέγονται από τη συνιστώσα NIAM και υφίστανται επεξεργασία ώστε να συντάξουν την πλήρη λίστα P , της οποίας κάθε εγγραφή (διαθέσιμο σημείο) περιλαμβάνει τα εξής πεδία:
 - $ID(p)$ - μοναδικό αναγνωριστικό σημείου p (ακέραιος αριθμός)
 - $T(p)$ - τύπος υποστηριζόμενης τεχνολογίας (ακέραιος αριθμός)
 - $Op(p)$ - πάροχος δικτύου (ακέραιος αριθμός)
 - $SS(p)$ - ένδειξη ισχύος (ακέραιος αριθμός)
 - $BW_{Av}(p)$ - διαθέσιμο εύρος ζώνης (Kbps)
 - $c(p, q), \forall s$, το ονομαστικό κόστος ανά μονάδα χρόνου ή όγκου δεδομένων. Αυτό το 'τιμολόγιο' των διαθέσιμων υπηρεσιών δεν χρειάζεται να λαμβάνεται συχνότερα από μία φορά την ημέρα (για κάθε σημείο p), καθώς είναι σχετικά απίθανο αυτό να παρουσιάζει συχνότερα σημαντικές διαφοροποιήσεις.
- Βήμα 1: Η λίστα όλων των τρεχουσών / ζητούμενων υπηρεσιών S χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το προφίλ που έχει προσδιορίσει ο χρήστης για κάθε υπηρεσία, κι έτσι υπολογίζονται οι συντελεστές $w_q, w_o, w_t, w_c, \forall s$.
- Βήμα 2: Προσδιορίζονται όλες οι δυνατές μεταθέσεις του συνόλου S , και για κάθε μετάθεση εκτελούνται τα ακόλουθα βήματα:
 - Βήμα 2(α): Εξάγεται το πρώτο στοιχείο της μετάθεσης.
 - Βήμα 2(β): Έστω s το τρέχον στοιχείο υπηρεσίας. Για κάθε σημείο $p \in P$ προσδιορίζονται τα επίπεδα ποιότητας στα οποία το σημείο p μπορεί να παρέχει την υπηρεσία s . Κατ' αυτόν τον τρόπο, κατασκευάζεται μια λίστα επιλογών ανάθεσης για την υπηρεσία s , με κάθε επιλογή ανάθεσης να περιλαμβάνει 2 παραμέτρους: ένα σημείο πρόσβασης και ένα επίπεδο ποιότητας μέσω των οποίων η s μπορεί να παρασχεθεί.
 - Βήμα 2(γ): Για κάθε επιλογή ανάθεσης που προσδιορίστηκε στο Βήμα 2(β), υπολογίζεται η τιμή της $F(p, q, s)$ (σχέση (2)). Επιλέγεται η επιλογή ανάθεσης εκείνη που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή της $F(p, q, s)$, και αυτή η μέγιστη τιμή προστίθεται στον συνολικό 'βαθμό' της υπό εξέταση μετάθεσης.

- Βήμα 2(δ): Τροποποιείται το εύρος ζώνης του σημείου πρόσβασης που επιλέγεται σαν μέρος της βέλτιστης επιλογής ανάθεσης: ελαττώνεται κατά το εύρος ζώνης που απαιτείται για την ανάθεση της s που προσδιορίστηκε στο Βήμα 2(γ), δηλαδή κατά $BW(s, q)$.
- Βήμα 2(ε): Εξάγεται το επόμενο στοιχείο της τρέχουσας μετάθεσης και η διαδικασία επίλυσης επιστρέφει στο Βήμα 2(β).
- Βήμα 3: Επιλέγεται η βέλτιστη λύση ανάθεσης των υπηρεσιών του S σε σημεία πρόσβασης και σε επίπεδα ποιότητας, έπειτα από προσδιορισμό της μετάθεσης που αντιστοιχεί στο μέγιστο συνολικό ‘βαθμό’.
- Βήμα 4: Τέλος.

Ο αλγόριθμος τερματίζει όταν εξεταστούν όλες οι μεταθέσεις του συνόλου S . Μπορεί επίσης να οριστεί κάποιο κατώφλι για την αντικειμενική συνάρτηση $OF(A_{S-QL}, A_{S-AP})$, ως ένα ελάχιστο όριο καταλληλότητας κάποιου ζεύγους αναθέσεων ή της ικανοποίησης του χρήστη, το οποίο μόλις ξεπεραστεί οδηγεί σε τερματισμό της διαδικασίας επίλυσης και σε επιλογή των αντίστοιχων αναθέσεων A_{S-QL} και A_{S-AP} .



Σχήμα 3-1. Διάγραμμα φάσεων της λύσης του προβλήματος IAS

Έστω m το πλήθος των υπηρεσιών που εκτελούνται ή ζητούνται στο κινητό τερματικό (ισοδύναμο με το μέγεθος του S), έστω n το πλήθος των σημείων πρόσβασης στη γειτονιά του τερματικού (ισοδύναμο με το μέγεθος του P), και έστω ℓ το συνολικό μέγιστο πλήθος δυνατών επιπέδων ποιότητας, ανεξαρτήτως του

εξεταζόμενου σημείου πρόσβασης ή της υπηρεσίας. Τότε, η πολυπλοκότητα του παραπάνω αλγορίθμου είναι $O(n \times \ell \times ((m+1)!))$, στη χειρότερη περίπτωση.

Αν και αυτή η πολυπλοκότητα μπορεί να φαίνεται σημαντική εξαιτίας της παρουσίας του παραγοντικού $(m+1)!$, θα πρέπει να σημειωθεί ότι, από τη μια μεριά σε μικρές φορητές συσκευές, όπως είναι τα κινητά τηλέφωνα ή ακόμη και τα smartphones, δεν υπάρχουν συνήθως περισσότερες από 3 ή 4 υπηρεσίες που εκτελούνται ταυτόχρονα, ενώ από την άλλη, ‘ισχυρότερες’ συσκευές, όπως οι φορητοί υπολογιστές, μπορούν εύκολα να χειριστούν αυτό το υπολογιστικό φορτίο.

Αξίζει ακόμη να σημειωθεί ότι η αποδοτικότητα του παραπάνω αλγορίθμου μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω με την παράλληλη εκτέλεση του Βήματος 2, για όλες τις δυνατές μεταθέσεις του συνόλου των υπηρεσιών S . Είναι επίσης δυνατόν να επιτευχθεί μια πιο ‘ισορροπημένη’ προσέγγιση εκτελώντας τον προτεινόμενο αλγόριθμο μόνο στην περίπτωση της εμφάνισης ή της εξαφάνισης σημείων πρόσβασης, ενώ νέες αιτήσεις για υπηρεσία μπορούν να σκανδαλίζουν έναν ακόμη πιο ‘άπληστο’ αλγόριθμο, ο οποίος θα υπολογίζει τη βέλτιστη ανάθεση μόνον της καινούριας υπηρεσίας, χωρίς να επιχειρεί να επαναπροσδιορίσει αναθέσεις για τις ήδη τρέχουσες υπηρεσίες. Μια τέτοια προσέγγιση θα μείωνε σημαντικά το υπολογιστικό κόστος.

3.5. Αποτελέσματα

3.5.1. Γενικά

Η αρχιτεκτονική του MTMS που προτείνεται στο πλαίσιο αυτής της διατριβής έχει υλοποιηθεί σαν μια πλατφόρμα μεσισμικού (*middleware platform*) βασισμένη στη γλώσσα προγραμματισμού Java. Η συνιστώσα NIAM του MTMS εκτελεί μια προσομοίωση της περιοδικής συλλογής μετρήσεων που αντανακλούν τη διαθεσιμότητα και τα λοιπά χαρακτηριστικά των σημείων πρόσβασης στην περιοχή του κινητού τερματικού, μέσω πρόσβασης σε κατάλληλα διαμορφωμένα αρχεία XML (Εικόνα 3-1).

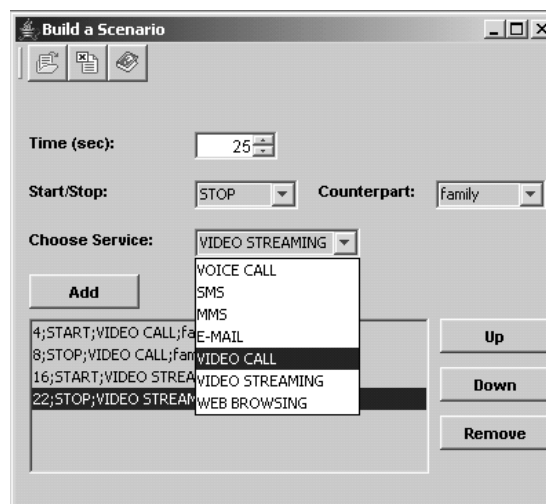
```

<?xml version="1.0" ?>
- <measurements>
- <measurement timer="0">
  <!-- HOME, morning -->
  <AP ip="147.102.1.1" providerCode="2" technology="1" signal="5" availBandwidth="170" />
  <AP ip="147.102.2.1" providerCode="3" technology="2" signal="4" availBandwidth="900" />
  <AP ip="147.102.3.1" providerCode="3" technology="3" signal="3" availBandwidth="2000" />
  <AP ip="147.102.4.1" providerCode="4" technology="4" signal="4" availBandwidth="2000" />
</measurement>
- <measurement timer="1">
  <!-- ROAD, morning -->
  <AP ip="147.102.1.2" providerCode="2" technology="1" signal="4" availBandwidth="100" />
  <AP ip="147.102.2.2" providerCode="1" technology="2" signal="4" availBandwidth="800" />
  <AP ip="147.102.2.3" providerCode="3" technology="2" signal="4" availBandwidth="900" />
</measurement>
- <measurement timer="2">
  <!-- OFFICE, noon -->
  <AP ip="147.102.1.3" providerCode="2" technology="1" signal="5" availBandwidth="170" />
  <AP ip="147.102.1.4" providerCode="1" technology="1" signal="4" availBandwidth="170" />
  <AP ip="147.102.2.4" providerCode="1" technology="2" signal="5" availBandwidth="800" />
  <AP ip="147.102.3.2" providerCode="3" technology="3" signal="2" availBandwidth="1000" />
  <AP ip="147.102.4.2" providerCode="4" technology="4" signal="4" availBandwidth="2000" />
</measurement>
- <measurement timer="3">
  <!-- HOME, evening -->
  <AP ip="147.102.1.1" providerCode="2" technology="1" signal="5" availBandwidth="170" />
  <AP ip="147.102.2.1" providerCode="3" technology="2" signal="4" availBandwidth="900" />
  <AP ip="147.102.3.1" providerCode="3" technology="3" signal="3" availBandwidth="2000" />
  <AP ip="147.102.4.1" providerCode="4" technology="4" signal="4" availBandwidth="2000" />
</measurement>
</measurements>

```

Εικόνα 3-1. Παράδειγμα XML αρχείου μετρήσεων

Μια γραφική διεπαφή επιτρέπει την κατασκευή και την αποθήκευση σεναρίων, την προσθήκη, δηλαδή, και τη διακοπή συνόδων επικοινωνίας σε προκαθορισμένες χρονικές στιγμές (Εικόνα 3-2).



Εικόνα 3-2. Γραφική διεπαφή κατασκευής σεναρίων

Σε κάθε ένα από τα σεναρία που περιγράφονται στη συνέχεια θεωρούμε ότι ο χρήστης κάνει χρήση μιας 4G συσκευής, η οποία είναι εξοπλισμένη με πολλαπλές δικτυακές διεπαφές, και ενσωματώνει την πλατφόρμα MTMS. Κάθε υπηρεσία

θεωρούμε ότι χαρακτηρίζεται από διαφορετικές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης, ανάλογα με το επίπεδο ποιότητας στο οποίο παρέχεται. Για τις υπηρεσίες που εξετάζονται στα δύο σενάρια που ακολουθούν (παράγραφοι 3.5.2 και 3.5.3 αντίστοιχα) ισχύουν τα παρακάτω, σε σχέση με τις απαιτήσεις τους σε εύρος ζώνης ανά επίπεδο ποιότητας (Πίνακες 3-4 και 3-5):

Πίνακας 3-4. Απαιτήσεις υπηρεσιών *voice* και *video call* σε εύρος ζώνης, ανά επίπεδο ποιότητας

<i>Voice call</i>		<i>Video call</i>	
<i>Bitrate (kbps)</i>	<i>QoS level - q</i>	<i>Bitrate (kbps)</i>	<i>QoS level - q</i>
4	1	32	1
8	2	64	2
16	3	128	3
20	4	256	4
25	5	384	5

Πίνακας 3-5. Απαιτήσεις υπηρεσιών *web browsing* και *video streaming* σε εύρος ζώνης, ανά επίπεδο ποιότητας

<i>Web browsing</i>		<i>Video streaming</i>	
<i>Bitrate (kbps)</i>	<i>QoS level - q</i>	<i>Bitrate (kbps)</i>	<i>QoS level - q</i>
32	1	64	1
64	2	128	2
128	3	512	3
384	4	1024	4
1024	5	2000	5

3.5.2. Σενάριο 1

3.5.2.1. Περιγραφή σεναρίου

Προσομοιώνουμε μια συνηθισμένη μέρα ενός μέσου χρήστη X, ο οποίος ξεκινά το πρωί από το σπίτι με το αυτοκίνητό του για να φτάσει στο γραφείο του (βήμα 1: στο σπίτι – βήμα 2: στο αυτοκίνητο – βήμα 3: στο χώρο στάθμευσης – βήμα 4: στο γραφείο), κάνοντας, καθ' όλη τη διάρκεια της διαδρομής αυτής, χρήση διαφόρων υπηρεσιών μέσω του 4G τερματικού του.

Το επιλεγμένο προφίλ του χρήστη περιλαμβάνει τις ακόλουθες ρυθμίσεις (Πίνακας 3-6):

Πίνακας 3-6. Προφίλ χρήστη στο σενάριο 1

Παράμετρος	Προτεραιότητα	Τιμή w
Ποιότητα	1	$w_q = 0.8$
Κόστος	2	$w_c = 0.6$
Πάροχος	3	$w_o = 0.4$
Τεχνολογία	4	$w_t = 0.2$

Επιπλέον, ο X έχει ορίσει τον πάροχο ‘Oper. #1’ και την τεχνολογία ‘WLAN’ ως προτιμώμενους.

Τα διαθέσιμα σημεία πρόσβασης στην περιοχή του χρήστη X σε κάθε ένα από τα 4 βήματα του σεναρίου, το διαθέσιμο εύρος ζώνης τους ($BW_{Av}(p)$), η ένδειξη ισχύος του λαμβανόμενου από αυτά σήματος ($SS(p)$) και ο πάροχος στον οποίο ανήκουν ($Op(p)$), καταγράφονται στον Πίνακα 3-7. Τα διάφορα διαθέσιμα σημεία πρόσβασης σημειώνονται με τον τύπο της υποστηριζόμενης τεχνολογίας (1: GSM, 2: UMTS, 3: WLAN, 4: DVB) και τον αύξοντα αριθμό σημείων για την αντίστοιχη τεχνολογία ως δείκτες.

Πίνακας 3-7. Δικτυακή διαθεσιμότητα στο σενάριο 1

Βήμα σεναρίου	Διαθέσιμα APs				
	p	$SS(p)$	$T(p)$	$Op(p)$	$BW_{Av}(p)$
1. στο σπίτι	$p^{1,1}$	5	GSM	#2	44
	$p^{2,1}$	4	UMTS	#1	280
	$p^{2,2}$	2	UMTS	#3	180
2. στο αυτοκίνητο	$p^{1,1}$	3	GSM	#2	44
	$p^{2,1}$	3	UMTS	#1	210
	$p^{4,1}$	2	DVB	#4	2500
	$p^{1,2}$	3	GSM	#5	44
3. στο χώρο στάθμευσης	$p^{2,3}$	4	UMTS	#3	430
	$p^{1,3}$	2	GSM	#1	44
	$p^{4,1}$	5	DVB	#4	2500
4. στο γραφείο	$p^{2,3}$	5	UMTS	#3	230
	$p^{3,1}$	4	WLAN	#5	900
	$p^{4,1}$	4	DVB	#4	2500

Στη συνέχεια δίνεται μια σύντομη περιγραφή των δραστηριοτήτων και των αιτήσεων για υπηρεσία του X σε κάθε βήμα του σεναρίου.

1. *στο σπίτι*: καθώς ο X ετοιμάζεται για να αναχωρήσει για τη δουλειά του, εκκινεί στο τερματικό του μια υπηρεσία web browsing, προκειμένου για τη λήψη ενός μεγάλου αρχείου. Παράλληλα, εκκινεί μια κλήση (voice call) προς ένα συνάδελφό του.
2. *στο αυτοκίνητο*: ο X τερματίζει την κλήση, ενώ η λήψη του αρχείου από τον παγκόσμιο ιστό βρίσκεται σε εξέλιξη. Καθώς μετακινείται, νέα διαθέσιμα σημεία πρόσβασης εμφανίζονται στην εμβέλεια του τερματικού του.
3. *στο χώρο στάθμευσης*: ενώ ο X σταθμεύει κοντά στο γραφείο του, εκκινεί μια υπηρεσία video streaming προκειμένου να παρακολουθήσει την πρωινή επαγγελματική συνάντηση για την οποία έχει ήδη αργήσει. Η σύννοδος web browsing είναι ακόμη ενεργή.
4. *στο γραφείο*: ο X φτάνει στο γραφείο του ενόσω η συμμετοχή του στη συνάντηση μέσω της υπηρεσίας video streaming καθώς και η λήψη του αρχείου βρίσκονται σε εξέλιξη. Και οι δύο υπηρεσίες τερματίζονται στο τέλος του βήματος αυτού.

3.5.2.2. Εκτέλεση σεναρίου

1. *στο σπίτι*: ο αλγόριθμος IAS σκανδαλίζεται εξαιτίας των νέων αιτήσεων για υπηρεσία που κάνει ο X. Οι υπολογιζόμενες από τον αλγόριθμο αναθέσεις είναι οι εξής (Πίνακας 3-8):

Πίνακας 3-8. Υπολογιζόμενες κατά IAS αναθέσεις στο βήμα 1

Υπηρεσία	$p(s)$	$ql(s)$
web browsing	$p_{2,1}$ (UMTS, #1)	3
voice call	$p_{1,1}$ (GSM, #2)	5

2. *στο αυτοκίνητο*: ο αλγόριθμος IAS σκανδαλίζεται εξαιτίας της εμφάνισης νέων σημείων πρόσβασης στην περιοχή του τερματικού ($p_{4,1}$ - DVB #4 και $p_{1,2}$ - GSM #5). Υπολογίζονται οι εξής αναθέσεις (Πίνακας 3-9):

Πίνακας 3-9. Υπολογιζόμενες κατά IAS αναθέσεις στο βήμα 2

Υπηρεσία	$p(s)$	$ql(s)$
web browsing	$p_{2,1}$ (UMTS, #1)	3

3. στο χώρο στάθμευσης: ο αλγόριθμος IAS σκανδαλίζεται εξαιτίας της νέας αίτησης για υπηρεσία του X, ενώ ταυτόχρονα αξιολογούνται τα νέα σημεία πρόσβασης που έχουν εμφανιστεί. Οι νέες αναθέσεις των υπηρεσιών είναι οι εξής (Πίνακας 3-10):

Πίνακας 3-10. Υπολογιζόμενες κατά IAS αναθέσεις στο βήμα 3

Υπηρεσία	$p(s)$	$ql(s)$
web browsing	$p_{2,3}$ (UMTS, #3)	4
video streaming	$p_{4,1}$ (DVB, #4)	5

4. στο γραφείο: ο αλγόριθμος IAS σκανδαλίζεται εξαιτίας της εμφάνισης νέων σημείων πρόσβασης ($p_{3,1}$ - WLAN #5). Υπολογίζονται οι αναθέσεις (Πίνακας 3-11):

Πίνακας 3-11. Υπολογιζόμενες κατά IAS αναθέσεις στο βήμα 4

Υπηρεσία	$p(s)$	$ql(s)$
web browsing	$p_{3,1}$ (WLAN, #5)	4
video streaming	$p_{4,1}$ (DVB, #4)	5

Στον Πίνακα 3-12 καταγράφονται ενδεικτικοί χρόνοι εκτέλεσης του αλγορίθμου IAS (σε μεσαίων σημερινών προδιαγραφών desktop, laptop και PDA) σε κάθε ένα από τα 4 βήματα του σεναρίου.

Πίνακας 3-12. Ενδεικτικοί χρόνοι εκτέλεσης του αλγορίθμου IAS στο σενάριο 1

Βήμα σεναρίου	Χρόνος εκτέλεσης αλγορίθμου IAS (ms)
1	~ 150
2	~ 120
3	~ 140
4	~ 150

Δοκιμές σε Java Micro-Edition (τυπικών επιλεγμένων προδιαγραφών) έδωσαν χρόνους εκτέλεσης λίγο μικρότερους από 1 sec.

Στα επόμενα θα επιχειρηθεί μια σύγκριση του προτεινόμενου αλγορίθμου με την απλούστερη δυνατή και ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο επιλογής πρόσβασης, η οποία υποδεικνύει την επιλογή του σημείου εκείνου για το οποίο η ένδειξη της ισχύος

του λαμβανόμενου από αυτό σήματος ξεπερνά την ένδειξη του επιλεγμένου σημείου πρόσβασης κατά ένα ορισμένο κατώφλι και για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. Η μέθοδος αυτή θα αναφέρεται στο εξής ως Best Signal Strength (BSS).

Στον Πίνακα 3-13 καταγράφονται οι αναθέσεις που υπολογίζονται τόσο από τον αλγόριθμο IAS όσο και από τη μέθοδο BSS σε κάθε βήμα του σεναρίου.

Πίνακας 3-13. Αναθέσεις υπολογιζόμενες από IAS και BSS στο σενάριο 1

Βήμα σεναρίου	Υπηρεσία	IAS		BSS	
		$p(s)$	$ql(s)$	$p(s)$	$ql(s)$
1	web browsing	$p^{2,1}$	3	$p^{1,1}$	1
	voice call	$p^{1,1}$	5	$p^{1,1}$	5
2	web browsing	$p^{2,1}$	3	$p^{2,1}$	3
3	web browsing	$p^{2,3}$	4	$p^{4,1}$	4
	video streaming	$p^{4,1}$	5	$p^{4,1}$	4
4	web browsing	$p^{3,1}$	4	$p^{2,3}$	3
	video streaming	$p^{4,1}$	5	$p^{2,3}$	2

3.5.2.3. Αποτελέσματα - συζήτηση

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η αξιολόγηση του προτεινόμενου αλγορίθμου στη βάση του πλήθους των διαπομπών που ‘υφίσταται’ συνολικά μια υπηρεσία σε εξέλιξη, καθώς και στη βάση της συνολικά παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσίας. Για το σκοπό αυτό, ορίζουμε το λόγο R της συνολικής ποιότητας υπηρεσίας που παρέχεται στο χρήστη, $QoS_{aggr.}$, προς το συνολικό πλήθος των διαπομπών που υφίσταται η υπηρεσία

αυτή, καθ’ όλη τη διάρκεια της εξέλιξής της, $\#HO_{aggr.}$ – δηλαδή $R = \frac{QoS_{aggr.}}{\#HO_{aggr.}}$.

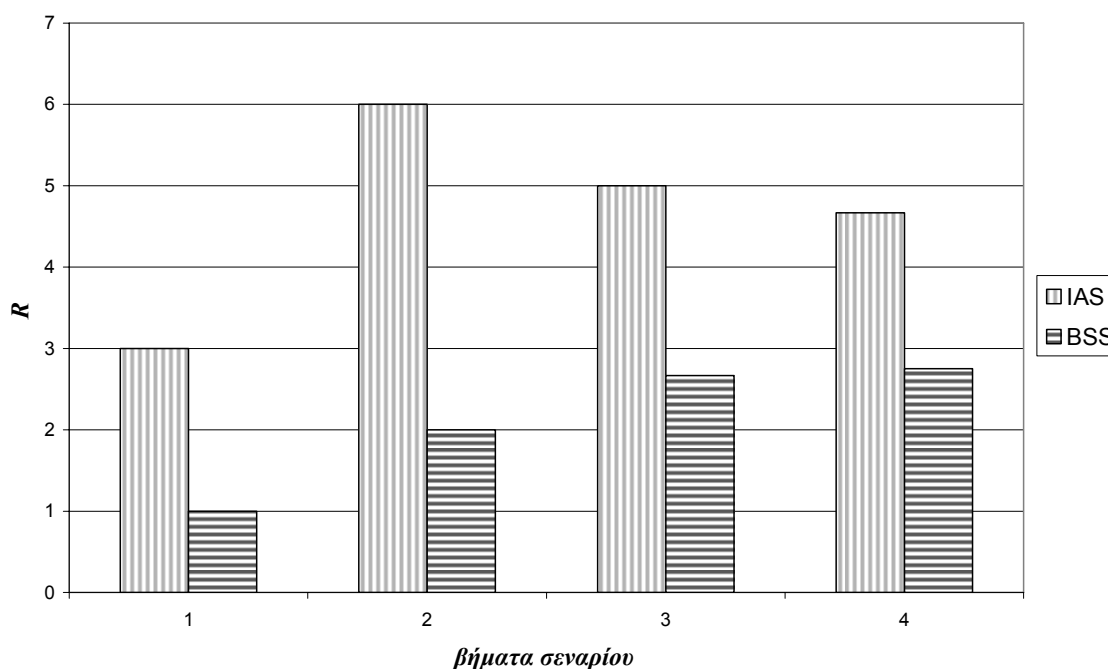
Προφανώς, η συνάρτηση R είναι αύξουσα ως προς τη μεταβλητή $QoS_{aggr.}$ και φθίνουσα ως προς τη μεταβλητή $\#HO_{aggr.}$.

Εξετάζεται η τιμή του R για την υπηρεσία web browsing, η οποία βρίσκεται σε εξέλιξη σε όλα τα βήματα του σεναρίου. Στον Πίνακα 3-14 υπολογίζονται οι αντίστοιχες τιμές, τόσο για τις αναθέσεις στις οποίες καταλήγει ο αλγόριθμος IAS όσο και γι’ αυτές της μεθόδου BSS.

Πίνακας 3-14. Υπολογισμός του λόγου $R = \frac{QoS_{aggr.}}{\#HO_{aggr.}}$ για τις αναθέσεις IAS και BSS στο σενάριο 1 (υπηρεσία web browsing)

Βήμα σεναρίου	IAS			BSS		
	$QoS_{aggr.}$	$\#HO_{aggr.}$	R_{IAS}	$QoS_{aggr.}$	$\#HO_{aggr.}$	R_{BSS}
1	3	1	3,00	1	1	1,00
2	6	1	6,00	4	2	2,00
3	10	2	5,00	8	3	2,67
4	14	3	4,66	11	4	2,75

Στο Σχήμα 3-2 δίνεται η γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων αυτών. Στον άξονα x σημειώνονται τα βήματα του σεναρίου (1 έως 4), και στο άξονα y ο λόγος R , όπως υπολογίζεται παραπάνω για τον αλγόριθμο IAS και τη μέθοδο BSS.



Σχήμα 3-2. Αποτελέσματα σεναρίου 1: γραφική αναπαράσταση του λόγου R για τις αναθέσεις IAS και BSS (υπηρεσία web browsing)

Παρατηρούμε ότι σε κάθε βήμα του σεναρίου υπάρχει σημαντική διαφορά ανάμεσα στις τιμές του λόγου R που υπολογίζονται με βάση τις αναθέσεις IAS και BSS. Αυτή η διαφορά εξηγείται κυρίως από το γεγονός ότι τα υπολογιζόμενα κατά IAS επίπεδα ποιότητας στα οποία ανατίθεται διαδοχικά η υπηρεσία web browsing είναι μεγαλύτερα (βήματα 1 και 4) ή ίσα (βήματα 2 και 3) με αυτά που υπολογίζονται κατά BSS. Αυτό με τη σειρά του οφείλεται στο ότι ο αλγόριθμος IAS συνυπολογίζει, εκτός

από την ένδειξη ισχύος, και το διαθέσιμο εύρος ζώνης κάθε σημείου πρόσβασης, αξιολογώντας αυτές τις δύο παραμέτρους σε συνδυασμό. Κατά δεύτερον, σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα του Πίνακα 3-14 ασκεί το γεγονός ότι το σημείο πρόσβασης που υπολογίζεται κατά IAS για την υπηρεσία web browsing στο βήμα 1 ($p_{2,1}$) είναι το ίδιο με αυτό που υπολογίζεται και στη συνέχεια ως βέλτιστο στο βήμα 2 – ‘κερδίζεται’ έτσι για τον αλγόριθμο IAS μια διαπομπή (τη στιγμή που ο BSS επιλέγει σε κάθε βήμα το ισχυρότερο σήμα), κέρδος που κληροδοτείται στις τιμές του λόγου R που υπολογίζονται και για τα επόμενα βήματα του σεναρίου.

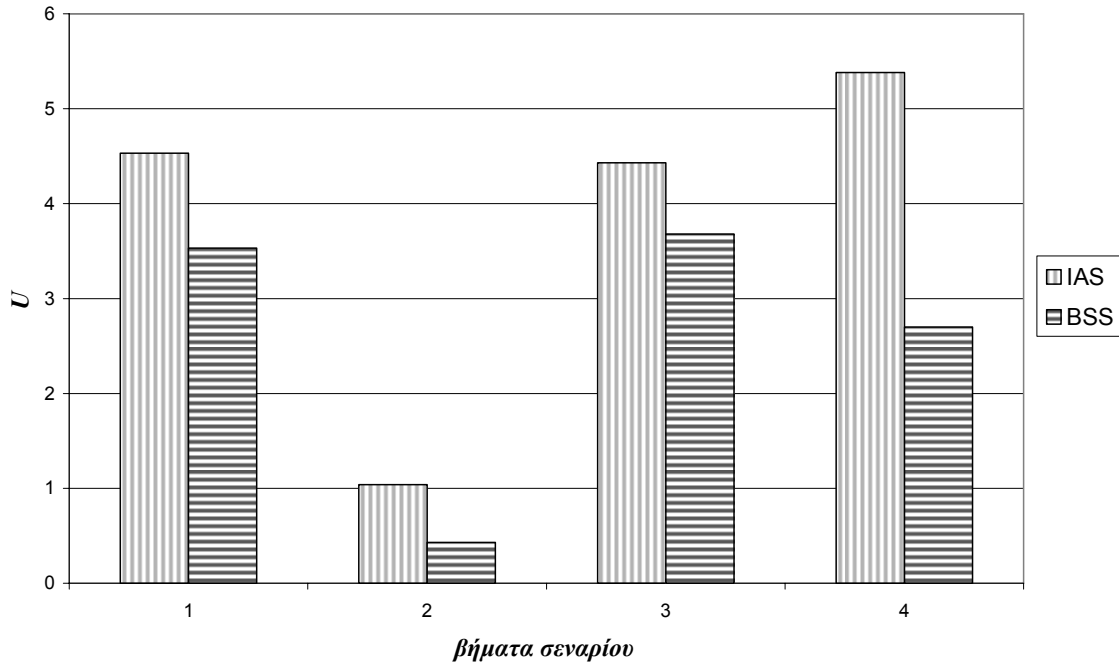
Στη συνέχεια, αξιολογείται ο προτεινόμενος αλγόριθμος IAS στη βάση της συνολικά παρεχόμενης στο χρήστη *χρησιμότητας* U . Η χρησιμότητα είναι ένα μέγεθος στην οικονομική θεωρία που αποτιμά τη συνολική ικανοποίηση ή το όφελος που αποκομίζει ο χρήστης από την κατανάλωση διαφόρων αγαθών ή υπηρεσιών ([21],[22],[23]). Η χρησιμότητα είναι περισσότερο μια αφηρημένη έννοια, παρά μια απτή και παρατηρήσιμη ποσότητα – παρ’ όλα αυτά αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο στην ανάλυση των επιλογών και της συμπεριφοράς του χρήστη ([24],[25],[26]). Είναι γνωστό επίσης ([27],[23]) ότι με δεδομένο ένα σύνολο προτιμήσεων ενός χρήστη, το οποίο ικανοποιεί κάποια κριτήρια λογικοφάνειας, είναι δυνατόν να οριστεί μια *συνάρτηση χρησιμότητας* η οποία να ερμηνεύει αυτές τις προτιμήσεις. Η συνάρτηση αυτή θα πρέπει να παίρνει μεγαλύτερες τιμές για επιλογές που ο χρήστης προτιμά έναντι άλλων. Υπ’ αυτή την έννοια, η αντικειμενική συνάρτηση $OF(AS - QL, AS - AP)$ που ορίστηκε στην παράγραφο 3.3 μπορεί να θεωρηθεί ότι πληρεί τις προϋποθέσεις αυτές και ότι αποτελεί ένα μέτρο της ικανοποίησης του χρήστη από τις υπό εξέταση αναθέσεις υπηρεσιών $AS - AP$ και $AS - QL$.

Στον Πίνακα 3-15 δίνονται οι αθροιστικές τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης (χρησιμότητας U) για τις υπολογιζόμενες κατά IAS και BSS αναθέσεις, σε κάθε βήμα του σεναρίου 1.

Πίνακας 3-15. Χρησιμότητες αναθέσεων IAS και BSS στο σενάριο 1

Βήμα σεναρίου	U_{IAS}	U_{BSS}
1	4,53	3,53
2	1,04	0,43
3	4,43	3,68
4	5,38	2,70

Στο Σχήμα 3-3 αποδίδονται γραφικά οι παραπάνω τιμές της χρησιμότητας U . Στον άξονα x σημειώνονται τα βήματα του σεναρίου (1 έως 4), και στον άξονα y η χρησιμότητα U .



Σχήμα 3-3. Αποτελέσματα σεναρίου 1: γραφική αναπαράσταση της χρησιμότητας U που προκύπτει από τις αναθέσεις IAS και BSS

Στο διάγραμμα του Σχήματος 3-3 αποτυπώνεται η διαφορά ανάμεσα στις συνολικές χρησιμότητες που απορρέουν από τις αναθέσεις κατά IAS και BSS. Η διαφορά αυτή κυμαίνεται μεταξύ 58% (βήμα 2) και 17% (βήμα 3), και οφείλεται, και πάλι, στην από κοινού αξιολόγηση όλων των χαρακτηριστικών κάθε σημείου πρόσβασης που εφαρμόζει ο αλγόριθμος IAS. Για παράδειγμα, στο βήμα 1 του σεναρίου, η U_{IAS} αποτυπώνει το γεγονός ότι ο επιλεγμένος πάροχος δικτύου συμπίπτει με τον προτιμώμενο του χρήστη, ενώ η U_{BSS} δεν μπορεί να αξιοποιήσει ένα τέτοιο πλεονέκτημα παρά μόνο κατά τύχη. Και εδώ, σημαντικό ρόλο παίζει το γεγονός ότι ο αλγόριθμος IAS αναθέτει συστηματικά όλες τις υπηρεσίες σε μεγαλύτερα ή ίσα επίπεδα ποιότητας σε σχέση με τη μέθοδο BSS, καθώς συνυπολογίζει και το διαθέσιμο εύρος ζώνης κάθε εξεταζόμενου σημείου πρόσβασης. Τέλος, ας σημειώσουμε ότι στο βήμα 2 του σεναρίου οι χρησιμότητες και των δύο μεθόδων παίρνουν αισθητά χαμηλότερες τιμές απ' ό,τι στα υπόλοιπα βήματα, καθώς συμβαίνει τότε (παρά την πολλαπλότητα των επιλογών) κανένα σημείο πρόσβασης να μην προσφέρει πολύ καλό συνδυασμό κόστους και ποιότητας.

3.5.3. Σενάριο 2

3.5.3.1. Περιγραφή σεναρίου

Σε αυτό το δεύτερο σενάριο προσομοιώνουμε τις δραστηριότητες ενός ακόμη χρήστη Υ. Ο Υ είναι μεταπτυχιακός φοιτητής και κινείται μεταξύ του γραφείου του και άλλων χώρων στο πανεπιστήμιο (βήμα 1: στο γραφείο – βήμα 2: στην τραπεζαρία – βήμα 3: στο γραφείο – βήμα 4: στο γραφείο) κάνοντας χρήση διαφόρων υπηρεσιών μέσω του 4G τερματικού του.

Καθώς ο Υ βρίσκεται εντός της πανεπιστημιούπολης, έχει δηλώσει μέσω του προφίλ του την προτίμησή του για το τοπικό ασύρματο δίκτυο (προτιμώμενος πάροχος: ‘Oper. #1’ και προτιμώμενη τεχνολογία: ‘WLAN’). Επιπλέον, το επιλεγμένο προφίλ του χρήστη περιλαμβάνει τις ακόλουθες ρυθμίσεις (Πίνακας 3-16):

Πίνακας 3-16. Προφίλ χρήστη (αρχικό) στο σενάριο 2

Παράμετρος	Προτεραιότητα	Τιμή w
Τεχνολογία	1	$w_t = 0.8$
Κόστος	2	$w_c = 0.6$
Ποιότητα	3	$w_q = 0.4$
Πάροχος	4	$w_o = 0.2$

Τα διαθέσιμα σημεία πρόσβασης στην περιοχή του χρήστη Υ σε κάθε ένα από τα 4 βήματα του σεναρίου, το διαθέσιμο εύρος ζώνης τους ($BW_{Av}(p)$), η ένδειξη ισχύος του λαμβανόμενου από αυτά σήματος ($SS(p)$) και ο πάροχος στον οποίο ανήκουν ($Op(p)$), καταγράφονται στον Πίνακα 3-17.

Πίνακας 3-17. Δικτυακή διαθεσιμότητα στο σενάριο 2

Βήμα σεναρίου	Διαθέσιμα APs				
	p	$SS(p)$	$T(p)$	$Op(p)$	$BW_{Av}(p)$
1. στο γραφείο	$p^{3,1}$	4	WLAN	#1	300
	$p^{1,1}$	5	GSM	#2	44
	$p^{2,1}$	3	UMTS	#3	400
2. στην τραπεζαρία	$p^{3,1}$	1	WLAN	#1	300
	$p^{1,2}$	3	GSM	#2	44
	$p^{2,2}$	4	UMTS	#3	400
	$p^{4,1}$	3	DVB	#4	800

Βήμα σεναρίου	Διαθέσιμα APs				
	p	$SS(p)$	$T(p)$	$Op(p)$	$BW_{Av}(p)$
3. στο γραφείο	$p^{3,1}$	4	WLAN	#1	120
	$p^{1,1}$	5	GSM	#2	44
	$p^{2,1}$	3	UMTS	#3	400
4. στο γραφείο	$p^{3,1}$	4	WLAN	#1	120
	$p^{1,1}$	5	GSM	#2	44
	$p^{2,1}$	3	UMTS	#3	400

Στη συνέχεια δίνεται μια σύντομη περιγραφή των δραστηριοτήτων και των αιτήσεων για υπηρεσία του Y σε κάθε βήμα του σεναρίου.

1. στο γραφείο: ο Y βρίσκεται στο γραφείο του και εκκινεί στο τερματικό του μια υπηρεσία web browsing.
2. στην τραπεζαρία: ενώ η υπηρεσία web browsing βρίσκεται ακόμη σε εξέλιξη ο Y φεύγει από το γραφείο του και κατευθύνεται προς την τραπεζαρία (όπου το πανεπιστημιακό WLAN έχει πολύ ασθενή κάλυψη). Παράλληλα εκκινεί μια video-κλήση προς ένα φιλικό του πρόσωπο.
3. στο γραφείο: ο Y τερματίζει την υπηρεσία web browsing και επιστρέφει στο γραφείο του. Η video-κλήση εξακολουθεί να είναι ενεργή.
4. στο γραφείο: ενώ η video-κλήση εξελίσσεται πλέον στο γραφείο του, ο Y παρατηρεί υποβάθμιση της ποιότητας και πραγματοποιεί την εξής αλλαγή στο προφίλ του (Πίνακας 3-18):

Πίνακας 3-18. Προφίλ χρήστη (τελικό) στο σενάριο 2

Παράμετρος	Προτεραιότητα	Τιμή w
Ποιότητα	1	$w_q = 0.8$
Κόστος	2	$w_c = 0.6$
Πάροχος	3	$w_o = 0.4$
Τεχνολογία	4	$w_t = 0.2$

Η υπηρεσία τερματίζεται στο τέλος του βήματος αυτού.

3.5.3.2. Εκτέλεση σεναρίου

1. στο γραφείο: ο αλγόριθμος IAS σκανδαλίζεται εξαιτίας της νέας αίτησης για υπηρεσία που κάνει ο Υ. Η υπολογιζόμενη από τον αλγόριθμο ανάθεση είναι η εξής (Πίνακας 3-19):

Πίνακας 3-19. Υπολογιζόμενη κατά IAS ανάθεση στο βήμα 1

Υπηρεσία	$p(s)$	$ql(s)$
web browsing	$p_{3,1}$ (WLAN, #1)	3

2. στην τραπεζαρία: ο αλγόριθμος IAS σκανδαλίζεται εξαιτίας της νέας αίτησης για υπηρεσία του Υ, ενώ ταυτόχρονα αξιολογούνται τα νέα σημεία πρόσβασης που έχουν εμφανιστεί ($p_{1,2}$ - GSM #2, $p_{2,2}$ - UMTS #3 και $p_{4,1}$ - DVB #4) . Υπολογίζονται οι εξής αναθέσεις (Πίνακας 3-20):

Πίνακας 3-20. Υπολογιζόμενες κατά IAS αναθέσεις στο βήμα 2

Υπηρεσία	$p(s)$	$ql(s)$
web browsing	$p_{3,1}$ (WLAN, #1)	3
video call	$p_{4,1}$ (DVB, #4)	3

3. στο γραφείο: ο αλγόριθμος IAS σκανδαλίζεται εξαιτίας της εμφάνισης νέων σημείων πρόσβασης στην περιοχή του τερματικού ($p_{3,1}$ - WLAN #1, $p_{1,1}$ - GSM #2 και $p_{2,1}$ - UMTS #3). Υπολογίζεται η ανάθεση (Πίνακας 3-21):

Πίνακας 3-21. Υπολογιζόμενη κατά IAS ανάθεση στο βήμα 3

Υπηρεσία	$p(s)$	$ql(s)$
video call	$p_{3,1}$ (WLAN, #1)	2

4. στο γραφείο: ο αλγόριθμος IAS σκανδαλίζεται εξαιτίας της αλλαγής στο προφίλ του χρήστη Υ. Η νέα υπολογιζόμενη ανάθεση είναι (Πίνακας 3-22):

Πίνακας 3-22. Υπολογιζόμενη κατά IAS ανάθεση στο βήμα 4

Υπηρεσία	$p(s)$	$ql(s)$
video call	$p_{2,1}$ (UMTS, #3)	5

Στον Πίνακα 3-23 καταγράφονται οι αναθέσεις που υπολογίζονται τόσο από τον αλγόριθμο IAS όσο κι από τη μέθοδο BSS σε κάθε βήμα του σεναρίου.

Πίνακας 3-23. Αναθέσεις υπολογιζόμενες από IAS και BSS στο σενάριο 2

Βήμα σεναρίου	Υπηρεσία	IAS		BSS	
		$p(s)$	$ql(s)$	$p(s)$	$ql(s)$
1	web browsing	$p_{3,1}$	3	$p_{1,1}$	1
2	web browsing	$p_{3,1}$	3	$p_{2,2}$	4
	video call	$p_{4,1}$	3	$p_{2,2}$	5
3	video call	$p_{3,1}$	2	$p_{1,1}$	1
4	video call	$p_{2,1}$	5	$p_{1,1}$	1

3.5.3.3. Αποτελέσματα - συζήτηση

Και εδώ, θα επιχειρηθεί αρχικά μια αξιολόγηση του προτεινόμενου αλγορίθμου στη βάση του πλήθους των διαπομπών που ‘υφίσταται’ συνολικά μια υπηρεσία σε εξέλιξη, καθώς και στη βάση της συνολικά παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσίας.

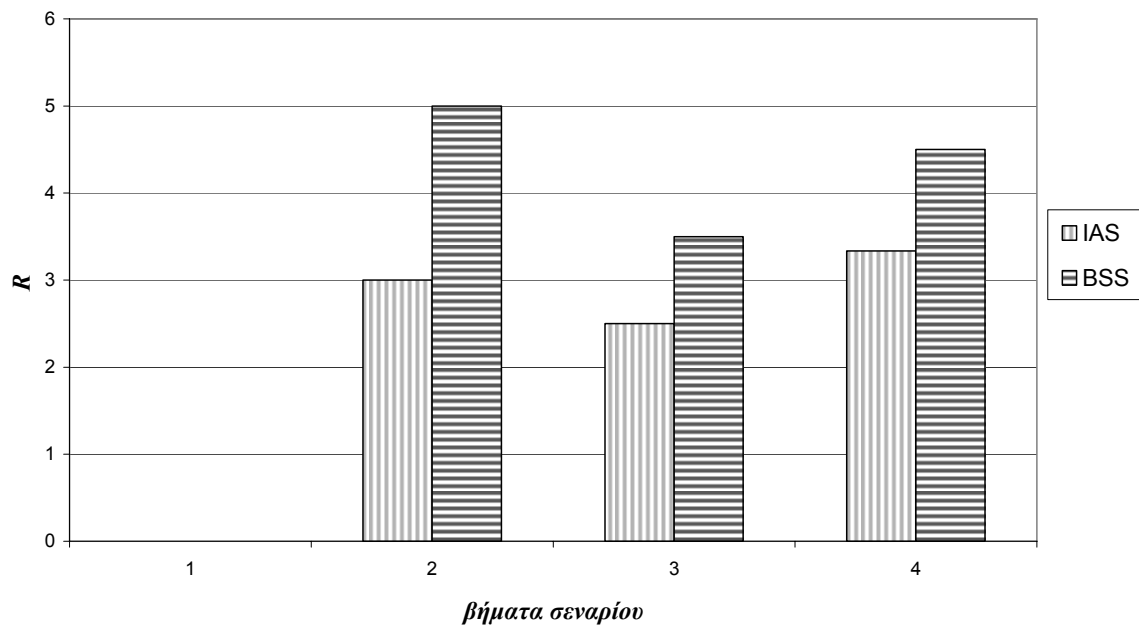
Υπολογίζουμε τις τιμές του λόγου $R = \frac{QoS_{aggr.}}{\#HO_{aggr.}}$ για την υπηρεσία video call, η οποία

βρίσκεται σε εξέλιξη σε 3 βήματα του σεναρίου (βήμα 2 έως βήμα 4). Στον Πίνακα 3-24 υπολογίζονται οι τιμές αυτές, τόσο για τις αναθέσεις στις οποίες καταλήγει ο αλγόριθμος IAS όσο και για αυτές της μεθόδου BSS.

Πίνακας 3-24. Υπολογισμός του λόγου $R = \frac{QoS_{aggr.}}{\#HO_{aggr.}}$ για τις αναθέσεις IAS και BSS στο σενάριο 2 (υπηρεσία video call)

Βήμα σεναρίου	IAS			BSS		
	$QoS_{aggr.}$	$\#HO_{aggr.}$	R_{IAS}	$QoS_{aggr.}$	$\#HO_{aggr.}$	R_{BSS}
2	3	1	3,00	5	1	5,00
3	5	2	2,50	7	2	3,50
4	10	3	3,33	9	2	4,50

Στο Σχήμα 3-4 δίνεται η γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων αυτών. Στον άξονα x σημειώνονται τα βήματα του σεναρίου (2 έως 4), και στο άξονα y ο λόγος R , όπως υπολογίζεται παραπάνω για τον αλγόριθμο IAS και τη μέθοδο BSS.



Σχήμα 3-4. Αποτελέσματα σεναρίου 2: γραφική αναπαράσταση του λόγου R για τις αναθέσεις IAS και BSS (υπηρεσία video call)

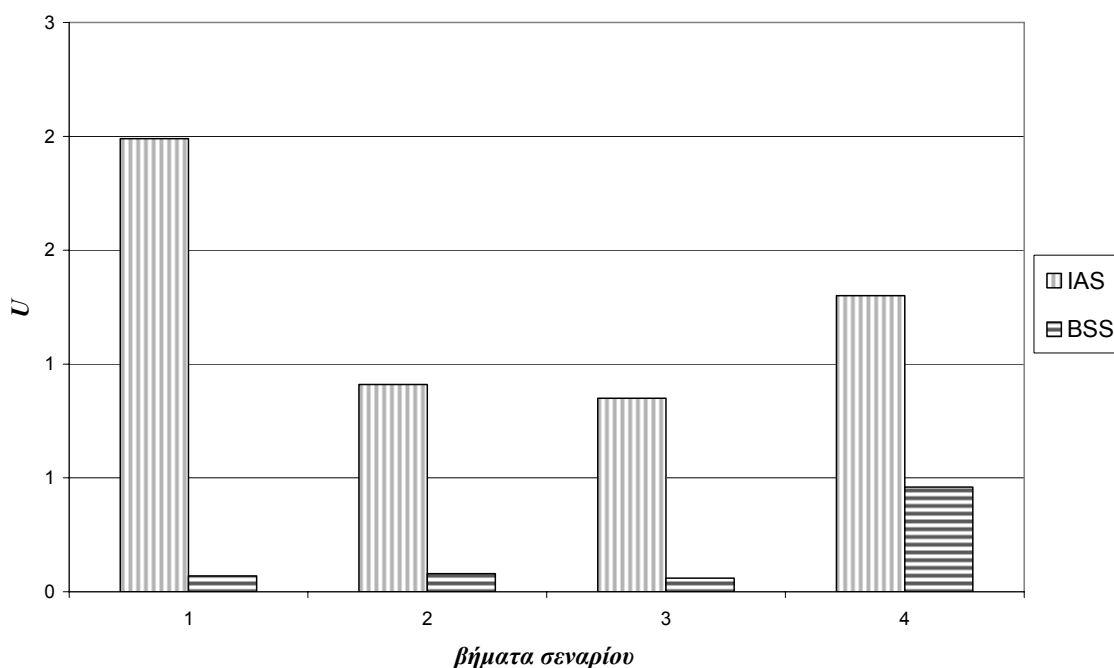
Παρατηρούμε ότι και στα τρία βήματα του σεναρίου κατά τα οποία εξελίσσεται η υπηρεσία video call, οι τιμές του λόγου R που υπολογίζονται με βάση τις αναθέσεις BSS είναι μεγαλύτερες από εκείνες που υπολογίζονται με βάση τις αναθέσεις IAS, αν και κατά μειούμενα ποσοστά (40%, 29% και 26% αντίστοιχα σε κάθε βήμα). Αυτή η σημαντική διαφορά οφείλεται στο γεγονός ότι το επιλεγμένο προφίλ του χρήστη (μέχρι και το βήμα 3) κατατάσσει χαμηλά την ποιότητα (στην τρίτη θέση) ενώ αντιθέτως δίνει προτεραιότητα στην επιλογή μιας συγκεκριμένης τεχνολογίας (WLAN) και στο χαμηλό κόστος. Όταν ο χρήστης τροποποιεί το προφίλ του στο βήμα 4 και τοποθετεί πλέον την ποιότητα στην πρώτη θέση των προτεραιοτήτων του, η ανάθεση στην οποία καταλήγει ο αλγόριθμος IAS παρέχει υψηλότερο επίπεδο ποιότητας ($ql(s) = 5$) απ' ό τι η μέθοδος BSS ($ql(s) = 1$). Είναι μάλιστα ενδιαφέρον το ότι η διαφορά του λόγου R θα αντισταθμιζόταν στο βήμα 4 υπέρ του αλγορίθμου IAS εάν δεν λάμβανε χώρα η επιπλέον διαπομπή (από $p_{3,1}$ προς $p_{2,1}$), εξαιτίας της αλλαγής του προφίλ του χρήστη.

Στη συνέχεια, αξιολογείται ο προτεινόμενος αλγόριθμος IAS στη βάση της συνολικά παρεχόμενης στο χρήστη χρησιμότητας U . Στον Πίνακα 3-25 δίνονται οι αθροιστικές τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης (χρησιμότητας U) για τις υπολογιζόμενες κατά IAS και BSS αναθέσεις, σε κάθε βήμα του σεναρίου 2.

Πίνακας 3-25. Χρησιμότητες αναθέσεων IAS και BSS στο σενάριο 2

Βήμα σεναρίου	U_{IAS}	U_{BSS}
1	1,99	0,07
2	0,91	0,08
3	0,85	0,06
4	1,30	0,46

Στο Σχήμα 3-5 αποδίδονται γραφικά οι παραπάνω τιμές της χρησιμότητας U . Στον άξονα x σημειώνονται τα βήματα του σεναρίου (1 έως 4), και στο άξονα y η χρησιμότητα U .



Σχήμα 3-5. Αποτελέσματα σεναρίου 2: γραφική αναπαράσταση της χρησιμότητας U που προκύπτει από τις αναθέσεις IAS και BSS

Στο διάγραμμα του Σχήματος 3-5 αποτυπώνεται η διαφορά ανάμεσα στις συνολικές χρησιμότητες που απορρέουν από τις αναθέσεις κατά IAS και BSS, διαφορά η οποία οφείλεται, και εδώ, στην από κοινού αξιολόγηση όλων των χαρακτηριστικών κάθε σημείου πρόσβασης που εφαρμόζει ο αλγόριθμος IAS, σε σχέση με τη μέθοδο BSS. Καθίσταται έτσι σαφές ότι, αν και η παρεχόμενη στο χρήστη ποιότητα δεν είναι πάντοτε η μέγιστη δυνατή, αυτό συμβαίνει μόνο όταν οι προτιμήσεις που ο ίδιος ο χρήστης έχει δηλώσει είναι τέτοιες που να οδηγούν σε μεγιστοποίηση άλλων παραμέτρων των διαθέσιμων σημείων πρόσβασης.

3.6. Ανακεφαλαίωση – συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύθηκε μια από τις βασικές απαιτήσεις που αφορά στη λειτουργία της αρχιτεκτονικής διαχείρισης MTMS (Mobile Terminal Management System): η ικανότητα διαμόρφωσης των υπηρεσιών που λαμβάνονται στο κινητό τερματικό και διαχείρισης των αιτήσεων του χρήστη για λήψη νέων υπηρεσιών – χειρισμός ο οποίος συνίσταται στον προσδιορισμό των κατάλληλων σημείων πρόσβασης και επιπέδων ποιότητας για κάθε μια από τις ήδη τρέχουσες και τις νέες υπηρεσίες που ο χρήστης ζητά να λάβει.

Το πρόβλημα της *Ευφυούς Επιλογής Πρόσβασης (Intelligent Access Selection – IAS)*, που αφορά αυτήν ακριβώς τη λειτουργία, περιγράφηκε αναλυτικά και διατυπώθηκε μαθηματικά. Παρουσιάστηκε ακόμη η επίλυση που επιχειρείται στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, η οποία κάνει χρήση ενός άπληστου αλγορίθμου, προκειμένου για την εύρεση της βέλτιστης (ή σχεδόν βέλτιστης) λύσης αυτού του προβλήματος βελτιστοποίησης σε πραγματικό χρόνο. Η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης λύσης εξετάστηκε στο πλαίσιο δύο σεναρίων που προσομοιώνουν τις απαιτήσεις, τη συμπεριφορά και τις προτιμήσεις αυτού που μπορούμε να φανταστούμε ως μέσου χρήστη μιας 4G υποδομής. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκτέλεση των δύο αυτών σεναρίων συγκρίθηκαν ποιοτικά με μια άλλη μέθοδο που βρίσκεται σε ευρεία εφαρμογή σήμερα, στη βάση της συνολικά παρεχόμενης στο χρήστη χρησιμότητας καθώς και στη βάση του συνδυασμένου κέρδους σε ποιότητα και σε αριθμό διαπομπών.

Παραπομπές

- [1] D. Chantrain, K. Handekyn, H. Vanderstraeten, “The Soft Terminal: Extending service intelligence from the network to the terminal”, *Alcatel Telecommunications Review*, 2nd Quarter 2000.
- [2] S. Y. Hui, K. H. Yeung, “Challenges in the migration to 4G mobile systems”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 12, pp. 54-59, Dec. 2003.
- [3] P. Demestichas, G. Vivier, K. El-Khazen, M. Theologou, “Evolution in wireless systems management concepts: from composite radio environments to reconfigurability”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 5, pp. 90-98, May 2004.
- [4] J. Kalliokulju, J. Meche, M. J. Rinne, J. Vallstrom, P. Varshney, S.-G. Haggman, “Radio access selection for multistandard terminals”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 39, no. 10, pp. 116-124, Oct. 2001.
- [5] E. Homayounvala, S. A. Ghorashi, A. H. Aghvami, “A Bayesian approach to modelling user preferences for reconfiguration”, presented at the E2R Workshop on Reconfigurable Mobile Systems and Networks Beyond 3G, Barcelona, Spain, Sept. 2004.
- [6] G. D. Abowd, E. D. Mynatt, “Charting past, present and future research in ubiquitous computing”, *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, vol. 7, no. 1, pp. 29-58, March 2000.
- [7] K. Henriksen, J. Indulska, A. Rakotonirainy, "Modelling context information in pervasive computing systems", in *Lecture Notes in Computer Science, Proceedings of Pervasive 2002*, vol. 2414, pp. 167-180, Springer, 2002.
- [8] R. van Eijk, J. Brok, J. van Bommel, B. Busropan, “Access network selection in a 4G environment and the roles of terminal and service platform”, presented at the 10th WWRF Meeting in New York, USA, Oct. 2003.
- [9] D. T. Pham, D. Karaboga, *Intelligent optimisation techniques: genetic algorithms, simulated annealing and neural networks*, Springer, 2000.
- [10] C. Papadimitriou, K. Steiglitz, *Combinatorial optimization: algorithms and complexity*, Prentice Hall, 1982.
- [11] E. Aarts, J. Korts, *Simulated annealing and the Boltzmann machines*, Wiley, 1989.

- [12] P. van Laarhoven, E. Aarts, *Simulated annealing: theory and application*, Kluwer Academic Publisher, 1988.
- [13] F. Glover, M. Laguna, *Tabu search*, Springer, 1998.
- [14] C. Rego, B. Alidaee (Editors), *Metaheuristic optimization via memory and evolution: Tabu search and Scatter search*, Springer, 2005.
- [15] D. Goldberg, *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison-Wesley Professional, 1989.
- [16] Z. Michalewicz, *Genetic algorithms + Data structures = Evolution programs*, Springer, 1998.
- [17] R. Haupt, S. Haupt, *Practical genetic algorithms*, Wiley-Interscience, 2004.
- [18] V. Vazirani, *Approximation algorithms*, Springer, 2004.
- [19] S. Skiena, *The algorithm design manual*, Springer, 1998.
- [20] M. Goodrich, R. Tamassia, *Algorithm design: Foundations, analysis and internet examples*, Wiley, 2001.
- [21] <http://www.investopedia.com/university/economics>
- [22] <http://www.economist.com/research/Economics>
- [23] R. Pindyck, D. Rubinfeld, *Microeconomics*, Prentice Hall, 2004.
- [24] P. Demestichas, V. Stavroulaki, L. Papadopoulou, A. Vasilakos, M. Theologou, “Service configuration and traffic distribution in composite radio environments”, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 33, no. 4, pp. 69-81, Nov. 2003.
- [25] C.-S. Chang, Z. Liu, “A bandwidth-sharing theory for a large number of HTTP-like connections”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 12, no. 5, pp. 952-962, Oct. 2004.
- [26] V. Marbukh, “On aggregate utility maximization based network management: challenges and possible approaches”, in *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Communications*, vol. 2, pp. 1212-1216, June 2004.
- [27] Θ. Γκαμαλέτσος, “Θεωρητική Οικονομική”, Εκδόσεις Σταμούλης, 1992.

Κεφάλαιο 4

Μπεϋζιανές Μέθοδοι:

*Θεωρία, Μάθηση και
Εφαρμογές*

4.1. Μπεϋζιανός συμπερασμός

Οι μπεϋζιανές μέθοδοι παρέχουν ένα μηχανισμό για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με πιθανότητες ενδεχομένων κάτω από συνθήκες αβεβαιότητας. Οι βασικές εκφράσεις του μπεϋζιανού φορμαλισμού αφορούν δεσμευμένες πιθανότητες, για παράδειγμα $P(A|B)$, η οποία εκφράζει την ‘εμπιστοσύνη’ (*degree of belief*) στο ενδεχόμενο A υπό την παραδοχή ότι το B είναι γνωστό με απόλυτη βεβαιότητα. Εάν $P(A|B) = P(A)$, τότε λέμε ότι τα ενδεχόμενα A και B είναι ανεξάρτητα. Εάν $P(A|B,C) = P(A|C)$, τότε λέμε ότι τα A και B είναι υπό συνθήκη ανεξάρτητα, δεδομένου του C .

Σε αντίθεση με την παραδοσιακή πρακτική η οποία ορίζει τις δεσμευμένες πιθανότητες με όρους σύνθετων ενδεχομένων (όπως στον κλασικό ορισμό $P(A|B) = \frac{P(A,B)}{P(B)}$), οι μπεϋζιανοί φιλόσοφοι θεωρούν τη δεσμευμένη σχέση μεταξύ ενδεχομένων πιο θεμελιώδη σε σύγκριση με αυτή των σύνθετων ενδεχομένων, ή με άλλα λόγια, περισσότερο συμβατή με την οργάνωση της ανθρώπινης γνώσης. Υπ’ αυτή την έννοια, το ενδεχόμενο B λειτουργεί ως δείκτης σε ένα πλαίσιο συνάφειας (*context*), ή πλαίσιο γνώσης, και το $A|B$ αντιστοιχεί στο ενδεχόμενο A στο πλαίσιο που ορίζεται από το B .

Η πιθανότητα οποιουδήποτε ενδεχομένου A μπορεί να υπολογιστεί δεσμεύοντάς την πάνω σε ένα οποιοδήποτε σύνολο αμοιβαίως αποκλειόμενων ενδεχομένων B_i , $i=1,2,\dots,n$ των οποίων η ένωση ισούται με το δειγματικό χώρο (διαμέριση του δειγματικού χώρου):

$$P(A) = \sum_i P(A|B_i) \cdot P(B_i) \quad (1)$$

Αυτός ο κατακερματισμός παρέχει τη βάση πάνω στην οποία στηρίζεται η βασισμένη σε υποθέσεις εξαγωγή συμπερασμάτων στον μπεϋζιανό φορμαλισμό. Από τη σχέση (1) προκύπτει ότι η εμπιστοσύνη σε ένα οποιοδήποτε ενδεχόμενο A είναι ένα ζυγισμένο άθροισμα όλων των διακριτών τρόπων με τους οποίους το A μπορεί να πραγματοποιηθεί. Η σχέση (1) είναι επίσης γνωστή ως *Θεώρημα Ολικής Πιθανότητας* (*marginalization rule*).

Μια ακόμη χρήσιμη γενίκευση του πολλαπλασιαστικού τύπου $P(A,B) = P(A|B) \cdot P(B)$ είναι ο λεγόμενος *κανόνας της αλυσίδας* (*chain rule*) ή

γενικευμένος πολλαπλασιαστικός τύπος. Σύμφωνα με αυτόν, για οποιοδήποτε σύνολο n ενδεχομένων, E_1, E_2, \dots, E_n , η πιθανότητα του σύνθετου ενδεχομένου (E_1, E_2, \dots, E_n) είναι ίση με το γινόμενο n δεσμευμένων πιθανοτήτων:

$$P(E_1, E_2, \dots, E_n) = P(E_n | E_{n-1}, \dots, E_2, E_1) \cdot \dots \cdot P(E_2 | E_1) \cdot P(E_1)$$

Ο πυρήνας των μπεϋζιανών τεχνικών κρύβεται στο γνωστό *Θεώρημα του Bayes*:

$$P(H | e) = \frac{P(e | H) \cdot P(H)}{P(e)} \quad (2)$$

σύμφωνα με το οποίο η βεβαιότητα που αποδίδουμε σε μια υπόθεση (*hypothesis*) H κατόπιν παρατήρησης μιας ένδειξης (*evidence*) e μπορεί να υπολογιστεί πολλαπλασιάζοντας την προηγούμενη σχετική γνώση μας $P(H)$ με την πιθανότητα $P(e | H)$ να πραγματοποιηθεί το e εάν το H αληθεύει. Η $P(H | e)$ συχνά ονομάζεται εκ-των-υστέρων (*posterior*) πιθανότητα, και η $P(H)$ εκ-των-προτέρων (*prior*) πιθανότητα. Ο παρονομαστής $P(e)$ είναι μια σταθερά κανονικοποίησης:

$$P(e) = P(e | H) \cdot P(H) + P(e | \neg H) \cdot P(\neg H),$$

η οποία μπορεί να υπολογιστεί από την απαίτηση η $P(H | e)$ και η $P(\neg H | e)$ να έχουν άθροισμα μονάδα ($[1],[2],[3]$).

Το θεώρημα του Bayes, όπως εκφράζεται από την (2), αφορά μία υπόθεση H και ένα στοιχείο (απόδειξη) e . Μπορεί εύκολα να γενικευτεί για ένα στοιχείο e και πολλές (m) – εξαντλητικές και αμοιβαία αποκλειόμενες – υποθέσεις (H_1, H_2, \dots, H_m) :

$$P(H_i | e) = \frac{P(e | H_i) \cdot P(H_i)}{\sum_{k=1}^m P(e | H_k) \cdot P(H_k)} \quad (3)$$

Γενίκευση μπορεί επίσης να γίνει για n στοιχεία (e_1, e_2, \dots, e_n) και m υποθέσεις (H_1, H_2, \dots, H_m) , με την προϋπόθεση ότι και τα δύο αυτά σύνολα αφορούν εξαντλητικά και αμοιβαίως αποκλειόμενα ενδεχόμενα.

$$P(H_i | e_1 e_2 \dots e_n) = \frac{P(e_1 e_2 \dots e_n | H_i) \cdot P(H_i)}{\sum_{k=1}^m P(e_1 e_2 \dots e_n | H_k) \cdot P(H_k)} \quad (4)$$

Ο τύπος (4) δεν είναι πρακτικά εφαρμόσιμος, καθώς απαιτεί τη γνώση των υπό συνθήκη πιθανοτήτων για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των στοιχείων για όλες τις υποθέσεις. Εάν όμως θεωρήσουμε επιπλέον ότι τα e_1, e_2, \dots, e_n είναι υπό συνθήκη ανεξάρτητα δεδομένης μιας οποιασδήποτε υπόθεσης H_i , τότε η (4) γράφεται:

$$P(H_i | e_1 e_2 \dots e_n) = \frac{P(e_1 | H_i) \cdot P(e_2 | H_i) \cdot \dots \cdot P(e_n | H_i) \cdot P(H_i)}{\sum_{k=1}^m P(e_1 | H_k) \cdot P(e_2 | H_k) \cdot \dots \cdot P(e_n | H_k) \cdot P(H_k)} \quad (5)$$

4.1.1. Μπεϋζιανά δίκτυα

Τα μπεϋζιανά δίκτυα (*Bayesian networks*) είναι γνωστό ότι αποτελούν ένα από τα πιο αξιόπιστα πιθανολογικά εργαλεία μοντελοποίησης, και αποδεικνύονται χρήσιμα στην κωδικοποίηση, στη μάθηση και στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με πιθανολογικές (αιτιακές) σχέσεις.

Τα μπεϋζιανά δίκτυα περιγράφουν την κατανομή πιθανότητας που χαρακτηρίζει ένα σύνολο μεταβλητών, ορίζοντας ένα σύνολο παραδοχών ανεξαρτησίας σε συνδυασμό με ένα σύνολο δεσμευμένων πιθανοτήτων. Αποτελούνται από τα εξής:

- Ένα σύνολο μεταβλητών (κάθε μια εκ των οποίων παίρνει ένα πεπερασμένο σύνολο διακριτών τιμών) και ένα σύνολο κατευθυνόμενων ακμών μεταξύ αυτών.
- Έναν πίνακα δεσμευμένης πιθανότητας $P(A | B_1, B_2, \dots, B_n)$ για κάθε μεταβλητή A με ‘γονείς’ τις μεταβλητές B_1, B_2, \dots, B_n .

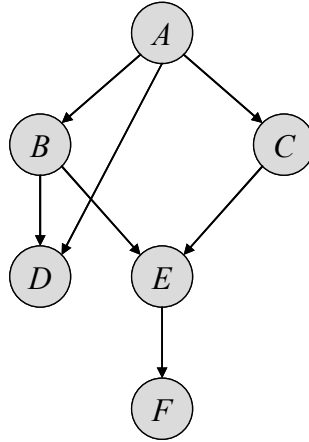
Έτσι, τα μπεϋζιανά δίκτυα αποτελούν κατευθυνόμενους μη-κυκλικούς γράφους (*directed acyclic graphs*) όπου κάθε κόμβος αναπαριστά μια τυχαία μεταβλητή. Οι ακμές του γράφου αναπαριστούν άμεσες σχέσεις εξάρτησης μεταξύ των συνδεδεμένων μεταβλητών, ενώ οι ισχείς των εξαρτήσεων αυτών ποσοτικοποιούνται από τις αντίστοιχες δεσμευμένες πιθανότητες. Στην πράξη, η δομή ενός μπεϋζιανού δικτύου μπορεί να οριστεί με την εξής εύκολη διαδικασία: αναθέτουμε μια κορυφή (κόμβο) σε κάθε μεταβλητή που μας ενδιαφέρει και στη συνέχεια σχεδιάζουμε βέλη προς κάθε κόμβο A_i από ένα επιλεγμένο σύνολο κορυφών Π_{A_i} , το οποίο περιλαμβάνει τις κορυφές που θεωρούνται άμεσες αιτίες του A_i (γονείς του A_i). Οι ισχείς αυτών των άμεσων επιδράσεων ποσοτικοποιούνται με την ανάθεση σε κάθε μεταβλητή A_i του πίνακα δεσμευμένης πιθανότητας $P(A_i | \pi_{A_i})$, που αναπαριστά τις υποκειμενικές εκτιμήσεις των δεσμευμένων πιθανοτήτων κάθε ενδεχομένου του A_i , με δεδομένο οποιονδήποτε συνδυασμό τιμών των π_{A_i} του συνόλου γονέων (*parent set*) Π_{A_i} . Ο συνδυασμός αυτών των τοπικών εκτιμήσεων προσδιορίζει ένα πλήρες και συνεπές συνολικό μοντέλο, δηλαδή μια από κοινού συνάρτηση κατανομής πιθανότητας, στη βάση του οποίου μπορούν να απαντηθούν όλα τα πιθανολογικά

ερωτήματα. Η συνολική από κοινού συνάρτηση κατανομής πιθανότητας των μεταβλητών A_1, \dots, A_n δίνεται από το γινόμενο:

$$P(A_1, A_2, \dots, A_n) = \prod_i P(A_i | \pi_{A_i})$$

Για παράδειγμα, η κατανομή που αντιστοιχεί στο γράφο του Σχήματος 4-1, μπορεί να γραφτεί με απλή επισκόπηση ([1]):

$$P(A, B, C, D, E, F) = P(F | E) \cdot P(E | B, C) \cdot P(D | A, B) \cdot P(C | A) \cdot P(B | A) \cdot P(A)$$



Σχήμα 4-1. Μπεϋζιανό δίκτυο που αναπαριστά την κατανομή $P(F|E) \cdot P(E|B,C) \cdot P(D|A,B) \cdot P(C|A) \cdot P(B|A) \cdot P(A)$

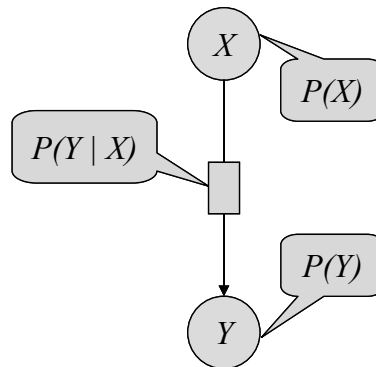
Ας σημειωθεί ακόμη ότι στο παράδειγμα του Σχήματος 4-1 θα πρέπει να προσδιοριστεί η εκ των προτέρων πιθανότητα $P(A)$. Έχει προταθεί ότι τέτοιες εκ-των-προτέρων πιθανότητες εισάγουν στο μοντέλο μια ανεπιθύμητη μεροληψία (*bias*). Ωστόσο, οι πιθανότητες αυτές είναι απαραίτητες, όχι για μαθηματικούς λόγους, αλλά γιατί ορισμένες εκ-των-προτέρων εκτιμήσεις βεβαιότητας αποτελούν αναπόσπαστο μέρος του ανθρώπινου συλλογισμού σχετικά με τη βεβαιότητα ενδεχομένων ([4]).

Μπορεί ναδειχθεί ότι υπάρχει μια 1-1 αντιστοιχία μεταξύ του κατευθυνόμενου μη-κυκλικού γράφου και της παραγοντοποίησης της από κοινού συνάρτησης κατανομής πιθανότητας σε δεσμευμένες κατανομές. Η απουσία παραδοχών ανεξαρτησίας μεταξύ των μεταβλητών έχει σαν αποτέλεσμα πλήρως συνδεδεμένους γράφους, ενώ αντιθέτως η παρουσία τους οδηγεί στη διαγραφή ακμών.

Αν και η εκμετάλλευση των σχέσεων ανεξαρτησίας μεταξύ μεταβλητών απλοποιεί σε μεγάλο βαθμό τον πιθανολογικό συμπερασμό στα μπεϋζιανά δίκτυα, η ακριβής εξαγωγή συμπερασμάτων σε ένα αυθαίρετο μπεϋζιανό δίκτυο με διακριτές μεταβλητές είναι πολυπλοκότητας NP-hard ([5]). Ακόμη και η προσεγγιστική εξαγωγή συμπερασμάτων είναι NP-hard ([6]). Η δυσκολία αυτή πηγάζει από την

πιθανή ύπαρξη μη-κατευθυνόμενων κύκλων στη δομή του δικτύου, δηλαδή κύκλων όπου αγνοούμε την κατεύθυνση των ακμών. Όταν μια δομή μπεϋζιανού δικτύου περιέχει πολλούς μη-κατευθυνόμενους κύκλους, τότε το πρόβλημα της εξαγωγής συμπερασμάτων καθίσταται ουσιαστικά μη-επιλύσιμο ([7]). Για πολλές εφαρμογές, ωστόσο, οι προκύπτουσες δικτυακές δομές είναι αρκετά απλές ώστε η εξαγωγή συμπερασμάτων να είναι εφικτή. Για εφαρμογές στις οποίες οι γενικές μέθοδοι συμπερασμού αποδεικνύονται μη πρακτικές, αναπτύσσονται εξειδικευμένες τεχνικές για συγκεκριμένες δικτυακές τοπολογίες ([8],[9],[10],[11]) ή για συγκεκριμένα ερωτήματα ([12],[13],[14],[15]).

Ένα ακόμη παράδειγμα ενός απλού μπεϋζιανού δικτύου δίνεται στο Σχήμα 4-2, όπου φαίνεται και ο συμβολισμός που θα ακολουθηθεί στα εξής. Ας σημειωθεί εδώ ακόμη, ότι τον συχνά χρησιμοποιούμενο στην ξένη βιβλιογραφία όρο *context*, ο οποίος υποδηλώνει το γενικότερο πλαίσιο, το ‘φάσμα’, το ‘περιβάλλον’, επιχειρούμε να τον μεταφράσουμε ως *πλαίσιο χρήσης*.



Σχήμα 4-2. Παράδειγμα ενός απλού μπεϋζιανού δικτύου

Η εξαγωγή συμπερασμάτων σε ένα μπεϋζιανό δίκτυο έχει συνήθως σαν στόχο τον υπολογισμό κάποιας πιθανότητας που παρουσιάζει ενδιαφέρον (όπως η $P(Y)$ στο παράδειγμα του Σχήματος 4-2). Οι σχετικοί αλγόριθμοι εκμεταλλεύονται τις ακόλουθες ιδιότητες και θεωρήματα της θεωρίας πιθανοτήτων ([17]):

$$\blacksquare P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_i P(X_i | \text{Parents}(X_i)) : \text{υπό συνθήκη αναζαρτησία} \quad (6)$$

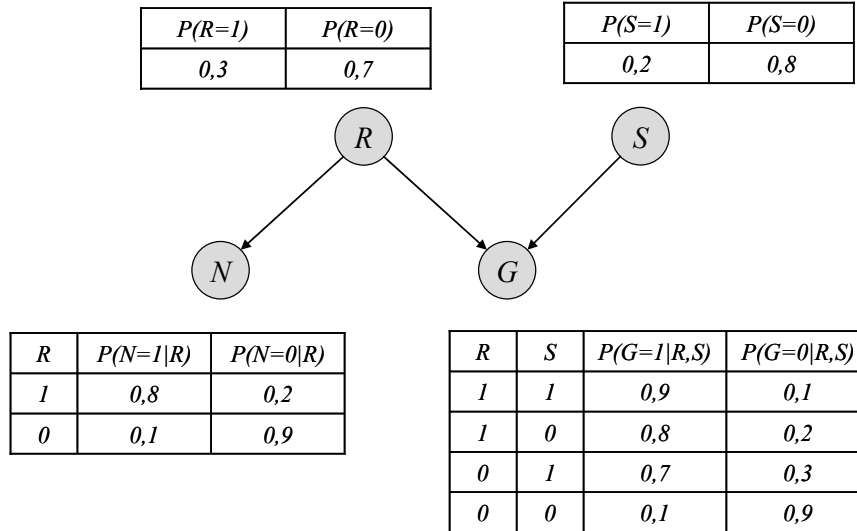
$$\blacksquare P(Y = y_j, X = x_i) = P(X = x_i) \cdot P(Y = y_j | X = x_i) : \text{πολλαπλασιαστικός τύπος} \quad (7)$$

$$\blacksquare P(Y = y_j) = \sum_i P(Y = y_j | X = x_i) \cdot P(X = x_i) : \text{θεώρημα ολικής πιθανότητας} \quad (8)$$

$$\blacksquare P(X = x_i | Y = y_j) = \frac{P(X = x_i) \cdot P(Y = y_j | X = x_i)}{P(Y = y_j)} : \text{θεώρημα του Bayes} \quad (9)$$

Η θεωρία των μπεϋζιανών δικτύων παρέχει αρκετές χρήσιμες τροποποιήσεις πάνω στα κλασικά δίκτυα. Ανάμεσα σε αυτές είναι και η δυνατότητα ορισμού δικτύων συνάφειας (*context-enabled networks*), όπως είναι τα πολυ-επίπεδα δίκτυα και τα επαναληπτικά πολυ-δίκτυα (*recursive multinets*), τα οποία παρέχουν διαφορετικές δικτυακές μπεϋζιανές μοντελοποιήσεις για διαφορετικούς συνδυασμούς ορισμένων χαρακτηριστικών συνάφειας. Μπεϋζιανά δίκτυα χρησιμοποιούνται συχνά και σε εφαρμογές τεχνητής νοημοσύνης, για την κατασκευή πιθανολογικών έμπειρων συστημάτων (*expert systems*). Ένα ελκυστικό χαρακτηριστικό τους είναι ακριβώς το γεγονός ότι η γραφική τους δομή μπορεί να ερμηνευτεί ως το αποτέλεσμα άμεσων αιτιακών σχέσεων μεταξύ των μεταβλητών. Σε τομείς γνώσης όπου οι αιτιακές σχέσεις είναι πολυπληθείς, όπως συμβαίνει με τις ιατρικές προγνώσεις (οι ασθένειες προκαλούν συμπτώματα), εμπειρογνώμονες μπορούν συνήθως να αναπαραστήσουν τη γνώση τους διαμέσου της γραφικής δομής του δικτύου. Οι ακριβείς τιμές των δεσμευμένων πιθανοτήτων που χαρακτηρίζουν το δίκτυο είναι συχνά δύσκολο να εκτιμηθούν από τους ειδικούς. Ωστόσο, αυτές οι δεσμευμένες πιθανότητες μπορούν εύκολα να προσδιοριστούν από τα διαθέσιμα δεδομένα: στην πιο απλή της μορφή, η *μάθηση* των μπεϋζιανών δικτύων (δεδομένης της γραφικής δομής τους) δεν αφορά παρά την καταμέτρηση των σχετικών συχνοτήτων (*frequency counting*). Στην περίπτωση όπου η ίδια η γραφική δομή δεν είναι προσδιορισμένη, η μάθηση της δομής του δικτύου από τα δεδομένα αποτελεί πραγματική πρόκληση.

Ας θεωρήσουμε στο σημείο αυτό ένα κλασικό παράδειγμα (*the wet grass example* – [16]) εφαρμογής και επίλυσης μπεϋζιανού δικτύου (Σχήμα 4-3). Έστω ότι παρατηρούμε ότι το γρασίδι στον κήπο μας είναι βρεγμένο ($G = 1$). Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στο ότι έβρεξε ($R = 1$), είτε στο ότι το ποτιστικό μηχάνημα ήταν ανοικτό ($S = 1$). Έστω ακόμη ότι παρατηρούμε το γρασίδι του γείτονα (N), του οποίου η κατάσταση είναι γενικά εξαρτημένη από την τιμή του G , κι αυτό διότι εάν το δικό μας γρασίδι είναι βρεγμένο, τότε ενδέχεται να έχει βρέξει, άρα ενδέχεται να έχει βραχεί και το γρασίδι του γείτονα.



Σχήμα 4-3. Γραφική απεικόνιση και πίνακες δεσμευμένων πιθανοτήτων στο παράδειγμα

Κάθε μια από τις μεταβλητές R , S , G , N μπορεί να πάρει δύο τιμές, 0 και 1, με προφανείς ερμηνείες. Η από κοινού συνάρτηση κατανομής πιθανότητας $P(R, S, G, N)$ είναι ένας πίνακας 16 εγγραφών για τον οποίο ισχύει:

$$\sum_{R=\{0,1\}, \dots, N=\{0,1\}} P(R, S, G, N) = 1$$

Με τη βοήθεια του πίνακα αυτού μπορούμε να υπολογίσουμε οποιαδήποτε πιθανότητα μας ενδιαφέρει. Για παράδειγμα, η πιθανότητα να μην έχει βρέξει δεδομένου ότι το γρασίδι του γείτονα είναι βρεγμένο υπολογίζεται:

$$P(R = 0 | N = 1) = \frac{P(R = 0, N = 1)}{P(N = 1)} = \frac{\sum_{S=\{0,1\}, G=\{0,1\}} P(R = 0, S, G, N = 1)}{\sum_{R=\{0,1\}, S=\{0,1\}, G=\{0,1\}} P(R, S, G, N = 1)}$$

Σύμφωνα με τη θεωρία, η από κοινού συνάρτηση κατανομής πιθανότητας $P(R, S, G, N)$ μπορεί να γραφεί ως γινόμενο δεσμευμένων κατανομών ως εξής:

$$P(R, S, G, N) = P(R) \cdot P(S | R) \cdot P(G | R, S) \cdot P(N | R, S, G)$$

Εάν θεωρήσουμε επιπλέον ότι οι μεταβλητές R και S είναι ανεξάρτητες, καθώς επίσης και οι G και N δεδομένης της τιμής της R , παίρνουμε τελικά:

$$P(R, S, G, N) = P(R) \cdot P(S) \cdot P(G | R, S) \cdot P(N | R)$$

Το δίκτυο είναι πλέον έτοιμο για εξαγωγή συμπερασμάτων. Ας υποθέσουμε ότι παρατηρούμε ότι το γρασίδι μας είναι βρεγμένο. Ποιά είναι η πιο πιθανή αιτία του γεγονότος αυτού; Έβρεξε ή έμεινε ανοικτό το ποτιστικό μηχάνημα; Υπολογίζουμε τις αντίστοιχες δεσμευμένες πιθανότητες:

$$P(R = 1 | G = 1) = \frac{P(R = 1, G = 1)}{P(G = 1)} = 0,615 \text{ και}$$

$$P(S = 1 | G = 1) = \frac{P(S = 1, G = 1)}{P(G = 1)} = 0,38$$

Βλέπουμε ότι και οι δύο αυτές πιθανότητες είναι μεγαλύτερες από τις εκ-των-προτέρων πιθανότητες $P(R = 1) = 0,3$ και $P(S = 1) = 0,2$, και ότι οι δύο αιτίες ‘ανταγωνίζονται’ η μία την άλλη για την εξήγηση της παρατήρησης $G = 1$. Με άλλα λόγια, οι πιθανότητες των δύο ενδεχομένων R και S αυξάνονται όταν το αποτέλεσμα τους βρίσκεται αληθινό.

Έστω τώρα ότι παρατηρούμε επιπλέον ότι το γρασίδι του γείτονα είναι βρεγμένο. Υπολογίζουμε εκ νέου:

$$P(R = 1 | G = 1, N = 1) = \frac{P(R = 1, G = 1, N = 1)}{P(G = 1, N = 1)} = 0,9274 \quad (10)$$

$$P(S = 1 | G = 1, N = 1) = \frac{P(S = 1, G = 1, N = 1)}{P(G = 1, N = 1)} = 0,2498 \quad (11)$$

Είναι προφανές ότι το πιθανό αίτιο R καθίσταται πιθανότερο καθώς παρατηρείται επιπλέον γι’ αυτό απόδειξη ($N = 1$). Αφού λοιπόν η αυξημένη πιθανότητα του R παρέχει μια εξήγηση της παρατήρησης $G = 1$, δεν χρειαζόμαστε πλέον την εξήγηση που παρέχεται από το άλλο πιθανό αίτιο S , το οποίο λαμβάνει τώρα μια χαμηλότερη πιθανότητα. Στη στατιστική, το φαινόμενο αυτό αναφέρεται συχνά ως *παράδοξο του Berkson*, ή *μεροληψία επιλογής (selection bias)*.

Είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε τα βήματα υπολογισμού της πιθανότητας $P(R = 1 | G = 1, N = 1)$. Μπορούμε να γράψουμε τον αριθμητή της σχέσης (10) ως εξής:

$$\begin{aligned} P(R = 1, G = 1, N = 1) &= \\ &= P(R = 1) \cdot P(G = 1 | R = 1) \cdot P(N = 1 | G = 1, R = 1) = \\ &= P(R = 1) \cdot P(G = 1 | R = 1) \cdot P(N = 1 | R = 1) = \\ &= 0,3 \cdot 0,82 \cdot 0,8 = 0,1968 \end{aligned} \quad (10a)$$

υποθέτοντας ότι $P(N = 1 | G = 1, R = 1) = P(N = 1 | R = 1)$, καθώς τα G και N είναι ανεξάρτητα. Ο παρονομαστής της (10) γράφεται:

$$\begin{aligned} P(G = 1, N = 1) &= \\ &= P(G = 1) \cdot P(N = 1 | G = 1) = \\ &= P(G = 1) \cdot P(N = 1) = \\ &= 0,4 \cdot 0,31 = 0,124 \end{aligned} \quad (10b)$$

Διαιρώντας όμως τα αποτελέσματα των (10a) και (10b) προκύπτει για την πιθανότητα $P(R = 1 | G = 1, N = 1) = 1,587$ (!), το οποίο είναι προφανώς λανθασμένο.

Πού όμως έγινε το λάθος; Η απάντηση βρίσκεται στην απόπειρα αποσύζευξης των G και N στη σχέση (10β): οι μεταβλητές G και N είναι ανεξάρτητες δεδομένου του R , δηλαδή μόνον όταν έχουμε πληροφορία για τη μεταβλητή R . Η ζητούμενη πιθανότητα δεν μπορεί να υπολογιστεί απλοποιώντας περαιτέρω τον παρονομαστή της σχέσης (10), παρά μόνο υπολογίζοντας αναλυτικά κάθε μια από τις 16 εγγραφές του πίνακα της από κοινού συνάρτησης κατανομής πιθανότητας $P(R,S,G,N)$ (Πίνακας 4-1) :

Πίνακας 4-1. Από κοινού συνάρτηση κατανομής πιθανότητας $P(R,S,G,N)$ του *wet grass example*

R	S	G	N	$P(R,S,G,N)$
1	1	1	1	0,0432
1	1	1	0	0,0108
1	1	0	1	0,0048
1	1	0	0	0,0012
1	0	1	1	0,1536
1	0	1	0	0,0384
1	0	0	1	0,0384
1	0	0	0	0,0096
0	1	1	1	0,0098
0	1	1	0	0,0882
0	1	0	1	0,0042
0	1	0	0	0,0378
0	0	1	1	0,0056
0	0	1	0	0,0504
0	0	0	1	0,0504
0	0	0	0	0,4536

Η ζητούμενη πιθανότητα $P(R=1|G=1,N=1)$ υπολογίζεται με τη βοήθεια της σχέσης (10), αλλά με τον αριθμητή και τον παρονομαστή τώρα να γράφονται:

$$\begin{aligned}
 & P(R=1, G=1, N=1) \\
 &= \sum_{S=\{0,1\}} P(R=1, S, G=1, N=1) = \quad (10\gamma) \\
 &= 0.1968
 \end{aligned}$$

και

$$\begin{aligned}
 & P(G = 1, N = 1) \\
 = & \sum_{R=\{0,1\}, S=\{0,1\}} P(R = 1, S, G = 1, N = 1) = & (10\delta) \\
 & = 0.2122
 \end{aligned}$$

Η (10γ) δίνει το ίδιο αποτέλεσμα με την (10α), κι αυτό γιατί η αποσύζευξη των G και N στη (10α) έγινε δεδομένης της τιμής της R . Αντιθέτως, η (10δ) δίνει ένα αποτέλεσμα ολότελα διαφορετικό από την (10β). Τέλος, διαιρώντας τις (10γ) και (10δ) προκύπτει το σωστό αποτέλεσμα.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η μάθηση σε ένα μπεϋζιανό δίκτυο γενικά συνεπάγεται τη βελτίωση της δομής και των τοπικών κατανομών πιθανότητας που προκύπτουν από τις αρχικές πληροφορίες του δικτύου. Η απλούστερη εκδοχή αυτού του προβλήματος αφορά τη χρήση νέας πληροφορίας για την ανανέωση των πιθανοτήτων ενός δικτύου δεδομένης δομής, ενώ μια πιο σύνθετη εκδοχή του αφορά την ίδια την επιλογή του πιο κατάλληλου μοντέλου ([7], βλ. επίσης παράγραφο 4.4). Σε ένα απλό μπεϋζιανό δίκτυο όλες οι μεταβλητές – χαρακτηριστικά θεωρούνται δομικά ισοδύναμα, κι έτσι ο απλός ανασυνδυασμός τους σε διαφορετικές δομές – μοντέλα επιτρέπει την επιλογή της πλέον κατάλληλης δομής. Υπάρχουν όμως τύποι μπεϋζιανών δικτύων οι οποίοι απαιτούν κάποια διάκριση μεταξύ των χαρακτηριστικών:

- *χαρακτηριστικά στόχοι (target attributes)*: αφορούν τους κόμβους των οποίων την κατανομή πιθανότητας θέλουμε να εκτιμήσουμε.
- *προγνωστικά χαρακτηριστικά (predictive attributes)*: αφορούν τους κόμβους των οποίων οι παρατηρούμενες τιμές επηρεάζουν την κατανομή πιθανότητας ενός χαρακτηριστικού-στόχου, μέσω μιας ευθείας σύνδεσης ή μέσω άλλων προγνωστικών χαρακτηριστικών, σύμφωνα με τις υπάρχουσες αιτακές σχέσεις μεταξύ τους.
- *χαρακτηριστικά πλαισίου χρήσης (contextual attributes)*: αφορούν κόμβους οι οποίοι δεν έχουν κάποια άμεση (‘ορατή’) επίδραση πάνω σε χαρακτηριστικά-στόχους, επηρεάζουν όμως τις κατανομές πιθανότητας μέσα στο ίδιο το δίκτυο. Ένα χαρακτηριστικό πλαισίου χρήσης ενδέχεται να είναι εξαρτημένο από κάποιο άλλο χαρακτηριστικό πλαισίου χρήσης ([17]).

Όταν σε ένα μπεϋζιανό δίκτυο πολλαπλές αιτίες, οι οποίες εκφράζονται από προγνωστικά χαρακτηριστικά, συνεισφέρουν ανεξάρτητα σε μια κοινή επίδραση πάνω σε ένα χαρακτηριστικό-στόχο (όπως οι μεταβλητές βροχή- R και ποτιστικό- S

στο παράδειγμα του Σχήματος 4-3), τότε μιλούμε για μια κατάσταση αιτιακής ανεξαρτησίας. Η ανεξαρτησία συγκεκριμένου πλαισίου χρήσης (*context-specific independence*) αναφέρεται σε μια κατάσταση όπου κάποιες τυχαίες μεταβλητές είναι μεταξύ τους ανεξάρτητες σε δεδομένο πλαίσιο χρήσης. Η ‘κομπόχνη’ των πιθανολογικών δικτύων έγκειται ακριβώς στην ικανότητά τους να συμπεριλαμβάνουν σχέσεις ανεξαρτησίας σε δεδομένο πλαίσιο χρήσης. Για παράδειγμα, μπορούμε, όπως είδαμε, να χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο για να υπολογίσουμε την πιθανότητα να έχει βρέξει, στο ‘πλαίσιο γνώσης’ που ορίζεται από την παρατήρηση του βρεγμένου γρασιδιού. Σε συστήματα συμπερασμού που είναι βασισμένα σε κανόνες (*rule-based systems*), αυτού του τύπου η εξάρτηση δεν μπορεί να συμπεριληφθεί. Σε τέτοια συστήματα, μπορούμε συχνά να καταλήξουμε σε λανθασμένα συμπεράσματα: για παράδειγμα, η συνεκτίμηση του κανόνα ‘ανοιχτό ποτιστικό σημαίνει βρεγμένο γρασίδι’ με τον κανόνα ‘βρεγμένο γρασίδι σημαίνει ότι έχει βρέξει’, οδηγεί στο λανθασμένο συμπέρασμα ‘ανοιχτό ποτιστικό σημαίνει ότι έχει βρέξει’.

Στην παραπομπή [18], σχέσεις ανεξαρτησίας πλαισίου χρήσης αξιοποιούνται βάση της παραδοχής ότι ενώ μια υπο-συνθήκη ανεξαρτησία θα πρέπει να ισχύει για κάθε πλαίσιο χρήσης, μια ανεξαρτησία πλαισίου χρήσης αρκεί να ευσταθεί μόνο για κάποιο πλαίσιο. Παρουσιάζεται επίσης ένας τρόπος αναπαράστασης αυτού του τύπου της ανεξαρτησίας με χρήση πολλαπλών μπεϋζιανών δικτύων. Στην παραπομπή [19] παρουσιάζονται δύο αλγόριθμοι που αξιοποιούν την ανεξαρτησία πλαισίου χρήσης: ο πρώτος αφορά την ποιοτική κωδικοποίηση της σχέσης αυτής μέσα στην ίδια τη δικτυακή δομή, ενώ ο δεύτερος επιλέγει ένα σύνολο μεταβλητών οι οποίες καθιστούν το δίκτυο μοναδικά συνδεδεμένο. Έτσι, μειώνεται ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για την εξαγωγή συμπερασμάτων μέσω του δικτύου. Στην παραπομπή [20] χρησιμοποιούνται γενικευμένοι κανόνες σε έναν αλγόριθμο εξάλειψης των χαρακτηριστικών πλαισίου χρήσης. Στην παραπομπή [21] χρησιμοποιούνται δίκτυα ομοιότητας (*similarity networks*) προκειμένου να εκφραστούν ρητά οι ανεξαρτησίες πλαισίου χρήσης σε μπεϋζιανά δίκτυα. Σε ένα δίκτυο ομοιότητας, οι ακμές μεταξύ των μεταβλητών μπορούν να θεωρηθούν σαν δίκτυα των οποίων οι ακμές εμφανίζονται ή εξαφανίζονται, ανάλογα με τις τιμές κάποιων μεταβλητών στο δίκτυο. Αυτό επιτρέπει σε διαφορετικά μπεϋζιανά δίκτυα να εξάγουν συμπεράσματα σε διαφορετικά πλαίσια χρήσης.

4.1.2. Μπεϋζιανά μετα-δίκτυα

Τα μπεϋζιανά μετα-δίκτυα αποτελούν επεκτάσεις των κλασικών μπεϋζιανών δικτύων σε πολυ-επίεδα πιθανολογικά μοντέλα. Υποθέτουν ότι η διαλειτουργικότητα μεταξύ των στοιχειωδών δικτύων μπορεί να μοντελοποιηθεί μέσω ενός ακόμη μπεϋζιανού δικτύου ([17]).

Ορισμός: Ένα μπεϋζιανό μετα-δίκτυο είναι ένα σύνολο μπεϋζιανών δικτύων, τοποθετημένων το ένα πάνω από το άλλο κατά τέτοιο τρόπο ώστε τα στοιχεία (κόμβοι ή δεσμευμένες ή μη κατανομές πιθανότητας) κάθε προηγούμενου πιθανολογικού δικτύου να εξαρτώνται από τις κατανομές πιθανότητας κόμβων που ανήκουν στο επόμενο δίκτυο. Υποθέτουμε πάντα ότι οι παράμετροι (κατανομές πιθανότητας) ενός μπεϋζιανού δικτύου αποτελούν τυχαίες μεταβλητές, και επιτρέπουμε σχέσεις υπο-συνθήκη εξάρτησης μεταξύ αυτών.

Ένα μπεϋζιανό μετα-δίκτυο αποτελείται από μια τριάδα:

$$MBN = (BN, R, P),$$

όπου $BN = \{BN_1, BN_2, \dots, BN_n\}$ είναι ένα σύνολο μπεϋζιανών δικτύων που αναπαριστούν ένα σύνολο επιπέδων, $R = R = \{R_{1,2}, R_{2,3}, \dots, R_{n-1,n}\}$ είναι ένα σύνολο συνδέσεων μεταξύ των επιπέδων, και P είναι η από κοινού συνάρτηση κατανομής πιθανότητας πάνω στο μετα-δίκτυο ([22]).

Κάθε $R_{i,i+1}$ είναι ένα σύνολο συνδέσεων μεταξύ των επιπέδων i και $i+1$ του μετα-δικτύου. Ορίζονται δύο τύποι συνδέσεων:

- R_{v-e} : σύνδεση ‘κορυφής – ακμής’, που σημαίνει ότι οι στοχαστικές τιμές της κορυφής $v_{i,k}$ στο δίκτυο BN_i αντιστοιχούν σε διαφορετικούς πίνακες δεσμευμένων πιθανοτήτων $P_k(v_{i-1,j} | v_{i-1,pj})$ στο δίκτυο BN_{i-1}
- R_{v-v} : σύνδεση ‘κορυφής – κορυφής’, που σημαίνει ότι οι στοχαστικές τιμές της κορυφής $v_{i,r}$ στο δίκτυο BN_i αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές της συνάφειας της κορυφής $v_{i-1,r}$ στο δίκτυο BN_{i-1} .

Σύμφωνα με αυτούς τους δύο τύπους συνδέσεων μεταξύ επιπέδων, ορίζονται και εξετάζονται δύο μοντέλα μπεϋζιανών μετα-δικτύων:

- το **C-μετα-δίκτυο**, το οποίο χαρακτηρίζεται από συνδέσεις τύπου R_{v-e} , και χρησιμοποιείται για τη διαχείριση δεσμευμένων εξαρτήσεων.

- το **R-μετα-δίκτυο**, το οποίο χαρακτηρίζεται από συνδέσεις τύπου R_{v-v} , και χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση της επιλογής συναφών χαρακτηριστικών ([22]).

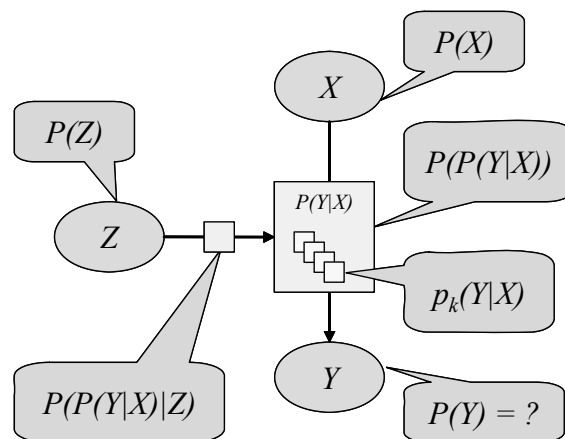
Γενικά, τα πολυ-επίπεδα δίκτυα είναι συνήθως ‘ευαίσθητα’ ως προς τις δεσμευμένες κατανομές πιθανότητας, οι οποίες θα πρέπει να ορίζονται με μεγάλη ακρίβεια, καθώς μικρές διαφοροποιήσεις στις τιμές τους μπορούν να οδηγήσουν σε πολύ διαφορετικές εκτιμήσεις των τιμών των χαρακτηριστικών-στόχων.

4.2. Μοντελοποίηση επίδρασης του πλαισίου χρήσης

Σε αυτή την παράγραφο εξετάζεται η μοντελοποίηση της απευθείας επίδρασης ενός χαρακτηριστικού πλαισίου χρήσης σε δεσμευμένες (παράγραφος 4.2.1) και σε μη δεσμευμένες (παράγραφος 4.2.2) πιθανότητες ενός μπεϋζιανού δικτύου, η οποία και αποτελεί ένα από τα βασικά στοιχεία της λογικής του μπεϋζιανού μετα-δικτύου.

4.2.1. Επίδραση του πλαισίου χρήσης στη δεσμευμένη πιθανότητα

Η απλούστερη δυνατή περίπτωση απεικονίζεται στο Σχήμα 4-4, όπου ένα χαρακτηριστικό πλαισίου χρήσης (Z) επηρεάζει τον τρόπο (δεσμευμένη πιθανότητα) με τον οποίο το χαρακτηριστικό στόχος Y εξαρτάται από τις τιμές που λαμβάνει το προγνωστικό χαρακτηριστικό X ([17]).



Σχήμα 4-4. Απλό μοντέλο επίδρασης πλαισίου χρήσης στη δεσμευμένη πιθανότητα

Το μοντέλο του Σχήματος 4-4 μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

- $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$: μεταβλητή – προγνωστικό χαρακτηριστικό με n δυνατές τιμές
- $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_t\}$: μεταβλητή – χαρακτηριστικό-στόχος με t δυνατές τιμές
- $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_q\}$: μεταβλητή – χαρακτηριστικό πλαισίου χρήσης με q δυνατές τιμές

- $P(Y | X) = \{p_1(Y | X), p_2(Y | X), \dots, p_r(Y | X)\}$: μεταβλητή δεσμευμένης εξάρτησης μεταξύ των μεταβλητών X και Y με r δυνατές τιμές.
- $P(P(Y | X) | Z)$: δεσμευμένη εξάρτηση μεταξύ των μεταβλητών Z και $P(Y | X)$.

Ας υποθέσουμε ότι ο στόχος είναι ο υπολογισμός της κατανομής $P(Y)$.

Κατ' αρχήν, υπολογίζουμε την πιθανότητα για τη μεταβλητή δεσμευμένης εξάρτησης:

$$P(P(Y | X) = p_k(Y | X)) = \sum_{m=1}^q P(P(Y | X) = p_k(Y | X) | Z = z_m) \cdot P(Z = z_m) \quad (12)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζουμε την εξής από κοινού πιθανότητα:

$$\begin{aligned} & P(Y = y_j, X = x_i, P(Y | X) = p_k(Y | X)) = \\ & = P(Y = y_j | X = x_i, P(Y | X) = p_k(Y | X)) \cdot P(X = x_i) \cdot P(P(Y | X) = p_k(Y | X)) \end{aligned} \quad (13)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι:

$$P(Y = y_j | X = x_i, P(Y | X) = p_k(Y | X)) = p_k(Y = y_j | X = x_i)$$

η (13) μπορεί να ξαναγραφεί ως εξής:

$$\begin{aligned} & P(Y = y_j | X = x_i, P(Y | X) = p_k(Y | X)) = \\ & = p_k(Y = y_j | X = x_i) \cdot P(X = x_i) \cdot P(P(Y | X) = p_k(Y | X)) \end{aligned} \quad (14)$$

Αντικαθιστώντας την (12) στην (14) έχουμε:

$$\begin{aligned} & P(Y = y_j, X = x_i, P(Y | X) = p_k(Y | X)) = \\ & = p_k(Y = y_j | X = x_i) \cdot \sum_{m=1}^q P(P(Y | X) = p_k(Y | X) | Z = z_m) \cdot P(Z = z_m) \end{aligned} \quad (15)$$

Εφαρμόζοντας το θεώρημα ολικής πιθανότητας στην (13) παίρνουμε:

$$\begin{aligned} & P(Y = y_j) = \\ & = \sum_{k=1}^r \sum_{i=1}^n p_k(Y = y_j | X = x_i) \cdot P(X = x_i) \cdot \sum_{m=1}^q P(P(Y | X) = p_k(Y | X) | Z = z_m) \cdot P(Z = z_m) \end{aligned} \quad (16)$$

Η, σε πιο συνεπτυγμένη μορφή (κρατώντας μόνο τα ονόματα των μεταβλητών χωρίς τις τιμές τους) ο γενικός τύπος υπολογισμού είναι ο ακόλουθος:

$$P(Y) = \sum_{\forall P(Y|X)} \sum_{\forall X} P(Y | X) \cdot P(X) \cdot \underbrace{\sum_{\forall Z} P(P(Y | X) | Z) \cdot P(Z)}_{\text{metalevel}} \quad (17)$$

Ας θεωρήσουμε το εξής υποθετικό σενάριο, το οποίο αναπαρίσταται από το μοντέλο του Σχήματος 4-4:

- Μεταβλητή – χαρακτηριστικό-στόχος (σωματική υγεία με αναφορά σε κάποια ασθένεια): $Y = \{\text{ασθενής}, \neg\text{ασθενής}\}$
- Μεταβλητή – προγνωστικό χαρακτηριστικό: $X = \{\text{καπνιστής}, \neg\text{καπνιστής}\}$
- Γνωστή κατανομή πιθανότητας: $P(\text{καπνιστής}) = 0,6$; $P(\neg\text{καπνιστής}) = 0,4$
- Μεταβλητή – χαρακτηριστικό πλαισίου χρήσης (βεβαρημένο ιατρικό ιστορικό): $Z = \{\text{ιστ.1}, \text{ιστ.2}, \text{ιστ.3}\}$
- Κατανομής πιθανότητας: $P(\text{ιστ.1}) = 0,2$; $P(\text{ιστ.2}) = 0,5$; $P(\text{ιστ.3}) = 0,3$
- Έστω ότι γνωρίζουμε δύο κατανομές για την $P(Y | X)$ (Πίνακας 4-2).

Πίνακας 4-2. Κατανομή της πιθανότητας $P(Y | X)$ στο παράδειγμα

$p_1(Y | X)$	<i>καπνιστής</i>	\neg <i>καπνιστής</i>
<i>ασθενής</i>	0,8	0,3
\neg <i>ασθενής</i>	0,2	0,7
$p_2(Y | X)$	<i>καπνιστής</i>	\neg <i>καπνιστής</i>
<i>ασθενής</i>	0,5	0,4
\neg <i>ασθενής</i>	0,5	0,6

- Έστω ότι η δεσμευμένη εξάρτηση της μεταβλητής $P(Y | X)$ από την Z χαρακτηρίζεται από την κατανομή του Πίνακα 4-3.

Πίνακας 4-3. Δεσμευμένη εξάρτηση μεταξύ πλαισίου χρήσης Z και δεσμευμένης πιθανότητας $P(Y | X)$ στο παράδειγμα

$P(P(Y | X) | Z)$	<i>ιστ.1</i>	<i>ιστ.2</i>	<i>ιστ.3</i>
$p_1(Y | X)$	0,2	0,6	0,7
$p_2(Y | X)$	0,8	0,4	0,3

Έτσι, έχουμε: $n = 2, q = 3, r = 2$. Έστω ότι ο στόχος είναι να υπολογίσουμε τις πιθανότητες $P(Y = \text{ασθενής})$ and $P(Y = \neg\text{ασθενής})$.

Σύμφωνα με την (12) υπολογίζουμε:

$$\sum_{m=1}^3 P(P(Y|X) = p_1(Y|X) | Z = z_m) \cdot P(Z = z_m) = 0,2 \times 0,2 + 0,6 \times 0,5 + 0,7 \times 0,3 = 0,55$$

$$\sum_{m=1}^3 P(P(Y|X) = p_2(Y|X) | Z = z_m) \cdot P(Z = z_m) = 0,8 \times 0,2 + 0,4 \times 0,5 + 0,3 \times 0,3 = 0,45$$

Εφαρμόζοντας τώρα την (16):

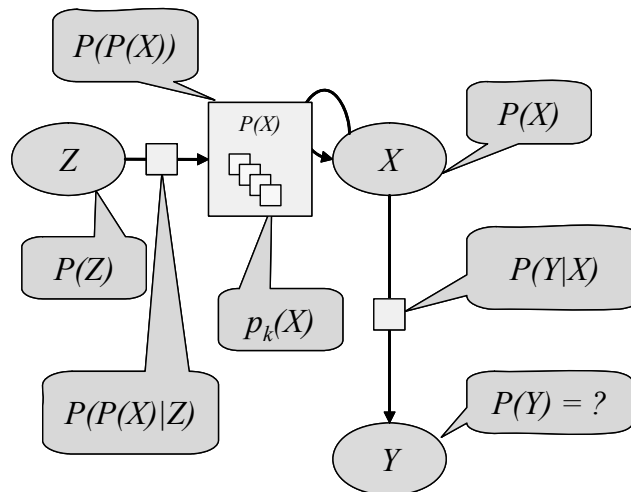
$$P(Y = \text{ασθενής}) = 0,8 \times 0,6 \times 0,55 + 0,3 \times 0,4 \times 0,55 + 0,5 \times 0,6 \times 0,45 + 0,4 \times 0,4 \times 0,45 = 0,537$$

και:

$$P(Y = \neg \text{ασθενής}) = 0,2 \times 0,6 \times 0,55 + 0,7 \times 0,4 \times 0,55 + 0,5 \times 0,6 \times 0,45 + 0,6 \times 0,4 \times 0,45 = 0,463$$

4.2.2. Επίδραση του πλαισίου χρήσης στη μη δεσμευμένη πιθανότητα

Η απλούστερη δυνατή περίπτωση απεικονίζεται στο Σχήμα 4-5, όπου ένα χαρακτηριστικό πλαισίου χρήσης (Z) επηρεάζει τη μη δεσμευμένη κατανομή πιθανότητας ενός προγνωστικού χαρακτηριστικού ($P(X)$) ([17]).



Σχήμα 4-5. Απλό μοντέλο επίδρασης πλαισίου χρήσης στη μη δεσμευμένη πιθανότητα

Το μοντέλο του Σχήματος 4-5 μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

- $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$: μεταβλητή – προγνωστικό χαρακτηριστικό με n δυνατές τιμές
- $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_t\}$: μεταβλητή – χαρακτηριστικό-στόχος με t δυνατές τιμές
- $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_q\}$: μεταβλητή – χαρακτηριστικό πλαισίου χρήσης με q δυνατές τιμές

- $P(X) = \{p_1(X), p_2(X), \dots, p_r(X)\}$: κατανομή πιθανότητας της μεταβλητής X με r δυνατές τιμές (διαφορετικές δυνατές κατανομές πιθανότητας για την X) και $P(P(X))$ η κατανομή πιθανότητας της μεταβλητής $P(X)$.
- $P(Y|X)$: κατανομή δεσμευμένης πιθανότητας της Y δεδομένης της X .
- $P(P(X)|Z)$: κατανομή δεσμευμένης πιθανότητας της $P(X)$ δεδομένης της Z .

Ας υποθέσουμε ότι ο στόχος είναι ο υπολογισμός της κατανομής $P(Y)$.

Κατ' αρχήν, υπολογίζουμε την ακόλουθη πιθανότητα:

$$P(P(X) = p_k(X)) = \sum_{m=1}^q P(P(X) = p_k(X) | Z = z_m) \cdot P(Z = z_m) \quad (18)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζουμε την εξής από κοινού πιθανότητα:

$$\begin{aligned} P(Y = y_j, X = x_i, P(X) = p_k(X)) &= \\ &= P(Y = y_j | X = x_i, P(X) = p_k(X)) \cdot P(X = x_i, P(X) = p_k(X)) = \quad (19) \\ &= P(Y = y_j | X = x_i, P(X) = p_k(X)) \cdot P(X = x_i | P(X) = p_k(X)) \cdot P(P(X) = p_k(X)) \end{aligned}$$

Λαμβάνοντας υπόψη την ανεξαρτησία μεταξύ των μεταβλητών Y και $P(X)$ δεδομένης της X , καθώς επίσης και ότι:

$$P(X = x_i, P(X) = p_k(X)) = p_k(X = x_i)$$

μπορούμε να ξαναγράψουμε την (19) ως εξής:

$$P(Y = y_j, X = x_i, P(X) = p_k(X)) = P(Y = y_j | X = x_i) \cdot p_k(X = x_i) \cdot P(P(X) = p_k(X)) \quad (20)$$

Αντικαθιστώντας την (18) στην (20) έχουμε:

$$\begin{aligned} P(Y = y_j, X = x_i, P(X) = p_k(X)) &= \\ &= P(Y = y_j | X = x_i) \cdot p_k(X = x_i) \cdot \sum_{m=1}^q P(P(X) = p_k(X) | Z = z_m) \cdot P(Z = z_m) \quad (21) \end{aligned}$$

Αθροίζοντας την (21) για όλα τα k και i παίρνουμε:

$$\begin{aligned} P(Y = y_j) &= \\ &= \sum_{k=1}^r \sum_{i=1}^n P(Y = y_j | X = x_i) \cdot p_k(X = x_i) \cdot \sum_{m=1}^q P(P(X) = p_k(X) | Z = z_m) \cdot P(Z = z_m) \quad (22) \end{aligned}$$

Η, σε πιο συνεπτυγμένη μορφή (κρατώντας μόνο τα ονόματα των μεταβλητών χωρίς τις τιμές τους) ο γενικός τύπος υπολογισμού είναι ο ακόλουθος:

$$P(Y) = \sum_{\forall P(X)} \sum_{\forall X} P(Y|X) \cdot P(X) \cdot \underbrace{\sum_{\forall Z} P(P(X)|Z) \cdot P(Z)}_{\text{metalevel}} \quad (23)$$

Ας θεωρήσουμε το εξής υποθετικό σενάριο, το οποίο αναπαρίσταται από το μοντέλο του Σχήματος 4-5:

- Μεταβλητή – χαρακτηριστικό-στόχος (σωματική υγεία με αναφορά σε κάποια ασθένεια): $Y = \{\text{ασθενής}, \neg\text{ασθενής}\}$
- Μεταβλητή – προγνωστικό χαρακτηριστικό: $X = \{\text{καπνιστής}, \neg\text{καπνιστής}\}$
- Έστω ότι γνωρίζουμε δύο κατανομές για τη μεταβλητή X (Πίνακας 4-4).

Πίνακας 4-4. Διαφορετικές κατανομές πιθανότητες για τη μεταβλητή X στο παράδειγμα

$P(X)$	καπνιστής	\neg καπνιστής
$p_1(X)$	0,7	0,3
$p_2(X)$	0,5	0,5

- Μεταβλητή – χαρακτηριστικό πλαισίου χρήσης (βεβαρημένο ιατρικό ιστορικό): $Z = \{\text{ιστ.1}, \text{ιστ.2}, \text{ιστ.3}\}$
- Κατανομή πιθανότητας: $P(\text{ιστ.1}) = 0,2$; $P(\text{ιστ.2}) = 0,5$; $P(\text{ιστ.3}) = 0,3$
- Έστω ότι γνωρίζουμε την κατανομή της δεσμευμένης πιθανότητας $P(Y|X)$ (Πίνακας 4-5).

Πίνακας 4-5. Κατανομή δεσμευμένης πιθανότητας $P(Y|X)$ στο παράδειγμα

$P(Y|X)$	καπνιστής	\neg καπνιστής
ασθενής	0,8	0,3
\neg ασθενής	0,2	0,7

- Έστω ότι η δεσμευμένη εξάρτηση της μεταβλητής $P(X)$ από την Z χαρακτηρίζεται από την κατανομή του Πίνακα 4-6.

Πίνακας 4-6. Δεσμευμένη εξάρτηση μεταξύ πλαισίου χρήσης Z και δεσμευμένης πιθανότητας $P(X)$ στο παράδειγμα

$P(P(X)|Z)$	ιστ.1	ιστ.2	ιστ.3
$p_1(X)$	0,2	0,6	0,8
$p_2(X)$	0,8	0,4	0,2

Έτσι, έχουμε: $n = 2, q = 3, r = 2$. Έστω ότι ο στόχος είναι να υπολογίσουμε τις πιθανότητες $P(Y = \text{ασθενής})$ and $P(Y = \neg\text{ασθενής})$.

Σύμφωνα με την (18) υπολογίζουμε:

$$\sum_{m=1}^3 P(P(X) = p_1(X) | Z = z_m) \cdot P(Z = z_m) = 0,2 \times 0,2 + 0,6 \times 0,5 + 0,8 \times 0,3 = 0,58$$

$$\sum_{m=1}^3 P(P(X) = p_2(X) | Z = z_m) \cdot P(Z = z_m) = 0,8 \times 0,2 + 0,4 \times 0,5 + 0,2 \times 0,3 = 0,42$$

Εφαρμόζοντας τώρα την (22):

$$P(Y = ασθενής) = 0,8 \times 0,7 \times 0,58 + 0,3 \times 0,3 \times 0,58 + 0,8 \times 0,5 \times 0,42 + 0,3 \times 0,5 \times 0,42 = 0,608$$

και:

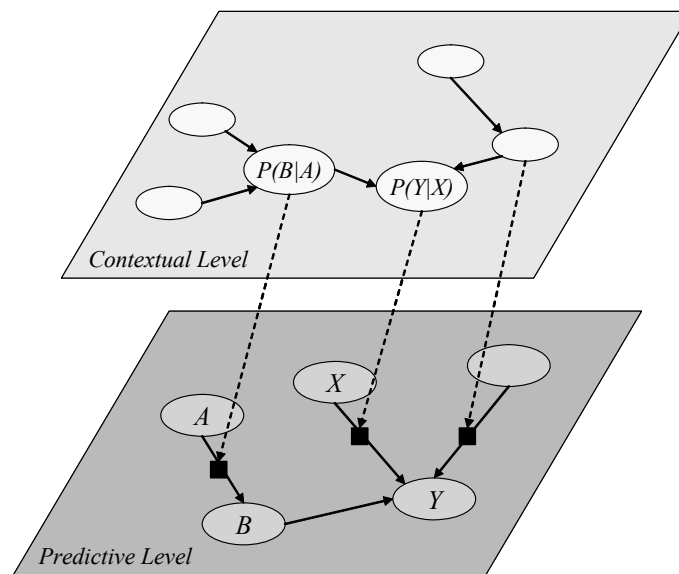
$$P(Y = \neg ασθενής) = 0,2 \times 0,7 \times 0,58 + 0,7 \times 0,3 \times 0,58 + 0,2 \times 0,5 \times 0,42 + 0,7 \times 0,5 \times 0,42 = 0,392$$

4.3. Μπεϋζιανά μετα-δίκτυα για τη διαχείριση κατανομών πιθανότητας

Στην παράγραφο αυτή εξετάζουμε λεπτομερέστερα τα δύο μοντέλα μπεϋζιανών μετα-δικτύων που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα, καθώς και τις εφαρμογές τους: το *C-μετα-δίκτυο* το οποίο θεωρεί τις δεσμευμένες εξαρτήσεις του δικτύου τυχαίες μεταβλητές, και το *R-μετα-δίκτυο*, το οποίο θεωρεί ότι οι ίδιες οι σχετικότητες (*relevances*) των προγνωστικών μεταβλητών αποτελούν τυχαίες μεταβλητές.

4.3.1. C-μετα-δίκτυο: διαχείριση δεσμευμένης εξάρτησης

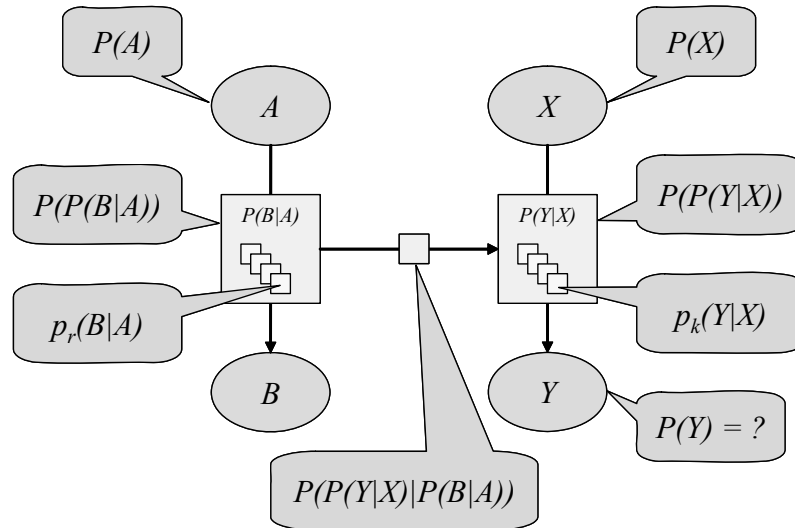
Ας θεωρήσουμε το μπεϋζιανό C-μετα-δίκτυο του Σχήματος 4-6.



Σχήμα 4-6. Μπεϋζιανό μετα-δίκτυο δύο επιπέδων για τη διαχείριση δεσμευμένων πιθανοτήτων

Οι μεταβλητές πλαισίου χρήσης του δικτύου αυτού βρίσκονται στο δεύτερο επίπεδο (επίπεδο πλαισίου χρήσης – *contextual level*), και ελέγχουν τις δεσμευμένες πιθανότητες που χαρακτηρίζουν τις μεταβλητές του πρώτου επιπέδου (προγνωστικό επίπεδο – *predictive level*) του δικτύου. Σε κάθε ένα από τα επίπεδα του σύνθετου δικτύου εφαρμόζεται κλασικός μπεϋζιανός συμπερασμός.

Στο Σχήμα 4-7 απεικονίζεται (για ευκολία σε προβολή σε δύο διαστάσεις) ένα τμήμα του μετα-δικτύου του Σχήματος 4-6 ([22]).



Σχήμα 4-7. Παράδειγμα μπεϋζιανού μετα-δικτύου, προβολή σε 2 διαστάσεις

Στο Σχήμα 4-7, οι κόμβοι του δικτύου του 2^{ου} επιπέδου (*contextual level*) αντιστοιχούν στις δεσμευμένες πιθανότητες του δικτύου του 1^{ου} επιπέδου (*predictive level*), δηλαδή στις $P(B|A)$ και $P(Y|X)$. Η ακμή του δικτύου του 2^{ου} επιπέδου αντιστοιχεί στη δεσμευμένη πιθανότητα $P(P(Y|X)|P(B|A))$.

Αυτό το μπεϋζιανό C-μετα-δίκτυο έχει τις εξής παραμέτρους:

- Χαρακτηριστικά στο προγνωστικό επίπεδο:
 - A με τιμές $\{a_1, a_2, \dots, a_{na}\}$, B με τιμές $\{b_1, b_2, \dots, b_{nb}\}$ και κατανομή πιθανότητας $P(A)$.
 - X με τιμές $\{x_1, x_2, \dots, x_{nx}\}$, Y με τιμές $\{y_1, y_2, \dots, y_{ny}\}$ και κατανομή πιθανότητας $P(X)$.
- Δεσμευμένες πιθανότητες στο προγνωστικό επίπεδο:
 - $P(B|A)$, η οποία είναι τυχαία μεταβλητή με σύνολο δυνατών τιμών $\{p_1(B|A), p_2(B|A), \dots, p_{mp}(B|A)\}$. Είναι σημαντικό να παρατηρήσουμε ότι αυτή η παράμετρος λειτουργεί ως απλή δεσμευμένη πιθανότητα στο

προγνωστικό επίπεδο και ταυτόχρονα ως κόμβος-μεταβλητή στο επίπεδο πλαισίου χρήσης.

- $P(Y|X)$, η οποία είναι τυχαία μεταβλητή με σύνολο δυνατών τιμών $\{p_1(Y|X), p_2(Y|X), \dots, p_{np}(Y|X)\}$. Και εδώ πρόκειται για μια μεταβλητή στο επίπεδο πλαισίου χρήσης.
- Δεσμευμένη πιθανότητα στο επίπεδο πλαισίου χρήσης:
 - $P(P(Y|X)|P(B|A))$, η οποία ορίζει τη δεσμευμένη εξάρτηση μεταξύ των δύο χαρακτηριστικών πλαισίου χρήσης, $P(Y|X)$ και $P(B|A)$.

Η κατανομή πιθανότητας του χαρακτηριστικού-στόχου $P(Y)$ μπορεί να υπολογιστεί με την εφαρμογή βασικών κανόνων της μπεϋζιανής θεωρίας σε κάθε επίπεδο του μετα-δικτύου:

Στο 1^ο επίπεδο του μετα-δικτύου υπολογίζουμε την από κοινού πιθανότητα:

$$\begin{aligned} & P(Y = y_j, X = x_i, P(Y|X) = p_k(Y|X)) = \\ & = \underbrace{P(Y = y_j | X = x_i, P(Y|X) = p_k(Y|X))}_{p_k(Y=y_j|X=x_i)} \cdot \underbrace{P(X = x_i, P(Y|X) = p_k(Y|X))}_{independent} = \\ & = p_k(Y = y_j | X = x_i) \cdot P(X = x_i) \cdot P(P(Y|X) = p_k(Y|X)) \end{aligned}$$

Στη συνέχεια, εφαρμόζουμε το θεώρημα ολικής πιθανότητας:

$$P(Y = y_j) = \sum_k \sum_i (p_k(Y = y_j | X = x_i) \cdot P(X = x_i) \cdot P(P(Y|X) = p_k(Y|X))) \quad (24)$$

Στο 2^ο επίπεδο, υπολογίζουμε την από κοινού πιθανότητα:

$$\begin{aligned} & P(P(Y|X) = p_k(Y|X), P(B|A) = p_r(B|A)) = \\ & = P(P(Y|X) = p_k(Y|X) | P(B|A) = p_r(B|A)) \cdot P(P(B|A) = p_r(B|A)) \end{aligned}$$

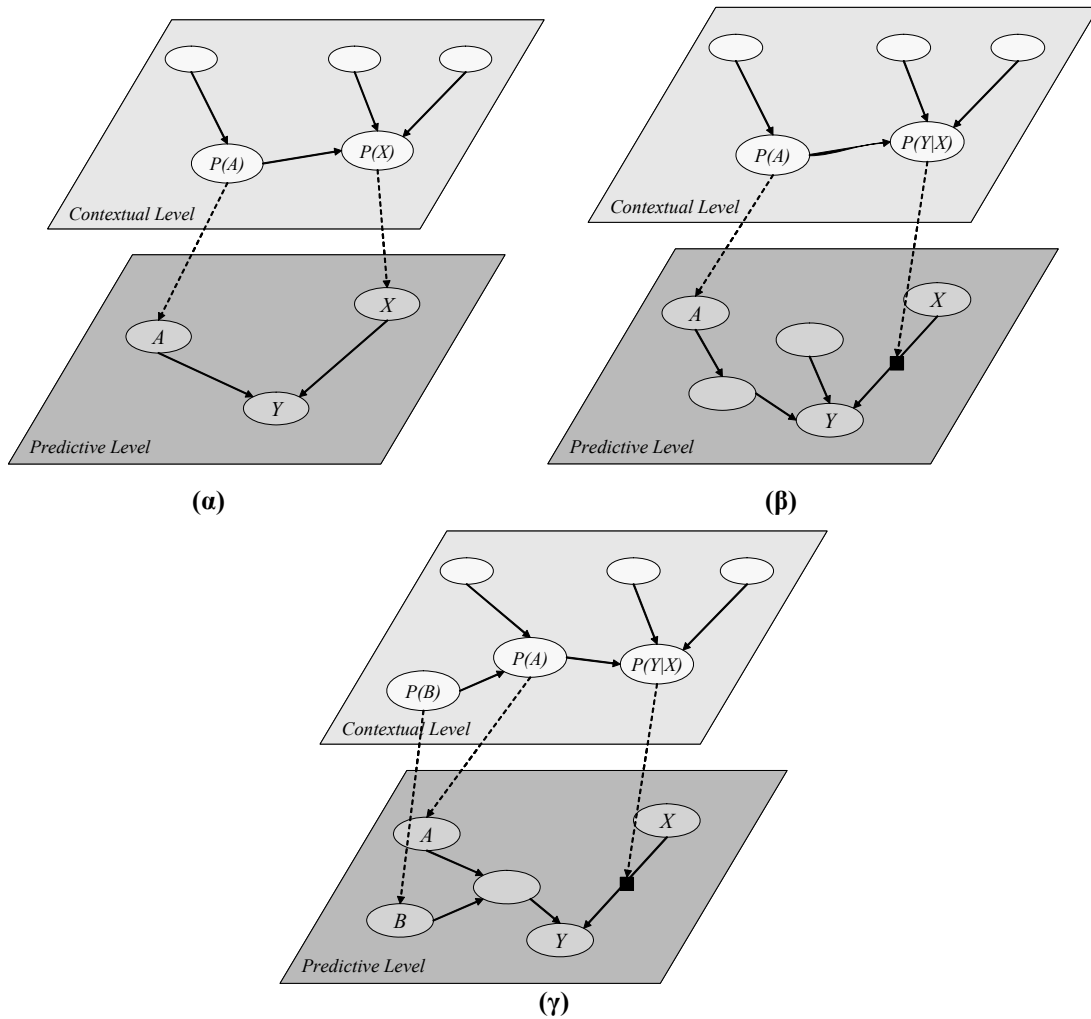
Εφαρμόζουμε το θεώρημα ολικής πιθανότητας:

$$\begin{aligned} & P(P(Y|X) = p_k(Y|X)) = \\ & = \sum_r P(P(Y|X) = p_k(Y|X) | P(B|A) = p_r(B|A)) \cdot P(P(B|A) = p_r(B|A)) \quad (25) \end{aligned}$$

Τέλος, από τις (24) και (25) παίρνουμε την εξής έκφραση για την κατανομή $P(Y)$:

$$\begin{aligned} & P(Y = y_j) = \sum_i \sum_k p_k(Y = y_j | X = x_i) \cdot P(X = x_i) \cdot \\ & \cdot \sum_r P(P(Y|X) = p_k(Y|X) | P(B|A) = p_r(B|A)) \cdot P(P(B|A) = p_r(B|A)) \end{aligned}$$

Παρόμοια διαδικασία επίλυσης μπορεί να ακολουθηθεί και σε άλλες περιπτώσεις μετα-δικτύων, όπου οποιουδήποτε τύπου (δεσμευμένες ή μη) κατανομές πιθανότητας στο προγνωστικό επίπεδο εξαρτώνται από κατανομές του επιπέδου πλαισίου χρήσης ([22]).



Σχήμα 4-8. Παραδείγματα C-μετα-δικτύων

Στο μετα-δίκτυο του Σχήματος 4-8 (α), κατανομές μη δεσμευμένης πιθανότητας που σχετίζονται με μεταβλητές στο προγνωστικό επίπεδο εξαρτώνται από κατανομές πιθανότητας που σχετίζονται με μεταβλητές στο επίπεδο πλαισίου χρήσης. Στο Σχήμα 4-8 (β), το επίπεδο πλαισίου χρήσης μοντελοποιεί την εξάρτηση μεταξύ δεσμευμένων και μη δεσμευμένων κατανομών στο προγνωστικό επίπεδο. Τέλος, στο Σχήμα 4-8 (γ), απεικονίζεται ένας συνδυασμός των δύο αυτών περιπτώσεων.

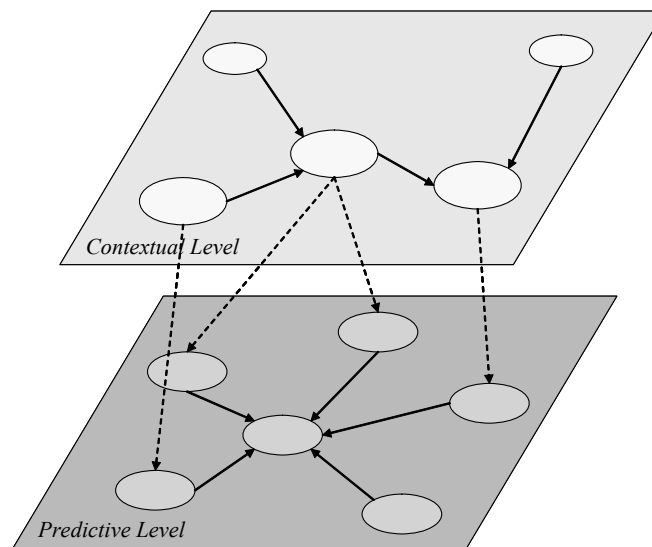
Μοντέλα μευζιανών μετα-δικτύων παρόμοια με αυτά που συζητήθηκαν στα παραπάνω μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα μεγάλο φάσμα εφαρμογών μοντελοποίησης, μεταξύ των οποίων και η πρόγνωση των προτιμήσεων / προφίλ ενός κινητού χρήστη: το προφίλ ενός χρήστη αποτελείται από κάποια προγνωστικά χαρακτηριστικά και κάποια χαρακτηριστικά πλαισίου χρήσης. Τα μεν προγνωστικά (τα οποία ορίζονται από τις προτιμήσεις του χρήστη) τοποθετούνται στο προγνωστικό επίπεδο και χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του χρήστη. Τα χαρακτηριστικά πλαισίου χρήσης (θέση χρήστη κ.λπ.) τοποθετούνται στο 2^ο επίπεδο

(ελέγχου) και χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη των κατάλληλων δεσμευμένων εξαρτήσεων μεταξύ των παραμέτρων του προφίλ και των συνιστωσών του πλαισίου χρήσης.

4.3.2. R-μετα-δίκτυο: μοντελοποίηση επιλογής σχετικών χαρακτηριστικών

Το μοντέλο του μπεϋζιανού μετα-δικτύου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμη σαν εργαλείο μοντελοποίησης της επιλογής σχετικών (συναφών) χαρακτηριστικών: αυτή η λειτουργία αφορά την επιλογή ενός υποσυνόλου χαρακτηριστικών τα οποία είναι σχετικά με την παράμετρο που επιθυμούμε να προσδιορίσουμε.

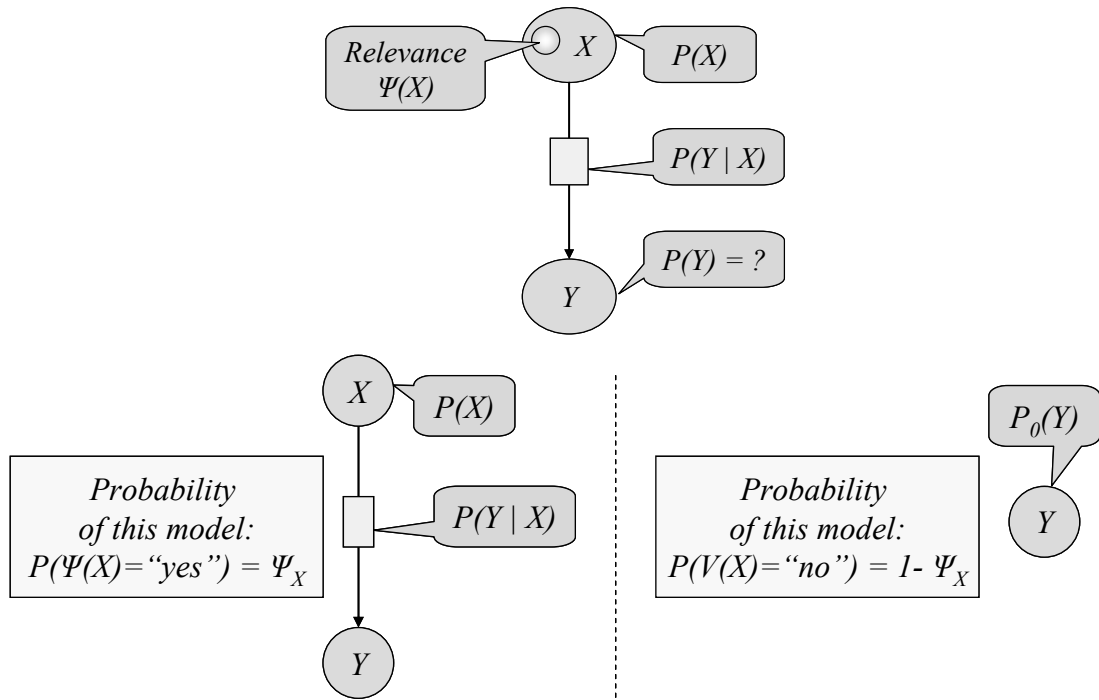
Ας θεωρήσουμε του μπεϋζιανό R-μετα-δίκτυο του Σχήματος 4-9 ([22]).



Σχήμα 4-9. Μπεϋζιανό R-μετα-δίκτυο για τη μοντελοποίηση επιλογής σχετικών χαρακτηριστικών

Και εδώ, οι μεταβλητές πλαισίου χρήσης θεωρούμε ότι απαρτίζουν το ανώτερο επίπεδο ελέγχου του μοντέλου, ενώ οι προγνωστικές μεταβλητές το κατώτερο. Οι τιμές των μεταβλητών πλαισίου χρήσης επηρεάζουν το κατά πόσον οι μεταβλητές του προγνωστικού επιπέδου σχετίζονται μεταξύ τους. Η τιμή σχετικότητας (συνάφειας) μιας μεταβλητής θεωρείται ίση με την πιθανότητα να επηρεάσει την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με ένα χαρακτηριστικό-στόχο, σε ένα δεδομένο πλαίσιο χρήσης.

Στο Σχήμα 4-10 απεικονίζεται (προβολή σε δύο διαστάσεις) ένα τμήμα του μετα-δικτύου του Σχήματος 4-9 ([22]).



Σχήμα 4-10. Ορισμός συνάφειας για το μπεϋζιανό R-μετα-δίκτυο

Αυτό το μπεϋζιανό R-μετα-δίκτυο έχει τις εξής παραμέτρους:

- Χαρακτηριστικά στο προγνωστικό επίπεδο: X με τιμές $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ και Y με τιμές $\{y_1, y_2, \dots, y_m\}$
- Κατανομές πιθανότητας στο προγνωστικό επίπεδο: $P(X)$ και $P(Y | X)$.
- Το κατηγορήμα συνάφειας: $\Psi(X) = \text{"yes"}$, εάν το χαρακτηριστικό X είναι σχετικό, $\Psi(X) = \text{"no"}$, εάν το χαρακτηριστικό X δεν είναι σχετικό.
- Η τιμή της συνάφειας: $\Psi_x = P(\Psi(X) = \text{"yes"})$

Η δεσμευμένη πιθανότητα της Y δεδομένης της X και της $\Psi(X)$ θα εκφράζεται ως εξής:

- $P(Y | X, \Psi(X)) = P(Y | X)$ εάν $\Psi(X) = \text{"yes"}$,
- $P_0(Y)$ εάν $\Psi(X) = \text{"no"}$,

όπου $P_0(Y)$ η εκ-των-προτέρων κατανομή πιθανότητας της μεταβλητής Y . Ένας τρόπος υπολογισμού της $P_0(Y)$ είναι ο εξής:

$$P_0(Y = y_j) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n P(Y = y_j | X = x_i)$$

όπου n είναι ο αριθμός των δυνατών τιμών της μεταβλητής X . Έτσι, η πιθανότητα του χαρακτηριστικού-στόχου Y υπολογίζεται:

$$P(Y) = \frac{1}{n} \cdot \sum_X P(Y|X) \cdot (n \cdot \Psi_X \cdot P(X)) + (1 - \Psi_X)$$

Η μοντελοποίηση της επιλογής σχετικών χαρακτηριστικών με τη βοήθεια ενός μπεϋζιανού R-μετα-δικτύου μπορεί να εφαρμοστεί σε κινητές εφαρμογές, όπου είναι επιθυμητή η επεξεργασία μόνο της σχετικής πληροφορίας, προκειμένου για την εξοικονόμηση πόρων του συστήματος. Θεωρώντας και πάλι το παράδειγμα του προφίλ ενός χρήστη, το οποίο απαρτίζεται τόσο από προγνωστικά χαρακτηριστικά όσο και από χαρακτηριστικά πλαισίου χρήσης, τα τελευταία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των προγνωστικών εκείνων χαρακτηριστικών που είναι σχετικά με το υπό εξέταση πλαίσιο χρήσης.

4.3.3. Συζήτηση

Τα μπεϋζιανά μετα-δίκτυα θεωρούνται χρήσιμα εργαλεία για την εισαγωγή δευτεροβάθμιας αβεβαιότητας σε ένα προγνωστικό μοντέλο. Ο γενικός φορμαλισμός που τα χαρακτηρίζει μπορεί να εφαρμοστεί τόσο για εφαρμογές μοντελοποίησης των δεσμευμένων εξαρτήσεων (C-μετα-δίκτυο), όσο και για εφαρμογές μοντελοποίησης της επιλογής των κατάλληλων / σχετικών χαρακτηριστικών (R-μετα-δίκτυο).

Η χρησιμότητά τους έγκειται στην ικανότητα διαχείρισης γνώσης σε διαφορετικά επίπεδα δυνατών πλαισίων χρήσης, η οποία και αποτελεί μια από τις βασικές ιδιότητες οποιουδήποτε ευφυούς συστήματος (*intelligent system*). Η πολυ-επίπεδη αναπαράσταση ενός πλαισίου χρήσης επιτρέπει την εξαγωγή συμπερασμάτων σε διαφορετικά πλαίσια επιτρέποντας την επίλυση προβλημάτων όπως είναι τα ακόλουθα ([23]):

- Η διερμηνεία γνώσης (*knowledge interpretation*) χρησιμοποιώντας όλα τα γνωστά πλαίσια χρήσης αυτής.
- Η ανάκτηση (‘εξόρυξη’) γνώσης (*knowledge discovery / acquisition*) όταν η αναπαράστασή της σε κάποιο πλαίσιο χρήσης, καθώς και το ίδιο το πλαίσιο είναι γνωστά.
- Η ανάκτηση γνώσης σχετικά με κάποιο πλαίσιο χρήσης όταν είναι γνωστό πώς η γνώση ‘μεταφράζεται’ στο πλαίσιο αυτό.
- Ο μεταχηματισμός γνώσης από ένα πλαίσιο χρήσης σε ένα άλλο.

4.4. Μάθηση στα μπεϋζιανά δίκτυα

4.4.1. Γενικά

Ένα βασικό πρόβλημα στη θεωρία των μπεϋζιανών δικτύων αφορά τη βελτίωση της δομής και των κατανομών πιθανότητας που έχουν αρχικά θεωρηθεί για την κατασκευή του μοντέλου, δεδομένων καινούριων παρατηρήσεων. Αυτό το πρόβλημα ονομάζεται *μάθηση* των μπεϋζιανών δικτύων και η αντιμετώπισή του αφορά την ανάπτυξη κατάλληλων τεχνικών επεξεργασίας δεδομένων οι οποίες συνδυάζουν εκ-των-προτέρων γνώση με νέες παρατηρήσεις για την παραγωγή βελτιωμένης γνώσης. Η απλούστερη έκδοση του προβλήματος της μάθησης εστιάζει στη χρήση νέας πληροφορίας για την ανανέωση των πιθανοτήτων μιας δεδομένης δομής μπεϋζιανού δικτύου, ενώ η πιο σύνθετη στην επιλογή της ίδιας της δομής του δικτύου. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι δύο πτυχές του προβλήματος αυτού.

4.4.2. Μάθηση παραμέτρων

Το πρόβλημα της μάθησης παραμέτρων σε ένα μπεϋζιανό δίκτυο μπορεί να διατυπωθεί ως εξής: δεδομένου ενός συνόλου παρατηρήσεων D πάνω στις μεταβλητές (X_1, X_2, \dots, X_n) του δικτύου και μιας δικτυακής δομής S , επιδιώκουμε τον υπολογισμό της εκ-των-υστερών πιθανότητας $P(\tilde{\theta}_s | D, S^h)$, όπου S^h υποδηλώνει την υπόθεση ότι η από κοινού συνάρτηση κατανομής πιθανότητας μπορεί να παραγοντοποιηθεί σύμφωνα με την S , και $\tilde{\theta}_s$ είναι το διάνυσμα των παραμέτρων (δεσμευμένων πιθανοτήτων του δικτύου).

Τα μπεϋζιανά δίκτυα μπορεί να θεωρηθεί ότι αναπαριστούν μια συλλογή μοντέλων ταξινόμησης, οργανωμένα βάσει σχέσεων υπο-συνθήκη ανεξαρτησίας. Υπ' αυτή την έννοια, για τη μάθηση των πιθανοτήτων σε ένα μπεϋζιανό δίκτυο μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες τεχνικές: η γραμμική παλινδρόμηση (*linear regression* – [24],[25]), τα πιθανολογικά νευρωνικά δίκτυα (*probabilistic neural networks* – [26],[27],[28],[29]), και οι λεξικοπαγείς αλγόριθμοι (*dictionary-based algorithms* – [30]). Οι περισσότερες μελετημένες μέθοδοι περιλαμβάνουν τη γραμμική παλινδρόμηση με γκαουσιανό θόρυβο (*linear regression with Gaussian noise* – [31]), και τη γενικευμένη γραμμική παλινδρόμηση (*generalized linear regression* – [10],[32],[33]).

4.4.3. Μάθηση δομής

4.4.3.1. Γενικά

Θεωρώντας ότι η δομή ενός δεδομένου μπεϋζιανού δικτύου μπορεί να βελτιωθεί, σημαίνει ότι είμαστε αβέβαιοι σχετικά με τη δομή που κωδικοποιεί την από κοινού συνάρτηση κατανομής πιθανότητας όλων των μεταβλητών του δικτύου. Αναπαριστώντας αυτή την αβεβαιότητα με τη βοήθεια μιας (διακριτής) τυχαίας μεταβλητής S^h , της οποίας οι τιμές αντιστοιχούν στις δυνατές υποθέσεις γύρω από τη δομή του δικτύου, τότε ο υπολογισμός της πιθανότητας ενός χαρακτηριστικού-στόχου του δικτύου θα πρέπει να εκφραστεί σαν άθροισμα πάνω σε όλες τις δυνατές τιμές της S^h . Αυτή η προσέγγιση βέβαια δεν είναι καθόλου πρακτική, και αυτό οφείλεται στο τεράστιο υπολογιστικό κόστος που απορρέει από το άθροισμα της μορφής \sum_{S^h} . Εάν θεωρήσουμε ένα μπεϋζιανό δίκτυο n μεταβλητών, το πλήθος των δυνατών δικτυακών δομών που μπορούν να προκύψουν είναι υπερ-εκθετικό σε σχέση με το n . Επομένως, σε περιπτώσεις όπου δεν μπορούμε να αποκλείσουμε με ασφάλεια ένα μεγάλο πλήθος των δυνατών δομών, αυτή η προσέγγιση είναι ανέφικτη.

Η στατιστική έχει προτείνει δύο κατευθύνσεις για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος: την *επιλογή μοντέλου* (*model selection*) και την *επιλεκτική μεσοτίμηση μοντέλων* (*selective model averaging*). Η πρώτη προσέγγιση συνίσταται στην επιλογή ενός ‘καλού’ μοντέλου (δηλ. μιας υπόθεσης δομής) ανάμεσα σε όλα τα δυνατά μοντέλα, και τη χρήση αυτού σαν να επρόκειτο για το σωστό μοντέλο. Η δεύτερη προσέγγιση συνίσταται στην επιλογή ενός διαχειρίσιμου αριθμού ‘καλών’ μοντέλων ανάμεσα από όλα τα δυνατά μοντέλα, και στην επακόλουθη αξιολόγηση αυτών σαν να επρόκειτο για ένα εξαντλητικό πλήθος δυνατών μοντέλων.

Αυτές οι δύο προσεγγίσεις εγείρουν κάποια σημαντικά ερωτήματα: η εφαρμογή τους σε δομές μπεϋζιανών δικτύων οδηγεί σε ακριβή αποτελέσματα; Εάν ναι, πώς αναζητούμε ‘καλά’ μοντέλα και πώς αποφασίζουμε εάν ένα μοντέλο είναι ‘καλό’ ή όχι; Το ερώτημα της ακρίβειας είναι δύσκολο να απαντηθεί θεωρητικά. Ωστόσο, αρκετοί ερευνητές έχουν δείξει πειραματικά ότι η επιλογή μιας και μόνης καλής υπόθεσης συχνά οδηγεί σε ορθές προβλέψεις ([34],[35],[36]), και ότι η μεσοτίμηση μοντέλων με χρήση μεθόδων Monte-Carlo μπορεί να είναι αποδοτική και να δώσει ακόμη καλύτερες προβλέψεις ([37],[38]). Το έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον που

παρατηρείται τον τελευταίο καιρό στην περιοχή της μάθησης με τη βοήθεια μπεϋζιανών δικτύων οφείλεται σε μεγάλο βαθμό σε παρόμοια αποτελέσματα. Ας σημειωθεί ακόμη ότι και η επιλογή μοντέλου και η επιλεκτική μεσοτίμηση μοντέλων οδηγούν σε μπεϋζιανά μοντέλα τα οποία γενικεύονται εύκολα με την προσθήκη νέων δεδομένων και αποφεύγουν την υπερβολική προσαρμογή (*overfitting*) στη διαθέσιμη πληροφορία.

Ο μεγαλύτερος όγκος της βιβλιογραφίας σχετικά με τη μάθηση μπεϋζιανών δικτύων πραγματεύεται την επιλογή μοντέλου. Σε αυτή τη μεθοδολογία, γίνεται χρήση κάποιου *κριτηρίου* για τη μέτρηση του κατά πόσον μια δεδομένη δομή ταιριάζει με την εκ-των-προτέρων γνώση και τα δεδομένα. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται ένας *αλγόριθμος αναζήτησης* για την εύρεση μιας κλάσης δομών που λαμβάνουν υψηλή βαθμολογία με βάση αυτό το κριτήριο.

4.4.3.2. Κριτήρια και εκ-των-προτέρων πιθανότητες

Ένα συχνά χρησιμοποιούμενο κριτήριο είναι αυτό της σχετικής εκ-των-υστέρων πιθανότητας (*relative posterior probability*):

$$\log P(D, S^h) = \log P(S^h) + \log P(D | S^h) \quad (26)$$

όπου ο λογάριθμος χρησιμοποιείται για αριθμητική ευκολία. Το κριτήριο αυτό είναι *καθολικό (global)* με την εξής έννοια: είναι εξίσου ευαίσθητο σε όλες τις πιθανές εξαρτήσεις μεταξύ των μεταβλητών. Ας θεωρήσουμε ένα πρόβλημα διάγνωσης μιας ασθένειας, δεδομένης της παρατήρησης ενός συνόλου συμπτωμάτων: σε ένα τέτοιο πρόβλημα, θα ήταν πιο λογικό να θεωρήσουμε ένα *τοπικό* κριτήριο, το οποίο θα αγνοεί τις εξαρτήσεις μεταξύ των συμπτωμάτων και θα είναι ευαίσθητο μόνο στις εξαρτήσεις ανάμεσα στην ασθένεια και τα συμπτώματα.

Η σχέση (26) περιλαμβάνει έναν όρο που αντιστοιχεί στην εκ-των-προτέρων πιθανότητα της υπό εξέταση δομής S^h ($\log P(S^h)$), και έναν όρο που αντιστοιχεί στην πιθανότητα καλής εφαρμογής των παρατηρήσεων D στην υπό εξέταση δομή S^h ($\log P(D | S^h)$). Ο τελευταίος όρος μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια μεθόδων Monte-Carlo ([38],[39]). Σε ό,τι αφορά τον πρώτο όρο, η πιο απλή προσέγγιση συνίσταται στη θεώρηση όλων των δυνατών δομών ως ισοπίθανων. Αυτή όμως η παραδοχή είναι στην πραγματικότητα ανακριβής, και χρησιμοποιείται μόνο χάριν ευκολίας. Μπορούμε να κάνουμε μια απλή βελτίωση αυτής της προσέγγισης ζητώντας από το χρήστη να αποκλείσει κάποιες από τις δυνατές υποθέσεις (πιθανόν

βασιζόμενος σε κρίσεις αιτίας και αποτελέσματος) και στη συνέχεια να θεωρήσουμε τις εναπομείνουσες δομές ισοπίθανες. Στην παραπομπή [36] προτείνεται η χρήση ενός εκ-των-προτέρων γνωστού δικτύου, και η βασική ιδέα είναι η εφαρμογή κάποιας ποινής (*penalty*) στην εκ-των-προτέρων πιθανότητα οποιασδήποτε δομής η οποία αποκλίνει σημαντικά από το γνωστό δίκτυο. Στην παραπομπή [40] παρουσιάζεται μια διαφορετική προσέγγιση στην οποία γίνεται χρήση πλασματικής (*imaginary*) πληροφορίας που παρέχεται από έναν εμπειρογνώμονα, ενώ στη συνέχεια, ένα πρόγραμμα υπολογιστή υποβοηθά τον χρήστη στη δημιουργία ενός υποθετικού συνόλου πλήρους πληροφορίας.

4.4.3.3. Μέθοδοι αναζήτησης

Ας θεωρήσουμε το πρόβλημα εύρεσης του βέλτιστου δικτύου, μεταξύ του συνόλου των δικτύων των οποίων κάθε κόμβος έχει το πολύ k γονείς. Το πρόβλημα αυτό για $k > 1$ είναι πολυπλοκότητας NP-hard, ακόμη και αν χρησιμοποιήσουμε ιδιαίτερα περιοριστικές εκ-των-προτέρων πιθανότητες για τις πιθανές δομές ([41]). Εξαιτίας αυτής της δυσκολίας η έρευνα έχει στραφεί προς ευριστικούς αλγορίθμους αναζήτησης, όπως είναι η άπληστη αναζήτηση (*greedy search*), η αναζήτηση τύπου *best-first* ([42]), και οι μέθοδοι Monte-Carlo.

Αυτές οι ευριστικές μέθοδοι μπορούν να γίνουν πολύ πιο αποδοτικές όταν χρησιμοποιείται ένα διαχωρίσιμο (*separable*) κριτήριο επιλογής μοντέλου. Δεδομένης μιας δικτυακής δομής για ένα σύνολο μεταβλητών (X_1, X_2, \dots, X_n) , ένα κριτήριο ονομάζεται διαχωρίσιμο όταν μπορεί να γραφεί σαν γινόμενο ξεχωριστών κριτηρίων για κάθε μεταβλητή:

$$C(S^h, D) = \prod_i c(X_i, Parents(X_i), D_i)$$

όπου D_i είναι το σύνολο των παρατηρήσεων που αφορούν μόνο τις μεταβλητές X_i και $Parents(X_i)$.

Οι περισσότερες από τις συχνά χρησιμοποιούμενες μεθόδους αναζήτησης μπεϋζιανών δικτύων κάνουν διαδοχικές αλλαγές στις ακμές του δικτύου, και χρησιμοποιούν την ιδιότητα της διαχωρισιμότητας για να αξιολογήσουν κάθε αλλαγή. Είναι εύκολο να αναγνωριστούν οι δυνατές αλλαγές που μπορούν να γίνουν: για κάθε ζευγάρι μεταβλητών, εάν υπάρχει ένα τόξο που να τις συνδέει, αυτό το τόξο μπορεί είτε να αντιστραφεί ή να αφαιρεθεί. Εάν δεν υπάρχει τόξο που να τις συνδέει, τότε μπορεί ένα να προστεθεί, προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Όλες αυτές οι αλλαγές

υπόκεινται στο βασικό περιορισμό σύμφωνα με τον οποίο το δίκτυο που προκύπτει δεν πρέπει να περιέχει κατευθυνόμενους κύκλους.

Ένα πρόβλημα που ενδέχεται να ανακύψει με οποιαδήποτε μέθοδο τοπικής αναζήτησης είναι ο εγκλωβισμός σε ένα τοπικό μέγιστο. Ένας τρόπος διαφυγής από τοπικό μέγιστο είναι η εφαρμογή της άπληστης αναζήτησης με τυχαίες επανεκκινήσεις. Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση, εφαρμόζεται η άπληστη αναζήτηση μέχρι την εύρεση ενός τοπικού μεγίστου, ενώ στη συνέχεια η δικτυακή δομή ‘διαταράσσεται’ κατά τυχαίο τρόπο και η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάποιο διαχειρίσιμο αριθμό επαναλήψεων.

4.4.4. Μάθηση μετα-δικτύων

Ειδικά για τη μάθηση των μπεϋζιανών μετα-δικτύων που συζητήθηκαν στις παραγράφους 4.1.2 και 4.3, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέθοδοι παρόμοιες με αυτές που συζητήθηκαν στα παραπάνω, για τη μάθηση των επί μέρους δικτύων σε κάθε επίπεδο του μετα-δικτύου. Σε αυτή την παράγραφο εξετάζουμε την κατάλληλη επέκταση κλασικών μεθόδων μάθησης για την περίπτωση των πολυ-επίπεδων πιθανολογικών μετα-δικτύων.

Ας θεωρήσουμε το εξής πρόβλημα εκμάθησης:

Δεδομένου του συνόλου D παραδειγμάτων εκμάθησης (*training set*) $\langle X_1, X_2, \dots, X_n, Y \rangle$, έστω ότι ο στόχος είναι η αποκατάσταση:

- του συνόλου των επιπέδων του μετα-δικτύου $\{l_1, l_2, \dots, l_L\}$, με κάθε επίπεδο να αποτελεί ένα μπεϋζιανό δίκτυο
- των συνδέσεων μεταξύ κάθε ζεύγους διαδοχικών επιπέδων $\{l_r, l_{r+1}\}$
- της δικτυακής δομής και των παραμέτρων σε κάθε επίπεδο, και συγκεκριμένα των πιθανοτήτων $P(v_i)$ και $P(v_i | Parents(v_i))$ για κάθε μεταβλητή v_i .

Η ακόλουθη διαδικασία μάθησης μπεϋζιανών μετα-δικτύων προτείνεται στην παραπομπή [44]. Αποτελείται από τέσσερα στάδια, τα τελευταία τρία εκ των οποίων επαναλαμβάνονται για κάθε επίπεδο του μετα-δικτύου.

- *Στάδιο 1: Κατανομή των μεταβλητών στα διαφορετικά επίπεδα.* Τα στοιχεία του διανύσματος εισόδου των μεταβλητών $\langle X_1, X_2, \dots, X_n \rangle$ ταξινομούνται σε προγνωστικά χαρακτηριστικά και σε χαρακτηριστικά πλαισίου χρήσης. Η ταξινόμηση αυτή (η οποία μπορεί να καθοδηγηθεί από διάφορων ειδών κριτήρια, βλ. [45],[46]) υπαγορεύει και τα επίπεδα του μετα-δικτύου που θα δημιουργηθεί.

- *Στάδιο 2: Μάθηση της δομής στο τρέχον επίπεδο.* Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με χρήση διαφόρων μεθόδων ([7],[43],[38]).
- *Στάδιο 3: Μάθηση των συνδέσεων μεταξύ του τρέχοντος επιπέδου και του επόμενου.* Αυτό το στάδιο έχει προστεθεί ειδικά για τη μάθηση των μετα-δικτύων, και περιγράφεται αναλυτικά στην παραπομπή [44], για μετα-δίκτυα τύπου C και R ξεχωριστά.
- *Στάδιο 4: Μάθηση των παραμέτρων στο τρέχον επίπεδο.* Αυτό επιτυγχάνεται λαμβάνοντας υπόψη τη συμπεριφορά των τιμών των παραμέτρων αυτών σε διαφορετικά πλαίσια χρήσης.

Εάν το επίπεδο πλαισίου χρήσης δεν είναι κενό, τότε τα στάδια 2 έως 4 επαναλαμβάνονται για το δίκτυο του επόμενου επιπέδου.

4.4.5. Συζήτηση

Οι μπεϋζιανές μέθοδοι μάθησης περιλαμβάνουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Κάθε παρατηρούμενο παράδειγμα εκμάθησης (*training example*) μπορεί να αυξήσει ή να μειώσει την πιθανότητα μια υπόθεση να είναι σωστή. Αυτή η δυνατότητα παρέχει μια πιο ευέλικτη προσέγγιση σε σχέση με αλγορίθμους οι οποίοι απορρίπτουν υποθέσεις οι οποίες βρίσκονται ασύμβατες με κάποιο παράδειγμα ([43]).
- Η εκ-των-προτέρων γνώση μπορεί να συνδυαστεί με παρατηρήσεις προκειμένου να καθοριστεί η τελική πιθανότητα μιας υπόθεσης. Αυτή η εκ-των-προτέρων γνώση παρέχεται καθορίζοντας:
 - μια εκ-των-προτέρων πιθανότητα για κάθε δυνατή δικτυακή δομή.
 - μια κατανομή πιθανότητας πάνω στις παρατηρήσεις, για κάθε υπόθεση.
- Οι μπεϋζιανές μέθοδοι είναι συμβατές με υποθέσεις οι οποίες κάνουν πιθανολογικές προβλέψεις.
- Καινούρια στιγμιότυπα μπορούν να ταξινομηθούν συνδυάζοντας τις προβλέψεις διαφόρων υποθέσεων, ανάλογα με την πιθανότητα επιβεβαίωσης της κάθε μιας.
- Ακόμη και σε περιπτώσεις όπου οι μπεϋζιανές μέθοδοι αποδεικνύονται υπολογιστικά απαγορευτικές, παρέχουν ένα μέτρο σύγκρισης για την επιλογή της κατά Bayes βέλτιστης λύσης, το οποίο χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση άλλων πρακτικών μεθόδων.

Μια πρακτική δυσκολία στην εφαρμογή των μπεϋζιανών μεθόδων αφορά το γεγονός ότι απαιτούν την εκ-των-προτέρων γνώση πολλών πιθανοτήτων. Μια

δεύτερη πρακτική δυσκολία αφορά το σημαντικό υπολογιστικό κόστος που απαιτείται για τον καθορισμό της κατά Bayes βέλτιστης υπόθεσης, στη γενική περίπτωση (γραμμική πολυπλοκότητα σε σχέση με τον αριθμό των υποψήφιων υποθέσεων). Τέλος, όπως συζητήθηκε αναλυτικά στα προηγούμενα, η επίλυση του προβλήματος της μάθησης της τοπολογίας / δομής ενός μπεϋζιανού δικτύου ανήκει στην κλάση πολυπλοκότητας NP-hard.

4.5. Εφαρμογή

Οι μέθοδοι και οι τεχνικές που παρουσιάστηκαν στο παρόν κεφάλαιο εφαρμόζονται στην επίλυση του προβλήματος *Μοντελοποίησης και Προσαρμογής στις Προτιμήσεις του Χρήστη (Modelling and Adaptation to User Preferences – MAUP)* που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 1. Πιο συγκεκριμένα, επιλέγεται η μοντελοποίηση των παραμέτρων του προφίλ του χρήστη μιας 4G υποδομής μέσω ενός μπεϋζιανού C-μετα-δικτύου, και στη συνέχεια επιχειρείται η εκμάθηση του δικτύου αυτού τόσο σε επίπεδο παραμέτρων όσο και σε επίπεδο δομής. Για την εκμάθηση του δικτύου χρησιμοποιούνται οι απαντήσεις του χρήστη σε ένα κατάλληλα διαμορφωμένο ‘ερωτηματολόγιο’, μέσω του οποίου ο χρήστης εκφράζει το κατά πόσον ικανοποιείται από διάφορες διαμορφώσεις (*configurations*) του προφίλ του, και των αναθέσεων υπηρεσιών σε επίπεδα ποιότητας και σε σημεία πρόσβασης που απορρέουν από τις διαμορφώσεις αυτές.

Η μοντελοποίηση του προφίλ / προτιμήσεων του χρήστη (για διαφόρων ειδών εφαρμογές) μέσω πιθανολογικών δικτύων αποτελεί μια αρκετά δημοφιλή ερευνητική τάση τα τελευταία χρόνια ([47],[48],[49]). Η δημοφιλία τέτοιων πιθανολογικών μοντέλων, σε σχέση με συστήματα κανόνων του τύπου ‘όταν $condition_i = true$ (π.χ. ο χρήστης βρεθεί στην κατάσταση y), τότε $result_i = x_i$ ’, οφείλεται στην επεκτασιμότητά τους και στην ικανότητα να συμπεριλαμβάνουν και να συνεκτιμούν πληροφορία πλαισίου χρήσης, η εκμετάλλευσή της οποίας αποτελεί μια από τις βασικές προκλήσεις των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων πέραν της τρίτης γενιάς.

Παραπομπές

- [1] J. Pearl, *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems*, Morgan-Kaufmann, 1988.
- [2] Γ. Κοκολάκης, Ι. Σπηλιώτης, *Εισαγωγή στη Θεωρία Πιθανοτήτων και Στατιστική*, Εκδόσεις Συμεών, 1999.
- [3] M. Spiegel, *Probability and Statistics*, McGraw-Hill, 1975.
- [4] F. Jensen, *An introduction to Bayesian Networks*, UCL Press, 1996.
- [5] G. Cooper, “Computational complexity of probabilistic inference using Bayesian belief networks”, *Artificial Intelligence*, vol. 42, pp. 393-405, 1990.
- [6] P. Dagum, M. Luby, “Approximating probabilistic inference in Bayesian belief networks is NP-hard”, *Artificial Intelligence*, vol. 60, pp. 141-153.
- [7] D. Heckerman, “A Tutorial on Learning with Bayesian Networks”, *Technical Report MSR-TR-95-06*, Microsoft Research, 1996.
- [8] D. Heckerman, “A tractable algorithm for diagnosing multiple diseases”, *Proceedings of 5th Workshop on Uncertainty in Artificial Intelligence*, Association for Uncertainty in Artificial Intelligence, 1989.
- [9] H. Suermondt, G. Cooper, “A combination of exact algorithms for inference on Bayesian belief networks”, *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. 5, pp. 521-542, 1991.
- [10] L. Saul, T. Jaakkola, M. Jordan, “Mean field theory for sigmoid belief networks”, *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 4, pp. 61-76, 1996.
- [11] T. Jaakkola, M. Jordan, “Computing upper and lower bounds on likelihoods in intractable networks”, *Proceedings of 12th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, Morgan Kaufmann, 1996.
- [12] K. Ramamurthi, A. Agogino, “Real time expert system for fault tolerant supervisory control”, in V. Tipnis, E. Patton (editors), *Computers in Engineering*, pp. 333-339, American Society of Mechanical Engineers, 1988.
- [13] R. Shachter, S. Andersen, K. Poh, “Directed reduction algorithms and decomposable graphs”, *Proceedings of 6th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, Association for Uncertainty in Artificial Intelligence, 1990.

- [14] F. Jensen, S. Lauritzen, K. Olesen, “Bayesian updating in recursive graphical models by local computations”, *Computational Statistics Quarterly*, vol. 4, pp. 269-282, 1990.
- [15] A. Darwiche, G. Provan, “Query DAGs: a practical paradigm for implementing belief-network inference”, *Proceedings of 12th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, Morgan Kaufmann, 1996.
- [16] W. Wiegerinck, T. Heskes, “Belief networks / Bayesian networks”, in J. Meij (editor), *Dealing with the data flood: Mining data, text and multimedia*, pp. 660-665, STT/Beweton, 2002.
- [17] V. Terziyan, “A Bayesian Metanetwork”, *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, vol. 14, 2004.
- [18] C. J. Butz, “Exploiting Contextual Independencies in Web Search and User Profiling”, *Proceedings of the IEEE World Congress on Computational Intelligence*, 2002.
- [19] C. Boutilier, N. Friedman, M. Goldszmidt and D. Koller, “Context-Specific Independence in Bayesian Networks”, *Proceedings of the 12th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, Morgan Kaufmann, 1996.
- [20] N. L. Zhang, “Inference in Bayesian Networks: The Role of Context-Specific Independence”, *International Journal of Information Technology and Decision Making*, 2002.
- [21] D. Geiger and D. Heckerman, “Knowledge Representation and Inference in Similarity Networks and Bayesian Multinets”, *Artificial Intelligence*, vol. 82, Elsevier, 1996.
- [22] V. Terziyan and O. Vitko, “Bayesian Metanetworks for Modelling User Preferences in Mobile Environment”, *Advances in Artificial Intelligence, Lecture Notes in Artificial Intelligence*, vol. 2812, Springer, 2003.
- [23] V. Terziyan and S. Puuronen, “Reasoning with Multilevel Contexts in Semantic Metanetworks”, in P. Bonzon, M. Cavalcanti, R. Nossum (editors), *Formal Aspects in Context*, Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [24] W. Buntine, “A guide to the literature on learning probabilistic networks from data”, *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 8, no. 2, pp.195-210, April 1996.
- [25] D. MacKay, “Bayesian interpolation”, *Neural Computation*, vol. 4, no. 3, pp. 415-447, MIT Press, 1992.

- [26] S. Haykin, *Neural networks, a comprehensive foundation*, Prentice Hall, 1998.
- [27] D. Specht, “Probabilistic neural networks”, *Neural Networks*, vol. 3, pp. 109-118, Elsevier, 1990.
- [28] C. M. Bishop, *Neural networks for pattern recognition*, Clarendon Press, 1998.
- [29] G. D. Garson, *Neural networks, an introductory guide for social scientists*, SAGE Publications, 1998.
- [30] J. Friedman, “Introduction to computational learning and statistical prediction”, *Technical Report*, Department of Statistics, Stanford University, 1995.
- [31] D. Heckerman, D. Geiger, “Likelihoods and priors for Bayesian networks”, *Technical Report MSR-TR-95-54*, Microsoft Research, 1996.
- [32] D. MacKay, “A practical Bayesian framework for backpropagation networks”, *Neural Computation*, vol. 4, pp. 448-472, 1992.
- [33] R. Neal, “Probabilistic inference using Markov chain Monte Carlo methods”, *Technical Report CRG-TR-93-1*, Department of Computer Science, University of Toronto, 1993.
- [34] G. Cooper, E. Herskovits, “A Bayesian method for the induction of probabilistic networks from data”, *Machine Learning*, vol. 9, pp. 309-347, 1992.
- [35] C. Aliferis, G. Cooper, “An evaluation of an algorithm for inductive learning of Bayesian belief networks using simulated data sets”, *Proceedings of 10th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, Seattle, USA, 1994.
- [36] D. Heckerman, A. Mandani, M. Wellman, “Real-world applications of Bayesian networks”, *Communications of the ACM*, vol. 38, no. 3, pp. 24-30, 1995.
- [37] S. Chib, “Marginal likelihood from the Gibbs output”, *Journal of the American Statistical Association*, vol. 90, pp. 1313-1321.
- [38] D. Madigan, A. Raftery, C. Volinsky and J. Hoeting, “Bayesian Model Averaging”, *Proceedings of the AAAI Workshop on Integrating Multiple Learned Models*, AAAI Press, 1996.
- [39] A. Raftery, “*Hypothesis testing and model selection*”, Chapman and Hall, 1996.
- [40] D. Madigan, J. Garvin, A. Raftery, “Eliciting prior information to enhance the predictive performance of Bayesian graphical models”, *Communications in Statistics: Theory and Methods*, vol. 24, pp. 2271-2292, 1995.
- [41] D. Chickering, D. Geiger, D. Heckerman, “Learning Bayesian networks: search methods and experimental results”, *Proceedings of 5th Conference on Artificial Intelligence and Statistics*, Society for Artificial Intelligence in Statistics, 1995.

- [42] R. Korf, “Linear-space best-first search”, *Artificial Intelligence*, vol. 62, pp. 41-78, 1993.
- [43] T. M. Mitchell, *Machine Learning*, McGraw-Hill, 1997
- [44] V. Terziyan and O. Vitko, “Learning Bayesian Metanetworks from data with Multilevel Uncertainty”, *Proceedings of the 1st IFIP International Conference on Artificial Intelligence and Innovations*, Kluwer, 2004.
- [45] P. Turney, “The identification of context-sensitive features: a formal definition of context for concept learning”, *Proceedings of the Workshop on Learning in Context-Sensitive Domains at the 13th International Conference on Machine Learning (ICML-96)*, 1996.
- [46] G. Widmer, “Tracking Context Changes Through Meta-Learning”, *Machine Learning*, vol. 27, 1997.
- [47] S. N. Schiaffino and A. Amandi, “User Profiling with Case Based Reasoning and Bayesian Networks”, in *Open Discussion Proceedings IBERAMIA-SBIA 2000*, Atibaia, Brazil, 2000.
- [48] S. K. M. Wong and C. J. Butz, “A Bayesian Approach to User Profiling in Information Retrieval”, *Technology Letters*, vol. 4, 2000.
- [49] M. Pazzani and D. Billsus, “Learning and Revising User Profiles: The Identification of Interesting Web Sites”, *Machine Learning*, vol. 27, 1997.

Κεφάλαιο 5

Μοντελοποίηση και Προσαρμογή στις Προτιμήσεις του Χρήστη

5.1. Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάστηκε η αρχιτεκτονική και η γενική λειτουργία ενός καινοτόμου *Συστήματος Διαχείρισης Κινητού Τερματικού (Mobile Terminal Management System – MTMS)* για συσκευές που λειτουργούν σε σύνθετα δικτυακά περιβάλλοντα τέταρτης γενιάς. Μια από τις βασικές απαιτήσεις που αφορούν τη λειτουργία του MTMS, όπως παρουσιάστηκε, είναι η ικανότητα αξιοποίησης ενός συνόλου πληροφοριών που χαρακτηρίζουν το εκάστοτε πλαίσιο χρήσης (*context*) με σκοπό τον προσδιορισμό των παραμέτρων του προφίλ του χρήστη. Οι παράμετροι αυτές του προφίλ του χρήστη χρησιμοποιούνται εν συνεχεία σαν είσοδος στο πρόβλημα διαμόρφωσης υπηρεσιών που επιλύει ο αλγόριθμος *Ευφυούς Επιλογής Πρόσβασης*, ο οποίος περιγράφηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.

Μπορούμε να διακρίνουμε δύο κύριες λειτουργίες οι οποίες απαιτούνται για την αξιοποίηση πληροφορίας πλαισίου χρήσης για τη διαχείριση κινητικότητας τερματικών σε περιβάλλοντα 4^{ης} γενιάς:

- Επεξεργασία και ‘αποκωδικοποίηση’ των πληροφοριών πλαισίου χρήσης (θέση του χρήστη, ώρα και ημέρα, τύπος εφαρμογής που χρησιμοποιείται κ.λπ.) με σκοπό τον καθορισμό του πλαισίου χρήσης.
- Αξιοποίηση της γνώσης του πλαισίου χρήσης για τη χρήση των αντίστοιχων προτιμήσεων του χρήστη στη διαδικασία επιλογής δικτύου / σημείου πρόσβασης.

Αυτές οι δύο λειτουργίες συνιστούν τις δύο πτυχές του προβλήματος *Μοντελοποίησης και Προσαρμογής στις Προτιμήσεις του Χρήστη (Modelling and Adaptation to User Preferences – MAUP)*. Η επίλυση του προβλήματος MAUP δίνει τη δυνατότητα στο κινητό τερματικό να οδηγείται κάθε στιγμή στις αναθέσεις εκείνες των υπηρεσιών σε δίκτυα και σε επίπεδα ποιότητας που ικανοποιούν τις προτιμήσεις του χρήστη με ορισμένη προτεραιότητα, ανάλογα με το πλαίσιο χρήσης. Στο παρόν κεφάλαιο δίνεται η αναλυτική περιγραφή του προβλήματος αυτού, η μαθηματική του διατύπωση καθώς και η επίλυση που επιχειρείται στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής.

Η επίλυση του προβλήματος MAUP συνίσταται στον προσδιορισμό κατάλληλων (ανάλογων του πλαισίου χρήσης) τιμών για διαφορετικούς συντελεστές w_q , w_o , w_i και w_c , οι οποίοι αντιστοιχούν στις παραμέτρους ‘ποιότητα’, προτιμώμενος ‘πάροχος δικτύου’, προτιμώμενος ‘τύπος τεχνολογίας’ και ‘κόστος’ αντίστοιχα. Οι συντελεστές αυτοί αναπαριστούν ένα μέτρο του βάρους που τους αποδίδεται στην αντικειμενική

συνάρτηση την οποία μεγιστοποιεί ο αλγόριθμος εύρεσης του βέλτιστου σημείου πρόσβασης. Στην παρούσα διατριβή προτείνεται η κατασκευή ενός πιθανολογικού μοντέλου, και συγκεκριμένα ενός μπεϋζιανού μετα-δικτύου 2 επιπέδων, στο οποίο οι διάφορες παράμετροι που προσδιορίζουν το πλαίσιο χρήσης (τόπος – *location*, χρόνος – *time*, τύπος περιεχομένου στο οποίο ζητείται από το χρήστη πρόσβαση – *content*, συμβαλλόμενος συνόδου επικοινωνίας – *communicating counterpart*, κ.λπ.) καθώς και οι προαναφερθείσες παράμετροι w_i αναπαρίστανται σαν τυχαίες μεταβλητές μιας τοπολογίας (αρχικά) άγνωστης δομής και παραμέτρων. Στόχος είναι η *μάθηση* της δομής και των παραμέτρων αυτής της τοπολογίας, κάνοντας χρήση ενός συνόλου παραδειγμάτων εκπαίδευσης (*training set*) το οποίο παρέχει ο χρήστης στο σύστημα, και μέσω του οποίου δηλώνει τις προτεραιότητές του σε κάποιες περιστάσεις. Σε ένα υψηλότερο εννοιολογικό επίπεδο, επιχειρείται εξόρυξη γνώσης σχετικά με τις προτιμήσεις του χρήστη σε *οποιοδήποτε* πλαίσιο χρήσης, δεδομένων των προτιμήσεών του σε κάποια *στιγμιότυπα* πλαισίου χρήσης.

Η εργασία που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο αυτό σχετίζεται άμεσα με διάφορες ευρείες περιοχές έρευνας, όπως: α) τη μοντελοποίηση παραμέτρων του κινητού περιβάλλοντος και των παραμέτρων του προφίλ του χρήστη, καθώς και, σε ένα ευρύτερο πλαίσιο, τη διατύπωση κατάλληλων μεθόδων για τη συμπερίληψη πληροφορίας σχετικής με το περιβάλλον / πλαίσιο χρήσης στη διαδικασία διαμόρφωσης υπηρεσιών στο κινητό τερματικό ([1],[2],[3],[4],[5]). β) τη μάθηση της δομής (αιτιακών σχέσεων) και των παραμέτρων (κατανομών δεσμευμένων πιθανοτήτων) μπεϋζιανών δικτύων με χρήση εκ-των-προτέρων (*prior*) γνώσης και συνόλων δειγμάτων ([6],[7],[8],[9],[10],[11]).

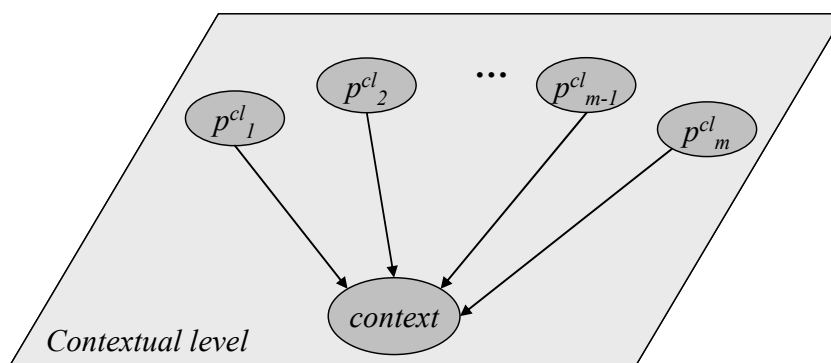
Η προσέγγιση του παρόντος κεφαλαίου για την εξέταση του προβλήματος MAUP είναι η ακόλουθη: Στην παράγραφο 5.2 δίνεται η γενική και η συμβολική περιγραφή του προβλήματος. Στην παράγραφο 5.3 δίνεται η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος. Η παράγραφος 5.4 μελετά τις προτεινόμενες μεθόδους επίλυσης, και τέλος, οι παράγραφοι 5.5 και 5.6 περιλαμβάνουν αποτελέσματα και κάποιες τελικές παρατηρήσεις αντίστοιχα.

5.2. Περιγραφή προβλήματος

5.2.1. Γενική περιγραφή

5.2.1.1. Δομή

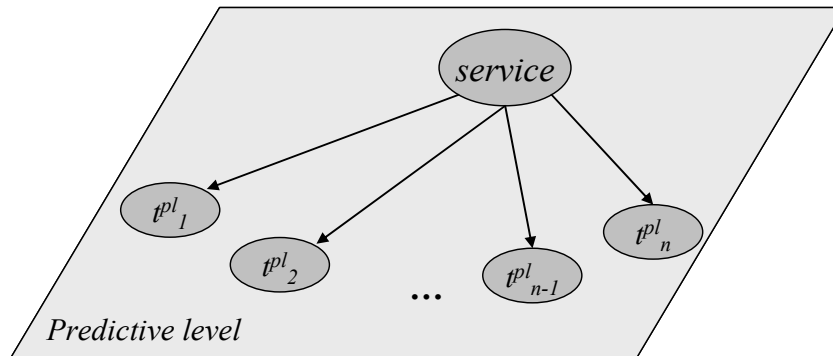
Ακολουθώντας τη θεωρία και το συμβολισμό των μπεϋζιανών δικτύων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4, μοντελοποιούμε το ‘χώρο’ του περιβάλλοντος / πλαισίου χρήσης ως ένα μπεϋζιανό δίκτυο, με κόμβους για το πλαίσιο χρήσης (*context*) και για κάθε παράμετρο που το χαρακτηρίζει (χρόνος, θέση, κ.λπ.) (Σχήμα 5-1). Κάθε κόμβος του δικτύου αναπαριστά μια τυχαία μεταβλητή. Η τυχαία μεταβλητή που αντιστοιχεί στο πλαίσιο χρήσης (*C*) αποτελεί ένα *χαρακτηριστικό στόχο* (*target attribute*), κι αυτό διότι πρόκειται για μια άγνωστη ποσότητα της οποίας την κατανομή πιθανότητας θέλουμε να εκτιμήσουμε. Οι υπόλοιπες τυχαίες μεταβλητές του δικτύου (p_i^{cl}) αποτελούν *προγνωστικά χαρακτηριστικά* (*predictive attributes*), κι αυτό διότι πρόκειται για κόμβους των οποίων οι παρατηρούμενες τιμές επηρεάζουν την κατανομή πιθανότητας της μεταβλητής *C*. Έτσι, το σύνολο των μεταβλητών p_i^{cl} και η μεταβλητή *C* συνδέονται με μια σχέση αιτίου – αποτελέσματος, ενώ οι μεταβλητές p_i^{cl} είναι μεταξύ τους ανεξάρτητες. Ας σημειωθεί ότι οι παρατηρούμενες αυτές τιμές των προγνωστικών χαρακτηριστικών p_i^{cl} μπορούν να προκύψουν από τις καταγραφές κατάλληλων αισθητήρων.



Σχήμα 5-1. Μπεϋζιανό δίκτυο επιπέδου πλαισίου χρήσης (*contextual level*)

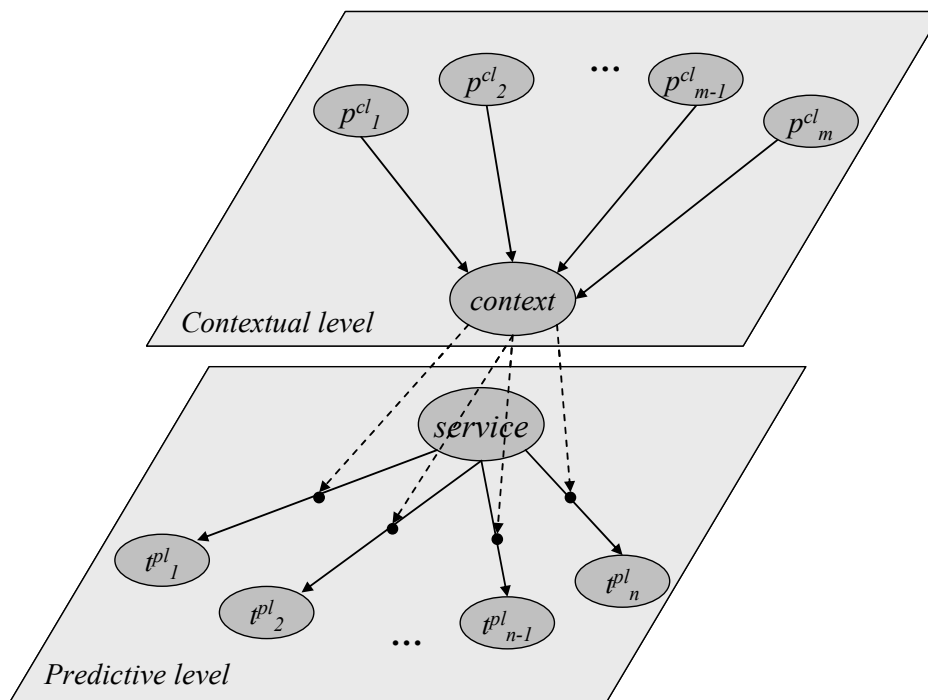
Κατά παρόμοιο τρόπο, ο ‘χώρος’ του προφίλ του χρήστη μοντελοποιείται ως ένα μπεϋζιανό δίκτυο με κόμβους για την υπηρεσία (*service*) και για κάθε παράμετρο του προφίλ (Σχήμα 5-2). Και εδώ, κάθε κόμβος του δικτύου αναπαριστά μια τυχαία μεταβλητή. Οι τυχαίες μεταβλητές t_i^{pl} αποτελούν *χαρακτηριστικά στόχους*, καθώς πρόκειται για άγνωστες ποσότητες των οποίων τις κατανομές πιθανότητας θέλουμε

να εκτιμήσουμε. Η τυχαία μεταβλητή που αντιστοιχεί στην υπηρεσία (S) αποτελεί ένα προγνωστικό χαρακτηριστικό, καθώς πρόκειται για έναν κόμβο του οποίου η παρατηρούμενη τιμή επηρεάζει τις κατανομές πιθανότητας των μεταβλητών t_i^{pl} . Και εδώ λοιπόν, η μεταβλητή S και το σύνολο των μεταβλητών t_i^{pl} συνδέονται με μια σχέση αιτίου – αποτελέσματος, ενώ οι μεταβλητές t_i^{pl} είναι μεταξύ τους ανεξάρτητες, δεδομένης της τιμής της S .



Σχήμα 5-2. Μπεϋζιανό δίκτυο προγνωστικού επιπέδου (predictive level)

Όπως έχει συζητηθεί αναλυτικά στα προηγούμενα, το προφίλ και οι προτιμήσεις του χρήστη (μεταβλητές t_i^{pl}) ενδέχεται να αποτελούν συναρτήσεις του εκάστοτε πλαισίου χρήσης C . Σαν παράδειγμα αναφέρουμε τις διαφορετικές προτεραιότητες που ενδέχεται να έχει η ποιότητα υπηρεσίας έναντι του κόστους σε ένα πλαίσιο χρήσης που χαρακτηρίζεται ως επαγγελματικό (*business context*) και σε ένα πλαίσιο χρήσης ελεύθερου χρόνου (*leisure context*). Έτσι, λοιπόν, το συνολικό μοντέλο που περιγράφει τη συμπεριφορά των παραμέτρων t_i^{pl} του προφίλ του χρήστη, με επίγνωση του μεταβαλλόμενου περιβάλλοντος που περιγράφεται από τη C , δίνεται από την υπέρθεση των δύο δικτύων των Σχημάτων 5-1 και 5-2, σε ένα μετα-δίκτυο 2 επιπέδων που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-3 ([2]).



Σχήμα 5-3. Μπεϋζιανό μετα-δίκτυο 2 επιπέδων

Σύμφωνα με αυτή την αναπαράσταση, οι μεταβλητές στο επίπεδο πλαισίου χρήσης του Σχήματος 5-3 επηρεάζουν τις δεσμευμένες πιθανότητες που χαρακτηρίζουν τις εξαρτήσεις μεταξύ των μεταβλητών του προγνωστικού επιπέδου. Αποτέλεσμα αυτής της υπέρθεσης είναι να χαρακτηρίζονται πλέον όλες οι μεταβλητές του επιπέδου πλαισίου χρήσης, C και p_i^{cl} , ως *χαρακτηριστικά πλαισίου χρήσης (contextual attributes)*, καθώς επηρεάζουν τις τιμές των χαρακτηριστικών στόχων t_i^{pl} χωρίς να έχουν κάποια άμεση (‘ορατή’) επίδραση πάνω τους, παρά επηρεάζοντας τις κατανομές πιθανότητας μέσα στο ίδιο το δίκτυο του προγνωστικού επιπέδου.

5.2.1.2. Συλλογιστική

Σε κάθε ένα από τα επίπεδα του σύνθετου δικτύου του Σχήματος 5-3 εφαρμόζεται κλασικός μπεϋζιανός συμπερασμός, λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις ανεξαρτησίας μεταξύ των μεταβλητών.

Έστω ότι θεωρούμε το εξής υποσύνολο των μεταβλητών p_i^{cl} στο επίπεδο πλαισίου χρήσης: τη θέση του χρήστη (L), την ώρα της ημέρας (T), και τον συμβαλλόμενο της συνόδου επικοινωνίας του χρήστη (CP). Η κατανομή πιθανότητας της τυχαίας μεταβλητής C προκύπτει από έναν πίνακα δεσμευμένης πιθανότητας (*conditional probability table – CPT*), στον οποίο αναγράφεται η πιθανότητα η μεταβλητή C να

λάβει κάποια από τις δυνατές τιμές της για κάθε δυνατό συνδυασμό των μεταβλητών - γονέων της, L , T και CP . Ο στόχος είναι ο προσδιορισμός της μέγιστης τιμής της δεσμευμένης πιθανότητας $P(C|T, L, CP)$, με δεδομένες τις τιμές των L , T και CP , με απλή επισκόπηση του σχετικού CPT, και συνεπώς της πιθανότερης τιμής της μεταβλητής C .

Έστω ότι θεωρούμε το εξής υποσύνολο των μεταβλητών t_i^{pl} στο προγνωστικό επίπεδο του Σχήματος 5-3: τους συντελεστές w_q , w_o , w_t και w_c , που αντιστοιχούν στις παραμέτρους ‘ποιότητα’, προτιμώμενος ‘πάροχος δικτύου’, προτιμώμενος ‘τύπος τεχνολογίας’ και ‘κόστος’ αντίστοιχα. Οι κατανομές πιθανότητας των τυχαίων μεταβλητών w_q , w_o , w_t και w_c προκύπτουν και εδώ από CPTs, στους οποίους αναγράφονται οι πιθανότητες οι μεταβλητές αυτές να λάβουν οποιαδήποτε από τις δυνατές τιμές τους για κάθε δυνατό συνδυασμό μεταξύ της μεταβλητής-γονέα τους S και της C . Αυτοί οι επί μέρους CPTs για κάθε $P(w_i|S)_C$, χρησιμοποιούνται αξιοποιώντας τις σχέσεις ανεξαρτησίας μεταξύ των w_q , w_o , w_t και w_c με σκοπό τον προσδιορισμό της μέγιστης τιμής της από κοινού πιθανότητας $P(w_q, w_c, w_t, w_o | S)$ και συνεπώς των πιθανότερων τιμών των μεταβλητών w_i .

5.2.1.3. Μάθηση

Στο Κεφάλαιο 4 συζητήθηκε αναλυτικά το πρόβλημα της μάθησης μπεϋζιανών δικτύων, το οποίο αφορά τη βελτίωση της δομής και των κατανομών πιθανότητας που έχουν αρχικά θεωρηθεί για την κατασκευή ενός μοντέλου, δεδομένων καινούριων παρατηρήσεων. Στα εξής και αναφερόμενοι στη μάθηση του προτεινόμενου μοντέλου του Σχήματος 5-3, θα εννοούμε την προσαρμογή των παραμέτρων και της δομής του γράφου του προγνωστικού επιπέδου, δηλαδή των εξαρτήσεων / διασυνδέσεων των παραμέτρων του προφίλ του χρήστη t_i^{pl} σε σχέση με την υπηρεσία S .

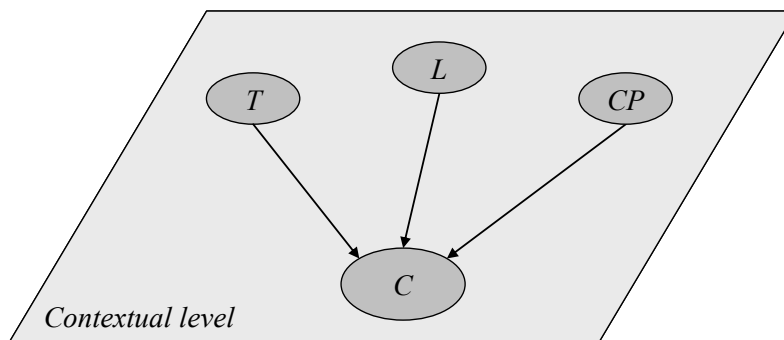
Σε κάθε διαδικασία εκπαίδευσης ενός δικτύου είναι απαραίτητη η χρήση ενός συνόλου παρατηρήσεων / παραδειγμάτων, το οποίο στο εξής θα ονομάζουμε D . Στην

προσέγγιση που παρουσιάζεται στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, διαμορφώνεται ένα κατάλληλο σύνολο εκπαίδευσης ως εξής: δίνεται στο χρήστη ένα ορισμένο πλήθος (υποσύνολο όλων των δυνατών συνδυασμών) διαφορετικών διαμορφώσεων των παραμέτρων του προφίλ του t_i^{pl} για διαφορετικούς συνδυασμούς των S και C , τις οποίες καλείται να απαντήσει εάν αποδέχεται ή όχι ως αποδεκτές λύσεις / προσεγγίσεις των πραγματικών του προτιμήσεων. Οι απαντήσεις του χρήστη σε αυτό το ‘ερωτηματολόγιο’ (του οποίου η κατάσταση αναλύεται περαιτέρω στις επόμενες παραγράφους) ορίζουν τις περιοχές αποδοχής και απόρριψης ορισμένων συνδυασμών των t_i^{pl} , δεδομένων των S και C , και χρησιμοποιούνται για την κατάλληλη διαμόρφωση των CPTs που χαρακτηρίζουν το προγνωστικό επίπεδο του Σχήματος 5-3. Σε ένα επόμενο βήμα, όπου θεωρούμε την ίδια τη δομή του γράφου του προγνωστικού επιπέδου άγνωστη και ζητούμενη, οι ίδιες απαντήσεις χρησιμοποιούνται για την εξόρυξη γνώσης σχετικά με τις αιτιακές σχέσεις που διέπουν τις μεταβλητές t_i^{pl} και S .

5.2.2. Συμβολική περιγραφή

5.2.2.1. Προσδιορισμός πλαισίου χρήσης

Έστω η απλοποιημένη δομή του γράφου στο επίπεδο πλαισίου χρήσης που εικονίζεται στο Σχήμα 5-4, σύμφωνα με όσα συζητήθηκαν στην παράγραφο 5.2.1.2.



Σχήμα 5-4. Απλοποιημένο μπεϋζιανό δίκτυο επιπέδου πλαισίου χρήσης (contextual level)

Έστω επίσης γνωστές τιμές των μεταβλητών T , L και CP , τις οποίες συμβολίζουμε με l , t και cp . Επιδιώκουμε τον προσδιορισμό της τιμής εκείνης c της μεταβλητής C για την οποία μεγιστοποιείται η εξής πιθανότητα:

$$P(C = c | T = t, L = l, CP = cp)$$

Εάν υποθέσουμε ότι η μεταβλητή T παίρνει n_{time} διακριτές και αμοιβαίως αποκλειόμενες τιμές, η μεταβλητή L παίρνει n_{loc} και η μεταβλητή CP παίρνει n_{cp}

διακριτές τιμές, τότε απαιτείται ένας 4-διάστατος πίνακας, όπου για κάθε τιμή της μεταβλητής πλαισίου χρήσης C θα δίνεται η τιμή της προαναφερθείσας δεσμευμένης πιθανότητας, δεδομένου καθενός από τους $n_{time} \cdot n_{loc} \cdot n_{cp}$ δυνατούς συνδυασμούς των άλλων μεταβλητών. Ο Πίνακας 5-1 αποτελεί ένα παράδειγμα ενός τέτοιου CPT, για τον οποίο ισχύουν:

$$T = \{morning, noon, afternoon, evening\} = \{t_1, t_2, t_3, t_4\}, n_{time} = 3$$

$$L = \{home, en route, work\} = \{l_1, l_2, l_3\}, n_{loc} = 3$$

$$CP = \{family, business, friends\} = \{cp_1, cp_2, cp_3\}, n_{cp} = 3$$

$$C = \{leisure, business\} = \{c_1, c_2\}, n_c = 2$$

Πίνακας 5-1. Πίνακας δεσμευμένης πιθανότητας $P(C|T, L, CP)$

	$L = l_1$							
	$CP = cp_1$				$CP = cp_2$			
	$T = t_1$	$T = t_2$	$T = t_3$	$T = t_4$	$T = t_1$	$T = t_2$	$T = t_3$	$T = t_4$
$C = c_1$	0,8	0,8	0,9	0,9	0,05	0,05	0,1	0,1
$C = c_2$	0,2	0,2	0,1	0,1	0,95	0,95	0,9	0,9

Για παράδειγμα, για $L = l_1 = home$, $CP = cp_2 = business$ και $T = t_4 = evening$, η μεταβλητή C παίρνει την τιμή $c_1 = leisure$ με πιθανότητα 0,1 και την τιμή $c_2 = business$ με πιθανότητα 0,9. Στην υλοποίηση που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, ο πίνακας της δεσμευμένης πιθανότητας $P(C = c | T = t, L = l, CP = cp)$ αναπαραστάθηκε μέσω ενός κατάλληλα διαμορφωμένου αρχείου XML (Εικόνα 5-1).

```

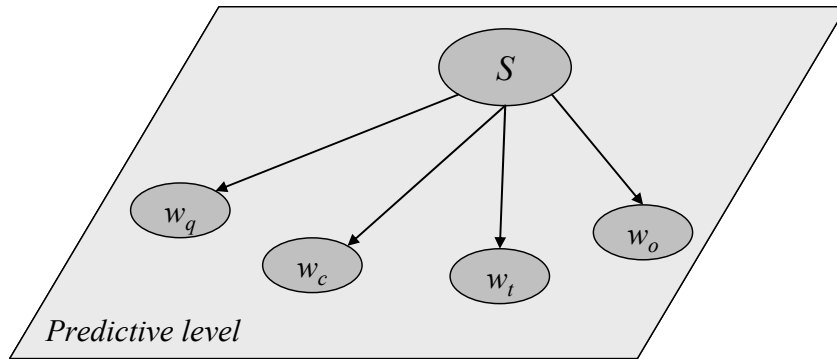
<?xml version="1.0" ?>
- <contextCPT>
- <location type="home">
- <counterpart type="family">
- <time type="morning">
  <context type="leisure">0.8</context>
  <context type="business">0.2</context>
</time>
- <time type="noon">
  <context type="leisure">0.8</context>
  <context type="business">0.2</context>
</time>
- <time type="afternoon">
  <context type="leisure">0.9</context>
  <context type="business">0.1</context>
</time>
- <time type="evening">
  <context type="leisure">0.9</context>
  <context type="business">0.1</context>
</time>
</counterpart>

```

Εικόνα 5-1. Παράδειγμα XML αρχείου για τη δεσμευμένη πιθανότητα $P(C|T, L, CP)$

5.2.2.2. Προσδιορισμός παραμέτρων προφίλ

Έστω η απλοποιημένη δομή του γράφου στο επίπεδο πλαισίου χρήσης που εικονίζεται στο Σχήμα 5-2, σύμφωνα με όσα συζητήθηκαν στην παράγραφο 5.2.1.2.



Σχήμα 5-5. Απλοποιημένο μπεϋζιανό δίκτυο προγνωστικού επιπέδου (predictive level)

Έστω επίσης γνωστή τιμή s της μεταβλητής S και γνωστή τιμή c της μεταβλητής C στο επίπεδο πλαισίου χρήσης. Επιδιώκουμε τον προσδιορισμό των τιμών εκείνων των συντελεστών - μεταβλητών w_q , w_o , w_t και w_c , έστω a , b , c , d οι τιμές αυτές, για τις οποίες μεγιστοποιείται η εξής πιθανότητα:

$$P(w_q = a, w_c = b, w_t = c, w_o = d \mid S = s)$$

Ισχύει:

$$P(w_q, w_c, w_t, w_o \mid S) = \frac{P(w_q, w_c, w_t, w_o, S)}{P(S)}$$

και σύμφωνα με τις σχέσεις ανεξαρτησίας που κωδικοποιούνται μέσω της δομής του Σχήματος 5-3:

$$P(w_q, w_c, w_t, w_o, S) = P(S) \cdot P(w_o \mid S) \cdot P(w_t \mid S) \cdot P(w_c \mid S) \cdot P(w_q \mid S)$$

Έτσι προκύπτει:

$$P(w_q = a, w_c = b, w_t = c, w_o = d \mid S = s) = P(w_o = a \mid S = s) \cdot P(w_t = b \mid S = s) \cdot P(w_c = c \mid S = s) \cdot P(w_q = d \mid S = s)$$

και ο υπολογισμός της ζητούμενης πιθανότητας ανάγεται στο γινόμενο των επί μέρους δεσμευμένων πιθανοτήτων οι οποίες προκύπτουν από πίνακες της μορφής του Πίνακα 5-2, όπου με n_s συμβολίζεται το πλήθος των δυνατών και διακριτών τιμών της μεταβλητής S ,

Πίνακας 5-2. Πίνακας δεσμευμένης πιθανότητας $P(w_i | S)$

	$S = s_1$	...	$S = s_{n_s}$
$w_i = 1$	$P(w_i = 1 | S = s_1)$	...	$P(w_i = 1 | S = s_{n_s})$
$w_i = 2$	$P(w_i = 2 | S = s_1)$	...	$P(w_i = 2 | S = s_{n_s})$
$w_i = 3$	$P(w_i = 3 | S = s_1)$	...	$P(w_i = 3 | S = s_{n_s})$
$w_i = 4$	$P(w_i = 4 | S = s_1)$	...	$P(w_i = 4 | S = s_{n_s})$

για κάθε μια από τις μεταβλητές w_q , w_o , w_t , w_c και για κάθε δυνατή τιμή της μεταβλητής C .

Θεωρώντας μια γενικότερη περίπτωση, όπου οι μεταβλητές του προγνωστικού επιπέδου του Σχήματος 5-5 δεν είναι κατ' ανάγκη μεταξύ τους ανεξάρτητες, η ζητούμενη πιθανότητα υπολογίζεται και ως εξής:

$$\begin{aligned}
 P(w_q = a, w_c = b, w_t = c, w_o = d | S = s) &= \frac{P(w_q = a, w_c = b, w_t = c, w_o = d, S = s)}{P(S)} = \\
 &= \frac{P(w_q = a, w_c = b, w_t = c, w_o = d, S = s)}{\sum_{w_q, w_c, w_t, w_o} P(w_q, w_c, w_t, w_o, S = s)}
 \end{aligned}$$

όπου πλέον δεν γίνεται χρήση επί μέρους πινάκων δεσμευμένων πιθανοτήτων για κάθε w_i , αλλά χρησιμοποιείται ο πίνακας της από κοινού συνάρτησης κατανομής πιθανότητας $P(w_q, w_c, w_t, w_o, S)$, ο οποίος περιέχει τόσες εγγραφές όσες είναι οι μεταθέσεις των μεταβλητών w_i επί τον αριθμό των δυνατών τιμών της S , n_s . Με τη βοήθεια του πίνακα αυτού μπορούμε να υπολογίσουμε οποιαδήποτε πιθανότητα μας ενδιαφέρει, όπως παρουσιάστηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.

5.2.2.3. Μάθηση παραμέτρων μοντέλου

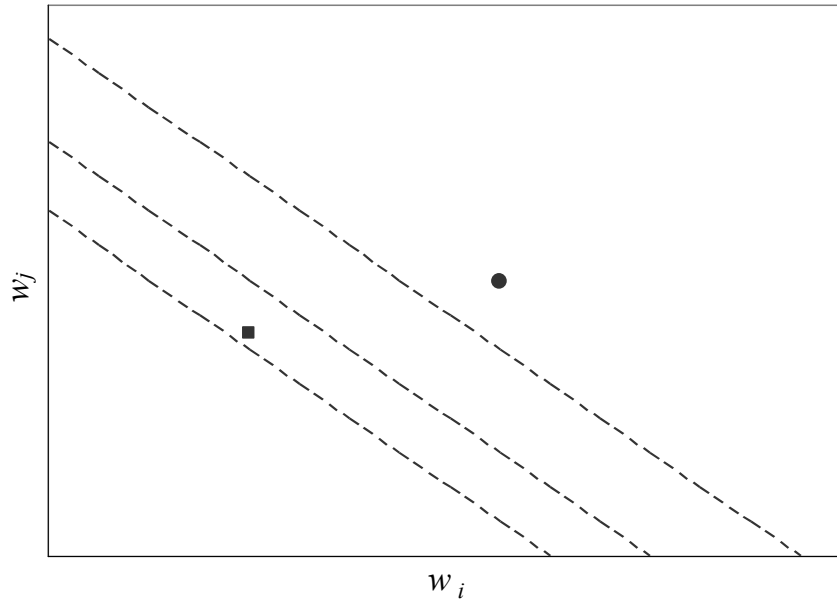
Συμβολίζουμε με D το σύνολο των παραδειγμάτων / απαντήσεων του χρήστη βάσει του οποίου θα εκπαιδευτεί το προτεινόμενο μοντέλο ώστε να 'μάθει' την από κοινού συνάρτηση κατανομής πιθανότητας $P(w_q, w_c, w_t, w_o, S)$, που σχετίζεται με τις μεταβλητές του γράφου του Σχήματος 5-5. Το σύνολο D αποτελείται από στοιχεία της εξής μορφής (Πίνακας 5-3):

Πίνακας 5-3. Σύνολο παραδειγμάτων εκπαίδευσης D

x	w_q	w_c	w_i	w_o	S	C	<i>User approval</i>
x_1	1	2	3	4	s_1	c_1	‘accept’
x_2	4	3	2	1	s_1	c_2	‘reject’
...
x_{N-1}	2	1	4	3	s_{n_s-1}	c_2	‘reject’
x_N	3	4	1	2	s_{n_s}	c_2	‘accept’

Οι απαντήσεις του χρήστη δίνονται σε ερωτήσεις της εξής μορφής: ‘Για την υπηρεσία s_i στο πλαίσιο χρήσης c_j είναι αποδεκτή η μετάθεση 1: w_q 2: w_c 3: w_i 4: w_o ;’ Ο χρήστης απαντά σε τουλάχιστον τόσες ερωτήσεις όσες είναι οι συνδυασμοί των υπηρεσιών (n_s) και των τύπων πλαισίου χρήσης ($n_c = 2$). Για ορισμένους συνδυασμούς υπηρεσίας – πλαισίου χρήσης ενδέχεται να υποβληθεί στο χρήστη και δεύτερη ερώτηση, αυτή τη φορά σχετική με μια μετάθεση των w_i η οποία να διαφέρει σημαντικά από αυτή της πρώτης ερώτησης για τον ίδιο συνδυασμό υπηρεσίας – πλαισίου χρήσης.

Τα στοιχεία – περιπτώσεις του D παρέχουν πληροφορία σχετικά με την ικανοποίηση ή μη των αναγκών του χρήστη μέσω της εκάστοτε μετάθεσης – συνδυασμού των συντελεστών w_i , χωρίς όμως να παρέχουν καμία πληροφορία σχετικά με το μέτρο της ικανοποίησης αυτής. Στο Σχήμα 5-6 δίνεται μια (αυθαίρετη αλλά χρήσιμη) αναπαράσταση του χώρου συμφωνίας – ικανοποίησης που μπορεί να ορίζεται σε ένα χώρο δύο διαστάσεων από δύο συντελεστές w_i και w_j : εάν θεωρήσουμε ότι οι δύο αυτοί συντελεστές έχουν σταθερό άθροισμα ορισμένης *χρησιμότητας*, τότε όλοι οι συνδυασμοί των τιμών τους που βρίσκονται δεξιότερα μιας οριακής τιμής χρησιμότητας (πρώτης από τα αριστερά διακεκομμένης γραμμής) θεωρούνται αποδεκτοί. Ο συνδυασμός τους εκείνος που διατυπώνεται σαν ερώτηση στο χρήστη και που αποσπά απάντηση ‘accept’, ενδέχεται να βρίσκεται είτε αρκετά μακριά (σημειωμένος με κύκλο) είτε αρκετά κοντά (σημειωμένος με τετράγωνο) στην οριακή αυτή τιμή.



Σχήμα 5-6. Χώρος συμφωνίας παραμέτρων w_i - παράδειγμα σε 2 διαστάσεις

Ανάλογη υπόθεση μπορεί να διατυπωθεί και για τις τέσσερις μεταβλητές w_q , w_o , w_l , w_c ή ακόμα και για περισσότερες. Από τα στοιχεία και μόνο του D δεν έχουμε τρόπο να ξεχωρίσουμε ποιές από τις μεταθέσεις των w_i βρίσκονται σε ‘ασφαλή’ απόσταση από κάποια οριακή τιμή χρησιμότητας. Η μέθοδος όμως που θα περιγραφεί στη συνέχεια για τη μάθηση της από κοινού συνάρτησης κατανομής πιθανότητας του πιθανολογικού μας μοντέλου τείνει να εξομαλύνει αυτές τις διαφορές.

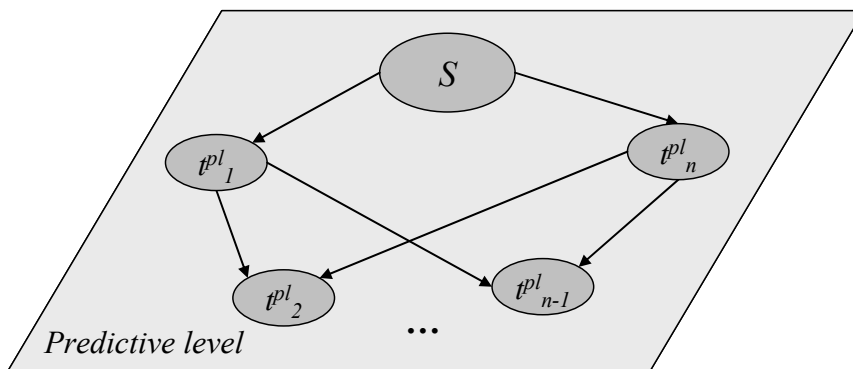
Επιδιώκουμε τον προσδιορισμό των τιμών της συνάρτησης κατανομής πιθανότητας $P(w_q, w_c, w_l, w_o, S)$, ή στη γενικότερη περίπτωση του γράφου του προγνωστικού επιπέδου του Σχήματος 5-3, της συνάρτησης $P(t_1^{pl}, t_2^{pl}, \dots, t_n^{pl}, S)$. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια των παρατηρήσεων του συνόλου D ως εξής:

- Αρχικά, οι τιμές της $P(t_1^{pl}, t_2^{pl}, \dots, t_n^{pl}, S)$ τίθενται όλες ισοπίθανες.
- Κάθε συνδυασμός των t_i^{pl} και S αξιολογείται ανάλογα με την εγγύτητά του προς τις περιοχές αποδοχής και απόρριψης που ορίζονται από τις περιπτώσεις του D .
- Η αντίστοιχη προς αυτόν τον συνδυασμό τιμή της $P(t_1^{pl}, t_2^{pl}, \dots, t_n^{pl}, S)$ αυξάνεται, στην περίπτωση ταξινόμησης του συνδυασμού σε περιοχή αποδοχής, ή μειώνεται, στην περίπτωση ταξινόμησης σε περιοχή απόρριψης. Αυτή η αύξηση ή η μείωση είναι ανάλογη της υπολογισμένης εγγύτητας, και πραγματοποιείται με εφαρμογή του θεωρήματος του Bayes $P(H|e) = \frac{P(e|H) \cdot P(H)}{P(e)}$, όπου H η αρχική

υπόθεση που κάνουμε σχετικά με την τιμή της $P(t_1^{pl}, t_2^{pl}, \dots, t_n^{pl}, S)$ και e η ‘απόδειξη’ ταξινόμησης του συνδυασμού σε περιοχή αποδοχής ή απόρριψης. Ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται αυτή η ταξινόμηση περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 5.4.1.

5.2.2.4. Μάθηση δομής μοντέλου

Έστω γνωστή από κοινού συνάρτηση κατανομής πιθανότητας $P(t_1^{pl}, t_2^{pl}, \dots, t_n^{pl}, S)$ και άγνωστη δομή του γράφου του πιθανολογικού μας μοντέλου. Ένα παράδειγμα τυχαίας τοπολογίας του γράφου στο προγνωστικό επίπεδο, όπου δεν γίνεται καμία παραδοχή ανεξαρτησίας μεταξύ των μεταβλητών t_i^{pl} φαίνεται στο Σχήμα 5-7.



Σχήμα 5-7. Τυχαία δομή του γράφου στο προγνωστικό επίπεδο

Δεδομένης της συνάρτησης $P(t_1^{pl}, t_2^{pl}, \dots, t_n^{pl}, S)$, επιδιώκουμε τον προσδιορισμό της δομής εκείνης του κατευθυνόμενου μη-κυκλικού γράφου ο οποίος απεικονίζει τις πραγματικές αιτιακές σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών, και παραγοντοποιεί την από κοινού συνάρτηση κατανομής πιθανότητες σε επιμέρους δεσμευμένες κατανομές κατά βέλτιστο τρόπο.

Όπως συζητήθηκε και στο Κεφάλαιο 4, καθώς το πλήθος των δυνατών δικτυακών δομών που μπορούν να προκύψουν για ένα μπεϋζιανό δίκτυο n μεταβλητών είναι υπερ-εκθετικό του n , η εξαντλητική αναζήτηση και αξιολόγηση κάθε δυνατής περίπτωσης είναι πρακτικά ανέφικτη. Μια συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι η *επιλογή μοντέλου* (βλ. Κεφάλαιο 4, παράγραφο 4.4.3.1), κατά την οποία γίνεται χρήση κάποιου *κριτηρίου* για τη μέτρηση του κατά πόσον μια δεδομένη δομή ταιριάζει με την εκ-των προτέρων γνώση και τα δεδομένα, ενώ στη συνέχεια χρησιμοποιείται ένας *αλγόριθμος αναζήτησης* για την εύρεση μιας κλάσης δομών οι οποίες λαμβάνουν υψηλή βαθμολογία σύμφωνα με αυτό το κριτήριο.

Έστω S^h η τυχαία μεταβλητή που αντιστοιχεί στην υπόθεση σχετικά με τη δομή του μπεϋζιανού δικτύου, και D το σύνολο των παρατηρήσεων. Έστω το κριτήριο αξιολόγησης δικτυακών δομών $\log P(D, S^h) = \log P(S^h) + \log P(D | S^h)$. Οι δομές S^h που αξιολογούνται ευνοϊκά με βάση αυτό το κριτήριο έχουν υψηλή πιθανότητα να παρέχουν μια ακριβή περιγραφή των αιτιακών σχέσεων που διέπουν το πιθανολογικό μας μοντέλο. Ο όρος $\log P(D | S^h)$ του κριτηρίου αυτού εκφράζει το κατά πόσον η υπό εξέταση δομή S^h μπορεί να ερμηνεύσει (ή να προβλέψει) με ακρίβεια τα δεδομένα του συνόλου παρατηρήσεων D . Αυτή η καταλληλότητα της δομής S^h μπορεί να υπολογιστεί με τη μέθοδο της *διασταυρωτικής επικύρωσης* (*cross validation*), κατά την οποία το μοντέλο εκπαιδεύεται χρησιμοποιώντας όλες τις περιπτώσεις του συνόλου D , πλην μιας ([12]). Στη συνέχεια, προβλέπουμε με τη βοήθεια του εκπαιδευμένου μοντέλου την περίπτωση που έχει παραλειφθεί, και επαναλαμβάνουμε αυτή τη διαδικασία για όλες τις περιπτώσεις στο D . Τέλος, αθροίζουμε τις βαθμολογίες που προκύπτουν με χρήση κάποιας συνάρτησης χρησιμότητας, και αξιολογούμε την υπό εξέταση δομή S^h .

5.3. Μαθηματική διατύπωση προβλήματος

5.3.1. Μάθηση παραμέτρων

Σε αυτήν την παράγραφο δίνεται η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος της μάθησης των κατανομών πιθανότητας σε ένα μπεϋζιανό δίκτυο δεδομένης δομής, με χρήση νέας πληροφορίας.

Έστω ένα μπεϋζιανό δίκτυο για το σύνολο των μεταβλητών $X = \{X_1, \dots, X_n\}$ το οποίο αποτελείται από:

- μια δομή S , η οποία κωδικοποιεί τις παραδοχές σχετικά με την υπό-συνθήκη ανεξαρτησία των μεταβλητών του X
- ένα σύνολο P τοπικών κατανομών πιθανότητας για κάθε μεταβλητή

Μαζί, τα δύο αυτά στοιχεία ορίζουν την από κοινού συνάρτηση κατανομής πιθανότητας του X . Η δομή S είναι ένας κατευθυνόμενος, μη-κυκλικός γράφος. Οι κόμβοι στην S βρίσκονται σε μια 1-1 αντιστοιχία με τις μεταβλητές του X . Σημειώνουμε με \mathbf{Pa}_i το σύνολο των κόμβων – γονέων της μεταβλητής X_i στη δομή S . Είναι γνωστό (βλ. Κεφάλαιο 4, παράγραφο 4.1.1) ότι η από κοινού συνάρτηση κατανομής πιθανότητας για το σύνολο X δίνεται από τη σχέση:

$$P(X_1, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | \mathbf{pa}_i) \quad (1)$$

Ορίζουμε επιπλέον τη μεταβλητή Θ_i της οποίας οι τιμές θ_i αντιστοιχούν στις δυνατές τιμές της κλασικής πιθανότητας για τη μεταβλητή X_i . Η τιμή θ_i αναφέρεται συχνά και ως παράμετρος. Η σχέση (1) μπορεί να ξαναγραφεί ως εξής:

$$P(X_1, \dots, X_n | \boldsymbol{\theta}_s, S^h) = \prod_{i=1}^n P(X_i | \mathbf{pa}_i, \boldsymbol{\theta}_i, S^h) \quad (2)$$

όπου $\boldsymbol{\theta}_i$ είναι το διάνυσμα των παραμέτρων για την κατανομή $P(X_i | \mathbf{pa}_i, \boldsymbol{\theta}_i, S^h)$, $\boldsymbol{\theta}_s$ είναι το διάνυσμα των παραμέτρων $(\theta_1, \dots, \theta_n)$, και S^h εκφράζει την υπόθεση ότι η κλασική (*physical*) από κοινού συνάρτηση κατανομής πιθανότητας μπορεί να παραγοντοποιηθεί σύμφωνα με τη δομή S .

Έστω ένα τυχαίο δείγμα $D = \{x_1, \dots, x_N\}$ από την από κοινού κατανομή του X . Κάθε στοιχείο του D αναφέρεται ως μια περίπτωση. Το πρόβλημα της μάθησης των παραμέτρων σε ένα μπεϋζιανό δίκτυο μπορεί τώρα να διατυπωθεί απλά:

Δεδομένου του τυχαίου δείγματος D , επιζητούμε τον υπολογισμό της εκ-των-υστέρων κατανομής $P(\boldsymbol{\theta}_s | D, S^h)$.

5.3.2. Μάθηση δομής

Έστω ότι είμαστε αβέβαιοι σχετικά με τη δικτυακή δομή η οποία αναπαριστά την από κοινού συνάρτηση κατανομής για τις μεταβλητές του συνόλου X . Αναπαριστούμε την αβεβαιότητα αυτή ορίζοντας μια διακριτή μεταβλητή της οποίας οι τιμές αντιστοιχούν στις δυνατές υποθέσεις σχετικά με τη δομή του δικτύου S^h και επιχειρούμε αποτίμηση των πιθανοτήτων $P(S^h)$. Δεδομένου ενός τυχαίου δείγματος $D = \{x_1, \dots, x_N\}$ από την από κοινού κατανομή του X , υπολογίζουμε τις εκ-των-υστέρων κατανομές $P(S^h | D)$ και $P(\boldsymbol{\theta}_s | D, S^h)$ και τις χρησιμοποιούμε για τον υπολογισμό οποιασδήποτε πιθανότητας παρουσιάζει ενδιαφέρον. Για παράδειγμα, για την πρόβλεψη της επόμενης περίπτωσης μετά την παρατήρηση του D , κάνουμε τον εξής υπολογισμό:

$$P(x_{N+1} | D) = \sum_{S^h} P(S^h | D) \int P(x_{N+1} | \boldsymbol{\theta}_s, S^h) \cdot P(\boldsymbol{\theta}_s | D, S^h) d\boldsymbol{\theta}_s \quad (3)$$

αθροίζοντας, δηλαδή, πάνω σε όλα τα διανύσματα παραμέτρων και για όλες τις δυνατές δικτυακές δομές. Ο υπολογισμός της $P(\boldsymbol{\theta}_s | D, S^h)$ συνιστά το πρόβλημα

μάθησης παραμέτρων που περιγράφηκε στην παράγραφο 5.3.1, ενώ ο υπολογισμός της $P(S^h | D)$ γίνεται με εφαρμογή του θεωρήματος του Bayes:

$$P(S^h | D) = \frac{P(S^h) \cdot P(D | S^h)}{P(D)} \quad (4)$$

όπου $P(D)$ είναι μια σταθερά κανονικοποίησης, ανεξάρτητη της δομής. Έτσι, ο υπολογισμός της εκ-των-υστέρων κατανομής για τις πιθανές δικτυακές δομές ανάγεται στον υπολογισμό της $P(D | S^h)$ για κάθε δυνατή δομή.

Η προσέγγιση αυτή δεν είναι πάντα εφαρμόσιμη στην πράξη. Μια σημαντική υπολογιστική συμφόρηση απορρέει από την άθροιση πάνω σε όλες τις δυνατές δομές στη σχέση (3). Εάν αναλογιστούμε ότι το πλήθος των δυνατών δικτυακών δομών (μη κυκλικών γράφων) που μπορούν να προκύψουν από n διακριτές μεταβλητές είναι υπερ-εκθετικό σε σχέση με το n , τότε η εφαρμογή της (3) είναι πρακτικά ανέφικτη. Για την ακρίβεια, το πλήθος αυτό προκύπτει με εφαρμογή του ακόλουθου αναδρομικού τύπου:

$$a_n = \sum_{k=1}^n (-1)^{k-1} \binom{n}{k} 2^{k \cdot (n-k)} a_{n-k}$$

με $a_0 = 1$ ([36],[37]).

Στον Πίνακα 5-4 παρουσιάζονται τιμές του a_n για κάποια μικρά n :

Πίνακας 5-4. Πλήθος κατευθυνόμενων μη κυκλικών γράφων για μικρά n

n	a_n
0	1
1	1
2	3
3	25
4	543
5	29.281
6	3.781.503
7	1.138.779.265
8	783.702.329.343
9	1.213.442.454.842.881
10	4.175.098.976.430.598.143

Είναι φανερό πως όσο αυξάνει το πλήθος των κόμβων στο δίκτυο, το κόστος εξαντλητικού υπολογισμού και αποτίμησης όλων των διαφορετικών δικτυακών δομών που μπορούν να προκύψουν γίνεται υπερ-εκθετικά πιο απαγορευτικό. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με τη μέθοδο της *επιλογής μοντέλου* (βλ. Κεφάλαιο 4, παράγραφο 4.4.3.1), κατά την οποία επιλέγεται μια ‘καλή’ δομή δικτύου ανάμεσα σε όλες τις δυνατές, και χρησιμοποιείται στους επακόλουθους υπολογισμούς σαν να επρόκειτο για τη σωστή δομή ([13]). Η εφαρμογή της μεθόδου αυτής εγείρει δύο σημαντικά θέματα:

- Τη διατύπωση ενός κατάλληλου κριτηρίου για την αξιολόγηση του κατά πόσον μια δεδομένη δομή προσαρμόζεται στην εκ-των-προτέρων γνώση και στο τυχαίο δείγμα.
- Την κατάστρωση ενός κατάλληλου αλγορίθμου αναζήτησης για την ανακάλυψη δικτυακών δομών οι οποίες αποτιμώνται ευνοϊκά με βάση το κριτήριο αυτό.

Έστω το εξής κριτήριο επιλογής μοντέλου:

$$\log P(D, S^h) = \log P(S^h) + \log P(D | S^h) \quad (5)$$

όπου ο λογάριθμος χρησιμοποιείται για αριθμητική ευκολία. Ο δεύτερος όρος του κριτηρίου αυτού έχει την ακόλουθη ενδιαφέρουσα ερμηνεία ([12]):

$$\log P(D | S^h) = \sum_{l=1}^N \log P(x_l | x_1, \dots, x_{l-1}, S^h) \quad (6)$$

όπου ο όρος $P(x_l | x_1, \dots, x_{l-1}, S^h)$ αφορά την πρόβλεψη της περίπτωσης x_l μέσω του μοντέλου S^h και αθροίζοντας πάνω σε όλες τις παραμέτρους αυτού. Ο λογάριθμος του όρου αυτού μπορεί να ερμηνευτεί ως η χρησιμότητα που απορρέει από την πρόβλεψη αυτή, με βάση τη συνάρτηση χρησιμότητας $\log P(x)$ ([14]). Έτσι, το μοντέλο με τη μεγαλύτερη αξιολόγηση μέσω της σχέσης (5) αποτελεί και τον καλύτερο εκτιμητή των δεδομένων του D , με βάση την προαναφερθείσα λογαριθμική συναρτηση χρησιμότητας.

Στην παραπομπή [14] σημειώνεται επίσης η σχέση μεταξύ του κριτηρίου αυτού και της μεθόδου της διασταυρωτικής επικύρωσης, κατά την οποία το μοντέλο εκπαιδεύεται χρησιμοποιώντας όλες τις περιπτώσεις του συνόλου D , πλην μιας, για παράδειγμα με το υποσύνολο $V_l = \{x_1, \dots, x_{l-1}, x_{l+1}, \dots, x_N\}$. Στη συνέχεια, επιχειρείται πρόβλεψη της περίπτωσης που έχει παραλειφθεί ([15],[16]). Η πρόβλεψη αυτή αποτιμάται με βάση κάποια συνάρτηση χρησιμότητας, ενώ η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε περίπτωση του D , αθροίζοντας τις προκύπτουσες

χρησιμότητες. Για τη συνάρτηση χρησιμότητας $\log P(x)$ προκύπτει το εξής κριτήριο διασταυρωτικής επικύρωσης:

$$CV(S^h, D) = \sum_{i=1}^N \log P(x_i | V_i, S^h) \quad (7)$$

5.4. Λύση προβλήματος

5.4.1. Μάθηση παραμέτρων

Στην παράγραφο αυτή εξετάζονται υπολογιστικά αποτελεσματικές λύσεις για το πρόβλημα της μάθησης παραμέτρων σε ένα μπεϋζιανό δίκτυο δεδομένης δομής.

Έστω το μπεϋζιανό δίκτυο του προγνωστικού επιπέδου που απεικονίζεται στο Σχήμα 5-5. Έστω ακόμη ένα σύνολο παραδειγμάτων εκπαίδευσης D με στοιχεία της μορφής που παρουσιάζεται στον Πίνακα 5-3.

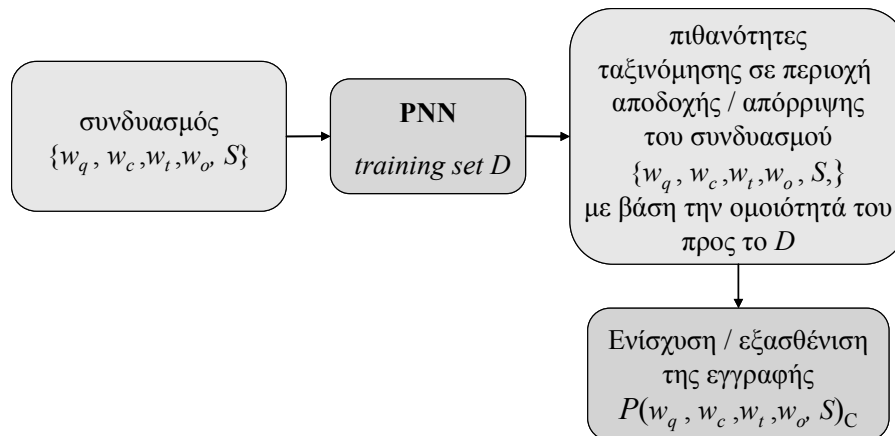
Η ιδιομορφία που παρουσιάζει η εκδοχή του προβλήματος που εξετάζεται στην παρούσα διατριβή εστιάζεται στο γεγονός ότι οι περιπτώσεις του συνόλου D δεν αφορούν κατ' ανάγκη ακριβή στιγμιότυπα της ζητούμενης από κοινού συνάρτησης κατανομής, αλλά αφορούν κυρίως, λιγότερο ή περισσότερο, αφηρημένους χώρους συμφωνίας ή διαφωνίας με μια προτεινόμενη μετάθεση των συντελεστών w_i (βλ. παράγραφο 5.2.2.3).

Η λύση που προτείνεται στο πλαίσιο αυτής της διατριβής αφορά την κατασκευή ενός *πιθανολογικού νευρωνικού δικτύου* (*probabilistic neural network, PNN*, [17],[18]), το οποίο εκπαιδεύεται κατάλληλα με γνώμονα τις περιπτώσεις του D , και εν συνεχεία χρησιμοποιείται για την ταξινόμηση κάθε δυνατού συνδυασμού των μεταβλητών στο προγνωστικό επίπεδο του Σχήματος 5-5 σε μια περιοχή αποδοχής ή απόρριψης, συμφωνίας ή διαφωνίας με τα όσα έχει δηλώσει ο χρήστης για τις προτιμήσεις του διαμέσου του D . Σε περίπτωση ταξινόμησης σε περιοχή συμφωνίας, τότε η αντίστοιχη εγγραφή του πίνακα της κατανομής $P(w_q, w_c, w_l, w_o, S)$ ενισχύεται (σε σχέση με την αρχική, κοινή για όλους τους αρχικά ισοπίθανους συνδυασμούς, τιμή της) ενώ σε περίπτωση ταξινόμησης σε περιοχή διαφωνίας η αντίστοιχη εγγραφή της $P(w_q, w_c, w_l, w_o, S)$ ελαττώνεται. Η μεταβολή αυτή στις αρχικές τιμές της $P(w_q, w_c, w_l, w_o, S)$ γίνεται σύμφωνα με το θεώρημα του Bayes

$$P(H | e) = \frac{P(e | H) \cdot P(H)}{P(e)} \quad \text{όπου:}$$

- H : το ενδεχόμενο η εκ-των-προτέρων τιμή της υπό εξέταση $P(w_q, w_c, w_t, w_o, S)$ να είναι σωστή.
- e : το ενδεχόμενο να ταξινομηθεί η υπό εξέταση περίπτωση $\{w_q, w_c, w_t, w_o, S\}$ σε περιοχή συμφωνίας.

Η διαδικασία αυτή αναπαρίσταται γραφικά στο Σχήμα 5-8.



Σχήμα 5-8. Χρήση πιθανολογικού νευρωνικού δικτύου για τη μάθηση της κατανομής $P(w_q, w_c, w_t, w_o, S)$

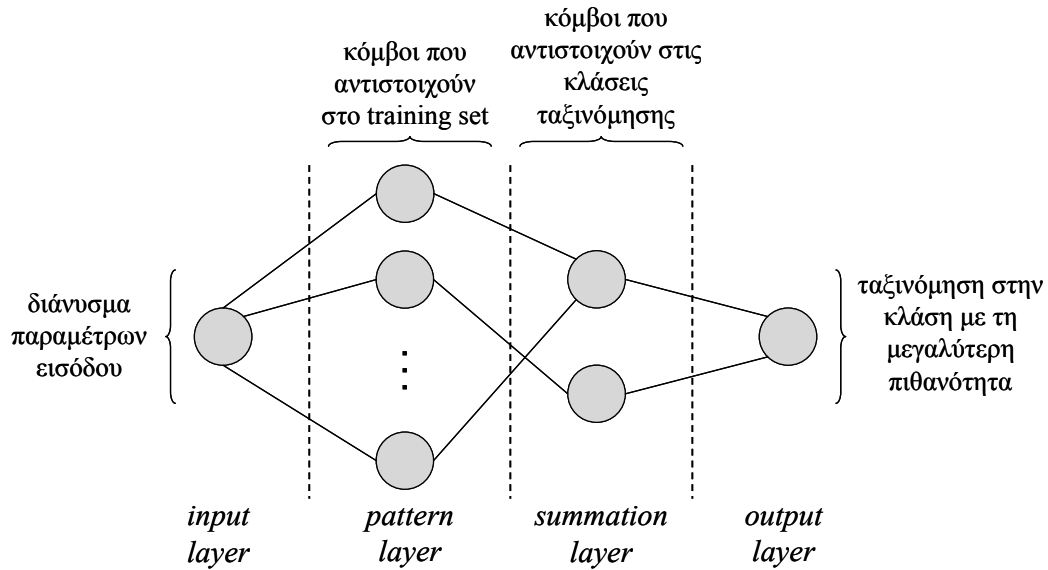
Πιο αναλυτικά, το προτεινόμενο πιθανολογικό νευρωνικό δίκτυο εκτελεί με τη σειρά τις ακόλουθες λειτουργίες, για κάθε δυνατή περίπτωση $\{w_q = a, w_c = b, w_t = c, w_o = d, S = s_i\}$ που εξετάζεται:

- Προσδιορίζει την ομοιότητα του συνδυασμού $\{w_q = a, w_c = b, w_t = c, w_o = d, S = s_i\}$ προς τα πρότυπα (*patterns*) που βρίσκονται αποθηκευμένα στους κόμβους αναγνώρισης προτύπων (βλ. Σχήμα 5-9). Τα πρότυπα αυτά αντιστοιχούν στις περιπτώσεις του D και η ομοιότητα, ή ποιοτική απόσταση, προς αυτά υπολογίζεται σαν μια καρτεσιανή απόσταση στο χώρο που ορίζεται από τις 5 μεταβλητές w_q, w_c, w_t, w_o, S . Τελικά, κάθε νευρώνας αυτού του λεγόμενου *στρώματος αναγνώρισης προτύπων (pattern recognition layer)* υπολογίζει ένα μέτρο της απόστασης μεταξύ της εισόδου και του παραδείγματος εκπαίδευσης που αντιπροσωπεύεται από αυτόν τον νευρώνα.
- Παράγει ένα διάνυσμα πιθανοτήτων, με στοιχεία που αντιστοιχούν στις πιθανότητες ταξινόμησης της εισόδου σε κάθε μια από τις διαθέσιμες κλάσεις (αποδοχής και απόρριψης). Η λειτουργία αυτή πραγματοποιείται από τους νευρώνες του *στρώματος αθροίσματος (summation layer)*, βλ. Σχήμα 5-9), καθένας

από τους οποίους αθροίζει τις εξόδους των νευρώνων εκείνων του στρώματος αναγνώρισης προτύπων που αντιστοιχούν σε αυτόν.

- Παράγει στην έξοδό του (στρώμα εξόδου – *output layer*, βλ. Σχήμα 5-9) την τιμή (κλάση ταξινόμησης) η οποία παρουσιάζει τη μέγιστη των πιθανοτήτων από αυτές που παράγονται από το στρώμα αθροίσματος.

Η αρχιτεκτονική του χρησιμοποιούμενου νευρωνικού δικτύου σχεδιάζεται στο Σχήμα 5-9.



Σχήμα 5-9. Αρχιτεκτονική του χρησιμοποιούμενου PNN

Η ανανέωση των εγγραφών της $P(w_q, w_c, w_t, w_o, S)$ γίνεται, όπως προαναφέρθηκε, σύμφωνα με τον κανόνα:

$$P(w_q, w_c, w_t, w_o, S | e) = \frac{P(e | w_q, w_c, w_t, w_o, S) \cdot P(w_q, w_c, w_t, w_o, S)}{P(e)} \quad (8)$$

όπου $P(e | w_q, w_c, w_t, w_o, S)$ προκύπτει από την έξοδο του PNN και η $P(e)$ υπολογίζεται:

$$P(e) = P(e | w_q, w_c, w_t, w_o, S) \cdot P(w_q, w_c, w_t, w_o, S) + P(e | \neg(w_q, w_c, w_t, w_o, S)) \cdot P(\neg(w_q, w_c, w_t, w_o, S)) \quad (9)$$

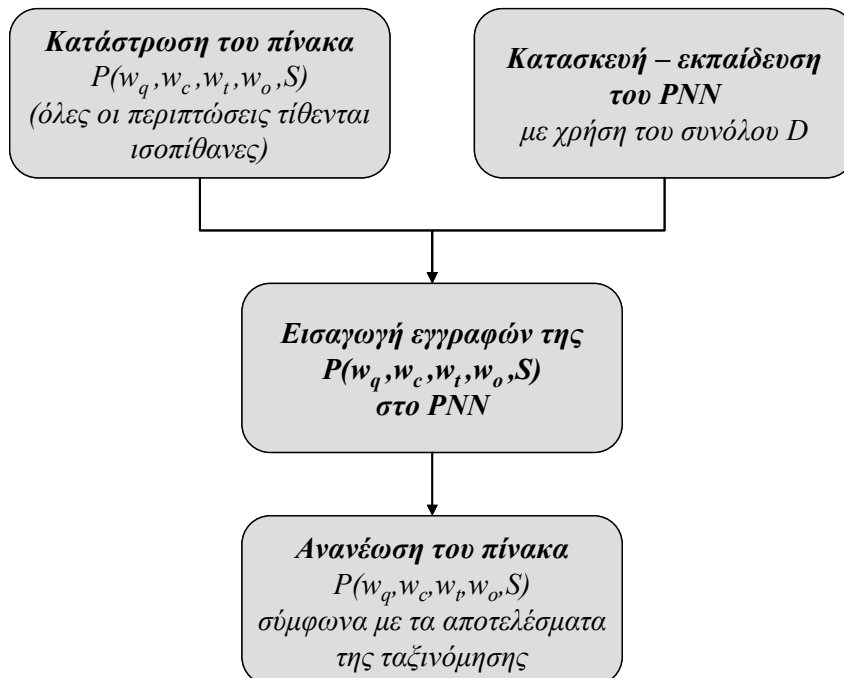
Ο όρος $P(e | \neg(w_q, w_c, w_t, w_o, S))$ στη σχέση (9) εκφράζει την πιθανότητα του ενδεχομένου να γίνει ταξινόμηση της υπό εξέταση περίπτωσης σε περιοχή αποδοχής με δεδομένο ότι η περίπτωση αυτή απορρίπτεται από τον χρήστη. Ο τρόπος με τον οποίο προσδιορίζεται η πιθανότητα αυτή είναι ο εξής: εάν το στοιχείο $\{S = s_i\}$ της εξεταζόμενης περίπτωσης $\{w_q = a, w_c = b, w_t = c, w_o = d, S = s_i\}$ εμφανίζεται σε μια

από τις περιπτώσεις του D , τότε θεωρούμε $P(e | \neg(w_q, w_c, w_t, w_o, S)) = 0,2$, ενώ εάν εμφανίζεται σε δύο από τις περιπτώσεις του D , τότε θεωρούμε $P(e | \neg(w_q, w_c, w_t, w_o, S)) = 0,1$.

Όλες οι ανανεώσεις των εγγραφών της $P(w_q, w_c, w_t, w_o, S)$ που γίνονται με αυτόν τον τρόπο υπόκεινται στο βασικό περιορισμό:

$$\sum_{w_q, w_c, w_t, w_o, S} P(w_q, w_c, w_t, w_o, S) = 1$$

Ανακεφαλαιώνοντας, στο Σχήμα 5-10 παρουσιάζεται συνοπτικά η διαδικασία που ακολουθείται για την επίλυση του προβλήματος μάθησης των παραμέτρων στο μπεϋζιανό δίκτυο του Σχήματος 5-5.



Σχήμα 5-10. Διάγραμμα φάσεων της λύσης του προβλήματος μάθησης παραμέτρων

5.4.2. Μάθηση δομής

Στην παράγραφο αυτή εξετάζονται υπολογιστικά αποτελεσματικές λύσεις για το πρόβλημα της μάθησης της δομής ενός μπεϋζιανού δικτύου δεδομένου πλήθους κόμβων. Το πρόβλημα εύρεσης της βέλτιστης δομής (σύμφωνα με κάποιο κριτήριο), μεταξύ του συνόλου των δομών στις οποίες κάθε κόμβος έχει το πολύ k γονείς, είναι NP-hard για $k > 1$ ([19]). Εξαιτίας αυτής της δυσκολίας η έρευνα έχει στραφεί προς ευριστικούς αλγορίθμους αναζήτησης, όπως είναι η *άπληστη αναζήτηση* (*greedy*

search [20],[21]), η αναζήτηση τύπου *best-first* (*best-first search* – [22]), και οι μέθοδοι *Monte-Carlo* (*Monte-Carlo methods* [23],[24]).

Έστω το μπεϋζιανό δίκτυο του προγνωστικού επιπέδου που απεικονίζεται στο Σχήμα 5-7. Έστω ακόμη ένα σύνολο παραδειγμάτων εκπαίδευσης D με στοιχεία της μορφής που παρουσιάζεται στον Πίνακα 5-3. Επιδιώκουμε τον προσδιορισμό της δομής εκείνης S του μπεϋζιανού δικτύου που παραγοντοποιεί την από κοινού συνάρτηση κατανομής πιθανότητας $P(w_q, w_c, w_t, w_o, S)$ σε επιμέρους δεσμευμένες κατανομές κατά βέλτιστο τρόπο, εφαρμόζοντας τη μέθοδο της επιλογής μοντέλου (βλ. παράγραφο 5.3.2). Στην παράγραφο 5.4.2.1 αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο αξιολογείται κάθε εξεταζόμενη δομή γράφου S^h , στην παράγραφο 5.4.2.2 παρουσιάζεται ο αλγόριθμος αναζήτησης δικτυακών δομών και στην παράγραφο 5.4.2.3 παρουσιάζεται η συνολική λύση και το αντίστοιχο διάγραμμα φάσεων.

5.4.2.1. Κριτήριο επιλογής

Χρησιμοποιούμε το εξής κριτήριο για την αξιολόγηση κάθε μιας από τις εξεταζόμενες δομές S^h (σχέση (5)):

$$\log P(D, S^h) = \log P(S^h) + \log P(D | S^h)$$

Ο πρώτος όρος του κριτηρίου αυτού, $\log P(S^h)$, αντιστοιχεί στην εκ-των-προτέρων πιθανότητα της υπό εξέταση δομής S^h . Θα θεωρήσουμε ισοπίθανες όλες τις εξεταζόμενες δομές S^h . Ο δεύτερος όρος του κριτηρίου, $\log P(D | S^h)$, αντιστοιχεί στην πιθανότητα καλής εφαρμογής των παρατηρήσεων D στην υπό εξέταση δομή S^h . Η πιθανότητα αυτή υπολογίζεται με τη μέθοδο της διασταυρωτικής επικύρωσης ως εξής:

- Βήμα 1: Το PNN που περιγράφηκε στην παράγραφο 5.4.1 κατασκευάζεται και εκπαιδεύεται κάνοντας χρήση όλων των περιπτώσεων του συνόλου D , πλην μιας, έστω της x_l , η οποία χαρακτηρίζεται από απάντηση αποδοχής.
- Βήμα 2: Κάθε εγγραφή του πίνακα της κατανομής $P(w_q, w_c, w_t, w_o, S)$ εισάγεται στο PNN, και διαμορφώνεται ανάλογα με την ταξινόμησή της σε κλάση αποδοχής ή απόρριψης, σύμφωνα με αυτά που περιγράφηκαν στην παράγραφο 5.4.1.
- Βήμα 3: Ο διαμορφωμένος πλέον πίνακας της κατανομής $P(w_q, w_c, w_t, w_o, S)$ χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της περίπτωσης x_l , και αυτή η πρόβλεψη επικυρώνεται από τη δομή S^h ως εξής:

- Βήμα 3(α): Έστω $x_l = \{w_q = a_l, w_c = b_l, w_t = c_l, w_o = d_l, S = s_l\}$. Υπολογίζεται η τιμή της $P(w_q, w_c, w_t, w_o, S)$ για $w_q = a_l, w_c = b_l, w_t = c_l, w_o = d_l, S = s_l$.
- Βήμα 3(β): Η $P(w_q, w_c, w_t, w_o, S)$ παραγοντοποιείται σύμφωνα με την υπό εξέταση δομή S^h .
- Βήμα 3(γ): Υπολογίζεται η τιμή της παραγοντοποιημένης μορφής της $P(w_q, w_c, w_t, w_o, S)$ για $w_q = a_l, w_c = b_l, w_t = c_l, w_o = d_l, S = s_l$.
- Βήμα 3(δ): Υπολογίζεται η διαφορά των τιμών της $P(w_q, w_c, w_t, w_o, S)$ για $w_q = a_l, w_c = b_l, w_t = c_l, w_o = d_l, S = s_l$ μεταξύ των βημάτων 3(α) και 3(γ). Η διαφορά αυτή αποτελεί μέτρο αντιστρόφως ανάλογο προς το λογάριθμο $\log P(D|S^h)$.

5.4.2.2. Αλγόριθμος αναζήτησης

Χρησιμοποιούμε έναν άπληστο αλγόριθμο αναζήτησης και αξιολόγησης δομών ο οποίος εξελίσσεται ως εξής:

- Βήμα 1: Επιλέγεται η αρχική δικτυακή δομή S_0^h , η οποία δεν περιέχει κανένα τόξο μεταξύ των μεταβλητών.
- Βήμα 2: Για τη δομή αυτή S_0^h προσδιορίζεται το σύνολο E των δυνατών δομικών αλλαγών e που μπορεί αυτή να υποστεί ως εξής:
 - Για κάθε ζεύγος κόμβων που δεν συνδέονται μεταξύ τους, μπορεί να προστεθεί ένα τόξο προς οποιαδήποτε κατεύθυνση.
 - Όλες οι αλλαγές e υπόκεινται στον εξής βασικό περιορισμό: η προκύπτουσα γραφική δομή δεν πρέπει να περιέχει κατευθυνόμενους κύκλους.
- Βήμα 3: Για κάθε $e \in E$ προσδιορίζεται η διαφορά $\Delta(e)$ στην τιμή του $\log P(D|S^h)$, που απορρέει από την εφαρμογή της αλλαγής e , και πραγματοποιείται η αλλαγή εκείνη e για την οποία η $\Delta(e)$ είναι (θετική) μέγιστη. Έτσι προκύπτει η S_1^h .
- Βήμα 4: Επαναλαμβάνονται τα βήματα 2 και 3 για τη δομή S_1^h , και στη συνέχεια για τις προκύπτουσες S_2^h, S_3^h, \dots .

Η αναζήτηση τερματίζει όταν πλέον δεν υπάρχουν e που να δίνουν γραφικές δομές χωρίς κατευθυνόμενους κύκλους, ή σε $\frac{n \cdot (n-1)}{2}$ βήματα το πολύ, όπου n το πλήθος των κόμβων στο δίκτυο.

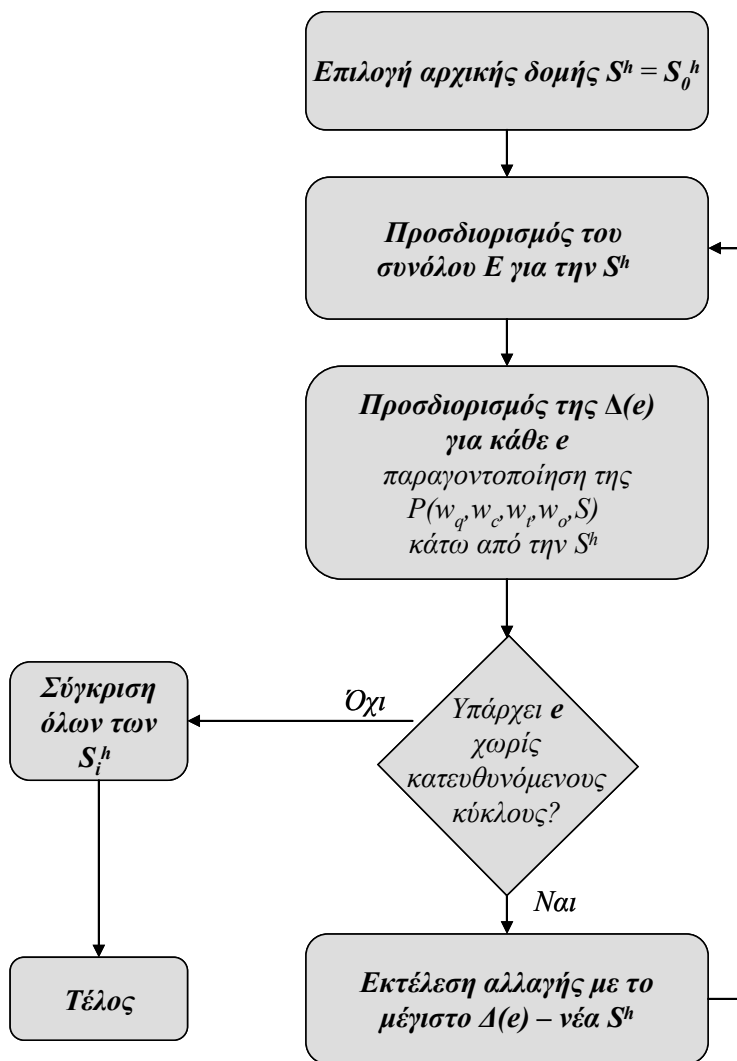
- Βήμα 5: Συγκρίνονται οι δομές $S_1^h, S_2^h, \dots, S_{n \cdot (n-1)/2}^h$ και επιλέγεται εκείνη που δίνει τη μεγαλύτερη τιμή $\log P(D | S^h)$.

Η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου είναι $O\left(\frac{3 \cdot n^2 \cdot (n-1)^2}{4} + n \cdot (n-1)\right)$, δηλαδή $O(n^4)$, στη χειρότερη περίπτωση.

5.4.2.3. Συνολική λύση

Η συνολική προτεινόμενη λύση, η οποία κάνει χρήση του κριτηρίου επιλογής που συζητήθηκε στην παράγραφο 5.4.2.1 και του αλγορίθμου αναζήτησης που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 5.4.2.2, εξελίσσεται σύμφωνα με το διάγραμμα φάσεων του Σχήματος 5-11.

Προαπαιτούμενο για την εκτέλεση του παραπάνω αλγορίθμου είναι ο προσδιορισμός της $P(w_q, w_c, w_t, w_o, S)$ με χρήση του συνόλου παραδειγμάτων εκπαίδευσης D και με εφαρμογή της μεθόδου που περιγράφηκε στην παράγραφο 5.4.1.



Σχήμα 5-11. Διάγραμμα φάσεων της λύσης του προβλήματος μάθησης δομής

5.5. Αποτελέσματα

5.5.1. Γενικά

Η λύση στο πρόβλημα MAUP που προτείνεται στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής έχει υλοποιηθεί στη γλώσσα προγραμματισμού Java, και ενσωματώνεται στην πλατφόρμα μεσισμικού του MTMS που συζητήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια.

Σε αυτή την υλοποίηση, χρησιμοποιείται η αναπαράσταση των γραφικών δομών των μευζιανών δικτύων μέσω πινάκων: για ένα δίκτυο n κόμβων χρησιμοποιείται ένας πίνακας \mathbf{A}_{net} διαστάσεων $n \times n$, για τον οποίο ισχύει:

$$\mathbf{A}_{\text{net}} = [a_{ij}], \quad a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{αν υπάρχει σύνδεση } i \rightarrow j \\ 0, & \text{αν δεν υπάρχει σύνδεση μεταξύ } i \text{ και } j \end{cases}$$

Στα σενάρια που περιγράφονται στη συνέχεια θεωρούμε ότι ο χώρος του πλαισίου χρήσης μοντελοποιείται σύμφωνα με όσα συζητήθηκαν στην παράγραφο 5.2.2.1

(Σχήμα 5-4), με τη μεταβλητή C να παίρνει 2 διαφορετικές τιμές, δηλαδή $C = \{leisure, business\} = \{c_1, c_2\}$, $n_c = 2$. Η (ζητούμενη) από κοινού συνάρτηση κατανομής πιθανότητας $P(w_q, w_c, w_t, w_o, S)$, που χαρακτηρίζει καθένα από τα δύο θεωρούμενα πλαίσια χρήσης, αναπαρίσταται σαν ένας πίνακας 96 γραμμών (όσες είναι δηλαδή οι μεταθέσεις των μεταβλητών w_i επί τον αριθμό των δυνατών τιμών της S , $n_s = 4$ στο παράδειγμα αυτό) και 6 στηλών (Πίνακας 5-5).

Πίνακας 5-5. Αναπαράσταση της κατανομής $P(w_q, w_c, w_t, w_o, S)$

w_q	w_c	w_t	w_o	S	$P(w_q, w_c, w_t, w_o, S)$
1	2	3	4	s_1	$\frac{1}{96}$
1	2	4	3	s_1	$\frac{1}{96}$
...
4	3	1	2	s_4	$\frac{1}{96}$
4	3	2	1	s_4	$\frac{1}{96}$

Όταν εισαχθεί στο νευρωνικό δίκτυο μια εγγραφή της $P(w_q, w_c, w_t, w_o, S)$, έστω η $y_k = \{w_q = a_{y_k}, w_c = b_{y_k}, w_t = c_{y_k}, w_o = d_{y_k}, S = s_{y_k}\}$, η απόσταση μεταξύ της εισόδου y_k και κάθε αποθηκευμένου παραδείγματος εκπαίδευσης με χαρακτηριστικά $x_i = \{w_q = a_{x_i}, w_c = b_{x_i}, w_t = c_{x_i}, w_o = d_{x_i}, S = s_{x_i}\}$ υπολογίζεται ως εξής:

$$d_{y_k - x_i} = \sqrt{(a_{y_k} - a_{x_i})^2 + (b_{y_k} - b_{x_i})^2 + (c_{y_k} - c_{x_i})^2 + (d_{y_k} - d_{x_i})^2}$$

Η απόσταση αυτή κανονικοποιείται με βάση τη μέγιστη δυνατή απόσταση μεταξύ εισόδου και παραδείγματος εκπαίδευσης, και ένα μέτρο της ομοιότητας μεταξύ y_k και x_i υπολογίζεται ως εξής:

$$corr_{y_k - x_i} = 1 - \frac{\sqrt{(a_{y_k} - a_{x_i})^2 + (b_{y_k} - b_{x_i})^2 + (c_{y_k} - c_{x_i})^2 + (d_{y_k} - d_{x_i})^2}}{\sqrt{20}}$$

σε περίπτωση που $s_{y_k} = s_{x_i}$, και

$$corr_{y_k - x_i} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{\sqrt{(a_{y_k} - a_{x_i})^2 + (b_{y_k} - b_{x_i})^2 + (c_{y_k} - c_{x_i})^2 + (d_{y_k} - d_{x_i})^2}}{\sqrt{20}}\right)$$

σε περίπτωση που $s_{y_k} \neq s_{x_i}$.

Το σύνολο των μέτρων ομοιότητας της περίπτωσης y_k προς όλα τα παραδείγματα x_1, \dots, x_N του συνόλου D αποθηκεύεται σε έναν πίνακα A_{corr} διαστάσεων $N \times 1$ και της εξής μορφής (Πίνακας 5-6):

Πίνακας 5-6. Αναπαράσταση της εξόδου του στρώματος αναγνώρισης προτύπων του PNN

$\text{corr}_{y_k - x_1}$	ομοιότητα της y_k προς την περίπτωση x_1
$\text{corr}_{y_k - x_2}$	ομοιότητα της y_k προς την περίπτωση x_2
...	...
$\text{corr}_{y_k - x_N}$	ομοιότητα της y_k προς την περίπτωση x_N

Η αντιστοιχία των περιπτώσεων x του στρώματος αναγνώρισης προτύπων του νευρωνικού δικτύου προς τις κλάσεις ταξινόμησης αποδοχής (k_1) και απόρριψης (k_2), προσδιορίζεται με τη βοήθεια ενός πίνακα A_{PNN} διαστάσεων $2 \times N$ και της εξής μορφής (Πίνακας 5-7):

Πίνακας 5-7. Αντιστοιχία παραδειγμάτων εκπαίδευσης προς κλάσεις ταξινόμησης στο PNN

	x_1	x_2	...	x_N
κλάση αποδοχής k_1	1	0	...	0
κλάση απόρριψης k_2	0	1	...	1

Η έξοδος του στρώματος αθροίσματος του νευρωνικού δικτύου συνίσταται στο γινόμενο των πινάκων A_{PNN} και A_{corr} , δηλαδή σε έναν πίνακα A_{class} διαστάσεων 2×1 και της εξής μορφής (Πίνακας 5-8):

Πίνακας 5-8. Αναπαράσταση της εξόδου του στρώματος αθροίσματος του PNN

r_1	συνολική ομοιότητα της y_k από προς την κλάση k_1
r_2	συνολική ομοιότητα της y_k από προς την κλάση k_2

Οι τιμές αυτές του πίνακα A_{class} κανονικοποιούνται, και ο πίνακας $A_{\text{class, norm}}$ που προκύπτει θεωρείται ότι αποτελεί το ζητούμενο διάνυσμα πιθανοτήτων ταξινόμησης της υπό εξέταση περίπτωσης y_k στις κλάσεις k_1 και k_2 (Πίνακας 5-9).

Πίνακας 5-9. Κανονικοποιημένη αναπαράσταση της εξόδου του στρώματος αθροίσματος του PNN

$\frac{r_1}{r_1 + r_2}$	συνολική πιθανότητα ταξινόμησης της y_k στην κλάση k_1
$\frac{r_2}{r_1 + r_2}$	συνολική πιθανότητα ταξινόμησης της y_k στην κλάση k_2

Η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης λύσης, τόσο στο επίπεδο της μάθησης παραμέτρων όσο και στο επίπεδο της μάθησης δομής, εξετάζεται στο πλαίσιο δύο σεναρίων: στο πρώτο σενάριο εξετάζεται η πιο γενική περίπτωση ενός γράφου $n = 5$ κόμβων, άγνωστης δομής και παραμέτρων, ενώ εξετάζεται ακόμη η επίδοση της προτεινόμενης μεθόδου επίλυσης για διαφορετικά σύνολα εκπαίδευσης D , για τα οποία μπορεί να δοθεί μια υψηλού επιπέδου (*high level*) ερμηνεία. Στο δεύτερο σενάριο γίνεται εφαρμογή στην ειδική περίπτωση του γράφου γνωστής δομής του προγνωστικού επιπέδου του Σχήματος 5-5, σε συνδυασμό με την επίλυση του προβλήματος IAS.

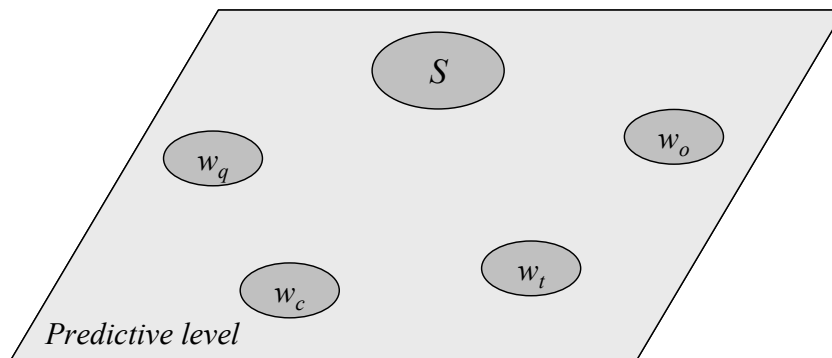
Ένα ενδιαφέρον σημείο σχετικά με την αξιολόγηση της προτεινόμενης λύσης αφορά τη σύγκριση (ειδικά στην περίπτωση του σεναρίου 2) με μια εναλλακτική, απλούστερη αντιμετώπιση του προβλήματος MAUP, η οποία συνίσταται στην κωδικοποίηση των προτιμήσεων του χρήστη μέσω απλών κανόνων (*rules*). Αυτή η σύγκριση βρίσκεται στο επίκεντρο μιας γενικότερης ερευνητικής συζήτησης γύρω από την καταλληλότερη μέθοδο αναπαράστασης της γνώσης σε προβλήματα μηχανικής μάθησης: κάποιοι ερευνητές υποστηρίζουν ότι η γνώση κωδικοποιείται καλύτερα με τη μορφή κανόνων ([25],[26],[27]), κάποιοι άλλοι υποστηρίζουν ότι ποιοτικά (όπως είναι τα πιθανολογικά) μοντέλα παρέχουν μια πιο ακριβή και εύρωστη αναπαράσταση της γνώσης ([28],[29],[30]). Σε γενικές γραμμές, έχει υποστηριχθεί ότι το βασικό πλεονέκτημα σχημάτων αναπαράστασης βασισμένων σε κανόνες είναι η *δομοστοιχείωση (modularity)* που παρέχουν, καθώς και η απλή διαδικασία ερμηνείας που συνεπάγονται ([25],[31]). Από την άλλη μεριά, υποστηρίζεται ότι οι μεθοδολογίες βασισμένες σε κανόνες επιβάλλουν ισχυρούς περιορισμούς στα είδη των εξαρτήσεων που μπορούν να αναπαρασταθούν αποτελεσματικά, και ότι η αφανής φύση των παραδοχών που αυτά εμπεριέχουν έχει συμβάλλει στη διάδοση ενός ‘μύθου’ σχετικά με την επεκτασιμότητά τους ([30]). Το θέμα αυτό θα συζητηθεί αναλυτικότερα στις επόμενες παραγράφους.

5.5.2. Σενάριο 1

5.5.2.1. Περιγραφή σεναρίου

Θεωρούμε ότι ο ‘χώρος’ των παραμέτρων του προφίλ του χρήστη μοντελοποιείται σύμφωνα με το μπεϋζιανό δίκτυο που απεικονίζεται στο Σχήμα 5-12, όπου η απουσία τόξων στο δίκτυο υποδηλώνει την άγνωστη δομή του γράφου. Ας σημειωθεί ότι ένα

τέτοιο μπεϋζιανό δίκτυο χαρακτηρίζει κάθε δυνατό πλαίσιο χρήσης, c_1 και c_2 , στο παρόν σενάριο όμως θα χρησιμοποιηθεί μόνο το δίκτυο του πλαισίου χρήσης c_2 .



Σχήμα 5-12. Αγνώστη δομή του γράφου στο προγνωστικό επίπεδο

Θεωρούμε 4 διαφορετικές υπηρεσίες:

$$S = \{\text{voice call, video call, video stream, web browsing}\} = \{s_1, s_2, s_3, s_4\}, n_s = 4.$$

Θεωρούμε ακόμη ότι το σύνολο παραδειγμάτων εκπαίδευσης D το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για τη μάθηση της δομής και των παραμέτρων του δικτύου αυτού συγκροτείται από απαντήσεις του χρήστη σχετικά με την αποδοχή ή την απόρριψη διαφορετικών μεταθέσεων των συντελεστών w_q, w_o, w_t, w_c για διάφορους συνδυασμούς υπηρεσίας (S) και πλαισίου χρήσης (C) (Πίνακας 5-10).

Πίνακας 5-10. Σύνολο παραδειγμάτων εκπαίδευσης D για το σενάριο 1

x	w_q	w_c	w_t	w_o	S	C	<i>User approval</i>
x_1	0,8	0,2	0,4	0,6	s_1	c_2	'accept'
x_2	0,2	0,8	0,4	0,6	s_1	c_2	'reject'
x_3	0,6	0,2	0,4	0,8	s_2	c_2	'accept'
x_4	0,4	0,8	0,6	0,2	s_2	c_2	'reject'
x_5	0,6	0,2	0,4	0,8	s_3	c_2	'accept'
x_6	0,4	0,8	0,6	0,2	s_3	c_2	'reject'
x_7	0,4	0,2	0,6	0,8	s_4	c_2	'accept'
x_8	0,2	0,8	0,4	0,6	s_4	c_2	'reject'

Στόχος μας είναι η μάθηση της δομής (αιτιακών σχέσεων) και των παραμέτρων (βαθμών εξάρτησης) του μπεϋζιανού δικτύου του Σχήματος 5-12, ώστε αυτό να αναπαριστά όσο το δυνατόν ακριβέστερα τη γνώση που εμπεριέχεται στο σύνολο εκπαίδευσης D . Αυτό επιτυγχάνεται με εφαρμογή της μεθόδου συνολικής λύσης που

περιγράφεται στην παράγραφο 5.4.2.3, ενώ τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια.

5.5.2.2. Αποτελέσματα – συζήτηση

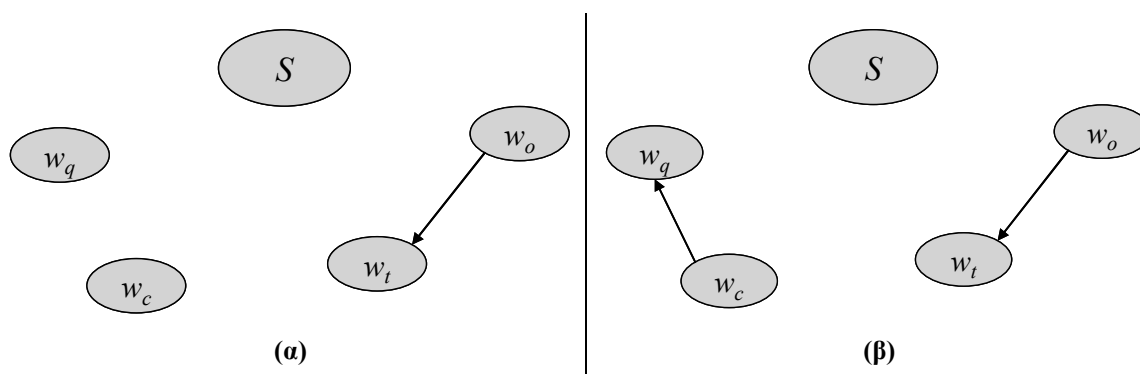
Η από κοινού συνάρτηση κατανομής πιθανότητας $P(w_q, w_c, w_t, w_o, S)$ που χαρακτηρίζει καθένα από τα δύο θεωρούμενα πλαίσια χρήσης ($c_1 = \{\text{leisure}\}$ και $c_2 = \{\text{business}\}$) έχει αρχικά τη μορφή του Πίνακα 5-5. Με χρήση του συνόλου παραδειγμάτων εκπαίδευσης D και με εφαρμογή της μεθόδου που περιγράφηκε αναλυτικά στις παραγράφους 5.4.1 και 5.5.1, οι εγγραφές του πίνακα αυτού προσαρμόζονται ως εξής (Πίνακας 5-11):

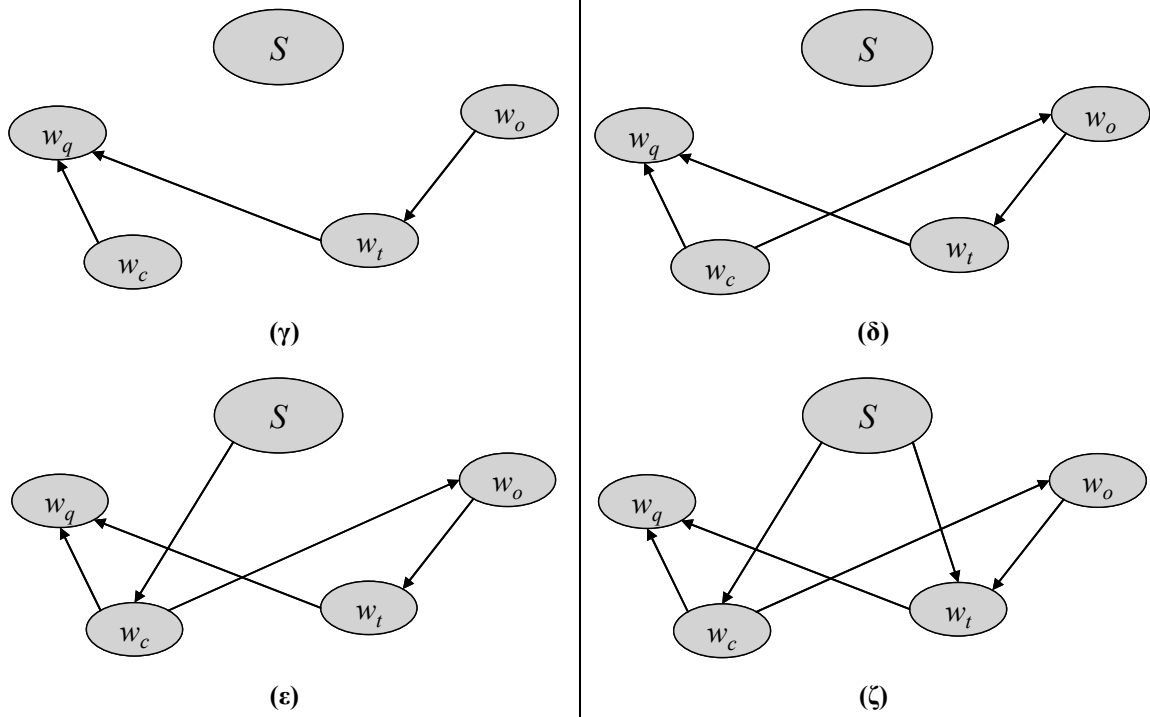
Πίνακας 5-11. Προσαρμοσμένος πίνακας κατανομής πιθανότητας $P(w_q, w_c, w_t, w_o, S)$

w_q	w_c	w_t	w_o	S	P	w_q	w_c	w_t	w_o	S	P
1	2	3	4	S_1	0,0167	1	2	3	4	S_3	0,0163
1	2	4	3	S_1	0,0048	1	2	4	3	S_3	0,0038
1	3	2	4	S_1	0,0193	1	3	2	4	S_3	0,0193
1	3	4	2	S_1	0,0175	1	3	4	2	S_3	0,0162
1	4	2	3	S_1	0,0207	1	4	2	3	S_3	0,0207
1	4	3	2	S_1	0,0202	1	4	3	2	S_3	0,0196
2	1	3	4	S_1	0,0029	2	1	3	4	S_3	0,0027
2	1	4	3	S_1	0,0016	2	1	4	3	S_3	0,0011
2	3	1	4	S_1	0,0187	2	3	1	4	S_3	0,0193
2	3	4	1	S_1	0,0052	2	3	4	1	S_3	0,0042
2	4	1	3	S_1	0,0203	2	4	1	3	S_3	0,0207
2	4	3	1	S_1	0,0191	2	4	3	1	S_3	0,0184
3	1	2	4	S_1	0,0027	3	1	2	4	S_3	0,0031
3	1	4	2	S_1	0,0005	3	1	4	2	S_3	0,0003
3	2	1	4	S_1	0,0052	3	2	1	4	S_3	0,0167
3	2	4	1	S_1	0,0019	3	2	4	1	S_3	0,0015
3	4	1	2	S_1	0,0194	3	4	1	2	S_3	0,0198
3	4	2	1	S_1	0,0186	3	4	2	1	S_3	0,0187
4	1	2	3	S_1	0,0015	4	1	2	3	S_3	0,0020
4	1	3	2	S_1	0,0008	4	1	3	2	S_3	0,0009
4	2	1	3	S_1	0,0040	4	2	1	3	S_3	0,0049
4	2	3	1	S_1	0,0021	4	2	3	1	S_3	0,0022
4	3	1	2	S_1	0,0166	4	3	1	2	S_3	0,0173
4	3	2	1	S_1	0,0050	4	3	2	1	S_3	0,0053
1	2	3	4	S_2	0,0163	1	2	3	4	S_4	0,0053

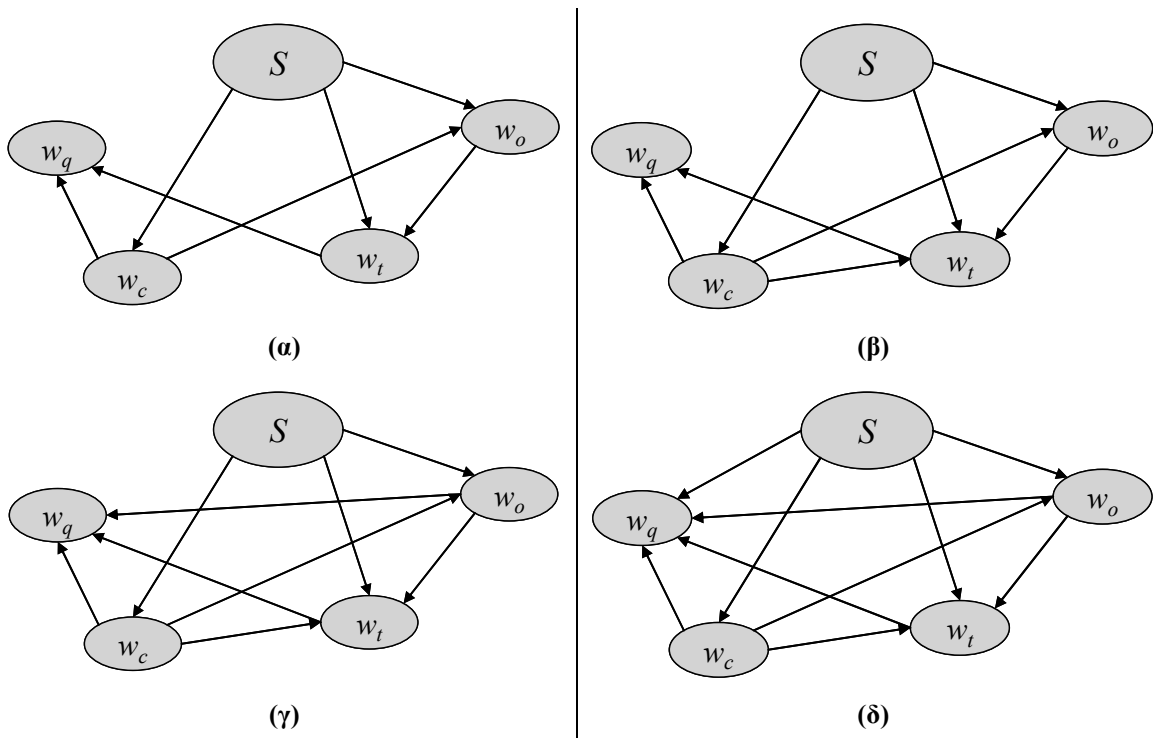
w_q	w_c	w_t	w_o	S	p	w_q	w_c	w_t	w_o	S	p
1	2	4	3	S_2	0,0038	1	2	4	3	S_4	0,0039
1	3	2	4	S_2	0,0193	1	3	2	4	S_4	0,0190
1	3	4	2	S_2	0,0162	1	3	4	2	S_4	0,0169
1	4	2	3	S_2	0,0207	1	4	2	3	S_4	0,0206
1	4	3	2	S_2	0,0196	1	4	3	2	S_4	0,0201
2	1	3	4	S_2	0,0028	2	1	3	4	S_4	0,0024
2	1	4	3	S_2	0,0011	2	1	4	3	S_4	0,0010
2	3	1	4	S_2	0,0193	2	3	1	4	S_4	0,0187
2	3	4	1	S_2	0,0042	2	3	4	1	S_4	0,0050
2	4	1	3	S_2	0,0207	2	4	1	3	S_4	0,0203
2	4	3	1	S_2	0,0185	2	4	3	1	S_4	0,0190
3	1	2	4	S_2	0,0031	3	1	2	4	S_4	0,0027
3	1	4	2	S_2	0,0003	3	1	4	2	S_4	0,0005
3	2	1	4	S_2	0,0167	3	2	1	4	S_4	0,0053
3	2	4	1	S_2	0,0015	3	2	4	1	S_4	0,0021
3	4	1	2	S_2	0,0198	3	4	1	2	S_4	0,0196
3	4	2	1	S_2	0,0187	3	4	2	1	S_4	0,0189
4	1	2	3	S_2	0,0020	4	1	2	3	S_4	0,0019
4	1	3	2	S_2	0,0009	4	1	3	2	S_4	0,0012
4	2	1	3	S_2	0,0049	4	2	1	3	S_4	0,0045
4	2	3	1	S_2	0,0022	4	2	3	1	S_4	0,0027
4	3	1	2	S_2	0,0173	4	3	1	2	S_4	0,0171
4	3	2	1	S_2	0,0053	4	3	2	1	S_4	0,0163

Στη συνέχεια, εφαρμόζεται η μέθοδος που περιγράφηκε στην παράγραφο 5.4.2.2 και υπολογίζονται σε κάθε βήμα (i) εκτέλεσης του αλγορίθμου οι δικτυακές δομές του Σχήματος 5-13 (όπου τα τμήματα (α), (β), (γ), (δ), (ε) και (ζ) αντιστοιχούν στα βήματα εκτέλεσης 1 έως 6) και του Σχήματος 5-14 (όπου τα τμήματα (α), (β), (γ) και (δ) αντιστοιχούν στα βήματα εκτέλεσης 7 έως 10):





Σχήμα 5-13. Αποτελέσματα σεναρίου 1: υπολογιζόμενες δικτυακές δομές σε κάθε βήμα (1 έως 6) του αλγορίθμου



Σχήμα 5-14. Αποτελέσματα σεναρίου 1: υπολογιζόμενες δικτυακές δομές σε κάθε βήμα (7 έως 10) του αλγορίθμου

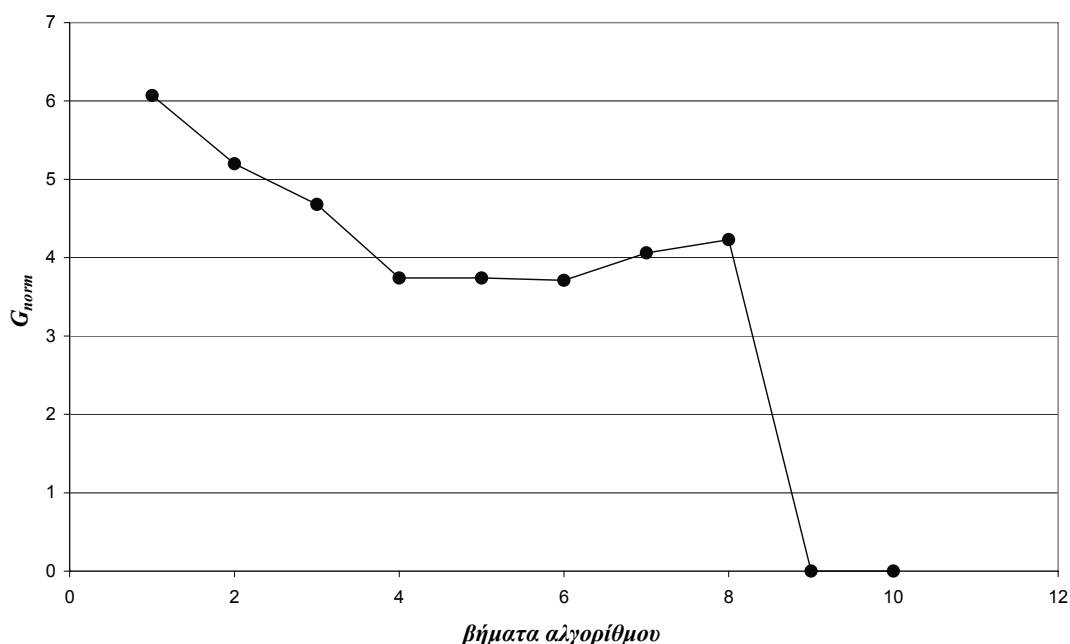
Σε κάθε βήμα εκτέλεσης του αλγορίθμου προστίθεται κι ένα τόξο στο γράφο. Ας σημειωθεί ότι καμία από τις προκύπτουσες δομές δεν περιέχει κατευθυνόμενους κύκλους. Η δομή που υπολογίζεται σε κάθε βήμα αποτιμάται σύμφωνα με τα όσα

περιγράφηκαν στην παράγραφο 5.4.2.1, και μια κανονικοποιημένη μορφή της αποτίμησης αυτής (G_{norm}) παρουσιάζεται στον Πίνακα 5-12. Ας σημειωθεί ότι η G_{norm} υπολογίζεται ως ένα σταθμισμένο άθροισμα των αποστάσεων που προκύπτουν για κάθε εκτέλεση της διασταυρωτικής επικύρωσης (σε όλες τις περιπτώσεις του D), και αποτελεί ένα μέτρο αντιστρόφως ανάλογο προς το λογάριθμο $\log P(D|S^h)$.

Πίνακας 5-12. Αποτελέσματα σεναρίου 1: αποτίμηση δικτυακών δομών σε κάθε βήμα του αλγορίθμου

i	G_{norm}	i	G_{norm}
1	6,07	6	3,71
2	5,20	7	4,06
3	4,68	8	4,23
4	3,74	9	~ 0
5	3,74	10	~ 0

Οι τιμές αυτές της G_{norm} αναπαρίστανται γραφικά στο Σχήμα 5-15, όπου στον άξονα x σημειώνονται τα βήματα εκτέλεσης του αλγορίθμου (1 έως 10), και στον άξονα y η αποτίμηση G_{norm} .



Σχήμα 5-15. Αποτελέσματα σεναρίου 1: γραφική αναπαράσταση της G_{norm} σε κάθε βήμα του αλγορίθμου

Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι γενικά η προσθήκη τόξων στο γράφο βελτιώνει την αποτίμηση G_{norm} μέχρι και το βήμα 6, στη συνέχεια επέρχεται μια μικρή επιδείνωση (βήματα 7 και 8), και τελικά (βήματα 9 και 10) παρατηρείται πλήρης ταύτιση των προβλέψεων των αντίστοιχων δομών σε ό,τι αφορά τις περιπτώσεις του συνόλου D και τη διαμορφωμένη κατανομή πιθανότητας $P(w_q, w_c, w_t, w_o, S)$ (Πίνακας 5-11). Πού οφείλεται όμως αυτή η απότομη ‘σύγκλιση’ των δομών που προκύπτουν στα βήματα 9 και 10 με τις προβλέψεις της $P(w_q, w_c, w_t, w_o, S)$; Μπορούμε πράγματι να θεωρήσουμε ότι η δομή που απεικονίζεται στο Σχήμα 5-14 (δ) είναι η βέλτιστη; Είναι δηλαδή εκείνη που αναπαριστά με τον καλύτερο τρόπο τις αιτιακές σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών w_i και S ;

Η απάντηση είναι πως όχι, και αυτό διότι η λύση που προτάθηκε στην παράγραφο 5.4.2.3, όπως και κάθε μέθοδος μη-επιβλεπόμενης μάθησης (*unsupervised learning*) δεν μπορεί να αποφύγει την ‘παγίδα’ της υπερβολικής προσαρμογής στα δεδομένα (*overfitting*). Αυτό που συμβαίνει στα βήματα 9 και 10 είναι ότι η προσθήκη επιπλέον τόξων ουσιαστικά εισάγει πλεονάζουσα πληροφορία στο μοντέλο, και έχει σαν αποτέλεσμα οι απλοποιήσεις που πραγματοποιούνται να αναιρούν την έννοια της δεσμευμένης εξάρτησης. Για παράδειγμα, σύμφωνα με τη δομή του Σχήματος 5-14 (δ) η $P(w_q, w_c, w_t, w_o, S)$ γράφεται:

$$\begin{aligned} P(w_q, w_c, w_t, w_o, S) &= \\ &= P(w_q | w_c, w_t, w_o, S) \cdot P(w_c | S) \cdot P(w_t | w_c, w_o, S) \cdot P(w_o | w_c, S) \cdot P(S) \\ &= \\ &= P(w_c, w_o, S) \cdot P(w_t | w_c, w_o, S) \cdot P(w_q | w_c, w_t, w_o, S) = \\ &= P(w_t, w_c, w_o, S) \cdot P(w_q | w_c, w_t, w_o, S) = \\ &= P(w_q, w_c, w_t, w_o, S) \end{aligned}$$

Είναι φανερό λοιπόν πως οι δομές που προκύπτουν στα βήματα εκτέλεσης 9 και 10 του αλγορίθμου δίνουν μια πλασματική εικόνα σύγκλισης στα δεδομένα. Επιστρέφοντας στον Πίνακα 5-12, συμπεραίνουμε ότι η βέλτιστη δομή είναι εκείνη η οποία συμπίπτει με το πρώτο ελάχιστο στην τιμή της G_{norm} , δηλαδή η δομή του βήματος εκτέλεσης 6, και του Σχήματος 5-13 (ζ).

Στο συμπέρασμα αυτό καταλήξαμε εισάγοντας την απαίτηση για καλή προσαρμογή στα δεδομένα από τη μια μεριά (μικρή τιμή της G_{norm}), και για σχετικά απλή αναπαράσταση των αιτιακών σχέσεων στο πιθανολογικό μας μοντέλο (αραιός γράφος) από την άλλη. Πώς μπορούμε όμως να επαληθεύσουμε καθολικά την

ορθότητα της υπολογιζόμενης λύσης; Πέρα από το να βασιστούμε σε κριτήρια όπως αυτό που περιγράφηκε στην παράγραφο 5.4.2.1, το μόνο που μπορούμε να κάνουμε είναι μια υψηλού επιπέδου (διαισθητική) σύγκριση ανάμεσα σε κάποιες γενικές εξαρτήσεις που απεικονίζονται στην υπολογιζόμενη βέλτιστη δομή και σε ορισμένους γενικούς κανόνες που μπορούμε να θεωρήσουμε ότι διέπουν τα διαθέσιμα δεδομένα (σύνολο D). Ως προς αυτό το σημείο, η δομή του Σχήματος 5-13 (ζ) επαληθεύει τη λογική παραδοχή ότι η μεταβλητή S λειτουργεί ως γονέας (αίτια) σε σχέση με τις μεταβλητές w_i , και ότι οι τελευταίες εμφανίζουν εξαρτήσεις χαρακτηριστικές των ζευγών ‘ποιότητα-κόστος’, ‘πάροχος-τεχνολογία’, ‘ποιότητα-τεχνολογία’ και ‘κόστος-πάροχος’.

Μπορούμε ακόμη να εξετάσουμε την επίδοση του προτεινόμενου αλγορίθμου σε σύνολα εκπαίδευσης που εμπεριέχουν κάποιες προφανείς σχέσεις ανεξαρτησίας, και να ελέγξουμε την απεικόνιση των σχέσεων στην προκύπτουσα βέλτιστη δομή. Για το σκοπό αυτό, κατασκευάζουμε ένα νέο σύνολο παραδειγμάτων εκπαίδευσης D' (Πίνακας 5-13), όπου οι απαντήσεις του χρήστη είναι ανεξάρτητες της υπηρεσίας.

Πίνακας 5-13. Σύνολο παραδειγμάτων εκπαίδευσης D' για το σενάριο 1

x	w_q	w_c	w_t	w_o	S	C	<i>User approval</i>
x_1	0,8	0,6	0,2	0,4	s_1	c_2	‘accept’
x_2	0,2	0,4	0,6	0,8	s_1	c_2	‘reject’
x_3	0,8	0,6	0,2	0,4	s_2	c_2	‘accept’
x_4	0,2	0,4	0,6	0,8	s_2	c_2	‘reject’
x_5	0,8	0,6	0,2	0,4	s_3	c_2	‘accept’
x_6	0,2	0,4	0,6	0,8	s_3	c_2	‘reject’
x_7	0,8	0,6	0,2	0,4	s_4	c_2	‘accept’
x_8	0,2	0,4	0,6	0,8	s_4	c_2	‘reject’

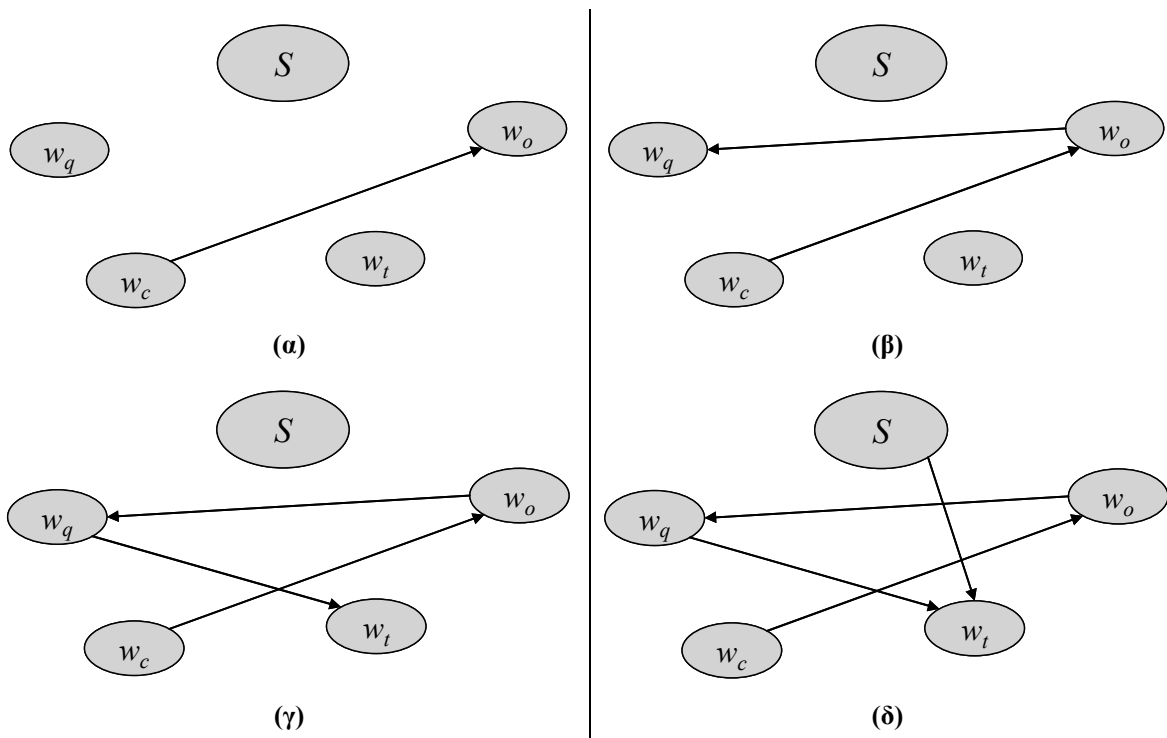
Με χρήση του συνόλου εκπαίδευσης D' , η από κοινού συνάρτηση κατανομής πιθανότητας $P(w_q, w_c, w_t, w_o, S)$ διαμορφώνεται ως εξής (Πίνακας 5-14):

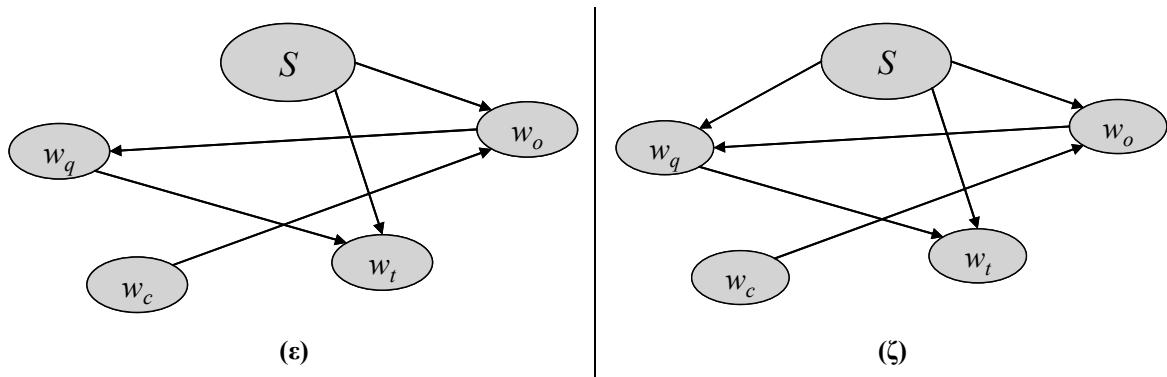
Πίνακας 5-14. Προσαρμοσμένος πίνακας κατανομής πιθανότητας $P(w_q, w_c, w_t, w_o, S)$ για το σύνολο D'

w_q	w_c	w_t	w_o	S	P	w_q	w_c	w_t	w_o	S	P
1	2	3	4	S_1	0,0203	1	2	3	4	S_3	0,0203
1	2	4	3	S_1	0,0208	1	2	4	3	S_3	0,0208
1	3	2	4	S_1	0,0188	1	3	2	4	S_3	0,0188
1	3	4	2	S_1	0,0198	1	3	4	2	S_3	0,0198
1	4	2	3	S_1	0,0174	1	4	2	3	S_3	0,0174
1	4	3	2	S_1	0,0176	1	4	3	2	S_3	0,0176
2	1	3	4	S_1	0,0194	2	1	3	4	S_3	0,0194
2	1	4	3	S_1	0,0199	2	1	4	3	S_3	0,0199
2	3	1	4	S_1	0,0162	2	3	1	4	S_3	0,0162
2	3	4	1	S_1	0,0165	2	3	4	1	S_3	0,0165
2	4	1	3	S_1	0,0041	2	4	1	3	S_3	0,0041
2	4	3	1	S_1	0,0037	2	4	3	1	S_3	0,0037
3	1	2	4	S_1	0,0167	3	1	2	4	S_3	0,0167
3	1	4	2	S_1	0,0171	3	1	4	2	S_3	0,0171
3	2	1	4	S_1	0,0047	3	2	1	4	S_3	0,0047
3	2	4	1	S_1	0,0044	3	2	4	1	S_3	0,0044
3	4	1	2	S_1	0,0014	3	4	1	2	S_3	0,0014
3	4	2	1	S_1	0,0008	3	4	2	1	S_3	0,0008
4	1	2	3	S_1	0,0035	4	1	2	3	S_3	0,0035
4	1	3	2	S_1	0,0032	4	1	3	2	S_3	0,0032
4	2	1	3	S_1	0,0020	4	2	1	3	S_3	0,0020
4	2	3	1	S_1	0,0011	4	2	3	1	S_3	0,0011
4	3	1	2	S_1	0,0005	4	3	1	2	S_3	0,0005
4	3	2	1	S_1	0	4	3	2	1	S_3	0
1	2	3	4	S_2	0,0203	1	2	3	4	S_4	0,0203
1	2	4	3	S_2	0,0208	1	2	4	3	S_4	0,0208
1	3	2	4	S_2	0,0188	1	3	2	4	S_4	0,0188
1	3	4	2	S_2	0,0198	1	3	4	2	S_4	0,0198
1	4	2	3	S_2	0,0174	1	4	2	3	S_4	0,0174
1	4	3	2	S_2	0,0176	1	4	3	2	S_4	0,0176
2	1	3	4	S_2	0,0194	2	1	3	4	S_4	0,0194
2	1	4	3	S_2	0,0199	2	1	4	3	S_4	0,0199
2	3	1	4	S_2	0,0162	2	3	1	4	S_4	0,0162
2	3	4	1	S_2	0,0165	2	3	4	1	S_4	0,0165
2	4	1	3	S_2	0,0041	2	4	1	3	S_4	0,0041
2	4	3	1	S_2	0,0037	2	4	3	1	S_4	0,0037

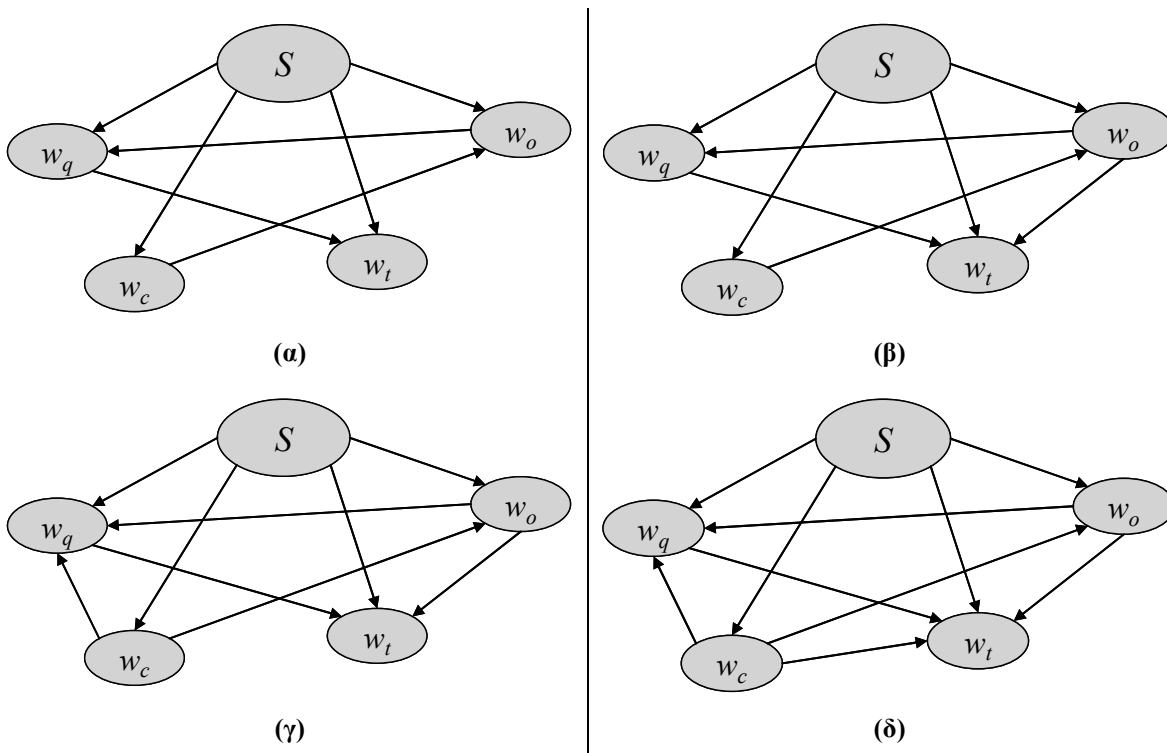
w_q	w_c	w_t	w_o	S	p	w_q	w_c	w_t	w_o	S	p
3	1	2	4	S_2	0,0167	3	1	2	4	S_4	0,0167
3	1	4	2	S_2	0,0171	3	1	4	2	S_4	0,0171
3	2	1	4	S_2	0,0047	3	2	1	4	S_4	0,0047
3	2	4	1	S_2	0,0044	3	2	4	1	S_4	0,0044
3	4	1	2	S_2	0,0014	3	4	1	2	S_4	0,0014
3	4	2	1	S_2	0,0008	3	4	2	1	S_4	0,0008
4	1	2	3	S_2	0,0035	4	1	2	3	S_4	0,0035
4	1	3	2	S_2	0,0032	4	1	3	2	S_4	0,0032
4	2	1	3	S_2	0,0020	4	2	1	3	S_4	0,0020
4	2	3	1	S_2	0,0011	4	2	3	1	S_4	0,0011
4	3	1	2	S_2	0,0005	4	3	1	2	S_4	0,0005
4	3	2	1	S_2	0	4	3	2	1	S_4	0

Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι εξής δικτυακές δομές, σε κάθε βήμα εκτέλεσης του αλγορίθμου (Σχήμα 5-16 όπου τα τμήματα (α), (β), (γ), (δ), (ε), (ζ) αντιστοιχούν στα βήματα εκτέλεσης 1 έως 6, και Σχήμα 5-17 όπου τα τμήματα (α), (β), (γ), (δ) αντιστοιχούν στα βήματα εκτέλεσης 7 έως 10):





Σχήμα 5-16. Αποτελέσματα σεναρίου 1: υπολογιζόμενες δικτυακές δομές για το σύνολο D' σε κάθε βήμα (1 έως 6) του αλγορίθμου

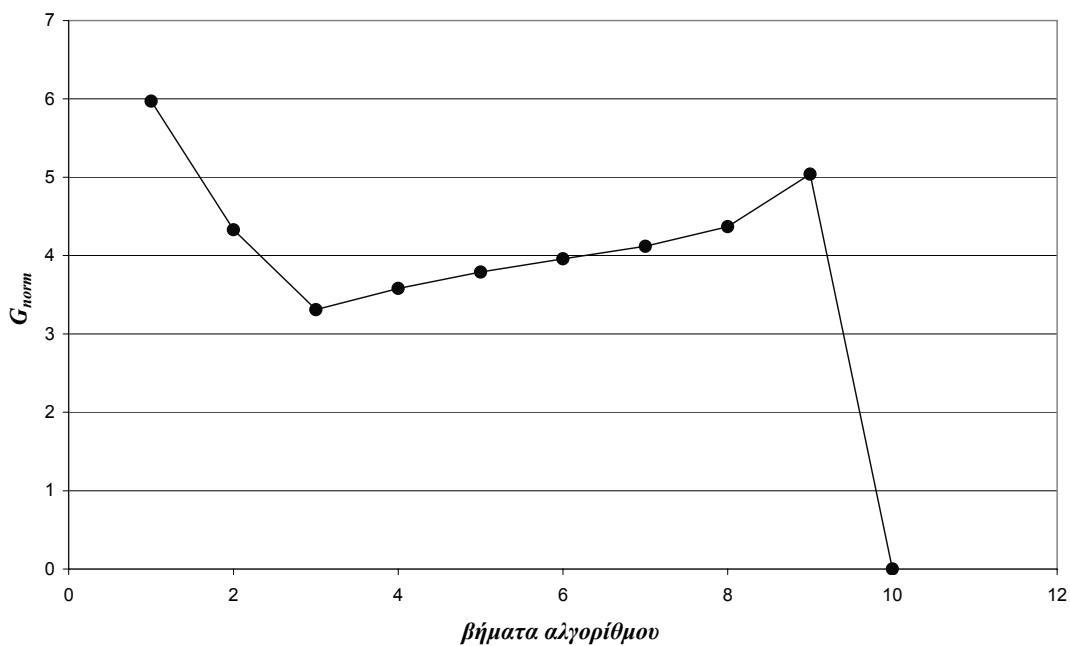


Σχήμα 5-17. Αποτελέσματα σεναρίου 1: υπολογιζόμενες δικτυακές δομές για το σύνολο D' σε κάθε βήμα (7 έως 10) του αλγορίθμου

Κάθε μια από αυτές τις δομές αποτιμάται κατά G_{norm} . Τα σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-15 και αναπαρίστανται γραφικά στο Σχήμα 5-18. Υπενθυμίζουμε ότι η G_{norm} αποτελεί ένα μέτρο αντιστρόφως ανάλογο προς το λογάριθμο $\log P(D|S^h)$.

Πίνακας 5-15. Αποτελέσματα σεναρίου 1: αποτίμηση δικτυακών δομών για το σύνολο D' σε κάθε βήμα του αλγορίθμου

i	G_{norm}	i	G_{norm}
1	5,97	6	3,96
2	4,33	7	4,12
3	3,31	8	4,37
4	3,58	9	5,04
5	3,79	10	~ 0



Σχήμα 5-18. Αποτελέσματα σεναρίου 1: γραφική αναπαράσταση της G_{norm} για το σύνολο D' σε κάθε βήμα του αλγορίθμου

Εφαρμόζοντας την ίδια συλλογιστική όπως και στα προηγούμενα, συμπεραίνουμε ότι η βέλτιστη δομή είναι εκείνη η οποία συμπίπτει με το πρώτο ελάχιστο στην τιμή της G_{norm} , δηλαδή η δομή του βήματος εκτέλεσης 3, και του Σχήματος 5-15 (γ), όπου η ανεξαρτησία της μεταβλητής S σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες έχει πράγματι βρεθεί. Με παρόμοιο τρόπο μπορεί να επαληθευτεί η εγκυρότητα της υπολογιζόμενης από τον αλγόριθμο δομής, χρησιμοποιώντας διαφορετικά σύνολα εκπαίδευσης στα οποία εμπεριέχεται κάποια υψηλού επιπέδου και εύκολα αποκωδικοποιήσιμη γνώση. Για πιο σύνθετα σύνολα εκπαίδευσης, όπως το αρχικό D που χρησιμοποιήθηκε στο σενάριο αυτό, απαιτείται ο συνδυασμός των αποτιμήσεων που υπολογίζονται από τον αλγόριθμο και της γνώσης που μπορεί να παρασχεθεί από κάποιον ειδικό (*domain*

expert). Είναι γενικά πολύ δύσκολο να αναπτυχθούν μηχανισμοί για την αυτόματη (και μη-επιβλεπόμενη) παραγωγή ικανοποιητικών αποτελεσμάτων σχετικά με τη μάθηση και την αναπαράσταση των αιτιακών σχέσεων σε ένα πιθανολογικό μοντέλο, χωρίς κάποια, έστω και αφηρημένη, αντίληψη του τρόπου λειτουργίας του μοντέλου.

5.5.3. Σενάριο 2

5.5.3.1. Περιγραφή σεναρίου

Στο σενάριο που περιγράφεται στη συνέχεια θεωρούμε 3 διαφορετικές υπηρεσίες, δηλαδή $S = \{web\ browsing, voice\ call, video\ stream\} = \{s_1, s_2, s_3\}$, $n_s = 3$. Θεωρούμε ακόμη ότι ο ‘χώρος’ των παραμέτρων του προφίλ του χρήστη μοντελοποιείται σύμφωνα με το μπεϋζιανό δίκτυο που απεικονίζεται στο Σχήμα 5-5. Θα παρουσιαστεί ένα σενάριο προσομοίωσης των δραστηριοτήτων και των αιτήσεων για υπηρεσία ενός μέσου χρήστη X , του οποίου οι προτιμήσεις προσεγγίζονται από την εξής (υψηλού επιπέδου – *high level*) περιγραφή (Πίνακας 5-16):

Πίνακας 5-16. Προτιμήσεις χρήση στο σενάριο 2 (υποκρύπτουσα γνώση)

	$C = \{leisure\}$	$C = \{business\}$
Γενικές προτιμήσεις	κόστος πιο σημαντικό από την ποιότητα	ποιότητα πιο σημαντική από το κόστος
$S = \{voice\ call\}$	–	–
$S = \{video\ stream\}$	τεχνολογία πιο σημαντική από τον πάροχο	πάροχος πιο σημαντικός από την τεχνολογία
$S = \{web\ browsing\}$	τεχνολογία πιο σημαντική από τον πάροχο	πάροχος πιο σημαντικός από την τεχνολογία

Με βάση αυτές τις προτιμήσεις, ο χρήστης παρέχει τις ακόλουθες απαντήσεις (Πίνακας 5-17) ερωτώμενος σχετικά με διαφορετικές μεταθέσεις των συντελεστών w_q , w_o , w_i , w_c και για διάφορους συνδυασμούς υπηρεσίας (S) και πλαισίου χρήσης (C), συγκροτώντας έτσι το σύνολο παραδειγμάτων εκπαίδευσης D (Πίνακας 5-18).

Πίνακας 5-17. Απαντήσεις του χρήστη σε τυχαία επιλεγμένες ερωτήσεις

Πλαίσιο χρήσης C	Υπηρεσία S	Αποδοχή				Απόρριψη			
		Q	C	O	T	Q	C	O	T
Leisure	Voice call	4	1	3	2	1	4	2	3
	Video streaming	4	1	2	3	2	4	1	3
	Web browsing	4	2	3	1	1	3	4	2
Business	Voice call	1	4	2	3	4	1	2	3
	Video streaming	2	4	1	3	3	1	4	2
	Web browsing	3	4	1	2	4	1	2	3

Πλέον των προτιμήσεων αυτών, ο χρήστης έχει ορίσει τον πάροχο ‘Oper. #1’ ως προτιμώμενο και την τεχνολογία ‘WLAN’ ως προτιμώμενη για τις υπηρεσίες video streaming και voice call. Το χαμηλότερο επίπεδο ποιότητας που έχει οριστεί για κάθε υπηρεσία είναι το επίπεδο 1, ενώ το μέγιστο επιτρεπόμενο είναι το επίπεδο 5.

Πίνακας 5-18. Σύνολο παραδειγμάτων εκπαίδευσης D για το σενάριο 2

x	w_q	w_c	w_t	w_o	S	C	User approval
x_1	0,2	0,8	0,4	0,6	s_2	c_1	‘accept’
x_2	0,8	0,2	0,6	0,4	s_2	c_1	‘reject’
x_3	0,2	0,8	0,6	0,4	s_3	c_1	‘accept’
x_4	0,6	0,2	0,8	0,4	s_3	c_1	‘reject’
x_5	0,2	0,6	0,4	0,8	s_1	c_1	‘accept’
x_6	0,8	0,4	0,2	0,6	s_1	c_1	‘reject’
x_7	0,8	0,2	0,6	0,4	s_2	c_2	‘accept’
x_8	0,2	0,8	0,6	0,4	s_2	c_2	‘reject’
x_9	0,6	0,2	0,8	0,4	s_3	c_2	‘accept’
x_{10}	0,4	0,8	0,2	0,6	s_3	c_2	‘reject’
x_{11}	0,4	0,2	0,8	0,6	s_1	c_2	‘accept’
x_{12}	0,2	0,8	0,6	0,4	s_1	c_2	‘reject’

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5-17, ο χρήστης απαντά σε ένα ζεύγος ‘ερωτήσεων’ για κάθε συνδυασμό υπηρεσίας και πλαισίου χρήσης. Η πρώτη ‘ερώτηση’ - μετάθεση των w_i παράγεται κατά τυχαίο τρόπο, ενώ η δεύτερη επιλέγεται κατάλληλα ώστε να διαφέρει σημαντικά από την πρώτη. Σημειώνουμε επίσης ότι στον Πίνακα 5-17 οι στήλες Q, C, O, T αντιστοιχούν κατά σειρά στις παραμέτρους ‘ποιότητα’, ‘κόστος’,

‘πάροχος δικτύου’ και ‘τεχνολογία’, και ότι οι αντίστοιχοι συνελεστές w_q , w_c , w_o , w_i παίρνουν τις τιμές 0.8, 0.6, 0.4, 0.2 ανάλογα με την ανάθεσή τους στην πρώτη, δεύτερη, τρίτη ή τέταρτη σειρά προτεραιότητας. Σημειώνουμε επίσης ότι ο X θεωρείται ένας μέσος χρήστης, χωρίς ιδιαίτερες και εξειδικευμένες γνώσεις γύρω από τις παραμέτρους που θέτει σε σειρά προτεραιότητας. Συνεπώς, ο X ενδέχεται να δώσει μια λανθασμένη απάντηση (με αναφορά στις υποκρύπτουσες προτιμήσεις που έχουν θεωρηθεί στον Πίνακα 5-16), ή ακόμη να δώσει αντιφατικές απαντήσεις σε ερωτήσεις που του υποβάλλονται. Η προτεινόμενη μέθοδος μοντελοποίησης και εκτίμησης των προτιμήσεων του χρήστη επιχειρεί να εξομαλύνει τις πιθανές αυτές αντιφάσεις και είναι σε θέση να προβλέψει τις πιθανότερες τιμές των παραμέτρων του προφίλ ακόμη και αν ο χρήστης αποδεχτεί ή απορρίψει και τις δύο μεταθέσεις των w_i για κάποιο συνδυασμό S και C , ή αν δώσει απάντηση για μια μόνο μετάθεση ανά συνδυασμό.

Προσομοιώνουμε μια συνηθισμένη μέρα ενός μέσου χρήστη X , ο οποίος ξεκινά το πρωί από το σπίτι του, πηγαίνει στο γραφείο του και επιστρέφει το βράδυ στο σπίτι (βήμα 1: πρωί, στο σπίτι – βήμα 2: πρωί, καθ’ οδόν – βήμα 3: μεσημέρι, στο γραφείο – βήμα 4: βράδυ, στο σπίτι), κάνοντας, καθ’ όλη τη διάρκεια της μέρας χρήση διαφόρων υπηρεσιών μέσω του 4G τερματικού του. Στόχος μας είναι η μάθηση των παραμέτρων του μπεϋζιανού δικτύου μέσω του οποίου μοντελοποιείται το προφίλ του χρήστη (Σχήμα 5-5), ώστε αυτό να αναπαριστά όσο το δυνατόν ακριβέστερα τη γνώση που εμπεριέχεται στο σύνολο εκπαίδευσης D . Η εκτέλεση του σεναρίου καθώς και τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια δίνονται σε συνδυασμό με την επίλυση του προβλήματος *Ευφούς Επιλογής Πρόσβασης*, που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3. Ας σημειωθεί εδώ ότι για όλες τις υπηρεσίες που αναφέρονται στα εξής, ισχύουν σχετικά με τις απαιτήσεις τους σε εύρος ζώνης, ανά επίπεδο ποιότητας, όσα παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3 (Πίνακες 3-4 και 3-5).

Τα διαθέσιμα σημεία πρόσβασης στην περιοχή του χρήστη X σε κάθε ένα από τα 4 βήματα του σεναρίου, το διαθέσιμο εύρος ζώνης τους ($BW_{Av}(p)$), η ένδειξη ισχύος του λαμβανόμενου από αυτά σήματος ($SS(p)$) και ο πάροχος στον οποίο ανήκουν ($Op(p)$), καταγράφονται στον Πίνακα 5-19. Τα διάφορα διαθέσιμα σημεία πρόσβασης σημειώνονται με τον τύπο της υποστηριζόμενης τεχνολογίας (1: GSM, 2: UMTS, 3: WLAN, 4: DVB) και τον αύξοντα αριθμό σημείων για την αντίστοιχη τεχνολογία ως δείκτες.

Πίνακας 5-19. Δικτυακή διαθεσιμότητα στο σενάριο 2

Βήμα σεναρίου	Διαθέσιμα APs				
	p	$SS(p)$	$T(p)$	$Op(p)$	$BW_{Av}(p)$
1. πρωί, στο σπίτι	$p_{1,1}$	5	GSM	#2	44
	$p_{2,1}$	4	UMTS	#3	280
	$p_{3,1}$	3	WLAN	#3	1700
	$p_{4,1}$	4	DVB	#4	2000
2. πρωί, καθ' οδόν	$p_{1,2}$	4	GSM	#2	44
	$p_{2,2}$	4	UMTS	#1	210
	$p_{2,3}$	4	UMTS	#3	350
3. μεσημέρι, στο γραφείο	$p_{1,3}$	5	GSM	#2	44
	$p_{2,4}$	5	UMTS	#1	400
	$p_{1,4}$	4	GSM	#1	44
	$p_{3,2}$	2	WLAN	#3	1000
	$p_{4,2}$	4	DVB	#4	2000
4. βράδυ, στο σπίτι	$p_{1,1}$	5	GSM	#2	44
	$p_{2,1}$	4	UMTS	#3	280
	$p_{3,1}$	3	WLAN	#3	1700
	$p_{4,1}$	4	DVB	#4	2000

Στη συνέχεια δίνεται μια σύντομη περιγραφή των δραστηριοτήτων και των αιτήσεων για υπηρεσία του X σε κάθε βήμα του σεναρίου.

1. *πρωί, στο σπίτι*: καθώς ο X ετοιμάζεται να αναχωρήσει για τη δουλειά του, εκκινεί στο τερματικό του μια υπηρεσία web browsing, και επισκέπτεται μια σελίδα με αθλητικά νέα. Η υπηρεσία web browsing τερματίζεται στο τέλος του βήματος 1.
2. *πρωί, καθ' οδόν*: ο X βρίσκεται καθ' οδόν προς τη δουλειά του. Εκκινεί μια κλήση (voice call) προς ένα συνάδελφό του για να ειδοποιήσει ότι θα φτάσει αργοπορημένος. Η υπηρεσία αυτή τερματίζεται στο τέλος του βήματος 2.
3. *μεσημέρι, στο γραφείο*: ο X βρίσκεται στο γραφείο του και εκκινεί μια υπηρεσία video streaming προκειμένου να συμμετάσχει σε μια εικονοδιάσκεψη με τον προϊστάμενό του. Μετά τον τερματισμό της κλήσης αυτής πραγματοποιεί μια κλήση (voice call) προς ένα φιλικό του πρόσωπο και επισκέπτεται μια

ιστοσελίδα (web browsing) ψυχαγωγικού περιεχομένου. Και οι τρεις αυτές υπηρεσίες τερματίζονται στο τέλος του βήματος 3.

4. *βράδυ, στο σπίτι*: ο *X* επιστρέφει στο σπίτι του το βράδυ και εκκινεί μια υπηρεσία web browsing προκειμένου για τη λήψη ενός αρχείου από την εταιρική ιστοσελίδα. Η υπηρεσία αυτή τερματίζεται στο τέλος του βήματος 4.

5.5.3.2. Εκτέλεση σεναρίου

Οι πίνακες δεσμευμένων πιθανοτήτων μέσω των οποίων προσδιορίζεται η πιθανότερη τιμή της μεταβλητής *C*, σύμφωνα με τα όσα συζητήθηκαν στην παράγραφο 5.2.2.1, έχουν ως εξής (Πίνακες 5-20, 5-21, 5-22):

Πίνακας 5-20. Πίνακες δεσμευμένης πιθανότητας $P(C | T, L, CP)$, για $L = l_1$

		$L = l_1$							
		$CP = cp_1$				$CP = cp_2$			
		$T = t_1$	$T = t_2$	$T = t_3$	$T = t_4$	$T = t_1$	$T = t_2$	$T = t_3$	$T = t_4$
$C = c_1$	0,8	0,8	0,9	0,9	0,05	0,05	0,1	0,1	
$C = c_2$	0,2	0,2	0,1	0,1	0,95	0,95	0,9	0,9	

		$L = l_1$			
		$CP = cp_3$			
		$T = t_1$	$T = t_2$	$T = t_3$	$T = t_4$
$C = c_1$	0,9	0,9	0,95	0,95	
$C = c_2$	0,1	0,1	0,05	0,05	

Πίνακας 5-21. Πίνακες δεσμευμένης πιθανότητας $P(C | T, L, CP)$, για $L = l_2$

		$L = l_2$							
		$CP = cp_1$				$CP = cp_2$			
		$T = t_1$	$T = t_2$	$T = t_3$	$T = t_4$	$T = t_1$	$T = t_2$	$T = t_3$	$T = t_4$
$C = c_1$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
$C = c_2$	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	

		$L = l_2$			
		$CP = cp_3$			
		$T = t_1$	$T = t_2$	$T = t_3$	$T = t_4$
$C = c_1$	0,1	0,1	0,1	0,1	
$C = c_2$	0,9	0,9	0,9	0,9	

Πίνακας 5-22. Πίνακες δεσμευμένης πιθανότητας $P(C | T, L, CP)$, για $L = l_3$

		$L = l_3$							
		$CP = cp_1$				$CP = cp_2$			
		$T = t_1$	$T = t_2$	$T = t_3$	$T = t_4$	$T = t_1$	$T = t_2$	$T = t_3$	$T = t_4$
$C = c_1$	0,9	0,9	0,9	0,9	0,1	0,1	0,1	0,1	
$C = c_2$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,9	0,9	0,9	0,9	

		$L = l_3$			
		$CP = cp_3$			
		$T = t_1$	$T = t_2$	$T = t_3$	$T = t_4$
$C = c_1$	0,9	0,9	0,9	0,9	
$C = c_2$	0,1	0,1	0,1	0,1	

Η από κοινού συνάρτηση κατανομής πιθανότητας $P(w_i, w_c, w_l, w_o, S)$ που χαρακτηρίζει καθένα από τα δύο θεωρούμενα πλαίσια χρήσης ($c_1 = \{\text{leisure}\}$ και $c_2 = \{\text{business}\}$) παραγοντοποιείται σύμφωνα με τα όσα περιγράφονται στην παράγραφο 5.2.2.2. Οι επί μέρους πίνακες δεσμευμένων πιθανοτήτων έχουν αρχικά την εξής μορφή (Πίνακας 5-23):

Πίνακας 5-23. Αρχικός πίνακας δεσμευμένης πιθανότητας $P(w_i | S)$ στο σενάριο 2

	$S = s_1$	$S = s_2$	$S = s_3$
$w_i = 1$	$P(w_i = 1 | S = s_1) = 0.25$	$P(w_i = 1 | S = s_2) = 0.25$	$P(w_i = 1 | S = s_3) = 0.25$
$w_i = 2$	$P(w_i = 2 | S = s_1) = 0.25$	$P(w_i = 2 | S = s_2) = 0.25$	$P(w_i = 2 | S = s_3) = 0.25$
$w_i = 3$	$P(w_i = 3 | S = s_1) = 0.25$	$P(w_i = 3 | S = s_2) = 0.25$	$P(w_i = 3 | S = s_3) = 0.25$
$w_i = 4$	$P(w_i = 4 | S = s_1) = 0.25$	$P(w_i = 4 | S = s_2) = 0.25$	$P(w_i = 4 | S = s_3) = 0.25$

Με χρήση του συνόλου παραδειγμάτων εκπαίδευσης D και με εφαρμογή της μεθόδου που περιγράφηκε αναλυτικά στις παραγράφους 5.4.1 και 5.5.1, οι εγγραφές των επί μέρους πινάκων δεσμευμένων πιθανοτήτων προσαρμόζονται ως εξής (Πίνακες 5-24, 5-25, 5-26, 5-27, 5-28, 5-29, 5-30, 5-31):

Πίνακας 5-24. Προσαρμοσμένος πίνακας δεσμευμένης πιθανότητας $P(w_q | S)$, για $C = c_1$

	$S = s_1$	$S = s_2$	$S = s_3$
$w_q = 1$	$P(w_q = 1 | S = s_1) = 0.071$	$P(w_q = 1 | S = s_2) = 0.010$	$P(w_q = 1 | S = s_3) = 0.295$
$w_q = 2$	$P(w_q = 2 | S = s_1) = 0.288$	$P(w_q = 2 | S = s_2) = 0.307$	$P(w_q = 2 | S = s_3) = 0.049$
$w_q = 3$	$P(w_q = 3 | S = s_1) = 0.288$	$P(w_q = 3 | S = s_2) = 0.307$	$P(w_q = 3 | S = s_3) = 0.295$
$w_q = 4$	$P(w_q = 4 | S = s_1) = 0.352$	$P(w_q = 4 | S = s_2) = 0.375$	$P(w_q = 4 | S = s_3) = 0.360$

Πίνακας 5-25. Προσαρμοσμένος πίνακας δεσμευμένης πιθανότητας $P(w_c | S)$, για $C = c_1$

	$S = s_1$	$S = s_2$	$S = s_3$
$w_c = 1$	$P(w_c = 1 | S = s_1) = 0.288$	$P(w_c = 1 | S = s_2) = 0.375$	$P(w_c = 1 | S = s_3) = 0.360$
$w_c = 2$	$P(w_c = 2 | S = s_1) = 0.352$	$P(w_c = 2 | S = s_2) = 0.307$	$P(w_c = 2 | S = s_3) = 0.295$
$w_c = 3$	$P(w_c = 3 | S = s_1) = 0.071$	$P(w_c = 3 | S = s_2) = 0.307$	$P(w_c = 3 | S = s_3) = 0.295$
$w_c = 4$	$P(w_c = 4 | S = s_1) = 0.288$	$P(w_c = 4 | S = s_2) = 0.010$	$P(w_c = 4 | S = s_3) = 0.049$

Πίνακας 5-26. Προσαρμοσμένος πίνακας δεσμευμένης πιθανότητας $P(w_t | S)$, για $C = c_1$

	$S = s_1$	$S = s_2$	$S = s_3$
$w_t = 1$	$P(w_t = 1 | S = s_1) = 0.352$	$P(w_t = 1 | S = s_2) = 0.307$	$P(w_t = 1 | S = s_3) = 0.312$
$w_t = 2$	$P(w_t = 2 | S = s_1) = 0.071$	$P(w_t = 2 | S = s_2) = 0.375$	$P(w_t = 2 | S = s_3) = 0.312$
$w_t = 3$	$P(w_t = 3 | S = s_1) = 0.288$	$P(w_t = 3 | S = s_2) = 0.010$	$P(w_t = 3 | S = s_3) = 0.063$
$w_t = 4$	$P(w_t = 4 | S = s_1) = 0.288$	$P(w_t = 4 | S = s_2) = 0.307$	$P(w_t = 4 | S = s_3) = 0.312$

Πίνακας 5-27. Προσαρμοσμένος πίνακας δεσμευμένης πιθανότητας $P(w_o | S)$, για $C = c_1$

	$S = s_1$	$S = s_2$	$S = s_3$
$w_o = 1$	$P(w_o = 1 | S = s_1) = 0.288$	$P(w_o = 1 | S = s_2) = 0.307$	$P(w_o = 1 | S = s_3) = 0.049$
$w_o = 2$	$P(w_o = 2 | S = s_1) = 0.288$	$P(w_o = 2 | S = s_2) = 0.010$	$P(w_o = 2 | S = s_3) = 0.360$
$w_o = 3$	$P(w_o = 3 | S = s_1) = 0.352$	$P(w_o = 3 | S = s_2) = 0.375$	$P(w_o = 3 | S = s_3) = 0.295$
$w_o = 4$	$P(w_o = 4 | S = s_1) = 0.071$	$P(w_o = 4 | S = s_2) = 0.307$	$P(w_o = 4 | S = s_3) = 0.295$

Πίνακας 5-28. Προσαρμοσμένος πίνακας δεσμευμένης πιθανότητας $P(w_q | S)$, για $C = c_2$

	$S = s_1$	$S = s_2$	$S = s_3$
$w_q = 1$	$P(w_q = 1 | S = s_1) = 0.292$	$P(w_q = 1 | S = s_2) = 0.363$	$P(w_q = 1 | S = s_3) = 0.306$
$w_q = 2$	$P(w_q = 2 | S = s_1) = 0.292$	$P(w_q = 2 | S = s_2) = 0.297$	$P(w_q = 2 | S = s_3) = 0.375$
$w_q = 3$	$P(w_q = 3 | S = s_1) = 0.357$	$P(w_q = 3 | S = s_2) = 0.297$	$P(w_q = 3 | S = s_3) = 0.010$
$w_q = 4$	$P(w_q = 4 | S = s_1) = 0.056$	$P(w_q = 4 | S = s_2) = 0.042$	$P(w_q = 4 | S = s_3) = 0.306$

Πίνακας 5-29. Προσαρμοσμένος πίνακας δεσμευμένης πιθανότητας $P(w_c | S)$, για $C = c_2$

	$S = s_1$	$S = s_2$	$S = s_3$
$w_c = 1$	$P(w_c = 1 | S = s_1) = 0.056$	$P(w_c = 1 | S = s_2) = 0.042$	$P(w_c = 1 | S = s_3) = 0.010$
$w_c = 2$	$P(w_c = 2 | S = s_1) = 0.292$	$P(w_c = 2 | S = s_2) = 0.297$	$P(w_c = 2 | S = s_3) = 0.306$
$w_c = 3$	$P(w_c = 3 | S = s_1) = 0.292$	$P(w_c = 3 | S = s_2) = 0.297$	$P(w_c = 3 | S = s_3) = 0.306$
$w_c = 4$	$P(w_c = 4 | S = s_1) = 0.357$	$P(w_c = 4 | S = s_2) = 0.363$	$P(w_c = 4 | S = s_3) = 0.375$

Πίνακας 5-30. Προσαρμοσμένος πίνακας δεσμευμένης πιθανότητας $P(w_t | S)$, για $C = c_2$

	$S = s_1$	$S = s_2$	$S = s_3$
$w_t = 1$	$P(w_t = 1 | S = s_1) = 0.292$	$P(w_t = 1 | S = s_2) = 0.315$	$P(w_t = 1 | S = s_3) = 0.306$
$w_t = 2$	$P(w_t = 2 | S = s_1) = 0.357$	$P(w_t = 2 | S = s_2) = 0.315$	$P(w_t = 2 | S = s_3) = 0.010$
$w_t = 3$	$P(w_t = 3 | S = s_1) = 0.056$	$P(w_t = 3 | S = s_2) = 0.054$	$P(w_t = 3 | S = s_3) = 0.375$
$w_t = 4$	$P(w_t = 4 | S = s_1) = 0.292$	$P(w_t = 4 | S = s_2) = 0.315$	$P(w_t = 4 | S = s_3) = 0.306$

Πίνακας 5-31. Προσαρμοσμένος πίνακας δεσμευμένης πιθανότητας $P(w_o | S)$, για $C = c_2$

	$S = s_1$	$S = s_2$	$S = s_3$
$w_o = 1$	$P(w_o = 1 | S = s_1) = 0.357$	$P(w_o = 1 | S = s_2) = 0.315$	$P(w_o = 1 | S = s_3) = 0.375$
$w_o = 2$	$P(w_o = 2 | S = s_1) = 0.056$	$P(w_o = 2 | S = s_2) = 0.054$	$P(w_o = 2 | S = s_3) = 0.306$
$w_o = 3$	$P(w_o = 3 | S = s_1) = 0.292$	$P(w_o = 3 | S = s_2) = 0.315$	$P(w_o = 3 | S = s_3) = 0.306$
$w_o = 4$	$P(w_o = 4 | S = s_1) = 0.292$	$P(w_o = 4 | S = s_2) = 0.315$	$P(w_o = 4 | S = s_3) = 0.010$

Στα εξής, εκτελείται με τη σειρά καθένα από τα βήματα του σεναρίου:

1. *πρωί, στο σπίτι*: Κατ' αρχήν, προσδιορίζεται η πιθανότερη τιμή της μεταβλητής C , με βάση τις $L = l_1$, $T = t_1$ και $CP = cp_3$, και υπολογίζεται $C = c_1$. Στη συνέχεια, με δεδομένα $C = c_1$ και $S = s_1$, προσδιορίζεται η πιθανότερη

μετάθεση των συντελεστών w_i καθώς και η βέλτιστη ανάθεση της υπό εξέταση υπηρεσίας σε επίπεδο ποιότητας και σε σημείο πρόσβασης. Τα αποτελέσματα αυτά συνοψίζονται στον Πίνακα 5-32:

Πίνακας 5-32. Υπολογιζόμενες κατά MAUP και IAS παράμετροι και ανάθεση στο βήμα 1

Υπηρεσία S	Πλαίσιο χρήσης C	Παράμετροι προφίλ				Ανάθεση	
		Q	C	O	T	$p(s)$	$ql(s)$
s_1	c_1	4	2	3	1	$p^{3,1}$ (WLAN, #3)	1

Καθώς το πλαίσιο χρήσης προσδιορίζεται ως 'leisure', και η μέγιστη προτεραιότητα ανατίθεται στον παράγοντα κόστους, επιλέγεται το σημείο πρόσβασης της τεχνολογίας WLAN και το χαμηλότερο δυνατό επίπεδο ποιότητας. Η επιλογή αυτή ενισχύεται ακόμη από το γεγονός ότι η τεχνολογία WLAN έχει οριστεί ως προτιμώμενη.

2. *πρωί, καθ' οδόν*: Προσδιορίζεται η πιθανότερη τιμή της μεταβλητής C , με βάση τις $L = l_2$, $T = t_1$ και $CP = cp_2$, και υπολογίζεται $C = c_2$. Στη συνέχεια, με δεδομένα $C = c_2$ και $S = s_2$ υπολογίζονται οι εξής παράμετροι του προφίλ καθώς και η ανάθεση (Πίνακας 5-33):

Πίνακας 5-33. Υπολογιζόμενες κατά MAUP και IAS παράμετροι και ανάθεση στο βήμα 2

Υπηρεσία S	Πλαίσιο χρήσης C	Παράμετροι προφίλ				Ανάθεση	
		Q	C	O	T	$p(s)$	$ql(s)$
s_2	c_2	1	4	3	2	$p^{2,2}$ (UMTS, #1)	5

Το πλαίσιο χρήσης προσδιορίζεται τώρα ως 'business', και η μέγιστη προτεραιότητα ανατίθεται στον παράγοντα ποιότητας. Για αυτό το λόγο επιλέγεται το σημείο πρόσβασης της τεχνολογίας UMTS και το μέγιστο επιτρεπόμενο επίπεδο ποιότητας. Η επιλογή αυτή ενισχύεται ακόμη από το γεγονός ότι ο πάροχος δικτύου #1 έχει οριστεί ως προτιμώμενος.

3. *μεσημέρι, στο γραφείο*: Για κάθε μια από τις τρεις υπηρεσίες που βρίσκονται σε εξέλιξη στο βήμα αυτό, υπολογίζονται οι εξής παράμετροι του προφίλ και οι αναθέσεις (Πίνακας 5-34)

Πίνακας 5-34. Υπολογιζόμενες κατά MAUP και IAS παράμετροι και αναθέσεις στο βήμα 3

Υπηρεσία S	Πλαίσιο χρήσης C	Παράμετροι προφίλ				Ανάθεση	
		Q	C	O	T	$p(s)$	$ql(s)$
s_3	c_2	2	4	1	3	$p^{4,2}$ (DVB, #4)	5
s_2	c_1	4	1	3	2	$p^{3,2}$ (WLAN, #3)	1
s_1	c_1	4	2	3	1	$p^{3,2}$ (WLAN, #3)	1

Για την υπηρεσία video streaming (s_3) επιλέγεται το σημείο πρόσβασης της τεχνολογίας DVB, καθώς αυτό μπορεί να προσφέρει το μέγιστο δυνατό επίπεδο ποιότητας. Οι υπηρεσίες voice call (s_2) και web browsing (s_1) ανατίθενται στο σημείο πρόσβασης της τεχνολογίας WLAN και προσφέρονται στο χαμηλότερο δυνατό επίπεδο ποιότητας, καθώς το πλαίσιο χρήσης που τις χαρακτηρίζει έχει προσδιοριστεί ως 'leisure'. Ας σημειωθεί εδώ ότι σε ό,τι αφορά την υπηρεσία s_1 σε πλαίσιο χρήσης c_1 , οι προτιμήσεις του χρήστη έχουν ήδη προσδιοριστεί στο βήμα 1 του σεναρίου, κι έτσι αυτές μπορούν να ανακτηθούν από την προσωρινή μνήμη του τερματικού αντί να υπολογιστούν εκ νέου.

4. *βράδυ, στο σπίτι*: Προσδιορίζεται η πιθανότερη τιμή της μεταβλητής C , με βάση τις $L = l_1$, $T = t_4$ και $CP = cp_2$, και υπολογίζεται $C = c_2$. Στη συνέχεια, με δεδομένα $C = c_2$ και $S = s_1$ υπολογίζονται οι εξής παράμετροι του προφίλ καθώς και η ανάθεση (Πίνακας 5-35):

Πίνακας 5-35. Υπολογιζόμενες κατά MAUP και IAS παράμετροι και ανάθεση στο βήμα 4

Υπηρεσία S	Πλαίσιο χρήσης C	Παράμετροι προφίλ				Ανάθεση	
		Q	C	O	T	$p(s)$	$ql(s)$
s_1	c_2	3	4	1	2	$p^{3,1}$ (WLAN, #3)	5

Το πλαίσιο χρήσης προσδιορίζεται τώρα ως 'leisure' για την υπηρεσία s_1 , και επιλέγεται το σημείο πρόσβασης της τεχνολογίας WLAN και το μέγιστο επιτρεπόμενο επίπεδο ποιότητας. Η επιλογή αυτή ενισχύεται ακόμη από το γεγονός ότι η τεχνολογία WLAN έχει οριστεί ως προτιμώμενη.

Στον Πίνακα 5-36 καταγράφονται ενδεικτικοί χρόνοι εκτέλεσης, τόσο του αλγορίθμου MAUP για την αρχική μάθηση των επί μέρους δεσμευμένων κατανομών πιθανότητας $P(w_i|S)$ (βήμα 0), όσο και της συνδυασμένης εκτέλεσης του αλγορίθμου IAS και του συμπερασμού για τον προσδιορισμό του πλαισίου χρήσης και των παραμέτρων του προφίλ σε κάθε ένα από τα 4 κύρια βήματα του σεναρίου. Οι χρόνοι αυτοί έχουν ληφθεί σε τυπικών σημερινών προδιαγραφών desktop υπολογιστή.

Πίνακας 5-36. Ενδεικτικοί χρόνοι εκτέλεσης των αλγορίθμων MAUP και IAS στο σενάριο 2

Βήμα σεναρίου	Χρόνος εκτέλεσης αλγορίθμου (ms)
0 (μάθηση συνάρτησης κατανομής)	~ 900
1	~ 150
2	~ 120
3	~ 200
4	~ 150

Στα επόμενα θα επιχειρηθεί μια σύγκριση της προτεινόμενης μεθόδου αντιμετώπισης του προβλήματος MAUP με ένα σχήμα κωδικοποίησης των προτιμήσεων του χρήστη σε διαφορετικά πλαίσια χρήσης με τη μορφή απλών κανόνων. Όπως συζητήθηκε στην παράγραφο 5.5.1, η αντιδιαστολή των δύο αυτών προσεγγίσεων βρίσκεται στον πυρήνα μιας γενικότερης θεωρητικής συζήτησης γύρω από την επεκτασιμότητα και την προσέγγιση της λειτουργίας της ανθρώπινης νόησης που χαρακτηρίζουν τα διάφορα μοντέλα αναπαράστασης της γνώσης.

5.5.3.3. Αποτελέσματα – συζήτηση

Έστω το εξής απλό σύστημα κανόνων (Rule-Based System – RBS) για την κωδικοποίηση των προτιμήσεων του χρήστη, που εκφράζονται με την υψηλού επιπέδου περιγραφή του Πίνακα 5-16:

- Σε πλαίσιο χρήσης ‘leisure’, να δοθεί η μεγαλύτερη βαρύτητα στον παράγοντα κόστους και οι υπόλοιποι παράγοντες να ζυγιστούν ισότιμα.
- Σε πλαίσιο χρήσης ‘business’, να δοθεί η μεγαλύτερη βαρύτητα στον παράγοντα ποιότητας και οι υπόλοιποι παράγοντες να ζυγιστούν ισότιμα.

Οι κανόνες αυτοί δίνονται συνοπτικά και με συμβολική μορφή στον Πίνακα 5-37.

Πίνακας 5-37. Απλό σύστημα κανόνων (RBS) για την αναπαράσταση των προτιμήσεων του χρήστη

Πλαίσιο χρήσης C	Παράμετροι προφίλ			
	w_q	w_c	w_t	w_o
c_1	0,4	0,8	0,4	0,4
c_2	0,8	0,4	0,4	0,4

Στον Πίνακα 5-38 καταγράφονται οι παράμετροι του προφίλ του χρήστη, όπως υπολογίζονται μέσω του προτεινόμενου μπεϋζιανού δικτύου (Bayesian Network – BN) και μέσω του RBS, σε κάθε βήμα του σεναρίου. Στον Πίνακα 5-38 καταγράφονται οι αναθέσεις που υπολογίζονται από τον αλγόριθμο IAS με βάση το προφίλ του χρήστη κατά BN και κατά RBS, σε κάθε βήμα του σεναρίου.

Πίνακας 5-38. Παράμετροι προφίλ υπολογιζόμενες κατά BN και RBS στο σενάριο 2

Βήμα σεναρίου	Υπηρεσία	BN				RBS			
		w_q	w_c	w_t	w_o	w_q	w_c	w_t	w_o
1	web browsing	0,2	0,6	0,8	0,4	0,4	0,8	0,4	0,4
2	voice call	0,8	0,2	0,6	0,4	0,8	0,4	0,4	0,4
3	video streaming	0,6	0,2	0,4	0,8	0,8	0,4	0,4	0,4
	voice call	0,2	0,8	0,6	0,4	0,4	0,8	0,4	0,4
	web browsing	0,2	0,6	0,8	0,4	0,4	0,8	0,4	0,4
4	web browsing	0,4	0,2	0,6	0,8	0,8	0,4	0,4	0,4

Πίνακας 5-39. Αναθέσεις σχετιζόμενες με BN και RBS στο σενάριο 2

Βήμα σεναρίου	Υπηρεσία	BN		RBS	
		$p(s)$	$ql(s)$	$p(s)$	$ql(s)$
1	web browsing	$p_{3,1}$	2	$p_{3,1}$	5
2	voice call	$p_{2,2}$	5	$p_{2,2}$	5
3	video streaming	$p_{4,2}$	5	$p_{4,2}$	5
	voice call	$p_{3,2}$	3	$p_{1,3}$	5
	web browsing	$p_{3,2}$	4	$p_{3,2}$	3
4	web browsing	$p_{3,1}$	5	$p_{3,1}$	5

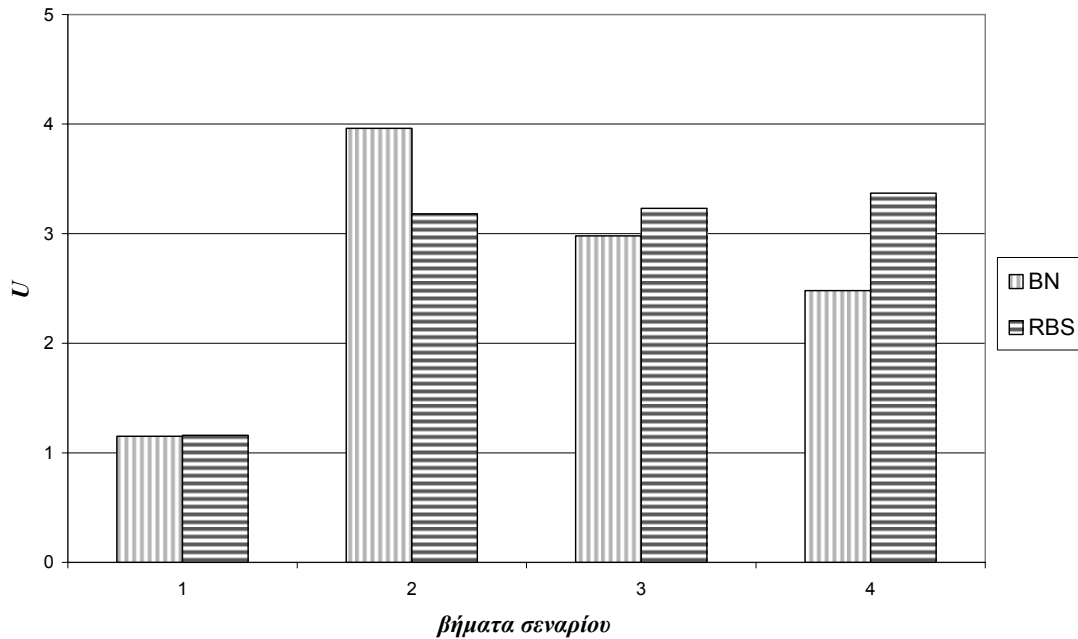
Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στον Πίνακα 5-39, δεν προκύπτουν μεγάλες διαφορές σε επίπεδο τελικών αναθέσεων μεταξύ της προτεινόμενης μπεϋζιανής μεθόδου για τον προσδιορισμό των προτιμήσεων του χρήστη και του συστήματος κανόνων του Πίνακα 5-37. Η πιο σημαντική διαφοροποίηση αφορά την ανάθεση της υπηρεσίας voice call στο βήμα 3 του σεναρίου, όπου μέσω της μπεϋζιανής μεθόδου αποτιμάται με μεγαλύτερη βαρύτητα η προτίμηση του χρήστη για συγκεκριμένη τεχνολογία (WLAN) και με μικρότερη βαρύτητα η ποιότητα υπηρεσίας. Οι υπόλοιπες διαφορές εντοπίζονται στα επίπεδα ποιότητας στα οποία ανατίθεται η υπηρεσία web browsing στο πλαίσιο χρήσης leisure (βήματα 1 και 3) και οι οποίες οφείλονται στην υψηλή προτεραιότητα που προσδιορίζεται για την παράμετρο της τεχνολογίας, σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο.

Στον Πίνακα 5-40 δίνονται οι τιμές της χρησιμότητας U που απορρέει από τις αναθέσεις που υπολογίζονται σε κάθε βήμα του σεναρίου, με προφίλ χρήστη υπολογιζόμενο κατά BN και κατά RBS.

Πίνακας 5-40. Χρησιμότητες αναθέσεων με προφίλ χρήστη κατά BN και RBS στο σενάριο 2

Βήμα σεναρίου	U_{BN}	U_{RBS}
1	1,15	1,16
2	3,96	3,18
3	2,98	3,23
4	2,48	3,37

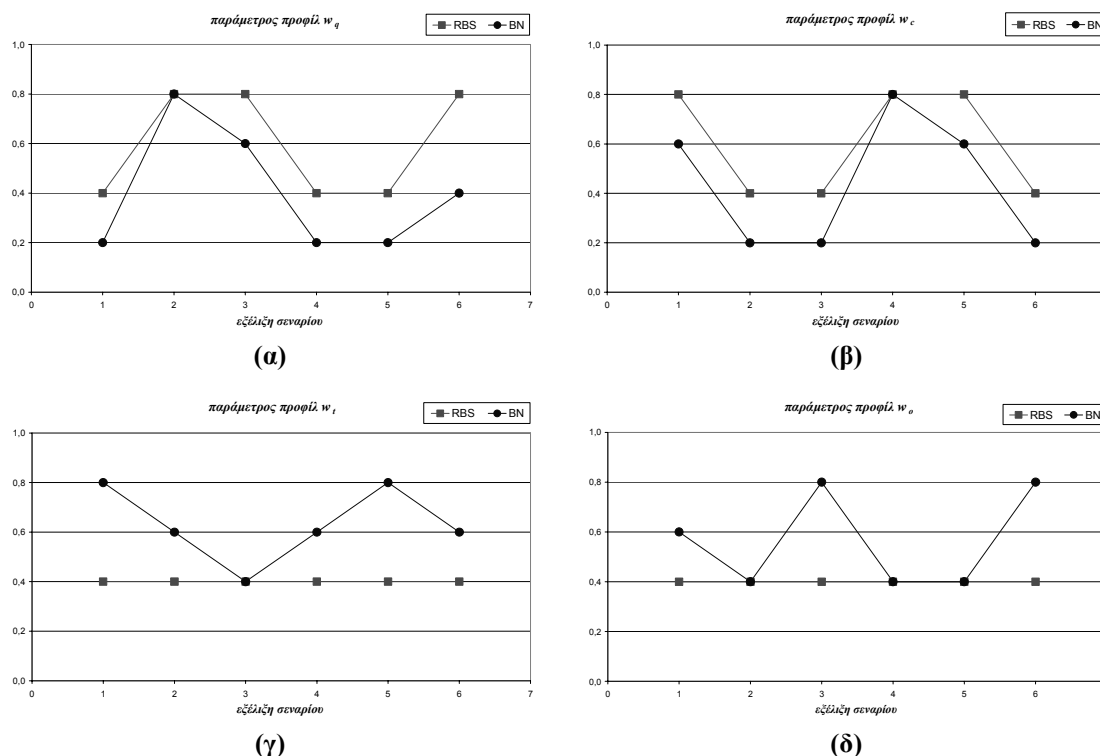
Στο Σχήμα 5-19 αποδίδονται γραφικά οι παραπάνω τιμές της χρησιμότητας U . Στον άξονα x σημειώνονται τα βήματα του σεναρίου (1 έως 4), και στον άξονα y η χρησιμότητα U . Ας σημειωθεί ότι οι τιμές της χρησιμότητας που απεικονίζονται γραφικά στο διάγραμμα αυτό δεν είναι απόλυτα συγκρίσιμες μεταξύ τους, καθώς προκύπτουν από αντικειμενικές συναρτήσεις – συναρτήσεις χρησιμότητας οι οποίες είναι διαφορετικές σε ό,τι αφορά τους συντελεστές w_i σύμφωνα με τους οποίους ‘ζυγίζονται’ οι παράμετροι της ποιότητας, του κόστους, της τεχνολογίας και του παρόχου δικτύου για κάθε δυνατή ανάθεση υπηρεσίας: στη μεν μέθοδο BN οι συντελεστές αυτοί υπολογίζονται από την ‘επίλυση’ του μπεϋζιανού δικτύου του προγνωστικού επιπέδου, με δεδομένη την υπηρεσία S και το πλαίσιο χρήσης C , στη δε μέθοδο RBS αυτοί προκύπτουν με απλή εφαρμογή των κανόνων του Πίνακα 5-37 με δεδομένο το πλαίσιο χρήσης C .



Σχήμα 5-19. Αποτελέσματα σεναρίου 2: γραφική αναπαράσταση της χρησιμότητας U που προκύπτει από το υπολογιζόμενο κατά BN και RBS προφίλ χρήστη

Αντίθετα, σημαντικότερες διαφορές μεταξύ των δύο μεθόδων για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του προφίλ του χρήστη μπορούν να εντοπιστούν στο επίπεδο των ίδιων των συντελεστών w_i . Στο Σχήμα 5-20 αποδίδονται γραφικά οι τιμές των συντελεστών αυτών, όπως υπολογίζονται κατά BN και κατά RBS, κατά την εξέλιξη του σεναρίου. Στο τμήμα (α) απεικονίζεται η γραφική παράσταση του συντελεστή ποιότητας w_q , στο τμήμα (β) του συντελεστή κόστους w_c , στο τμήμα (γ) του συντελεστή τεχνολογίας w_t και στο τμήμα (δ) του συντελεστή παρόχου δικτύου w_o .

Είναι φανερό ότι τα ζεύγη των αντίστοιχων γραφικών παραστάσεων, τουλάχιστον στις περιπτώσεις (α) και (β), έχουν την ίδια γενική συμπεριφορά, με το γράφημα της μεθόδου RBS να αποτελεί μια ‘απλούστευση’ ή μια ‘προσέγγιση’ των διακυμάνσεων που αποδίδονται στο γράφημα της μεθόδου BN. Στις περιπτώσεις (γ) και (δ), παρατηρούμε ότι η συμπεριφορά των συντελεστών w_t και w_o , όπως περιγράφεται με τη μέθοδο RBS, είναι εντελώς επίπεδη.



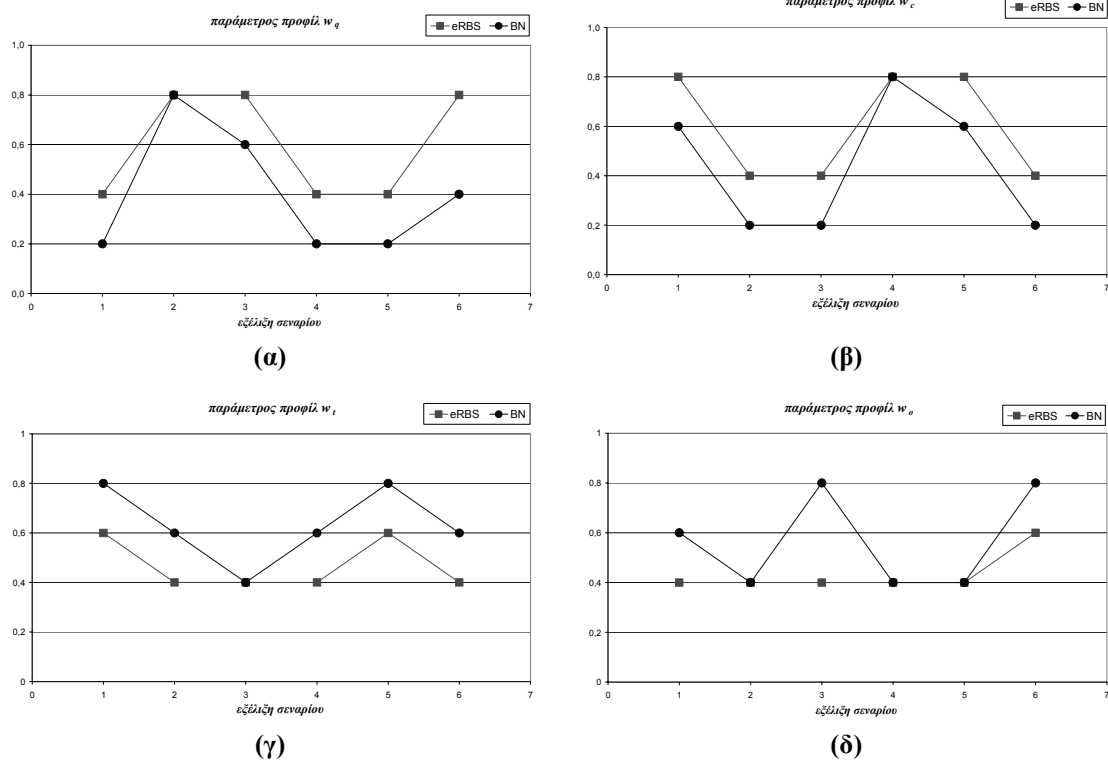
Σχήμα 5-20. Αποτελέσματα σεναρίου 2: γραφική αναπαράσταση των παραμέτρων του προφίλ του χρήστη που προκύπτουν από επίλυση κατά BN και RBS

Ένα βελτιωμένο σύστημα κανόνων (enhanced RBS – eRBS), σε σχέση με αυτό του Πίνακα 5-37, περιγράφεται συμβολικά στον Πίνακα 5-41.

Πίνακας 5-41. Βελτιωμένο σύστημα κανόνων (eRBS) για την αναπαράσταση των προτιμήσεων του χρήστη

Πλαίσιο χρήσης C	Υπηρεσία S	Παράμετροι προφίλ			
		w_q	w_c	w_i	w_o
c_1	$\forall S \neq s_1$	0,4	0,8	0,4	0,4
c_2	$\forall S \neq s_1$	0,8	0,4	0,4	0,4
c_1	s_1	0,4	0,8	0,6	0,4
c_2	s_1	0,8	0,4	0,4	0,6

Και πάλι, αποδίδουμε γραφικά τη διακύμανση των συντελεστών w_i , όπως υπολογίζονται κατά BN και κατά eRBS, κατά την εξέλιξη του σεναρίου (Σχήμα 5-21), και παρατηρούμε μια μικρή βελτίωση της συμπεριφοράς των γραφημάτων κατά eRBS (γ) και (δ).



Σχήμα 5-21. Αποτελέσματα σεναρίου 2: γραφική αναπαράσταση των παραμέτρων του προφίλ του χρήστη που προκύπτουν από επίλυση κατά BN και eRBS

Μια προφανής παρατήρηση που μπορεί να διατυπωθεί σε σχέση με τα όσα συζητήθηκαν στα παραπάνω είναι η εξής: δικαιολογείται η πολυπλοκότητα του προτεινόμενου πιθανολογικού μοντέλου από το (σχετικά μικρό) κέρδος που επιτυγχάνεται στην ακρίβεια πρόβλεψης των παραμέτρων του προφίλ του χρήστη; Στην απλή περίπτωση των τεσσάρων παραμέτρων w_i του προφίλ που παρουσιάστηκε στο παρόν σενάριο, δεν μπορεί να δοθεί με σιγουριά καταφατική απάντηση στο ερώτημα αυτό. Εκτιμούμε όμως, ότι η ικανότητα ακριβούς πρόβλεψης που επιτυγχάνεται με συστήματα κανόνων παρόμοια με αυτά που περιγράφηκαν στα παραπάνω εξαντλείται σε παρόμοιες απλές περιπτώσεις αιτιακών σχέσεων μεταξύ των παραμέτρων, και ότι η περαιτέρω επέκταση του συστήματος κανόνων ώστε να συμπεριλάβει περισσότερες εξαρτήσεις γίνεται με δυσκολία δυσανάλογη προς την αύξηση του πλήθους των παραμέτρων που συμπεριλαμβάνουμε στο μοντέλο μας.

Το σημείο αυτό γίνεται ξεκάθαρο με τη βοήθεια του ακόλουθου παραδείγματος, όπου στο προφίλ του χρήστη έχουν προστεθεί δύο επιπλέον παράμετροι, w_{e1} και w_{e2} . Οι παράμετροι αυτές θα μπορούσαν να αναφέρονται στο ιστορικό εξυπηρέτησης του χρήστη από κάποιο σημείο πρόσβασης, στην ποικιλία ή στην ‘εξειδίκευση’ του συνόλου των προσφερόμενων υπηρεσιών από κάποιο σημείο κ.λπ. Στον Πίνακα 5-42

δίνεται η συμβολική περιγραφή του συνόλου παραδειγμάτων εκπαίδευσης D για το διευρυμένο πλέον προφίλ του χρήστη, και στον Πίνακα 5-43 ένα εκτεταμένο σύστημα κανόνων (extended RBS – exRBS) για την κωδικοποίηση των προτιμήσεων που εμπεριέχονται σ' αυτό.

Πίνακας 5-42. Σύνολο παραδειγμάτων εκπαίδευσης D για το διευρυμένο προφίλ χρήστη

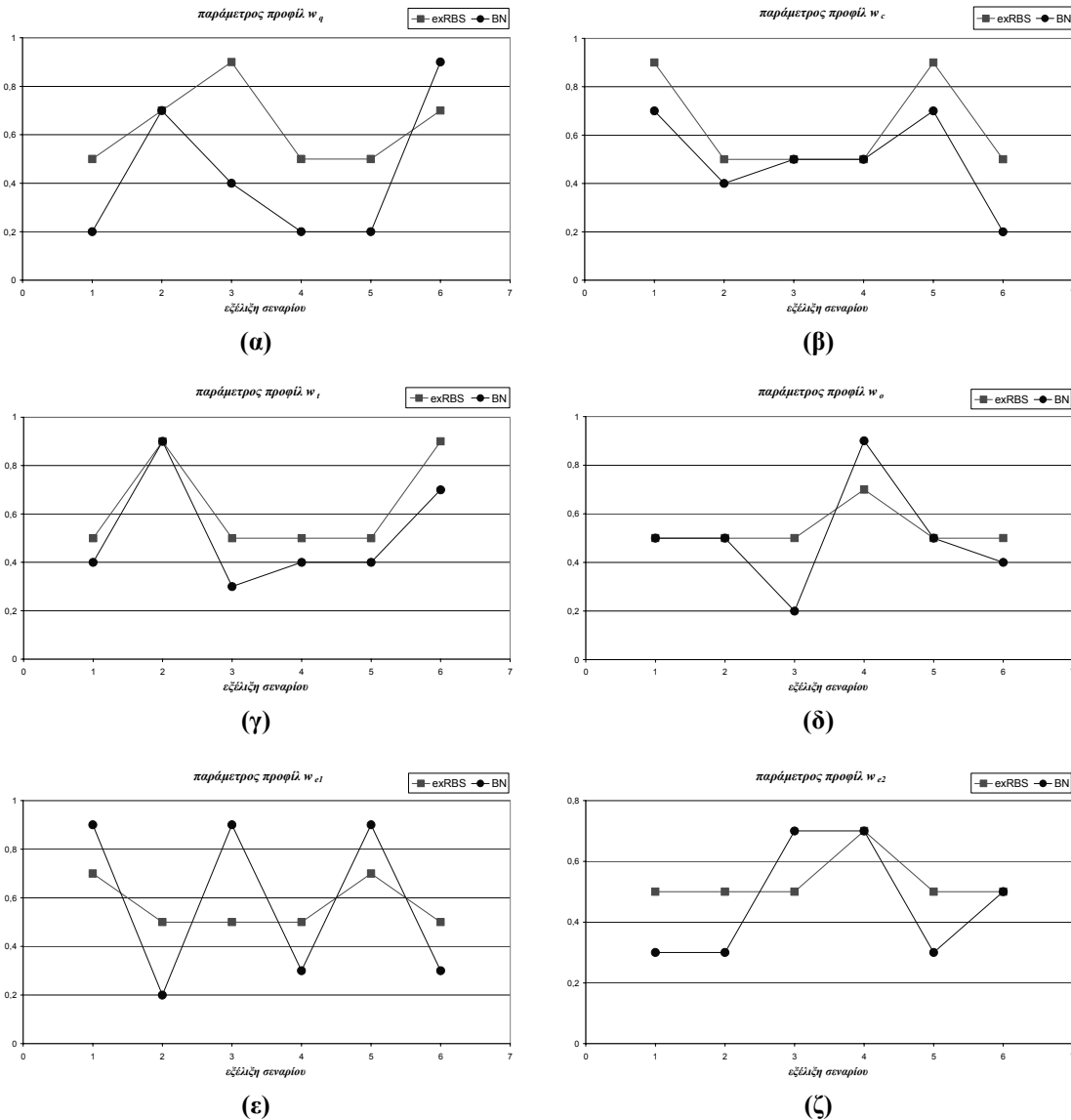
x	w_q	w_c	w_t	w_o	w_{e1}	w_{e2}	S	C	User approval
x_1	0,3	0,7	0,5	0,2	0,9	0,4	s_2	c_1	'accept'
x_2	0,7	0,2	0,3	0,9	0,4	0,5	s_2	c_1	'reject'
x_3	0,3	0,5	0,4	0,7	0,2	0,9	s_3	c_1	'accept'
x_4	0,5	0,2	0,9	0,3	0,7	0,4	s_3	c_1	'reject'
x_5	0,2	0,9	0,3	0,5	0,7	0,4	s_1	c_1	'accept'
x_6	0,7	0,3	0,9	0,4	0,2	0,5	s_1	c_1	'reject'
x_7	0,9	0,3	0,4	0,7	0,2	0,5	s_2	c_2	'accept'
x_8	0,4	0,7	0,9	0,3	0,5	0,2	s_2	c_2	'reject'
x_9	3	0,4	0,2	0,3	0,9	0,7	s_3	c_2	'accept'
x_{10}	0,2	0,7	0,5	0,9	0,3	0,4	s_3	c_2	'reject'
x_{11}	2	0,3	0,9	0,5	0,2	0,4	s_1	c_2	'accept'
x_{12}	0,4	0,9	0,2	0,3	0,7	0,5	s_1	c_2	'reject'

Πίνακας 5-43. Εκτεταμένο σύστημα κανόνων (exRBS) για το διευρυμένο προφίλ χρήστη

Πλαίσιο χρήσης C	Υπηρεσία S	Παράμετροι προφίλ					
		w_q	w_c	w_t	w_o	w_{e1}	w_{e2}
c_1	$\forall S \neq s_1, s_2$	0,5	0,9	0,5	0,5	0,5	0,5
c_2	$\forall S \neq s_1, s_2$	0,9	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
c_1	s_2	0,5	0,5	0,5	0,7	0,5	0,9
c_2	s_2	0,7	0,5	0,9	0,5	0,5	0,5
c_1	s_1	0,5	0,9	0,5	0,5	0,7	0,5
c_2	s_1	0,7	0,5	0,9	0,5	0,5	0,5

Στο Σχήμα 5-22 αποδίδονται γραφικά οι τιμές και των έξι συντελεστών w_i , όπως υπολογίζονται κατά BN και κατά exRBS, κατά την εξέλιξη του ίδιου σεναρίου που συζητήθηκε και στα προηγούμενα, με τα τμήματα (α), (β), (γ), (δ), (ε) και (ζ) να

απεικονίζουν τις γραφικές παραστάσεις των συντελεστών w_q , w_c , w_i , w_o , w_{e1} και w_{e2} αντίστοιχα.



Σχήμα 5-22. Γραφική αναπαράσταση των παραμέτρων του προφίλ του χρήστη που προκύπτουν από επίλυση κατά BN και exRBS

Στα διαγράμματα αυτά είναι εμφανέστερη η ποιοτική διαφορά που επισημάνθηκε νωρίτερα: η συμπεριφορά των παραμέτρων w_i όπως υπολογίζεται με τη βοήθεια του συστήματος κανόνων του Πίνακα 5-43 αποτελεί μια χονδροειδή προσέγγιση των διακυμάνσεων που προκύπτουν από την επίλυση του πιθανολογικού μοντέλου.

Ένα ακόμη μειονέκτημα της μεθόδου RBS αφορά την επεκτασιμότητα του χρησιμοποιούμενου μοντέλου: ένα παρόμοιο σύστημα κανόνων παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες στη συμπερίληψη νέων παραμέτρων καθώς και στην τροποποίηση των υπάρχουσών σχέσεων μεταξύ των παραμέτρων, καθώς αλλαγές σε κάποια 'υπο-περιοχή' του χώρου του προφίλ ενδέχεται να προκαλέσει αθέμιτες

αλλαγές σε άλλες υπο-περιοχές ή να δημιουργήσει αντικρουόμενους κανόνες. Σε ένα ευρύτερο πλαίσιο, η έρευνα έχει δείξει ότι η συλλογιστική που αφορά αβέβαιη γνώση είναι εγγενώς λιγότερο επιδεκτική κωδικοποίησης μέσω κανόνων, σε σχέση με τη συλλογιστική που αφορά βεβαιότητες ([32]). Αντίθετα, το προτεινόμενο πιθανολογικό μοντέλο προσαρμόζεται εύκολα σε οποιαδήποτε αλλαγή στις προτιμήσεις του χρήστη, καθώς αρκεί η χρήση ενός κατάλληλου συνόλου παραδειγμάτων εκπαίδευσης για την προσαρμογή της δομής και των παραμέτρων του μπεϋζιανού δικτύου.

Πέρα όμως από τα επιχειρήματα αυτά, η σύγκριση πιθανολογικών μοντέλων και συστημάτων βασισμένων σε κανόνες για την κωδικοποίηση της γνώσης που εμπεριέχεται σε ακατέργαστα δεδομένα (όπως είναι το σύνολο D) μπορεί να τεθεί σε ένα γενικότερο, αν όχι φιλοσοφικό, πλαίσιο, το οποίο αφορά την ίδια τη δυνατότητα εξόρυξης γνώσης με τη μορφή κανόνων από τέτοια δεδομένα. Σε πολλούς εμπειρικούς επιστημονικούς κλάδους (όπως είναι η μετεωρολογία, η βιολογία, τα υπολογιστικά παιχνίδια κ.λπ.) συναντάται το εξής υπολογιστικό αδιέξοδο: υπολογίζονται λύσεις σε στιγμιότυπα ορισμένων πολύπλοκων προβλημάτων, πιθανόν με τεράστιο αναλυτικό κόστος, όμως οι λύσεις αυτές είναι ερμηνευτικά αδιαφανείς. Προσπάθειες να ερμηνευτούν αυτές οι λύσεις, οι οποίες προκύπτουν με εφαρμογή μεθόδων *brute force* ή τύπου ‘μαύρου κουτιού’, με όρους ανθρώπινα κατανοήσιμους ή απομνημονεύσιμους, και να αποκρυπτογραφηθούν στη μορφή αναγνωρίσιμων γενικών κανόνων, δεν έχουν τελεσφορήσει ([33],[34],[35]). Για το πρόβλημα της *Μοντελοποίησης και Προσαρμογής στις Προτιμήσεις του Χρήστη* που εξετάζεται στην παρούσα διατριβή, αυτό σημαίνει ότι, στη γενική περίπτωση, ενδέχεται να υπάρχουν εξαρτήσεις και συσχετίσεις μεταξύ των παραμέτρων του προφίλ του χρήστη, των οποίων η διατύπωση με τη μορφή απλών κανόνων να είναι αδύνατη.

5.6. Ανακεφαλαίωση – συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύθηκε μια ακόμη βασική απαίτηση που αφορά τη λειτουργία της αρχιτεκτονικής διαχείρισης MTMS (Mobile Terminal Management System): η ικανότητα αξιοποίησης ενός συνόλου πληροφοριών που χαρακτηρίζουν το εκάστοτε πλαίσιο χρήσης (*context*) με σκοπό τον προσδιορισμό των παραμέτρων του προφίλ του χρήστη. Οι παράμετροι αυτές του προφίλ του χρήστη χρησιμοποιούνται εν συνεχεία σαν είσοδος στο πρόβλημα διαμόρφωσης υπηρεσιών που επιλύει ο

αλγόριθμος *Ευφρούς Επιλογής Πρόσβασης*, ο οποίος περιγράφηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.

Οι δύο πτυχές του προβλήματος *Μοντελοποίησης και Προσαρμογής στις Προτιμήσεις του Χρήστη (Modelling and Adaptation to User Preferences – MAUP)*, δηλαδή η επεξεργασία της πληροφορίας πλαισίου χρήσης με σκοπό τον καθορισμό του πλαισίου χρήσης και η αξιοποίηση της γνώσης αυτής με σκοπό τον προσδιορισμό των κατάλληλων παραμέτρων του προφίλ του χρήστη, αντιμετωπίζονται με την κατασκευή ενός κατάλληλου πιθανολογικού μοντέλου, και συγκεκριμένα ενός μπεϋζιανού μετα-δικτύου 2 επιπέδων. Στο πλαίσιο αυτής της προσέγγισης λύσης, το πρόβλημα MAUP περιγράφηκε αναλυτικά και διατυπώθηκε μαθηματικά. Παρουσιάστηκε ακόμη η προτεινόμενη λύση στο πρόβλημα της μάθησης της δομής και των παραμέτρων της τοπολογίας του πιθανολογικού μοντέλου. Η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης λύσης, τόσο στο επίπεδο της μάθησης παραμέτρων όσο και στο επίπεδο της μάθησης δομής, εξετάστηκε στο πλαίσιο δύο σεναρίων: στο πρώτο σενάριο εξετάστηκε περίπτωση ενός γράφου άγνωστης δομής και παραμέτρων, ενώ στο δεύτερο σενάριο έγινε εφαρμογή σε μια ειδική περίπτωση γράφου, σε συνδυασμό με την επίλυση του προβλήματος IAS.

Παραπομπές

- [1] J. Pascoe, N. Ryan and D. Morse, “Issues in developing context-aware computing,” in: *Lecture Notes in Computer Science, Proceedings of the International Symposium on Handheld and Ubiquitous Computing*, vol. 1707, pp. 208-221, Springer, 1999.
- [2] E. Homayounvala, S. A. Ghorashi, A. H. Aghvami, “A Bayesian approach to modelling user preferences for reconfiguration”, presented at the E2R Workshop on Reconfigurable Mobile Systems and Networks Beyond 3G, Barcelona, Spain, Sept. 2004.
- [3] V. Terziyan and O. Vitko, “Bayesian Metanetworks for Modelling User Preferences in Mobile Environment”, *Advances in Artificial Intelligence, Lecture Notes in Artificial Intelligence*, vol. 2812, Springer, 2003.
- [4] G. Chen, D. Kotz, “A survey of context-aware mobile computing research”, *Technical Report TR2000-381*, Department of Computer Science, Dartmouth College, 2000.
- [5] A. Dey, G. Abowd, “Towards a better understanding of context and context-awareness”, *Technical Report GIT-GVU-99-22*, Georgia Institute of Technology, College of Computing, 1999.
- [6] D. Heckerman, “A tutorial on learning with Bayesian Networks”, *Technical Report MSR-TR-95-06*, Microsoft Research, 1996.
- [7] W. Buntine, “A guide to the literature on learning probabilistic networks from data”, *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 195-210, April 1996.
- [8] K.-C. Chang, J. Liu, “Efficient algorithms for learning probabilistic networks”, in *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pp. 1274-1279, Oct. 1996.
- [9] P. Larranaga, C.M.H. Kuijpers, R.H. Murga, Y. Yurramendi, “Learning Bayesian network structures by searching for the best ordering with genetic algorithms”, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 26, no. 4, pp. 487-493, July 1996.
- [10] G. Cooper, E. Herskovits, “A Bayesian method for the induction of probabilistic networks from data”, *Machine Learning*, vol. 9, pp. 309-347, 1992.

- [11] A. Onisko, M. Druzdzal, H. Wasyluk, “Learning Bayesian network parameters from small data sets: Application of Noisy-OR gates”, *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. 27, pp. 165-182, 2001.
- [12] P. Dawid, “Statistical theory. The prequential approach”, *Journal of the Royal Statistical Society (Series A)*, vol. 147, pp. 278-292, 1984.
- [13] M. Kearns, Y. Mansour, A. Ng, D. Ron, “An experimental and theoretical comparison of model selection methods”, *Machine Learning*, vol. 27, pp. 7-50, 1997.
- [14] J. Bernardo, “Expected information as expected utility”, *Annals of Statistics*, vol. 7, pp. 686-690, 1979.
- [15] M. Stone, “Asymptotics for and against cross-validation”, *Biometrika*, vol. 64, pp. 29-35, 1977.
- [16] M. Stone, “Cross-validators choice and assessment of statistical predictions”, *Journal of the Royal Statistical Society (Series B)*, vol. 36, pp. 111-147, 1974.
- [17] D. Specht, “Probabilistic neural networks”, *Neural Networks*, vol. 3, pp. 109-118, Elsevier, 1990.
- [18] C. M. Bishop, *Neural networks for pattern recognition*, Clarendon Press, 1998.
- [19] D. M. Chickering, D. Geiger, D. Heckerman, “Learning Bayesian networks is NP-hard”, *Technical Report MSR-TR-94-17*, Microsoft Research, 1994.
- [20] V. Vazirani, *Approximation algorithms*, Springer, 2004.
- [21] S. Skiena, *The algorithm design manual*, Springer, 1998.
- [22] R. Korf, “Linear-space best-first search”, *Artificial Intelligence*, vol. 62, pp. 41-78, 1993.
- [23] M. Jordan, Z. Ghahramani, T. Jaakkola, L. Saul, “An Introduction to variational methods for graphical models”, *Machine Learning*, vol. 37, pp. 183-233, 1999.
- [24] R. Neal, “Probabilistic inference using Markov chain Monte Carlo methods”, *Technical Report CRG-TR-93-1*, Department of Computer Science, University of Toronto, 1993.
- [25] J. Doyle, “Methodological simplicity in expert system construction: the case of judgements and reasoned assumptions”, *Technical Report CMU-CS-83-114*, Department of Computer Science, Carnegie-Mellon University, 1983.
- [26] R. Davis, J. King. “An overview of production systems”, *Machine Intelligence*, vol. 8, pp. 300-332, Wiley, 1977.

- [27] R. Duda, P. Hart, N. Nilsson, “Subjective Bayesian methods for rule-based inference systems”, *AFIPS Conference Proceedings of the 1976 National Computer Conference*, vol. 45, pp. 1075-1082, 1976
- [28] P. Szolovits, S. Pauker, “Categorical and probabilistic reasoning in medicine revisited”, *Artificial Intelligence*, vol. 59, pp. 167-180, 1993.
- [29] V. Dhar, H. Pople, “Rule-based versus structure-based models for explaining and generating expert behavior”, *Communications of the ACM*, vol. 30, no. 6, pp. 542-555, June 1987.
- [30] E. Horvitz, J. Breese, M. Henrion, “Decision theory in expert systems and artificial intelligence”, *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. 2, pp. 247-302, 1988.
- [31] L. Forgy, J. McDermott, “OPS: A domain-independent production system”, in *Proceedings of the 5th International Conference on Artificial Intelligence*, pp. 933-939, William Kaufmann, 1977.
- [32] D. Heckerman, E. Horvitz, “On the expressiveness of rule-based systems for reasoning under uncertainty”, in *Proceedings of the Sixth National Conference on Artificial Intelligence*, AAAI Press, 1987.
- [33] D. Michie, “Brute force in chess and science”, in A. Marsland, J. Schaeffer (editors), *Computers, Chess and Cognition*, pp. 239-257, Springer-Verlag, 1990.
- [34] D. Michie, I. Bratko, “Ideas on knowledge synthesis stemming from the KBBKN endgame”, *Journal of the International Computer Chess Association*, vol. 10, no. 1, pp. 3-13, 1987.
- [35] A. Roycroft, “Expert against oracle”, in J. Hayes, D. Michie, J. Richards (editors), *Machine Intelligence 11*, Oxford University Press, pp. 347-373, 1988.
- [36] F. Harary, E. Palmer, *Graphical Enumeration*, Academic Press, 1973.
- [37] R. Robinson, “Counting Labeled Acyclic Digraphs”, in F. Harary (editor), *New Directions in Graph Theory*, Academic Press, 1973.

Κεφάλαιο 6

*Συμπεράσματα
&
Ανακεφαλαίωση*

6.1. Ανακεφαλαίωση – συνεισφορά διατριβής

Στο περιβάλλον των ετερογενών συστημάτων επικοινωνιών τέταρτης γενιάς, που εκληρώνουν την απαίτηση Always Best Connected – ABC, προκύπτουν νέες απαιτήσεις για τη διαχείριση των κινητών τερματικών: αυτά θα πρέπει να ενσωματώνουν μηχανισμούς για τη διαχείριση της διαδικασίας επιλογής πρόσβασης, καθώς και για την ανίχνευση και την αξιοποίηση πληροφορίας που σχετίζεται με το εκάστοτε πλαίσιο χρήσης, προκειμένου για την εκμετάλλευσή της στη διαμόρφωση των υπηρεσιών που λαμβάνονται στο τερματικό.

Η εκπλήρωση αυτών των απαιτήσεων εισάγει την ανάγκη περιγραφής ενός νέου Συστήματος Διαχείρισης Κινητού Τερματικού, ικανού να ανιχνεύει τη διαθεσιμότητα σημείων πρόσβασης στην περιοχή του τερματικού, να λαμβάνει τη βέλτιστη απόφαση σχετικά με την ανάθεση των τρεχουσών και των ζητούμενων υπηρεσιών σε δικτυακές διεπαφές και σε επίπεδα ποιότητας, και να επιτρέπει το δυναμικό επανακαθορισμό των προτιμήσεων του χρήστη ανάλογα με την υπηρεσία και το πλαίσιο χρήσης.

Σε αυτό το πλαίσιο, η συνεισφορά της παρούσας διατριβής έγκειται στη γενική περιγραφή μιας προτεινόμενης αρχιτεκτονικής για ένα τέτοιο Σύστημα Διαχείρισης και στην ανάπτυξη μηχανισμών που αποτελούν λειτουργικές συνιστώσες αυτού του συστήματος. Συγκεκριμένα, η μελέτη εστιάστηκε στο πρόβλημα βελτιστοποίησης της καθοδηγούμενης από κινητά τερματικά διαδικασίας επιλογής πρόσβασης (*πρόβλημα Ευφυούς Επιλογής Πρόσβασης – Intelligent Access Selection - IAS*) και στο πρόβλημα της μοντελοποίησης των παραμέτρων του προφίλ του χρήστη και της μάθησης των μεταξύ τους αιτιακών σχέσεων (*πρόβλημα Μοντελοποίησης και Προσαρμογής στις Προτιμήσεις του Χρήστη – Modelling and Adaptation to User Preferences - MAUP*).

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάστηκαν οι απαιτήσεις και η προτεινόμενη αρχιτεκτονική διαχείρισης κινητού τερματικού (*Mobile Terminal Management System – MTMS*) και δόθηκε η αναλυτική περιγραφή των επί μέρους συνιστωσών της καθώς και των αντίστοιχων λειτουργιών: της Συνιστώσας Προσαρμογής στους Οδηγούς Δικτύου (υπεύθυνης για τη συγκέντρωση μετρήσεων από τις δικτυακές διεπαφές του τερματικού και για την πραγματοποίηση της σύνδεσης και της αποσύνδεσης με το επιλεγμένο κάθε φορά σημείο πρόσβασης), της Συνιστώσας Προτιμήσεων Χρήστη (υπεύθυνης για την επίλυση του προβλήματος MAUP και για τη διαχείριση του προφίλ του χρήστη) και της Συνιστώσας Διαχείρισης Κινητικότητας (υπεύθυνης για την επίλυση του προβλήματος IAS).

Στο Κεφάλαιο 3 δόθηκε η γενική, συμβολική και μαθηματική περιγραφή του προβλήματος IAS. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφηκαν αναλυτικά τα δεδομένα εισόδου, οι αντικειμενικοί σκοποί και οι περιορισμοί του προβλήματος, και παρουσιάστηκε η αντικειμενική συνάρτηση (συνάρτηση χρησιμότητας) της οποίας η μεγιστοποίηση επιτρέπει τον υπολογισμό των ζητούμενων αναθέσεων των υπηρεσιών σε σημεία πρόσβασης και σε επίπεδα ποιότητας. Παρουσιάστηκε ακόμη ο προτεινόμενος άπληστος αλγόριθμος επίλυσης, ο οποίος υπολογίζει το διάνυσμα της βέλτιστης λύσης με προσέγγιση πραγματικού χρόνου. Δόθηκαν, τέλος, αποτελέσματα εκτέλεσης του προτεινόμενου αλγορίθμου σε δύο σενάρια προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάστηκαν με όρους παρεχόμενης χρησιμότητας και πλήθους διαπομπών που πραγματοποιούνται κατά την εξέλιξη του σεναρίου, και συγκρίθηκαν με την αντίστοιχη εκτέλεση μιας απλούστερης μεθόδου επιλογής πρόσβασης η οποία βρίσκεται σε ευρεία εφαρμογή σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάστηκαν οι μπεϋζιανές μέθοδοι που αποτελούν το θεωρητικό υπόβαθρο της προτεινόμενης λύσης στο πρόβλημα MAUP. Πιο συγκεκριμένα, έγινε μια εισαγωγή στη θεωρία των μπεϋζιανών δικτύων και μεταδικτύων και στα προβλήματα μοντελοποίησης όπου αυτά εφαρμόζονται. Δόθηκε επίσης μια αναλυτική περιγραφή του προβλήματος της μάθησης των μπεϋζιανών δικτύων, το οποίο αποτελείται από δύο συνιστώσες: τη μάθηση των παραμέτρων και τη μάθηση της δομής (τοπολογίας) του δικτύου. Συζητήθηκαν επίσης θέματα σχετικά με τη μαθηματική πολυπλοκότητα του προβλήματος αυτού καθώς επίσης και σχετικά με τις μεθόδους αντιμετώπισής του που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία.

Στο Κεφάλαιο 5 δόθηκε η γενική, συμβολική και μαθηματική περιγραφή του προβλήματος MAUP. Συγκεκριμένα, παρουσιάστηκε το προτεινόμενο πιθανολογικό μοντέλο για την πρόβλεψη του πλαισίου χρήσης και των παραμέτρων του προφίλ του χρήστη, το οποίο αποτελείται από ένα μπεϋζιανό δίκτυο δύο επιπέδων. Το πρόβλημα MAUP αντιμετωπίστηκε εν συνεχεία σε τρεις φάσεις: στον προσδιορισμό του πλαισίου χρήσης, στον προσδιορισμό των παραμέτρων του προφίλ και στη μάθηση και την προσαρμογή του μοντέλου. Για αυτή την τελευταία φάση του προβλήματος, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος επιλογής μοντέλου (*model selection*) και προτάθηκε ένα κατάλληλο κριτήριο καθώς κι ένας άπληστος αλγόριθμος αναζήτησης και αποτίμησης δικτυακών δομών. Δόθηκαν, τέλος, αποτελέσματα εκτέλεσης του προτεινόμενου αλγορίθμου στο πλαίσιο δύο σεναρίων. Στο πρώτο σενάριο εξετάστηκε η επίδοση της προτεινόμενης λύσης σε μια περίπτωση μπεϋζιανού δικτύου άγνωστης δομής και

παραμέτρων, ενώ στο δεύτερο σενάριο εξετάστηκε η περίπτωση ενός δικτύου γνωστής δομής και άγνωστων παραμέτρων, ενώ η εκτέλεση πραγματοποιήθηκε σε συνδυασμό με την προτεινόμενη λύση στο πρόβλημα IAS. Η γενικότερη προσέγγιση που ακολουθήθηκε για την αντιμετώπιση του προβλήματος MAUP και για την κωδικοποίηση της σχετικής γνώσης συγκρίθηκε με μια εναλλακτική προσέγγιση βασισμένη σε συστήματα κανόνων.

Συνοψίζοντας, τα πρωτότυπα σημεία της διατριβής είναι τα εξής:

- Η υλοποίηση μηχανισμών που καθιστούν ικανό το κινητό τερματικό να οδηγείται κάθε στιγμή σε αναθέσεις υπηρεσιών σε επίπεδα ποιότητας και σε σημεία πρόσβασης, οι οποίες εκπληρώνουν την απαίτηση ABC και μεγιστοποιούν την παρεχόμενη χρησιμότητα.
- Η μαθηματική διατύπωση και η επίλυση του πολυ-παραμετρικού προβλήματος βελτιστοποίησης της Ευφυούς Επιλογής Πρόσβασης.
- Η περιγραφή και η μελέτη ενός πιθανολογικού δικτυακού μοντέλου για την μοντελοποίηση των παραμέτρων του προφίλ του χρήστη και για την αναπαράσταση της σχετικής γνώσης.
- Η μαθηματική διατύπωση και η επίλυση του προβλήματος της μάθησης των παραμέτρων και της δομής του μπεϋζιανού δικτύου που χρησιμοποιείται για την κωδικοποίηση των αιτιακών σχέσεων και του βαθμού εξάρτησης μεταξύ των προτιμήσεων του χρήστη, με χρήση ενός συνόλου παραδειγμάτων εκπαίδευσης.

6.2. Κατευθύνσεις για μελλοντικές επεκτάσεις της διατριβής

Μέχρι σήμερα, η έρευνα στο χώρο των συστημάτων πέραν της τρίτης γενιάς ήταν κυρίως προσανατολισμένη στην ενοποίηση των επιμέρους τεχνολογιών πρόσβασης, στη συνύπαρξη και στη μεταξύ τους συνεργασία με στόχο την πραγμάτωση του σύνθετου ασύρματου περιβάλλοντος. Μόνο πρόσφατα έχουν αρχίσει να διατυπώνονται απόψεις σχετικά με τη μεταφορά στα κινητά τερματικά μέρους της λειτουργικότητας που αφορά την επιλογή δικτύου πρόσβασης, τη διαμόρφωση των υπηρεσιών και τη διαχείριση του προφίλ του χρήστη. Σε αυτό ακριβώς το πλαίσιο παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν τα ειδικότερα προβλήματα μελέτης της παρούσας διατριβής.

Ορισμένες ιδέες για τη συνέχιση και την επέκταση της εργασίας αυτής παρατίθενται στη συνέχεια:

- Επέκταση της αντικειμενικής συνάρτησης – συνάρτησης χρησιμότητας που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3 και χρησιμοποιήθηκε στην επίλυση του προβλήματος IAS, ώστε να συμπεριλάβει και άλλες παραμέτρους οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν τη διαδικασία επιλογής πρόσβασης. Αυτές μπορούν, για παράδειγμα, να αφορούν το ιστορικό καλής/κακής εξυπηρέτησης του χρήστη από κάποιο σημείο πρόσβασης, την παρεχόμενη ποικιλία σε υπηρεσίες και σε αντίστοιχα επίπεδα ποιότητας, καθώς και όρους που σχετίζονται με τον συνολικό προγραμματισμό και διαχείριση των πόρων της ετερογενούς ασύρματης υποδομής.
- Μελέτη εναλλακτικών μεθόδων – αλγορίθμων για την επίλυση του προβλήματος IAS, όπως είναι η μέθοδος *simulated annealing*, οι γενετικοί αλγόριθμοι, κ.λπ. (βλ. Κεφάλαιο 3, παράγραφο 3.4), με σκοπό τον υπολογισμό συνολικά (*globally*) βέλτιστων λύσεων σε ακόμη μικρότερους χρόνους εκτέλεσης.
- Επέκταση του πιθανολογικού μοντέλου που προτείνεται για τη μοντελοποίηση των προτιμήσεων και του προφίλ του χρήστη, ώστε να συμπεριλάβει και άλλες παραμέτρους σχετιζόμενες με τη διαδικασία επιλογής πρόσβασης (βλ. πρώτο σημείο στην παρούσα λίστα).
- Αξιοποίηση του προτεινόμενου τρόπου μοντελοποίησης και πρόβλεψης των προτιμήσεων του χρήστη με επίγνωση του περιβάλλοντος σε εφαρμογές σύνθεσης υπηρεσιών (*service composition*).
- Μελέτη εναλλακτικών μεθόδων, αντί της επιλογής μοντέλου, για την επίλυση του προβλήματος της μάθησης της δομής μπεϋζιανών δικτύων, όπως είναι η επιλεκτική μεσοτίμηση μοντέλων (*selective model averaging*).
- Μελέτη εναλλακτικών αλγορίθμων αναζήτησης και αποτίμησης δικτυακών δομών για την εύρεση της τοπολογίας που ερμηνεύει κατά βέλτιστο τρόπο τα δεδομένα του συνόλου παραδειγμάτων εκπαίδευσης.

Αρκτικόλεξα

Αρκτικόλεξο	Απόδοση στην Αγγλική	Απόδοση στην Ελληνική
3G	Third Generation	3η Γενιά Κινητών Επικοινωνιών
4G	Fourth Generation	4η Γενιά Κινητών Επικοινωνιών
AAA	Authentication Authorization Accounting	Πιστοποίηση Εξουσιοδότηση Λογιστική
ABC	Always Best Connected	Διαρκώς καλύτερη σύνδεση
AP	Access Point	Σημείο Πρόσβασης
AR	Access Router	Δρομολογητής Πρόσβασης
B3G	Beyond the Third Generation	Πέραν της 3ης Γενιάς
BN	Bayesian Network	Μπεϋζιανό Δίκτυο
BSS	Best Signal Strength	Βέλτιστη Ισχύς Σήματος
CARD	Candidate Access Router Discovery	Ανακάλυψη Υποψηφίων Δρομολογητών Πρόσβασης
CPT	Conditional Probability Table	Πίνακας Δεσμευμένης Πιθανότητας
DSL	Digital Subscriber Line	Ψηφιακή Συνδρομητική Γραμμή
DVB	Digital Video Broadcasting	Ψηφιακή Μετάδοση Video
DVB - T	Digital Video Broadcasting - Terrestrial	Επίγεια Ψηφιακή Μετάδοση Video
GPRS	General Packet Radio Service	Γενική Ασύρματη Υπηρεσία Πακέτου
GPS	Global Positioning System	Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης
GSM	Global System for Mobile Communications	Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών
GUI	Graphical User Interface	Γραφική Διεπαφή Χρήστη
HTTP	Hyper Text Transfer Protocol	Πρωτόκολλο Μεταφοράς Υπερ-Κειμένου
IAS	Intelligent Access Selection	Ευφυής Επιλογή Πρόσβασης

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών
IETF	Internet Engineering Task Force	Ομάδα Εργασίας Εφαρμοσμένης Μηχανικής Διαδικτύου
IP	Internet Protocol	Πρωτόκολλο Διαδικτύου
JVM	Java Virtual Machine	Εικονική Μηχανή Java
LBS	Location-Based Services	Υπηρεσίες Βασισμένες στην Τοποθεσία
MAC	Machine Address Code	Κωδικός Διεύθυνσης Μηχανής
MAUP	Modelling and Adaptation to User Preferences	Μοντελοποίηση και Προσαρμογή στις Προτιμήσεις του Χρήστη
MIP	Mobile Internet Protocol	Πρωτόκολλο Κινητού Διαδικτύου
MMM	Mobility Management Module	Συνιστώσα Διαχείρισης Κινητικότητας
MMS	Multimedia Messaging Service	Υπηρεσία Μηνυμάτων Πολυμέσων
MT	Mobile Terminal	Κινητό Τερματικό
MTMS	Mobile Terminal Management System	Σύστημα Διαχείρισης Κινητού Τερματικού
NIAM	Network Interface Adaptation Module	Συνιστώσα Προσαρμογής στους Οδηγούς Δικτύου
NP	Non-deterministic Polynomial	Μη-αιτιοκρατικό πολυωνυμικό
PDA	Personal Digital Assistant	Προσωπικός Ψηφιακός Βοηθός
PNN	Probabilistic Neural Network	Πιθανολογικό Νευρωνικό Δίκτυο
QoS	Quality of Service	Ποιότητα Υπηρεσίας
RADIUS	Remote Authentication Dial-In User Service	Υπηρεσία Απομακρυσμένης Επαλήθευσης Ταυτότητας Χρήστη
RBS	Rule-Based System	Σύστημα Βασισμένο σε Κανόνες
SDR	Software Defined Radio	Ραδιο-επικοινωνίες Λογισμικού
SIP	Session Initiation Protocol	Πρωτόκολλο Έναρξης Συνόδου

SLA	Service Level Agreement	Συμφωνία Επιπέδου Υπηρεσίας
SMS	Short Message Service	Υπηρεσία Σύντομων Μηνυμάτων
TD-CDMA	Time-Division Code Division Multiple Access	Διαίρεση Χρόνου - Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Κώδικα άμεσης ακολουθίας
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System	Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Τηλεπικοινωνιών
UPM	User Preferences Module	Συνιστώσα Προτιμήσεων Χρήστη
WLAN	Wireless Local Area Network	Ασύρματο Τοπικό Δίκτυο
XML	Extensible Markup Language	Επεκτάσιμη Γλώσσα Σήμανσης