



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

**Χωροχρονικές Τεχνικές Μοντελοποίησης και  
Διαστρωματικής Σχεδίασης Δικτύων με Εφαρμογή σε  
Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

Ευάγγελος Σ. Ανυφαντής

Αθήνα, Ιούνιος 2015





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

**Χωροχρονικές Τεχνικές Μοντελοποίησης και  
Διαστρωματικής Σχεδίασης Δικτύων με Εφαρμογή σε  
Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

Ευάγγελος Σ. Ανυφαντής

**Συμβουλευτική Επιτροπή:** Συμεών Παπαβασιλείου, Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
Βασίλειος Μάγκλαρης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
Μιχαήλ Θεολόγου, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Επταμελής εξεταστική επιτροπή:

.....  
Σ. Παπαβασιλείου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Β. Μάγκλαρης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Μ. Θεολόγου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ν. Μήτρου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Δ. Κακλαμάνη  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....  
Α. Παναγόπουλος  
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Δ. Βέργαδος  
Επ. Καθηγητής Παν.  
Πειραιώς

Αθήνα, Ιούνιος 2015

.....  
**Ευάγγελος Σ. Ανυφαντής**

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ευάγγελος Σ. Ανυφαντής, 2015.

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 τον συγγραφέα.

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



# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1	Πλαίσιο έρευνας .....	3
1.2	Συμβολή της διατριβής .....	5
1.3	Διάρθρωση της διατριβής .....	6
<b>2</b>	<b>Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας:</b>	
	<b>Προβλήματα και Προκλήσεις</b>	<b>9</b>
2.1	Ιστορική αναδρομή και σχετική βιβλιογραφία .....	10
2.2	Επισκόπηση κατάληξης φάσματος στην περιοχή των Αθηνών .....	16
2.2.1	Σύνοψη μεθοδολογίας .....	17
2.2.2	Αποτελέσματα χρησιμοποίησης του ραδιοφάσματος .....	24
2.2.3	Συμπεράσματα .....	28
2.3	Βασικές κατευθύνσεις έρευνας σε δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας ..	29
<b>3</b>	<b>Εντοπισμός, Ανάλυση και Εκμετάλλευση Ιδιοτήτων του Ραδιοφάσματος</b>	<b>33</b>
3.1	Πλαίσιο μελέτης, κίνητρα και οφέλη .....	34
3.2	Ιδιότητες συσχέτισης μεταξύ φασματικών στοιχείων .....	38
3.2.1	Μεθοδολογία ανάλυσης .....	39
3.2.2	Αποτελέσματα σε πραγματικό περιβάλλον ραδιοσυχνότητων .....	41
3.3	Σενάριο εφαρμογής .....	49
3.4	Συμπεράσματα και δυνατές επεκτάσεις .....	53
<b>4</b>	<b>Μοντελοποίηση και Διαστρωματική Σχεδίαση</b>	
	<b>Κατανεμημένων Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας</b>	<b>55</b>
4.1	Κίνητρα, συνεισφορά και χαρακτηριστικά της προτεινόμενης προσέγγισης	55
4.2	Θεωρητικό υπόβαθρο και σχετική βιβλιογραφία .....	57
4.3	Μοντέλο συστήματος .....	62
4.4	Πλαίσιο διαστρωματικής σχεδίασης και αλγόριθμος επίλυσης .....	66
4.4.1	Διαστρωματική σχεδίαση .....	67
4.4.2	Αλγόριθμος επίλυσης .....	76
4.4.3	Παράλληλη προσέγγιση .....	79
4.5	Αποτελέσματα προσομοιώσεων .....	82
4.5.1	Σύγκλιση αλγορίθμου επίλυσης .....	83
4.5.2	Παράλληλες υλοποιήσεις αλγορίθμου Gibbs Sampling .....	86
4.5.3	Φυσικό στρώμα προτεινόμενης αρχιτεκτονικής .....	88
4.5.4	MAC στρώμα προτεινόμενης αρχιτεκτονικής .....	92
4.5.5	Στρώμα δικτύου προτεινόμενης αρχιτεκτονικής .....	93

<b>5</b>	<b>Μοντελοποίηση και Διαστρωματική Σχεδίαση</b>	<b>97</b>
	<b>Κεντροποιημένων Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας</b>	<b>97</b>
5.1	Κίνητρα, συνεισφορά και χαρακτηριστικά της προτεινόμενης προσέγγισης	98
5.2	Θεωρητικό και τεχνικό υπόβαθρο	100
5.3	Μοντέλο συστήματος	102
5.4	Σχεδίαση και ανάλυση της προτεινόμενης διαστρωματικής προσέγγισης	106
5.5	Επέκταση μεθοδολογίας	112
5.5.1	Ενσωμάτωση πληροφοριών κοινωνικών δικτύων σε δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας	114
5.6	Αποτελέσματα προσομοιώσεων	118
5.6.1	Εφαρμοσιμότητα της προτεινόμενης προσέγγισης σε δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας	120
5.6.2	Επίδοση προτεινόμενης προσέγγισης	122
5.6.3	Διαχείριση φήμης για την εμφάνιση πρωτευόντων χρηστών	125
<b>6</b>	<b>Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις</b>	<b>131</b>
<b>A'</b>	<b>Τυχαία Πεδία Markov - Markov Random Fields (MRFs)</b>	<b>137</b>
	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>141</b>

# Κατάλογος σχημάτων

2.1	Γνωσιακός κύκλος. ....	11
2.2	Κατηγοριοποίηση τεχνικών δυναμικής φασματικής πρόσβασης. ....	13
2.3	Εξοπλισμός φασματικής ανίχνευσης και τοποθεσία μετρήσεων. ....	19
2.4	Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας του αναλυτή φάσματος. ....	21
2.5	Χρησιμοποίηση ραδιοφάσματος για συχνότητες απο 300MHz έως 2700MHz. ....	25
2.6	Κατάληψη φάσματος σε συχνότητες λειτουργίας τηλεοπτικών καναλιών. .	27
3.1	Η θεωρητική εικόνα του ραδιοφάσματος, το εφαρμοζόμενο πλαίσιο μετρήσεων, και η υποβόσκουσα αλληλεξάρτηση των φασματικών στοιχείων. ....	36
3.2	Συσχέτιση τιμών ενέργειας μεταξύ διαφορετικών φασματικών στοιχείων. .	43
3.3	Ομαδοποίηση φασματικών στοιχείων βάσει των ιδιοτήτων συσχέτισης που χαρακτηρίζουν τη μετρηθείσα ενέργειά τους. Οι διακεκομμένες γραμμές συμβολίζουν τις συστάδες φασματικών στοιχείων που συνιστούν υποψήφια δευτερογενή κανάλια. ....	48
3.4	Κατάσταση κατάληψης της εξετασθείσας φασματικής περιοχής εύρους ζώνης 5MHz. Ο κάθετος άξονας έχει βαθμονομηθεί βάσει των 5000 δειγμάτων που συλλέχθηκαν σε χρονικό διάστημα περίπου 42 ωρών. ....	49
3.5	Διάρκεια σάρωσης σε σχέση με το μέγεθος των φασματικών στοιχείων (εξετάζοντας φασματική περιοχή εύρους ζώνης 50MHz και χρησιμοποιώντας την αρχιτεκτονική ανίχνευσης της ενότητας 2.2.1). ....	51
3.6	Βελτίωση επίδοσης τεχνικών αδρομερούς-λεπτομερούς ανίχνευσης εφαρμόζοντας τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μελέτης. ....	52
4.1	Παράδειγμα ανίχνευσης συγκρούσεων σε κατανεμημένα δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας. ....	65
4.2	Εφαρμοζόμενο MRF σύστημα γειτονιάς. ....	66
4.3	Προτεινόμενη αρχιτεκτονική κατανεμημένων δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας. ....	68
4.4	Παραδείγματα διαφορετικών μορφών της γενικής συνάρτησης χρησιμότητας. ....	71
4.5	Σύγκλιση των προτεινόμενων αλγορίθμων επίλυσης σε βέλτιστες κεντρικοποιημένες λύσεις. ....	84
4.6	Σύγκλιση $\tau$ -παράλληλων αλγορίθμων Gibbs Sampling με κριτήριο την αποφυγή συγκρούσεων. ....	87
4.7	Αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ δευτερευόντων χρηστών. ....	88

4.8	Φασματική χρησιμοποίηση στο πεδίο του χώρου. ....	90
4.9	Σύγκριση προτεινόμενης προσέγγισης με μονοεπίπεδες τεχνικές κατανομής καναλιών. ....	91
4.10	Εξεταζόμενη τοπολογία τυχαία τοποθετημένων κόμβων. ....	92
4.11	Μέσος αριθμός κόμβων για τους οποίους απαιτείται η χρήση CSMA/CA μετά από $t$ εποχές ανόπτησης (τυχαία τοπολογία). ....	93
4.12	Ανταγωνισμός πρόσβασης στο μέσο για κάθε δευτερεύον χρήστη. ....	93
4.13	Εξεταζόμενη τοπολογία δευτερεύοντος δικτύου με 3 ενεργές ροές. ....	94
4.14	Αριθμός εκχωρημένων καναλιών ανά κόμβο (μετά το πέρας 2000 εποχών ανόπτησης). ....	94
5.1	Μοντέλο συστήματος της προτεινόμενης κεντριοποιημένης προσέγγισης. ....	106
5.2	Επέκταση μοντελοποίησης για ενσωμάτωση πληροφοριών από κοινωνικά δίκτυα. ....	113
5.3	Εξεταζόμενη τοπολογία δευτερεύοντος δικτύου (πριν και μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου Gibbs sampling). ....	121
5.4	Σύγκλιση σε καταστάσεις ελαχίστης ενέργειας. ....	121
5.5	Άθροισμα μήκους ουρών (εναπομείναντα πακέτα που δεν έχουν φτάσει στον κόμβο προορισμού) μετά τη πάροδο 1000 χρονικών θυρίδων. ....	123
5.6	Μέση διατεματική (από άκρο σε άκρο) καθυστέρηση για τις υπάρχουσες ροές. ....	124
5.7	Μέση διεκπεραιωτικότητα δικτύου ως προς τις υπάρχουσες ροές. ....	124
5.8	Η εξεταζόμενη τοπολογία δευτερεύοντος δικτύου και η αντίστοιχη ενυπάρχουσα φήμη επανεμφάνισης πρωτευόντων χρηστών για κάθε θέση. ....	127
5.9	Αναπαράσταση της σχετιζόμενης φήμης επανεμφάνισης πρωτευόντων χρηστών σε δύο διαστάσεις για το εξεταζόμενο σενάριο. ....	127
5.10	Ενεργοποιήσεις δευτερευόντων ζεύξεων για ροή δεδομένων μεταξύ του κόμβου πηγής 11 (στη θέση με συντεταγμένες (1,3) - βλέπε επίσης το Σχήμα 5.8) και του κόμβου προορισμού 15 (στη θέση με συντεταγμένες (5,3)). ....	128

# Κατάλογος πινάκων

2.1	Παράμετροι λειτουργίας εξοπλισμού .....	23
3.1	Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα διαστημάτων εμπιστοσύνης του συντελεστή συσχέτισης για βαθμό εμπιστοσύνης ίσο με 95%. .....	46
5.1	Παράμετροι Προσομοίωσης .....	119



*Στους γονείς μου, Στέφανο και Νίκη,  
και στην αδερφή μου, Βίκυ, ...*





# Περίληψη

Η λειτουργία των δικτύων επικοινωνιών - και ιδιαίτερα των ασύρματων δικτύων - επηρεάζεται συχνά από τις μεταβαλλόμενες συνθήκες του δικτυακού περιβάλλοντος, οι οποίες εισάγουν εξαρτήσεις στον τρόπο λειτουργίας τους τόσο στο πεδίο του χώρου όσο και στο πεδίο του χρόνου. Το φαινόμενο αυτό γίνεται εμφανέστερο σε σενάρια ασύρματων δικτύων νέας γενιάς που εκμεταλλεύονται σχήματα δυναμικής φασματικής πρόσβασης και στηρίζονται στην τεχνολογία των γνωσιακών ραδιοεπικοινωνιών. Για το λόγο αυτό, η παρούσα διδακτορική διατριβή επικεντρώνεται σε δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας και ερευνά τεχνικές μοντελοποίησης των εν λόγω δικτύων που λαμβάνουν εγγενώς υπόψη τις υφιστάμενες χωροχρονικές εξαρτήσεις.

Μέσω μιας επισκόπησης κατάληψης φάσματος στην περιοχή των Αθηνών αποτυπώνεται η πραγματική εικόνα του φάσματος ραδιοσυχνότητων, αναδεικνύονται πρακτικά προβλήματα στη μεθοδολογία φασματικής ανίχνευσης και συμπεραίνεται η ύπαρξη ασυμφωνιών φασματικής κατάληψης στις διαστάσεις του χώρου και του χρόνου. Για τη βελτίωση της ενημερότητας των χρηστών τεχνολογίας γνωσιακών ραδιοεπικοινωνιών περιγράφεται μια μεθοδολογία ανάλυσης των αρχικών ακατέργαστων δεδομένων που προκύπτουν από τη διαδικασία φασματικής ανίχνευσης με σκοπό την εξαγωγή πολύτιμων πληροφοριών και χρήσιμων στατιστικών ιδιοτήτων του ραδιοφάσματος. Συγκεκριμένα, εντοπίζονται και μελετώνται οι ιδιότητες συσχέτισης στη μετρούμενη ενέργεια γειτονικών καναλιών και παρουσιάζονται πρακτικά σενάρια εφαρμογής που βελτιώνουν πρακτικές μεθοδολογίες φασματικής ανίχνευσης μέσω μιας αποδοτικότερης σχέσης μεταξύ ταχύτητας και ακρίβειας ανίχνευσης.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, μελετώνται προβλήματα βελτιστοποίησης που αφορούν τόσο κατανεμημένες όσο και κεντρικοποιημένες προσεγγίσεις λειτουργίας των δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας. Η κατανομή φασματικών πόρων, ο έλεγχος ισχύος και οι διαδικασίες χρονοπρογραμματισμού και δρομολόγησης αποτελούν βασικά αντικείμενα έρευνας τα οποία αναλύονται εκτενώς και αντιμετωπίζονται από τεχνικές διαστρωματικής σχεδίασης που προτείνονται στην τρέχουσα εργασία. Ειδικότερα, παρουσιάζεται μια νέα μεθοδολογία μοντελοποίησης ασύρματων δικτύων βασισμένη στη θεωρία των τυχαίων πεδίων Markov και προτείνεται μια κατανεμημένη αρχιτεκτονική διαστρωματικής σχεδίασης που οδηγεί μέσω τοπικών χωρικών εξαρτήσεων σε βέλτιστες καταστάσεις του συνολικού δικτύου. Αντίστοιχα, υιοθετώντας τις πιο πρόσφατες σχετικές ρυθμιστικές κινήσεις που προδιαγράφουν ένα αρχικό κεντρικοποιημένο τρόπο λειτουργίας δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας, προτείνεται ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο διαστρωματικής σχεδίασης των εν λόγω δικτύων που βασίζεται σε κεντρικές βάσεις δεδομένων φάσματος και συνεισφέρει στη συνδυασμένη αντιμετώπιση προβλημάτων στοχεύοντας στη γενικότερη βελτιστοποιημένη λειτουργία των δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας.

**Λέξεις-κλειδιά:** Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, Διαστρωματική Σχεδίαση, Μοντελοποίηση Δικτύου, Τυχαία Πεδία Markov, Βελτιστοποίηση Δικτύων, Διαμοιρασμός Φασματικών Πόρων, Συσχετίσεις Ενέργειας, Επισκόπηση Κατάληψης Φάσματος.



# Abstract

Communication networks, and especially the wireless ones, are often influenced by the dynamically changing conditions of the network environment, hence, introducing dependencies in both time and space dimensions. This phenomenon becomes even more prominent in next generation wireless networks that exploit dynamic spectrum access schemes and cognitive radio technology. For that reason, this thesis focuses on cognitive radio networks and investigates network modeling techniques that inherently take into account any existing spatiotemporal dependencies.

The conducted spectrum occupancy survey in the metropolitan area of Athens demonstrates the actual picture of radio spectrum, unveils practical difficulties in spectrum sensing methodologies and highlights the existence of discontinuities in spectrum occupancy both in space and time dimensions. To improve cognitive radio users awareness, an inference methodology is described towards extracting valuable information and useful statistical properties of spectrum through processing and analyzing the raw spectrum sensing data. In particular, we identify and study the correlation properties of adjacent frequency bins as well as present practical application scenarios that improve current methodologies of energy detection based spectrum sensing through a more efficient relationship between speed and accuracy.

The focus of the thesis is placed on optimization problems in cognitive radio networks covering both distributed and centralized approaches. Spectrum resource allocation, power control, scheduling and routing procedures are among the key research issues that are analyzed and addressed in the current work through the proposed cross-layer design. Specifically, this thesis introduces a new network modeling methodology based on the theory of Markov random fields and proposes a distributed cross-layer architecture contributing to global optimal network states through local interactions. Similarly, by adopting the most recent regulations that specify a first centralized approach for cognitive radio networks practical exploitation, we propose a holistic cross-layer design framework compatible with the specified centralized spectrum databases and aiming at jointly addressing a class of network problems towards the overall optimized operation of cognitive radio networks.

**Keywords:** Cognitive Radio Networks, Cross-layer Design, Network Modeling, Markov Random Fields, Network Optimization, Spectrum Sharing, Power Correlations, Spectrum Occupancy Survey.



# Αντί προλόγου

Αντί προλόγου, οφείλω και επιθυμώ να αφιερώσω λίγες γραμμές για να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε ορισμένους ανθρώπους που συνέβαλλαν, ο καθένας με τον τρόπο του, στην εκπόνηση της ανά χείρας διδακτορικής διατριβής. Χωρίς τη συνδρομή τους, το περιεχόμενο της παρούσας εργασίας θα ήταν φτωχότερο και η ολοκλήρωσή της δυσκολότερη.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στη σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Συμεών Παπαβασιλείου, στον οποίο θα ήθελα αρχικά να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου για την ευκαιρία που μου παρείχε ώστε να εκπαιδευτώ και να εντρυφήσω στην επιστημονική έρευνα της δικτύωσης υπολογιστών. Η υποστήριξη και καθοδήγηση που έλαβα, καθώς και η εμπιστοσύνη προς το πρόσωπό μου και η ομαλή συνεργασία μας, αποτέλεσαν καθοριστικούς παράγοντες για την εξέλιξη των διδακτορικών μου σπουδών.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ. Βασίλη Μάγκλαρη, διευθυντή του εργαστηρίου Διαχείρισης & Βέλτιστου Σχεδιασμού Δικτύων Τηλεματικής (NETMODE), για τη φιλοξενία που μου παρείχε στο εργαστήριο κατά τη διάρκεια των διδακτορικών μου σπουδών. Οι ουσιώδεις και εποικοδομητικές συζητήσεις μας, καθώς και ο ενθουσιασμός που μου μετέφερε κυρίως κατά την αλληλεπίδρασή μας στην οργάνωση προπτυχιακών εργαστηρίων, επηρέασαν τον τρόπο σκέψης μου και συνέβαλλαν έμμεσα στην ολοκλήρωση της δουλειάς αυτής. Επιπλέον, οφείλω να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου στον καθηγητή κ. Μιχαήλ Θεολόγου για την μακροχρόνια στήριξή του, τις συμβουλές και την προθυμία συνεργασίας που μου προσέφερε όλα αυτά τα χρόνια.

Κατά τη διάρκεια των διδακτορικών μου σπουδών είχα την τύχη, κυρίως μέσω του εργαστηρίου NETMODE, αλλά και όχι μόνο, να συμπορεύομαι με συναδέλφους και πραγματικούς φίλους που επηρέασαν, ο καθένας με τον τρόπο του, την εξέλιξη των διδακτορικών μου σπουδών. Θα ήταν μάταιο να προσπαθήσω να αναφερθώ σε καθέναν χωριστά, αλλά τους ευχαριστώ για την καθημερινή αλληλεπίδραση, την αμέριστη υποστήριξη, και τις ευχάριστες συζητήσεις που διευκόλυναν την προσπάθειά μου και συνέβαλλαν ουσιαστικά στην ποιοτικότερη ολοκλήρωση των σπουδών μου. «Scripta manent»..., αλλά οι πράξεις έχουν ουσία, και για το λόγο αυτό, υπόσχομαι να εκφράζω την ευγνωμοσύνη μου για καθέναν σας ξεχωριστά στην πράξη.

Για το περιεχόμενο της διδακτορικής διατριβής, οφείλω να αναφερθώ και να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Βασίλη Καρυώτη, ο οποίος με καθοδήγησε ερευνητικά από την αρχή των διδακτορικών μου σπουδών, τον Σταμάτη Αρκουλή και την Ελένη Στάη. Ως συν-συγγραφείς των δημοσιευμένων επιστημονικών εργασιών μου, η συνεισφορά τους στην παρούσα διδακτορική διατριβή είναι άμεση και ουσιαστική. Σας ευχαριστώ θερμά για την άψογη και ευχάριστη συνεργασία μας.

Τέλος, επιθυμώ να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στο Ίδρυμα Παιδείας και Ευρωπαϊ-

κού Πολιτισμού και τον Πρόεδρό του, κ. Ν. Τρίχα, για την ηθική και οικονομική στήριξη που μου παρείχε κατά τη διάρκεια των διδακτορικών μου σπουδών. Η συμβολή του για τη δημιουργία των κατάλληλων συνθηκών επίτευξης μεταπτυχιακής έρευνας υπήρξε σημαντική, και για το λόγο αυτό, εύχομαι να συνεχίσει επιτυχημένα να παρέχει την υποστήριξή του σε νέους μελλοντικούς ερευνητές.

*Ευάγγελος Σ. Ανυφαντής  
Αθήνα, Ιούνιος 2015*

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

Οι ασύρματες επικοινωνίες αποτελούσαν πάντοτε και συνεχίζουν να αποτελούν ένα ενεργό πεδίο έρευνας με πληθώρα ανοικτών προς μελέτη ζητημάτων και αυξημένο κοινωνικό και οικονομικό αντίκτυπο. Σε αντίθεση με τις ενσύρματες επικοινωνίες, χαρακτηρίζονται από τις ιδιαιτερότητες του κοινού ασύρματου μέσου, δηλαδή του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων ή αλλιώς *ραδιοφάσματος* (radio spectrum), καθώς και τη φύση των ασύρματων ζεύξεων που αναπόφευκτα δύναται να εκτίθενται σε εξωγενείς παράγοντες με αποτέλεσμα τη χρονικά και χωρικά μεταβαλλόμενη ποιότητά τους. Το ραδιοφάσμα αποτελεί έναν πρακτικά πεπερασμένο φυσικό πόρο που χρησιμοποιείται από κοινού από ασύρματα τερματικά διαφόρων υπηρεσιών. Για την εναρμονισμένη λειτουργία τους, η χρήση του ραδιοφάσματος υπόκειται σε αυστηρούς κανόνες που θεσπίζονται από τις ρυθμιστικές αρχές κάθε χώρας και συμμορφώνονται με διεθνή κανονιστικά πλαίσια και υποδείξεις. Ωστόσο, οι σύγχρονες τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, σε συνδυασμό με τις αυξανόμενες απαιτήσεις των σημερινών χρηστών για επικοινωνία με οποιοδήποτε μέσον, οπουδήποτε, και οποτεδήποτε, εισάγουν νέες προκλήσεις, θέτουν υπό αμφισβήτηση παλαιές υιοθετημένες τεχνικές και συμβάλλουν στη διαμόρφωση ενός νέου σκηνικού ασύρματης δικτύωσης.

Η βελτίωση της ποιότητας των υπηρεσιών στους τελικούς χρήστες και η αποδοτικότερη λειτουργία του συνολικού δικτύου συνιστούν πάγιους στόχους στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών. Παράλληλα, η σημερινή εικόνα του ραδιοφάσματος περιγράφει δυο αντιφατικές τάσεις που χαρακτηρίζουν και συνάμα εγείρουν ερωτήματα σχετικά με τις σύγχρονες πρακτικές εκχώρησης ραδιοσυχνοτήτων. Πρώτον, αναθέτοντας στατικά

σε αδειοδοτημένες υπηρεσίες το δικαίωμα αποκλειστικής χρήσης συγκεκριμένων κομματιών ραδιοφάσματος επιτυγχάνεται η εύρυθμη λειτουργία των ήδη υπαρχόντων υπηρεσιών, ωστόσο, συρρικνώνοντας τους ελεύθερους φασματικούς πόρους που προορίζονται για νέες καινοτόμες υπηρεσίες και δημιουργώντας έλλειμμα ζήτησης ραδιοφάσματος. Από την άλλη πλευρά, η διαφαινόμενη έλλειψη φασματικών πόρων έρχεται σε αντίθεση με δημοσιευμένα αποτελέσματα σύγχρονων επισκοπήσεων κατάληψης φάσματος, τα οποία φανερώνουν ότι οι ήδη εκχωρημένες φασματικές ζώνες υποχρησιμοποιούνται και παρουσιάζουν έντονες χωρικές και χρονικές διακυμάνσεις ως προς το βαθμό χρησιμοποίησής τους, ακόμη και σε πυκνοκατοικημένες περιοχές. Στην ουσία, όμως, τα συμπεράσματά τους, σε συνδυασμό με τους πάγιους στόχους έρευνας των δικτύων επικοινωνιών, αποτέλεσαν κινητήρια δύναμη για την αναθεώρηση των τρεχουσών σχημάτων εκχώρησης ραδιοσυχνοτήτων και λειτουργούν ως καταλύτης στην προσπάθεια μετάβασης από στατική σε δυναμική φασματική πρόσβαση.

Η ανάγκη αντιμετώπισης των προβλημάτων και των προκλήσεων του νέου σκηνικού ασύρματης δικτύωσης συμβάλλει στην αναζήτηση νέων τεχνολογιών ασύρματης δικτύωσης που προσφέρουν στον τελικό χρήστη και στους σχεδιαστές δικτύων προηγμένες δυνατότητες και ευφυή χαρακτηριστικά λειτουργίας. Η *γνωσιακή ραδιοεπικοινωνία* (Cognitive Radio) και κατ' επέκταση τα *δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας* (Cognitive Radio Networks) αποτελούν μια από τις σημαντικότερες πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα των ασυρμάτων επικοινωνιών και δύναται να συνεισφέρουν προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση. Η τεχνολογία των γνωσιακών ραδιοεπικοινωνιών περιγράφει τη μετάβαση από προγραμματιζόμενες σε ευφυείς πλατφόρμες ραδιοεπικοινωνιών με δυνατότητες μάθησης, λογικής και αυτοματοποιημένου ελέγχου. Εισάγει ευελιξία, προσαρμοστικότητα και ευφυΐα τους ασύρματους κόμβους των παραδοσιακών δικτύων επικοινωνίας καθιστώντας τους ικανούς να αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον και να προσαρμόζονται κατάλληλα και ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής της τεχνολογίας γνωσιακών ραδιοεπικοινωνιών αποτελούν τα *δευτερεύοντα δίκτυα* (secondary networks), δηλαδή τα ασύρματα δίκτυα κόμβων που στηρίζονται στη δυναμική φασματική πρόσβαση και λειτουργούν στη σκιά των ήδη αδειοδοτημένων υπηρεσιών ή διαφορετικά των πρωτευόντων δικτύων (primary networks). Ωστόσο, οι νέες αυξημένες δυνατότητες οδηγούν σε νέες προκλήσεις. Η προσφερόμενη ευελιξία συνεπάγεται περι-



σότερους βαθμούς ελευθερίας και επακόλουθα επιτρέπει την αντιμετώπιση σύνθετων και πολυπλοκότερων προβλημάτων, ενώ ο μη τυποποιημένος ακόμη τρόπος λειτουργίας των δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας θέτει την ανάγκη έρευνας και σχεδίασης νέων ολοκληρωμένων λύσεων υψηλής αποδοτικότητας.

Νέα δικτυακά σενάρια, π.χ. παρουσίας τόσο πρωτεύοντων όσο και δευτερευόντων χρηστών, έρχονται στο προσκήνιο και κατά συνέπεια, νέες αποδοτικές τεχνικές μοντελοποίησης και σχεδίασης ασύρματων δικτύων νέας γενιάς απαιτείται να ερευνηθούν. Βασικά γνωρίσματα των νέων σεναρίων ασύρματης δικτύωσης και ιδίως των δευτερευόντων δικτύων αποτελούν οι δυναμικά μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας. Για το λόγο αυτό, η παρούσα εργασία πραγματεύεται τεχνικές μοντελοποίησης και διαστρωματικής σχεδίασης δικτύων, με επίκεντρο τα δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας, λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη υφιστάμενες εξαρτήσεις στο πεδίο του χρόνου, του χώρου και της συχνότητας.

## 1.1 Πλαίσιο έρευνας

Η αποτίμηση της πραγματικής κατάστασης του περιβάλλοντος ραδιοσυχνοτήτων απαιτεί υψηλής ακρίβειας επισκοπήσεις κατάληψης φάσματος. Οι εν λόγω μελέτες μέσω της καταγραφής και ανάλυσης δεδομένων φασματικής ανίχνευσης συμβάλλουν στην ανάδειξη συγκεκριμένων ερευνητικών προβλημάτων, όπως για παράδειγμα, η υποχρησιμοποίηση μεγάλων εκχωρημένων κομματιών φάσματος εν αντιθέσει με το αναφερόμενο στη σχετική βιβλιογραφία αδιέξοδο μεταξύ ζήτησης και προσφοράς φασματικών πόρων. Η παρούσα διατριβή ακολουθεί το ανωτέρω πλαίσιο μελέτης και χρησιμοποιεί τη συλλογή πραγματικών μετρήσεων φασματικής κατάληψης ως το βασικό εργαλείο α) μέτρησης και αξιολόγησης της τρέχουσας κατάστασης του ραδιοφάσματος και β) συμπερασμού επιμέρους προβλημάτων και βασικών κατευθύνσεων έρευνας. Επιπλέον, υιοθετεί την άποψη ότι οι γνωσιακές ραδιοεπικοινωνίες αποτελούν σήμερα την καταλληλότερη και πλέον υποσχόμενη τεχνολογία για την αποτελεσματική διαχείριση του ραδιοφάσματος, τη βελτιστοποίηση πάγιων στόχων στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών και τη γενικότερη προσαρμογή των ασύρματων δικτύων στις απαιτήσεις των σύγχρονων επικοινωνιών.

Η λειτουργία των δευτερευόντων δικτύων, δηλαδή της κύριας εφαρμογής της τεχνολογίας γνωσιακών ραδιοεπικοινωνιών, στηρίζεται στην εκμετάλλευση σχημάτων δυνα-

μικής φασματικής πρόσβασης και απαιτεί την προσαρμογή τους στις επικρατούσες συνθήκες περιβάλλοντος ραδιοσυχνότητας. Δεδομένης της δυναμικής φύσης των ευκαιριών μετάδοσης, χαρακτηρίζεται από τις μεταβαλλόμενες συνθήκες στο πεδίο του χρόνου, του χώρου και της συχνότητας, ενώ το πεπερασμένο εύρος εκπομπής των ασύρματων τερματικών, σε συνδυασμό με την εκάστοτε τοπολογία τους, δημιουργεί χωρικές εξαρτήσεις που επηρεάζουν άμεσα την καθολική λειτουργία του δικτύου. Στο πλαίσιο αυτό κρίνεται επιτακτική η εμβριθής μελέτη των δυναμικά μεταβαλλόμενων συνθηκών λειτουργίας καθώς και η διερεύνηση τεχνικών που λαμβάνουν υπόψη και αξιοποιούν τις υφιστάμενες χωροχρονικές εξαρτήσεις κατά τη φάση μοντελοποίησης και σχεδίασης του δικτύου.

Με σκοπό την επανεξέταση των τρεχουσών πρακτικών λειτουργίας των ασύρματων δικτύων και τη βελτιστοποίηση των νέων δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας, η παρούσα εργασία κινείται στο πλαίσιο έρευνας προσεγγίσεων που ενστερνίζονται τη δημοφιλή στη σύγχρονη βιβλιογραφία ιδέα της *διαστρωματικής σχεδίασης* (cross-layer design) αρχιτεκτονικών λειτουργίας για ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών. Με τον όρο διαστρωματική σχεδίαση ορίζεται κάθε είδους σχεδιασμός πρωτοκόλλων που παραβιάζει την κλασική αρχιτεκτονική, βασισμένης σε επίπεδα, στοιβάς πρωτοκόλλων (layered architecture). Η προκείμενη τεχνική σχεδίασης δικτύων λαμβάνει ιδιαίτερη σημασία εξαιτίας της αυξημένης ευελιξίας και των πλεονεκτημάτων επίδοσης που δύναται να προσφέρει, καθώς ο διαμοιρασμός πληροφοριών μεταξύ όλων των στρωμάτων μιας στοιβάς πρωτοκόλλων προσφέρει στο σχεδιαστή ενός δικτύου περισσότερους βαθμούς ελευθερίας κατά την αναζήτηση βέλτιστων καταστάσεων λειτουργίας.

Στο γενικότερο πλαίσιο έρευνας και ανάπτυξης δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας επικρατούν δυο διαφορετικά ρεύματα τα οποία πηγάζουν, αφενός, από την αρχική σύλληψη της ιδέας για δημιουργία ευφών κατανεμημένων πλατφορμών ραδιοεπικοινωνίας με δυνατότητες μάθησης, και αφετέρου, από τις μετέπειτα πρώιμες προσπάθειες πρακτικής εφαρμογής δευτερευόντων δικτύων οι οποίες προδιαγράφουν ένα κεντρικοποιημένο πλαίσιο λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα, η εφαρμογή της τεχνολογίας γνωσιακών ραδιοεπικοινωνιών σε δικτυακά σενάρια χωρίς προϋπόθεση επιπρόσθετης δικτυακής υποδομής αποτέλεσε εξ αρχής βασικό πεδίο έρευνας, συνάδοντας με το όραμα για αυτόνομα κατανεμημένα δίκτυα με ευφυΐα στα άκρα που προσφέρουν ευελιξία εφαρμογής, επεκτασιμότητα, σύνθεση πολύπλοκων τοπολογιών και μικρό κόστος επενδύσεων σε αναγκαίες

δικτυακές υποδομές. Παράλληλα, πρόσφατες αποφάσεις διεθνών ρυθμιστικών αρχών και οργανισμών τυποποίησης, στην προσπάθεια τους να θέσουν τις βάσεις και να διευκολύνουν μέσω ενός κανονιστικού πλαισίου την περαιτέρω εξέλιξη των δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας έως την εμπορική αποδοχή τους, προωθούν ένα κεντρικοποιημένο πλαίσιο λειτουργίας υποβοηθούμενο από κεντρικές οντότητες που αναφέρονται στη σχετική βιβλιογραφία ως βάσεις δεδομένων φάσματος. Με τον τρόπο, λοιπόν, αυτό γίνεται εμφανής η διάκριση δύο βασικών κατευθύνσεων έρευνας όσον αφορά τα δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας που χαρακτηρίζονται από τον καταναμημένο ή τον κεντρικοποιημένο τρόπο λειτουργίας τους.

## 1.2 Συμβολή της διατριβής

Η παρούσα διατριβή συμβάλλει αρχικά στην καταγραφή της πραγματικής εικόνας του ραδιοφάσματος μέσω της επισκόπησης κατάληψης φάσματος που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή των Αθηνών και συμπληρώνει αντίστοιχες μελέτες που πραγματοποιούνται τα τελευταία έτη παγκοσμίως σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές με απώτερο σκοπό τον εμπλουτισμό των συλλεχθέντων δεδομένων, τη διασταύρωση των παρατηρήσεων σε μεγαλύτερη κλίμακα και τον έλεγχο της εγκυρότητας και ορθότητας των εξαχθέντων συμπερασμάτων. Επιπλέον, αναδεικνύει υπάρχουσες πρακτικές αδυναμίες στον τρόπο φασματικής ανίχνευσης και προτείνει μια μεθοδολογία ανάλυσης και επεξεργασίας των δεδομένων ανίχνευσης με στόχο τον εντοπισμό στατιστικών ιδιοτήτων, και ειδικότερα ιδιοτήτων συσχέτισης στο πεδίο της συχνότητας, που η γνώση τους δύναται να ωφελήσει τη λειτουργία των δευτερευόντων χρηστών. Προς την κατεύθυνση αυτή παρουσιάζονται πρακτικά σενάρια εφαρμογής της προτεινόμενης μεθοδολογίας στον τομέα των δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας δίνοντας έμφαση στη διαδικασία εύρεσης διαθέσιμων φασματικών πόρων μέσω μιας αποδοτικότερης σχέσης μεταξύ ταχύτητας και ακρίβειας ανίχνευσης.

Η πραγματοποιηθείσα μελέτη στοχεύει τόσο σε κεντρικοποιημένα όσο και σε καταναμημένα δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας καλύπτοντας κατά συνέπεια τα δύο βασικά ρεύματα έρευνας στο συγκεκριμένο τομέα. Παρουσιάζει μια νέα μεθοδολογία μοντελοποίησης των δευτερευόντων δικτύων λαμβάνοντας εξ αρχής υπόψη τις υπάρχουσες χωροχρονικές εξαρτήσεις και διευκολύνοντας με τον τρόπο αυτό την περαιτέρω ανάλυσή τους αλλά και τη σχεδίαση νέων αποδοτικών μηχανισμών. Συνεισφέρει, επίσης, στην ευέλικτη

και αποδοτική σχεδίαση δευτερευόντων δικτύων περιγράφοντας ένα νέο τρόπο διαστρωματικής σχεδίασης και εισάγοντας ένα κάθετο στρώμα ελέγχου στην παραδοσιακή στοίβα πρωτοκόλλων με σκοπό την υποστήριξη μηχανισμών βελτιστοποίησης της συνολικής λειτουργίας του δικτύου.

Επίκεντρο της παρούσας μελέτης αποτελεί η βελτίωση των επιδόσεων του δευτερεύοντος δικτύου λαμβάνοντας, παράλληλα, ως προϋπόθεση την ανάγκη συμμόρφωσης με τις πρόσφατες ρυθμιστικές κινήσεις που προωθούν την πρακτική εφαρμογή της τεχνολογίας γνωσιακών ραδιοεπικοινωνιών, αλλά και την απαίτηση για ανεμπόδιστη λειτουργία των πρωτευόντων συστημάτων. Με το ανωτέρω σκεπτικό εξετάζεται η σφαιρική και συνδυασμένη αντιμετώπιση - μέσω προτεινόμενων μηχανισμών - επιμέρους προβλημάτων που ενδεικτικά περιλαμβάνουν τη βέλτιστη κατανομή φασματικών πόρων, τον αποτελεσματικό έλεγχο ισχύος εκπομπής, το χρονοπρογραμματισμό μεταδόσεων και την αποδοτική δρομολόγηση. Έτσι, η παρούσα διατριβή μελετά και προτείνει ολοκληρωμένες διαστρωματικές λύσεις τόσο για κεντρικοποιημένα όσο και κατανεμημένα δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας συνεισφέροντας στην έρευνα και αξιοποίηση των προηγμένων δυνατοτήτων της καινοφανούς αυτής τεχνολογίας δικτύωσης.

Οι προτεινόμενες τεχνικές μοντελοποίησης και διαστρωματικής σχεδίασης των δευτερευόντων δικτύων βασίζονται στη θεωρία των τυχαίων πεδίων Markov, δηλαδή σε ένα μαθηματικό πλαίσιο ανάλυσης που συναντάται κυρίως σε διαφορετικούς επιστημονικούς κλάδους όπως η στατιστική φυσική και η ανάλυση εικόνας. Η θεωρία των τυχαίων πεδίων Markov θεωρείται καταλληλότερη για την ανάλυση δευτερευόντων δικτύων που λειτουργούν υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες περιβάλλοντος στο πεδίο του χρόνου και του χώρου, καθώς αξιοποιεί εκ φύσεως τις τοπικές χωρικές εξαρτήσεις για τη μελέτη καθολικών παρατηρούμενων γεγονότων. Συνεπώς, αξιοποιώντας την εν λόγω θεωρία, η παρούσα διατριβή καθιστά δυνατή την πρόταση βελτιστοποιήσεων όσον αφορά τη λειτουργία των δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας, ενώ παράλληλα ανοίγει το δρόμο για περαιτέρω έρευνα και εφαρμογή των τυχαίων πεδίων Markov σε προβλήματα δικτύωσης μεταφέροντας τεχνογνωσία από διαφορετικά επιστημονικά πεδία.

### 1.3 Διάρθρωση της διατριβής

Το υπόλοιπο της παρούσας διατριβής δομείται ως εξής.

Το Κεφάλαιο 2 εισάγει τα προβλήματα και τις προκλήσεις των δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας μέσω μιας επισκόπησης της σχετικής βιβλιογραφίας και μιας σύντομης ιστορικής αναδρομής που ξεκινά από την αρχική επινόηση της τεχνολογίας των γνωσιακών ραδιοεπικοινωνιών και καταλήγει στις πιο πρόσφατες εξελίξεις. Επιπρόσθετα, αναδεικνύοντας την ανάγκη αποτύπωσης της πραγματικής εικόνας του ραδιοφάσματος, παρουσιάζει την επισκόπηση κατάληψης φάσματος που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή των Αθηνών, συνοψίζει κρίσιμα συμπεράσματα και αναλύει τις βασικές προκύπτουσες κατευθύνσεις έρευνας σε δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας.

Το Κεφάλαιο 3 ασχολείται με την επεξεργασία των αρχικών ακατέργαστων δεδομένων μετρήσεων ανίχνευσης του ραδιοφάσματος, τα οποία προέρχονται από την επισκόπηση κατάληψης φάσματος στην περιοχή των Αθηνών, και προτείνει μια μεθοδολογία ανάλυσης για την εξαγωγή πολύτιμων πληροφοριών και "κρυμμένων" στατιστικών ιδιοτήτων. Εστιάζει στον εντοπισμό των ιδιοτήτων συσχέτισης στο πεδίο της συχνότητας και παρουσιάζει τα πιθανά οφέλη που η γνώση τους δύναται να αποφέρει. Ως βασικό σενάριο μελέτης και πρακτικής εφαρμογής παρουσιάζεται η βελτίωση πρακτικών μεθοδολογιών φασματικής ανίχνευσης, οι οποίες στηρίζονται στον εντοπισμό της ενέργειας σημάτων, μέσω μιας αποδοτικότερης σχέσης μεταξύ ταχύτητας και ακρίβειας ανίχνευσης.

Το Κεφάλαιο 4 επικεντρώνεται σε κατανεμημένα δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας και προτείνει χωροχρονικές τεχνικές μοντελοποίησης και διαστρωματικής σχεδίασής τους. Εισάγει τη θεωρία των τυχαίων πεδίων Markov στη μελέτη και μοντελοποίηση της λειτουργίας των δευτερευόντων δικτύων, παρουσιάζει ένα καινοτόμο πλαίσιο διαστρωματικής σχεδίασης και επαληθεύει τα προσδοκώμενα οφέλη μέσω μιας σειράς αποτελεσμάτων προσομοίωσης.

Σε αντίθεση, το Κεφάλαιο 5 εστιάζει στον κεντρικοποιημένο τρόπο λειτουργίας των δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας όπως προδιαγράφεται από τις πιο πρόσφατες σχετικές ρυθμιστικές κινήσεις. Στοχεύοντας στη βελτιστοποίηση των επιδόσεων των δευτερευόντων δικτύων εξετάζονται θέματα που άπτονται στα προβλήματα κατανομής φασματικών πόρων, ελέγχου ισχύος, χρονοπρογραμματισμού και δρομολόγησης, προτείνοντας ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο διαστρωματικής σχεδίασης και λειτουργίας των δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας.

Στο Κεφάλαιο 6 επισημαίνονται βασικά συμπεράσματα και ορισμένες κατευθύνσεις

μελλοντικής επέκτασης της παρούσας εργασίας. Τέλος, στο Παράρτημα Α' παρέχονται περισσότερες πληροφορίες για τη θεωρία των τυχαίων πεδίων Markov.

## Κεφάλαιο 2

# Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας: Προβλήματα και Προκλήσεις

Οι διαμορφωθείσες απαιτήσεις των σημερινών χρηστών για επικοινωνία με οποιοδήποτε μέσον, οπουδήποτε, και οποτεδήποτε έχουν οδηγήσει στη ραγδαία αύξηση των κινητών - συνδεδεμένων στο Διαδίκτυο - κόμβων και αναπόφευκτα, στη συνεχώς αυξανόμενη κίνηση δεδομένων σε ασύρματα κινητά δίκτυα. Αναλυτικότερα, προβλέπεται [1] ότι μέχρι το τέλος του τρέχοντος έτους ο αριθμός των κινητών συσκευών – συνδεδεμένων στο Διαδίκτυο – θα ξεπεράσει τον αριθμό των ανθρώπων στη Γη, ενώ έως το έτος 2019 η παγκόσμια κίνηση δεδομένων που σχετίζεται με κινητές συσκευές αναμένεται να αυξηθεί σχεδόν δέκα φορές σε σύγκριση με την αντίστοιχη κίνηση του έτους 2014. Κύρια στοιχεία της αναφερόμενης τάσης αποτελούν η μεταβολή της φύσης των δεδομένων τα οποία μεταφέρονται μέσω ασύρματων συσκευών, όπου αναμένεται ότι οι υπηρεσίες βίντεο θα παράγουν δεδομένα που θα ξεπερνούν τα τρία τέταρτα της παγκόσμιας κίνησης δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα, καθώς και η περαιτέρω διείσδυση των έξυπνων συσκευών. Σημειώνεται ότι για το έτος 2014 μια έξυπνη συσκευή παράγαγε είκοσι δύο φορές περισσότερη κίνηση από μια συμβατική κινητή συσκευή, ενώ προβλέπεται ότι έως το έτος 2019 οι έξυπνες συσκευές θα καλύπτουν το 54% των συνολικών κινητών συσκευών, ποσοστό εμφανώς αυξημένο σε σύγκριση με το 26% που κάλυπταν το προηγούμενο έτος [1].

Οι διαρκώς αυξανόμενες μελλοντικές απαιτήσεις, ωστόσο, έρχονται σε πλήρη αντίθεση με την εφαρμοζόμενη, στατική, αναποτελεσματική πολιτική διαχείρισης και ανάθεσης ραδιοφάσματος σε υπηρεσίες ασύρματων δικτύων επικοινωνιών. Διεθνείς κανονισμοί

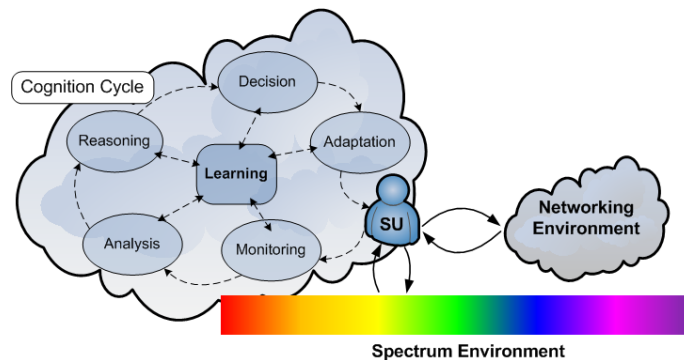
ραδιοεπικοινωνιών και κανονιστικοί φορείς οι οποίοι πρόσκεινται στην κυβέρνηση κάθε χώρας αναθέτουν σήμερα το αποκλειστικό δικαίωμα χρήσης συγκεκριμένων συχνοτήτων σε καθορισμένες υπηρεσίες επικοινωνιών. Ως αποτέλεσμα, τα υπάρχοντα συστήματα ασύρματων επικοινωνιών χρησιμοποιούν στατικά μεγάλα κομμάτια φάσματος συχνοτήτων (κυρίως στις συχνότητες 300MHz έως 3000MHz, που αποτελούν το πιο επιθυμητό κομμάτι συχνοτήτων από άποψη τεχνολογικών λειτουργιών και χαρακτηριστικών διάδοσης), περιορίζοντας σημαντικά τους διαθέσιμους φασματικούς πόρους για ανάπτυξη και λειτουργία νέων ή αναβαθμισμένων υπηρεσιών. Παράλληλα, αναιρείται η έννοια της φασματικής ουδετερότητας, σε συνδυασμό με την ευελιξία την οποία συνεπάγεται ως προς την αποδοτική κατανομή φασματικών πόρων, καθώς συγκεκριμένα τμήματα του ραδιοφάσματος συνδέονται άμεσα με συγκεκριμένες τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες. Στα πλαίσια της προκύπτουσας έλλειψης φασματικών πόρων, αλλά και των περαιτέρω αναγκών παροχής έξυπνων και αποδοτικών υπηρεσιών, τα δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας εισάγουν νέα δεδομένα, λύσεις και προκλήσεις στο μονολιθικό τρόπο λειτουργίας των παραδοσιακών ραδιοεπικοινωνιών.

## 2.1 Ιστορική αναδρομή και σχετική βιβλιογραφία

Η ραγδαία ανάπτυξη της μικροηλεκτρονικής των τελευταίων δεκαετιών έδωσε ώθηση στο σχεδιασμό συστημάτων ψηφιακών ραδιοεπικοινωνιών που στηρίζονται κατά κύριο λόγο στο λογισμικό ή διαφορετικά στη *λογισμικόριστη ραδιοεπικοινωνία* (SDRs - Software Defined Radios) [2, 3]. Με τον τρόπο αυτό, πρωταρχικές λειτουργίες βασικής ζώνης αποθηκεύονται στη μνήμη μιας συσκευής και υλοποιούνται αποκλειστικά μέσω λογισμικού, προσδίδοντας ευελιξία και ικανότητα προγραμματισμού σε ένα ασύρματο πομπό/δέκτη. Οι *γνωσιακές ραδιοεπικοινωνίες* (CRs - Cognitive Radios) [4, 5, 6] εισήχθησαν ως μετεξέλιξη των ραδιοεπικοινωνιών μέσω λογισμικού (SDRs) ενσωματώνοντας μοντελοποιημένη λογική και ευφυΐα στη συσκευή τελικού χρήστη. Προτάθηκαν για πρώτη φορά το 1999 από τον Joseph Mitola III [4] περιγράφοντας τον τρόπο μετάβασης από προγραμματιζόμενες σε ευφυείς πλατφόρμες ραδιοεπικοινωνιών με δυνατότητες μάθησης, λογικής και αυτοματοποιημένου ελέγχου. Συγκεκριμένα, προτάθηκε [4, 5] μια γλώσσα μοντελοποίησης και αναπαράστασης της γνώσης (RKRL - Radio Knowledge Representation Language) που ορίζει τον τρόπο διεπαφής με τις εσωτερικές δομές της συ-



σκευής, το φυσικό και δικτυακό περιβάλλον της, καθώς επιπρόσθετα υποστηρίζει κατάλληλα την ενσωμάτωση μοντελοποιημένης λογικής και αλγορίθμων μηχανικής μάθησης. Επιπλέον, παρουσιάστηκε [4, 5] μια πρότυπη αρχιτεκτονική υλοποίησης γνωσιακών ραδιοεπικοινωνιών (CR1) βασισμένη στο *γνωσιακό κύκλο* (Cognition Cycle), μια εκδοχή του οποίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Γνωσιακός κύκλος.

Μια συσκευή γνωσιακών ραδιοεπικοινωνιών αλληλεπιδρά με το περιβάλλον μέσω ερεθισμάτων και ακολουθεί τη λειτουργία ενός γνωσιακού κύκλου (Σχήμα 2.1) όπου κύριο δομικό στοιχείο του αποτελεί η *μάθηση* (learning), ή αλλιώς η παραγωγή γνώσης, μέσω αρθρωτών τμημάτων *παρακολούθησης* (monitoring), *ανάλυσης* (analysis), *αιτιολόγησης* (reasoning), *απόφασης* (decision) και *προσαρμογής* (adaptation). Αναλυτικότερα, ένας χρήστης της τεχνολογίας γνωσιακών ραδιοεπικοινωνιών διαθέτει την ικανότητα να λαμβάνει ερεθίσματα τόσο από το δικτυακό (π.χ. από ομότιμες γειτονικές δικτυακές συσκευές) όσο και από το φασματικό του περιβάλλον. Τα ερεθίσματα αυτά εμφανίζονται ως *διακοπές* (interrupts) οι οποίες θέτουν σε λειτουργία τα επιμέρους στοιχεία του γνωσιακού κύκλου. Με τον τρόπο αυτό, ένας χρήστης γνωσιακών ραδιοεπικοινωνιών παρακολουθεί συνεχώς τον εξωτερικό του κόσμο και επεξεργάζεται τις αλληλεπιδράσεις με το περιβάλλον του, αναλύοντας, αιτιολογώντας, και ιεραρχώντας τη σημασία των εκάστοτε ερεθισμάτων. Εν συνεχεία, σχεδιάζει και αξιολογεί εναλλακτικές προσεγγίσεις απόκρισης και αποφασίζει για την καταλληλότερη επιλογή, π.χ. για τη βέλτιστη κατανομή των διαθέσιμων πόρων. Τέλος, η συσκευή προσαρμόζει τη λειτουργία της εκτελώντας τις ληφθείσες αποφάσεις, ενώ η απόκριση του γνωσιακού κύκλου εξωτερικεύεται, επιδρώντας αναπόφευκτα στο δικτυακό περιβάλλον της συσκευής και εν τέλει ανατροφοδοτώντας την ανωτέρω διαδικασία. Ακρογωνιαίος λίθος του γνωσιακού κύκλου αποτελεί η παραγωγή

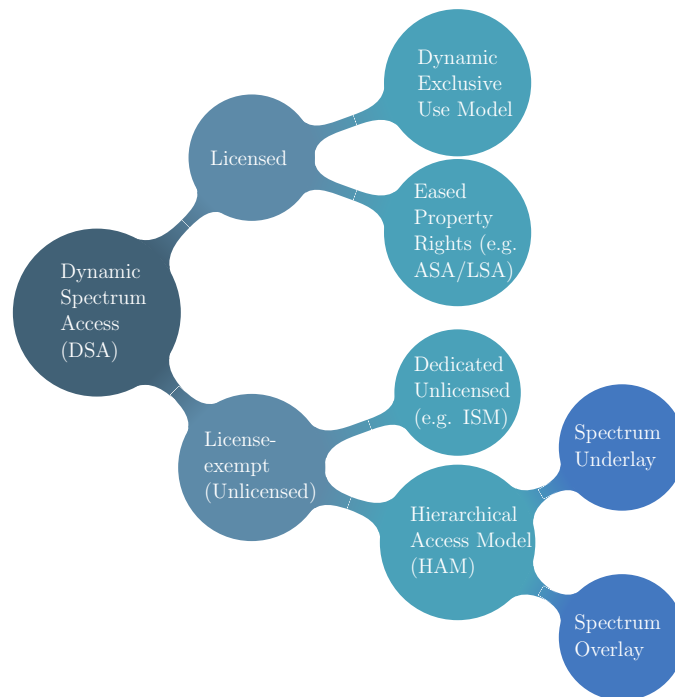
γνώσης μέσω τεχνικών μηχανικής μάθησης και η αφομοίωσή της, ανατροφοδοτώντας και συντονίζοντας τα επιμέρους προαναφερθέντα τμήματα του γνωσιακού κύκλου.

Η ανάγκη εφαρμογής των γνωσιακών ραδιοεπικοινωνιών έδωσε το έναυσμα στη μελέτη και έρευνα θεωρητικών μηχανισμών για τη μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση της λειτουργίας των ασύρματων δικτύων, γεγονός που αποτυπώνεται έκδηλα στην πληθώρα των επιστημονικών εργασιών της σχετικής βιβλιογραφίας [7]. Παράλληλα, αναπτύχθηκε στην πράξη μια σειρά από πειραματικές πλατφόρμες [8] με σκοπό τη δοκιμή και εφαρμοσμένη έρευνα σε συσκευές γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας. Για την υποστήριξη και αναδιάρθρωση εκτεταμένων λειτουργιών σε SDR/CR συστήματα αναπτύχθηκαν λογισμικά εργαλεία – κατά κύριο λόγο ανοικτού κώδικα – όπως το GNU Radio [9], το Iris [10] και το OSSIE [11]. Από πλευράς υλικού, υλοποιήθηκαν ευέλικτες πλατφόρμες που καταστούν δυνατή την έρευνα δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας, όπως το USRP (Universal Software Radio Peripheral) [12], αλλά και πιο σύνθετων συστημάτων. Ενδεικτικά αναφέρονται οι SDR πλατφόρμες BEE/BEE2 (Berkeley Emulation Engine) [13], WARP (Wireless Open-Access Research Platform) [14] και KUAR (Kansas University Agile Radio) [15] που υλοποιήθηκαν, αντιστοίχως, από τα πανεπιστήμια Berkeley, Rice και Kansas των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής.

Βασική εφαρμογή των γνωσιακών ραδιοεπικοινωνιών αποτέλεσε εξαρχής η ευέλικτη διαχείριση και κατανομή φάσματος σε ασύρματες υπηρεσίες με απώτερο στόχο την αντικατάσταση της επικρατούσας στατικής πολιτικής διαχείρισης του ραδιοφάσματος. Από τον εμπνευστή των γνωσιακών ραδιοεπικοινωνιών προτάθηκε [16] αρχικά μια μεθοδολογία δυναμικής ενοικίασης φασματικών ζωνών από τους αδειούχους – *πρωτεύοντες χρήστες* (PUs – Primary Users) – σε χρήστες δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας – *δευτερεύοντες χρήστες* (SUs – Secondary Users), οι οποίοι έχουν την ικανότητα αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον και συμμόρφωσης στους κανόνες ενοικίασης, π.χ., οι δευτερεύοντες χρήστες οφείλουν να μεταβάλλουν άμεσα τη συχνότητα λειτουργίας τους σε περίπτωση εμφάνισης ενός πρωτεύοντος χρήστη. Πρωταρχικός σκοπός αποτελεί η αποτελεσματική αξιοποίηση ενός πρακτικά πεπερασμένου – για εφαρμογές ασύρματων κινητών επικοινωνιών - φυσικού πόρου, εφόσον χρονικά ή χωρικά υπο-χρησιμοποιείται, μέσω της δυναμικής εκχώρησής του σε δευτερογενείς υπηρεσίες.

Η ιδέα της *φασματικής ουδετερότητας* (spectrum neutrality) όσον αφορά τόσο τις τε-

χνολογίες όσο και τις υπηρεσίες που το χρησιμοποιούν, δηλαδή της ανεξαρτησίας των εκχωρημένων ζωνών συχνοτήτων από το είδος των υποκείμενων τεχνολογιών εκπομπής και υπηρεσιών επικοινωνίας, και η ανάγκη ικανοποίησης της αυξανόμενης ζήτησης φασματικών ζωνών πυροδότησε τη μελέτη σχημάτων επίτευξης δυναμικής φασματικής πρόσβασης (Dynamic Spectrum Access, Σχήμα 2.2) [17, 18]. Βασικός παράγοντας διαφοροποίησης των προτεινόμενων στρατηγικών αποτελεί η *αδειοδοτημένη* (licensed) ή *μη αδειοδοτημένη* (license-exempt, unlicensed) χρήση του ραδιοφάσματος όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2.



**Σχήμα 2.2:** Κατηγοριοποίηση τεχνικών δυναμικής φασματικής πρόσβασης.

Στην πρώτη κατηγορία αδειοδοτημένης κατάληψης φάσματος, διακρίνονται οι περιπτώσεις του μοντέλου δυναμικής αποκλειστικής χρήσης (Dynamic Exclusive Use Model) και της στρατηγικής αδειοδοτημένων δευτερευόντων χρηστών μέσω του μοντέλου χαλαρών δικαιωμάτων ιδιοκτησίας (Eased Property Rights). Το μοντέλο δυναμικής αποκλειστικής χρήσης διατηρεί τη λογική εκχώρησης φασματικών ζωνών σε συγκεκριμένες υπηρεσίες, αλλά επιτρέπει στους δικαιούχους να εμπορεύονται και να ανταλλάζουν φασματικές ζώνες χωρίς την παρέμβαση των ρυθμιστικών αρχών. Παρότι πιο ευέλικτο από την επικρατούσα στατική πολιτική, το μοντέλο δυναμικής αποκλειστικής χρήσης αδυνατεί να εκμεταλλευτεί περιπτώσεις υπο-χρησιμοποίησης του φάσματος εξαιτίας της εκρηκτικής

φύσης της κίνησης δεδομένων. Σε αντίθεση, η στρατηγική αδειοδοτημένων δευτερευόντων χρηστών μέσω του μοντέλου χαλαρών δικαιωμάτων ιδιοκτησίας επιτρέπει το διαμοιρασμό κοινών φασματικών ζωνών σε διαφορετικά δίκτυα πρόσβασης. Αναλυτικότερα, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί η άδεια ενός δευτερεύοντος χρήστη απαιτείται συμφωνία με τον πρωτεύον χρήστη σε ένα πλαίσιο διαμοιρασμού φάσματος που βρίσκεται υπό την εποπτεία των ρυθμιστικών αρχών. Η επιτευχθείσα συμφωνία περιγράφει με ακρίβεια τους όρους κοινής χρήσης του φάσματος, π.χ. γεωγραφική περιοχή εφαρμογής της άδειας, τεχνικές ρυθμίσεις αποφυγής παρεμβολών, κτλ. Ενδεικτικά παραδείγματα της προαναφερθείσας στρατηγικής αποτελούν οι προσεγγίσεις *εξουσιοδοτημένης μεριζόμενης πρόσβασης* (ASA - Authorized Shared Access) που προτάθηκε αρχικά από τις εταιρίες Qualcomm και Nokia το 2011 για χρήση στις IMT φασματικές ζώνες και *αδειοδοτημένης μεριζόμενης πρόσβασης* (LSA - Licensed Shared Access) η οποία ακολούθησε γενικεύοντας το εύρος εφαρμογής της και εκτός IMT φασματικών ζωνών [19].

Στη δεύτερη κατηγορία τεχνικών δυναμικής φασματικής πρόσβασης περιλαμβάνονται προσεγγίσεις μη αδειοδοτημένης χρήσης των φασματικών πόρων. Βασικό παράδειγμα ασύρματων επικοινωνιών σε μη αδειοδοτημένες φασματικές ζώνες αποτελεί η λειτουργία των δημοφιλών ζωνών συχνοτήτων Βιομηχανικών, Επιστημονικών και Ιατρικών μεταδόσεων (ISM - Industrial, Scientific and Medical) μέσω της *αποκλειστικά μη αδειοδοτημένης* (Dedicated Unlicensed) προσέγγισης. Πιο συγκεκριμένα, μια αποκλειστική φασματική ζώνη εκχωρείται από τις ρυθμιστικές αρχές για κοινή χρήση φάσματος μεταξύ μη αδειοδοτημένων συσκευών με ισοδύναμα δικαιώματα. Εναλλακτικά, σημειώνεται ένα *ιεραρχικό μοντέλο πρόσβασης* - υλοποιούμενο από τεχνικές *επικάλυψης φάσματος* (Spectrum Overlay) ή *υποκάλυψης φάσματος* (Spectrum Underlay) -, σύμφωνα με το οποίο μη αδειοδοτημένοι δευτερεύοντες χρήστες λειτουργούν στη σκιά των πρωτεύοντων χρηστών εξασφαλίζοντας την ανεμπόδιστη λειτουργία τους. Αναλυτικότερα, μέσω τεχνικών επικάλυψης φάσματος, ένας δευτερεύον χρήστης καταλαμβάνει ευκαιριακά (σε μια περιοχή, κάποια χρονική στιγμή) μη κατειλημμένες φασματικές ζώνες (*φασματικές οπές* - spectrum holes), ενώ, μέσω τεχνικών υποκάλυψης φάσματος, υπακούει σε αυστηρούς περιορισμούς (χαμηλά όρια ισχύος μετάδοσης, υπερευρυζωνική (UWB - Ultra-Wide Band) τεχνολογία) ώστε να λειτουργεί κάτω από το κατώφλι θερμοκρασίας παρεμβολής [6] των πρωτεύοντων χρηστών.

Οι ανωτέρω προσεγγίσεις δυναμικής φασματικής πρόσβασης αποτελούν προϊόν μελέτης διεθνών ομάδων εργασίας και αποτέλεσμα οδηγιών που έχουν εκδοθεί τα τελευταία έτη από αρμόδια ρυθμιστικά όργανα (π.χ. FCC, Ofcom, RSPG, iDA). Κοινό παρονομαστή για την επίτευξή τους αποτελεί η αξιοποίηση των προηγμένων ικανοτήτων ενημερότητας και προσαρμοστικότητας των δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας (Σχήμα 2.1). Παράλληλα, οργανισμοί τυποποίησης, όπως οι IEEE, ETSI, ECMA, έχουν συμβάλει στη δημιουργία διεθνών προτύπων που υποστηρίζουν τη συνύπαρξη διαφορετικών υπηρεσιών σε κοινές φασματικές ζώνες για εφαρμογή σε περιφερειακά (WRAN – Wireless Regional Area Network), μητροπολιτικά (WMAN - Wireless Metropolitan Area Network) και τοπικά (WLAN - Wireless Local Area Network) ασύρματα δίκτυα. Ενδεικτικά παραδείγματα αποτελούν τα πρότυπα IEEE 802.22, IEEE 802.11af (super Wi-Fi), IEEE 802.19, ECMA-392 που αφορούν στην εκμετάλλευση φασματικών κενών στις ζώνες VHF (Very High Frequency) και UHF (Ultra High Frequency) (TVWS – TV White Spaces), καθώς και τα πρότυπα IEEE 802.16h και LTE-Advanced τα οποία ενσωματώνουν άμεσα ή έμμεσα λειτουργίες και χαρακτηριστικά δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας.

Ουσιαστική συμβολή στην εξέλιξη του ανωτέρου τεχνολογικού ρεύματος κατέχουν οι *επισκοπήσεις κατάληψης φάσματος* (Spectrum Occurance Surveys), οι οποίες πραγματοποιούνται τα τελευταία έτη παγκοσμίως σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές [20, 21, 22, 23, 24, 25, 26] και ωθούν τη συνέχιση της έρευνας στον τομέα των δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας φανερώνοντας πιθανά σενάρια εφαρμογής τους. Οι επισκοπήσεις κατάληψης φάσματος καταγράφουν και, εν συνεχεία, παρουσιάζουν λεπτομερώς πληροφορίες σχετικά με τη φασματική δραστηριότητα των πρωτευόντων χρηστών, αναδεικνύοντας με τον τρόπο αυτό την πραγματική εικόνα του ραδιοφάσματος και προσφέροντας βαθύτερη κατανόηση των προβλημάτων και των προκλήσεων που απορρέουν από το στατικό τρόπο φασματικής πρόσβασης των σημερινών πρωτευόντων χρηστών. Η σπουδαιότητά τους έγκειται στο γεγονός ότι επαληθεύουν στην πράξη και σε πραγματικό περιβάλλον ραδιοσυχνοτήτων την υποχρησιμοποίηση φασματικών πόρων ακόμη και σε περιοχές οι οποίες χαρακτηρίζονται από ταυτόχρονη έλλειψη διαθέσιμων προς εκχώρηση ζωνών συχνοτήτων. Παράλληλα, προβάλλουν έμμεσα τις ευκαιρίες βελτίωσης της τρέχουσας λειτουργίας των ασύρματων δικτύων, εφόσον αξιοποιηθεί κατάλληλα η δυναμική των δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας, καθώς επίσης και του βαθμού εφικτότητας της άμεσης με-

ταφοράς της τεχνολογίας γνωσιακών ραδιοεπικοινωνιών σε πραγματικό περιβάλλον.

## 2.2 Επισκόπηση κατάληψης φάσματος στην περιοχή των Αθηνών

Η έλλειψη φασματικών πόρων για την κάλυψη των αναγκών μιας αγοράς με διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση, όπως η αγορά των κινητών ασύρματων επικοινωνιών, οδηγεί στην ενδελεχή μελέτη και ανάλυση της κατάστασης του ραδιοφάσματος. Οι υποθέσεις σχετικά με σημαντική υποχρησιμοποίηση μεγάλων εκχωρημένων κομματιών φάσματος - απόρροια των εφαρμοζόμενων στατικών πολιτικών φασματικής διαχείρισης - αντιτίθενται στο αναφερόμενο αδιέξοδο μεταξύ ζήτησης και προσφοράς φασματικών πόρων παροτρύνοντας, επακόλουθα, τη χρησιμοποίηση επισκοπήσεων κατάληψης του ραδιοφάσματος ανά τον κόσμο ως το βασικό εργαλείο μέτρησης και αξιολόγησης της τρέχουσας κατάστασης. Στην κατεύθυνση αυτή, ένα σύνολο μελετών έχει πρόσφατα δημοσιευθεί στη σχετική βιβλιογραφία - ανάμεσα εκ των οποίων και η επισκόπηση κατάληψης φάσματος στην περιοχή των Αθηνών [26] - χρησιμοποιώντας στην πλειονότητά τους παρόμοιες μεθοδολογίες επαίσθησης του ραδιοφάσματος με σκοπό την εξαγωγή συγκρίσιμων αποτελεσμάτων και κοινών συμπερασμάτων.

Οι πρώτες ολοκληρωμένες μελέτες και μετρήσεις κατάληψης φάσματος πραγματοποιήθηκαν σε διάφορες περιοχές των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής, π.χ. Βιρτζίνια, Νέα Υόρκη, Σικάγο, κ.α., [20] και επικεντρώθηκαν στο εύρος συχνοτήτων 30MHz έως 3000MHz, καθώς αποτελεί το πιο επιθυμητό κομμάτι συχνοτήτων από άποψη χαρακτηριστικών διάδοσης για κινητές επικοινωνίες. Οι επιλογές των σημείων μέτρησης έγιναν με στρατηγικό σκοπό τη μελέτη κατάληψης του ραδιοφάσματος σε περιοχές με διαφορετικά χαρακτηριστικά (αστικό περιβάλλον, αγροτική περιοχή, κτλ.). Για την αξιολόγηση του βαθμού χρησιμοποίησης των ήδη εκχωρημένων φασματικών ζωνών παγκοσμίως και την περαιτέρω αξιοποίησή τους στη δημιουργία εναρμονισμένων διεθνών κανονισμών, παρόμοιες μετρήσεις φάσματος πραγματοποιήθηκαν, ωσαύτως, σε διαφορετικές χώρες. Ενδεικτικά, σημειώνονται οι μελέτες επισκόπησης κατάληψης φάσματος στην Ισπανία για εύρος συχνοτήτων από 75MHz έως 7075MHz [21], στη Γερμανία για εύρος συχνοτήτων από 20MHz έως 6000MHz [22], στην Ιρλανδία για εύρος συχνοτήτων από 100MHz έως

3000MHz [20], στη Γαλλία και Τσεχία για εύρος συχνοτήτων από 400MHz έως 3000MHz [27], στη Σιγκαπούρη για εύρος συχνοτήτων από 80MHz έως 5850MHz [23], στη Νέα Ζηλανδία για εύρος συχνοτήτων από 800MHz έως 2750MHz [24], στην Κίνα για εύρος συχνοτήτων από 20MHz έως 3000MHz [28] και στο Κατάρ για συχνότητες λειτουργίας από 700MHz έως 3000MHz [25]. Ως βασική τεχνική πραγματοποίησης των ανωτέρω μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε η ανίχνευση φάσματος βασισμένη στον εντοπισμό ενέργειας, με διαφοροποιήσεις στις παραμέτρους ρύθμισης των εκάστοτε συστημάτων μέτρησης (π.χ. διάρκεια μετρήσεων, διακριτική ικανότητα ανίχνευσης, κτλ.) και στην ακόλουθη μεθοδολογία επεξεργασίας των συλλεχθέντων δεδομένων [29]. Μέσω των αποτελεσμάτων τους διαπιστώνεται η αναποτελεσματική διαχείριση των φασματικών πόρων, επακόλουθο των τεχνητών περιορισμών που εισάγονται εξαιτίας της στατικής εφαρμοζόμενης πολιτικής φασματικής πρόσβασης. Ωστόσο, κρίνεται απαραίτητη η συνέχιση των μελετών κατάληψης του ραδιοφάσματος σε νέες γεωγραφικές περιοχές προκειμένου να συνεισφέρουν στον εμπλουτισμό των συλλεχθέντων δεδομένων, στη διασταύρωση των παρατηρήσεων σε μεγαλύτερη κλίμακα, στον έλεγχο της εγκυρότητας και ορθότητας των εξαχθέντων συμπερασμάτων, καθώς και στη δημιουργία εναρμονισμένων οδηγιών, κανονισμών και τεχνολογικών προτύπων σε παγκόσμιο επίπεδο.

Στην κατεύθυνση αυτή η παρούσα ενότητα εστιάζει στην παρουσίαση της επισκόπησης κατάληψης φάσματος που πραγματοποιήθηκε, στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής, για πρώτη φορά στην περιοχή των Αθηνών [26]. Βασικοί στόχοι αποτελούν η αποτύπωση της πραγματικής εικόνας του ραδιοφάσματος στον ελλαδικό χώρο, η επιβεβαίωση και θωράκιση των ήδη υπάρχοντων πειραματικών παρατηρήσεων της σχετικής βιβλιογραφίας [20, 21, 22, 23, 24, 25], καθώς και η συλλογή πραγματικών δεδομένων για περαιτέρω ανάλυση και επεξεργασία.

### 2.2.1 Σύνοψη μεθοδολογίας

Η μεθοδολογία επισκόπησης κατάληψης του ραδιοφάσματος συνίσταται στο σχεδιασμό και στην υλοποίηση μιας αρχιτεκτονικής φασματικής ανίχνευσης για τη συλλογή των δεδομένων, καθώς και στη μετέπειτα επεξεργασία τους για την παραγωγή των τελικών αποτελεσμάτων. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των μετρήσεων περιλαμβάνει ως κύριο συστατικό τον αναλυτή σήματος PXI-5661 RF Vector

Signal Analyzer [30] της εταιρίας National Instruments (NI) με ικανότητα εύρους ανίχνευσης από 9KHz έως 2.7GHz, ο οποίος ενσωματώθηκε στη διάταξη PXI-1042Q [31] του ιδίου κατασκευαστή προσφέροντας μια ολοκληρωμένη υψηλών προδιαγραφών πλατφόρμα μετρήσεων με ενσωματωμένο υπολογιστικό σύστημα διπύρηνου επεξεργαστή και λειτουργικού συστήματος Microsoft Windows XP. Ο έλεγχος και η παραμετροποίηση του ανωτέρω αναλυτή φάσματος, καθώς και η αυτοματοποιημένη διαδικασία συλλογής και αποθήκευσης των δεδομένων ανίχνευσης, επιτεύχθηκε μέσω του προγραμματιστικού περιβάλλοντος του λογισμικού LabView 8.5 [32]. Ο αναλυτής φάσματος τοποθετήθηκε σε προστατευόμενο χώρο και συνδέθηκε μέσω ομοαξονικού καλωδίου RG213-U χαμηλών απωλειών (συνολικού μήκους 10 μέτρων) σε μια υψηλής απόδοσης ευρυζωνικής (300MHz έως 3000MHz) ομοιοκατευθυντικής δισκοκωνικής κεραίας μοντέλου Sirio SD 3000N (Σχήμα 2.3).

Εξαιτίας των ενδογενών περιορισμένων δυνατοτήτων κινητικότητας της ανωτέρω αρχιτεκτονικής (π.χ. ογκώδης εξοπλισμός, απαίτηση συνεχούς σύνδεσης με το δίκτυο παροχής ρεύματος, κλπ.), η επιλογή του σημείου εγκατάστασης πραγματοποιήθηκε με στρατηγικό σκοπό προσβλέποντας στη βέλτιστη δυνατή καταγραφή της καθολικής εικόνας του ραδιοφάσματος. Για το λόγο αυτό, αποφεύχθηκε η τοποθέτηση της ομοιοκατευθυντικής κεραίας σε εσωτερικό χώρο ή σε σημείο όπου η διέλευση των ραδιοσημάτων εμποδίζεται από γειτονικά φυσικά ή τεχνητά εμπόδια (π.χ. τοίχους γειτονικών κτηρίων, δέντρων, κλπ.), γεγονός που - σε συμφωνία με αντίστοιχες μελέτες [33, 34] - θα οδηγούσε επακόλουθα σε χαμηλό, αλλά μη καθολικά αντιπροσωπευτικό, βαθμό χρησιμοποίησης του ραδιοφάσματος. Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν από την οροφή του νέου κτηρίου Ηλεκτρολόγων της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών στην πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου στην Αθήνα. Το επιλεγθέν σημείο τοποθέτησης της κεραίας παρέχει ανεμπόδιστη οπτική επαφή με το κέντρο της πόλης, το κέντρο ραδιοτηλεοπτικών εκπομπών του Ύμηττου, καθώς και με άλλους κοντινούς ή απομακρυσμένους ραδιοπομπούς (π.χ. σταθμοί βάσης GSM, 3G, κλπ.).

Ως μέθοδος επαίσθησης του ραδιοφάσματος επιλέχθηκε η τεχνική *φασματικής ανίχνευσης βασισμένη στον εντοπισμό της ενέργειας σημάτων* (EDSS - Energy Detection based Spectrum Sensing), γνωστή και ως *περιοδόγραμμα* (periodogram) ή αλλιώς *ακτινομετρία* (radiometry). Ως τεχνική χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος υλοποίησης, μι-



κρή υπολογιστική πολυπλοκότητα, υψηλή ταχύτητα ανίχνευσης, καθώς και ανεξαρτησία από το εντοπιζόμενο σήμα. Αναλυτικότερα, η βασική λειτουργία της τεχνικής EDSS συνίσταται στη σύγκριση της μετρηθείσας ενέργειας σε καθορισμένες φασματικές υποζώνες, οι οποίες ορίζονται ως *φασματικά στοιχεία* (frequency bins), με ένα κατώφλι εντοπισμού για τον προσδιορισμό της κατάστασης κατάληψης των συγκεκριμένων φασματικών συνιστωσών. Επομένως, δεν απαιτείται προηγούμενη γνώση του σήματος πρωτεύοντος χρήστη, γενικεύοντας με τον τρόπο αυτό, την εφαρμογή της σε ποικίλα σενάρια λειτουργίας. Σε πρακτικό επίπεδο, παρά την ύπαρξη ορισμένων περιπτώσεων χαμηλής αποδοτικότητας ως επακόλουθο της γενικότητας της μεθόδου [35], η μέθοδος EDSS αποτελεί την πλέον διαδεδομένη και προτιμώμενη τεχνική στις τρέχουσες σχετικές μελέτες [20, 21, 22, 23, 24, 25, 8]. Παράλληλα, υποστηρίζεται από την πλειοψηφία των σύγχρονων πλατφορμών γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας [8], γεγονός που καθιστά την πραγματοποιηθείσα έρευνα πλήρως συμβατή, άμεσα εκμεταλλεύσιμη και συγκρίσιμη με αντίστοιχες πειραματικές υλοποιήσεις.



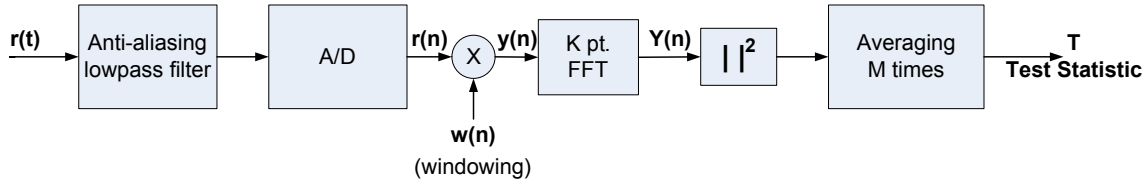
**Σχήμα 2.3:** Εξοπλισμός φασματικής ανίχνευσης και τοποθεσία μετρήσεων.

Τα βασικά βήματα λειτουργίας του χρησιμοποιούμενου αναλυτή φάσματος παρουσιάζονται στο σχηματικό διάγραμμα του Σχήματος 2.4 και επεξηγούν το θεωρητικό και τεχνικό υπόβαθρο της τεχνικής EDSS. Αρχικά, το λαμβανόμενο σήμα συνεχούς χρόνου,  $r(t)$ , φιλτράρεται μέσω ενός *φίλτρου αντιμετώπισης της αναδίπλωσης* (anti-aliasing filter) ώστε να αντιμετωπισθεί το φαινόμενο της αναδίπλωσης φάσματος (εμφάνιση φασματι-

κών ειδώλων) που μπορεί να προκληθεί κατά τη ψηφιοποίηση του σήματος συνεχούς χρόνου μέσω δειγματοληψίας [36]. Στην πράξη, αποκόπτονται όλες οι φασματικές συνιστώσες που είναι μεγαλύτερες ή ίσες του μισού της συχνότητας δειγματοληψίας. Εν συνεχεία, προχωρούμε στη ψηφιοποίηση και την περαιτέρω επεξεργασία. Ειδικότερα, το σήμα διακριτού χρόνου,  $r(n)$ , τεμαχίζεται σε τμήματα πεπερασμένης διάρκειας ( $K$  δειγμάτων) πολλαπλασιάζοντάς το με ένα ορθογωνικό χρονικό παράθυρο. Για τη μείωση της αναπόφευκτης φασματικής διαρροής, ήτοι του συνυπολογισμού στην ισχύ μιας συχνότητας και μέρους της ισχύος γειτονικών συχνοτήτων στις οποίες απλώνονται οι πλευρικοί λοβοί του φάσματος ενός χρονικού ορθογωνικού παραθύρου, εφαρμόζεται η *συνάρτηση παραθύρου* (windowing function) τύπου Blackman-Harris. Το διακριτό σήμα πεπερασμένης διάρκειας,  $y(n)$ , αναλύεται στη συνέχεια φασματικά χρησιμοποιώντας *ταχύ μετασχηματισμό Fourier* (FFT – Fast Fourier Transform) και οι φασματικές συνιστώσες,  $Y(n)$ , επεξεργάζονται με τη βοήθεια ενός στοιχείου ύψωσης στο τετράγωνο για τον υπολογισμό της ενέργειας του αναλυόμενου φάσματος για το πεπερασμένης διάρκειας σήμα  $y(n)$  (ή εναλλακτικά της εκτίμησης της *πυκνότητας φασματικής ισχύος* (PSD - Power Spectral Density) του αντίστοιχου τυχαίου σήματος, δηλαδή της ισχύος ανά μονάδα συχνότητας με μονάδα μέτρησης W/Hz). Τέλος, για τη σύγκλιση του εκτιμητή φασματικής πυκνότητας ισχύος περιλαμβάνεται μια διαδικασία *μεσοτίμησης* (averaging) η οποία μειώνει την επίδραση της παρουσίας θορύβου. Συγκεκριμένα, για ένα χρονικό διάστημα παρατήρησης  $N$ , η ακολουθία δειγμάτων τεμαχίζεται μέσω της συνάρτησης παραθύρου σε  $M$  τμήματα ίσης διάρκειας, έτσι ώστε  $N = K \times M$ , και η μεσοτιμημένη φασματική ενέργεια για κάθε φασματική συνιστώσα (περιοδόγραμμα) αποκτάται υπολογίζοντας τη μέση τιμή στα αντίστοιχα  $M$  τμήματα. Σημειώνεται ότι το μέγεθος,  $K$ , του FFT καθορίζει τη διακριτική ικανότητα του αναλυτή φάσματος και επηρεάζει άμεσα την ταχύτητα ανίχνευσης, ενώ ο αριθμός τμημάτων μεσοτίμησης,  $M$ , επιδρά στη μεταβλητότητα της εκτίμησης της υπολογιζόμενης φασματικής πυκνότητας και στην πολυπλοκότητα της διαδικασίας ανίχνευσης του φάσματος.

Η παρουσία ή απουσία σήματος πρωτεύοντος χρήστη διατυπώνεται μαθηματικά ως έλεγχος των παρακάτω υποθέσεων

$$\begin{cases} H_0 : & y(n) = \vartheta(n) \text{ αν το σήμα είναι απών} \\ H_1 : & y(n) = s(n) + \vartheta(n) \text{ αν το σήμα είναι παρών} \end{cases} \quad (2.1)$$



Σχήμα 2.4: Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας του αναλυτή φάσματος.

όπου  $s(n)$  και  $v(n)$  (με  $n = 1, \dots, N$ ) συμβολίζουν, αντίστοιχα, το διακριτού-χρόνου σήμα πρωτεύοντος χρήστη και τον προσθετικό θόρυβο. Για τη μέθοδο EDSS το πρόβλημα ανίχνευσης πρωτευόντων χρηστών για κάθε φασματικό στοιχείο  $k$  εκφράζεται μαθηματικά μέσω του προβλήματος απόφασης

$$\begin{cases} T_k \leq \gamma & \text{καθορίζει ότι το φασματικό στοιχείο } k \text{ είναι μη-κατειλημένο} \\ T_k > \gamma & \text{καθορίζει ότι το φασματικό στοιχείο } k \text{ είναι κατειλημένο} \end{cases} \quad (2.2)$$

όπου η συνάρτηση ελέγχου  $T_k$  είναι η μέση ανιχνευόμενη φασματική πυκνότητα ισχύος  $P(k)$  και  $\gamma$  το προεπιλεγμένο κατώφλι απόφασης. Σύμφωνα με το θεώρημα του Parseval, ο υπολογισμός της ενέργειας του ανιχνευόμενου σήματος μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε στο πεδίο του χρόνου είτε στο πεδίο της συχνότητας. Επομένως, το μεσοτιμημένο περιοδόγραμμα, δηλαδή η μέση εκτιμώμενη φασματική πυκνότητα ισχύος, για κάθε φασματικό στοιχείο  $k$  εκφράζεται ως εξής

$$P(k) = \frac{1}{M} \sum_M \frac{1}{K} |Y(k)|^2 \quad k = 0, \dots, K - 1. \quad (2.3)$$

Η επίδοση της τεχνικής EDSS εξαρτάται άμεσα από την επιλογή του κατωφλίου απόφασης  $\gamma$ , το οποίο μπορεί να προσδιοριστεί με θεωρητικό ή πρακτικό τρόπο. Υποθέτοντας προσθετικό λευκό Gaussian θόρυβο (AWGN), μεγάλο αριθμό δειγμάτων και εφαρμόζοντας το Κεντρικό Οριακό Θεώρημα (Κ.Ο.Θ), η κατανομή του  $T_k$  προσεγγίζεται ως Gaussian κατανομή έτσι ώστε

$$T_k \sim \begin{cases} H_0 : \mathcal{N}(M\sigma_v^2, 2M\sigma_v^4) \\ H_1 : \mathcal{N}(M(\sigma_v^2 + \sigma_s^2), 2M(\sigma_v^2 + \sigma_s^2)^2) \end{cases} \quad (2.4)$$

όπου  $\sigma_s^2$  και  $\sigma_v^2$  συμβολίζουν τη μεταβλητότητα σήματος και θορύβου, αντίστοιχα. Ορίζοντας τις πιθανότητες χαμένης ανίχνευσης  $P_{md}$  και ψευδούς συναγερού  $P_{fa}$  ως εξής

$$P_{md} = Pr(T_k \leq \gamma | H_1) \quad (2.5)$$

$$P_{fa} = Pr(T_k > \gamma | H_0) \quad (2.6)$$

η επιλογή της κρίσιμης περιοχής του ανωτέρου ελέγχου στατιστικών υποθέσεων, και επομένως της τιμής της παραμέτρου  $\gamma$ , μπορεί να επιτευχθεί με τη βοήθεια των σχέσεων (2.5), (2.6) και του λήμματος Neyman-Pearson για σταθερή πιθανότητα ψευδούς συναγερμού (PFA - Probability of False Alarm) [37, 38]. Ωστόσο, σε πρακτικά σενάρια ο προσδιορισμός της παραμέτρου  $\gamma$  πραγματοποιείται μέσω εναλλακτικών προσεγγίσεων, οι οποίες εκμεταλλεύονται δεδομένα πραγματικών μετρήσεων. Γνωστές προσεγγίσεις αποτελούν οι τεχνικές  $m$ -dB κριτηρίου και  $PFA$  κριτηρίου [29], οι οποίες θέτουν το κατώφλι απόφασης  $\gamma$  για κάθε φασματικό στοιχείο ξεχωριστά και προαπαιτούν τη συλλογή μετρήσεων δειγμάτων θορύβου (μέσω της αντικατάστασης της κεραίας με προσαρμοσμένο/εικονικό φορτίο). Η πρώτη προσέγγιση θέτει την τιμή της παραμέτρου  $\gamma$  ίση με  $m$  dB πάνω από το μέσο μετρηθέν επίπεδο θορύβου σε κάθε φασματικό στοιχείο, ενώ η δεύτερη προσέγγιση προσδιορίζει το κατώφλι απόφασης  $\gamma$  έτσι ώστε ο μέγιστος λόγος δειγμάτων θορύβου άνω της τιμής του κατωφλίου  $\gamma$  προς το συνολικό αριθμό δειγμάτων να είναι ίσος με την πιθανότητα  $P_{fa}$ .

Η επισκόπηση κατάληψης φάσματος στην περιοχή των Αθηνών πραγματοποιήθηκε για φασματικές συχνότητες από 300MHz έως 2700MHz πλησιάζοντας τη φασματική ζώνη από 100MHz έως 3000MHz, η οποία καλείται συχνά στη βιβλιογραφία και ως *ηδυσσημείο* (sweet spot) εξαιτίας των ελκυστικών για κινητές επικοινωνίες χαρακτηριστικών διάδοσης και των εξαιρετικά δημοφιλών σχετιζόμενων ασύρματων υπηρεσιών που την καλύπτουν (π.χ., ραδιοφωνία, τηλεόραση, κινητή τηλεφωνία, ασύρματο Ίντερνετ, κλπ.). Ο Πίνακας 2.1 συνοψίζει τις παραμέτρους λειτουργίας του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού ανίχνευσης φάσματος. Συγκεκριμένα, εξαιτίας του μεγάλου συνολικού εύρους ζώνης, η εξετασθείσα φασματική περιοχή χωρίστηκε σε μικρότερα κομμάτια φάσματος με *εύρος συχνοτήτων* (frequency span) ίσο με 50MHz και αντίστοιχες *κεντρικές συχνότητες* (central frequencies) που ξεκινούν από τα 325MHz και εκτείνονται (με βήμα 50MHz) έως τα 2675MHz. Τα προαναφερθέντα κομμάτια φάσματος σαρώνονται σειριακά ανά 30 δευτερόλεπτα, χρονική διάρκεια που χαρακτηρίζεται και ως *διάστημα ανίχνευσης* (sensing interval), ενώ η συνολική *διάρκεια μετρήσεων ανίχνευσης* (sensing duration) ισούται με 7 ημέρες. Για την ακριβή αποτύπωση της εικόνας του ραδιοφάσματος και την αποφυγή αδυναμιών προηγούμενων μελετών (π.χ. [28]), όπου τα φασματικά στοιχεία καλύπτουν κομμάτια διαφορετικών πρωτεύοντων καναλιών και αναπόφευκτα οδηγούν σε επισκοπήσεις

**Πίνακας 2.1:** Παράμετροι λειτουργίας εξοπλισμού

Frequency Span	50 MHz
Central Frequencies	from 325 to 2675 MHz
Resolution Bandwidth	10 kHz
Frequency Bin Size	4.02 kHz
Detection Type	RMS
No. of Averages	10
Reference Level	-30 dBm
Sensing Interval	30 sec
Sensing Duration	7 days

κατάληψης φάσματος χαμηλότερης ανάλυσης, εφαρμόστηκε υψηλής ακρίβειας φασματική ανίχνευση θέτοντας το εύρος ζώνης διακριτικής ικανότητας (resolution bandwidth) ίσο με 10kHz. Με τον τρόπο αυτό καθορίστηκε έμμεσα το μέγεθος φασματικού στοιχείου (frequency bin size) να είναι ίσο με 4.02kHz, ενώ σε συνδυασμό με την αυξημένη ευαισθησία του χρησιμοποιούμενου φασματικού αναλυτή (επίπεδο θερμικού θορύβου μικρότερο από  $-140dBm/10kHz$ ) κατέστη δυνατός ο εντοπισμός ακόμη και στενού εύρους ζώνης σημάτων πρωτεύοντων χρηστών. Ο υπολογισμός της μέσης πυκνότητας φασματικής ισχύος επιτεύχθηκε μέσω του τύπου ανίχνευσης (detection type) RMS (Root-Mean-Square), δηλαδή υψώνοντας στο τετράγωνο τις μετρηθείσες τιμές, βρίσκοντας τη μέση τιμή των τετραγώνων και υπολογίζοντας μετέπειτα τη τετραγωνική ρίζα του αποτελέσματος, ενώ ο αριθμός δειγμάτων μεσοτίμησης  $M$  τέθηκε ίσος με 10.

Για την εξισορρόπηση των κινδύνων υπερεκτίμησης ή υποεκτίμησης της μετρούμενης φασματικής χρησιμοποίησης, το κατώφλι απόφασης  $\gamma$  προσδιορίστηκε, για κάθε φασματικό στοιχείο ανεξάρτητα, συνδυάζοντας τις τεχνικές  $m$ -dB κριτηρίου (με  $m = 5$ ) και  $PFA$  κριτηρίου (με  $P_{fa} = 0.01$ ) [29]. Αναλυτικότερα, αντικαθιστώντας την ομοιοκατευθυντική κεραία της αρχιτεκτονικής ανίχνευσης με προσαρμοσμένο εικονικό φορτίο (dummy load), δηλαδή με αντίσταση 50Ω, συλλέχθηκαν μετρήσεις δειγμάτων θορύβου με σκοπό τον υπολογισμό της τιμής ισχύος που καθορίζει για κάθε φασματικό στοιχείο την πιθανότητα ψευδούς συναγερού  $P_{fa}$  να ισούται με 0.01. Εν συνεχεία, για τον προσδιορισμό του κατωφλίου απόφασης  $\gamma$  κάθε φασματικού στοιχείου προστίθεται σε κάθε

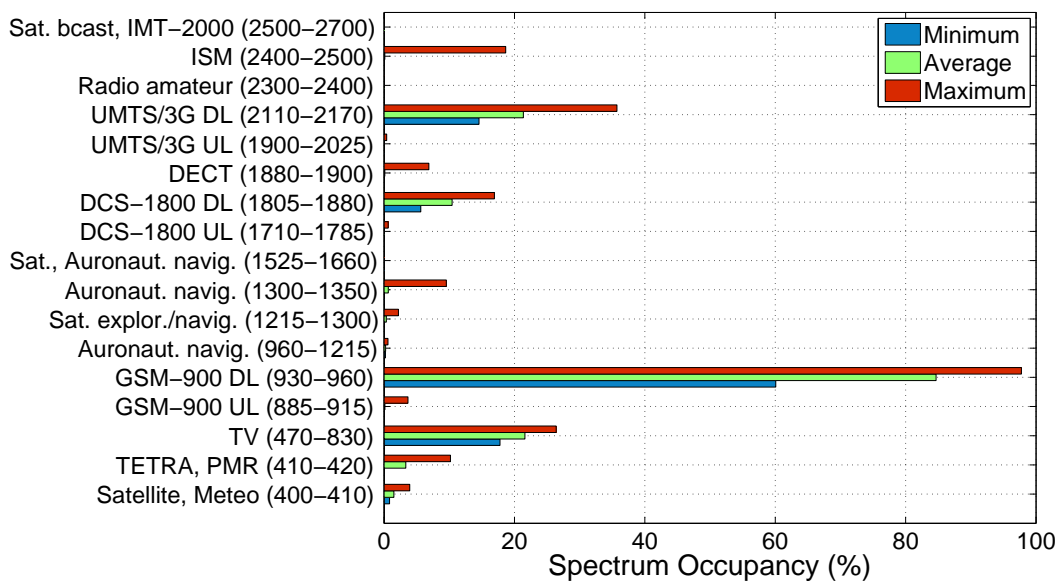
προκύπτουσα τιμή η ποσότητα των  $5dB$  με σκοπό την αποφυγή της πιθανότητας υπερεκτίμησης της μετρούμενης φασματικής χρησιμοποίησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο ανωτέρω εμπειρικός υβριδικός τρόπος υπολογισμού των τιμών κατωφλίου  $\gamma$  για κάθε φασματικό στοιχείο επιλέχθηκε, ύστερα από την ενδελεχή παρατήρηση ενός μεγάλου συνόλου δειγμάτων PSD, με σκοπό τη βελτίωση της δυνατότητας ορθής ανίχνευσης της κατάστασης κατάληψης ενός φασματικού στοιχείου, ενώ οι προκύπτουσες τιμές κατωφλίων προσεγγίζουν σημαντικά αντίστοιχες τιμές σχετικών επισκοπήσεων κατάληψης φάσματος (π.χ. [27]).

### 2.2.2 Αποτελέσματα χρησιμοποίησης του ραδιοφάσματος

Η χρησιμοποιηθείσα μεθοδολογία επαίσθησης του ραδιοφάσματος συνέβαλε στη συλλογή αναλυτικών πληροφοριών κατάληψης φάσματος, ξεχωριστά για κάθε φασματικό στοιχείο, σε εύρος ζώνης από 300MHz έως 2700MHz. Επιζητώντας την εύληπτη παρουσίαση των συλλεχθέντων δεδομένων ανίχνευσης ενέργειας και τη διευκόλυνση της αποτίμησης των αποτελεσμάτων για περαιτέρω εξαγωγή συμπερασμάτων, τα αρχικώς ανεπεξέργαστα συλλεχθέντα δεδομένα ομαδοποιούνται με κριτήριο τη θέση των εκάστοτε σχετιζόμενων φασματικών στοιχείων στο πεδίο της συχνότητας και τα αποτελέσματα χρησιμοποίησης του ραδιοφάσματος παρουσιάζονται συγκεντρωτικά για καθορισμένες φασματικές ζώνες. Τα φασματικά όρια, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.5, προσδιορίζονται από το είδος των πρωτογενών υπηρεσιών στις οποίες έχουν εκχωρηθεί οι αντίστοιχες ομάδες συχνοτήτων και καθορίζονται μέσω του επίσημου και πρόσφατα ενημερωμένου Εθνικού Κανονισμού Κατανομής Ζωνών Συχνοτήτων [39], ο οποίος θεσπίζεται από την Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων (ΕΕΤΤ) [40] και την Ελληνική Κυβέρνηση.

Στο Σχήμα 2.5 απεικονίζονται στατιστικά στοιχεία για το ποσοστό χρησιμοποίησης κάθε αδειοδοτημένης υπηρεσίας, όπως προέκυψε βάσει των πραγματικών μετρήσεων ανίχνευσης ενέργειας στην περιοχή των Αθηνών. Αναλυτικότερα, το ποσοστό χρησιμοποίησης μιας φασματικής ζώνης υπολογίζεται για κάθε σάρωση από το λόγο του αριθμού των κατειλημμένων φασματικών στοιχείων προς το συνολικό αριθμό των στοιχείων της εξεταζόμενης ζώνης. Κατά τη διάρκεια της επταήμερης επισκόπησης κατάληψης φάσματος προσδιορίστηκαν λίγο περισσότερες από 20,000 τιμές ποσοστών χρησιμοποίησης για

κάθε φασματική ζώνη (όσο δηλαδή και ο αριθμός των σαρώσεων) και με βάση τις καταγεγραμμένες αυτές τιμές υπολογίζονται και παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στο Σχήμα 2.5 το ελάχιστο, μέγιστο και μέσο ποσοστό χρησιμοποίησης κάθε αδειοδοτημένης υπηρεσίας. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η διάρκεια των μετρήσεων υπήρξε σχετικά μεγάλη, δηλαδή 7 ημέρες, γεγονός που συνέβαλε στην αυξημένη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και την αποφυγή ψευδών διαπιστώσεων εξαιτίας τυχαίων προσωρινών φαινομένων. Συγκεκριμένα, η διάρκεια πραγματοποίησης των μετρήσεων κρίνεται επαρκώς μεγάλη προκειμένου να είναι ικανή να συμπεριλάβει σημαντικό εύρος της δυναμικής συμπεριφοράς των πρωτευόντων χρηστών, η οποία μεταβάλλεται σε χρονική κλίμακα ωρών (π.χ. κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου) ή ημερών (π.χ. αναμενόμενες διαφοροποιήσεις στη συμπεριφορά των χρηστών τις καθημερινές έναντι των σαββατοκύριακων) και αποτυπώνεται έκδηλα στην κατάσταση κατάληψης του ραδιοφάσματος.



**Σχήμα 2.5:** Χρησιμοποίηση ραδιοφάσματος για συχνότητες από 300MHz έως 2700MHz.

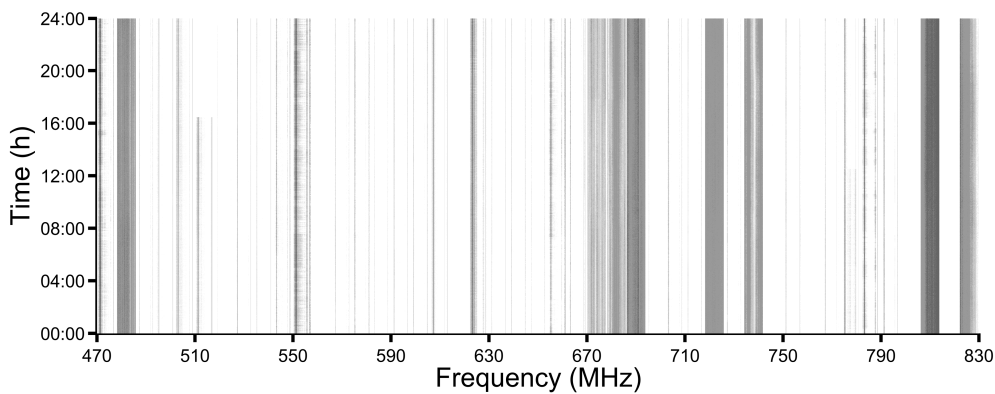
Από τα ανωτέρω αποτελέσματα διαπιστώνεται το γενικό συμπέρασμα ότι το ελκυστικό, για ασύρματες υπηρεσίες επικοινωνιών, φάσμα συχνοτήτων με εύρος από 300MHz έως 2700MHz υπο-χρησιμοποιείται ακόμη και στην πυκνοκατοικημένη περιοχή των Αθηνών. Επιπρόσθετα, παρατηρώντας προσεκτικότερα τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα όσον αφορά τις αποκλίσεις μεταξύ ελαχίστων, μέσων και μεγίστων τιμών ποσοστών χρησιμοποίησης, αλλά και εμβαθύνοντας στη αναλυτικότερη μελέτη του συνόλου των δεδο-

μένων κάθε φασματικής ζώνης, διακρίνονται δύο βασικά πρότυπα κατάληψης του ραδιοφάσματος. Από τη μια πλευρά υπάρχουν ζώνες συχνοτήτων, όπως η περιοχή λειτουργίας των τηλεοπτικών καναλιών, όπου κομμάτια φάσματος έχουν βρεθεί είτε διαρκώς κατειλημμένα είτε διαρκώς ελεύθερα, και επομένως καθίσταται ευκολότερη η άμεση εφαρμογή τεχνολογιών που εκμεταλλεύονται τις ευκαιρίες μετάδοσης μέσω τεχνικών δυναμικής φασματικής πρόσβασης. Από την άλλη πλευρά, παρατηρούνται ζώνες συχνοτήτων, όπως συμβαίνει για παράδειγμα για τις υπηρεσίες *κατερχόμενης ζεύξης* (DL - Downlink) συστημάτων GSM-900 (Global System for Mobile communications), DCS-1800 (Digital Cellular System) και UMTS/3G (Universal Mobile Telecommunication System), οι οποίες παρουσιάζουν μεταβλητή χρονικά συμπεριφορά και επακόλουθα συνεπάγονται υψηλότερες απαιτήσεις για μια υποψήφια τεχνολογία, π.χ. γνωσιακών ραδιοεπικοινωνιών, εκμετάλλευσης των φασματικών οπών.

Αναλυτικότερα, η ανατεθειμένη για υπηρεσίες ευρυεκπομπής φασματική ζώνη εύρους από 470MHz έως 830MHz εμφανίζει σταθερή συμπεριφορά κατάληψης με ποσοστό χρησιμοποίησης κοντά στο 20%. Οι σχετικά μικρές αποκλίσεις μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής φασματικής χρησιμοποίησης οφείλονται κυρίως στη *ψηφιακή μετάβαση* (digital switchover), η οποία έλαβε χώρα την περίοδο των μετρήσεων για το κεντρικό κέντρο ραδιοτηλεοπτικών εκπομπών του Υμηττού και οδήγησε στην παύση του επίγειου αναλογικού τηλεοπτικού σήματος με ταυτόχρονη ενεργοποίηση του επίγειου ψηφιακού. Ειδικότερα, το Σχήμα 2.6 απεικονίζει την αναλυτική εικόνα κατάληψης του ραδιοφάσματος για υπηρεσίες ευρυεκπομπής (φασματική περιοχή λειτουργίας τηλεοπτικών καναλιών, 470MHz έως 830MHz) στη διάρκεια μίας ημέρας, όπου διακρίνεται η χρονικά αμετάβλητη κατάσταση κατάληψης τόσο των ψηφιακών όσο και ορισμένων εξασθετισμένων αναλογικών καναλιών που προέρχονται κυρίως από το απομακρυσμένο κέντρο εκπομπής της Πάρνηθας.

Υψηλότερο ποσοστό φασματικής χρησιμοποίησης συναντάται για τις ζώνες συχνοτήτων 930-960MHz, 1805-1880MHz και 2110-2170MHz, οι οποίες κατανέμονται σε υπηρεσίες κατερχόμενης ζεύξης κινητών τηλεπικοινωνιών δεύτερης και τρίτης γενιάς. Το γεγονός αυτό αιτιολογείται πλήρως λαμβάνοντας υπόψη τα σχετικά στενά φασματικά όρια των συγκεκριμένων ζωνών σε συνδυασμό με την δημοφιλία των συγκεκριμένων υπηρεσιών αλλά και την πληθώρα των ήδη αδειοδοτημένων ενεργών παρόχων. Επιπροσθέτως,





**Σχήμα 2.6:** Κατάληψη φάσματος σε συχνότητες λειτουργίας τηλεοπτικών καναλιών.

παρατηρείται χρονικά μεταβαλλόμενη (σε επίπεδο ωρών) συμπεριφορά κατάληψης των συγκεκριμένων συχνοτήτων, καθώς κάποιοι σταθμοί βάσης τίθενται εκτός λειτουργίας - κυρίως κατά τη διάρκεια της νύχτας όπου η ζήτηση των χρηστών είναι μειωμένη - για την προστασία του εξοπλισμού και την εξοικονόμηση ενέργειας. Για τις αντίστοιχες φασματικές ζώνες που ανατίθενται στις ανερχόμενες ζεύξεις (UL - Uplink) των συγκεκριμένων υπηρεσιών (GSM-900 UL, DCS-1800 UL, UMTS/3G UL) το ποσοστό φασματικής χρησιμοποίησης παρατηρείται ιδιαίτερος χαμηλό εξαιτίας της χαμηλής ισχύος εκπομπής των κινητών τερματικών που συνήθως λειτουργούν σε κλειστούς εσωτερικούς χώρους και εναπόκεινται σε αναπόφευκτες επιπρόσθετες αποσβέσεις σήματος κατά τη διαδρομή τους έως το σημείο μετρήσεων (μη οπτική επαφή). Παρόμοιες παρατηρήσεις υφίστανται, ωσαύτως, για τις εκπομπές ασύρματων συσκευών σταθερής τηλεφωνίας (DECT - Digital Enhanced Cordless Telecommunications) και υπηρεσιών που λειτουργούν στη ζώνη Βιομηχανικών, Επιστημονικών και Ιατρικών μεταδόσεων (ISM - Industrial, Scientific and Medical) με χαρακτηριστικότερο παράδειγμα τη τεχνολογία WiFi. Η μικρή διάρκεια και η τοπική φύση των συγκεκριμένων μεταδόσεων, που σε συνδυασμό με τη στατική θέση του εξοπλισμού μετρήσεων σε οροφή κτηρίου (Σχήμα 2.3) καθιστά την κεραία λήψεων εκτός εύρους εκπομπής των περισσότερων ενεργών σημείων πρόσβασης (access points), δικαιολογεί τόσο τη χαμηλή μέση χρησιμοποίηση όσο και το σημαντικό μέγιστο ποσοστό κατάληψης των συγκεκριμένων φασματικών ζωνών.

Τέλος, όπως σημειώνεται και σε αντίστοιχες σχετικές μελέτες [21, 23, 25], η χρησιμοποίηση φασματικών πόρων για υπηρεσίες δορυφορικών επικοινωνιών (π.χ. δορυφορική ραδιοπλοήγηση, διαστημική έρευνα, κινητή δορυφορική, κλπ.) παρατηρείται εξαι-

ρετικά χαμηλή εξαιτίας των εξειδικευμένων απαιτούμενων προδιαγραφών για τη ορθή λήψη/ανίχνευση χαμηλής ισχύος δορυφορικών σημάτων (π.χ. χρήση ειδικών κεραιών υψηλής κατευθυντικότητας και υψηλού κέρδους). Οι υπόλοιπες φασματικές ζώνες με χαμηλό ποσοστό χρησιμοποίησης, π.χ. για υπηρεσίες αεροναυτικής πλοήγησης, δικαιολογούνται κυρίως είτε από την περιορισμένη χρήση των συγκεκριμένων υπηρεσιών στην εξεταζόμενη περιοχή είτε από τη μεσολάβηση τεχνητών ή φυσικών εμποδίων (π.χ. βουνών) από το σημείο εφαρμογής τους.

### 2.2.3 Συμπεράσματα

Η επισκόπηση κατάληψης φάσματος καταλήγει στο βασικό συμπέρασμα ότι οι ήδη εκχωρημένοι φασματικοί πόροι υπο-χρησιμοποιούνται ακόμη και στην πυκνοκατοικημένη αστική περιοχή των Αθηνών. Έμμεσα, συνεπώς, φανερώνεται η αναποτελεσματική στατική πολιτική διαχείρισης του ραδιοφάσματος η οποία εισάγει τεχνητούς περιορισμούς στη διαθεσιμότητα των φασματικών ζωνών, καθώς και η αναγκαιότητα εφαρμογής αρχιτεκτονικών δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας για αύξηση της φασματικής αποδοτικότητας.

Παρατηρώντας τη χαμηλή χρησιμοποίηση του φάσματος στις ζώνες VHF και UHF με αποτέλεσμα την ύπαρξη φασματικών κενών (TVWS – TV White Spaces), αλλά και τη χρονικά σταθερή συμπεριφορά τους, δικαιολογείται απόλυτα η έντονη δραστηριότητα που πρόσφατα αναπτύσσεται σχετικά με την εκμετάλλευσή τους (π.χ. μέσω των προτύπων IEEE 802.22, IEEE 802.11af, κλπ.), καθώς αποτελούν στην πράξη το πιο εφικτό, αλλά συνάμα ελκυστικό, σενάριο δυναμικής φασματικής πρόσβασης. Ωστόσο, τονίζεται ότι η δυναμική των δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας δεν περιορίζεται μόνο στα συγκεκριμένα σενάρια. Ακόμη και σε περιπτώσεις υψηλής χρησιμοποίησης, π.χ. κατερχόμενη ζεύξη συστήματος GSM-900 με μέσο ποσοστό χρησιμοποίησης 84.7%, παρατηρούνται φασματικές περιοχές με χρονικά μεταβαλλόμενη κατάσταση απασχόλησης οι οποίες μπορούν να μεταφραστούν σε χρονικά μεταβαλλόμενες ευκαιρίες μετάδοσης. Τις συγκεκριμένες προκλήσεις εκμετάλλευσης καλείται να αντιμετωπίσει η τεχνολογία γνωσιακών ραδιοεπικοινωνιών βάσει της οποίας οι δευτερεύοντες χρήστες έχουν τη δυνατότητα να αξιοποιούν ευκαιριακά κάθε είδους φασματικές οπές που μπορούν να εμφανιστούν στα πεδία της συχνότητας, του χώρου και του χρόνου. Για το λόγο αυτό, οι χωροχρονικές τε-

χνικές μοντελοποίησης και σχεδίασης που παρουσιάζονται στη παρούσα διατριβή έχουν ουσιαστικό νόημα και αποκτούν ιδιαίτερη χρησιμότητα σε δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας.

Αξίζει επίσης να επισημανθεί ότι μέσω της διαδικασίας επισκόπησης κατάληψης του ραδιοφάσματος παρατηρήθηκε πειραματικά η σημαντική αύξηση του απαιτούμενου χρόνου ανίχνευσης όταν το μέγεθος των φασματικών στοιχείων μειώνεται με στόχο την επίτευξη ακριβέστερων μετρήσεων. Διαπιστώνεται, επομένως, η αντικρουόμενη σχέση μεταξύ ακρίβειας και χρόνου ανίχνευσης. Το γεγονός αυτό αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε εφαρμογές όπου το εύρος ζώνης φασματικής ανίχνευσης είναι μεγάλο και οι χρονικές απαιτήσεις απόκρισης είναι αυστηρές, καθώς επίσης σε περιπτώσεις χρησιμοποίησης φθηνότερου εξοπλισμού με προδιαγραφές χαμηλότερης ταχύτητας ανίχνευσης. Συνοψίζοντας, μέσω της πραγματοποιηθείσας μελέτης επιτεύχθηκε η συλλογή δεδομένων υψηλής ακρίβειας που αποτυπώνουν την πραγματική εικόνα του ραδιοφάσματος στην περιοχή των Αθηνών, αλλά και επιτρέπουν την περαιτέρω επεξεργασία τους, όπως αναλύεται εκτενέστερα στο Κεφάλαιο 3 της παρούσας διδακτορικής διατριβής, για την έρευνα καινοτόμων μηχανισμών αντιμετώπισης σχετικών προβλημάτων που στηρίζονται σε πραγματικά δεδομένα και εκμεταλλεύονται χαρακτηριστικές ιδιότητες του ραδιοφάσματος.

## 2.3 Βασικές κατευθύνσεις έρευνας σε δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας

Οι εξελίξεις στο ερευνητικό πεδίο των δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας (ενότητα 2.1) και τα πρόσφατα ευρήματα της τρέχουσας κατάστασης κατάληψης του ραδιοφάσματος μέσω των σχετικών επισκοπήσεων (ενότητα 2.2) φανερώνουν ανοικτά προς επίλυση ερευνητικά προβλήματα στον τομέα των σύγχρονων ασύρματων τηλεπικοινωνιών. Επίσης, σκιαγραφούν τις συνεπαγόμενες προκλήσεις καθώς και τις βασικές κατευθύνσεις έρευνας με σκοπό την ανάλυση, το σχεδιασμό, και εν τέλει, την ανάπτυξη και πρακτική εφαρμογή της τεχνολογίας των γνωσιακών ραδιοεπικοινωνιών.

Ο εντοπισμός ασυνεχειών φασματικής κατάληψης, δηλαδή φασματικών οπών, στις διαστάσεις του χώρου και του χρόνου θέτουν τις πρώτες βάσεις αξιοποίησης των προηγμένων δυνατοτήτων των δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας, προδιαγράφοντας πιθανά

σενάρια μελλοντικής εφαρμογής τους. Εκτός των αναγκαίων ρυθμιστικών βημάτων, προϋπόθεση για τη μεταφορά της καινοφανούς αυτής τεχνολογίας δικτύωσης στον πραγματικό κόσμο αποτελεί η ευφυή αρχιτεκτονική σχεδίαση τους ώστε να εξασφαλίζεται η αποτελεσματικότητά τους. Η βελτιστοποιημένη, λοιπόν, λειτουργία τους αποτελεί αναγκαία και ικανή συνθήκη εφαρμογής τους και για την επίτευξή της καθίσταται απαραίτητη η έρευνα μεθοδολογιών που λαμβάνουν εγγενώς υπόψη τις υπάρχουσες χωροχρονικές αλληλεξαρτήσεις ανεξαρτήτως των μελλοντικά υιοθετημένων, κεντρικοποιημένων ή κατανεμημένων, αρχιτεκτονικών.

Η βελτιστοποίηση της λειτουργίας των ασύρματων δικτύων νέας γενιάς απαιτεί, επίσης, την επανεξέταση και ενδεχόμενη αναθεώρηση θεμελιωδών αρχών των κλασικών δικτύων επικοινωνιών. Μια από τις κυριότερες ερευνητικές κατευθύνσεις στη σύγχρονη βιβλιογραφία [41, 42, 43, 44, 45, 46] αποτελεί η ιδέα της *διαστρωματικής σχεδίασης* (cross-layer design) ασύρματων δικτύων επικοινωνιών εξαιτίας της αυξημένης ευελιξίας και των πλεονεκτημάτων επίδοσης που δύναται να προσφέρει. Με τον όρο *διαστρωματική σχεδίαση* (cross-layer design) ορίζεται κάθε είδους σχεδιασμός πρωτοκόλλων που παραβιάζει την κλασική αρχιτεκτονική, βασισμένης σε επίπεδα, στοίβας πρωτοκόλλων (layered architecture) [43]. Σύμφωνα με την εργασία [44] ο ορισμός αυτός μπορεί να επεκταθεί περαιτέρω χαρακτηρίζοντας ως διαστρωματική σχεδίαση κάθε αλγόριθμο, μεθοδολογία ή αφαιρετικό μοντέλο που υιοθετεί αλληλεπιδράσεις μεταξύ μη γειτονικών στρωμάτων. Κύριοι λόγοι που οδηγούν στην επανεξέταση της λογικής των κλασικών αρχιτεκτονικών βασισμένων σε επίπεδα (π.χ. μοντέλο Διασύνδεσης Ανοικτών Συστημάτων (OSI - Open Systems Interconnection), TCP/IP στοίβα πρωτοκόλλων) αποτελούν οι ουσιώδεις διαφορές μεταξύ των κλασικών ενσύρματων και των ασύρματων δικτύων τόσο σε επίπεδο ζεύξεων όσο και σε επίπεδο τερματικών (π.χ. κινητά τερματικά με περιορισμένους πόρους ενέργειας). Αναλυτικότερα, μια ασύρματη ζεύξη είναι εκτεθειμένη σε εξωγενείς παράγοντες με αποτέλεσμα τη χρονικά μεταβαλλόμενη ποιότητά της, ενώ τα προβλήματα που ενδέχεται να αντιμετωπίσει είναι μοναδικά και εκ φύσεως διαφορετικά από τις ενσύρματες επικοινωνίες. Για παράδειγμα, η αύξηση της από άκρο σε άκρο καθυστέρησης σε ασύρματες επικοινωνίες δεν οφείλεται απαραίτητα σε συμφόρηση μιας ενδιάμεσης ζεύξης αλλά μπορεί να δικαιολογείται από την υποβάθμιση της ποιότητας ενός καναλιού. Επίσης, οι βέλτιστες επιλογές δρομολόγησης και οι κατάλληλοι παράμετροι εκπομπής μπορεί να

μεταβάλλονται δυναμικά ανάλογα με τις διακυμάνσεις στην ποιότητα των χρησιμοποιηθέντων καναλιών. Τέλος, η φύση των ασύρματων καναλιών μεταβάλλει τη στενή έννοια των *δισημειακών ζεύξεων* (point-to-point link), όπως ορίζονται στις ενσύρματες επικοινωνίες, καθώς κάθε ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ ασύρματων συσκευών γίνεται ευρέως αντιληπτή επιτρέποντας σενάρια συνεργασίας ή συντονισμού με γειτονικούς ασύρματους κόμβους.

Τα πλεονεκτήματα της διαστρωματικής σχεδίασης βασίζονται στην παρεχόμενη ευελιξία, καθώς ο διαμοιρασμός πληροφοριών μεταξύ όλων των στρωμάτων μιας στοίβας πρωτοκόλλων και η συνδυασμένη ρύθμιση διαστρωματικών παραμέτρων προσφέρει στο σχεδιαστή ενός δικτύου περισσότερους βαθμούς ελευθερίας κατά την αναζήτηση βέλτιστων καταστάσεων λειτουργίας. Ειδικότερα, στα δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας, των οποίων η λειτουργία διέπεται από τη λογική του γνωσιακού κύκλου και των εγγενώς διαστρωματικών δομικών στοιχείων του (Σχήμα 2.1), η ανάγκη για συνδυασμένη προσαρμογή παραμέτρων και επίγνωση της εσωτερικής κατάστασης διαδικασιών για κάθε επιμέρους στρώμα γίνεται περισσότερο εμφανής. Για παράδειγμα, η σχεδίαση μηχανισμών ανωτέρων στρωμάτων (π.χ., αλγορίθμων δρομολόγησης, πρωτοκόλλων ελέγχου συμφόρησης) οφείλει να λαμβάνει άμεσα υπόψη πληροφορίες από το κατώτερο φυσικό στρώμα, όπως τα αποτελέσματα ανίχνευσης φάσματος και οι δυνατότητες προσαρμογής των παραμέτρων εκπομπής, ενώ όπως επισημαίνεται στην εργασία [45] προηγμένες τεχνικές ανίχνευσης φάσματος οφείλουν να σχεδιάζονται δίνοντας έμφαση στις υπάρχουσες διαστρωματικές αλληλεπιδράσεις.

Ο τρόπος υλοποίησης αρχιτεκτονικών διαστρωματικής σχεδίασης μπορεί να επιτευχθεί μέσω της άμεσης δικατευθυντικής ροής πληροφοριών μεταξύ γειτονικών ή μη γειτονικών στρωμάτων, μέσω μια κοινής βάσης δεδομένων με πρόσβαση από όλα τα στρώματα, ή μέσω νέων δομών που καταστρατηγούν εντελώς την έννοια της στοίβας πρωτοκόλλων [43]. Ωστόσο, η αυξημένη ευελιξία των αρχιτεκτονικών διαστρωματικής σχεδίασης συνοδεύεται από το κόστος της επιπρόσθετης σηματοδοσίας, της πολυπλοκότητας και της αμφιλεγόμενης συμβατότητας σε περιπτώσεις διαφορετικών διαστρωματικών υλοποιήσεων λόγω της μη ύπαρξης ενός καθολικού τυποποιημένου τρόπου σχεδίασης. Εξαιτίας των ανωτέρων μειονεκτημάτων που έχουν διατυπωθεί ως επιφυλάξεις στη σχετική βιβλιογραφία [47], κρίνεται απαραίτητη η ανάπτυξη ολοκληρωμένων διαστρωματικών λύσεων

που διατηρούν τα πλεονεκτήματα μιας σταθερής αρχιτεκτονικής (π.χ., διατηρώντας την έννοια της στοίβας πρωτοκόλλων και των ξεχωριστών στρωμάτων), ενώ δίνουν έμφαση στις αλληλεξαρτήσεις των στρωμάτων και συμβάλλουν στη συνδυασμένη διαστρωματική επίτευξη αντικειμενικών στόχων του συστήματος.

Παράλληλα, βασική κατεύθυνση έρευνας σε δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας συνιστά η περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση των διαθέσιμων μετρήσεων κατάληψης του ραδιοφάσματος με σκοπό την εύρεση πολύτιμων (ενδεχομένως μη άμεσα εμφανών) στοιχείων, ιδιοτήτων, και συμπεριφορών του φασματικού περιβάλλοντος. Πρόκληση σε μια τέτοια προσπάθεια αποτελεί ο μεγάλος όγκος των δεδομένων που χαρακτηρίζουν κάθε προσπάθεια επισκόπησης κατάληψης ευρείας ζώνης φάσματος, γεγονός που δυσχεραίνει τον εύκολο χειρισμό τους και την άμεση αξιοποίηση τους. Η αναλυτική μελέτη τους και η στατιστική τους επεξεργασία, επομένως, εξελίσσεται σε μείζονος σημασίας έργο με απώτερο στόχο την εκμετάλλευσή τους σε πρακτικά σενάρια εφαρμογής.

Οι ανωτέρω ερευνητικές κατευθύνσεις αποτελούν και το περιεχόμενο των κεφαλαίων που ακολουθούν. Παρότι στη βιβλιογραφία εντοπίζονται ποικίλες κατηγορίες τεχνικής φασματικής πρόσβασης, οι οποίες περιγράφονται εκτενέστερα στην ενότητα 2.1 και συγκεκριμένα στο Σχήμα 2.2, η παρούσα διατριβή επικεντρώνεται στη δημοφιλέστερη τεχνική *επικάλυψης φάσματος* (Spectrum Overlay) όπου οι χωροχρονικές εξαρτήσεις είναι πιο εμφανείς και απαιτούν σαφή μέτρα αντιμετώπισης στηριζόμενα σε χωροχρονικές τεχνικές μοντελοποίησης και διαστρωματικής σχεδίασης δικτύων.

## Κεφάλαιο 3

# Εντοπισμός, Ανάλυση και Εκμετάλλευση Ιδιοτήτων του Ραδιοφάσματος

Οι επισκοπήσεις κατάληψης φάσματος με σκοπό την αποτίμηση της πραγματικής κατάστασης του περιβάλλοντος ραδιοσυχνοτήτων απαιτούν υψηλής ακρίβειας και επαρκούς διάρκειας μετρήσεις που επακόλουθα οδηγούν στη συλλογή μεγάλου όγκου δεδομένων. Ως παράδειγμα μπορεί να εκληφθεί η επισκόπηση κατάληψης φάσματος που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή των Αθηνών, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2, και είχε ως αποτέλεσμα τη συγκέντρωση δεδομένων που αποθηκευμένα ως ασυμπίεστα αρχεία κωδικοποίησης ASCII σε εξωτερικό σκληρό δίσκο προσεγγίζουν τη χωρητικότητα των 100 GB (GigaByte). Αναλυτικότερα, για τον υπολογισμό της πυκνότητας φασματικής ισχύος σε εύρος συχνοτήτων από 300MHz έως 2700MHz με εύρος ζώνης διακριτικής ικανότητας 10kHz (και επακόλουθα μέγεθος φασματικού στοιχείου ίσο με 4.02kHz) απαιτούνται περίπου 600.000 εγγραφές τιμών ενέργειας, ενώ για τη συνολική διάρκεια των μετρήσεων (επτά ημέρες) πραγματοποιήθηκαν περίπου 20.000 σάρωσεις της φασματικής ζώνης ενδιαφέροντος (μια σάρωση κάθε 30 δευτερόλεπτα) και καταγράφηκαν συνολικά 12.096.000.000 τιμές ενέργειας. Όμοια, κατά τη συνήθη κανονική λειτουργία μιας συσκευής τεχνολογίας γνωσιακών ραδιοεπικοινωνιών απαιτείται η συνεχής παρακολούθηση του γειτονικού περιβάλλοντος και η συλλογή δεδομένων για περαιτέρω επεξεργασία σύμφωνα με τη λογική του γνωσιακού κύκλου (Σχήμα 2.1). Ο όγκος των δεδομένων ποικίλει και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το εύρος ζώνης της φασματικής περιοχής ενδιαφέροντος, ο επιδιωκόμενος βαθμός ακρίβειας, κλπ. Παρότι ο όγκος των στιγμιαία

αποθηκευμένων δεδομένων αναμένεται μικρότερος σε σύγκριση με τις γενικότερες και ολοκληρωτικές επισκοπήσεις κατάληψης φάσματος, η ανάγκη ταχείας προσαρμογής στις συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες περιβάλλοντος συμβάλλει στη διαρκή ή περιοδική ανίχνευση του ραδιοφάσματος με αποτέλεσμα την αυξημένη ταχύτητα παραγωγής νέων δεδομένων. Σε κάθε περίπτωση, συνεπώς, αναφερόμαστε σε πληθώρα δεδομένων που η περαιτέρω επεξεργασία και αξιοποίησή τους συνιστά σημαντικό αντικείμενο μελέτης.

Η ανάλυση μεγάλου όγκου δεδομένων μέσω στατιστικών μεθοδολογιών καθιστά εφικτή την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων σε πληθώρα πρακτικών εφαρμογών, ενώ επιπρόσθετα αποτελεί επίκαιρο αντικείμενο έρευνας σε ποικίλους επιστημονικούς κλάδους οι οποίοι ασχολούνται με τη διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων. Βάσει του ανωτέρου σκεπτικού, το τρέχον κεφάλαιο ασχολείται με την επεξεργασία των αρχικών ακατέργαστων δεδομένων μετρήσεων ανίχνευσης του ραδιοφάσματος και προτείνει μια μεθοδολογία ανάλυσης για την εξαγωγή πολύτιμων πληροφοριών και "κρυμμένων" στατιστικών ιδιοτήτων. Στοχεύοντας στην άμεση εκμετάλλευση της προτεινόμενης μεθοδολογίας χρησιμοποιούνται πραγματικά δεδομένα, τα οποία προέρχονται από την επισκόπηση κατάληψης φάσματος στην περιοχή των Αθηνών (ενότητα 2.2), και παρουσιάζονται πρακτικά σενάρια εφαρμογής της στον τομέα των δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας.

### **3.1 Πλαίσιο μελέτης, κίνητρα και οφέλη**

Ας υποθέσουμε έναν δευτερεύον χρήστη ο οποίος συμπεριφέρεται ως *λογικός πράκτορας* (rational agent) στηριζόμενος στις δυνατότητες που του προσφέρει η τεχνολογία των δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας. Υιοθετώντας την παραδοχή ότι δεν θεωρείται δεδομένη γνώση εκ των προτέρων ή απευθείας ενημέρωση από εξωτερικές πηγές πληροφοριών, ο δευτερεύον χρήστης οφείλει να παρατηρεί το εξωτερικό του περιβάλλον μέσω των δικών του μετρήσεων και να αξιοποιεί τα συλλεχθέντα δεδομένα για την παραγωγή γνώσης που θα τον βοηθήσει, εν συνεχεία, στην ορθή λήψη αποφάσεων για την κατανομή πόρων, την αποτελεσματική και γρήγορη ανίχνευση φασματικών οπών, την επιλογή φασματικής ζώνης εκπομπής, κλπ. Ως μεθοδολογία επαίσθησης του ραδιοφάσματος θεωρείται η τεχνική φασματικής ανίχνευσης βασισμένη στον εντοπισμό της ενέργειας σημάτων (EDSS), η οποία παρουσιάστηκε εκτενώς στην ενότητα 2.2.1, εξαιτίας των πλεονεκτημάτων που διαθέτει με κυριότερα την ανεξαρτησία από το εντοπιζόμενο σήμα, δηλαδή

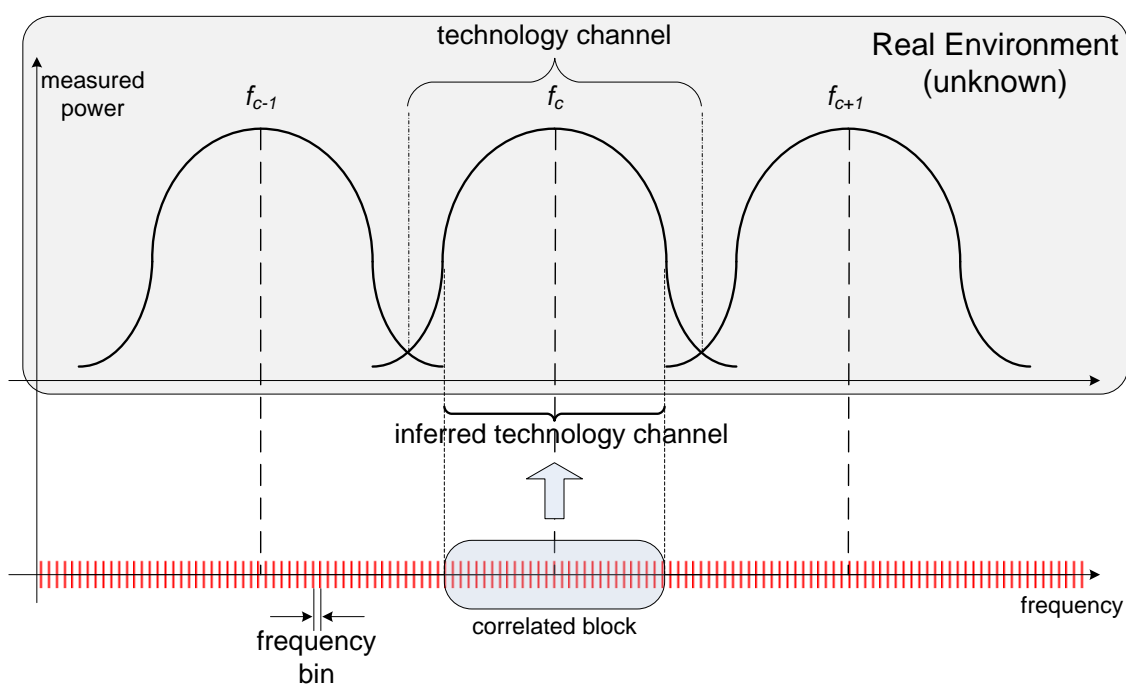


τη μη απαίτηση προηγούμενης γνώσης, την απλότητά της αλλά και την εφαρμοσιμότητά της καθώς υποστηρίζεται από την πλειονότητα των υπαρχόντων πειραματικών ή εμπορικών πλατφορμών γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας. Στόχος αποτελεί η επεξεργασία των διαθέσιμων (ιστορικών ή τωρινών) δεδομένων μέσω στατιστικής ανάλυσης με σκοπό την παραγωγή χρήσιμων και εκμεταλλεύσιμων συμπερασμάτων που μπορούν να βοηθήσουν στη γενικότερη βελτίωση της λειτουργίας του δικτύου.

Τα συλλεχθέντα δεδομένα αποτελούν, για την εξεταζόμενη περίπτωση, μετρήσεις ενέργειας κάθε μια εκ των οποίων αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο φασματικό στοιχείο. Η έννοια του φασματικού στοιχείου στην τεχνική EDSS είναι κυρίαρχη και αποκτά βαρυσήμαντη σημασία καθώς η σχετιζόμενη μετρηθείσα ενέργεια προσδιορίζει την ύπαρξη ή μη φασματικής οπής και άρα ευκαιρίας μετάδοσης, ενώ το μέγεθός ενός φασματικού στοιχείου επιδρά άμεσα στη σχέση μεταξύ ακρίβειας ανίχνευσης και κόστους υλοποίησης (π.χ. απαιτούμενη διάρκεια ανίχνευσης). Επιπρόσθετα, κάθε φασματικό στοιχείο αντιμετωπίζεται μέσω της τεχνικής EDSS ως ανεξάρτητο δομικό στοιχείο του ραδιοφάσματος, ενώ παραλληλίζοντας την εικόνα του ραδιοφάσματος με μια πραγματική ψηφιακή εικόνα η έννοια του φασματικού στοιχείου μπορεί να αντιστοιχηθεί με την έννοια του *εικονοστοιχείου* (pixel).

Βασική ιδέα της προτεινόμενης μεθοδολογίας αποτελεί το γεγονός ότι όπως στην περίπτωση της ψηφιακής εικόνας η τιμή (δηλαδή, το χρώμα) ενός εικονοστοιχείου εξαρτάται από τα χρώματα των γειτονικών εικονοστοιχείων, έτσι και στην περίπτωση της εικόνας του ραδιοφάσματος υποβόσκει μια χωρική αλληλεξάρτηση μεταξύ των τιμών διαφορετικών φασματικών στοιχείων. Αναλυτικότερα, το Σχήμα 3.1 απεικονίζει τη θεωρητική εικόνα ενός πραγματικού περιβάλλοντος ραδιοσυχνοτήτων το οποίο αποτελείται από κανάλια εκπομπής πρωτευόντων χρηστών (άνω τμήμα της εικόνας) και το περιβάλλον μετρήσεων της τεχνικής EDSS το οποίο περιλαμβάνει μια σειρά ανεξάρτητων φασματικών στοιχείων με εύρος ζώνης σαφώς μικρότερο των πρωτευόντων καναλιών προκειμένου να εξασφαλίζεται η ορθή ανίχνευση ακόμη και στενού εύρους ζώνης σημάτων πρωτευόντων χρηστών (κάτω τμήμα της εικόνας). Γίνεται αντιληπτό, συνεπώς, ότι όμορα φασματικά στοιχεία στη διάσταση της συχνότητας υπερκαλύπτονται από κοινά πρωτεύοντα κανάλια με αποτέλεσμα να επηρεάζονται με όμοιο τρόπο από τα υπάρχοντα πρωτογενή συστήματα, να παρουσιάζουν συνοχή στην κατάσταση κατάληψής τους και συσχέτιση στη

συμπεριφορά των ανιχνευμένων τιμών ενέργειας. Στόχος, επομένως, της προτεινόμενης μεθοδολογίας αποτελεί η επεξεργασία των δεδομένων ανίχνευσης και η στατιστική τους ανάλυση, έτσι ώστε ένας δευτερεύον χρήστης να είναι σε θέση να συνάγει τα άγνωστα εκ των προτέρων όρια των πρωτογενών καναλιών, αναγνωρίζοντας και ομαδοποιώντας τα φαινομενικά ανεξάρτητα φασματικά στοιχεία, και επακόλουθα να εκμεταλλεύεται την ανωτέρω γνώση για τη βελτίωση της γενικότερης λειτουργίας του και ειδικότερα για την οργάνωση και το συντονισμό των επιμέρους τμημάτων του γνωσιακού κύκλου (Σχήμα 2.1).



**Σχήμα 3.1:** Η θεωρητική εικόνα του ραδιοφάσματος, το εφαρμοζόμενο πλαίσιο μετρήσεων, και η υποβόσκουσα αλληλεξάρτηση των φασματικών στοιχείων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι αν και θεωρητικά η στοχευόμενη γνώση μπορεί να υποθεθεί ως δεδομένη, στην πράξη τα φασματικά όρια των καναλιών στα οποία εκπέμπουν μεμονωμένοι πρωτεύοντες χρήστες δεν είναι δημοσίως διαθέσιμα. Ο προσδιορισμός τους είναι δύσκολος και απαιτεί το συνδυασμό πληροφοριών από πολλαπλές ετερογενείς εξωτερικές πηγές ώστε να επιτευχθεί. Συγκεκριμένα, απαιτείται αρχικά η γνώση της πρωτογενούς υπηρεσίας στην οποία έχει εκχωρηθεί το συγκεκριμένο κομμάτι φάσματος. Οι πληροφορίες αυτές περιλαμβάνονται στον εθνικό κανονισμό κατανομής ζωνών συχνοτήτων, π.χ. [39], διαφέρουν ανά χώρα και είναι συνήθως διαθέσιμες μόνο σε επίσημα

έγγραφα της εκάστοτε κυβέρνησης. Επιπρόσθετα, απαιτούνται πληροφορίες για το είδος του πρωτοκόλλου επικοινωνίας κάθε υπηρεσίας (π.χ. διαφορετικά πρότυπα, όπως GSM, UMTS, κλπ., για την υπηρεσία κινητής τηλεφωνίας), αλλά και οι ακριβείς εσωτερικές προδιαγραφές του εκάστοτε πρωτοκόλλου (π.χ. το πρότυπο GSM λειτουργεί με τη χρήση καναλιών εύρους ζώνης 200kHz). Φαίνεται, επομένως, ότι επιζητώντας την αυτονομία του δευτερεύοντος χρήστη από εξωτερικές πηγές τα φασματικά όρια των καναλιών που χρησιμοποιούνται από πρωτεύοντες χρήστες δεν μπορούν να θεωρηθούν στην πράξη γνωστά και συνεπώς εναπόκειται στον ίδιο τον δευτερεύον χρήστη να τα αναζητήσει.

Τα κίνητρα, συνεπώς, του εντοπισμού και της εκμετάλλευσης των εγγενών ιδιοτήτων του ραδιοφάσματος μέσω της ανάλυσης των δεδομένων μέτρησης παραμένουν πολύπλευρα και σημαντικά. Αφενός μεν εξυπηρετείται η προσπάθεια κάθε δευτερεύοντος χρήστη να ανακαλύψει ένα αρχικά άγνωστο φασματικό περιβάλλον μέσω των λειτουργιών παρακολούθησης και ανάλυσης των ερεθισμάτων που λαμβάνει. Υπενθυμίζεται ότι οι λειτουργίες αυτές αποτελούν θεμελιώδη δομικά στοιχεία του γνωσιακού κύκλου, όπως επεξηγήθηκε στην ενότητα 2.1, και κατά συνέπεια χρήζουν ιδιαίτερης σημασίας για την πρόταση ολοκληρωμένων λύσεων τεχνολογίας γνωσιακών ραδιοεπικοινωνιών. Αφετέρου δε παρακινείται από την ανάγκη ορισμού της έννοιας των *δευτερευόντων καναλιών*. Συγκεκριμένα, η πλειονότητα των θεωρητικών εργασιών της σύγχρονης βιβλιογραφίας λαμβάνουν ως δεδομένη την ύπαρξη καθορισμένων δευτερευόντων καναλιών κατά τη σχεδίαση σύνθετων αλγορίθμων και τη μοντελοποίηση προβλημάτων σε δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας. Αξίζει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι η χρησιμοποίηση του όρου "δευτερεύον κανάλι" είναι αυθαίρετη, καθώς ο ορισμός του απαιτεί το σαφή καθορισμό τόσο της κεντρικής συχνότητας του καναλιού όσο και του αντίστοιχου εύρους ζώνης. Στην πράξη, εν αντιθέσει, ένα δευτερεύον κανάλι συνίσταται από ένα σύνολο μη κατειλημμένων φασματικών στοιχείων, αναφέρεται σε μια δεδομένη χρονική στιγμή, ενώ το εύρος ζώνης και η κεντρική συχνότητα ποικίλουν και προσδιορίζονται βάσει της θέσης και του μεγέθους των στιγμιαία ανιχνευμένων φασματικών οπών.

Η συσχέτιση φασματικών στοιχείων, τα οποία αντιμετωπίζονται εν γένει ως ανεξάρτητα στοιχεία από τεχνικές ανίχνευσης βασισμένες στη μέθοδο EDSS, μπορεί να προσφέρει σημαντικά πρακτικά οφέλη είτε στη σχεδίαση νέων μηχανισμών ανίχνευσης είτε στην τροποποίηση ήδη υπάρχοντων μηχανισμών. Συγκεκριμένα, ο εντοπισμός και η ομαδοποί-

ηση φασματικών στοιχείων που χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό συσχέτισης μπορεί να συμβάλει στην ευκολότερη και αποτελεσματικότερη διαχείριση του μεγάλου όγκου δεδομένων μετρήσεων, καθώς επίσης στη βελτίωση της διαδικασίας εύρεσης φασματικών οπών μέσω μιας αποδοτικότερης σχέσης μεταξύ ταχύτητας και ακρίβειας ανίχνευσης. Επιπρόσθετα, συνεισφέρει στον προσδιορισμό συγκεκριμένων συνόλων φασματικών στοιχείων με συνεκτική συμπεριφορά ως προς την κατάσταση κατάληψής τους, τα οποία δύναται να χαρακτηριστούν ως υποψήφια δευτερογενή κανάλια. Με τον τρόπο αυτό, ένας δευτερεύον χρήστης καθίσταται ικανός να εκτιμήσει/προβλέψει το αναμενόμενο μέγεθος των πιθανών φασματικών κενών σε κάθε φασματική περιοχή ενδιαφέροντος και εν συνεχεία να αποφασίζει και να προσαρμόζει την ακολουθούμενη πολιτική μεταδόσεων του ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες επικοινωνίας. Για παράδειγμα, συμπεραίνοντας ότι τα πρωτογενή κανάλια σε μια φασματική περιοχή έχουν εύρος ίσο με 200 kHz (π.χ. GSM κανάλια) ένας δευτερεύον χρήστης αναμένει ότι η χρησιμοποίηση δευτερογενών καναλιών μεγαλύτερου εύρους ζώνης θα συνοδεύεται αναπόφευκτα από μεγαλύτερη πιθανότητα επανεμφάνισης πρωτεύοντων χρηστών και επακόλουθα υψηλότερο κόστος αναδιάρθρωσης της λειτουργίας του.

Αξίζει, επιπλέον, να σημειωθεί ότι δεδομένου ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία βασίζεται και επαληθεύεται σε πραγματικά δεδομένα προερχόμενα από την επισκόπηση κατάληψης φάσματος στην περιοχή των Αθηνών, τα οφέλη της μπορούν να μεταφερθούν άμεσα στην πράξη και να συμπληρώσουν θεωρητικές εργασίες οι οποίες βασίζονται είτε στην παραδοχή ύπαρξης προκαθορισμένων δευτερογενών καναλιών είτε σε θεωρητικές, μη τεκμηριωμένες, υποθέσεις ύπαρξης συσχέτισης μεταξύ των φασματικών στοιχείων, π.χ. [48, 49].

## **3.2 Ιδιότητες συσχέτισης μεταξύ φασματικών στοιχείων**

Η μελέτη των ιδιοτήτων συσχέτισης που ενυπάρχουν στο ραδιοφάσμα εμφανίζεται στη σύγχρονη βιβλιογραφία σε σχετικές εργασίες που εξετάζουν το πεδίο της συχνότητας, του χρόνου και του χώρου. Στη διάσταση του χρόνου εξετάζεται η αυτοσυσχέτιση ενός καναλιού μέτρησης με σκοπό τη μοντελοποίηση και την πρόγνωση της κατάστασης κατάληψής του από πρωτεύοντες χρήστες [50, 51], ενώ στη διάσταση του χώρου βασικό κίνητρο αποτελεί η ακριβέστερη απόφαση χρησιμοποίησης ή μη ενός καναλιού μέσω της

συνεργατικής ανίχνευσης του ραδιοφάσματος από πολλαπλούς γειτονικούς δευτερεύοντες χρήστες [52, 53]. Εν αντιθέσει, η προτεινόμενη μεθοδολογία εμβαθύνει στην ανάλυση και αξιοποίηση των ιδιοτήτων συσχέτισης που ενυπάρχουν μεταξύ διαφορετικών φασματικών στοιχείων, δηλαδή στη διάσταση της συχνότητας.

Σχετικές εργασίες στη βιβλιογραφία, π.χ. [28, 54], μελετούν τη συσχέτιση μεταξύ φασματικών στοιχείων όσον αφορά την κατάσταση κατάληψής τους. Κύριο μειονέκτημα των συγκεκριμένων προσεγγίσεων αποτελεί η εξάρτηση των συμπερασμάτων που προκύπτουν από το εφαρμοζόμενο κατώφλι απόφασης  $\gamma$ , το οποίο υπολογίζεται συνήθως εμπειρικά (όπως επεξηγήθηκε στην ενότητα 2.2.1) και συνοδεύεται αναπόφευκτα από ένα βαθμό αβεβαιότητας εκφρασμένο μέσω των πιθανοτήτων χαμένης ανίχνευσης  $P_{md}$  και ψευδούς συναγεμμού  $P_{fa}$ . Σε αντίθεση, η προκείμενη μελέτη εστιάζει στη συσχέτιση μεταξύ των καταγεγραμμένων τιμών ενέργειας για γειτονικά φασματικά στοιχεία, δίχως δηλαδή να υπεισέρχεται ο παράγοντας  $\gamma$  που δύναται να επηρεάσει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Παρόμοιο σκεπτικό ακολουθείται στην εργασία [55] η οποία στηρίζεται σε δεδομένα επισκόπησης κατάληψης φάσματος στην περιοχή του Λονδίνου και αναδεικνύει την ύπαρξη συσχέτισης μεταξύ των τιμών ενέργειας τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας. Με αφορμή τις ιδιότητες συσχέτισης μεταξύ των φασματικών στοιχείων οι οποίες επαληθεύονται στην πράξη χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των μετρήσεων από την επισκόπηση κατάληψης φάσματος στην περιοχή των Αθηνών, η παρούσα μελέτη καταλήγει, επιπλέον, σε ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο εκμετάλλευσης των ιδιοτήτων συσχέτισης, σύμφωνα με το οποίο ένας δευτερεύον χρήστης μπορεί να παράγει γνώση για το άγνωστο περιβάλλον του εντοπίζοντας συνεκτικές φασματικές περιοχές και ομαδοποιώντας φασματικά στοιχεία τα οποία αντιστοιχούν σε συγκεκριμένα πρωτογενή κανάλια (Σχήμα 3.1).

### 3.2.1 Μεθοδολογία ανάλυσης

Ας θεωρήσουμε το σύνολο των συλλεχθέντων δεδομένων τιμών ενέργειας για κάθε φασματικό στοιχείο χωριστά ως μια χρονική σειρά από παρατηρήσεις που προέκυψαν σε χρονικό ορίζοντα  $\mathcal{I}$ . Στην πράξη, τα δεδομένα αυτά δύναται να συλλέγονται από δευτερεύοντες χρήστες κατά τη διάρκεια της συμβατικής λειτουργίας τους, και συγκεκριμένα μέσω της αναγκαίας διαδικασίας, συνεχής ή περιοδικής, ανίχνευσης του φασματικού πε-

ριβάλλοντος. Οι τιμές των χρονικών σειρών αναφέρονται σε τιμές ενέργειας και αντιπροσωπεύουν την εκάστοτε συμπεριφορά των γειτονικών πρωτογενών υπηρεσιών στο αντίστοιχο χρονικό παράθυρο μετρήσεων.

Υποθέτουμε ότι για κάθε φασματικό στοιχείο αντιστοιχίζεται μια συνεχής τυχαία μεταβλητή  $X_f$ , η οποία λαμβάνει τιμές  $x_f \in \mathfrak{R}$  αντιπροσωπεύοντας τη μετρηθείσα ενέργεια. Για τη μελέτη του βαθμού εξάρτησης μεταξύ δύο τυχαίων μεταβλητών  $X_{f_1}$  και  $X_{f_2}$ , χρησιμοποιείται ο *συντελεστής συσχέτισης Pearson* (Pearson product-moment correlation coefficient) ( $\rho$ ) ο οποίος ορίζεται ως

$$\rho_{X_{f_1}X_{f_2}} = \frac{\text{cov}(X_{f_1}, X_{f_2})}{\sigma_{X_{f_1}} \cdot \sigma_{X_{f_2}}}. \quad (3.1)$$

Σημειώνεται ότι ως  $\text{cov}(X_{f_1}, X_{f_2}) = E[(X_{f_1} - m_{X_{f_1}}) \cdot (X_{f_2} - m_{X_{f_2}})]$  εκφράζεται η *συμμεταβλητότητα* (covariance) των αντιστοίχων τυχαίων μεταβλητών  $X_{f_1}$  και  $X_{f_2}$ , ενώ ως  $m_{X_f}$  και  $\sigma_{X_f}$  συμβολίζονται η αναμενόμενη τιμή (μέση τιμή) και η τυπική απόκλιση της τυχαίας μεταβλητής  $X_f$ , αντίστοιχα. Αξίζει να επισημανθεί για μια ακόμη φορά ότι εκτιμώντας τη συσχέτιση με βάση την ακατέργαστη μορφή των μετρήσεων φασματικής ισχύος, η προτεινόμενη μεθοδολογία δεν επηρεάζεται από το εφαρμοζόμενο κατώφλι απόφασης  $\gamma$  το οποίο δύναται να θέσει σε κίνδυνο την ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος.

Ο συντελεστής συσχέτισης Pearson μετρά το βαθμό της γραμμικής εξάρτησης μεταξύ δύο τυχαίων μεταβλητών όταν η κατανομή πιθανότητας των αντίστοιχων πληθυσμών είναι γνωστή. Εναλλακτικά, εκφράζει το βαθμό στον οποίο μπορούμε να προβλέψουμε τη μια τυχαία μεταβλητή όταν γνωρίζουμε την τιμή της άλλης. Ωστόσο, σε πρακτικές εφαρμογές, όπως στην προκείμενη μελέτη, η κατανομή πιθανότητας των τυχαίων μεταβλητών είναι άγνωστη. Περιοριζόμαστε, λοιπόν, σε ένα πεπερασμένο αριθμό παρατηρήσεων, ή αλλιώς δειγμάτων, οι οποίες εκφράζονται για κάθε μεταβλητή  $X_f$  ως μια χρονική σειρά μετρήσεων πεπερασμένου μήκους  $\mathcal{I}$ , π.χ.  $\{x_f^{(1)}, x_f^{(2)}, \dots, x_f^{(\mathcal{I})}\}$ , για κάθε φασματικό στοιχείο  $f$ . Για την περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται ο *δειγματικός συντελεστής συσχέτισης* (sample correlation coefficient)  $r$  ως εκτιμητής της συσχέτισης των αντίστοιχων πληθυσμών δυο τυχαίων μεταβλητών και ορίζεται ως

$$r_{f_1f_2} = \frac{\sum_i (x_{f_1}^{(i)} - \bar{x}_{f_1}) \cdot (x_{f_2}^{(i)} - \bar{x}_{f_2})}{\sqrt{\sum_i (x_{f_1}^{(i)} - \bar{x}_{f_1})^2 \cdot \sum_i (x_{f_2}^{(i)} - \bar{x}_{f_2})^2}} \quad (3.2)$$

όπου  $\bar{x}_f = \frac{x_f^{(1)} + x_f^{(2)} + \dots + x_f^{(\mathcal{I})}}{\mathcal{I}}$ . Σημειώνεται ότι για οικονομία χώρου και διευκόλυνση του

συμβολισμού χρησιμοποιούνται εφεξής τα σύμβολα  $\rho$  και  $r$  ώστε να συμβολίζουν, αντίστοιχα, το συντελεστή συσχέτισης (Σχέση 3.1) και το δειγματικό συντελεστή συσχέτισης (Σχέση 3.2) για οποιοδήποτε ζευγάρι φασματικών στοιχείων.

Από την ανισότητα Cauchy-Schwarz αποδεικνύεται ότι, όπως και για το  $\rho$ , η τιμή του δειγματικού συντελεστή συσχέτισης Pearson  $r$  κυμαίνεται από  $-1$  (πλήρως αρνητική συσχέτιση) έως  $+1$  (πλήρως θετική συσχέτιση). Εφόσον  $r = 0$ , συνεπάγεται ότι οι εξεταζόμενες τυχαίες μεταβλητές είναι ασυσχέτιστες (αλλά όχι αναγκαία ανεξάρτητες). Εξαιτίας ωστόσο της πηγής των ιδιοτήτων συσχέτισης μεταξύ διαφορετικών φασματικών στοιχείων, όπως επεξηγείται στο Σχήμα 3.1, συνεπάγεται ότι για μικρή τιμή  $r$  τα αντίστοιχα φασματικά στοιχεία δεν είναι πιθανόν να ανήκουν στη φασματική περιοχή που καλύπτεται από το ίδιο τεχνολογικό πρωτεύον κανάλι μιας και στην περίπτωση αυτή αναμένεται υψηλή γραμμική εξάρτηση μεταξύ των τιμών ενέργειας των εμπλεκόμενων φασματικών στοιχείων.

Υπολογίζοντας, λοιπόν, τον δειγματικό συντελεστή συσχέτισης ανάμεσα σε κάθε ζεύγος φασματικών στοιχείων ενδιαφέροντος, ένας δευτερεύον χρήστης μπορεί μετέπειτα να ομαδοποιήσει γειτονικά φασματικά στοιχεία σε διακριτές ζώνες και να επιτύχει τη δημιουργία συνόλων φασματικών στοιχείων με συνεκτική συμπεριφορά ως προς τη μετρούμενη ενέργεια. Όπως εξηγήθηκε νωρίτερα, κάθε τέτοια συστάδα φασματικών στοιχείων ουσιαστικά αντιπροσωπεύει ένα συγκεκριμένης τεχνολογίας πρωτεύον κανάλι (Σχήμα 3.1) και επακόλουθα η εικόνα του υποκείμενου φασματικού περιβάλλοντος μπορεί να ανακατασκευαστεί επιτυχώς και με αποτελεσματικό τρόπο, προσφέροντας ποικίλα οφέλη και πρακτικά σενάρια εκμετάλλευσης.

### 3.2.2 Αποτελέσματα σε πραγματικό περιβάλλον ραδιοσυχνοτήτων

Με γνώμονα την πειραματική επαλήθευση των ανωτέρω υποθέσεων, ο εντοπισμός και η ανάλυση των ιδιοτήτων συσχέτισης μεταξύ διαφορετικών φασματικών στοιχείων διενεργήθηκε σε πραγματικό περιβάλλον αξιοποιώντας πραγματικά δεδομένα ανίχνευσης ενέργειας, όπως προέκυψαν από την επισκόπηση κατάληψης φάσματος στην περιοχή των Αθηνών (ενότητα 2.2). Σε αντίθεση με την πλειονότητα των επισκοπήσεων κατάληψης φάσματος της σχετικής βιβλιογραφίας, η προκείμενη μελέτη θεωρείται καταλληλότερη καθώς υιοθετεί φασματικά στοιχεία εξαιρετικά μικρού μεγέθους και επομένως καταλήγει

σε υψηλής ακρίβειας συλλεχθέντα δεδομένα. Το γεγονός αυτό μειώνει την πιθανότητα δύο ή περισσότερα ανεξάρτητα πρωτογενή κανάλια να καλύπτουν διαφορετικά μέρη του ιδίου φασματικού στοιχείου, συνεπώς, παρέχοντας στον δευτερεύον χρήστη μια πιο λεπτομερή εικόνα του ραδιοφάσματος. Με τον τρόπο αυτό, δεν αλλοιώνεται το περιεχόμενο της φασματικής ανίχνευσης εξαιτίας της διαδικασίας μέτρησης και επακόλουθα πληρούνται οι προϋποθέσεις για τον ορθό εντοπισμό και την ακριβέστερη παρουσίαση των εγγενών ιδιοτήτων συσχέτισης του ραδιοφάσματος.

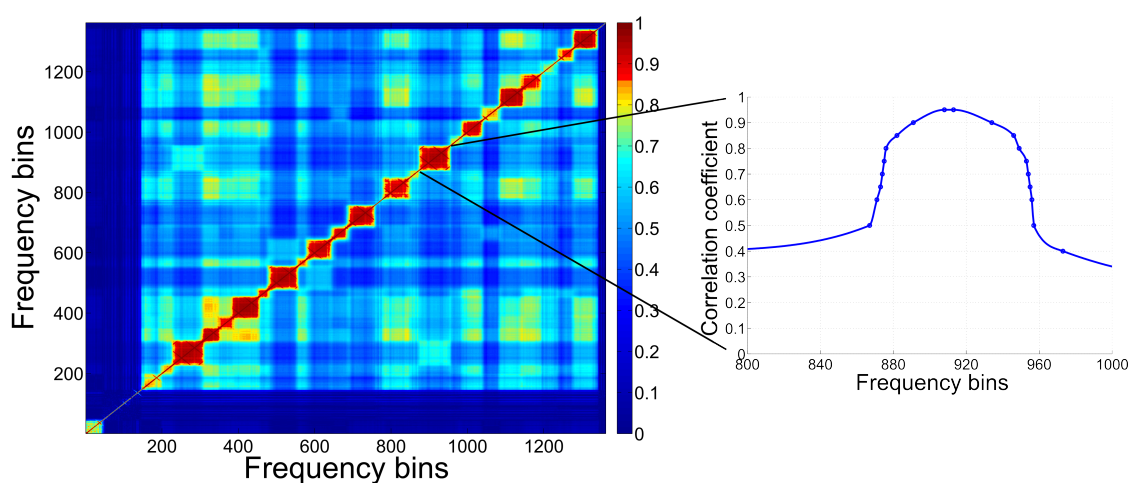
Για την εύληπτη παρουσίαση των αποτελεσμάτων, επικεντρωθήκαμε - από το συνολικό εύρος  $300 - 2700\text{MHz}$  - σε ένα μικρότερο κομμάτι ραδιοφάσματος το οποίο στην πράξη εκχωρείται σε υπηρεσίες κατερχόμενη ζεύξης κινητών τηλεπικοινωνιών και ειδικότερα σε υπηρεσίες τεχνολογίας GSM<sup>1</sup>. Υπενθυμίζεται ότι σύμφωνα με τα ευρήματα της μελέτης που παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.2.2 οι συγκεκριμένες αδειοδοτημένες φασματικές ζώνες χαρακτηρίζονται από υψηλό ποσοστό χρησιμοποίησης, αλλά ταυτόχρονα από μεταβλητή χρονικά συμπεριφορά, γεγονός που επιτρέπει την εφαρμογή της τεχνολογίας γνωσιακών ραδιοεπικοινωνιών εισάγοντας συνάμα υψηλότερες απαιτήσεις και μεγαλύτερες προκλήσεις. Για το λόγο αυτό, για την πειραματική μελέτη και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων συσχέτισης επιλέγεται μια ζώνη συχνοτήτων, εύρους περίπου  $5\text{MHz}$  (και συγκεκριμένα 1362 φασματικών στοιχείων), εκχωρημένη σε υπηρεσίες GSM κατερχόμενη ζεύξης. Η συγκεκριμένη ζώνη χαρακτηρίζεται από τη δυναμική φύση του φασματικού περιβάλλοντος και, επομένως, αντιπροσωπεύει ορθότερα τις προβλέψεις για το σχηματιζόμενο δυναμικό φασματικό τοπίο το οποίο αναμένεται να διέπει τις ασύρματες επικοινωνίες στα επόμενα έτη.

Αρχικά, ένα υποσύνολο μετρήσεων (δηλαδή, 1362 χρονικές σειρές) με χρονικό ορίζοντα που αντιστοιχεί σε 5760 δείγματα χρησιμοποιείται με σκοπό τον υπολογισμό των ιδιοτήτων συσχέτισης του ραδιοφάσματος. Το Σχήμα 3.2 απεικονίζει την υπολογισμένη συσχέτιση μεταξύ των φασματικών στοιχείων, τα οποία εν προκειμένω καλούνται επίσης και ως *κανάλια μέτρησης* (measurement channels), εξετάζοντας τα δεδομένα μέτρησης/ανίχνευσης φασματικής ισχύος. Όπως γίνεται εμφανές, παρατηρούνται υψηλές τιμές συσχέτισης μεταξύ γειτονικών φασματικών στοιχείων που εποπτικά σχηματίζουν διακριτές φασματικές υποζώνες επαληθεύοντας τη θεωρητική προσέγγιση του Σχήματος 3.1.

<sup>1</sup> Σημειώνεται ότι η συγκεκριμένη πληροφορία θεωρείται άγνωστη για τον δευτερεύον χρήστη.



Ειδικότερα, εμφανίζεται υψηλός βαθμός συσχέτισης σε συνεχόμενα φασματικά στοιχεία (κανάλια μέτρησης) τα οποία καλύπτονται από ένα μοναδικό πρωτεύον κανάλι, ενώ η παρατηρούμενη συσχέτιση μειώνεται απότομα στα σύνορα των σχηματιζόμενων φασματικών υποζωνών. Η συμπεριφορά αυτή δικαιολογείται από το γεγονός ότι στην πράξη οι υπάρχουσες αδειοδοτημένες υπηρεσίες λειτουργούν στην πλειονότητά τους εκπέμποντας σε συνεχή κομμάτια φάσματος. Επίσης, η απότομη μείωση της υπολογιζόμενης συσχέτισης των τιμών ενέργειας, συγκλίνοντας σε τιμές κοντά στο μηδέν, είναι αναμενόμενη για φασματικά στοιχεία στα οποία η επίδραση της ενέργειας θορύβου είναι σημαντική (π.χ. μη κατειλημμένα κανάλια μέτρησης) ή στα οποία η ανιχνευμένη ενέργεια προέρχεται από εκπομπές διαφορετικών πρωτευόντων χρηστών. Με τον τρόπο αυτό, συνεχόμενα φασματικά στοιχεία μπορούν να ομαδοποιηθούν σε διακριτές συστάδες μέσω της εντοπισμένης εξάρτησης των στοιχείων που τα αποτελούν, κατά συνέπεια, σχηματίζοντας συνεκτικές φασματικές περιοχές που ορίζουν υποψήφια δευτερογενή κανάλια με ακριβή στοιχεία για τη φασματική θέση και το εύρος ζώνης τους.



**Σχήμα 3.2:** Συσχέτιση τιμών ενέργειας μεταξύ διαφορετικών φασματικών στοιχείων.

Η ερμηνεία των τιμών του δειγματικού συντελεστή συσχέτισης, και εν συνεχεία ο καθορισμός της τιμής του κατωφλίου  $r_{thr}$  πάνω από το οποίο μπορεί να συναχθεί υψηλή εξάρτηση, βασίζεται κυρίως στο περιεχόμενο και τους σκοπούς του εκάστοτε εξεταζόμενου συνόλου μετρήσεων. Για παράδειγμα, μια τιμή συσχέτισης ίση με 0.8 μπορεί να θεωρηθεί πολύ χαμηλή για ένα πείραμα που στοχεύει στην επαλήθευση ενός φυσικού νόμου, ενώ μπορεί να θεωρηθεί πολύ υψηλή σε πειράματα κοινωνικών επιστημών όπου ενδε-

χομένως επηρεάζονται από επιπρόσθετους αστάθμιστους παράγοντες. Στην προκειμένη μελέτη, η παρατηρούμενη εξάρτηση των τιμών ενέργειας μεταξύ γειτονικών φασματικών στοιχείων οφείλεται στο γεγονός ότι η μετάδοση ενός μεμονωμένου πρωτεύοντος καναλιού καλύπτει ένα υπερσύνολο φασματικών στοιχείων, π.χ. ένα κανάλι GSM εύρους ζώνης  $200kHz$  απλώνεται σε πολλαπλά φασματικά στοιχεία μεγέθους  $4.02kHz$ . Συνεπώς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2, οι τιμές ενέργειας φασματικών στοιχείων που ανήκουν σε κοινό πρωτεύον κανάλι παρουσιάζουν υψηλές τιμές συσχέτισης και επομένως η επιλογή ενός υψηλού κατωφλίου  $r_{thr}$ , π.χ.  $r_{thr} = 0.75$ , επιτρέπει τον εντοπισμό συνεκτικών υποζωνών με σαφή οριοθετημένα φασματικά σύνορα.

Προτού ωστόσο αξιοποιηθούν οι υπολογισμένες τιμές του δειγματικού συντελεστή συσχέτισης για την αναγνώριση των φασματικών ορίων των πρωτευόντων καναλιών είναι ανάγκη να εξετασθεί η εγκυρότητα των εξαχθέντων στατιστικών αποτελεσμάτων. Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.2.1, ο δειγματικός συντελεστής συσχέτισης,  $r$ , χρησιμοποιείται ως εκτιμητής του αγνώστου συντελεστή συσχέτισης  $\rho$  και επηρεάζεται από το μέγεθος του διαθέσιμου δείγματος. Είναι χρήσιμο, λοιπόν, να προσδιοριστεί ένα διάστημα τιμών το οποίο καλείται ως *διάστημα εμπιστοσύνης* (confidence interval) και περιέχει την άγνωστη τιμή της παραμέτρου  $\rho$  με κάποια πιθανότητα  $\gamma$ , π.χ. 95%.

Δεδομένου ότι η κατανομή του δειγματικού συντελεστή συσχέτισης δεν είναι γνωστή και  $-1 \leq \rho \leq 1$ , το διάστημα εμπιστοσύνης του συντελεστή  $\rho$  σε σχέση με το μέγεθος δειγμάτων και την τιμή του δειγματικού συντελεστή συσχέτισης  $r$  (Σχέση 3.1) μπορεί να εκτιμηθεί μόνο προσεγγιστικά. Η πρώτη κατά προσέγγιση εκτίμηση, η οποία εξετάζεται, υποθέτει μεγάλο αριθμό δειγμάτων και στηρίζεται στο μετασχηματισμού Fisher [37]. Συγκεκριμένα, ας θεωρήσουμε το μετασχηματισμό

$$z = \frac{1}{2} \ln \frac{1+r}{1-r} = \operatorname{artanh}(r) \quad (3.3)$$

και μεγάλο αριθμό δειγμάτων,  $\mathcal{I}$ . Μπορεί να αποδειχθεί ότι η κατανομή της τυχαίας μεταβλητής  $z$  είναι κατά προσέγγιση κανονική [37] με μέση τιμή  $m_z \simeq \frac{1}{2} \ln \frac{1+\rho}{1-\rho}$  και μεταβλητότητα  $\sigma_z^2 \simeq \frac{1}{\mathcal{I}-3}$ . Το διάστημα εμπιστοσύνης για τον συντελεστή συσχέτισης,  $\rho$ , με βαθμό εμπιστοσύνης  $\gamma$  μπορεί να εκτιμηθεί κατά προσέγγιση μέσω της σχέσης

$$Pr\{r_1 < r < r_2\} = \gamma, \quad (3.4)$$

όπου

$$r_1 = \frac{\exp 2z_1 - 1}{\exp 2z_1 + 1} \text{ and } r_2 = \frac{\exp 2z_2 - 1}{\exp 2z_2 + 1} \quad (3.5)$$

$$z_1 = m_z - \frac{z_{\frac{1+\gamma}{2}}}{\sqrt{\mathcal{I} - 3}} \text{ and } z_2 = m_z + \frac{z_{\frac{1+\gamma}{2}}}{\sqrt{\mathcal{I} - 3}}, \quad (3.6)$$

και  $z_{\frac{1+\gamma}{2}}$  τέτοιο ώστε  $Pr\{z > z_{\frac{1+\gamma}{2}}\} = \frac{1+\gamma}{2}$ . Με βάση τις Σχέσεις (3.4), (3.5), και (3.6) είναι δυνατός ο υπολογισμός των διαστημάτων εμπιστοσύνης του συντελεστή συσχέτισης για διαφορετικούς βαθμούς εμπιστοσύνης  $\gamma$  θέτοντας για την εξεταζόμενη περίπτωση τον αριθμό δειγμάτων ίσο με 5760. Ο μετασχηματισμός Fisher χρησιμοποιείται ευρέως στην πράξη από στατιστικά πακέτα, ωστόσο, στη θεωρία βασίζεται στην υπόθεση ότι τα ζεύγη παρατηρήσεων/δειγμάτων ακολουθούν κατανομή πιθανότητας συγκεκριμένης δομής, π.χ. προέρχονται από διμεταβλητό κανονικό πληθυσμό, έτσι ώστε η ασυμπτωτική μεταβλητότητα του  $z$  να είναι ανεξάρτητη του  $\rho$  [56, 57]. Για την επαλήθευση της ακρίβειας της εκτίμησης των διαστημάτων εμπιστοσύνης χρησιμοποιείται επίσης μια δεύτερη προσεγγιστική τεχνική που βασίζεται στη μέθοδο εκκίνησης (bootstrap) [57, 58]. Η μέθοδος bootstrap αποτελεί μια στατιστική τεχνική υψηλού υπολογιστικού φόρτου υποστηριζόμενη από την πλειονότητα των στατιστικών πακέτων, η οποία χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι ο κατά προσέγγιση υπολογισμός των διαστημάτων εμπιστοσύνης μιας στατιστικής παραμέτρου επιτυγχάνεται αποκλειστικά και μόνο βάσει των συνόλων δεδομένων, χωρίς δηλαδή υποθέσεις για την κατανομή πιθανότητας του πληθυσμού από τον οποίο προέρχονται.

Ο Πίνακας 3.1 παρουσιάζει ενδεικτικά αποτελέσματα των διαστημάτων εμπιστοσύνης του συντελεστή συσχέτισης,  $\rho$ , βάσει της εκτίμησης μέσω του δειγματικού συντελεστή συσχέτισης,  $r$ , όταν εφαρμόζονται και οι δύο προαναφερθείσες τεχνικές. Εξετάζοντας τη φασματική περιοχή των 5 MHz του Σχήματος 3.2 ελέγχονται τέσσερα αντιπροσωπευτικά ζεύγη φασματικών στοιχείων που καλύπτουν ικανοποιητικά το εύρος τιμών του δειγματικού συντελεστή συσχέτισης. Συγκεκριμένα, εξετάζονται τόσο μακρινά φασματικά στοιχεία για τα οποία αναμένεται χαμηλή έως μηδενική τιμή συσχέτισης όσο και γειτονικά φασματικά στοιχεία τα οποία με μεγάλη πιθανότητα ανήκουν στο εύρος ζώνης εκπομπής του ίδιου πρωτεύοντος χρήστη και συνεπώς οι αντίστοιχες τιμές ενέργειας εμφανίζουν υψηλό βαθμό συσχέτισης. Όπως παρατηρείται στον Πίνακα 3.1 το μέγεθος των δειγμάτων, δηλαδή 5760 δείγματα, είναι επαρκώς μεγάλο έτσι ώστε ο συντελεστής συσχέτισης  $\rho$  να μπορεί να εκτιμηθεί ορθά και με υψηλή ακρίβεια από το δειγματικό συντελεστή  $r$

για κάθε εξεταζόμενο ζεύγος δεδομένων. Η ανωτέρω παρατήρηση ισχύει όταν ο υπολογισμός των διαστημάτων εμπιστοσύνης πραγματοποιείται είτε με βάση το μετασχηματισμό Fisher είτε με τη μέθοδο bootstrap. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων και διασφαλίζει ότι ένα κατώφλι απόφασης  $r_{\text{thr}} = 0.75$  είναι ικανό στην πράξη να κατηγοριοποιήσει τις περιπτώσεις χαμηλής και υψηλής συσχέτισης με σκοπό εν τέλει την δημιουργία συστάδων φασματικών στοιχείων με συνεκτική συμπεριφορά φασματικής κατάληψης.

**Πίνακας 3.1:** Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα διαστημάτων εμπιστοσύνης του συντελεστή συσχέτισης για βαθμό εμπιστοσύνης ίσο με 95%.

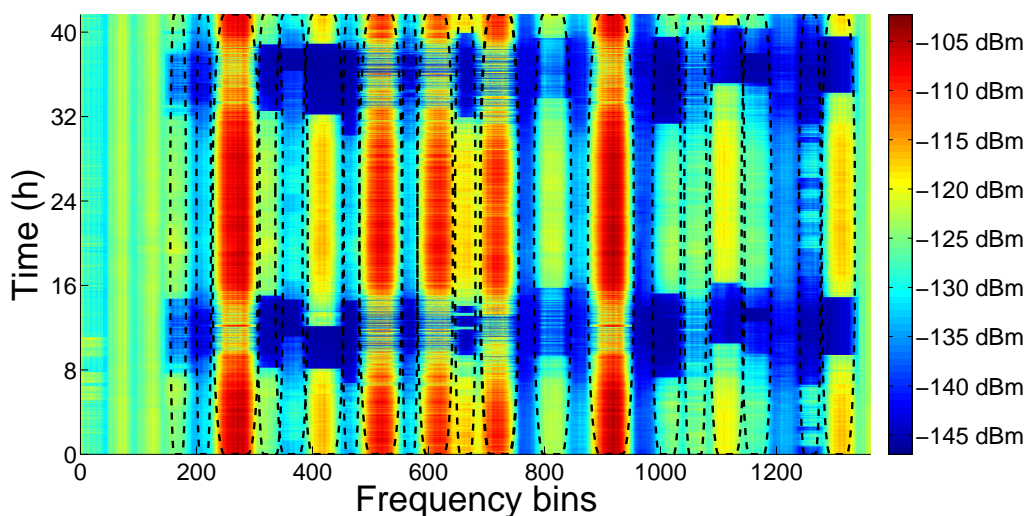
Measurement bins	$r$ Value	Fisher's transformation	Bootstrap
1 and 910	0.0263	$0.0004 < \rho < 0.0521$	$-0.0018 < \rho < 0.0509$
800 and 910	0.5020	$0.4824 < \rho < 0.5210$	$0.4795 < \rho < 0.5237$
900 and 910	0.9404	$0.9374 < \rho < 0.9433$	$0.9355 < \rho < 0.9448$
909 and 910	0.9894	$0.9889 < \rho < 0.9900$	$0.9883 < \rho < 0.9904$

Για τον χαρακτηρισμό ενός συνόλου  $\mathcal{N}$  φασματικών στοιχείων ως συστάδα/ομάδα υψηλής συσχέτισης όλες οι τιμές των στοιχείων (εγγραφών) του αντίστοιχου  $\mathcal{N} \times \mathcal{N}$  πίνακα συσχέτισης οφείλουν να είναι μεγαλύτερες από την προκαθορισμένη τιμή του κατωφλίου απόφασης  $r_{\text{thr}}$ . Παρότι οι πίνακες συσχέτισης είναι πάντοτε συμμετρικοί, και επομένως στην πράξη απαιτείται ο υπολογισμός μόνο των μισών στοιχείων τους, το υπολογιστικό κόστος μιας τέτοιας διαδικασίας έχει πολυπλοκότητα τάξης μεγέθους  $O(\mathcal{N}^2)$ . Επιπρόσθετα, για τον αρχικό εντοπισμό τέτοιων ομάδων υψηλής συσχέτισης σε ένα μεγάλο εύρος ζώνης φάσματος, π.χ. αποτελούμενο στη περίπτωση μας από 1362 φασματικά στοιχεία, ως  $\mathcal{N}$  θα πρέπει να θεωρείται ο συνολικός αριθμός των εξεταζόμενων φασματικών στοιχείων οδηγούμενοι επομένως σε αυξημένο υπολογιστικό κόστος. Στην πράξη, ωστόσο, το κόστος αυτό μπορεί να μειωθεί περαιτέρω αξιοποιώντας συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και παρατηρήσεις για το εξεταζόμενο πρόβλημα. Ειδικότερα, όπως παρατηρείται στο Σχήμα 3.2 δύναται να υποτεθεί ότι οι συνεκτικές ομάδες με υψηλό βαθμό συσχέτισης αποτελούνται αποκλειστικά από συνεχόμενα φασματικά στοιχεία. Θεωρώντας εν συνεχεία ότι ένα πρωτεύον σήμα μπορεί να καλύπτει έως ένα μέγιστο πεπερασμένο αριθμό φασματικών στοιχείων  $W$  (το οποίο καλείται επίσης και ως "παράθυρο"), οι ιδιό-

τητες συσχέτισης μπορούν να υπολογιστούν αποδοτικότερα ακολουθώντας μια προσέγγιση ολισθαίνοντος παραθύρου. Πιο συγκεκριμένα, τα διαθέσιμα δεδομένα φασματικής ανίχνευσης σαρώνονται προοδευτικά και οι ιδιότητες συσχέτισης εκτιμώνται τοπικά για τα φασματικά στοιχεία που ανήκουν στο τρέχον "παράθυρο". Κατά συνέπεια, η πολυπλοκότητα του υπολογιστικού κόστους μειώνεται από  $O(N^2)$  σε  $O(N \cdot W)$ , όπου  $W \ll N$ .

Αφότου αξιοποιηθεί ένα δείγμα δεδομένων εκπαίδευσης ("φάση εκπαίδευσης") για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων συσχέτισης και επακόλουθα τον καθορισμό συνεκτικών ομάδων φασματικών στοιχείων βάσει του κατωφλίου απόφασης  $r_{\text{thr}}$ , στη συνέχεια χρησιμοποιείται ένα νέο σύνολο δεδομένων για την παρουσίαση των πλεονεκτημάτων που προκύπτουν από την ανωτέρω διαδικασία. Στόχος αποτελεί η επαλήθευση της δυνατότητας του δευτερεύοντος χρήστη να αναγνωρίζει αυτόνομα και με αυτοματοποιημένο τρόπο την αρχικώς άγνωστη διάρθρωση του ραδιοφάσματος όσον αφορά τη φασματική θέση και το εύρος ζώνης εκπομπής των πρωτευόντων καναλιών. Με τον τρόπο αυτό συμπληρώνεται και ενισχύεται η διαδικασία ανίχνευσης EDSS που εκ φύσεως αντιμετωπίζει κάθε φασματικό στοιχείο ως ανεξάρτητη δομική μονάδα, καθιστώντας το χρήστη ικανό να παράγει γνώση μέσω στατιστικής επεξεργασίας και να χειρίζεται αποδοτικότερα το μεγάλο όγκο δεδομένων.

Το Σχήμα 3.3 απεικονίζει τις ανιχνευμένες τιμές ενέργειας για τα φασματικά στοιχεία που καλύπτουν την εξεταζόμενη φασματική περιοχή των  $5\text{MHz}$  (Σχήμα 3.2) για ένα νέο σύνολο δειγμάτων διάρκειας περίπου 42 ωρών που, συγκεκριμένα, αντιστοιχεί σε καταγραφή 5000 παρατηρήσεων. Με διακεκομμένες γραμμές παρουσιάζονται οι συστάδες φασματικών στοιχείων όπως ομαδοποιούνται αυτοματοποιημένα με κριτήριο το βαθμό συσχέτισης μεταξύ των φασματικών στοιχείων και με βάση την τιμή κατωφλίου  $r_{\text{thr}} = 0.75$ . Παρατηρείται ότι οι προκύπτουσες ομάδες φασματικών στοιχείων εναρμονίζονται με τις υπάρχουσες αδειοδοτημένες μεταδόσεις οι οποίες μπορούν να εντοπιστούν εποπτικά στο Σχήμα 3.3 μέσω των τιμών ανιχνευμένης ενέργειας και των ομοιόμορφων μεταβολών της ενέργειας στη διάσταση του χρόνου. Επομένως, επιβεβαιώνεται στην πράξη ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία εξαγωγής στατιστικών ιδιοτήτων και ομαδοποίησης συσχετιζόμενων φασματικών στοιχείων δύναται να συνεισφέρει με ουσιαστικό τρόπο στην ενημερότητα των δευτερευόντων χρηστών και στην παραγωγή γνώσης που βοηθά στην επίγνωση του γειτονικού φασματικού περιβάλλοντος τους.

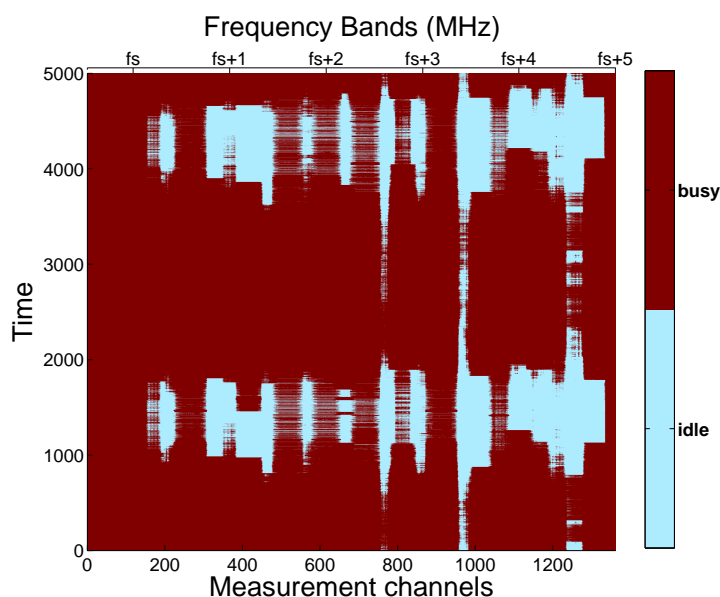


**Σχήμα 3.3:** Ομαδοποίηση φασματικών στοιχείων βάσει των ιδιοτήτων συσχέτισης που χαρακτηρίζουν τη μετρηθείσα ενέργειά τους. Οι διακεκομμένες γραμμές συμβολίζουν τις συστάδες φασματικών στοιχείων που συνιστούν υποψήφια δευτερογενή κανάλια.

Μια πιο προσεκτική ματιά στο Σχήμα 3.3 φανερώνει επίσης ότι στηριζόμενοι σε πραγματικά δεδομένα μετρήσεων καθίσταται δυνατόν να ληφθούν υπόψη επιπρόσθετοι παράγοντες, όπως η διαρροή ισχύος σε παρακείμενα κανάλια, τοπικές εξασθενίσεις, κλπ., οι οποίοι δεν μπορούν προβλεφθούν ακόμη και αν υπήρχε πλήρης γνώση των σχημάτων μετάδοσης των πρωτευόντων χρηστών. Το γεγονός αυτό εξηγεί, επίσης, πιθανές μικρές επικαλύψεις στα σύνορα των εξαχθέντων φασματικών υποζωνών, αλλά κυρίως ενισχύει την πρακτικότητα της εφαρμοζόμενης μεθόδου. Αξίζει ωστόσο να αναφερθεί ότι προϋπόθεση για την εύρεση ομάδων υψηλής συσχέτισης αποτελεί η ύπαρξη φασματικής δραστηριότητας από την πλευρά των πρωτευόντων χρηστών κατά τη διάρκεια της "φάσης εκπαίδευσης", καθώς διαφορετικά η συσχέτιση παραμένει χαμηλή και πιθανά πρωτογενή κανάλια δεν δύναται να εντοπισθούν, π.χ. όπως παρατηρείται στην περιοχή των πρώτων φασματικών στοιχείων του Σχήματος 3.3.

Τέλος, όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή της ενότητας 3.2, βασικό πλεονέκτημα της ανωτέρω μεθοδολογίας ανάλυσης αποτελεί η αξιοποίηση των ακατέργαστων τιμών ενέργειας, σε αντίθεση με σχετικές εργασίες που μελετούν την κατάσταση κατάληψης, για τον εντοπισμό ιδιοτήτων συσχέτισης μεταξύ των φασματικών στοιχείων. Ως επιβεβαίωση του ανωτέρου ισχυρισμού το Σχήμα 3.4 αποτυπώνει την κατάσταση κατάληψης του

ραδιοφάσματος που αντιστοιχεί στα ανιχνευμένα δεδομένα τιμών ενέργειας του Σχήματος 3.3. Είναι εμφανές ότι η αντιστοίχιση των δεδομένων ανίχνευσης σε δύο καταστάσεις (δηλαδή ο χαρακτηρισμός κάθε φασματικού στοιχείου ως κατειλημμένο ή ελεύθερο) αποκρύπτει κρίσιμες πληροφορίες και κατά συνέπεια καθιστά ανέφικτο τον προσδιορισμό - ακόμη και εποπτικά - των φασματικών ορίων των εκάστοτε υποκείμενων πρωτευόντων καναλιών.



**Σχήμα 3.4:** Κατάσταση κατάληψης της εξετασθείσας φασματικής περιοχής εύρους ζώνης 5 MHz. Ο κάθετος άξονας έχει βαθμονομηθεί βάσει των 5000 δειγμάτων που συλλέχθηκαν σε χρονικό διάστημα περίπου 42 ωρών.

### 3.3 Σενάριο εφαρμογής

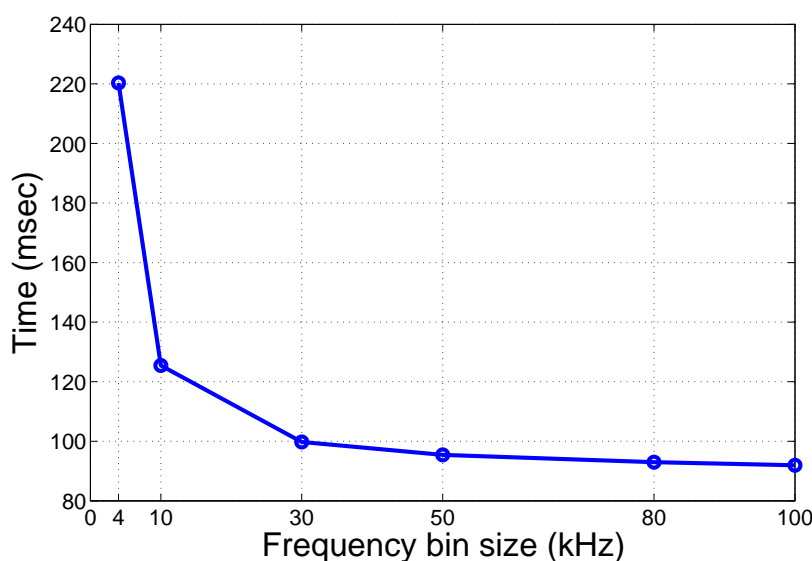
Η προτεινόμενη μεθοδολογία ανάλυσης για την εξαγωγή ιδιοτήτων συσχέτισης του ραδιοφάσματος και η εκμετάλλευσή τους για τη μετέπειτα ομαδοποίηση των φασματικών στοιχείων μπορεί να εφαρμοστεί σε ποικίλα πρακτικά σενάρια. Εν προκειμένω, η παρούσα ενότητα εστιάζει στη βελτίωση πρακτικών μεθοδολογιών ανίχνευσης βασισμένων στην τεχνική EDSS και έχει ως στόχο την αύξηση του αριθμού και του μεγέθους των ανιχνευόμενων φασματικών οπών λαμβάνοντας υπόψη την αντικρουόμενη σχέση μεταξύ ακρίβειας και ταχύτητας ανίχνευσης. Η επίτευξη ενός τέτοιου στόχου δύναται να συνεισφέρει, στην πράξη, στην αύξηση της φασματικής χρησιμοποίησης μέσω της αποδοτικό-

τερης διαχείρισης του ραδιοφάσματος και επακόλουθα σε υψηλότερη ποιότητα υπηρεσίας για εφαρμογές δευτερευόντων χρηστών.

Όπως εξηγήθηκε στην ενότητα 2.2.1, η τεχνική EDSS βασίζεται στον εντοπισμό της ενέργειας σημάτων μέσω μιας ακολουθιακής και εξαντλητικής εξέτασης διαδοχικών φασματικών στοιχείων. Για την αποφυγή σφαλμάτων κατά τη διαδικασία μετρήσεων και την ενίσχυση της διακριτικής ικανότητας της φασματικής επαίσθησης, το μέγεθος των φασματικών στοιχείων οφείλει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο [29]. Η συγκεκριμένη, ωστόσο, απαίτηση επιβραδύνει αναπόφευκτα τη συνολική διαδικασία ανίχνευσης όπως αποτυπώνεται στο Σχήμα 3.5. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι μειώνοντας το μέγεθος των φασματικών στοιχείων η διάρκεια σάρωσης αυξάνεται σημαντικά, δημιουργώντας πρακτικά εμπόδια εφαρμογής σε περιπτώσεις ανίχνευσης φάσματος ευρείας ζώνης. Από την άλλη πλευρά, αν και η επιλογή μεγαλύτερων φασματικών στοιχείων επιταχύνει τη διαδικασία ανίχνευσης δύναται να επηρεάσει σημαντικά την ποιότητα των αποτελεσμάτων υπερεκτιμώντας τη χρησιμοποίηση του ραδιοφάσματος. Για παράδειγμα, ένα φασματικό στοιχείο μεγάλου μεγέθους το οποίο περιλαμβάνει την εκπομπή ενός στενής ζώνης πρωτεύοντος σήματος θα χαρακτηριστεί ως κατειλημμένο (δεδομένου ότι η ανιχνευμένη τιμή ενέργειας ξεπερνά ένα προκαθορισμένο κατώφλι  $\gamma$ ) ακόμη και αν παραμένει ελεύθερο στο μεγαλύτερο κομμάτι της περιοχής συχνοτήτων του.

Για την εξισορρόπηση των προαναφερθέντων συγκρουόμενων στόχων ταχύτητας και ακρίβειας, διάφορες πρακτικές προσεγγίσεις έχουν προταθεί στη σύγχρονη βιβλιογραφία. Ως δημοφιλέστερες εμφανίζονται οι προσεγγίσεις βασισμένες στην *αδρομερή-λεπτομερή ανίχνευση* (Coarse-fine sensing) [59, 60, 61]. Παρότι ποικίλες παραλλαγές έχουν προταθεί έως σήμερα, χαρακτηριστικό τους στοιχείο αποτελεί η λειτουργία τους σε δυο διακριτές φάσεις. Αναλυτικότερα, σε πρώτη φάση πραγματοποιείται αδρομερής ανίχνευση του φάσματος, δηλαδή υιοθετούνται μεγάλου μεγέθους φασματικά στοιχεία, με σκοπό την ταχεία ανίχνευση φασματικών περιοχών με ισχυρές ενδείξεις μη χρησιμοποίησής τους από πρωτεύοντες χρήστες. Εν συνεχεία, μια δεύτερη φάση λεπτομερούς ανίχνευσης, π.χ. μέσω της χρήσης μικρών φασματικών στοιχείων, λαμβάνει χώρα αποκλειστικά και μόνο για τις φασματικές περιοχές οι οποίες χαρακτηρίστηκαν ελεύθερες κατά την πρώτη φάση ανίχνευσης. Με τον τρόπο αυτό εκτιμάται η κατάσταση των επιλεγμένων φασματικών περιοχών με μεγαλύτερη ακρίβεια χωρίς ωστόσο να διενεργείται η χρονοβόρα διαδικασία



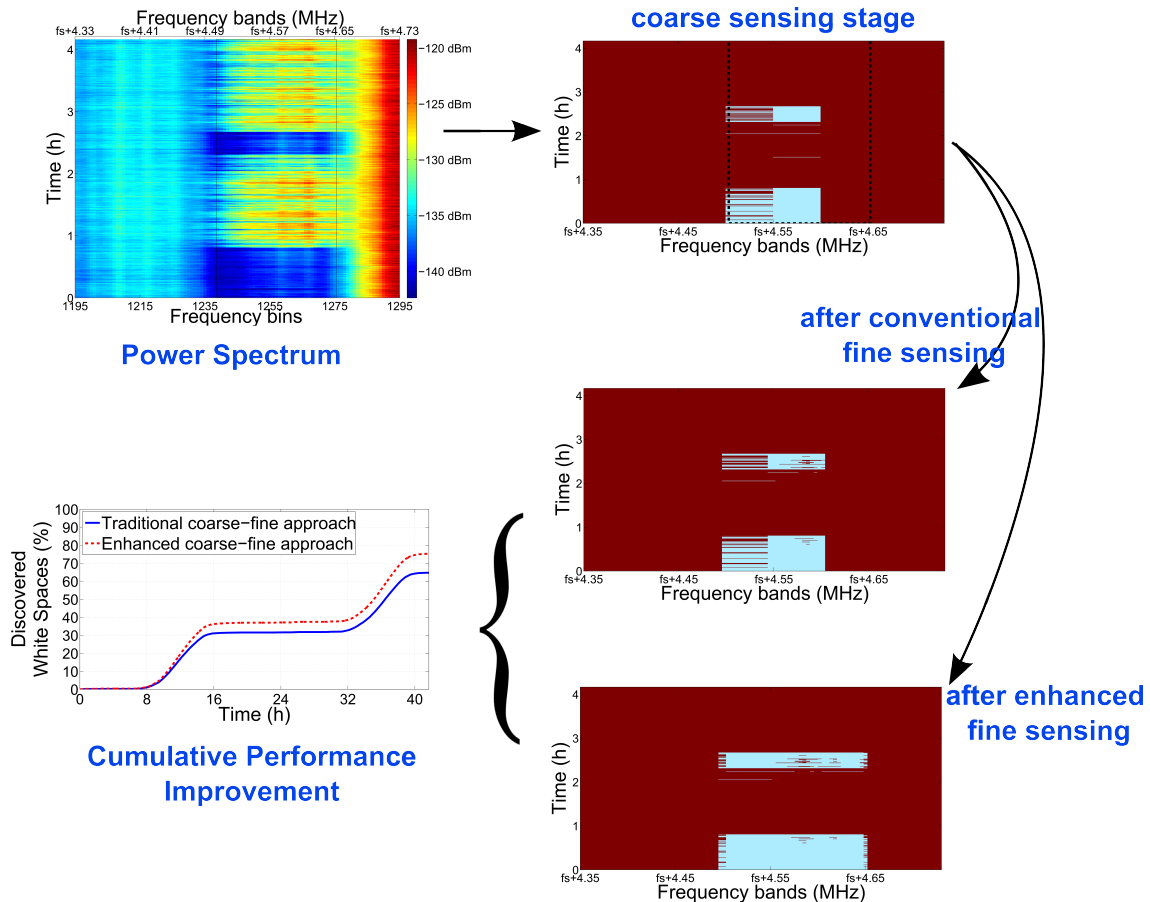


**Σχήμα 3.5:** Διάρκεια σάρωσης σε σχέση με το μέγεθος των φασματικών στοιχείων (εξετάζοντας φασματική περιοχή εύρους ζώνης 50MHz και χρησιμοποιώντας την αρχιτεκτονική ανίχνευσης της ενότητας 2.2.1).

λεπτομερούς ανίχνευσης σε όλο το εύρος του εξεταζόμενου φάσματος.

Η παραχθείσα γνώση των συνεκτικών ομάδων φασματικών στοιχείων δύναται να συνεισφέρει άμεσα στην περαιτέρω βελτίωση των επιδόσεων των ανωτέρω προσεγγίσεων μέσω της ακόλουθης προτεινόμενης τροποποίησης. Εάν ένα φασματικό στοιχείο ανιχνεύεται ως ελεύθερο κατά τη πρώτη φάση αδρομερούς ανίχνευσης και επιπλέον ανήκει ή καλύπτει μέρος κάποιας υποζώνης η οποία έχει συναχθεί ως συνεκτική από την προτεινόμενη μεθοδολογία της ενότητας 3.2, τότε η επόμενη φάση λεπτομερούς ανίχνευσης πραγματοποιείται για όλο το εύρος της αντίστοιχης υποζώνης. Δεδομένου ότι η συνεκτική υποζώνη αντιστοιχεί σε ένα μοναδικό πρωτεύον κανάλι αναμένεται ότι ολόκληρη η αντίστοιχη φασματική περιοχή θα βρεθεί πιθανώς ελεύθερη.

Για την πειραματική επαλήθευση των οφελών της προτεινόμενης τροποποίησης επικεντρωνόμαστε στη φασματική περιοχή των 5MHz της ενότητας 3.2.2 για την οποία έχουν ήδη εντοπισθεί συνεκτικές φασματικές υποζώνες με κριτήριο το βαθμό συσχέτισης (Σχήμα 3.3). Το Σχήμα 3.6 συγκρίνει την επίδοση της συμβατικής προσέγγισης αδρομερούς-λεπτομερούς ανίχνευσης με την προτεινόμενη τροποποιημένη προσέγγιση που εκμεταλλεύεται την αποκτούμενη γνώση συσχέτισης όπως προέκυψε από στατιστική ανάλυση προηγούμενων παρατηρήσεων. Στην πάνω αριστερά εικόνα τους Σχήματος 3.6



**Σχήμα 3.6:** Βελτίωση επίδοσης τεχνικών αδρομερούς-λεπτομερούς ανίχνευσης εφαρμόζοντας τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μελέτης.

αποτυπώνεται η μετρούμενη ενέργεια σήματος, όπου για εποπτικούς λόγους εστιάζεται ένα κομμάτι  $400\text{kHz}$  του εξεταζόμενου φάσματος για διάρκεια 4 ωρών. Με διακεκομμένες γραμμές απεικονίζονται τα όρια της φασματικής περιοχής η οποία έχει χαρακτηριστεί ως συνεκτική μέσω της ανάλυσης των ιδιοτήτων συσχέτισης προηγούμενων μετρήσεων. Αρχικά εφαρμόζεται η πρώτη φάση αδρομερούς ανίχνευσης με μέγεθος φασματικού στοιχείου ίσο με  $50\text{kHz}$  με αποτελέσματα κατάληψης φάσματος όπως παρουσιάζονται στην πάνω δεξιά εικόνα. Εν συνέχεια, η φάση λεπτομερούς ανίχνευσης (με μέγεθος φασματικού στοιχείου ίσο με  $4.02\text{kHz}$ ) πραγματοποιείται με βάση τόσο τη συμβατική όσο και τη νέα προτεινόμενη μεθοδολογία. Όπως γίνεται εμφανές η εκμετάλλευση των ιδιοτήτων συσχέτισης οδηγεί στην ανακάλυψη μεγαλύτερων φασματικών κενών συνεισφέροντας σε λιγότερες χαμένες ευκαιρίες μετάδοσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι φασματικές οπές μεγαλύτερου μεγέθους αποκτούν ιδιαίτερη σημασία κατά την πρακτική εφαρμογή των δευτερογενών υπηρεσιών (κυρίως για εφαρμογές που χαρακτηρίζονται από υψηλές

απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας). Τέλος, το Σχήμα 3.6 παρουσιάζει στην κάτω αριστερά εικόνα το συνολικό ποσό ανιχνευμένων φασματικών οπών για όλη τη διάρκεια των 42 ωρών συγκρίνοντας τη συνολική επίδοση των δυο μεθοδολογιών όταν εφαρμόζονται σε ολόκληρη την εξεταζόμενη φασματική περιοχή εύρους ζώνης  $5MHz$ . Έτσι, με τον τρόπο αυτό αποδεικνύεται πειραματικά ότι η προτεινόμενη τροποποίηση υπερτερεί και δύναται να ενισχύσει συμβατικές μεθοδολογίες αδρομερούς-λεπτομερούς ανίχνευσης μέσω της εκμετάλλευσης των εγγενών ιδιοτήτων συσχέτισης του ραδιοφάσματος.

### 3.4 Συμπεράσματα και δυνατές επεκτάσεις

Η ανάλυση πραγματικών δεδομένων μέτρησης του ραδιοφάσματος και η αξιοποίηση των εξαχθέντων συμπερασμάτων με σκοπό τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των δευτερευόντων χρηστών οφείλει να αποτελεί ύψιστη προτεραιότητα στην έρευνα των δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας. Στην ουσία, συνιστά αναπόσπαστο κομμάτι του γνωσιακού κύκλου, όπως περιγράφεται στο Σχήμα 2.1, όπου η παρακολούθηση (monitoring) του ραδιοφάσματος και η ανάλυση (analysis) των συλλεχθέντων δεδομένων συνάδουν στη μάθηση (learning) πολύτιμων πληροφοριών που δύναται να αξιοποιηθούν κατά τη σχεδίαση και εκτέλεση των λοιπών λειτουργικών μονάδων μιας συσκευής γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας.

Το παρόν κεφάλαιο εστίασε στην περιγραφή μιας μεθοδολογίας ανάλυσης για την εξαγωγή στατιστικών ιδιοτήτων συσχέτισης των φασματικών στοιχείων βάσει των τιμών ενέργειάς τους. Άμεση συνεισφορά αποτελεί η συμπλήρωση και βελτίωση των προσεγγίσεων που βασίζονται στη δημοφιλή τεχνική φασματικής ανίχνευσης EDSS, π.χ. προσεγγίσεων αδρομερούς-λεπτομερούς ανίχνευσης, σύμφωνα με την οποία τα φασματικά στοιχεία συνιστούν ανεξάρτητα δομικά κομμάτια του ραδιοφάσματος. Όπως περιγράφηκε αναλυτικά και επαληθεύτηκε πειραματικά στις προηγούμενες ενότητες, η στατιστική επεξεργασία των δεδομένων μέτρησης, και συγκεκριμένα οι ιδιότητες συσχέτισης στη διάσταση της συχνότητας, δύναται να συμβάλλουν σημαντικά στη μάθηση του περιβάλλοντος ραδιοσυχνοτήτων και στην αξιοποίηση - σε πρακτικά σενάρια εφαρμογής - της αποκτηθείσας επιπρόσθετης γνώσης που προκύπτει μέσω της ομαδοποίησης φασματικών στοιχείων.

Έμμεσα, επιπλέον, η αναγνώριση φασματικών περιοχών που χαρακτηρίζονται από συ-

νεκτική συμπεριφορά κατάληψης μπορεί να βοηθήσει στη διαδικασία επιλογής καναλιού εκπομπής για έναν δευτερεύον χρήστη. Τονίζεται ότι εξαιτίας του κόστους αναδιάρθρωσης των παραμέτρων λειτουργίας των δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας [62, 63], η αποφυγή φασματικών περιοχών με έντονη μεταβλητότητα στη δραστηριότητα των πρωτεύοντων χρηστών συμβάλλει στην αποδοτικότερη λειτουργία του συνολικού δικτύου. Έτσι, λοιπόν, η ανακάλυψη και χρησιμοποίηση ομάδων φασματικών στοιχείων που καλύπτουν τη λειτουργία ενός μοναδικού πρωτεύοντος καναλιού, σε σύγκριση με την τυχαία επιλογή μιας φασματικής περιοχής που δύναται να καλύπτει μέρος περισσότερων πρωτεύοντων καναλιών, οδηγεί στη μείωση της συχνότητας αλλαγών στην κατάσταση κατάληψης της εν λόγω φασματικής περιοχής και επομένως, διασφαλίζεται έμμεσα χαμηλότερο κόστος αναδιάρθρωσης. Για τον ίδιο λόγο, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.1, η ομαδοποίηση των φασματικών στοιχείων με κριτήριο τις εντοπισμένες ιδιότητες συσχέτισης καθιστά επίσης εφικτή την οριοθέτηση συνεκτικών φασματικών περιοχών που δύναται στην πράξη να οριστούν ως υποψήφια δευτερεύοντα κανάλια.

Μέσω της ανάλυσης πραγματικών δεδομένων η προκείμενη μελέτη συνέβαλε στην εξαγωγή πολύτιμων συμπερασμάτων όσον αφορά τις υποκείμενες ιδιότητες συσχέτισης του ραδιοφάσματος δίνοντας, παράλληλα, κίνητρο για την έρευνα περισσότερων "κρυμμένων" στατιστικών ιδιοτήτων του. Επιπλέον, η αποτύπωση της πραγματικής εικόνας του ραδιοφάσματος μέσω των επισκοπήσεων κατάληψης φάσματος και η μετέπειτα επεξεργασία των δεδομένων με την παρουσίαση πραγματικών στατιστικών παραμέτρων δύναται να συμβάλει στη χρησιμοποίηση των εξαχθέντων πραγματικών τιμών σε θεωρητικά μοντέλα που στηρίζονται στις ιδιότητες συσχέτισης, στην επαλήθευση θεωρητικών συμπερασμάτων, ή ακόμη στη δημιουργία νέων θεωρητικών ερευνητικών εργασιών. Για παράδειγμα, μια πιθανή θεωρητική προέκταση των συμπερασμάτων της πραγματοποιηθείσας μελέτης αποτελεί η αξιοποίηση των αλληλεξαρτήσεων των γειτονικών φασματικών στοιχείων για την εξάλειψη αβεβαιοτήτων που υπεισέρχονται κατά τη διαδικασία απόφασης κατάληψης ενός φασματικού στοιχείου, μέσω μετεπεξεργασίας και σε αναλογία με τεχνικές ανάλυσης εικόνας που στοχεύουν στον καθαρισμό μιας θορυβώδους εικόνας βάσει των χωρικών αλληλεξαρτήσεων γειτονικών εικονοστοιχείων [64].

## **Κεφάλαιο 4**

# **Μοντελοποίηση και Διαστρωματική**

# **Σχεδίαση Κατανεμημένων**

# **Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας**

Τα εγγενή χαρακτηριστικά των δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας, όπως η ενσωματωμένη ευφυΐα και η συνεχής αλληλεπίδραση με το περιβάλλον, επιτρέπουν την εφαρμογή τους σε απαιτητικά δικτυακά σενάρια τα οποία δεν προϋποθέτουν ιεραρχική δομή λειτουργίας και απαραίτητη συνύπαρξη υπάρχουσας επιπρόσθετης δικτυακής υποδομής. Η κατανεμημένη λειτουργία τους συνάδει με το όραμα για αυτόνομα κατανεμημένα δίκτυα με ευφυΐα στα άκρα που προσφέρουν ευελιξία εφαρμογής, επεκτασιμότητα, σύνθεση πολύπλοκων τοπολογιών (π.χ. πολυβηματικά ασύρματα δίκτυα αυθαίρετης τοπολογίας) και μικρό κόστος επενδύσεων σε αναγκαίες δικτυακές υποδομές. Στο τρέχον κεφάλαιο παρουσιάζεται η μοντελοποίηση και το προτεινόμενο πλαίσιο διαστρωματικής σχεδίασης κατανεμημένων δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας λαμβάνοντας υπόψη τις υπάρχουσες χωρικές και χρονικές αλληλεξαρτήσεις.

### **4.1 Κίνητρα, συνεισφορά και χαρακτηριστικά της προτεινόμενης προσέγγισης**

Η αύξηση της φασματικής χρησιμοποίησης με παράλληλη διασφάλιση της ανεμπόδιστης λειτουργίας των πρωτεύοντων χρηστών αποτελεί θεμελιώδες ζητούμενο στη σχε-

δίαση μηχανισμών για εφαρμογή σε δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας. Ο μερισμός φάσματος μεταξύ πρωτεύοντων και δευτερευόντων συστημάτων συνιστά το τυπικό πρόβλημα μελέτης στη σχετική βιβλιογραφία. Ωστόσο, η αποτελεσματική και βιώσιμη λειτουργία των δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας απαιτεί επιπρόσθετα τον αποδοτικό μερισμό φάσματος μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών, γεγονός που εισάγει ιδιαίτερες προκλήσεις εξαιτίας της χρονικά και χωρικά μεταβαλλόμενης φύσης των φασματικών πόρων από τη σκοπιά του δευτερεύοντος χρήστη. Επιπλέον, το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής φασματικών πόρων σε κόμβους γνωσιακών ραδιοεπικοινωνιών γίνεται ακόμη πιο απαιτητικό, καθώς είναι άρρηκτα συζευγμένο με άλλα προβλήματα, όπως ο χρονοπρογραμματισμός της πρόσβασης στο μέσο και η βελτίωση των διαδρομών δρομολόγησης, τα οποία εν γένει ανήκουν σε διαφορετικά στρώματα των παραδοσιακών αρχιτεκτονικών πρωτοκόλλων (π.χ. TCP/IP στοίβα πρωτοκόλλου).

Απαντώντας στις ανωτέρω προκλήσεις η προτεινόμενη προσέγγιση λαμβάνει ενδογενώς υπόψη τις χωρικές αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών, φροντίζει για την αποτελεσματική αξιοποίηση των χωρικά και χρονικά μεταβαλλόμενων ευκαιριών μετάδοσης και παρέχει ένα ευέλικτο πλαίσιο διαστρωματικής σχεδίασης πρωτοκόλλων. Μέσω της ανταλλαγής τοπικών πληροφοριών μεταξύ γειτονικών κόμβων συνεισφέρει στην καθολική βέλτιστη λειτουργία του δευτερεύοντος δικτύου, ενώ μέσω της εκμετάλλευσης των αλληλεξαρτήσεων μεταξύ των παραδοσιακών στρωμάτων (φυσικό στρώμα, στρώμα ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (MAC - Media Access Control) και στρώμα δικτύου) συμβάλλει στη βελτιστοποιημένη λειτουργία της στοίβας πρωτοκόλλων.

Η παρούσα εργασία δεν περιορίζει τον τρόπο υλοποίησης της διαστρωματικής αρχιτεκτονικής [43]. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη διατυπωμένες επιφυλάξεις της σχετικής βιβλιογραφίας [47], όπως αναφέρθηκαν στην ενότητα 2.3, διατηρεί την έννοια των ξεχωριστών στρωμάτων μιας στοίβας πρωτοκόλλων, εντοπίζει την ανάγκη συντονισμού τους και συνεισφέρει στο σχετικό πεδίο έρευνας προτείνοντας ένα καινοτόμο πλαίσιο σχεδίασης διαστρωματικών λύσεων. Το προτεινόμενο πλαίσιο βασίζεται στην εισαγωγή ενός κάθετου στρώματος ελέγχου στην παραδοσιακή αρχιτεκτονική πρωτοκόλλων, το οποίο διαφέρει από την ιδέα της κοινής βάσης δεδομένων με πρόσβαση από όλα τα στρώματα [43] και επιτρέπει τη μελέτη και αξιοποίηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των οριζόντιων στρωμάτων μέσω της εισαγωγής αναλυτικών μαθηματικών μοντελοποιήσεων και

προηγμένων μεθοδολογιών ελέγχου.

Κύριο χαρακτηριστικό της προτεινόμενης προσέγγισης αποτελεί η μοντελοποίηση του δευτερεύοντος δικτύου μέσω της θεωρίας των τυχαίων πεδίων Markov (MRFs - Markov Random Fields), η οποία επιτρέπει τη μαθηματική αναπαράσταση των χωρικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ των γειτονικών χρηστών και εν συνεχεία την ανάλυση και σχεδίαση κατανεμημένων μηχανισμών. Ως βασικό εργαλείο επίτευξης ενοποιημένων διαστρωματικών λύσεων, λαμβάνοντας υπόψη χαρακτηριστικά και στόχους διαφορετικών στρωμάτων της στοίβας πρωτοκόλλων, χρησιμοποιούνται οι συναρτήσεις δυναμικού. Τέλος, πυρήνα και μηχανή επίλυσης της προτεινόμενης σχεδίασης συνιστά η μέθοδος *δειγματοληψίας κατά Gibbs* (Gibbs Sampling) σε συνδυασμό με ένα πρόγραμμα *προσομοιωμένης ανόπτησης* (simulated annealing) που επιτρέπει τη λήψη συλλογικών, αλλά κατανεμημένων, αποφάσεων από τους δευτερεύοντες χρήστες για την κατάλληλη προσαρμογή του δικτύου στις εκάστοτε επικρατούσες συνθήκες και τη σύγκλιση σε βέλτιστες καταστάσεις λειτουργίας.

## 4.2 Θεωρητικό υπόβαθρο και σχετική βιβλιογραφία

Θεμελιώδες στοιχείο της προτεινόμενης προσέγγισης αποτελεί η αναγνώριση και η άμεση συμπερίληψη των υφιστάμενων χωρικών αλληλεξαρτήσεων μεταξύ των γειτονικών δευτερευόντων χρηστών κατά τη φάση μοντελοποίησης και σχεδίασης του εξεταζόμενου δικτύου. Από τη σκοπιά των δευτερευόντων χρηστών, οι εν λόγω εξαρτήσεις οφείλονται στο κοινό διαμοιραζόμενο μέσο επικοινωνίας και στις ανά σημείο μεταβαλλόμενες συνθήκες περιβάλλοντος που είτε αποδίδονται στις χωρικά μεταβαλλόμενες ευκαιρίες μετάδοσης (δηλαδή, στην εμφάνιση των φασματικών οπών), είτε στην εν γένει ανομοιόμορφη τοπολογία του δευτερεύοντος δικτύου (π.χ. διαφορετικός αριθμός γειτονικών κόμβων). Επακόλουθα, μέσω των χωρικών εξαρτήσεων διαμορφώνεται η επίδοση του συνολικού δικτύου, καθώς ενδεικτικά η απόφαση ενός χρήστη για χρησιμοποίηση ενός συγκεκριμένου καναλιού εκπομπής επηρεάζει τις αντίστοιχες αποφάσεις των ομότιμων γειτονικών χρηστών.

Για τη συμπερίληψη των χωρικών εξαρτήσεων κατά τη μοντελοποίηση και τη σχεδίαση ενός δικτύου γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας προτείνεται η εφαρμογή της θεωρίας των τυχαίων πεδίων Markov (MRF - Markov Random Field), η οποία εμφανίστηκε αρχικά στον κλάδο της στατιστικής φυσικής [65]. Συγκεκριμένα, η ιδέα των τυχαίων πεδίων

Markov προέρχεται από την προσπάθεια του Γερμανού φυσικού Ernst Ising να περιγράψει πιθανοτικά εμπειρικά παρατηρούμενα γεγονότα σε φερρομαγνητικά υλικά μέσω ενός πολύ ειδικού μοντέλου συστήματος (το οποίο έλαβε το όνομά του, δηλαδή μοντέλο Ising). Βάσει του μοντέλου Ising μελετάται μια σειρά  $n$  σημείων σε τοπολογία γραμμής, όπου κάθε σημείο αντιπροσωπεύει ένα δίπολο με συγκεκριμένη κατάσταση, π.χ. προσανατολισμό, για κάθε χρονική στιγμή. Θεωρώντας ως  $\omega \in \Omega$  τη στιγμιαία διάρθρωση του συστήματος, δηλαδή το διάλυμα που περιγράφει τις καταστάσεις όλων των σημείων, στόχος αποτελεί η εύρεση ενός πιθανοτικού μέτρου  $P$  στο χώρο  $\Omega$  (τυχαίο πεδίο) έτσι ώστε  $P(\omega)$  να εκφράζει την πιθανότητα εμφάνισης της διάρθρωσης  $\omega$  στο εξεταζόμενο σύστημα.

Η μελέτη του ανωτέρω μοντέλου τοπολογίας γραμμής μπορεί να γενικευτεί σε οποιοδήποτε γράφο σημείων όπου σε κάθε σημείο του γράφου εκχωρείται μια ετικέτα (κατάσταση σημείου), ενώ οι ακμές του γράφου ορίζουν τη γειτονιά κάθε σημείου. Το πιθανοτικό μέτρο που εκφράζει την πιθανότητα εμφάνισης μιας συγκεκριμένης διάρθρωσης συστήματος ονομάζεται τυχαίο πεδίο Markov εφόσον η κατάσταση κάθε σημείου εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από τις καταστάσεις των γειτονικών του σημείων. Με τον τρόπο αυτό δύναται να εκφραστούν οι χωρικές εξαρτήσεις των εξεταζόμενων σημείων σε αναλογία με τις Μαρκοβιανές αλυσίδες που περιγράφουν αντίστοιχες χρονικές εξαρτήσεις. Αναλυτικότερα, όπως είναι γνωστό μια στοχαστική διαδικασία εμφανίζει την ιδιότητα Markov στο χρόνο όταν η κατάστασή της σε μια οποιαδήποτε χρονική στιγμή  $t$  δεδομένων όλων των χρονικά προηγούμενων καταστάσεων εξαρτάται μόνο από την κατάσταση της αμέσως προηγούμενης χρονικής στιγμής  $t - 1$ . Ο ανωτέρω ορισμός της ιδιότητας Markov στερείται συμμετρίας στο πεδίο του χρόνου και για την ευκολότερη αναγωγή του στο παράδειγμα του χώρου μπορεί να διατυπωθεί ως εξής: η πιθανότητα ενός συγκεκριμένου συμβάντος τη χρονική στιγμή  $t$  δεδομένων όλων των προηγούμενων (ιστορικών) και όλων των επόμενων (μελλοντικών) συμβάντων εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από τα συμβάντα των γειτονικών χρονικών στιγμών  $t - 1$  και  $t + 1$ . Μπορεί να γίνει, επομένως, αντιληπτό ότι η θεωρία των τυχαίων πεδίων Markov περιγράφει μια γενίκευση της ιδιότητας Markov στο χώρο.

Για την περιγραφή ενός τυχαίου πεδίου Markov μέσω της αναπαράστασής του ως τυχαίο πεδίο Gibbs (GRFs - Gibbs Random Fields), σε κάθε διαφορετική διάρθρωση  $\omega$  του συστήματος εκχωρείται μια συγκεκριμένη τιμή μέσω μιας ειδικής συνάρτησης, η οποία



καλείται *συνάρτηση ενέργειας* κυρίως εξαιτίας της πρωταρχικής εφαρμογής των MRFs στο πεδίο της στατιστικής φυσικής. Επιπρόσθετα, γενικεύοντας την έννοια της ενέργειας ορίζονται οι *συναρτήσεις δυναμικού* (potential functions) οι οποίες αναφέρονται σε συγκεκριμένες υπο-διαρθρώσεις  $\omega_A$  (π.χ. στη κατάσταση ενός μεμονωμένου σημείου, στις καταστάσεις ενός ζεύγους γειτονικών σημείων, κλπ.) μιας διάρθρωσης  $\omega$ , όπου  $A$  ένα υποσύνολο σημείων. Ως γνωστόν, στην κλασική φυσική και ειδικότερα στον τομέα του ηλεκτρομαγνητισμού ως συνάρτηση δυναμικού ορίζεται μια βαθμωτή συνάρτηση θέσης της οποίας η τιμή σχετίζεται με το έργο ανά μονάδα φορτίου που απαιτείται για τη μετακίνηση ενός θετικού φορτίου από το άπειρο ως το αντίστοιχο σημείο θέσης υπό το υφιστάμενο ηλεκτρικό πεδίο. Ομοίως, αλλά γενικεύοντας τον ορισμό της, η συνάρτηση δυναμικού στη θεωρία των τυχαίων πεδίων Markov αποτελεί στην ουσία μια βαθμωτή συνάρτηση της κατάστασης ενός σημείου ή της διάρθρωσης ενός συνόλου σημείων, ή διαφορετικά, το δυναμικό περιγράφει τον τρόπο εκχώρησης μιας βαθμωτής τιμής σε ένα υποσύνολο σημείων με συγκεκριμένες καταστάσεις. Περισσότερες και αναλυτικότερες πληροφορίες για τα τυχαία πεδία Markov, καθώς και τη σχέση των τυχαίων πεδίων Markov (MRFs - Markov Random Fields) με τα τυχαία πεδία Gibbs (GRFs - Gibbs Random Fields), παρέχονται στο Παράρτημα Α'.

Οι προσπάθειες βελτιστοποίησης συστημάτων που μοντελοποιούνται μέσω της θεωρίας των τυχαίων πεδίων Markov οδηγούν συχνά στην επίλυση ενός προβλήματος ελαχιστοποίησης ενέργειας. Οι περιπτώσεις μελέτης του καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων σε διαφορετικούς επιστημονικούς κλάδους (όπως στην ανάλυση εικόνας, στη στατιστική φυσική, στη ρομποτική, κλπ.) και οι αλγόριθμοι επίλυσής του μπορούν να διακριθούν σε ντετερμινιστικές, π.χ. [66], και μη ντετερμινιστικές (στοχαστικές), π.χ. [64], προσεγγίσεις. Στην παρούσα εργασία επικεντρωνόμαστε σε μια συγκεκριμένη μέθοδο στοχαστικής χαλάρωσης που αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως μέθοδος δειγματοληψίας βάσει της Gibbs κατανομής (*δειγματοληψία κατά Gibbs - Gibbs Sampling*). Έχει αποδειχθεί [64] ότι η ανωτέρω κατανεμημένη μέθοδος σε συνδυασμό με ένα κατάλληλο λογαριθμικό πρόγραμμα ανόπτησης δύναται να αξιοποιήσει τις υφιστάμενες χωρικές εξαρτήσεις και θεωρητικά να συγκλίνει σε διαρθρώσεις που ελαχιστοποιούν την ενέργεια συστήματος. Περισσότερες πληροφορίες για τον τρόπο εφαρμογής της μεθόδου Gibbs Sampling με σκοπό τη βελτιστοποιημένη κατανομή φασματικών πόρων σε δίκτυα γνωσιακής ρα-

διοεπικοινωνίας παρέχονται στην ενότητα 4.4.2.

Το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής φασματικών πόρων σε κόμβους γνωσιακών ραδιοεπικοινωνιών έχει μελετηθεί εκτενώς στη σύγχρονη βιβλιογραφία δίνοντας, ωστόσο, μεγαλύτερη έμφαση στην αλληλεπίδραση μεταξύ των πρωτεύοντων και των δευτερεύοντων συστημάτων και λιγότερη στη σχεδίαση αποτελεσματικών δικτύων δυναμικής φασματικής πρόσβασης με ευφυή μερισμό φάσματος μεταξύ των ιδίων των δευτερεύοντων χρηστών [67]. Για τη συμπερίληψη και αντιμετώπιση του τελευταίου προβλήματος, δηλαδή του αποδοτικού μερισμού χωροχρονικών μεταβαλλόμενων φασματικών πόρων σε δευτερογενείς κόμβους με σκοπό τη βελτιστοποίηση των επιδόσεων ενός δευτερεύοντος δικτύου, είναι ανάγκη να εξετασθούν ευέλικτοι και προσαρμόσιμοι μηχανισμοί κατανομής ραδιοπόρων (RRA - Radio Resource Allocation), οι οποίοι ενημερώνονται για την κατάσταση του ραδιοφάσματος και λαμβάνουν υπόψη τις χρονικές και χωρικές μεταβολές του.

Οι μηχανισμοί κατανομής ραδιοπόρων έχουν μελετηθεί εκτενώς σε κυβελωτά δίκτυα, σε δίκτυα αισθητήρων και πρόσφατα σε δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας. Όμοια με το πρόβλημα εκχώρησης κώδικα σε δίκτυα πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης κώδικα (CDMA - Code Division Multiple Access), διάφορα σχήματα κατανομής καναλιών έχουν προταθεί στη σύγχρονη βιβλιογραφία βάσει προσεγγιστικών μεθοδολογιών χρωματισμού (όπου κάθε χρώμα αντιστοιχίζεται με ένα διαφορετικό κανάλι) γραφημάτων [68, 69, 70], δεδομένου ότι το πρόβλημα χρωματισμού γραφήματος ανήκει στην κατηγορία των NP-hard προβλημάτων. Συγκεκριμένα, στην εργασία [69] προτείνεται μια ευρετική μεθοδολογία χρωματισμού δύο βημάτων για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, όπου οι κόμβοι του εξεταζόμενου δικτύου οργανώνονται σε συστάδες και τρεις τύποι μηνυμάτων ελέγχου χρησιμοποιούνται για την εκχώρηση ενός μοναδικού καναλιού (χρώματος) σε κάθε κόμβο. Η πολυπλοκότητα και οι απαιτήσεις του εν λόγω προβλήματος αυξάνονται σε δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας, όπου στοχεύοντας στην ελαχιστοποίηση των χαμένων ευκαιριών μετάδοσης ένας δευτερεύον χρήστης δύναται να μεταδίδει σε πολλαπλά κανάλια μέσω της τεχνικής συνάθροισης φερουσών (carrier aggregation). Διαφορετικές RRA μεθοδολογίες έχουν εφαρμοστεί συμπεριλαμβανομένων κεντροποιημένων, όπου ένας σταθμός βάσης διαδίδει πληροφορίες εκχώρησης καναλιών σε δευτερεύοντες χρήστες, και κατανεμημένων συστημάτων, όπου για παράδειγμα στην εργασία [70] διατυπώ-

νεται ένα πρόβλημα χρωματισμού γραφήματος από λίστα (list multi-coloring problem) και προτείνονται υπο-βέλτιστοι αλγόριθμοι χρωματισμού. Επιπλέον, προσεγγίσεις ενισχυτικής μάθησης (reinforcement learning) έχουν επίσης εξεταστεί για τη δυναμική κατανομή καναλιών σε δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας. Ειδικότερα, η εργασία [71] προτείνει μια προσέγγιση βασισμένη σε ενισχυτική μάθηση σύμφωνα με την οποία ένας δευτερεύον χρήστης ανταμείβεται ή τιμωρείται μέσω μια θετικής ή αρνητικής, αντίστοιχα, σταθερής τιμής μετά από κάθε επιτυχή ή αποτυχημένη μετάδοση πακέτου έτσι ώστε να βελτιστοποιηθούν οι επόμενες αποφάσεις εκχώρησης καναλιού. Σημειώνεται ότι η εργασία [71], σε αντίθεση με την προτεινόμενη προσέγγιση του τρέχοντος κεφαλαίου, μελετά την περίπτωση ενός μοναδικού ζεύγους δευτερευόντων χρηστών, συνεπώς, αδυνατώντας να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά το μερισμό φασματικών πόρων σε πολλαπλούς δευτερεύοντες χρήστες.

Μεθοδολογίες στηριζόμενες στη θεωρία των τυχαίων πεδίων Markov έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για κατανομή πόρων σε ασύρματα δίκτυα [72, 73]. Οι συγγραφείς της εργασίας [72] επικεντρώνονται στο πρόβλημα ελέγχου ισχύος και κατανομής καναλιών σε δίκτυα αισθητήρων με σκοπό την ακριβή κατανομή καναλιών, δηλαδή ένα κανάλι ανά κόμβο, υπό την υπόθεση προκαθορισμένου αμετάβλητου αριθμού καναλιών και τακτικών (regular) τοπολογιών. Μια πιο γενική προσέγγιση που καλύπτει αυθαίρετες τοπολογίες στα πολυπλοκότερα δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας έχει προταθεί στην εργασία [73] και αποτελεί τη βάση της προτεινόμενης μοντελοποίησης και διαστρωματικής σχεδίασης του τρέχοντος κεφαλαίου.

Η βελτιστοποίηση της λειτουργίας της κλασικής στοίβας πρωτοκόλλων μέσω διαστρωματικών αρχιτεκτονικών συναντάται επίσης σε πληθώρα πρόσφατων εργασιών της σύγχρονης βιβλιογραφίας [47, 74]. Ωστόσο, βάσει του γενικού ορισμού των διαστρωματικών προσεγγίσεων ως αλγορίθμων, μεθοδολογιών ή αφαιρετικών μοντέλων που υιοθετούν αλληλεπιδράσεις μεταξύ μη γειτονικών στρωμάτων [44], η πλειονότητα των προτεινόμενων προσεγγίσεων σε δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας που αφορούν μηχανισμούς ανωτέρων επιπέδων έχουν προσδιοριστεί ως διαστρωματικές λύσεις εξαιτίας της απαραίτητης εξάρτησής τους από τα αποτελέσματα της διαδικασίας φασματικής ανίχνευσης. Στην εργασία [75] οι συγγραφείς διαπιστώνουν και τονίζουν την ανάγκη πραγματικών διαστρωματικών λύσεων σε δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας, οι οποίες οφεί-

λουν να χαρακτηρίζονται από άμεση αλληλεπίδραση και αμφίδρομη ροή πληροφοριών μεταξύ των στρωμάτων, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η αποδοτικότητα και η ευστάθεια των εκάστοτε προτεινόμενων προσεγγίσεων.

Σχετικές διαστρωματικές τεχνικές σχεδίασης δικτύων έχουν προταθεί μέσω του προτεινόμενου πλαισίου της εργασίας [76], όπου το ολικό δίκτυο μοντελοποιείται ως ένα γενικευμένο πρόβλημα μεγιστοποίησης χρησιμότητας δικτύου (NUM - Network Utility Maximization). Αν και η χρήση συναρτήσεων χρησιμότητας μέσω NUM προβλημάτων δύναται να οδηγήσει σε ολοκληρωτικές διαστρωματικές λύσεις, τα εγγενή χαρακτηριστικά του ασύρματου περιβάλλοντος και οι αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των μεταβλητών του δικτύου οδηγούν συχνά σε μη κυρτά (non-convex) προβλήματα υψηλής πολυπλοκότητας και διατυπώσεις που απαιτούν κεντρικοποιημένες λύσεις. Για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων προτείνονται ευρετικές οι οποίες ωστόσο οδηγούν σε υπο-βέλτιστες λύσεις. Για παράδειγμα, η εργασία [77] παρουσιάζει μια κατανεμημένη ευρετική για την από κοινού αντιμετώπιση των προβλημάτων δρομολόγησης και δυναμικής φασματικής πρόσβασης ώστε να μειωθεί η υπολογιστική επιβάρυνση του αρχικού κεντρικοποιημένου NUM προβλήματος. Ωστόσο, αποδεικνύεται μέσω προσομοιώσεων ότι σε ένα σχετικά μικρού μεγέθους δευτερεύον δίκτυο η επίδοση του κατανεμημένου αλγορίθμου μειώνεται στο 75% της βέλτιστης λύσης.

### 4.3 Μοντέλο συστήματος

Ας θεωρήσουμε ένα πολυβηματικό δίκτυο γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας αποτελούμενο από  $n$  δευτερεύοντες χρήστες οι οποίοι αλληλεπιδρούν δυναμικά με το περιβάλλον χωρίς κάποια κεντρική υποδομή και προσπαθούν να αξιοποιήσουν ευκαιρίες μετάδοσης στο πεδίο του χρόνου, στο πεδίο της συχνότητας και στο πεδίο του χώρου. Υποθέτουμε ένα ιεραρχικό μοντέλο μη αδειοδοτημένης φασματικής πρόσβασης υλοποιούμενο από τεχνικές επικάλυψης φάσματος (Σχήμα 2.2). Στόχος των δευτερευόντων χρηστών αποτελεί η ευκαιριακή πρόσβαση στο αδειοδοτημένο φάσμα εξασφαλίζοντας την ανεμπόδιστη λειτουργία των πρωτευόντων χρηστών και βελτιώνοντας, παράλληλα, τη χωρική επαναχρησιμοποίηση των μη κατειλημμένων φασματικών πόρων.

Κάθε δευτερεύον χρήστης μπορεί να μαθαίνει και να προσαρμόζεται στις επικρατούσες συνθήκες του φασματικού και δικτυακού περιβάλλοντός του μέσω τριών περιοχών

λειτουργίας, όπως ορίζονται από τα ακόλουθα μεγέθη:

- Η ακτίνα ανίχνευσης  $R_s$  (κόκκινος κύκλος στο Σχήμα 4.3) εντός της οποίας οι ενεργές εκπομπές πρωτεύοντων χρηστών μπορούν να εντοπισθούν και να καθορίσουν αντίστοιχα τη λίστα διαθέσιμων καναλιών για το σχετιζόμενο δευτερεύον χρήστη.
- Η ακτίνα εκπομπής (μετάδοσης)  $R_t$  (μπλε κύκλος στο Σχήμα 4.3) η οποία αναπαριστά το εύρος επικοινωνίας του δευτερεύοντος χρήστη.
- Η μέγιστη απόσταση  $R_i$  όπου ένα σήμα κατειλημμένου (busy tone) ενός δευτερεύοντος χρήστη μπορεί να ανιχνευθεί, χωρίς απαραίτητα να μπορεί να αποκωδικοποιηθεί. Η χρησιμότητα ενός σήματος κατειλημμένου εξηγείται αναλυτικότερα στη συνέχεια. Σημειώνεται, ωστόσο, ότι η ακτίνα  $R_i$  εξαρτάται άμεσα από την ισχύ εκπομπής του σήματος κατειλημμένου και επομένως, μπορεί να ρυθμιστεί κατάλληλα ώστε να καλύπτει την περιοχή παρεμβολής γύρω από τον δευτερεύοντα χρήστη, δηλαδή την περιοχή στην οποία η λειτουργία (εκπομπή σήματος) του δευτερεύοντος χρήστη μπορεί υπό προϋποθέσεις να επηρεάσει τη λειτουργία των υπόλοιπων δευτερευόντων χρηστών.

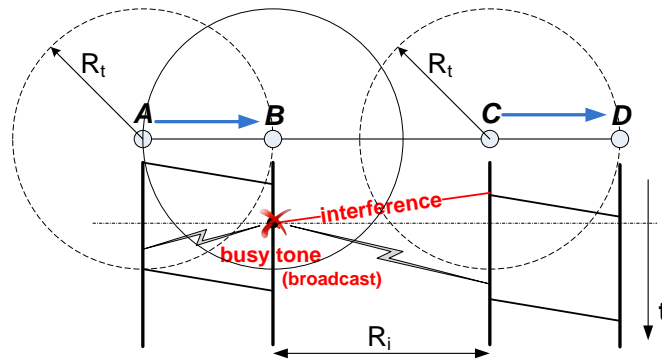
Επιπρόσθετα, κάθε δευτερεύον χρήστης είναι ικανός να ακούει σε όλα τα διαθέσιμα κανάλια, ενώ πολλαπλά κανάλια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μετάδοση από έναν κόμβο, για παράδειγμα, μέσω OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) διαμόρφωσης και συνάθροισης φερουσών (carrier aggregation) [78]. Η ισχύς μετάδοσης θεωρείται όμοια για όλους τους δευτερεύοντες χρήστες και κατ' επέκταση οι ασύρματες ζεύξεις μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών συμμετρικές.

Σε δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας η ανίχνευση μεταδόσεων (φυσική και εικονική) έχει διττό σκοπό: την αποφυγή πρόκλησης παρεμβολών σε πρωτεύοντες χρήστες, καθώς και την εξασφάλιση αποδοτικού μερισμού φάσματος μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών. Σχετικά με τη φυσική ανίχνευση, υποθέτουμε την εφαρμογή οποιασδήποτε διαθέσιμης πρότυπης τεχνικής φασματικής ανίχνευσης [35] για την ενημέρωση των δευτερευόντων χρηστών σχετικά με την τοπική κατάσταση του ραδιοφάσματος. Παράλληλα, μηνύματα ελέγχου μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών μπορούν να συμβάλλουν σε μια διαδικασία εικονικής ανίχνευσης μεταδόσεων. Συγκεκριμένα, κάθε δευτερεύον χρήστης αναμεταδίδει μέσω ενός κοινού καναλιού ελέγχου [79] τη λίστα των φερουσών (κανα-

λιών) στις οποίες σκοπεύει να μεταδώσει, καθώς και επιπρόσθετες πληροφορίες όπως αναφέρονται αναλυτικά στην ενότητα 4.4.1.1. Με τον τρόπο αυτό, οι γειτονικοί κόμβοι που λαμβάνουν τα ανωτέρω μηνύματα ενημερώνονται ώστε να απέχουν από την ταυτόχρονη μετάδοση στα συγκεκριμένα κανάλια που δύναται να οδηγήσει σε συγκρούσεις πακέτων.

Σε πραγματικές συνθήκες, ωστόσο, η πηγή παρεμβολής ενός δευτερεύοντος χρήστη μπορεί να βρίσκεται εκτός του εύρους μετάδοσης του κόμβου,  $R_t$ , γεγονός που καθιστά συχνά τον άμεσο συντονισμό μεταξύ ανταγωνιστικών δευτερευόντων χρηστών, δηλαδή των κόμβων που ανήκουν στον ίδιο τομέα συγκρούσεων, αδύνατο μέσω απλής ανταλλαγής μηνυμάτων ελέγχου. Για την αντιμετώπιση του ανωτέρω περιορισμού υποθέτουμε ότι όταν ένας δευτερεύον χρήστης (δέκτης) αδυνατεί να λάβει μηνύματα σε κάποια κανάλια λειτουργίας λόγω παρεμβολής (ανίχνευση συγκρούσεων βασιζόμενος στο SINR κριτήριο), μεταδίδει ένα *σήμα κατειλημμένου* (busy tone) στα αντίστοιχα κανάλια λειτουργώντας ως ενδιάμεσος κόμβος μεταξύ του αναμενόμενου πομπού και των πιθανών παρεμβολέων και συμβάλλει στην ενημέρωση και στον συντονισμό τους. Το Σχήμα 4.1 απεικονίζει ένα ενδεικτικό σενάριο όπου τα επικοινωνούντα ζεύγη  $A \rightarrow B$  και  $C \rightarrow D$  μεταδίδουν ταυτόχρονα στο ίδιο κανάλι, ενώ ως  $R_i$  συμβολίζεται η μέγιστη απόσταση από τον δέκτη όπου η ταυτόχρονη λειτουργία ενός δευτερεύοντος χρήστη δεν μπορεί να αγνοηθεί (πρόκληση παρεμβολών). Παρότι τα μηνύματα ελέγχου των κόμβων A και B δε μπορούν να αποκωδικοποιηθούν επιτυχώς έξω από το εύρος εκπομπής  $R_t$ , ο κόμβος C αντιλαμβάνεται την πρόκληση συγκρούσεων στο σχετικό κανάλι μέσω της ανίχνευσης των σημάτων κατειλημμένου από τους κόμβους που υποφέρουν από συγκρούσεις, π.χ. ο κόμβος B. Σημειώνεται ότι το εύρος  $R_i$  ( $R_i \geq R_t$ ) εξαρτάται από το κατώφλι ευαισθησίας των χρηστών γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας όπως και από την ισχύ εκπομπής σύμφωνα με την οποία ένας δευτερεύον χρήστης (θύμα παρεμβολής) εκπέμπει σήμα κατειλημμένου. Για τη συνέχεια θεωρούμε ότι το εξεταζόμενο μοντέλο γνωσιακών ραδιοεπικοινωνιών βασίζεται σε ευρυζωνική περιοδική φασματική ανίχνευση, όπου κάθε κόμβος ανανεώνει περιοδικά τη λίστα διαθέσιμων καναλιών. Κάθε περίοδος ανίχνευσης αναπαριστά, επίσης, το χρονικό διάστημα κατά το οποίο ανταλλάσσονται μηνύματα ελέγχου και μεταδίδονται σήματα κατειλημμένου.

Στο πλαίσιο αυτό, η θεωρία των MRFs (Παράρτημα A') αξιοποιείται προκειμένου



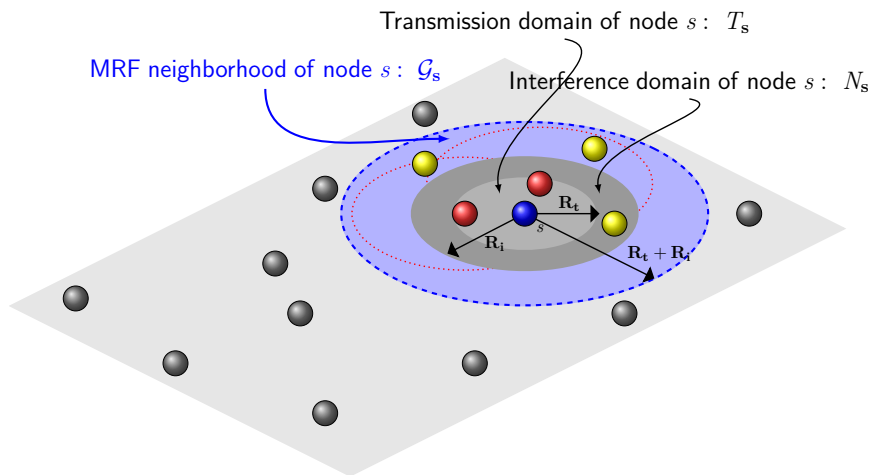
**Σχήμα 4.1:** Παράδειγμα ανίχνευσης συγκρούσεων σε κατανεμημένα δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας.

να αναλυθεί και σχεδιαστεί η διαστρωματική αρχιτεκτονική δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας. Συγκεκριμένα, κάθε δευτερεύον χρήστης αντιστοιχίζεται με ένα MRF σημείο ορίζοντας το πεπερασμένο πλήθος σημείων  $S = \{1, 2, \dots, n\}$ . Για κάθε σημείο  $s$  θεωρούμε μια τυχαία μεταβλητή  $X_s$  η οποία χαρακτηρίζει την κατάσταση του, ενώ το σύνολο των πιθανών καταστάσεων ενός σημείου συμβολίζεται ως  $\Lambda$  και άρα η τυχαία μεταβλητή  $X_s$  λαμβάνει τιμή  $x_s \in \Lambda$ . Η οικογένεια των χωρικά εξαρτώμενων τυχαίων μεταβλητών  $X = \{X_s, s \in S\}$  περιγράφει τη συνολική κατάσταση του συστήματος (εν προκειμένω του δευτερεύοντος δικτύου) σε κάθε χρονική στιγμή, ενώ μια διάρθρωση  $\omega = \{(x_1, \dots, x_s, \dots, x_n) : x_s \in \Lambda, s \in S\}$  αντιπροσωπεύει μια από τις πιθανές καταστάσεις του συστήματος. Τέλος, ο πεπερασμένος χώρος  $\Omega = \Lambda^n$  συμβολίζει το σύνολο όλων των δυνατών καταστάσεων του συστήματος.

Στην προτεινόμενη MRF μοντελοποίηση η κατάσταση κάθε κόμβου  $s$  δίνεται από τη λίστα των επιλεγμένων/εκχωρημένων καναλιών προς μετάδοση και εκφράζεται μέσω του δυαδικού διανύσματος  $\vec{u}_s = (u^{(1)} \ u^{(2)} \ \dots \ u^{(M)})^T$ , όπου  $u^{(m)} \in \Theta = \{0, 1\}$  ισούται με 1 (ή 0) αν το  $m$ -οστό κανάλι έχει (ή αντίστοιχα δεν έχει) επιλεγεί. Ως  $M$  συμβολίζεται το πλήθος των συνολικών καναλιών του εξεταζόμενου συστήματος. Κατά συνέπεια, ορίζονται ακολούθως οι διανυσματικοί χώροι  $\Lambda = \Theta^M$  με  $\dim \Lambda = M$  και  $\Lambda^n = \Theta^{n \times M}$  με  $\dim \Lambda^n = nM$ .

Για το σχεδιασμό της MRF μοντελοποίησης ορίζεται, επίσης, το σύστημα γειτονιάς  $\mathcal{G}$ , σύμφωνα με το οποίο η γειτονιά ενός κόμβου  $s$ ,  $\mathcal{G}_s$ , περιλαμβάνει κάθε δευτερεύον χρήστη που θα μπορούσε να προκαλέσει παρεμβολή σε κάποιον πιθανό δέκτη του κόμβου  $s$ , όπως

φαίνεται στο Σχήμα 4.2. Αναλυτικότερα, για την αποφυγή συγκρούσεων τα επιλεγμένα κανάλια ενός κόμβου  $s$ , τα οποία υποδηλώνονται από το διάνυσμα  $\vec{u}_s$ , εξαρτώνται από τις καταστάσεις των κόμβων  $k \in \bigcup_{j \in T_s} N_j$ .  $N_j = \{k : d_{kj} \leq R_i, k \neq j\}$  και  $T_s = \{j : d_{sj} \leq R_t, s \neq j\}$  αναπαριστούν την περιοχή (τομέα) παρεμβολής του κόμβου  $j$  και την περιοχή εκπομπής του κόμβου  $s$ , αντίστοιχα, ενώ  $d_{sj}$  συμβολίζει την πραγματική Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των κόμβων  $s$  και  $j$ . Συνεπώς, με βάση το προαναφερθέν MRF σύστημα γειτονιάς οι αποφάσεις κάθε κόμβου εξαρτώνται από τις καταστάσεις των υπόλοιπων δευτερευόντων χρηστών που βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη από  $R_t + R_i$ . Έτσι, η κατάσταση (κατανομή των διαθέσιμων καναλιών) του συνολικού δικτύου δύναται να περιγραφεί από ένα τυχαίο πεδίο Markov ορισμένο βάσει του ανωτέρω συστήματος γειτονιάς  $\mathcal{G}$ .



Σχήμα 4.2: Εφαρμοζόμενο MRF σύστημα γειτονιάς.

## 4.4 Πλαίσιο διαστρωματικής σχεδίασης και αλγόριθμος επίλυσης

Στις επόμενες υποενότητες παρουσιάζεται το προτεινόμενο πλαίσιο διαστρωματικής σχεδίασης με βάση το μοντέλο συστήματος της ενότητας 4.3, το οποίο οδηγεί στη διατύπωση και επίλυση ενός πολυκριτηριακού (multi-objective) διαστρωματικού (cross-layer) προβλήματος βελτιστοποίησης με σκοπό τον αποτελεσματικό διαμοιρασμό φασματικών πόρων μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών, τη μείωση του ανταγωνισμού των εν λόγω χρηστών για πρόσβαση στο μέσο, τη διατήρηση της συνδεσιμότητας του δευτερεύοντος



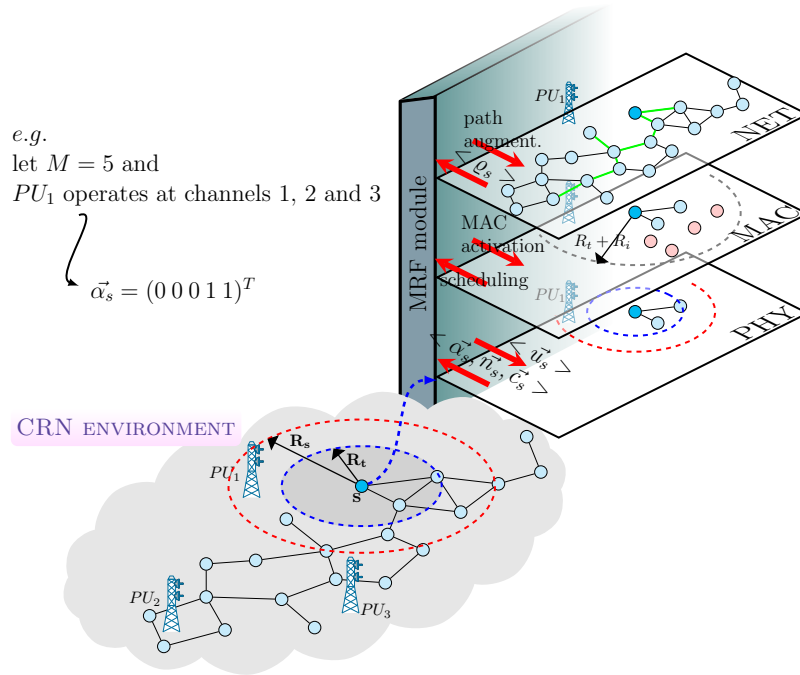
δικτύου και τη βελτίωση της ποιότητας των ενεργών μονοπατιών δρομολόγησης. Στη συνέχεια, περιγράφεται αναλυτικά η αρχιτεκτονική της προτεινόμενης σχεδίασης με έμφαση στις λειτουργίες κάθε στρώματος της στοίβας πρωτοκόλλων, ο αλγόριθμος επίλυσης και οι δυνατές βελτιώσεις του.

#### 4.4.1 Διαστρωματική σχεδίαση

Η βελτιστοποιημένη κατανομή πόρων σε κόμβους γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη λειτουργίες και παραμέτρους πολλαπλών στρωμάτων της παραδοσιακής στοίβας πρωτοκόλλων TCP/IP, οδηγεί στην ανάγκη συνδυασμένης αντιμετώπισης των σχετικών προβλημάτων μέσω διαστρωματικών προσεγγίσεων. Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.3, η χρησιμοποίηση τεχνικών διαστρωματικής σχεδίασης κρίνεται κατάλληλη για ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών, δύναται να συνεισφέρει στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους, αλλά απαιτεί την εμβριθή ανάλυση και εφαρμογή ολοκληρωμένων προσεγγίσεων έτσι ώστε οι αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των μη γειτονικών στρωμάτων να μη διαταράσσουν την ευστάθεια και ομαλή λειτουργία του δικτύου. Εν προκειμένω, η προτεινόμενη προσέγγιση διαστρωματικής σχεδίασης αξιοποιεί τα πλεονεκτήματα μιας σταθερής αρχιτεκτονικής δικτύωσης, διατηρώντας την έννοια της στοίβας πρωτοκόλλων και των ξεχωριστών στρωμάτων, ενώ εισάγει ένα επιπρόσθετο κάθετο στρώμα ελέγχου και συντονισμού των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των οριζόντιων στρωμάτων.

Το Σχήμα 4.3 απεικονίζει την προτεινόμενη αρχιτεκτονική κατανεμημένων δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας όπου δευτερεύοντες χρήστες συνυπάρχουν με πρωτεύοντες χρήστες. Το προτεινόμενο κάθετο στρώμα ελέγχου στηρίζεται στη μοντελοποίηση του δικτύου μέσω της θεωρίας των τυχαίων πεδίων Markov και συνεισφέρει, για κάθε δευτερεύον χρήστη, στην έξυπνη κατανομή καναλιών, στην επιλεκτική ενεργοποίηση σχημάτων ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (MAC) και στην επαύξηση των εκχωρημένων πόρων σύμφωνα με την κατάσταση παραμέτρων του στρώματος δικτύου.

Αναλυτικότερα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3, τα αποτελέσματα της φασματικής ανίχνευσης σε περιοχή ακτίνας  $R_s$  καθορίζουν τη λίστα διαθέσιμων/ελεύθερων καναλιών, η οποία εκφράζεται για κάθε κόμβο  $s$  μέσω του δυαδικού διανύσματος  $\vec{a}_s$  (στοιχεία με τιμές 0 ή 1 αναπαριστούν κατειλημμένα ή διαθέσιμα κανάλια, αντίστοιχα). Σημειώνεται ότι η



Σχήμα 4.3: Προτεινόμενη αρχιτεκτονική κατανομμένων δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας.

επικοινωνία μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών πραγματοποιείται αποκλειστικά μέσω κοινών διαθέσιμων καναλιών, προκειμένου να εξασφαλίζεται η διαφανής λειτουργία τους ως προς τα πρωτεύοντα συστήματα. Εκτός του διανύσματος  $\vec{\alpha}_s$  (φυσική ανίχνευση) εισάγονται επίσης οι ακόλουθες δομές με σκοπό την πλήρη συλλογή πληροφοριών δραστηριότητας των δευτερευόντων χρηστών (εικονική ανίχνευση):

- Κάθε κόμβος συλλέγει μηνύματα ελέγχου από τους υπόλοιπους δευτερεύοντες χρήστες εντός του εύρους επικοινωνίας  $R_t$  και αποθηκεύει τις πληροφορίες για τις καταστάσεις των ομότιμων κόμβων (MRF σημείων) εντός ακτίνας  $R_t$  στο διάνυσμα  $\vec{n}_s = (n^{(1)}\ n^{(2)}\ \dots\ n^{(M)})^T$ . Σημειώνεται ότι  $n^{(m)}$  ισούται με 0 αν το  $m$ -οστό κανάλι δε χρησιμοποιείται και με 1 (ή 2) αν το συγκεκριμένο κανάλι χρησιμοποιείται, δηλαδή έχει επιλεγθεί προς μετάδοση, από έναν γειτονικό χρήστη (ή περισσότερους από έναν χρήστες, αντίστοιχα).
- Τα σήματα κατειλημμένου χρησιμοποιούνται για την ειδοποίηση ενός δευτερεύοντος χρήστη σχετικά με παρεμβολή που προκαλεί εντός ακτίνας  $R_i$ . Μέσω φυσικής ανίχνευσης, κάθε δευτερεύον χρήστης,  $s$ , μπορεί να εντοπίζει σήματα κατειλημμένου στα επιλεγμένα για τον ίδιο κανάλια και να ανανεώνει μια συνάρτηση κόστους, η οποία συμβολίζεται ως  $\vec{c}_s = (c^{(1)}\ c^{(2)}\ \dots\ c^{(M)})^T$  και εκφράζει μια μετρική της

προκληθείσας παρεμβολής για κάθε κανάλι. Ως πολιτική ανανέωσης υιοθετείται μια μέθοδος εμπνευσμένη από τεχνικές ενισχυτικής μάθησης. Συγκεκριμένα, κάθε φορά που ένας κόμβος εντοπίζει ένα σήμα κατειλημμένου σε ένα επιλεγμένο κανάλι  $m$  προστίθεται μια σταθερά ως "ποινή" στο στοιχείο  $c^{(m)}$ , ενώ κατά αντιστοιχία κερδίζεται "βραβείο" για κάθε επιτυχή μετάδοση χωρίς ακολουθούμενη ανίχνευση σήματος κατειλημμένου.

#### 4.4.1.1 Φυσικό στρώμα - Κατανομή καναλιών

Το φυσικό στρώμα στα δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας επιτρέπει την ανίχνευση του ραδιοφάσματος και είναι υπεύθυνο για την αναπροσαρμογή των χαρακτηριστικών μετάδοσης κάθε κόμβου, όπως για παράδειγμα τη δυναμική κατανομή καναλιών εκπομπής. Στο πλαίσιο της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής σχεδιάζεται στην παρούσα υποενότητα μια ευέλικτη πλατφόρμα διαμοιρασμού φάσματος μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών με στόχο τη βελτίωση της χωρικής επαναχρησιμοποίησης των φασματικών πόρων, την αύξηση της φασματικής χρησιμοποίησης, την επίτευξη χαμηλής πιθανότητας συγκρούσεων πακέτων και κυρίως την άμεση αλληλεπίδραση του φυσικού στρώματος με στόχους υψηλότερων στρωμάτων μέσω του MRF δομοστοιχείου (module), όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.3.

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4.2, η αποδόμηση της MRF ενέργειας συστήματος,  $U$ , σε μια οικογένεια συναρτήσεων δυναμικού,  $V_C$ , (Παράρτημα Α') εκφράζει το γεγονός ότι οι συναρτήσεις δυναμικού αποτελούν βαθμωτές συναρτήσεις ικανές να περιγράψουν τη συνεισφορά μεμονωμένων υπο-διαρθρώσεων  $\omega_A$  στη συνολική ενέργεια του συστήματος με διάρθρωση  $\omega$ . Συγκεκριμένα για το πεδίο της στατιστικής φυσικής, αναπαριστούν τη συνεισφορά των εξωτερικών πεδίων (κλίκα ενός στοιχείου), της αλληλεπίδρασης ζευγών (κλίκα δυο σημείων), κλπ., στη συνολική ενέργεια του συστήματος. Στη συνέχεια, εξετάζεται η κλάση των *ανά ζεύγος γειτονικών συναρτήσεων δυναμικού* (pairwise, nearest-neighbor potentials) [80, 81] όπου  $V_C \equiv 0$  όταν  $C$  δεν αποτελεί κλίκα<sup>1</sup> ενός (μονοσύνολο)

<sup>1</sup>Ως κλίκα ορίζεται ένα σύνολο σημείων για τα οποία όλα τα σημεία του συνόλου είναι μεταξύ τους γείτονες, δεδομένου ενός προκαθορισμένου συστήματος γειτονιάς. Στη θεωρία γράφων ένας υπογράφος (subgraph) ονομάζεται κλίκα, ή πλήρες υπογράφος, αν κάθε ζευγάρι κορυφών του συνδέεται με ακμή.

ή δυο (διμελές σύνολο) στοιχείων. Συνεπώς, η συνάρτηση ενέργειας διατυπώνεται ως εξής

$$U(\omega) = \sum_{s \in S} V_{\{s\}}^{(1)}(x_s) + \sum_{\{s,j\} \in (S \times S), j \in \mathcal{G}_s} V_{\{s,j\}}^{(2)}(x_s, x_j) \quad (4.1)$$

Για την προτεινόμενη σχεδίαση δημιουργείται μια αντιστοίχιση μεταξύ, α) του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, το οποίο στη στατιστική φυσική και στο μοντέλο Ising [65] ωθεί τον προσανατολισμό κάθε εξεταζόμενου διπόλου ενός φερρομαγνητικού υλικού προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση για την ελαχιστοποίηση της ενέργειας συστήματος, και β) της ανάγκης/επιθυμίας για αυξημένο εύρος ζώνης και ικανοποίηση των απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας (QoS - Quality of Service), η οποία ωθεί κάθε μεμονωμένο δευτερεύον χρήστη να ζητά περισσότερους φασματικούς πόρους (κανάλια). Επομένως, η σχεδίαση των συναρτήσεων δυναμικού πρώτης τάξης,  $V^{(1)}$ , πραγματοποιείται με βασικό στόχο την ικανοποίηση των δευτερευόντων χρηστών και την αύξηση της φασματικής χρησιμοποίησης μειώνοντας τον αριθμό των μη εκχωρημένων διαθέσιμων καναλιών σε κάθε χρήστη.

Για να περιγραφεί η επιθυμία του δευτερεύοντος χρήστη για μεγαλύτερο εύρος ζώνης (περισσότερα εκχωρημένα κανάλια εκπομπής) εκμεταλλευόμαστε τις *συναρτήσεις χρησιμότητας* (utility functions), οι οποίες χρησιμοποιούνται συνήθως για να εκφράσουν την ευχαρίστηση του χρήστη σε προβλήματα βέλτιστης κατανομής πόρων. Μια γενική σιγμοειδής συνάρτηση, η οποία θεωρείται ως μια γενικευμένη συνάρτηση χρησιμότητας [82] και εκφράζει την ικανοποίηση των χρηστών σε διαφορετικού τύπου δευτερεύοντα δίκτυα, μπορεί να γραφεί ως εξής

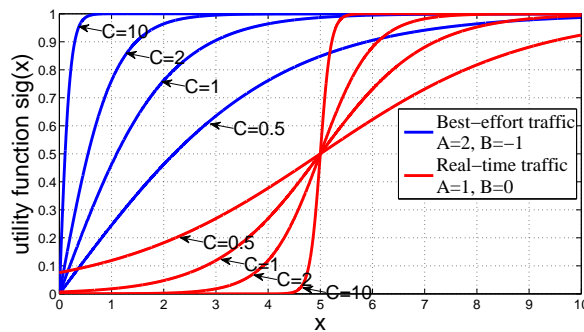
$$sig(x) = \frac{A}{1 + 1 \cdot e^{-C(x-d)}} + B \quad (4.2)$$

όπου  $A$  και  $B$  καθορίζουν το εύρος της σιγμοειδούς συνάρτησης. Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 4.4, ως  $d$  συμβολίζεται το σημείο καμπής το οποίο αναπαριστά το κρίσιμο κατώφλι πάνω από το οποίο η ευχαρίστηση του δευτερεύοντος χρήστη αυξάνει σημαντικά, ενώ η παράμετρος  $C$  επηρεάζει την κλίση της σιγμοειδούς καμπύλης. Επισημαίνεται ότι η προαναφερόμενη συνάρτηση χρησιμότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατανομή πόρων σε δίκτυα διαφορετικών τύπων υπηρεσιών χαρακτηριζόμενα από διαφορετικές απαιτήσεις και διαφορετικούς στόχους ανωτέρων στρωμάτων. Για παράδειγμα, μια κοίλη συνάρτηση χρησιμότητας με  $d = 0$  (μπλε καμπύλες στο Σχήμα 4.4) είναι κατάλληλη σε δευτερεύοντα δίκτυα χαρακτηριζόμενα από κίνηση βέλτιστης προσπάθειας (best-effort

traffic) λαμβάνοντας υπόψη κριτήρια δικαιοσύνης [73], ενώ για κίνηση πραγματικού χρόνου με απαιτήσεις QoS είναι καταλληλότερη μια σιγμοειδής συνάρτηση χρησιμότητας ως προς το κατανεμημένο εύρος ζώνης που εκχωρείται σε κάθε δευτερεύον κόμβο. Η μεταβλητή  $x$  αναπαριστά την ποσότητα εκχωρημένων πόρων, η οποία στην εξεταζόμενη περίπτωση είναι ισοδύναμη με  $\|\vec{u}_s\|_1$  όπου  $\|\cdot\|_1$  συμβολίζει τη  $L_1$ -νόρμα (δηλαδή, τον αριθμό των εκχωρημένων καναλιών σε κάθε κόμβο  $s$ ). Συνεπώς, στοχεύοντας στη σύγκλιση σε καταστάσεις ελαχίστης ενέργειας, η συνάρτηση δυναμικού  $V^{(1)}$  σχεδιάζεται ως εξής

$$V_{\{s\}}^{(1)}(x_s) = \begin{cases} \lambda_1 \cdot (1 - \text{sig}(\|\vec{u}_s\|_1)), & \text{αν } \|\vec{u}_s\|_1 \geq 1 \text{ και} \\ & \vec{u}_s \cdot \vec{\alpha}_s = \vec{u}_s \cdot \vec{1} \\ \delta_1 > 0, & \text{αλλιώς.} \end{cases} \quad (4.3)$$

Θέτοντας στην παράμετρο  $\delta_1$  μια υψηλή θετική τιμή αποθαρρύνεται ένας δευτερεύον χρήστης από την εκπομπή σε κατειλημμένο κανάλι, αποφεύγοντας με τον τρόπο αυτό την δημιουργία παρεμβολών σε πρωτεύοντα συστήματα. Επιπρόσθετα, αποθαρρύνεται η περίπτωση μη επιλογής κανενός καναλιού εκπομπής, γεγονός που συνεπάγεται την αποσύνδεση του κόμβου από το υπόλοιπο δίκτυο.



**Σχήμα 4.4:** Παραδείγματα διαφορετικών μορφών της γενικής συνάρτησης χρησιμότητας.

Οι συναρτήσεις δυναμικού δεύτερης τάξης,  $V^{(2)}$ , αντικατοπτρίζουν την συνεισφορά (κόστος) στην ενέργεια του συστήματος που προέρχεται από την αλληλεπίδραση ανταγωνιστικών δευτερευόντων χρηστών και αποσκοπούν στην από κοινού βελτιστοποιημένη λειτουργία του φυσικού στρώματος και του στρώματος MAC. Αναλυτικότερα, η κατανομή (επιλογή) ορθογωνικών διανυσμάτων,  $\vec{u}_s$ , μεταξύ ανταγωνιστικών χρηστών εγγυάται μεταδόσεις δευτερευόντων χρηστών χωρίς συγκρούσεις και αποτρέπει τη συμφόρηση ενός καναλιού. Ανταλλάσσοντας τοπικά μηνύματα, δηλαδή τα διανύσματα  $\vec{u}_s$  και  $\vec{n}_s$ , και

αξιοποιώντας τις πληροφορίες από τα σήματα κατειλημμένου μέσω του διανύσματος  $\vec{c}_s$ , όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, οι ανά ζεύγη αλληλεπιδράσεις ενός χρήστη  $s$  στην MRF γειτονιά  $\mathcal{G}_s$  εκφράζονται μέσω των ακόλουθων συναρτήσεων δυναμικού

$$V_{\{s,j\}}^{(2)}(x_s, x_j) = \begin{cases} \lambda_2 \cdot \vec{u}_s \cdot \vec{u}_j, & \text{αν } j \in T_s \text{ και} \\ & \vec{u}_s \cdot \vec{\alpha}_j \neq 0 \\ \frac{\lambda_2 \cdot \sum_{k \in T_s} (\vec{u}_s \cdot \vec{n}_{sk}) + \lambda_3 \cdot \vec{u}_s \cdot \vec{c}_s}{|\mathcal{G}_s \setminus \{T_s\}|}, & \text{αν } j \in \mathcal{G}_s \setminus \{T_s\} \\ \delta_2 > 0, & \text{αλλιώς.} \end{cases} \quad (4.4)$$

όπου  $j \in \mathcal{G}_s$ , ενώ  $|\mathcal{G}_s \setminus \{T_s\}|$  δηλώνει το πλήθος των ανταγωνιστικών δευτερευόντων χρηστών που βρίσκονται εκτός του εύρους μετάδοσης του κόμβου  $s$ . Η συνάρτηση δυναμικού  $V_{\{s,j\}}^{(2)}(x_s, x_j)$  επηρεάζεται άμεσα από τα διανύσματα  $\vec{u}_j$  των κόμβων  $j \in T_s$ , ενώ η επιρροή των κόμβων που ανήκουν στο σύνολο  $\mathcal{G}_s \setminus \{T_s\}$  εκφράζεται μέσω των διανυσμάτων  $\vec{n}_{sk}$  και  $\vec{c}_s$ . Το δυαδικό διάνυσμα  $\vec{n}_{sk}$  αναπαριστά (με τιμή στοιχείων ίση με 1) τα χρησιμοποιούμενα κανάλια από κόμβους εντός  $T_k \setminus \{s\}$  και προκύπτει από το περιεχόμενο του διανύσματος  $\vec{n}_k$  σε συνδυασμό με την τρέχουσα κατάσταση του κόμβου  $s$ . Ομοίως με τη συνάρτηση δυναμικού  $V_{\{s\}}^{(1)}(x_s)$ , θέτοντας την παράμετρο  $\delta_2$  ίση με μια σταθερά υψηλής τιμής αποθαρρύνεται το σενάριο όπου οι κόμβοι μεταδίδουν σε κατειλημμένα κανάλια για τους πιθανούς δέκτες (γείτονες εντός εύρους εκπομπής  $R_t$ ).

Με το ανωτέρω πλαίσιο, καταστάσεις (διαρθρώσεις)  $\omega$  βέλτιστης λειτουργίας (ελαχίστης ενέργειας) μπορούν να αναζητηθούν με μικρή επιβάρυνση σηματοδοσίας. Για την ποσοτικοποίηση των ανταλλαχθέντων μηνυμάτων ελέγχου επισημαίνεται ότι κάθε κόμβος  $s$  απαιτείται μόνο να αναμεταδίδει περιοδικά εντός εύρους  $R_t$  τις τιμές των διανυσμάτων  $\vec{u}_s$ ,  $\vec{\alpha}_s$  και  $\vec{n}_s$ . Δεδομένου ότι τα διανύσματα  $\vec{u}_s$  και  $\vec{\alpha}_s$  είναι δυαδικά, ενώ τα στοιχεία του διανύσματος  $\vec{n}_s$  παίρνουν τιμές από το σύνολο  $\{0, 1, 2\}$ , ο αριθμός των απαιτούμενων bits για την κωδικοποίηση των ανωτέρω μηνυμάτων είναι σχετικά μικρός. Συνεπώς, η τοπική φύση των εκπομπών σε συνδυασμό με το μικρό μέγεθος μηνυμάτων καθιστούν την προτεινόμενη προσέγγιση αποτελεσματική ως προς την επιβάρυνση (κόστος) σηματοδοσίας.

Επιπλέον, αξίζει να επισημανθεί ότι μολονότι η σύνθετη περίπτωση των δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας έχει μελετηθεί και παρουσιαστεί, η προτεινόμενη προσέγγιση μπορεί να αξιοποιηθεί ωσαύτως στη γενικότερη περίπτωση των αποκεντρωμένων ασύρματων δικτύων για τη βέλτιστη επιλογή καναλιών εκπομπής. Στην περίπτωση αυτή αρκεί

να αγνοηθούν τα αποτελέσματα ανίχνευσης πρωτεύοντων χρηστών, δηλαδή η τιμή των στοιχείων του διανύσματος  $\vec{a}_s$  να τεθεί ίση με 0 για κάθε MRF σημείο  $s$ .

#### 4.4.1.2 Στρώμα ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (MAC) - Χρονοπρογραμματισμός

Ως προς τη λειτουργικότητα του στρώματος MAC, το προτεινόμενο πλαίσιο σχεδίασης επικεντρώνεται στην αποτελεσματική αντιμετώπιση του ανταγωνισμού μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών για πρόσβαση στο μέσο και στη βελτίωση της επίδοσης των υπαρχόντων αμιγών αλγορίθμων πρόσβασης. Χάριν ευκολίας υιοθετείται ο δημοφιλής μηχανισμός CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) και προτείνεται ένα υβριδικό αποκεντρωμένο σχήμα ελέγχου πρόσβασης βασισμένο σε επιλεκτική ενεργοποίηση του CSMA/CA με σκοπό την επίτευξη αποτελεσματικού ελέγχου πρόσβασης στα εκχωρημένα κανάλια μέσω μικρού κόστους σηματοδοσίας. Αναλυτικότερα, όταν ο αριθμός των διαθέσιμων καναλιών είναι επαρκής, η κατανομή καναλιών σε φυσικό επίπεδο είναι ικανή για την παροχή αποτελεσματικού μερισμού φάσματος μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών χωρίς συγκρούσεις λόγω της ορθογωνικότητας των επιλεγμένων καναλιών. Ωστόσο, όταν ο αριθμός των διαθέσιμων καναλιών είναι πολύ μικρότερος, η διαμαχοπαγής (contention-based) λειτουργία δε μπορεί να αποφευχθεί, ειδικά σε τοπικά πυκνές γειτονιές κόμβων, απαιτώντας συνεπώς έλεγχο πρόσβασης του μέσου.

Όπως περιγράφηκε στην υποενότητα 4.4.1.1 οι συναρτήσεις δυναμικού δεύτερης τάξης αναπαριστούν ένα μέτρο των συγκρούσεων μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών και επομένως μπορούν να αξιοποιηθούν για την επιλεκτική ενεργοποίηση σχημάτων ελέγχου πρόσβασης στο μέσο, π.χ. CSMA/CA. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τη προτεινόμενη προσέγγιση, αν ένας δευτερεύον κόμβος προτίθεται να μεταδώσει στα εκχωρημένα κανάλια ενώ η αντίστοιχη τιμή του αθροίσματος των δεύτερης τάξης συναρτήσεων δυναμικού - που αφορούν το συγκεκριμένο κόμβο - είναι μη μηδενική, τότε RTS/CTS μηνύματα ανταλλάσσονται και ένας χρονομετρητής υποχώρησης ρυθμίζεται κατάλληλα ώστε να αποφευχθούν πιθανές συγκρούσεις πακέτων μεταξύ δευτερευόντων χρηστών. Αντιθέτως, εφόσον ένας δευτερεύον χρήστης παρατηρεί μηδενικές συναρτήσεις δυναμικού δεύτερης τάξης αρχίζει να μεταδίδει χωρίς επιπρόσθετο κόστος σηματοδοσίας. Συνοπτικά, το MRF δομοστοιχείο στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική του Σχήματος 4.3 συγκεντρώνει πληροφορίες προερχόμενες από τα υπόλοιπα στρώματα και είναι υπεύθυνο ώστε να ενερ-

γοποιεί/απενεργοποιεί σε κάθε κόμβο το μηχανισμό ελέγχου πρόσβασης στο μέσο.

Βασικοί στόχοι του ανωτέρω υβριδικού σχήματος MAC αποτελούν η αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ δευτερευόντων εκπομπών, η σταθερότητα του δικτύου, καθώς και ο περιορισμός των μηνυμάτων ελέγχου (σηματοδοσίας), δηλαδή των μηνυμάτων RTS/CTS, και των χαμένων ευκαιριών μετάδοσης (οπουδήποτε και οποτεδήποτε είναι εφικτό). Συνεπώς, σε ένα συνωστισμένο δευτερεύον δίκτυο με λιγοστούς διαθέσιμους φασματικούς πόρους, οι συγκρούσεις μεταξύ δευτερευόντων χρηστών μπορούν να αντιμετωπισθούν μέσω του μηχανισμού CSMA/CA, δηλαδή θυσιάζοντας χρόνο μετάδοσης για σηματοδοσία. Αντίθετα, σε μια περιοχή με λιγοστούς χρήστες και χαμηλή φασματική χρησιμοποίηση δεν υπάρχει ανάγκη χρονοπρογραμματισμού και επομένως, εφαρμόζεται άμεση επικοινωνία χωρίς καθυστέρηση και επιπρόσθετη επιβάρυνση. Στην υποενότητα 4.5.4, παρουσιάζονται σχετικές προσομοιώσεις για την ανάδειξη και επικύρωση των πλεονεκτημάτων του προτεινόμενου υβριδικού σχήματος MAC.

#### 4.4.1.3 Στρώμα Δικτύου - Βελτίωση επιλεγμένων διαδρομών

Εξαιτίας των προηγμένων ικανοτήτων των χρηστών γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας, ποικίλα σχήματα δρομολόγησης έχουν προταθεί τα οποία χαρακτηρίζονται ως διαστρωματικές λύσεις δεδομένου ότι απαιτούνται πάντα πληροφορίες ανίχνευσης φάσματος προερχόμενες από το χαμηλότερο φυσικό στρώμα. Ωστόσο, μια πραγματική διαστρωματική λύση απαιτεί άμεση αμφίδρομη αλληλεπίδραση μεταξύ των στρωμάτων, από το χαμηλότερο στο υψηλότερο στρώμα και αντίστροφα, παρέχοντας σταθερότητα με ένα κλειστό μηχανισμό ανατροφοδότησης που λειτουργεί σε ίδια χρονική κλίμακα [83].

Ως απάντηση στην ανωτέρω πρόκληση, επεκτείνεται το προτεινόμενο MRF πλαίσιο που περιγράφεται στις προηγούμενες υποενότητες μέσω ενός μηχανισμού ανατροφοδότησης με τον οποίο χαρακτηριστικά του στρώματος δικτύου επηρεάζουν τις αποφάσεις κατανομής φασματικών πόρων στο φυσικό στρώμα. Υποθέτοντας οποιονδήποτε υπάρχον αλγόριθμο δρομολόγησης που αξιοποιεί τα αποτελέσματα φασματικής ανίχνευσης του φυσικού στρώματος, δίνεται έμφαση στη ροή πληροφορίας από το στρώμα δικτύου προς το φυσικό στρώμα μέσω του προτεινόμενου MRF πλαισίου. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται μια διαστρωματική μετρική  $\rho(s)$ , για κάθε κόμβο  $s$ , η οποία δύναται να αναπαριστά παραμέτρους του στρώματος δικτύου όπως το μήκος της ουράς αναμονής των πακέτων,



η συμμετοχή του κόμβου σε ενεργά μονοπάτια δρομολόγησης, το φορτίο κίνησης του κόμβου, κλπ. Για τη συνέχεια, θεωρείται ότι η παράμετρος  $\varrho(s)$  συμβολίζει τον αριθμό των ενεργών ροών που διέρχονται από κάθε κόμβο  $s$  και επομένως, μια υψηλή τιμή  $\varrho(s)$  εκφράζει την αυξημένη επιθυμία του κόμβου για επιπρόσθετους φασματικούς πόρους.

Στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική του Σχήματος 4.3 η διαστρωματική μετρική  $\varrho(s)$  αξιοποιείται κατά τη διάρκεια κατανομής καναλιών ώστε να υποστηρίζει/ενισχύει αποφάσεις και στρατηγικές δρομολόγησης του στρώματος δικτύου. Ειδικότερα, η μεταβλητή  $\varrho(s)$  χρησιμοποιείται ώστε να δώσει βαρύτητα στις συναρτήσεις δυναμικού πρώτης τάξης ενός κόμβου  $s$  που αφορούν κόμβους με υψηλότερο φόρτο δικτυακής κίνησης, τροποποιώντας την εξίσωση 4.3 ως εξής

$$V_{\{s\}}^{(1)}(x_s) = \begin{cases} \lambda_1 \cdot \left( 1 - \frac{A}{1 + 1 \cdot e^{-C(x-d-\varrho(s)\cdot step)}} - B \right), \\ \text{αν } \|\vec{u}_s\|_1 \geq 1 \text{ και } \vec{u}_s \cdot \vec{\alpha}_s = \vec{u}_s \cdot \vec{1} \\ \delta_1 > 0, \quad \text{αλλιώς.} \end{cases} \quad (4.5)$$

Με τον τρόπο αυτό, η παράμετρος  $\varrho(s)$  εκφράζει τη ζήτηση για επιπρόσθετα κανάλια (εύρος ζώνης) και επηρεάζει την ενέργεια συστήματος εισάγοντας MRF σημεία με ανομοιόμορφη συνεισφορά στη συνολική ενέργεια. Όπως παρατηρείται στην εξίσωση (4.5), η εισαγωγή της παραμέτρου  $\varrho(s)$  ελέγχει το σημείο καμψής της συνάρτησης χρησιμότητας για την συνάρτηση δυναμικού πρώτης τάξης. Συνεπώς, οι δευτερεύοντες χρήστες που εξυπηρετούν ένα αυξημένο αριθμό ροών επωφελούνται κατά τη φάση κατανομής καναλιών. Αξίζει να σημειωθεί ότι εφόσον η ανατροφοδότηση από το στρώμα δικτύου προς το φυσικό στρώμα (μέσω του κάθετου στρώματος - MRF δομοστοιχείο) αξιοποιεί ήδη γνωστές πληροφορίες για έναν κόμβο δεν υφίσταται επιπρόσθετη επιβάρυνση σηματοδοσίας.

Συνοπτικά, ο προτεινόμενος μηχανισμός ανατροφοδότησης συμβάλλει στη βελτίωση των επιλεγμένων διαδρομών δρομολόγησης με πρόσθετους φασματικούς πόρους (εφόσον είναι διαθέσιμοι) παρέχοντας πιο σταθερά και υψηλότερης ποιότητας μονοπάτια δρομολόγησης, καθώς περισσότεροι εκχωρημένοι φασματικοί πόροι συνεισφέρουν σε ανθεκτικότερες (σε περίπτωση δέσμευσης κάποιου καναλιού εξαιτίας επανεμφάνισης πρωτευόντων χρηστών) και υψηλότερης χωρητικότητας ασύρματες ζεύξεις. Στο Σχήμα 4.3 απεικονίζονται οι αλληλεπιδράσεις των διαφορετικών στρωμάτων μέσω του MRF δομοστοιχείου, ενώ στην ενότητα 4.5.5 παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα του προτεινόμενου μηχανι-

σμού μέσω αποτελεσμάτων προσομοίωσης.

#### 4.4.2 Αλγόριθμος επίλυσης

Αν και η θεωρία των MRFs παρέχει ένα πλήρες μοντέλο ανάλυσης της συμπεριφοράς ενός συστήματος, όπως το προκείμενο δίκτυο δευτερευόντων χρηστών, ο άμεσος υπολογισμός βέλτιστων λύσεων - δηλαδή, των καταστάσεων (διαρθρώσεων) εκείνων που ελαχιστοποιούν την καθολική ενέργεια του συστήματος - είναι πρακτικά αδύνατος εξαιτίας του εξαιρετικά μεγάλου χώρου πιθανών καταστάσεων  $\Omega$ . Δειγματοληπτικοί και άλλοι στατιστικοί μέθοδοι εκτίμησης, όπως η μέθοδος Monte Carlo, μπορούν θεωρητικά να εφαρμοστούν επιτυχώς για την εκτίμηση των ζητούμενων παραμέτρων μέσω δειγμάτων, χωρίς δηλαδή να απαιτείται πλήρης αναλυτικός υπολογισμός του χώρου καταστάσεων  $\Omega$ . Η άμεση, όμως, στατική δειγματοληψία βασιζόμενη στην κατανομή ενός τυχαίου πεδίου Gibbs καθίσταται υπολογιστικά αδύνατη εξαιτίας της συνάρτησης διαμέρισης  $Z$  (Παράρτημα Α' - εξίσωση Α'.2) που ο προσδιορισμός της απαιτεί τον υπολογισμό του αθροίσματος όλων των πιθανών καταστάσεων του συστήματος. Οι ιδιαιτερότητες, επομένως, της κατανομής Gibbs θέτουν πρακτικά εμπόδια στον υπολογισμό βέλτιστων εκτιμητριών και για το λόγο αυτό, μελετώνται προσεγγίσεις που ανήκουν στην οικογένεια των δυναμικών Monte Carlo μεθόδων και η ανάλυση/εξέλιξή τους περιγράφεται μέσω Μαρκοβιανών αλυσίδων (MCMC - Markov Chain Monte Carlo). Βασικός στόχος αποτελεί η κατασκευή Μαρκοβιανών αλυσίδων με υπολογιστικά απλό κανόνα μετάβασης (Markov kernel) που συγκλίνουν σε επιθυμητές καταστάσεις/κατανομές ισορροπίας.

Η ισοδυναμία μεταξύ MRFs και "γετονικών" (neighbour) GRFs καθώς και το μικρό μέγεθος των γειτονιών σε πρακτικά προβλήματα (π.χ. σε ασύρματα πολυβηματικά δίκτυα όπου οι κόμβοι εξαρτώνται από το τοπικό τους περιβάλλον) καθιστούν εφικτή την εκμετάλλευση αλγορίθμων που στηρίζονται στον επαναληπτικό υπολογισμό των δεσμευμένων πιθανοτήτων (local characteristics) της σχέσης (Α'.1) του Παραρτήματος Α' [64]. Συγκεκριμένα, σε ένα σύστημα εξαρτώμενων τυχαίων μεταβλητών που δύναται να περιγραφεί μέσω της θεωρίας των τυχαίων πεδίων Markov, η μέθοδος δειγματοληψίας κατά Gibbs (Gibbs Sampling) ορίζει την επαναληπτική διαδικασία μετάβασης σε νέες καταστάσεις (διαρθρώσεις) συστήματος, όπου η επιλογή μιας νέας κατάστασης βασίζεται στα τοπικά χαρακτηριστικά (local characteristics) του ζητούμενου GRF. Αποδεικνύεται ότι η Μαρ-

κοβιανή αλυσίδα η οποία αναλύει την εξέλιξη της δειγματοληψίας κατά Gibbs συγκλίνει στο ζητούμενο τυχαίο πεδίο Gibbs [64, 81], και επομένως καθίσταται δυνατή η εκτίμηση διαφόρων παραμέτρων με υπολογιστικά απλό τρόπο, π.χ. ο μέσος αριθμός επισκέψεων σε μια κατάσταση κατά τη διαδικασία Gibbs Sampling συγκλίνει στη πιθανότητα εμφάνισης της συγκεκριμένης κατάστασης/διάρθρωσης βάσει του σχετιζόμενου GRF.

Η εκμετάλλευση μεθόδων στοχαστικής χαλάρωσης για τον υπολογισμό βέλτιστων καταστάσεων που ελαχιστοποιούν την ενέργεια του συστήματος έχει μελετηθεί τόσο στη στατιστική φυσική όσο και στο ερευνητικό πεδίο της επεξεργασίας εικόνας [84, 64]. Έχει αποδειχθεί ότι εφαρμόζοντας δειγματοληψία κατά Gibbs (Gibbs Sampling) σε συνδυασμό με ένα κατάλληλο λογαριθμικό πρόγραμμα ανόπτησης (προερχόμενο από τη μέθοδο προσομοιωμένης ανόπτησης - simulated annealing - η οποία χρησιμοποιήθηκε αρχικά στον τομέα της συνδυαστικής βελτιστοποίησης [85]) το σύστημα συγκλίνει, μέσω μιας παραγόμενης αλυσίδας Markov στο χώρο καταστάσεων  $\Omega$ , σε ομοιόμορφη κατανομή ισορροπίας στο χώρο των βέλτιστων καταστάσεων συστήματος (δηλαδή στο υποσύνολο των διαρθρώσεων  $\omega$  που ελαχιστοποιούν την ενέργεια συστήματος) [64]. Συνεπώς, ξεκινώντας από μια τυχαία αρχική κατάσταση συστήματος  $\omega$  ο αλγόριθμος Gibbs Sampling συγκλίνει σε καταστάσεις ελαχίστης καθολικής ενέργειας. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε αντίθεση με ντετερμινιστικές επαναληπτικές μεθόδους βελτίωσης, ο αλγόριθμος Gibbs sampling επιτρέπει τοπικές αλλαγές που μπορεί να αυξήσουν την καθολική ενέργεια συστήματος, αποφεύγοντας με τον τρόπο αυτό την παγίδευση της διαδικασίας σύγκλισης σε τοπικά ελάχιστα της συνάρτησης ενέργειας.

Η ακολουθιακή (sequential) μέθοδος Gibbs sampling λειτουργεί με κατανεμημένο τρόπο και περιγράφεται ως εξής [64]:

- Υποθέτουμε μια αυθαίρετη αρχική κατάσταση συστήματος  $X(t = 0)$ , ένα πρόγραμμα ανόπτησης  $T(w)$ , μια σταθερά  $\nu \geq n$  και ένα ακολουθιακό σχήμα επίσκεψης  $\{\sigma_t, \sigma_{t+1}, \dots, \sigma_{t+\nu-1}\} \supseteq S$ , όπου σε κάθε χρονική στιγμή (χρονοθυρίδα)  $t$  αποκλειστικά το MRF σημείο  $s = \sigma_t$  ανανεώνει την κατάστασή του. Η καθολική κατάσταση συστήματος, εκφραζόμενη ως  $X(t) \doteq \{X_{s_1}(t), X_{s_2}(t), \dots, X_{s_n}(t)\}$ , εξελίσσεται στο χρόνο σχηματίζοντας μια ανομοιογενή Markov αλυσίδα.
- Σε κάθε χρονοθυρίδα  $t$ , θεωρούμε  $\omega = X(t - 1)$  και συμβολίζουμε με  $\omega^{x_s}$  τη διάρθρωση (κατάσταση συστήματος) που διαφέρει από τη διάρθρωση  $\omega$  στο σημείο

$s$  λαμβάνοντας τιμή  $x_s$ . Η ανανέωση (απόφαση μετάβασης σε νέα κατάσταση) στο σημείο  $s = \sigma_t$  πραγματοποιείται σύμφωνα με την κατανομή (local characteristic):

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(X_{s=\sigma_t}(t) = x_s \mid X_r(t-1) = x_r, r \neq s) &= \\ &= \frac{\exp\left(-\frac{1}{T(w)} \cdot \sum_{C:s \in C} V_C(\omega^{x_s})\right)}{Z_s} \end{aligned} \quad (4.6)$$

όπου

$$Z_s = \sum_{x_s \in \Lambda} \exp\left(-\frac{1}{T(w)} \cdot \sum_{C:s \in C} V_C(\omega^{x_s})\right).$$

Τα MRF σημεία ανανεώνονται σειριακά μέσα σε μια *σάρωση* (sweep), η οποία υποδηλώνει τη χρονική περίοδο κατά την οποία όλα τα σημεία έχουν ανανεώσει τις καταστάσεις τους. Επομένως, ως προς την προτεινόμενη προσέγγιση, μια σάρωση ολοκληρώνεται όταν όλοι οι δευτερεύοντες χρήστες λάβουν νέες αποφάσεις σχετικά με τους χρησιμοποιούμενους φασματικούς πόρους. Το πρόγραμμα ανόπτησης  $T(w)$  αναπαριστά τη φθίνουσα πορεία της θερμοκρασίας συστήματος  $T$ , όπου  $w$  συμβολίζει το δείκτη της  $w$ -οστής σάρωσης. Επιπλέον, επισημαίνεται ότι η θερμοκρασία συστήματος ανανεώνεται στο τέλος κάθε σάρωσης ορίζοντας μια νέα *εποχή ανόπτησης* (annealing epoch).

Η ανωτέρω στρατηγική προσομοιωμένης ανόπτησης έχει τις ρίζες της στη χημική ανόπτηση, δηλαδή τη μέθοδο προσδιορισμού χαμηλών καταστάσεων ενέργειας ενός υλικού με σταδιακή μείωση της θερμοκρασίας. Στην πράξη, όσο η θερμοκρασία συστήματος μειώνεται, η συνάρτηση μάζας πιθανότητας του τυχαίου πεδίου Gibbs (Α'.2) συγκεντρώνεται στις καταστάσεις συστήματος που ελαχιστοποιούν τη συνάρτηση ενέργειας, απομονώνοντας με τον τρόπο αυτό τις βέλτιστες λύσεις του προβλήματος βελτιστοποίησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο αλγόριθμος Gibbs sampling καθιστά δυνατή την αποφυγή σύγκλισης σε τοπικά ελάχιστα της συνάρτησης ενέργειας, δεδομένου ότι η δειγματοληψία ξεκινά από υψηλές θερμοκρασίες όπου η κατανομή (4.6) είναι ουσιαστικά ομοιόμορφη και επιτρέπει συνεπώς τις μεταβάσεις σε υψηλότερης ενέργειας καταστάσεις συστήματος.

Οι προκύπτουσες καταστάσεις συστήματος μετά από κάθε σάρωση, δηλαδή  $\{X(t + w \cdot \nu) : w = 0, 1, 2, \dots\}$ , περιγράφουν μια ανομοιογενή αλυσίδα Markov στο χώρο καταστάσεων συστήματος  $\Omega$  με Markov πυρήνα (kernel), δηλαδή πιθανότητα μετάβασης μεταξύ καταστάσεων συστήματος σε διαδοχικές σαρώσεις, που έχει ως εξής

$$\mathbb{Q}^{\{w\}}(x, y) = \mathbb{P}_{\sigma_t}^{T(w)} \dots \mathbb{P}_{\sigma_{t+\nu-1}}^{T(w)}(x, y) \quad (4.7)$$

όπου  $\mathbb{Q}^{\{w\}}(x, y)$  αποτελεί τη σύνθεση των πινάκων  $\mathbb{P}_{\sigma_t}^{T(w)}$  που εκφράζονται ως

$$\mathbb{P}_{\sigma_t}^{T(w)}(x, y) = \begin{cases} \mathbb{P}(X_{s=\sigma_t} = y_s \mid X_r = x_r, r \neq s), & \text{αν } y_{S \setminus \{s=\sigma_t\}} = x_{S \setminus \{s=\sigma_t\}} \\ 0, & \text{αλλιώς.} \end{cases} \quad (4.8)$$

και συμβολίζουν τη δεσμευμένη πιθανότητα δειγματοληψίας (4.6) ενός σημείου για την  $w$ -οστή σάρωση και τον αντίστοιχο κόμβο που καθορίζεται από το δείκτη  $\sigma_t$  του σχήματος επίσκεψης. Αποδεικνύεται ότι η ανωτέρω αλυσίδα Markov συγκλίνει οριακά στην ομοιόμορφη κατανομή για το σύνολο των καταστάσεων που ελαχιστοποιούν την καθολική ενέργεια συστήματος [64, 81]. Τέλος, επισημαίνεται ότι η σχέση (4.6) εξαρτάται μόνο από τις τιμές των γειτονικών MRF σημείων στο καθοριζόμενο σύστημα γειτονίας  $\mathcal{G}$  για κάθε σημείο  $s = \sigma_t$  και συνεπώς, αποφεύγεται ο υπολογισμός της συνάρτησης διαμέρισης  $Z$ .

### 4.4.3 Παράλληλη προσέγγιση

Ο ακολουθιακός αλγόριθμος Gibbs Sampling σε συνδυασμό με κατάλληλο πρόγραμμα ανόπτησης εγγυάται θεωρητικά τη σύγκλιση σε καταστάσεις συστήματος που ελαχιστοποιούν τη συνάρτηση ενέργειας και συνεπώς, βελτιστοποιούν τη λειτουργία του δευτερεύοντος δικτύου ως προς τους σχεδιαστικούς στόχους που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.4.1. Εξαιτίας της κατανεμημένης φύσης του αλγορίθμου η εκτέλεσή του απαιτεί ενδογενώς χαμηλή επιβάρυνση σηματοδοσίας. Ωστόσο, ο συνολικός αριθμός των δευτερευόντων κόμβων (MRF σημείων) επηρεάζει αναπόφευκτα τη χρονική διάρκεια ολοκλήρωσης μιας σάρωσης, μειώνοντας κατά συνέπεια την ταχύτητα προσαρμογής του δικτύου. Παράλληλα, το σειριακό σχήμα επισκέψεων απαιτεί κάποιο είδος συγχρονισμού μεταξύ των κόμβων (π.χ. κάθε χρονική στιγμή ένας μόνο κόμβος ανανεώνει την κατάστασή του), γεγονός που αυξάνει την πολυπλοκότητα και ενδεχομένως εμποδίζει την εφαρμογή του ακολουθιακού αλγορίθμου σε πρακτικά δικτυακά σενάρια κατανεμημένων δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας. Ως απάντηση στις ανωτέρω προκλήσεις εξετάζονται ακολουθώς παράλληλες υλοποιήσεις του αλγορίθμου Gibbs Sampling δίνοντας έμφαση σε ζητήματα επεκτασιμότητας, πρακτικής εφαρμοσιμότητας και επιτάχυνσης της σύγκλισης σε βέλτιστες καταστάσεις.

Μια εναλλακτική προσέγγιση ανανέωσης των καταστάσεων των MRF σημείων, η οποία μπορεί να εγγυηθεί τις ιδιότητες σύγκλισης του ακολουθιακού αλγορίθμου, είναι η

σύγχρονη ανανέωση των καταστάσεων δευτερευόντων χρηστών που ανήκουν σε ανεξάρτητα σύνολα (independent sets), δηλαδή σε σύνολα που δεν περιέχουν γειτονικά MRF σημεία ως προς το καθορισμένο σύστημα γειτονιάς  $\mathcal{G}$  [81]. Ακολουθώντας τη συγκεκριμένη στρατηγική, η διαδικασία δειγματοληψίας (λήψης αποφάσεων από τους δευτερεύοντες κόμβους) επιταχύνεται καθώς μια σάρωση ολοκληρώνεται μετά από  $\chi(G)$  χρονοθυρίδες, όπου  $\chi(G)$  συμβολίζει το χρωματικό αριθμό<sup>2</sup> του δικτυακού γράφου  $G$ . Στην πραγματικότητα, η διάρκεια μιας σάρωσης δεν εξαρτάται πλέον από το μέγεθος του δικτύου αλλά από το μέγεθος των MRF γειτονιών. Ωστόσο, η διαμέριση των δευτερευόντων χρηστών σε ανεξάρτητα σύνολα αποτελεί ένα NP-hard πρόβλημα και απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό χρόνο και κόστος σηματοδοσίας, συνεπώς, χειροτερεύοντας στην πράξη την επίδοση του δικτύου.

Αντίθετα, μια πλήρως παράλληλη προσέγγιση επιτρέπει σε κάθε κόμβο να λαμβάνει αποφάσεις για την κατάστασή του ταυτόχρονα με τους υπόλοιπους κόμβους, καθιστώντας τη διάρκεια μιας σάρωσης ανεξάρτητη από το μέγεθος του δικτύου (μια σάρωση ανά χρονοθυρίδα) και ξεπερνώντας με τον τρόπο αυτό οποιοδήποτε πρόβλημα επεκτασιμότητας. Η πιθανότητα μετάβασης (σύγχρονος πυρήνας Markov) μεταξύ δύο διαφορετικών διαρθρώσεων (καταστάσεων συστήματος) μπορεί να εκφραστεί ως

$$\mathbb{Q}^{\{w\}}(x, y) = \prod_{s \in S} \mathbb{P}_s^{T(w)}(y_s | x), \quad (4.9)$$

δεδομένου ότι κάθε κόμβος λαμβάνει αυτόνομες αποφάσεις σύμφωνα με την κατανομή πιθανότητας (4.6). Έχει αποδειχθεί [81] ότι για την περίπτωση των τυχαίων πεδίων GRFs με αποκλειστικά μη μηδενικές ανά ζεύγος γειτονικές συναρτήσεις δυναμικού η πλήρως παράλληλη υλοποίηση του αλγορίθμου Gibbs Sampling έχει αναστρέψιμη οριακή κατανομή, αλλά το σύνολο καταστάσεων για τις οποίες λαμβάνει αυστηρά θετική τιμή είναι μεγαλύτερο από το σύνολο καταστάσεων συστήματος ελάχιστης ενέργειας, επομένως, περιλαμβάνοντας μη βέλτιστες καταστάσεις. Πράγματι, όπως διαπιστώνεται μέσω αποτελεσμάτων προσομοίωσης, η πλήρως παράλληλη προσέγγιση του αλγορίθμου Gibbs Sampling μπορεί να επιφέρει σοβαρές ταλαντώσεις ενέργειας (μεταβαίνοντας σε καταστάσεις που δεν ελαχιστοποιούν την ενέργεια του συστήματος) στην κατάσταση του συ-

<sup>2</sup>Ως χρωματικός αριθμός  $\chi(G)$  ενός γραφήματος  $G$  ορίζεται ο ελάχιστος πληθάρθρωμος του συνόλου χρωμάτων που απαιτούνται για να χρωματιστούν όλες οι κορυφές του γράφου έτσι ώστε οι γειτονικές κορυφές να έχουν διαφορετικό χρώμα.

στήματος, καθιστώντας τη συγκεκριμένη προσέγγιση ακατάλληλη για πρακτική χρήση σε δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας.

Για την εξισορρόπηση μεταξύ κριτηρίων όπως η ταχύτητα σύγκλισης, η επεκτασιμότητα και η ποιότητα των λύσεων εστιάζουμε στη συνέχεια σε έναν μερικώς σύγχρονο (ήμι-παράλληλο) αλγόριθμο, ο οποίος έχει αρχικά προταθεί από τον Α. Τρουνέ [86] και κυμαίνεται μεταξύ πλήρως παράλληλης και ακολουθιακής υλοποίησης του Gibbs Sampling. Συγκεκριμένα, σε κάθε χρονική στιγμή (χρονοθυρίδα), κάθε δευτερεύον χρήστης ανανεώνει ανεξάρτητα την κατάστασή του με πιθανότητα  $\tau$ , ενώ δεν αλλάζει την τρέχουσα κατάστασή του με πιθανότητα  $1 - \tau$ . Ο ανομοιογενής πυρήνας Markov (πιθανότητα μετάβασης μεταξύ δυο διαδοχικών καταστάσεων συστήματος) μπορεί να εκφραστεί ως

$$\mathbb{Q}_{\tau}^{\{w\}}(x, y) = \prod_{s \in S} \left( \tau \cdot \mathbb{P}_s^{T(w)}(y_s | x) + (1 - \tau) \cdot \mathbf{1}_{\{x_s=y_s\}} \right), \quad (4.10)$$

όπου τα στοιχεία του διανύσματος  $\mathbf{1}_{\{x_s=y_s\}}$  λαμβάνουν τιμή ίση με τη μονάδα εάν  $x_s = y_s$  και τιμή 0 όταν  $x_s \neq y_s$ . Με τη συγκεκριμένη  $\tau$ -παράλληλη προσέγγιση δεν υπάρχει ανάγκη συγχρονισμού μεταξύ των κόμβων, ενώ μια σάρωση εκτελείται ταχύτερα δεδομένου ότι ο μέσος αριθμός κόμβων που λαμβάνουν παράλληλα αποφάσεις σε κάθε χρονική θυρίδα ισούται με  $n \cdot \tau$ . Σημειώνεται ότι για κάποιες ειδικές περιπτώσεις έχει αποδειχθεί [86, 87] ότι το σύνολο καταστάσεων συστήματος όπου η οριακή κατανομή συγκλίνει με αυστηρά θετικές τιμές περιλαμβάνει μόνο τις καθολικά βέλτιστες λύσεις. Ωστόσο, στη γενική περίπτωση το σύστημα μπορεί να παγιδευτεί σε τοπικά ελάχιστα της συνάρτησης ενέργειας [86], ενώ η επιλογή της παραμέτρου  $\tau \in (0, 1)$  δεν μπορεί να επηρεάσει το σύνολο καταστάσεων σύγκλισης της οριακής κατανομής. Με άλλα λόγια, μια προσαρμογή στην παράμετρο  $\tau$  εντός του ανοικτού διαστήματος  $(0, 1)$  δε μπορεί θεωρητικά να προσθέσει ή να αφαιρέσει βέλτιστες λύσεις από το σύνολο καταστάσεων σύγκλισης. Στην ενότητα 4.5 εξετάζεται μέσω προσομοιώσεων η επίδοση της ήμι-παράλληλης προσέγγισης σε σύγκριση με την καθαρά ακολουθιακή προσέγγιση Gibbs Sampling έτσι ώστε να αναδειχθούν αδυναμίες, πλεονεκτήματα και να αξιολογηθεί η δυνατότητα υιοθέτησης του ήμι-παράλληλου αλγορίθμου επίλυσης Gibbs Sampling για την προτεινόμενη αρχιτεκτονική.

## 4.5 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Στην παρούσα ενότητα αξιολογείται η επίδοση του προτεινόμενου MRF πλαισίου σε ποικίλα δικτυακά σενάρια σύμφωνα με μετρικές που αντικατοπτρίζουν τους σχεδιαστικούς στόχους της στοίβας πρωτοκόλλων, όπως αναφέρθηκαν στις υποενότητες 4.4.1.1, 4.4.1.2 και 4.4.1.3. Εκτός της επίδοσης μελετώνται, επίσης, πρακτικά θέματα σύγκλισης τόσο του ακολουθιακού όσο και των παράλληλων υλοποιήσεων του αλγορίθμου Gibbs Sampling σε πεπερασμένο χρόνο ανόπτησης. Οι ακόλουθες προσομοιώσεις παρέχουν αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα που φανερώνουν την καταλληλότητα του προτεινόμενου πλαισίου για εφαρμογή σε δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας.

Πιο συγκεκριμένα, για τις επόμενες προσομοιώσεις έχει εφαρμοστεί ο αλγόριθμος Gibbs sampling σε συνδυασμό με ένα πρόγραμμα ανόπτησης της μορφής  $T(w) = \frac{c_o}{\ln(1+w)}$ . Η συγκεκριμένη μορφή ελάττωσης της θερμοκρασίας συστήματος  $T(w)$  συμφωνεί με το θεωρητικό πρόγραμμα ανόπτησης για το οποίο αποδεικνύεται [64] ότι το σύστημα συγκλίνει οριακά σε βέλτιστες λύσεις (δηλαδή, σε καταστάσεις που ελαχιστοποιούν την ενέργεια του εξεταζόμενου συστήματος). Ειδικότερα, η λογαριθμική μορφή του  $T(w)$  συμβάλλει στην εύρεση βέλτιστων καταστάσεων αποφεύγοντας τη παγίδευση σε τοπικά ελάχιστα της συνάρτησης ενέργειας, ενώ παράλληλα διατηρεί το χρόνο εύρεσης λύσεων (χρόνος σύγκλισης) σε σχετικά μικρές τιμές εξυπηρετώντας πρακτικά σενάρια.

Κάθε πείραμα προσομοίωσης έχει εκτελεστεί για 2000 σαρώσεις, ενώ εμπειρικά και σύμφωνα με τη σύγκλιση των αποτελεσμάτων επιλέγεται  $c_o = 2.0$ . Τα εξεταζόμενα σενάρια εφαρμόζονται σε περιοχή  $1000m \times 1000m$  (ή  $1000m$  για τοπολογία γραμμής) και οι πρωτεύοντες χρήστες τοποθετούνται τυχαία μεταδίδοντας σε ένα τυχαία επιλεγμένο κανάλι. Ο αριθμός των πρωτευόντων χρηστών ποικίλει για κάθε σενάριο και επηρεάζει την αφθονία των διαθέσιμων φασματικών πόρων. Όπου δεν αναφέρεται ρητά, το δευτερεύον δίκτυο χαρακτηρίζεται από κίνηση βέλτιστης προσπάθειας (best-effort traffic) και σιγμοειδή συνάρτηση χρησιμότητας με  $A = 2$ ,  $B = -1$  και  $C = 2$  (σχέση (4.2)). Τέλος, αξίζει να τονιστεί ότι κατά τη διάρκεια όλων των προσομοιώσεων παρατηρήθηκε ότι η λειτουργία του προτεινόμενου MRF πλαισίου δεν επηρεάζει τη λειτουργία των πρωτευόντων χρηστών, δηλαδή εκχωρεί στους δευτερεύοντες χρήστες αποκλειστικά ελεύθερους φασματικούς πόρους, εξασφαλίζοντας μηδενικές συγκρούσεις πακέτων μεταξύ πρωτευό-



ντων και δευτερευόντων συστημάτων. Με τον τρόπο αυτό, επικυρώνεται η συμβατότητα της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής στην απαίτηση για διαφανή λειτουργία των δευτερευόντων χρηστών.

#### 4.5.1 Σύγκλιση αλγορίθμου επίλυσης

Για τη μελέτη της σύγκλισης της προτεινόμενης κατανεμημένης μεθόδου διατυπώνεται ένα ισοδύναμο, ως προς τους στόχους, κεντρικοποιημένο πρόβλημα κατανομής πόρων, το οποίο εκφράζεται ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης χρωματισμού γραφήματος από λίστα (list-coloring optimization). Ας θεωρήσουμε ότι οι  $n$  δευτερεύοντες χρήστες αναπαριστούν τους κόμβους ενός γράφου και το σύνολο  $E = \{e_{ij}\}$  δηλώνει τις ακμές του γράφου, όπου  $e_{ij} = 1$  εάν οι δευτερεύοντες χρήστες  $i$  και  $j$  είναι γείτονες ως προς το καθορισμένο MRF σύστημα γειτονιάς της ενότητας 4.3 (διαφορετικά,  $e_{ij} = 0$ ). Τότε, το αντίστοιχο κεντρικοποιημένο πρόβλημα εκφράζεται ως εξής

$$\min \sum_s \left(1 - \text{sig}(\|\vec{u}_s\|_1)\right)$$

**subject to**

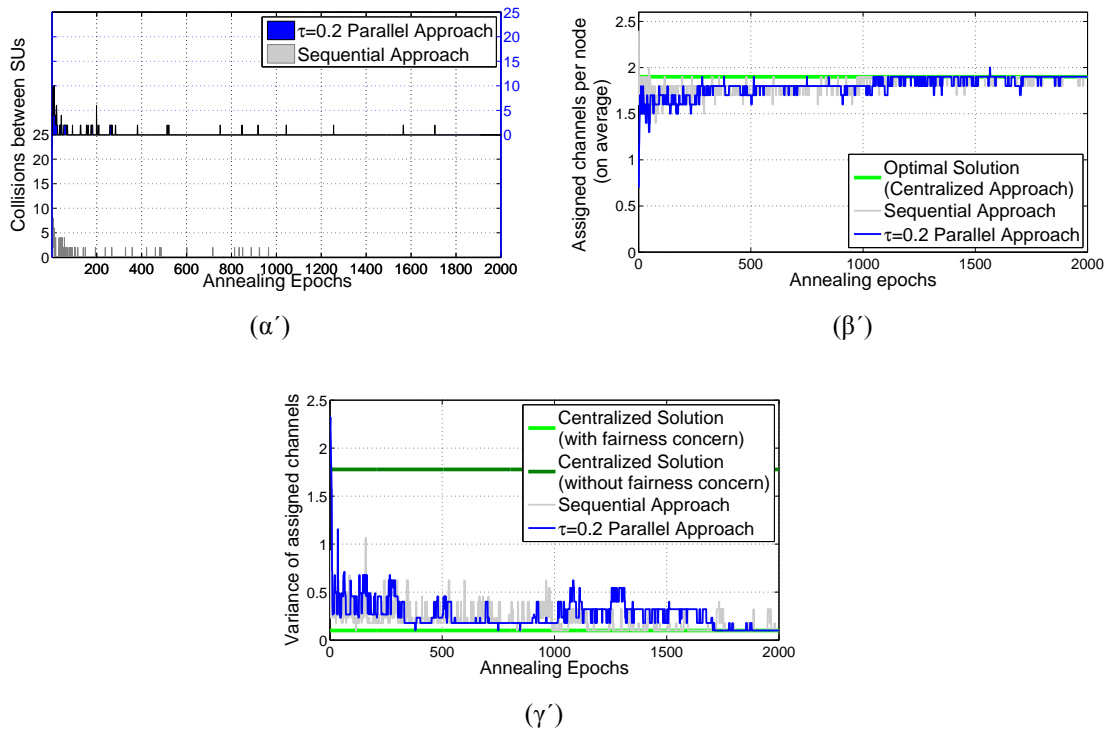
$$u(s, f) \leq \alpha(s, f) \quad \forall s, f \quad (4.11)$$

$$\left(u(i, f) + u(j, f)\right) \cdot e(i, j) \leq 1 \quad \forall i, j, f \quad (4.12)$$

$$u(s, f) \in \{0, 1\} \quad \forall s, f$$

όπου με  $u(i, j)$  και  $\alpha(i, j)$  συμβολίζονται οι τιμές του  $j$ -οστού στοιχείου των διανυσμάτων  $\vec{u}_i$  και  $\vec{\alpha}_i$ , αντίστοιχα. Ο περιορισμός (4.11) περιγράφει την απαίτηση χρήσης αποκλειστικά διαθέσιμων καναλιών για εκπομπές δευτερευόντων χρηστών και ο περιορισμός (4.12) εκφράζει την απαίτηση αποφυγής συγκρούσεων μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών μέσω του ορθογωνικού διαμοιρασμού φασματικών πόρων.

Το ανωτέρω κεντρικοποιημένο πρόβλημα βελτιστοποίησης αποτελεί ένα *μη γραμμικό ακέραιο πρόβλημα προγραμματισμού* (NLIP - Non-Linear Integer Programming problem) που χαρακτηρίζεται σαν NP-hard πρόβλημα ως προς την πολυπλοκότητά του, δηλαδή στη χειρότερη περίπτωση απαιτεί χρόνο υπολογισμού που κλιμακώνεται εκθετικά ως προς το μέγεθος του προβλήματος, εν προκειμένω, ως προς το μέγεθος του δευτερευόντος δικτύου. Για το λόγο αυτό, στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται σχετικά μικρές τοπολογίες με



**Σχήμα 4.5:** Σύγκλιση των προτεινόμενων αλγορίθμων επίλυσης σε βέλτιστες κεντρικοποιημένες λύσεις.

σκοπό την εύρεση της βέλτιστης κεντρικοποιημένης λύσης και τη σύγκρισή της με τις αντίστοιχες λύσεις της προτεινόμενης προσέγγισης. Σημειώνεται ότι η εύρεση της λύσης του ανωτέρου NLIP προβλήματος πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού TOMLAB [88] αξιοποιώντας μια μη γραμμική τεχνική επέκτασης και οριοθέτησης (branch-and-bound).

Αντίθετα, η προτεινόμενη προσέγγιση επιτυγχάνει χαμηλότερη πολυπλοκότητα εκμεταλλευόμενη τις ιδιότητες της θεωρίας των MRFs και τον αλγόριθμο στοχαστικής χαλάρωσης Gibbs Sampling. Ειδικότερα, αν  $K$  ο συνολικός αριθμός σαρώσεων, η προτεινόμενη προσέγγιση απαιτεί στη χειρότερη περίπτωση  $n$  αποφάσεις σε κάθε σάρωση (όπου  $n$  ο αριθμός των δευτερευόντων χρηστών), ενώ για κάθε ανανέωση ο αριθμός των υπολογισμών ισούται με το μέγεθος των πιθανών καταστάσεων ενός δευτερεύοντος χρήστη. Συνεπώς, δεδομένου ότι  $K$  αποτελεί μια προκαθορισμένη σταθερά, η πολυπλοκότητα της προτεινόμενης προσέγγισης είναι τάξεως  $O(n)$  (αυξάνεται γραμμικά) ως προς το μέγεθος του δευτερεύοντος δικτύου.

Το Σχήμα 4.5 παρουσιάζει την επίδοση της προτεινόμενης κατανομής προσέγγισης.

γησης σε σύγκριση με τη βέλτιστη κεντρικοποιημένη λύση για τοπολογία γραμμής απο-τελούμενη από  $n = 10$  δευτερεύοντες χρήστες και 2 πρωτεύοντες χρήστες. Ο αριθμός των συνολικών εξεταζόμενων καναλιών ισούται με  $M = 6$  και θεωρούμε ότι  $R_i = 1.5 \times R_c$ . Ειδικότερα, το Σχήμα 4.5α' απεικονίζει την εξέλιξη του ακολουθιακού και ήμι-παράλληλου αλγορίθμου Gibbs Sampling ως προς τις πιθανές συγκρούσεις που παρουσιάζονται μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών, οι οποίες υπολογίζονται έμμεσα μέσω του συνολικού αριθμού μη ορθογωνικών εκχωρημένων καναλιών σε γειτονικούς - σύμφωνα με το σύστημα γειτονιάς  $\mathcal{G}$  - κόμβους. Παρατηρείται ότι μετά από μια φάση εξερεύνησης, όπου η θερμοκρασία συστήματος είναι υψηλή, τα διαθέσιμα κανάλια εκχωρούνται έτσι ώστε να αποφεύγονται τυχόν συγκρούσεις πακέτων (περιβάλλον λειτουργίας άνευ συγκρούσεων). Κατά συνέπεια, όσο ο δείκτης εποχής ανόπτωσης αυξάνεται, η πιθανότητα συγκρούσεων μειώνεται και πρακτικά συγκλίνει στην ιδεατή περίπτωση περιβάλλοντος άνευ συγκρούσεων (collision-free environment). Αξίζει να επισημανθεί ότι εξαιτίας της στοχαστικής φύσης της εφαρμοζόμενης προσέγγισης επίλυσης και του πεπερασμένου αριθμού σαρώσεων υπάρχει μη μηδενική αλλά πολύ μικρή πιθανότητα παρατήρησης σύγκρουσης πακέτων ακόμη και για χαμηλές τιμές θερμοκρασίας συστήματος (δηλαδή μετά από ένα μεγάλο αριθμό σαρώσεων). Στις περιπτώσεις αυτές, ο προτεινόμενος μηχανισμός ενεργοποίησης σχημάτων ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (4.4.1.2) αξιοποιείται για την αποφυγή των συγκρούσεων. Επιπρόσθετα, τα Σχήματα 4.5β' και 4.5γ' παρουσιάζουν, αντίστοιχα, την εξέλιξη του αλγορίθμου Gibbs Sampling ως προς τη φασματική χρησιμοποίηση (δηλαδή, του αριθμού εκχωρημένων καναλιών ανά κόμβο) και τη δικαιοσύνη (δηλαδή, τη μεταβλητότητα των εκχωρημένων καναλιών στο σύνολο των κόμβων) σε σύγκριση με τη βέλτιστη κεντρικοποιημένη λύση. Οι δύο μετρικές αντικατοπτρίζουν αντικρουόμενους στόχους (δηλαδή, αύξηση του εκχωρημένου εύρους ζώνης σε δευτερεύοντες χρήστες αλλά με δίκαιο τρόπο), οι οποίοι εκφράζονται μέσω των συναρτήσεων δυναμικού (4.3) και (4.4), όπου  $\{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3\} = \{4, 2, 2\}$ . Όμοια με το Σχήμα 4.5α', παρατηρείται ότι καθώς η θερμοκρασία συστήματος μειώνεται, οι προτεινόμενες κατανεμημένες προσεγγίσεις συγκλίνουν στις βέλτιστες κεντρικοποιημένες λύσεις.

Αξίζει, ωστόσο, να επισημανθεί ότι για πεπερασμένο χρόνο ανόπτωσης, και άρα περιορισμένο αριθμό σαρώσεων, είναι δυνατόν σε ορισμένα σενάρια το σύστημα να μην προλάβει να συγκλίνει κατά το πέρασ των προκαθορισμένων σαρώσεων οδηγώντας σε

υποβέλτιστες λύσεις. Όπως αναφέρεται στο βιβλίο [81], εναλλακτικά σχήματα ανόπτησης (π.χ. εκθετική ανόπτηση) μπορούν να επιταχύνουν τη σύγκλιση, όμως, υπό το κόστος χαμηλότερης ποιότητας λύσεων, ενώ η αναλυτική εύρεση βέλτιστων προγραμμάτων ανόπτησης για ένα πρόβλημα πεπερασμένου χρόνου ανόπτησης κρίνεται εξαιρετικά δύσκολη. Για τη συνέχεια, στοχεύοντας στην ισορρόπηση μεταξύ βέλτιστης λύσης και ταχύτητας σύγκλισης, υιοθετείται η λογαριθμική ανόπτηση και εξετάζεται η σύγκλιση, και συνεπώς η εφαρμοσιμότητα, του αλγορίθμου Gibbs Sampling σε πιο περίπλοκα δικτυακά σενάρια.

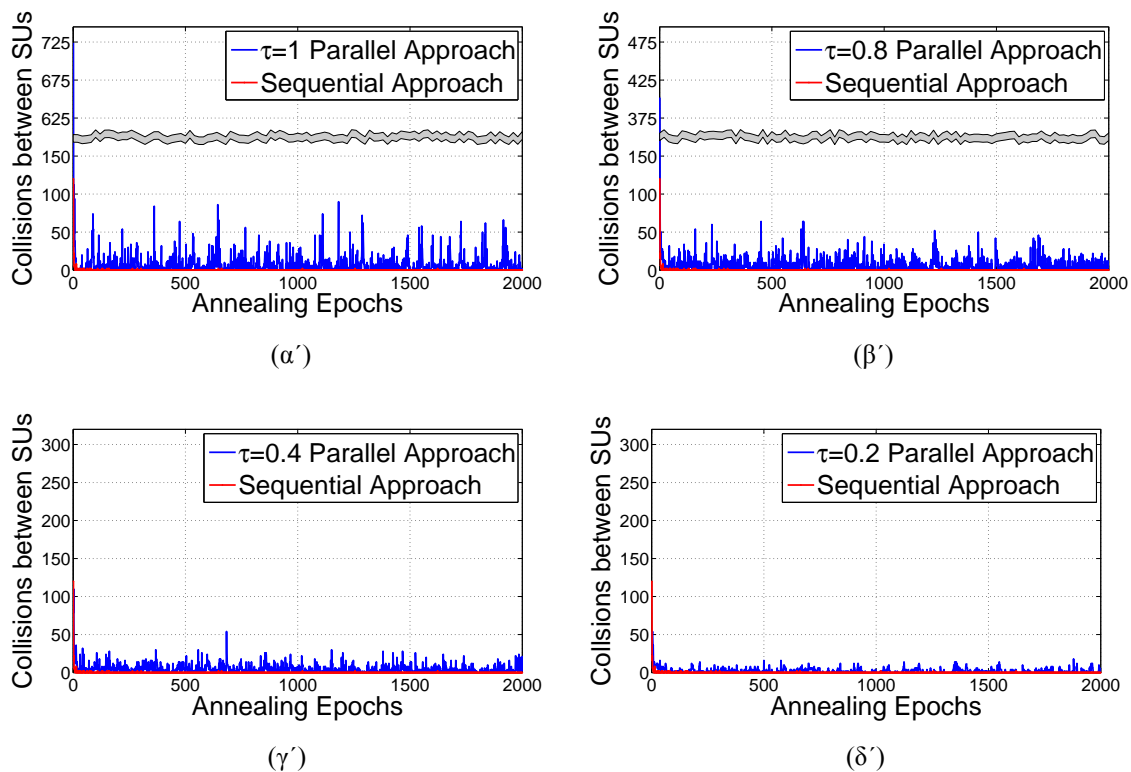
#### 4.5.2 Παράλληλες υλοποιήσεις αλγορίθμου Gibbs Sampling

Όπως σημειώθηκε στην ενότητα 4.4.3, οι παράλληλες υλοποιήσεις του αλγορίθμου Gibbs Sampling μπορούν να βελτιώσουν την επεκτασιμότητα της προτεινόμενης προσέγγισης και να μειώσουν το κόστος συγχρονισμού των δευτερευόντων χρηστών. Συγκεκριμένα, η πλήρως παράλληλη υλοποίηση καθιστά τη διάρκεια μιας σάρωσης ανεξάρτητη από το μέγεθος του δικτύου, ενώ η  $\tau$ -παράλληλη (ήμι-παράλληλη) προσέγγιση παραμένει αποτελεσματική καθώς κατά μέσο όρο  $n \cdot \tau$  κόμβοι ανανεώνουν παράλληλα τις καταστάσεις τους.

Το Σχήμα 4.6 παρουσιάζει την εξέλιξη των παράλληλων προσεγγίσεων σε σχέση με την ακολουθιακή προσέγγιση ως προς τις εποχές ανόπτησης ( $x$ -άξονας) και με κριτήριο την αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών. Επισημαίνεται ότι σε αντίθεση με τις παράλληλες προσεγγίσεις όπου πολλαπλοί χρήστες ανανεώνουν ταυτόχρονα τις καταστάσεις τους, μια εποχή ανόπτησης για τον ακολουθιακό αλγόριθμο Gibbs Sampling υπονοεί την ολοκλήρωση μιας σάρωσης (δηλαδή, την παρέλευση  $n$  χρονοθυρίδων). Συνεπώς, συγκρίνοντας τις επιδόσεις σύγκλισης μεταξύ παράλληλων προσεγγίσεων και ακολουθιακής προσέγγισης πρέπει να τονιστεί ότι ένα πρόγραμμα ανόπτησης ολοκληρώνεται πρακτικά πολύ γρηγορότερα όταν εφαρμόζεται η ήμι/παράλληλη προσέγγιση.

Τα Σχήματα 4.6α', 4.6β', 4.6γ' και 4.6δ' απεικονίζουν την επίδραση της παραμέτρου  $\tau$  (σχέση (4.10)) στην επίδοση της προτεινόμενης MRF προσέγγισης ως προς την αποφυγή συγκρούσεων σε δίκτυο τοπολογίας πλέγματος ( $R_t = 250m$ ,  $R_i = 300m$ ) αποτελούμενο από 25 δευτερεύοντες χρήστες, 2 πρωτεύοντες χρήστες και 10 αδειοδοτημένα κανάλια. Σημειώνεται ότι η μέγιστη τιμή του  $y$ -άξονα αναπαριστά το μέγιστο αριθμό συγκρούσεων (εκφραζόμενες από τον αριθμό μη ορθογωνικών εκχωρημένων καναλιών σε γειτονικούς

χρήστες), όπως αυτές λαμβάνουν χώρα κυρίως στις αρχικές εποχές ανόπτησης. Παρατηρείται ότι όταν η παράμετρος  $\tau$  είναι αρκετά μικρή, και οι δυο προσεγγίσεις συγκλίνουν σε καταστάσεις συστήματος όπου η πιθανότητα συγκρούσεων είναι εξαιρετικά μικρή. Πιο συγκεκριμένα, αν και η πλήρως παράλληλη προσέγγιση ( $\tau = 1$ ) δεν μπορεί να εγγυηθεί σύγκλιση σε βέλτιστες διαρθρώσεις (χαμηλής ενέργειας), η μερικώς παράλληλη προσέγγιση παρουσιάζει σχεδόν όμοια συμπεριφορά με την ακολουθιακή. Λαμβάνοντας υπόψη τα πλεονεκτήματα της παραλληλοποίησης του αλγορίθμου Gibbs Sampling, η ήμι-παράλληλη προσέγγιση εμφανίζεται ως πιο κατάλληλη για πρακτική εφαρμογή στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική. Στις επόμενες υποενότητες, συνεχίζεται η παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης τόσο για την ήμι-παράλληλη προσέγγιση με  $\tau = 0.2$  όσο και για την ακολουθιακή με σκοπό τη σύγκριση των επιδόσεών τους και την επικύρωση της όμοιας συμπεριφοράς τους.

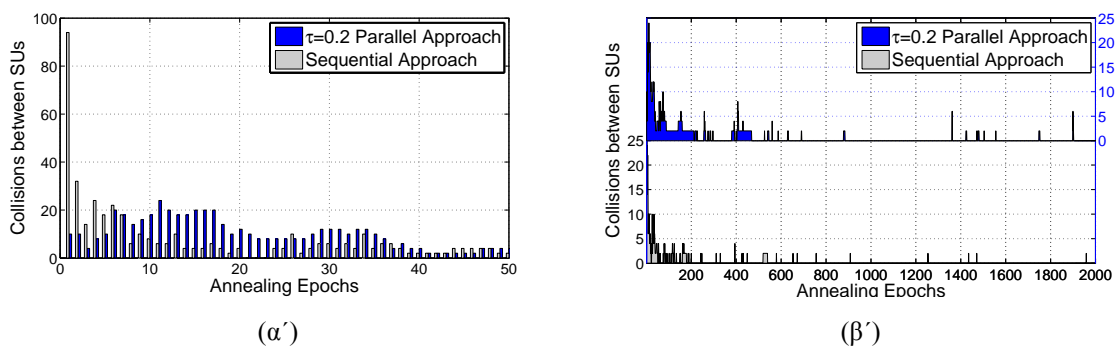


**Σχήμα 4.6:** Σύγκλιση  $\tau$ -παράλληλων αλγορίθμων Gibbs Sampling με κριτήριο την αποφυγή συγκρούσεων.

### 4.5.3 Φυσικό στρώμα προτεινόμενης αρχιτεκτονικής

Στις επόμενες υποενότητες παρουσιάζονται μέσω αποτελεσμάτων προσομοίωσης τα οφέλη του προτεινόμενου διαστρωματικού πλαισίου ως προς τους σχεδιαστικούς στόχους που προσδιορίστηκαν για κάθε στρώμα χωριστά στην ενότητα 4.4.1.

Αρχικά, θεωρούμε την περίπτωση ενός δευτερεύοντος δικτύου πλέγματος  $5 \times 5$ , το οποίο λειτουργεί στη σκιά 10 τυχαία τοποθετημένων πρωτευόντων χρηστών (με  $M = 10$  κανάλια μετάδοσης), στοχεύοντας στην επικύρωση της βελτίωσης της φασματικής χρησιμοποίησης μέσω του αποδοτικού μερισμού φάσματος και της αποφυγής συγκρούσεων που παρέχει ο προτεινόμενος MRF μηχανισμός κατανομής καναλιών. Σημειώνεται ότι για τις ακόλουθες προσομοιώσεις, δίνοντας έμφαση στην επιθυμία για αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ δευτερευόντων χρηστών και στην αποτελεσματική εκμετάλλευση των ευκαιριών μετάδοσης, χρησιμοποιείται η παραμετροποίηση των συναρτήσεων δυναμικού έτσι ώστε  $\lambda_1 = 2$ ,  $\lambda_2 = 3$  και  $\lambda_3 = 5$ .



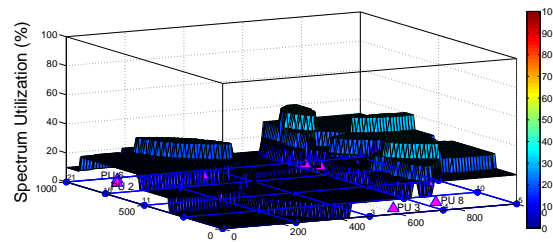
Σχήμα 4.7: Αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ δευτερευόντων χρηστών.

Το Σχήμα 4.7 απεικονίζει την εξέλιξη του ακολουθιακού και του ήμι-παράλληλου αλγόριθμου Gibbs Sampling με κριτήριο επίδοσης την αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ μεταδόσεων δευτερευόντων χρηστών. Συγκεκριμένα, το Σχήμα 4.7α' παρουσιάζει τις συγκρούσεις που δύναται να προκληθούν εξαιτίας εκχώρησης μη ορθογωνικών καναλιών σε γειτονικούς κόμβους (ως προς το ορισμένο MRF συστημα γειτονιάς) για τις πρώτες 50 εποχές ανόπτησης (φάση εξερεύνησης) και το Σχήμα 4.7β' απεικονίζει τη συνολική εικόνα για διάστημα 2000 εποχών ανόπτησης. Διαπιστώνεται ότι με τη πάροδο μιας φάσης εξερεύνησης καταστάσεων, οι δυο αλγόριθμοι συγκλίνουν σε λειτουργία άνευ συγκρούσεων παρέχοντας προσαρμογές στις εκχωρήσεις καναλιών που συμβάλλουν στην υψηλή

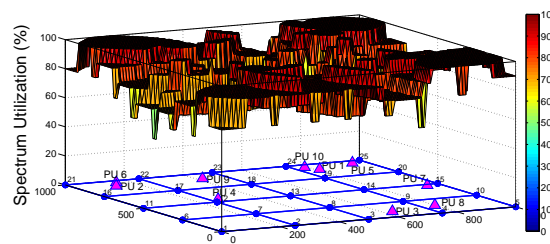
επαναχρησιμοποίηση των φασματικών πόρων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ήμι-παράλληλη προσέγγιση παρουσιάζει όμοια συμπεριφορά σύγκλισης με την ακολουθιακή (χωρίς κόστος συγχρονισμού), ενώ εισάγει μια φάση αργής εκκίνησης όπου οι δευτερεύοντες χρήστες ενεργοποιούνται σταδιακά και επομένως, ο αριθμός των συγκρούσεων διατηρείται μικρός ακόμη και για τις αρχικές εποχές ανόπτησης (Σχήμα 4.7α').

Πρωταρχικός σχεδιαστικός στόχος των δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας αποτελεί η αύξηση του βαθμού χρησιμοποίησης του ραδιοφάσματος μέσω αποτελεσματικής φασματικής διαχείρισης. Το Σχήμα 4.8β' επιδεικνύει τη βελτίωση της φασματικής χρησιμοποίησης στο πεδίο του χώρου με χρήση του ακολουθιακού αλγορίθμου επίλυσης (παρόμοια αποτελέσματα διαπιστώθηκαν και για την ήμι-παράλληλη προσέγγιση με  $\tau = 0.2$ ). Συγκεκριμένα, το Σχήμα 4.8α' παρουσιάζει το επίπεδο φασματικής χρησιμοποίησης (δηλαδή, το ποσοστό χρησιμοποιούμενων καναλιών) για το εξεταζόμενο σενάριο όταν το δευτερεύον δίκτυο είναι ανενεργό, απεικονίζοντας με τον τρόπο αυτό τις μεταβαλλόμενες στο πεδίο του χώρου ευκαιρίες μετάδοσης (φασματικά κενά). Όπως διαπιστώνεται το προτεινόμενο πλαίσιο καθιστά τη λειτουργία του δευτερεύοντος δικτύου αποτελεσματική ως προς το μερισμό φάσματος τόσο μεταξύ δευτερευόντων χρηστών όσο και μεταξύ πρωτεύοντων και δευτερευόντων συστημάτων, καθώς παρατηρείται ραγδαία αύξηση φασματικής χρησιμοποίησης χωρίς την πρόκληση παρεμβολής στους πρωτεύοντες χρήστες.

Ως επιπρόσθετο βήμα, συγκρίνεται η επίδοση της προτεινόμενης διαστρωματικής (ακολουθιακή και ημι-παράλληλη) προσέγγισης με καθαρά μονοεπίπεδες τεχνικές που ακολουθούν την κλασική αρχιτεκτονική - βασισμένης σε επίπεδα - στοίβας πρωτοκόλλων και εστιάζουν στο πρόβλημα κατανομή καναλιών μέσω τεχνικών χρωματισμού ενός γράφου, όπως προτείνονται στην εργασία [70]. Για την ασφαλή εξαγωγή συμπερασμάτων, παρουσιάζονται μεσοτιμημένα αποτελέσματα προσομοιώσεων που αντιστοιχούν σε 10 εκτελέσεις/επαναλήψεις κάθε σεναρίου λειτουργίας, όπου ο αριθμός των πρωτεύοντων και δευτερευόντων χρηστών παραμένει σταθερός, ενώ μεταβάλλεται η δραστηριότητα των αδειοδοτημένων συστημάτων (π.χ. διαφορετική φασματική χρησιμοποίηση εξαιτίας διαφορετικών δεσμευμένων καναλιών εκπομπής από τους πρωτεύοντες χρήστες). Αναλυτικότερα, η εργασία [70] αντιστοιχεί το δευτερεύον δίκτυο σε ένα γράφο, όπου οι κόμβοι του αντιπροσωπεύουν τους δευτερεύοντες χρήστες ενώ κάθε ακμή συνδέει δύο κόμβους οι οποίοι θα πρέπει να χρησιμοποιούν διαφορετικό κανάλι λειτουργίας για την αποφυγή πα-



(α') Ενεργό πρωτεύον δίκτυο - Ανενεργοί δευτερεύοντες χρήστες.



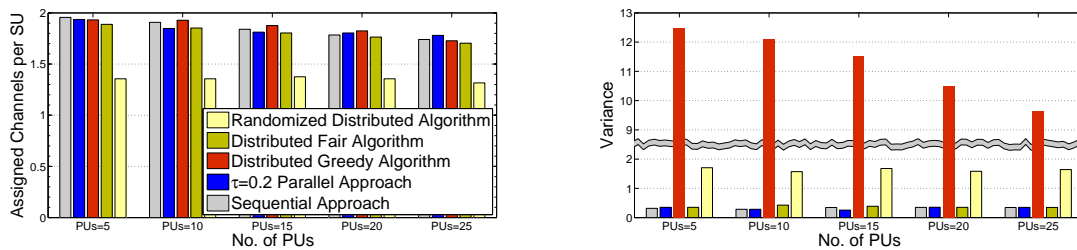
(β') Ενεργό πρωτεύον δίκτυο - Ενεργοί δευτερεύοντες χρήστες (ακολουθιακός αλγόριθμος Gibbs Sampling).

**Σχήμα 4.8:** Φασματική χρησιμοποίηση στο πεδίο του χώρου.

ρεμβολών. Προτείνονται τρεις διαφορετικές κατανεμημένες ευρετικές χρωματισμού του γράφου: ο κατανεμημένος άπληστος αλγόριθμος (distributed greedy algorithm), ο κατανεμημένος δίκαιος αλγόριθμος (distributed fair algorithm) και ο τυχαιοποιημένος κατανεμημένος αλγόριθμος (randomized distributed algorithm). Ο πρώτος αλγόριθμος εκχωρεί κανάλια σε κάθε κόμβο έχοντας ως προτεραιότητα τους κόμβους με τον μικρότερο αριθμό ακμών, ενώ ο δεύτερος μηχανισμός στηρίζεται σε πρώτη φάση στην κατασκευή ενός ακυκλικού γράφου για το εξεταζόμενο δίκτυο και σε δεύτερη φάση σε μια προδιαγεγραμμένη διαδικασία εκχώρησης χρωμάτων. Για την αποφυγή του κόστους σηματοδοσίας που αναπόφευκτα εισάγεται, ο τρίτος αλγόριθμος περιγράφει ένα τυχαιοποιημένο κατανεμημένο μηχανισμό διεκδίκησης καναλιών που βασίζεται στον αλγόριθμο υποχώρησης (backoff algorithm) του προτύπου IEEE 802.11.

Όπως παρατηρείται στα Σχήματα 4.9α' και 4.9β', ο κατανεμημένος άπληστος αλγόριθμος οδηγεί σε υψηλή ανομοιογένεια όσον αφορά τον αριθμό των εκχωρημένων καναλιών ανά κόμβο, ενώ ο τυχαιοποιημένος κατανεμημένος αλγόριθμος εμφανίζει χαμηλή επίδοση ως προς την παρατηρούμενη μέση φασματική χρησιμοποίηση συγκρινόμενος με τις προτεινόμενες προσεγγίσεις ακολουθιακής ή ημι-παράλληλης υλοποίησης. Επιπλέον,





(α') Μέση φασματική χρησιμοποίηση.

(β') Δικαιοσύνη κατά την εκχώρηση καναλιών.

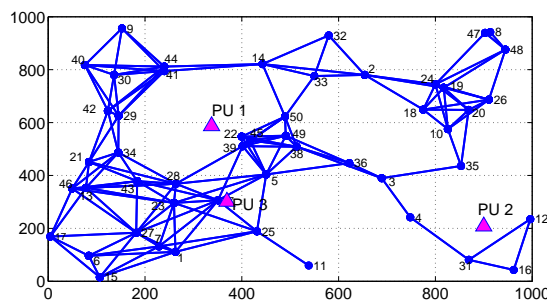
**Σχήμα 4.9:** Σύγκριση προτεινόμενης προσέγγισης με μονοεπίπεδες τεχνικές κατανομής καναλιών.

οι προτεινόμενες προσεγγίσεις εμφανίζουν ελαφρώς καλύτερη επίδοση σε σύγκριση με τον κατανεμημένο δίκαιο αλγόριθμο, ο οποίος ωστόσο απαιτεί μη πρακτικές υποθέσεις για καθαρά πολυβηματικά ασύρματα δίκτυα. Αναλυτικότερα, βασίζεται στην εκ των προτέρων γνώση του γράφου παρεμβολής των δευτερευόντων χρηστών και υποθέτει άμεση ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ των κόμβων που δύναται να παρεμβάλλουν με σκοπό την κατανομή των καναλιών μέσω μιας επαναληπτικής, πλήρως συγχρονισμένης, διαδικασίας. Ωστόσο, στην πράξη δύο δευτερεύοντες χρήστες δύναται να παρεμβάλλουν παρότι βρίσκονται εκτός της περιοχής μετάδοσης  $R_t$ , ενώ η ανάγκη κατασκευής ενός ακυκλικού κατευθυντικού γράφου για το συνολικό δίκτυο, όπως και ο απαιτούμενος συγχρονισμός, συνεπάγεται υψηλότερη επιβάρυνση σηματοδοσίας και υψηλότερο κόστος υλοποίησης ειδικά για μεγάλης κλίμακας δευτερεύοντα δίκτυα.

Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι σε δυσχερέστερα σενάρια (π.χ. όταν οι διαθέσιμοι πόροι είναι περιορισμένοι) οι προτεινόμενοι μηχανισμοί κατανομής καναλιών λειτουργούν αποδοτικότερα εξαιτίας της συνολικότερης διαστρωματικής τους σχεδίασης. Στο Σχήμα 4.9 αυξάνεται προοδευτικά ο αριθμός των ενεργών πρωτευόντων χρηστών με σκοπό τον έμμεσο περιορισμό των διαθέσιμων φασματικών πόρων. Οι εξεταζόμενες τεχνικές της εργασίας [70], ως αμιγώς μονοεπίπεδες ευρετικές τεχνικές χρωματισμού, ενδέχεται να οδηγούν στην αποσύνδεση ορισμένων δευτερευόντων χρηστών μη εκχωρώντας τους κανένα κανάλι λόγω έλλειψης φασματικών πόρων (χρωμάτων). Σε αντίθεση, οι προτεινόμενοι μηχανισμοί μπορούν πάντα να εγγυηθούν τους προδιαγεγραμμένους στόχους (π.χ. τουλάχιστον ένα κανάλι ανά χρήστη) μέσω της άρρηκτης λειτουργίας των υπόλοιπων διαστρωματικών λειτουργιών, π.χ. χρησιμοποίησης ενός σχήματος ελέγχου πρόσβασης στο μέσο για την αποφυγή συγκρούσεων στο επιλεγθέν κανάλι.

#### 4.5.4 MAC στρώμα προτεινόμενης αρχιτεκτονικής

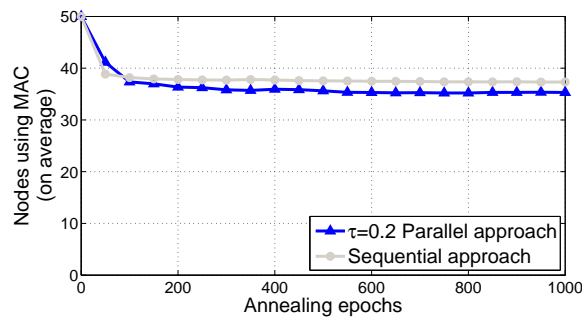
Για την αξιολόγηση του προτεινόμενου υβριδικού μηχανισμού πρόσβασης στο μέσο (υποενότητα 4.4.1.2) εξετάζεται ο ανταγωνισμός πρόσβασης στο μέσο για τυχαία τοπολογία μεγάλου μεγέθους (Σχήμα 4.10), που αντιπροσωπεύει ένα ενδεικτικό δικτυακό σενάριο περιορισμένων/ανεπαρκών φασματικών πόρων. Σημειώνεται ότι εφόσον η RTS/CTS χειραψία εισάγει καθυστέρηση και καταναλώνει πόρους μετάδοσης, η μείωση του αριθμού των δευτερευόντων χρηστών που χρησιμοποιεί σχήμα CSMA/CA βελτιώνει έμμεσα την επίδοση του δικτύου.



Σχήμα 4.10: Εξεταζόμενη τοπολογία τυχαία τοποθετημένων κόμβων.

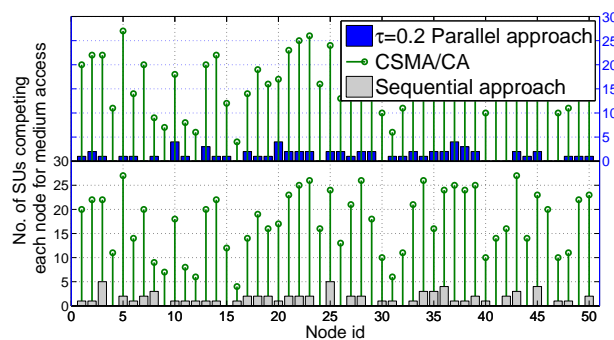
Στο εξεταζόμενο σενάριο, 50 δευτερεύοντες χρήστες και 3 πρωτεύοντες χρήστες μοιράζονται ένα σύνολο 10 αδειοδοτημένων καναλιών (Σχήμα 4.10). Το Σχήμα 4.11 απεικονίζει το μέσο αριθμό κόμβων που αναγκάστηκαν να χρησιμοποιήσουν σχήμα ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (π.χ. CSMA/CA) έως την τρέχουσα εποχή απόκτησης. Παρατηρείται ότι ο αριθμός των κόμβων που εφαρμόζουν μηχανισμό πρόσβασης στο μέσο παρουσιάζει μείωση, ωστόσο, με οριακή μη μηδενική τιμή. Η αιτιολόγηση της ανωτέρω διαπίστωσης προκύπτει από το γεγονός ότι σε μια μεγάλη τυχαία τοπολογία δευτερεύοντος δικτύου με ελάχιστους φασματικούς πόρους υπάρχουν γειτονιές με λίγους κόμβους όπου λειτουργία άνευ συγκρούσεων μπορεί να επιτευχθεί χωρίς την επιβάρυνση του CSMA/CA σχήματος και πυκνές περιοχές όπου ο MAC μηχανισμός είναι αναπόφευκτος.

Ωστόσο, αν και οι περισσότεροι δευτερεύοντες χρήστες αναγκάζονται να χρησιμοποιήσουν ένα σχήμα ελέγχου πρόσβασης στο μέσο, η σύγκλιση σε καταστάσεις συστήματος ελαχίστης ενέργειας μέσω της προτεινόμενης προσέγγισης επιτυγχάνει τελικώς να μειώσει το επίπεδο ανταγωνισμού. Το Σχήμα 4.12 συγκρίνει τις προτεινόμενες υβριδικές προσεγγίσεις με την περίπτωση του παραδοσιακού CSMA/CA που εφαρμόζεται καθολικά



**Σχήμα 4.11:** Μέσος αριθμός κόμβων για τους οποίους απαιτείται η χρήση CSMA/CA μετά από  $t$  εποχές ανόπτησης (τυχαία τοπολογία).

σε όλους τους κόμβους και όλα τα κανάλια μετάδοσης. Παρατηρείται ότι ο αριθμός των ομότιμων κόμβων με τους οποίους ένας δευτερεύον χρήστης ανταγωνίζεται για πρόσβαση στο μέσο στα εκχωρημένα κανάλια (κατακόρυφος άξονας) έχει μειωθεί δραματικά.

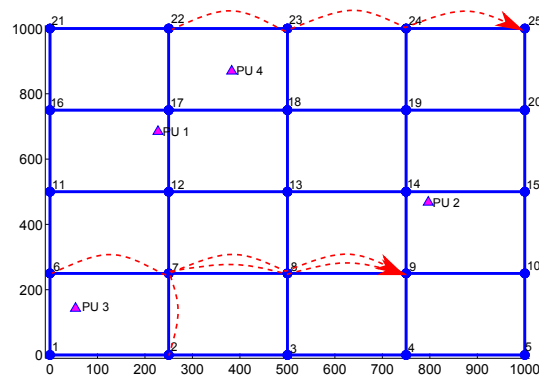


**Σχήμα 4.12:** Ανταγωνισμός πρόσβασης στο μέσο για κάθε δευτερεύον χρήστη.

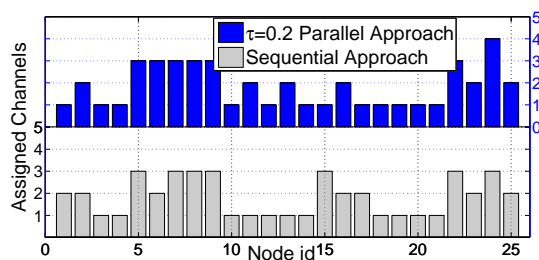
#### 4.5.5 Στρώμα δικτύου προτεινόμενης αρχιτεκτονικής

Στην υποενότητα 4.4.1.3 προτάθηκε ένας μηχανισμός ανατροφοδότησης για την παροχή σταθερών μονοπατιών, ενισχύοντας τους φασματικούς πόρους στις επιλεγμένες διαδρομές των ενεργών δικτυακών ροών. Σημειώνεται ότι μεγαλύτερο πλήθος εκχωρημένων καναλιών σε μια ενεργή ζεύξη του δευτερεύοντος δικτύου συνεπάγεται υψηλότερο ρυθμό διέλευσης (μέσω συνάθροισης φερουσών) και μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα/ ανεκτικότητα ως προς τις αναγκαστικές διακοπές ζεύξης εξαιτίας των μεταβολών στη φασματική δραστηριότητα των πρωτευόντων χρηστών. Στην παρούσα υποενότητα εξετάζεται η μελέτη περίπτωσης ενός δευτερεύοντος δικτύου σε τοπολογία πλέγματος με 3 ενεργές δικτυακές ροές (Σχήμα 4.13) και παρέχονται αποτελέσματα επίδοσης σχετικά με το

στόχο ενίσχυσης των επιλεγμένων μονοπατιών δρομολόγησης μέσω του προτεινόμενου μηχανισμού.



Σχήμα 4.13: Εξεταζόμενη τοπολογία δευτερεύοντος δικτύου με 3 ενεργές ροές.



Σχήμα 4.14: Αριθμός εκχωρημένων καναλιών ανά κόμβο (μετά το πέρας 2000 εποχών ανόπτησης).

Το Σχήμα 4.14 παρουσιάζει την κατανομή καναλιών ανά κόμβο μετά την ολοκλήρωση του αλγορίθμου Gibbs Sampling. Παρατηρείται ότι οι δευτερεύοντες χρήστες που εξυπηρετούν μεγαλύτερο αριθμό ροών, π.χ. οι κόμβοι 7, 8 και 9 τους οποίους διατρέχουν 2 ενεργές ροές, ευνοούνται κατά τη φάση κατανομής καναλιών και επομένως, 3 διαθέσιμα κανάλια εκχωρούνται σε καθένα τους. Ομοίως, τουλάχιστον δυο κανάλια ανά κόμβο εκχωρούνται (όπως ζητείται μέσω της παραμέτρου  $\rho(s)$  στη συνάρτηση δυναμικού της σχέσης (4.5)) για κόμβους με μία ενεργή ροή. Συνεπώς, οι αποφάσεις και οι πολιτικές δρομολόγησης του στρώματος δικτύου λαμβάνονται από κοινού υπόψη στο προτεινόμενο MRF πλαίσιο διαστρωματικής σχεδίασης με σκοπό την παροχή αποτελεσματικής κατανομής καναλιών και τη δημιουργία σταθερών και υψηλής ποιότητας διαδρομών δρομολόγησης. Όπως φαίνεται για μια ακόμη φορά, η ακολουθιακή και η ήμι-παράλληλη προσέγγιση παρουσιάζουν όμοια συμπεριφορά, γεγονός που ενισχύει τη διαπίστωση ότι η ήμι-παράλληλη προσέγγιση του αλγορίθμου Gibbs Sampling μπορεί να χρησιμοποιηθεί

στην πράξη για την επίτευξη αποδοτικότερης σχέσης μεταξύ ποιότητας των λύσεων και πρακτικότητας του εφαρμοζόμενου αλγορίθμου.



## **Κεφάλαιο 5**

# **Μοντελοποίηση και Διαστρωματική Σχεδίαση Κεντροποιημένων Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας**

Τα προσδοκώμενα οφέλη των δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας σε συνδυασμό με τα πλεονεκτήματα της δυναμικής φασματικής πρόσβασης (ενότητα 2.1) αποτέλεσαν κινητήρια δύναμη και ώθησαν, τα τελευταία έτη, προσπάθειες δημιουργίας ευνοϊκών συνθηκών και προδιαγραφών για τη λειτουργία των δευτερευόντων χρηστών. Η αρχικά επιφυλακτική στάση των εθνικών ρυθμιστικών αρχών (NRAs - National Regulatory Authorities) και της βιομηχανίας τηλεπικοινωνιών σχετικά με τη μη ώριμη, ακόμη, τεχνολογία γνωσιακών ραδιοεπικοινωνιών για καθαρά κατανεμημένη λειτουργία (π.χ., έλλειψη εγγυήσεων ακρίβειας της φασματικής ανίχνευσης, ανάγκη επιπρόσθετης έρευνας για τη διασφάλιση της αρμονικής λειτουργίας των αδειοδοτημένων χρηστών, κλπ.) οδήγησαν διεθνείς ρυθμιστικές ομάδες εργασίας και οργανισμούς τυποποίησης στην προώθηση κεντροποιημένων λύσεων με σκοπό την εκμετάλλευση πολιτικών δυναμικής φασματικής πρόσβασης και την άμβλυνση των συνεπειών μιας προδιαγραφόμενης κατάστασης αδιεξόδου στη σχέση ζήτησης και προσφοράς φασματικών πόρων.

Αν και ο ρόλος των δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας, όπως προδιαγράφεται από τις πρώτες ρυθμιστικές κινήσεις [89, 90], είναι περιορισμένος και απέχει από την πλήρη αξιοποίηση της δυναμικής τους, το προωθούμενο κεντροποιημένο πλαίσιο λειτουργίας δευτερευόντων χρηστών μπορεί να βρει άμεση εφαρμογή σε πολυάριθμα δι-

κτυακά σενάρια. Ενδεικτικά, αναφέρονται οι περιπτώσεις μικρής, μεσαίας ή μεγάλης εμβέλειας ασύρματης πρόσβασης σε ζώνες συχνοτήτων VHF και UHF (TVWS - TV White Spaces) και οι γνωσιακές φεμτο-κυψέλες με σκοπό την αποσυμφόρηση των υπαρχόντων μακρο-δικτύων. Υιοθετώντας τις αρχές του προδιαγεγραμμένου κανονιστικού πλαισίου, το τρέχον κεφάλαιο μοντελοποιεί και αναλύει τη λειτουργία ενός δικτύου δευτερευόντων χρηστών στοχεύοντας σε ανοικτά ερευνητικά ζητήματα, όπως η αύξηση της *διεκπεραιωτικότητας δικτύου* (network throughput) και η επίτευξη *σταθερότητας (ευστάθειας) δικτύου* (network stability). Μέσω της προκείμενης μελέτης, προτείνεται μια νέα προσέγγιση λειτουργίας κεντρικοποιημένων δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας που δύναται να συμπληρώσει το υπάρχον κανονιστικό πλαίσιο αξιοποιώντας τα οφέλη της διαστρωματικής σχεδίασης. Κύρια χαρακτηριστικά αποτελούν ο συνδυασμένος μηχανισμός κατανομής καναλιών και ελέγχου ισχύος εκπομπής, ο αποτελεσματικός αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού και δρομολόγησης πακέτων και η ενσωμάτωση/αξιοποίηση ετερογενών πληροφοριών με σκοπό τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας.

## 5.1 Κίνητρα, συνεισφορά και χαρακτηριστικά της προτεινόμενης προσέγγισης

Με επίκεντρο τη διευκόλυνση της λειτουργίας μη αδειοδοτημένων χρηστών σε ζώνες συχνοτήτων VHF και UHF, ρυθμιστικές αρχές (όπως οι FCC [89], Ofcom [90], κλπ.) και οργανισμοί τυποποίησης (π.χ. IEEE) έχουν πρόσφατα υιοθετήσει και προωθήσει ένα κεντρικοποιημένο πλαίσιο λειτουργίας δευτερευόντων χρηστών, μη αδειοδοτημένης χρήσης του φάσματος και υποβοηθούμενο από κεντρικές βάσεις δεδομένων φάσματος (spectrum databases) [89, 90]. Οι συγκεκριμένες βάσεις δεδομένων δύναται να παρέχουν ανά πάσα στιγμή πληροφορίες σχετικά με τις διαθέσιμες φασματικές οπές ανά γεωγραφική περιοχή, καθώς και λεπτομέρειες/οδηγίες οι οποίες αφορούν τις επιτρεπόμενες μεταδόσεις δευτερευόντων συστημάτων πάνω από κάθε φασματική ζώνη, π.χ. παρέχοντας μια σταθερή μέγιστη ισχύ εκπομπής εντός γεωγραφικής ζώνης αποκλεισμού (όπως προδιαγράφεται σύμφωνα με τους κανονισμούς της FCC [89]) ή προσδιορίζοντας ένα μέγιστο επιτρεπτό όριο EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power) ανά συσκευή (όπως ορίζει ο κανο-



νισμός της Ofcom [90]).

Οι πρόσφατες ρυθμιστικές δραστηριότητες, συνεπώς, έχουν σχηματίσει ένα πρώιμο βιώσιμο κεντρικοποιημένο πλαίσιο λειτουργίας δευτερευόντων δικτύων δίνοντας έμφαση στην προστασία των υπαρχόντων αδειοδοτημένων συστημάτων από τις μεταδόσεις των δευτερευόντων χρηστών. Το γεγονός αυτό αποτελεί τη σημαντικότερη τροχοπέδη για την πρακτική αποδοχή και εφαρμογή της τεχνολογίας γνωσιακών ραδιοεπικοινωνιών και εξηγεί τη βαρύτητα που έχει δοθεί σε ρυθμιστικό επίπεδο προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση. Περιγράφει, ωστόσο, τη μία όψη των υφισταμένων προκλήσεων στον τομέα της έρευνας των δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας, αφήνοντας χώρο σε εργασίες που υιοθετούν την απαίτηση για ανεμπόδιστη λειτουργία των αδειοδοτημένων υπηρεσιών και εστιάζουν στη βελτίωση των επιδόσεων του δευτερεύοντος δικτύου. Βασικό κίνητρο, επομένως, της παρούσας μελέτης αποτελεί η καταρχήν υιοθέτηση του προδιαγεγραμμένου, υποβοηθούμενου από βάσεις δεδομένων φάσματος, πλαισίου λειτουργίας δευτερευόντων χρηστών και εν συνεχεία, η ανάλυσή του και ο εμπλουτισμός του με συμπληρωματικά στοιχεία που στοχεύουν στη βελτιστοποίηση του δευτερεύοντος δικτύου.

Η βέλτιστη λειτουργία των δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας είναι, παράλληλα, συνυφασμένη με την αξιοποίηση κάθε είδους εξωτερικού ερεθίσματος ή πληροφορίας που θέτει σε κίνηση τις λειτουργικές μονάδες του γνωσιακού κύκλου (Σχήμα 2.1). Εφόσον όμως η ποικιλότητα των πηγών πληροφοριών συνεχώς αυξάνει, οι δευτερεύοντες χρήστες οφείλουν να παρακολουθούν, αναλύουν και αξιοποιούν επιπρόσθετες ετερογενείς πληροφορίες χωρίς να περιορίζονται αποκλειστικά και μόνο σε άμεσα εκμεταλλεύσιμες λειτουργικές παραμέτρους, π.χ. σε δεδομένα προερχόμενα από τη διαδικασία φασματικής ανίχνευσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εναλλακτικής πηγής πληροφοριών συνιστούν τα ραγδαίως αναπτυσσόμενα κοινωνικά δίκτυα μέσω των οποίων πληθώρα πληροφοριών μπορούν να αποκτηθούν, όπως για παράδειγμα χαρακτηριστικά και προτιμήσεις των γειτονικών χρηστών, συστάσεις ή φήμες που αφορούν την τρέχουσα θέση μιας συσκευής, κλπ. Για το λόγο αυτό, επιδιώκεται η πραγματοποίηση εμπειριστατωμένων ολοκληρωμένων μελετών που εξετάζουν τη σφαιρικότητα του προβλήματος και η πρόταση/σχεδίαση λύσεων που παρέχουν ευέλικτους μηχανισμούς ικανούς να ενσωματώνουν και να αξιοποιούν πληροφορίες οι οποίες προέρχονται τόσο από τα πολλαπλά στρώματα μιας στοιβάς πρωτοκόλλων όσο και από το κοινωνικό στρώμα με απώτερο σκοπό τη βελτίωση της λει-

τουργίας του δευτερεύοντος δικτύου.

Έχοντας ως κίνητρο τις ανωτέρω κατευθύνσεις, προτείνεται μέσω αναλυτικής μελέτης μια ολοκληρωμένη κεντρικοποιημένη προσέγγιση η οποία συνεισφέρει στη συνδυασμένη διαστρωματική επίτευξη αντικειμενικών στόχων του δευτερεύοντος δικτύου διασφαλίζοντας ταυτόχρονα τη σταθερότητά του. Αναλυτικότερα, βασιζόμενοι στη θεωρία των τυχαίων πεδίων Markov (MRFs) καθώς και σε χαρακτηριστικά της τεχνικής Back-pressure [91], εισάγεται στις επόμενες ενότητες ένας διαστρωματικός μηχανισμός βελτιστοποίησης κεντρικοποιημένων δευτερευόντων δικτύων - συμβατών με τις πρόσφατες ρυθμιστικές εξελίξεις - ελέγχοντας την κατανομή καναλιών, την ισχύ εκπομπής και προδιαγράφοντας, παράλληλα, το χρονοπρογραμματισμό και τη δρομολόγηση των μεταδιδόμενων πακέτων. Επιπλέον, αναγνωρίζοντας την ετερογενή φύση των πληροφοριών που ένας χρήστης μπορεί να αντλήσει, η προτεινόμενη προσέγγιση επεκτείνεται συμπεριλαμβάνοντας στο αναλυτικό της μοντέλο τη δυνατότητα ενσωμάτωσης πληροφοριών που προέρχονται από το κοινωνικό στρώμα στοχεύοντας, κατ' επέκταση, στη μεθοδική και αποτελεσματική αξιοποίησή τους.

## 5.2 Θεωρητικό και τεχνικό υπόβαθρο

Για την αναλυτική μελέτη ενός δικτύου δευτερευόντων χρηστών και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του είναι ανάγκη να ορισθούν εξ αρχής - πριν τη μοντελοποίηση του δικτύου - ορισμένες βασικές έννοιες που αφορούν περιορισμούς και θεμελιώδεις αρχές ενός γενικού δικτύου υπολογιστών. Ως μεταβλητές ελέγχου του δικτύου χαρακτηρίζονται οι παράμετροι του συστήματος που μπορούν να τροποποιηθούν, αποφασιστούν ή προσαρμοστούν αποκλειστικά και μόνο μέσω των εσωτερικών μηχανισμών λειτουργίας του, ενώ διακρίνονται από εξωγενείς παραμέτρους οι οποίες επηρεάζουν την επικοινωνία χωρίς να δύναται ο πλήρης έλεγχός τους, π.χ. η τρέχουσα κατάσταση της τοπολογίας του δικτύου. Η επιτυχία, συνεπώς, μιας προτεινόμενης δικτυακής προσέγγισης έγκειται στον αποτελεσματικό τρόπο σχεδίασης των μηχανισμών που ρυθμίζουν κατάλληλα τις μεταβλητές ελέγχου καθορίζοντας επακόλουθα την αποδοτικότητα του συνολικού δικτύου.

Ως *περιοχή χωρητικότητας* (capacity region) ενός δικτύου ορίζεται το σύνολο των ρυθμών κίνησης, ή διαφορετικά των επιτρεπτών ρυθμών αφίξεων δεδομένων, που δύναται να υποστηριχθεί ευσταθώς από τους κόμβους του δικτύου λαμβάνοντας υπόψη όλες τις δυ-

νατές στρατηγικές επιλογής μεταβλητών ελέγχου που επηρεάζουν τη δρομολόγηση, το χρονοπρογραμματισμό και τη διαδικασία κατανομής δικτυακών πόρων. Η *ευστάθεια του δικτύου* (network stability) επιτυγχάνεται εφόσον όλες οι μεμονωμένες ουρές αναμονής των δικτυακών κόμβων είναι σταθερές, όπου μια ουρά αναμονής καλείται ισχυρά σταθερή εάν

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{\tau=0}^{t-1} E(Q(\tau)) < \infty$$

με  $Q(\tau)$  να αναπαριστά το τρέχον μήκος της ουράς (δηλαδή, το πλήθος των πακέτων που αναμένουν να εξυπηρετηθούν) [92].

Για τη μελέτη της ευστάθειας δικτύου μπορεί να χρησιμοποιηθεί η θεωρία της *ευστάθειας κατά Lyapunov* (Lyapunov stability) [92, 93] σύμφωνα με την οποία ένα σύστημα διακριτού χρόνου είναι κατά Lyapunov ευσταθές εάν υπάρχει βαθμωτή θετικά ορισμένη συνάρτηση  $L(t)$ , η οποία καλείται και ως *συνάρτηση Lyapunov* (Lyapunov function), της οποίας η χρονική μεταβολή  $\Delta(t) = L(t+1) - L(t)$  είναι συνάρτηση αρνητικά ορισμένη. Η συνάρτηση Lyapunov θα μπορούσε να ειπωθεί σαν μια γενίκευση της αποθηκευμένης εσωτερικής ενέργειας του συστήματος από τις απώλειες της οποίας μπορεί να συναχθεί η ευστάθεια. Για παράδειγμα, ορίζοντας ως συνάρτηση Lyapunov σε ένα σύστημα  $N$  ουρών αναμονής μια συνάρτηση τετραγωνικής μορφής που εκφράζει το βαθμό συμφόρησης των ουρών, π.χ.  $L(Q(t)) = \sum_{i=1}^N Q_i(t)^2$ , συνεπάγεται ότι λαμβάνει χαμηλές τιμές εφόσον όλες οι ουρές αναμονής του συστήματος έχουν μικρό μήκος και υψηλές τιμές εάν έστω και μια ουρά έχει μεγάλο μήκος. Για να χαρακτηριστεί, λοιπόν, ένα δίκτυο ευσταθές θα πρέπει η χρονική μεταβολή  $\Delta(t) = L(t+1) - L(t)$  να είναι αρνητική κάθε φορά που το άθροισμα των μηκών των ουρών αναμονής των κόμβων του δικτύου αυξάνει αρκετά. Ειδικότερα, αποδεικνύεται [92, 93] ότι εάν υπάρχουν σταθερές  $B > 0$ ,  $\epsilon > 0$  έτσι ώστε για κάθε διακριτή χρονική στιγμή  $t$  να ισχύει

$$E \left( L(Q(t+1)) - L(Q(t)) \mid Q(t) \right) \leq B - \epsilon \sum_{i=1}^N Q_i(t),$$

τότε το δίκτυο είναι ισχυρά ευσταθές.

Οι μεταβλητές ελέγχου ενός συστήματος, και εν προκειμένω ενός δικτύου, θα πρέπει να καθοδηγούνται μέσω κατάλληλων μηχανισμών έτσι ώστε να βελτιστοποιούν την επίδοση των μετρικών του δικτύου και ταυτόχρονα να επηρεάζουν τις μεταβολές της συνάρτησης Lyapunov οδηγώντας το δίκτυο σε ευσταθή λειτουργία. Συγκεκριμένα, ως βέλ-

πιστης διεκπεραιωτικότητας (throughput optimal) αλγόριθμος ή μηχανισμός ελέγχου χαρακτηρίζεται κάθε δικτυακή προσέγγιση που μπορεί να εξυπηρετεί το σύνολο των ρυθμών αφίξεων που ανήκουν στην περιοχή χωρητικότητας του δικτύου χωρίς να παραβιάζει τους κανόνες ευστάθειας δικτύου [94, 95]. Ειδικότερα, μπορεί ναδειχθεί [92] ότι στρατηγικές λήψης αποφάσεων που επιλέγουν με άπληστο τρόπο τη μετάδοση πακέτων σε μη παρεμβαλλόμενες ζεύξεις μέγιστης χωρητικότητας μπορούν εν τέλει να οδηγήσουν σε αστάθεια και υπο-βέλτιστη διεκπεραιωτικότητα (ρυθμοαπόδοση) αν δεν προηγηθεί η μη ρεαλιστική υπόθεση ότι όλες οι ουρές αναμονής του συστήματος έχουν πάντοτε διαθέσιμα πακέτα προς μετάδοση. Αντίθετα, χαρακτηριστικό παράδειγμα αποδεδειγμένων αλγορίθμων βέλτιστης διεκπεραιωτικότητας αποτελούν μηχανισμοί ελέγχου που βασίζονται στην τεχνική Backpressure [91, 92] σύμφωνα με την οποία οι αποφάσεις κατανομής πόρων στηρίζονται μεν στην παρατηρούμενη τοπολογία του δικτύου, αλλά και στις τρέχουσες διαφορές των μεγεθών των ουρών αναμονής των εκάστοτε κόμβων. Η υλοποίηση του αλγορίθμου Backpressure βασίζεται στην επίλυση ενός κεντρικοποιημένου προβλήματος μέγιστης προσαρμογής βαρών (MWM - Maximum Weight Matching) μη πολυωνυμικής πολυπλοκότητας (NP-hard πρόβλημα) [96] που στην πράξη εξαρτάται από τον αριθμό των μέγιστων ανεξάρτητων συνόλων (maximal independent sets) του εκάστοτε δικτυακού γράφου. Αξίζει να σημειωθεί ότι στοχεύοντας σε μειωμένη πολυπλοκότητα έχουν προταθεί στη σύγχρονη βιβλιογραφία διάφορα υπο-βέλτιστα σχήματα τα οποία προσεγγίζουν τη βέλτιστη λύση του MWM προβλήματος, π.χ. [95, 96].

### 5.3 Μοντέλο συστήματος

Ακολουθώντας τις τελευταίες εξελίξεις στον τομέα της δυναμικής φασματικής πρόσβασης, και συγκεκριμένα τις πρόσφατες προσεγγίσεις εκμετάλλευσης των φασματικών οπών στις ραδιοηλεκτρονικές συχνότητες (TVWS)[89, 90], υιοθετείται ένα μοντέλο δευτερεύοντος δικτύου υποβοηθούμενο από κεντρικές βάσεις δεδομένων φάσματος. Βασικός ρόλος των βάσεων δεδομένων φάσματος αποτελεί η συλλογή πληροφοριών κατάληψης του ραδιοφάσματος και η ενημέρωση/καθοδήγηση των δευτερευόντων χρηστών με σκοπό την ανεμπόδιστη λειτουργία των ήδη αδειοδοτημένων υπηρεσιών, π.χ., των δεκτών επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης (DTT - Digital Terrestrial Television) και των PMSE (Programme-Making and Special-Events) συσκευών.

Έστω  $N$  δευτερεύοντες χρήστες υπό ένα μοντέλο μη αδειοδοτημένης ευκαιριακής φασματικής πρόσβασης σε  $M$  ετερογενή κανάλια, όπου κάθε κανάλι  $m$  χαρακτηρίζεται από την κεντρική συχνότητα  $f_m$  και το εύρος ζώνης  $W_m$ . Οι δευτερεύοντες χρήστες συνυπάρχουν με πρωτεύοντα συστήματα, ενώ παράλληλα επικοινωνούν με μια κεντρική οντότητα (βάση δεδομένων φάσματος) που λειτουργεί ως ελεγκτής δικτύου και παρέχει σε κάθε χρήστη συγκεκριμένες λειτουργικές παραμέτρους, δηλαδή τη λίστα των διαθέσιμων καναλιών (φασματικά κενά) και το μέγιστο επιτρεπτό όριο ισχύος εκπομπής ανά κανάλι (εξαρτώμενο από τη γεωγραφική θέση του δευτερεύοντος χρήστη και τη χωρικά εξαρτώμενη δραστηριότητα των πρωτευόντων χρηστών). Η μέγιστη επιτρεπτή τιμή ισχύος εκπομπής για το κανάλι  $m$  στην οποία ο δευτερεύον χρήστης  $i$  μπορεί να εκπέμψει, χωρίς να δημιουργεί παρεμβολή σε πρωτεύοντα συστήματα, συμβολίζεται ως  $P_{i,m}$ .

Για τη βελτιστοποίηση της επίδοσης του δευτερεύοντος δικτύου επεκτείνουμε ακολούθως το ήδη προδιαγεγραμμένο κεντρικοποιημένο πλαίσιο ευκαιριακής φασματικής πρόσβασης λαμβάνοντας, παράλληλα, υπόψη τους κανονιστικούς περιορισμούς. Υποθέτουμε ότι κάθε δευτερεύον χρήστης  $i$  είναι ικανός να επιλέγει ένα κανάλι λειτουργίας  $m$  και να εφαρμόζει έλεγχο ισχύος υπό τον περιορισμό της μέγιστης τιμής  $P_{i,m}$ , συμβάλλοντας στη δημιουργία ευέλικτων τοπολογιών και στον αποδοτικό μερισμό φάσματος μεταξύ των μη αδειοδοτημένων ομότιμων χρηστών. Για την εφαρμογή ελέγχου ισχύος θεωρείται ότι το εύρος της μέγιστης επιτρεπόμενης ενέργειας διακριτοποιείται σε  $L$  στάθμες και υποδηλώνεται για ένα κόμβο  $i$  μέσω της παραμέτρου  $a_P^{(i)} \in \{a_{P_1}, \dots, a_{P_L}\}$  όπου  $a_P^{(i)}$  συμβολίζει την ποσοστιαία τιμή (π.χ.,  $a_{P_1} = 0\%$ ,  $a_{P_L} = 100\%$ ) του μέγιστου ορίου  $P_{i,m}$ . Επομένως, χρησιμοποιώντας το απλοποιημένο μοντέλο απωλειών διαδρομής για διάδοση μη-οπτικής επαφής [97] και συμβολίζοντας ως  $P_R^{thr}$  την ευαισθησία δέκτη του δευτερεύοντος κόμβου, το εύρος (εμβέλεια) μετάδοσης  $R_{T_i}^m$  του κόμβου  $i$  για το κανάλι  $m$  μπορεί να εκτιμηθεί ως

$$R_{T_i}^m = d_0 \left[ \frac{a_P^{(i)} P_{i,m} G_t G_r}{P_R^{thr}} \cdot \left( \frac{c_0}{4\pi d_0 f_m} \right)^2 \right]^{\frac{1}{\eta}} \quad (5.1)$$

όπου  $c_0$  η ταχύτητα του φωτός,  $d_0$  η LOS (Line-of-Sight) απόσταση αναφοράς (απόσταση μέχρι την οποία ισχύει διάδοση οπτικής επαφής) και  $\eta$  ο εκθέτης των απωλειών διαδρομής. Τα κέρδη των κεραιών πομπού και δέκτη συμβολίζονται ως  $G_t$  και  $G_r$ , αντιστοίχως, ενώ χάριν ευκολίας θεωρούνται για τη συνέχεια ίσα με τη μονάδα.

Οι συγκρούσεις πακέτων μεταξύ μεταδόσεων δευτερευόντων χρηστών μπορεί να συμ-

βούν όταν δύο ή περισσότερα πακέτα λαμβάνονται την ίδια χρονική στιγμή. Ωστόσο, εξαιτίας του φαινομένου σύλληψης πακέτων διαφορετικής στάθμης ισχύος (capture effect), είναι δυνατή η συνύπαρξη επικαλυπτόμενων μεταδόσεων μεταξύ δευτερευόντων χρηστών. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση δυο επικαλυπτόμενων μεταδόσεων, ένας δευτερεύον χρήστης μπορεί να λάβει ένα πακέτο χωρίς σύγκρουση εφόσον ο λόγος σήματος προς παρεμβολή είναι αρκετά μεγάλος για την επιτυχή αποκωδικοποίηση της εξελισσόμενης μετάδοσης που τον αφορά. Ως μοντέλο παρεμβολών υιοθετείται για τη συνέχεια το *μοντέλο κατωφλίου σύλληψης* (capture threshold model) [98], σύμφωνα με το οποίο ένας δευτερεύον χρήστης  $i$  επικοινωνεί επιτυχώς με έναν ομότιμο κόμβο  $j$  στο κανάλι  $m$ , εφόσον

$$a_P^{(i)} \cdot P_{i,m} \cdot G_{i,j}^{(m)} \geq P_R^{thr} \text{ and } \frac{a_P^{(i)} \cdot P_{i,m} \cdot G_{i,j}^{(m)}}{a_P^{(i')} \cdot P_{i',m} \cdot G_{i',j}^{(m)}} \geq C_p^{thr} \quad \forall i' \neq i \quad (5.2)$$

όπου  $C_p^{thr}$  συμβολίζει το κατώφλι σύλληψης πάνω από το οποίο η παρεμβολή από κάποιον πιθανό πομπό  $i'$  μπορεί να αγνοηθεί θεωρώντας την ανίσχυρη για την πρόκληση σύγκρουσης πακέτων. Ως  $G_{i,j}^{(m)}$  αναπαριστάται το κέρδος καναλιού για τη ζεύξη  $(i, j)$  στο κανάλι  $m$ , δηλαδή

$$G_{i,j}^{(m)} = G_t \cdot G_r \cdot \left( \frac{c}{4\pi d_0 f_m} \right)^2 \cdot \left( \frac{d_0}{d_{ij}} \right)^\eta, \quad (5.3)$$

όπου  $d_{ij}$  αποτελεί την Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των κόμβων  $i$  και  $j$ .

Σχετικά με την κίνηση των δεδομένων του δευτερευόντος δικτύου θεωρείται ένας πεπερασμένος αριθμός ροών, δηλαδή ζευγών κόμβων πηγής-προορισμού, όπου τα πακέτα μεταδίδονται υπό ένα σύστημα διαίρεσης χρόνου. Σε κάθε χρονική θυρίδα  $t$  παράγονται νέα δεδομένα ενώ νέες αποφάσεις μετάδοσης λαμβάνονται για την παράδοση των πακέτων στους κατάλληλους προορισμούς. Ειδικότερα, υποθέτουμε ότι νέα δεδομένα παράγονται εξωγενώς (από τα υψηλότερα στρώματα της στοίβας πρωτοκόλλων, π.χ. στρώμα εφαρμογής) σε κάθε κόμβο  $i$  με μέσο ρυθμό  $\lambda_i^c$ , όπου  $\lambda_i^c \neq 0$  εάν ο κόμβος  $i$  αποτελεί πηγή πακέτων για τη ροή  $c$ . Ο στιγμιαίος αριθμός πακέτων που παράγονται από τον κόμβο  $i$  στη χρονική θυρίδα  $t$  για τη ροή  $c$  συμβολίζεται με  $A_i^c(t)$ , όπου  $\mathbb{E}[A_i^c(t)] = \lambda_i^c$ . Σημειώνεται ότι οι ρυθμοί αφίξεων θεωρούνται άνω φραγμένοι, δηλαδή  $\lambda_i^c(t) \leq \lambda_{\max}$ ,  $\forall i, c$ . Το σύνολο των πηγών για μια ροή  $c$  αναπαριστάται ως  $S(c)$  και  $A_i^c(t) = 0$ ,  $\forall t, i \notin S(c)$ . Επιπλέον, η χωρητικότητα (αριθμός μεταδιδόμενων πακέτων) σε κάθε δευτερεύουσα ζεύξη  $s = (i, j)$

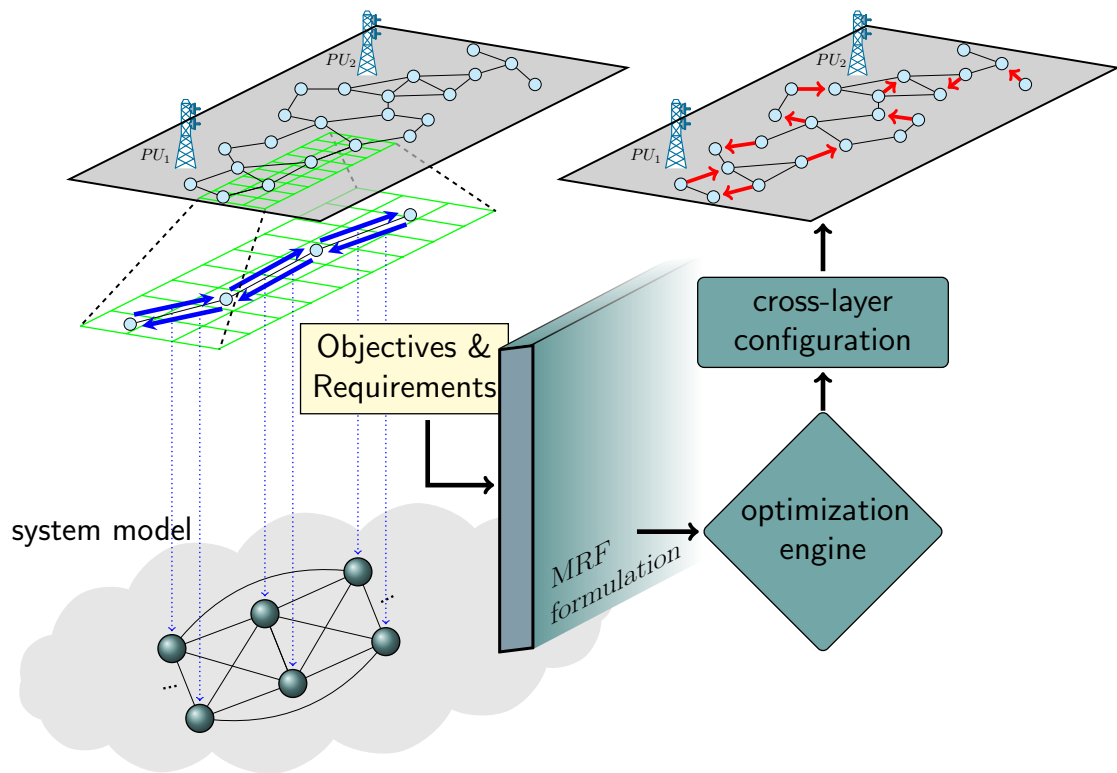
στο χρόνο  $t$  συμβολίζεται ως  $\mu_{i,j}(t)$ , ενώ ισχύει ότι

$$\mu_{i,j}(t) \leq \mu_{i,j}^{\max} = \max_m \left\{ \left\lfloor \frac{W_m}{Pkt_s} \cdot \log_2 (1 + SNR_s) \right\rfloor \right\} \quad (5.4)$$

όπου  $Pkt_s$  το μέγεθος των πακέτων και  $SNR_s = \frac{P_{i,m} \cdot G_{i,j}^{(m)}}{N_0 + N_P}$ .  $N_0$  αναπαριστά το θόρυβο βάθους (background noise) και  $N_P$  το συνολικό προσθετικό θόρυβο (παρεμβολή) εξαιτίας της λειτουργίας των πρωτευόντων συστημάτων. Ωσαύτως, ως  $\mu_{i,j}^c(t)$  δηλώνεται η κίνηση πακέτων, αποκλειστικά για τη ροή  $c$ , στη ζεύξη  $s = (i, j)$ . Τα αφικνούμενα πακέτα για κάθε δευτερεύοντα χρήστη  $i$ , εφόσον δεν προωθούνται, αποθηκεύονται σε ξεχωριστές ανά ροή ουρές αναμονής, συμβολιζόμενες ως  $Q_i^c$ , όπου  $Q_i^c(t)$  το μέγεθος (μήκος) της ουράς στη χρονική θυρίδα  $t$ . Εάν ο κόμβος  $i$  αποτελεί τον προορισμό για μια ροή  $c$ , τότε ισχύει ότι  $Q_i^c(t) = 0, \forall t$ .

Η προτεινόμενη μοντελοποίηση του δευτερεύοντος δικτύου, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1, βασίζεται στη θεωρία των MRFs (Παράρτημα Α') λαμβάνοντας υπόψη τις χωρικές εξαρτήσεις μεταξύ των δευτερευόντων ζεύξεων. Συγκεκριμένα, η ενεργοποίηση μιας δευτερεύουσας ζεύξης επιδρά άμεσα στην τοπική γειτονιά των αντίστοιχων κόμβων και προκαλεί, μέσω αναπροσαρμογών, αλυσιδωτές επιπτώσεις στο υπόλοιπο δευτερεύον δίκτυο καθορίζοντας τη συνολική επίδοσή του. Έτσι, λοιπόν, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1, κάθε δυνατή κατευθυνόμενη δευτερεύουσα ζεύξη αντιστοιχίζεται με ένα MRF σημείο και το πρόβλημα βέλτιστης κατανομής πόρων μπορεί να ειπωθεί ως ένας πρόβλημα ελαχιστοποίησης της ενέργειας του συστήματος. Η σχεδίαση και διατύπωση του τελικού MRF προβλήματος εξαρτάται από τις απαιτήσεις και τους στόχους του δευτερεύοντος δικτύου, όπως θα περιγραφεί αναλυτικά στην επόμενη ενότητα, ενώ ειδικές τεχνικές ελαχιστοποίησης της καθολικής ενέργειας συστήματος μπορούν να αξιοποιηθούν για την εύρεση των βέλτιστων καταστάσεων του συστήματος (optimization engine). Με τον τρόπο αυτό η συνολική λειτουργία του δευτερεύοντος δικτύου μπορεί να αναλυθεί μέσω της θεωρίας των MRFs παρέχοντας, εν τέλει, το μηχανισμό εκείνο που ρυθμίζει τις διαστρωματικές μεταβλητές ελέγχου του δικτύου και επιδρά άμεσα στην απόδοσή του.

Αναλυτικότερα, βασιζόμενοι στη μέγιστη ακτίνα μετάδοσης  $R_{T_i}^{(max)}$  κάθε δευτερεύοντος χρήστη  $i$ , η οποία μπορεί να εκτιμηθεί μέσω της σχέσης (5.1), ορίζεται ως  $\mathcal{K}$  το σύνολο με πληθάρημο  $K$  όλων των δυνατών κατευθυνόμενων συνδέσεων μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών. Κάθε ζεύξη  $s = (i, j) \in \mathcal{K}$  αντιστοιχίζεται με ένα MRF σημείο (Σχήμα 5.1) και αναπαριστά την κατευθυνόμενη σύνδεση μεταξύ του πομπού  $i$  και του



Σχήμα 5.1: Μοντέλο συστήματος της προτεινόμενης κεντριοποιημένης προσέγγισης.

δέκτη  $j$ . Η κατάσταση ενός MRF σημείου (ή εναλλακτικά μιας δευτερεύουσας ζεύξης)  $s = (i, j)$  εκφράζεται από το ζεύγος  $\langle m, a_P \rangle_s$  με χώρο καταστάσεων  $\Lambda$  μεγέθους  $M \times L$ . Μέσω της κατάστασης  $\langle m, a_P \rangle_s$  αναπαριστάται το επιλεγθέν κανάλι  $m$  και η πραγματική ισχύς εκπομπής  $a_P \times P_{i,m}$  του κόμβου  $i$ . Συνεπώς, για παράδειγμα, το σημείο  $s = (i, j)$  με κατάσταση  $\langle 1, 50\% \rangle$  υποδηλώνει ότι ο κόμβος  $i$  μεταδίδει προς τον κόμβο  $j$  στο κανάλι 1 (δηλαδή, στη συχνότητα  $f_1$  με εύρος ζώνης  $W_1$ ) με ισχύ εκπομπής ίση με  $0.5 \times P_{i,1}$ . Περισσότερες πληροφορίες για τη θεωρία των MRFs μπορούν να βρεθούν στο Παράρτημα Α'.

## 5.4 Σχεδίαση και ανάλυση της προτεινόμενης διαστρωματικής προσέγγισης

Κύρια ιδιότητα των τυχαίων πεδίων Markov αποτελεί η εξάρτηση της κατάστασης ενός MRF σημείου αποκλειστικά και μόνο από τις καταστάσεις των άμεσων γειτόνων του σε ένα σύστημα γειτονιάς  $\mathcal{G}$ , όπως εκφράζεται μέσω των δεσμευμένων πιθανοτήτων



(local characteristics) της σχέσης (A'.1). Για τη σχεδίαση της προτεινόμενης προσέγγισης ορίζεται το σύστημα γειτονιάς  $\mathcal{G} = \{\mathcal{G}_s\}_{s \in \mathcal{K}}$  σύμφωνα με το οποίο δύο σημεία (δηλαδή, δυο κατευθυνόμενες ζεύξεις του δευτερεύοντος δικτύου - Σχήμα 5.1)  $s$  και  $s'$  είναι MRF γείτονες αν και μόνο αν η ταυτόχρονη λειτουργία τους είναι δυνατόν να προκαλέσει συγκρούσεις πακέτων μεταξύ δευτερευόντων χρηστών. Συνεπώς, η MRF γειτονιά ενός σημείου  $s$  εκφράζεται ως εξής

$$\mathcal{G}_s = \left\{ \begin{array}{l} s' = \{i', j'\} : \quad s' \neq s \text{ and} \\ \left( \begin{array}{l} i = i' \text{ or } i = j' \text{ or } i' = j \text{ or } j = j' \\ \text{or} \\ \min_{m : P_{i,m} \cdot G_{i,j}^{(m)} \geq P_R^{thr}} \left( \frac{P_{i,m} \cdot G_{i,j}^{(m)}}{P_{i',m} \cdot G_{i',j}^{(m)}} \right) < C_p^{thr} \\ \text{or} \\ \min_{m : P_{i',m} \cdot G_{i',j'}^{(m)} \geq P_R^{thr}} \left( \frac{P_{i',m} \cdot G_{i',j'}^{(m)}}{P_{i,m} \cdot G_{i,j}^{(m)}} \right) < C_p^{thr} \end{array} \right) \end{array} \right\} \quad (5.5)$$

Όμοια με το Κεφάλαιο 3 εξετάζεται η κλάση των ανά ζεύγος γειτονικών συναρτήσεων δυναμικού (pairwise, nearest-neighbor potentials) [80, 81] με συνάρτηση ενέργειας που εκφράζεται μέσω της σχέσης (4.1). Για τη σχεδίαση της προτεινόμενης προσέγγισης, καθορίζονται στη συνέχεια οι συναρτήσεις δυναμικού πρώτης τάξης  $V_{\{s\}}^{(1)}$  και δεύτερης τάξης  $V_{\{s,s'\}}^{(2)}$  με σκοπό την καταγραφή μέσω της συνάρτησης ενέργειας  $U(\omega)$  των συνεισφορών των διαφόρων καταστάσεων συστήματος  $\omega$  ως προς τη χωρητικότητα του δευτερεύοντος δικτύου και το κόστος των πιθανών συγκρούσεων πακέτων. Έτσι, η συνάρτηση δυναμικού πρώτης τάξης για κάθε MRF σημείο  $s = (i, j)$  με κατάσταση  $x_s = \langle m, a_P \rangle_s$  σχεδιάζεται ως

$$V_{\{s\}}^{(1)}(x_s) = \begin{cases} \delta_1 > 0, & \text{αν } 0 < a_P^{(s)} \cdot P_{i,m} \cdot G_{i,j}^{(m)} < P_R^{thr} \\ -\lambda_1 \cdot \frac{W_m}{C_{max}} \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{a_P^{(s)} \cdot P_{i,m} \cdot G_{i,j}^{(m)}}{N_0 + N_P} \right), & \text{αλλιώς.} \end{cases} \quad (5.6)$$

Συγκεκριμένα, κάθε MRF σημείο (ζεύξη δευτερεύοντος δικτύου), ανάλογα με τη κατάσταση του, συνεισφέρει στη συνολική ενέργεια συστήματος σύμφωνα με τη μέγιστη δυνατή χωρητικότητα που μπορεί να προσφέρει. Η παράμετρος  $\delta_1$  αναπαριστά μια ποινή για την αποφυγή μη χρήσιμων ενεργών ζεύξεων, δηλαδή συνδέσεων  $s = (i, j)$  που για συγκεκριμένη τιμή καταστάσεως  $\langle m, a_P \rangle_s$  είναι εξ ορισμού ανέφικτη η επιτυχής μετάδοση

πακέτων. Για λόγους κανονικοποίησης συμβολίζεται ως  $C_{max}$  η μέγιστη δυνατή χωρητικότητα ζεύξης στο εξεταζόμενο δευτερεύον δίκτυο.

Παρόμοια, οι συναρτήσεις δυναμικού δεύτερης τάξης  $V_{\{s,s'\}}^{(2)}$  υποδηλώνουν την αλληλεπίδραση μεταξύ των MRF σημείων, δηλαδή των ζεύξεων  $s$  με κατάσταση  $x_s = \langle m, a_P \rangle_s = \{m, a_P^{(s)}\}$  και  $s'$  με κατάσταση  $x_{s'} = \langle m, a_P \rangle_{s'} = \{m', a_P^{(s')}\}$ , και εκφράζονται ως

$$V_{\{s,s'\}}^{(2)}(x_s, x_{s'}) = \begin{cases} \lambda_2 \cdot \delta_2 > 0, & \text{αν η "συνθήκη συγκρούσεων" = 1} \\ 0, & \text{αλλιώς.} \end{cases} \quad (5.7)$$

Η παράμετρος  $\delta_2$  αποτελεί σταθερά υψηλής θετικής τιμής και λειτουργεί ως ποινή αυξάνοντας την ενέργεια συστήματος για καταστάσεις που δύναται να οδηγήσουν σε συγκρούσεις πακέτων μεταξύ δύο ενεργών ζεύξεων του δευτερεύοντος δικτύου. Η "συνθήκη συγκρούσεων" περιγράφει ακολούθως τα πιθανά σενάρια (καταστάσεις) μεταξύ των MRF σημείων  $s$  και  $s'$  που δύναται να οδηγήσουν σε συγκρούσεις πακέτων και εκφράζεται ως εξής

$$\left( \begin{array}{c} a_P^{(s)} \neq 0 \text{ and } a_P^{(s')} \neq 0 \text{ and} \\ (i = i' \text{ or } i = j' \text{ or } i' = j \text{ or } j = j') \end{array} \right) \text{ OR} \\ \left( \begin{array}{c} m = m' \text{ and} \\ \left( \begin{array}{c} P_R^{thr} \leq [a_P^{(s)} \cdot P_{i,m} \cdot G_{i,j}^{(m)}] < C_p^{thr} \cdot [a_P^{(s')} \cdot P_{i',m} \cdot G_{i',j}^{(m)}] \\ \text{or} \\ P_R^{thr} \leq [a_P^{(s')} \cdot P_{i',m} \cdot G_{i',j'}^{(m)}] < C_p^{thr} \cdot [a_P^{(s)} \cdot P_{i,m} \cdot G_{i,j'}^{(m)}] \end{array} \right) \end{array} \right)$$

Σημειώνεται ότι  $\lambda_1$  και  $\lambda_2$  αναπαριστούν μη αρνητικές παραμέτρους για τον έλεγχο της βαρύτητας των συνεισφορών των συναρτήσεων δυναμικού στη συνάρτηση της ενέργειας του ολικού συστήματος.

Το πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής καναλιών και ελέγχου ισχύος σε κάθε ζεύξη ενός δευτερεύοντος δικτύου, με στόχο τη μεγιστοποίηση της προσφερόμενης χωρητικότητας δικτύου αποφεύγοντας συγκρούσεις πακέτων, διατυπώνεται ως ένα πρόβλημα εύρεσης MRF καταστάσεων συστήματος που ελαχιστοποιούν τη συνολική του ενέργεια. Η εύρεση καθολικά βέλτιστων λύσεων αποτελεί ένα δύσκολο προς επίλυση πρόβλημα για τοπολογίες δικτύου όπου το μέγεθος των πιθανών καταστάσεων συστήματος είναι

εξαιρετικά μεγάλο. Για το λόγο αυτό έχουν προταθεί στη σχετική βιβλιογραφία ισχυρές τεχνικές [64], [66] που αξιοποιούν χαρακτηριστικές ιδιότητες των MRFs με σκοπό την βελτίωση/απλούστευση της διαδικασίας επίλυσης. Για τη συνέχεια, υιοθετείται ο ακολουθιακός αλγόριθμος Gibbs Sampling, όπως περιγράφεται στην ενότητα 4.4.2, ως ο αλγόριθμος επίλυσης του ανωτέρου MRF προβλήματος ελαχιστοποίησης ενέργειας συστήματος. Υπενθυμίζεται ότι εφαρμόζοντας δειγματοληψία κατά Gibbs (Gibbs Sampling) σε συνδυασμό με ένα κατάλληλο λογαριθμικό πρόγραμμα ανόπτησης το σύστημα συγκλίνει, μέσω μιας παραγόμενης αλυσίδας Markov στο χώρο καταστάσεων  $\Omega$ , με ομοιόμορφη κατανομή ισορροπίας στο χώρο των βέλτιστων καταστάσεων συστήματος (δηλαδή, στο υποσύνολο των διαρθρώσεων  $\omega$  που ελαχιστοποιούν την ενέργεια συστήματος) [64].

Με στόχο τη διασφάλιση της ευστάθειας του δικτύου, καθώς και την ενσωμάτωση λειτουργιών των στρωμάτων δικτύου (network layer) και MAC (MAC layer) στο ανωτέρω MRF πρόβλημα βελτιστοποίησης για την επιπρόσθετη επίτευξη χρονοπρογραμματισμού και δρομολόγησης πακέτων βέλτιστης διεκπεραιωτικότητας, αξιοποιείται η τεχνική των back-pressure αλγορίθμων [91]. Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος back-pressure βασίζεται στις διαφορές ως προς το μέγεθος των ουρών αναμονής πακέτων στους κόμβους κάθε σύνδεσης (queue backlog differentials). Σε κάθε χρονική θυρίδα, επιλέγει (ενεργοποιεί) για μετάδοση το μέγιστο σύνολο ανεξάρτητων συνδέσεων, δηλαδή, ζεύξεων που δεν οδηγούν σε συγκρούσεις πακέτων, το οποίο μεγιστοποιεί το άθροισμα των γινομένων της μέγιστης διαφοράς ουρών δύο κόμβων επί τη χωρητικότητα της αντίστοιχης ζεύξης. Η συγκεκριμένη ποσότητα εκφράζεται μαθηματικά ως  $\max \sum \mu_{i,j}^{c^*}(t) \cdot \{Q_i^{(c^*)}(t) - Q_j^{(c^*)}(t)\}$ . Για κάθε χρονική θυρίδα  $t$ , μετά τον υπολογισμό των μεταβλητών  $\mu_{i,j}^c(t)$ ,  $\forall s = (i, j)$ ,  $c$  σύμφωνα με τις επιλεγμένες ενεργοποιήσεις, κάθε δευτερεύον χρήστης  $i$  ανανεώνει τις ανά ροή  $c$  ουρές αναμονής  $Q_i^c$  σύμφωνα την ακόλουθη σχέση

$$Q_i^c(t+1) \leq \max \left\{ Q_i^c(t) - \sum_j \mu_{i,j}^c(t), 0 \right\} + \sum_j \mu_{j,i}^c(t) + A_i^c(t). \quad (5.8)$$

Για την αξιοποίηση των ιδιοτήτων βέλτιστης διεκπεραιωτικότητας των τεχνικών back-pressure (ενότητα 5.2) προτείνεται ακολούθως η επανεξέταση και τροποποίηση των συναρτήσεων δυναμικού πρώτης τάξης (Σχέση (5.6)) και δεύτερης τάξης (Σχέση (5.7)), αντικαθιστώντας τις ομοιογενείς παραμέτρους  $\lambda_1$  και  $\lambda_2$  με τις ανομοιογενείς χρονικά μεταβαλλόμενες διαφορές ουρών (queue backlogs), όπως περιγράφεται στην ακόλουθη Πρόταση.

**Πρόταση** Θέτοντας την παράμετρο  $\lambda_1$  στη συνάρτηση δυναμικού πρώτης τάξης (Σχέση (5.6)) ξεχωριστά για κάθε MRF σημείο  $s = (i, j)$ , ως  $\lambda_1 = \max \left\{ \max_c \{Q_i^{(c)} - Q_j^{(c)}\}, 0 \right\}$  και την παράμετρο  $\lambda_2$  στη συνάρτηση δυναμικού δεύτερης τάξης (Σχέση (5.7)) ως  $\lambda_2 = \max \left\{ \max_c \{Q_i^{(c)} - Q_j^{(c)}\}, \max_c \{Q_{i'}^{(c)} - Q_{j'}^{(c)}\}, 1 \right\}$ , ενώ επιπρόσθετα  $V_{\{s\}}^{(1)}(x_s) = \delta_1 \forall x_s$  αν  $\max_c \{Q_i^{(c)} - Q_j^{(c)}\} < 0$ , τότε η προτεινόμενη προσέγγιση είναι βέλτιστης διεκπεραιωτικότητας, δηλαδή εξασφαλίζει ισχυρή ευστάθεια δικτύου υποθέτοντας ότι οι ρυθμοί αφίξεων πακέτων στους δευτερεύοντες χρήστες βρίσκονται εντός περιοχής χωρητικότητας  $\mathcal{C}$ .

*Απόδειξη:* Το MRF πρόβλημα βελτιστοποίησης εκφράζεται μέσω της ελαχιστοποίησης της συνάρτησης ενέργειας  $U(\omega)$  ως

$$\min_{\omega \in \Omega} \sum_{s \in S} V_{\{s\}}^{(1)}(x_s) + \sum_{s \in S} \sum_{s' \in \mathcal{G}_s} V_{\{s, s'\}}^{(2)}(x_s, x_{s'}) \quad (5.9)$$

Δεδομένου ότι οι παράμετροι  $\delta_1$  και  $\delta_2$  λαμβάνουν υψηλές θετικές τιμές, οι αντίστοιχες διαρθρώσεις  $\omega$  που ενεργοποιούν τις συγκεκριμένες παραμέτρους (ποινές) δεν μπορεί να αποτελούν μέρος του συνόλου των βέλτιστων λύσεων. Σημειώνεται ότι η παράμετρος  $\lambda_2$  τίθεται μέσω της ανωτέρω Πρότασης έτσι ώστε να είναι πάντα της ίδιας τάξης με την παράμετρο  $\lambda_1$  για την αποφυγή ανισορροπίας μεταξύ των συνεισφορών των συναρτήσεων δυναμικού πρώτης και δεύτερης τάξης. Συμβολίζοντας ως  $\Gamma$  το σύνολο των διαρθρώσεων (καταστάσεων συστήματος) που προσθέτουν ποινές ίσες με  $\delta_1$  ή  $\delta_2$  στη συνολική ενέργεια (σύμφωνα με τις Σχέσεις (5.6) και (5.7)), τότε ο χώρος βέλτιστων λύσεων μπορεί να περιοριστεί ξαναγράφοντας το αρχικό πρόβλημα ελαχιστοποίησης (5.9) ως

$$\min_{\omega \in \Omega} \sum_{s \in S} \left[ -\lambda_1 \cdot W_m \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{a_P^{(s)} \cdot P_{i,m} \cdot G_{i,j}^{(m)}}{N_0 + N_P} \right) \right] + \sum_{s \in S} \sum_{s' \in \mathcal{G}_s} 0, \\ \text{subject to } \omega \notin \Gamma$$

ή διαφορετικά

$$\min_{\omega \in \Omega} \sum_{\{i,j\} \in S} \left[ -\lambda_1 \cdot W_m \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{a_P^{(s)} \cdot P_{i,m} \cdot G_{i,j}^{(m)}}{N_0 + N_P} \right) \right] \\ \text{subject to } \omega \notin \Gamma.$$

Δεδομένου ότι οι περιορισμοί που εκφράζονται μέσω του συνόλου  $\Gamma$  εγγυώνται αποφυγή παρεμβολών μεταξύ των ενεργών ζεύξεων των δευτερευόντων χρηστών, ο εκτιμώμενος λόγος SNR μιας ενεργής ζεύξης  $s$  θα ισούται με  $SNR_s = \frac{a_P^{(s)} \cdot P_{i,m} \cdot G_{i,j}^{(m)}}{N_0 + N_P}$ . Όμως,

$\mu_{i,j}(t) = \frac{W_m}{Pkt_s} \cdot \log_2 \left( 1 + SNR_s \right)$  αποτελεί την χωρητικότητα κίνησης μιας ζεύξης  $s = (i, j)$  στη χρονική θυρίδα  $t$  για το επιλεγμένο κανάλι  $m$  και το επιλεγμένο επίπεδο ισχύος  $a_P^{(s)}$  (ενότητα 5.3). Ορίζοντας ότι  $\mu_{i,j}(t) = 0$  για όλα τα ζεύγη κόμβων  $\{i, j\}$  με απόσταση μεγαλύτερη από την μέγιστη εμβέλεια επικοινωνίας (δηλαδή,  $d_{i,j} > R_{T_i}^{(max)}$ ) συνεπάγεται ότι οι βέλτιστες λύσεις του αρχικού MRF προβλήματος βελτιστοποίησης μπορούν να βρεθούν μέσω του προβλήματος

$$\min_{\omega \in \Omega} \sum_i \sum_j \left[ -\lambda_1 \cdot \mu_{i,j}(t) \right], \text{ subject to } \omega \notin \Gamma \quad (5.10)$$

Θέτοντας σύμφωνα με την ανωτέρω Πρόταση τις παραμέτρους  $\lambda_1$  κάθε συνάρτησης δυναμικού πρώτου βαθμού ως  $\lambda_1 = \max \left\{ \max_c \{Q_i^{(c)} - Q_j^{(c)}\}, 0 \right\}$  για κάθε σημείο  $s = (i, j)$ , το πρόβλημα (5.10) μετασχηματίζεται ως εξής

$$\max_{\omega \in \Omega} \sum_i \sum_j \left[ \mu_{i,j}(t) \cdot \max \left\{ \max_c \{Q_i^{(c)}(t) - Q_j^{(c)}(t)\}, 0 \right\} \right]$$

subject to  $\omega \notin \Gamma$ .

Το ανωτέρω ισοδύναμο πρόβλημα μεγιστοποίησης ταυτίζεται με το πρόβλημα επίλυσης των back-pressure αλγορίθμων που χαρακτηρίζονται ως αλγόριθμοι βέλτιστης διεκπεραιωτικότητας [91]. Επομένως, εκμεταλλευόμενοι τη θεωρητικά αποδεδειγμένη σύγκλιση του ακολουθιακού αλγορίθμου Gibbs Sampling σε καταστάσεις ελαχιστοποίησης της ενέργειας συστήματος [64], αποδεικνύεται η ορθότητα της ανωτέρω Πρότασης, δηλαδή, ότι η προτεινόμενη προσέγγιση είναι επίσης βέλτιστης διεκπεραιωτικότητας. ■

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι με τον τρόπο αυτό η σχεδίαση των συναρτήσεων δυναμικού επιτρέπει την ενσωμάτωση στην προτεινόμενη προσέγγιση της πολιτικής δρομολόγησης του back-pressure αλγορίθμου, η οποία στηρίζεται στην εξυπηρέτηση της βέλτιστης ροής  $c^*$  για κάθε ενεργή ζεύξη. Ειδικότερα, για κάθε MRF σημείο (ζεύξη δευτερεύοντος δικτύου) υπολογίζονται οι διαφορές ουρών για όλες τις υπάρχουσες ροές,  $P_{ij}^c(t) = Q_i^c(t) - Q_j^c(t), \forall c$ , η μέγιστη εκ των οποίων  $P_{ij}(t) = \max \{ \max_c P_{ij}^c(t), 0 \}$  εισάγεται στις παραμέτρους  $\lambda_1, \lambda_2$  της ανωτέρω Πρότασης για την κατανομή των καναλιών και του έλεγχου ισχύος. Τελικά, η βέλτιστη ροή  $c^*(i, j) = \arg \max_c P_{ij}^c(t)$  επιλέγεται για εξυπηρέτηση αν η ζεύξη  $s = (i, j)$  έχει προγραμματιστεί για μετάδοση, δηλαδή, αν το πρόβλημα MRF βελτιστοποίησης έχει συγκλίνει σε μη μηδενική εκχώρηση ισχύος για τον κόμβο  $i$  του MRF σημείου  $s = (i, j)$ . Επισημαίνεται ότι ο χρονοπρογραμματισμός των

μεταδόσεων προκύπτει από τον έλεγχο ισχύος κάθε MRF σημείου στο πρόβλημα ελαχιστοποίησης της MRF ενέργειας συστήματος. Επομένως,  $\mu_{i,j}^c(t) = \mu_{i,j}(t)$  αν  $c = c^*(i, j)$ , διαφορετικά  $\mu_{i,j}^c(t) = 0$ .

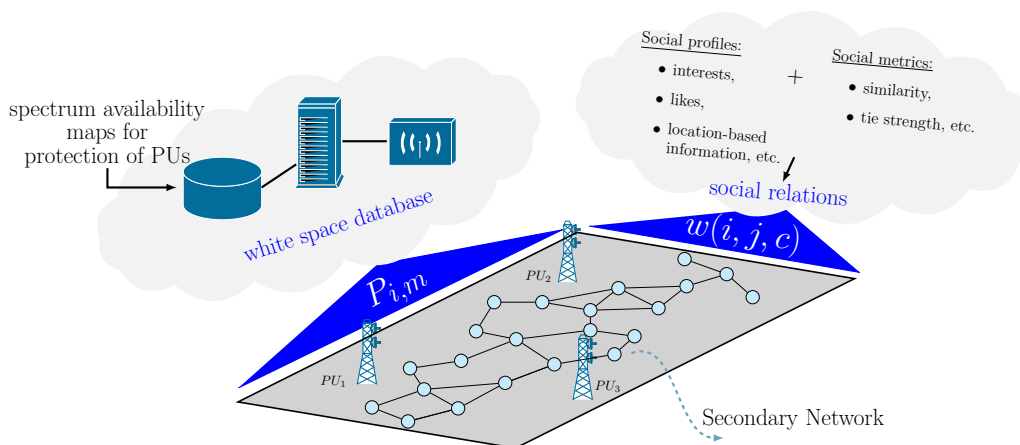
## 5.5 Επέκταση μεθοδολογίας

Οι πληροφορίες που συλλέγονται από έναν χρήστη τεχνολογίας γνωσιακών ραδιοεπικοινωνιών και επεξεργάζονται μέσω της διαδικασίας που περιγράφει ο γνωσιακός κύκλος (Σχήμα 2.1) δεν περιορίζονται αποκλειστικά σε δεδομένα φασματικής ανίχνευσης, αλλά οφείλουν να καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα δεδομένων με στόχο την αξιοποίηση κάθε δυνατότητας απόκτησης ή παραγωγής επιπρόσθετης γνώσης. Η πρόοδος των ασύρματων επικοινωνιών και η ραγδαία αύξηση των κινητών - συνδεδεμένων στο Διαδίκτυο - συσκευών δίνουν νέα προοπτική στην αλληλεπίδραση των χρηστών, επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό τη διαμόρφωση νέων προτύπων δεδομένων κίνησης και δημιουργούν νέες, ακόμη αναξιοποίητες, πηγές πληροφοριών. Για το λόγο αυτό, ωθείται η συνέργεια διαφορετικών επιστημονικών κλάδων, όπως η επιστήμη υπολογιστών και οι κοινωνικές επιστήμες, για την έρευνα προβλημάτων και τη σχεδίαση μηχανισμών που αφορούν τη νέα γενιά δικτύωσης υπολογιστών (socially-aware networking) [99, 100]. Τα κοινωνικά δίκτυα αποτελούν, συνεπώς, χαρακτηριστικό παράδειγμα πηγής πληροφοριών τις οποίες ένας δευτερεύον χρήστης δύναται να αντλήσει και εν συνεχεία να εκμεταλλευτεί με απώτερο σκοπό την αύξηση της ποιότητας των υπηρεσιών του.

Η έννοια του *κοινωνικού δικτύου* (social network) ορίζει μια δομή συνδεδεμένων και αλληλεπιδρώντων οντοτήτων (π.χ. χρηστών) και περιγράφει τις δομές και τους δεσμούς μεταξύ των χρηστών. Ο πρακτικός ορισμός τους σε σενάρια επικοινωνιών αναφέρεται σε ένα σύστημα παροχής υπηρεσιών διανομής δεδομένων που εμπλέκουν με οποιοδήποτε τρόπο τις υφιστάμενες κοινωνικές σχέσεις μεταξύ των χρηστών [99]. Συγκεκριμένα, το εν λόγω σύστημα περιλαμβάνει το κοινωνικό προφίλ κάθε χρήστη (δηλαδή, προσωπικά χαρακτηριστικά του, ενδιαφέροντα, προτιμήσεις, συνήθειες, κλπ.) και ενσωματώνει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συνδεδεμένων χρηστών (π.χ. διάχυση πληροφοριών όπως η φήμη ενός γεγονότος, συστάσεις, κλπ.). Προκύπτει, επομένως, ότι τα κοινωνικά δίκτυα εμπεριέχουν ένα σύνολο πληροφοριών οι οποίες μπορεί να αξιοποιηθούν είτε για τη βελτίωση της κατανομής πόρων και των επιδόσεων ενός δικτύου δευτερευόντων χρηστών είτε

με στόχο τη διευκόλυνση και καλύτερη εξυπηρέτηση των κοινωνικών υπηρεσιών που δύνανται να προσφέρονται σε αυτό.

Η αξιοποίηση πληροφοριών που προέρχονται από κοινωνικά δίκτυα κατά τη σχεδίαση των μηχανισμών ελέγχου ενός δικτύου γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας προαπαιτεί την ενσωμάτωση χαρακτηριστικών ιδιοτήτων που τα συνοδεύουν κατά τη φάση μοντελοποίησης του δικτύου με σκοπό τη μετέπειτα ανάλυσή τους. Το Σχήμα 5.2 επεκτείνει το κεντριοποιημένο πλαίσιο λειτουργίας δευτερευόντων χρηστών, όπως περιγράφηκε στην ενότητα 5.3, εισάγοντας παράγοντες στάθμισης (βάρη) της μορφής  $w(i, j, c)$  που αντικατοπτρίζουν πληροφορίες κοινωνικού περιεχομένου και ορίζονται κατάλληλα ανάλογα με το σενάριο εφαρμογής. Ειδικότερα, ένας παράγοντας βάρους  $w(i, j, c)$  εκχωρείται σε κάθε ζεύγος δευτερεύουσας ζεύξης  $s = (i, j)$  και ροής  $c$  εκφράζοντας μια *κοινωνική σχέση* (social relation) η οποία δύναται να αναφέρεται στις ομοιότητες μεταξύ των κοινωνικών προφίλ των δευτερευόντων χρηστών  $\{i, j\}$  για την ροή  $c$  (π.χ. ενδιαφέροντα, προτιμήσεις, πληροφορίες κοινωνικού περιεχομένου βασισμένες στη γεωγραφική θέση των χρηστών, κλπ.). Τα κοινωνικά προφίλ των χρηστών μπορούν να είναι αποθηκευμένα σε μια κεντρική οντότητα ή τοπικά σε κάθε χρήστη και να αποκτώνται είτε μέσω πραγματικών ιστορικών δεδομένων είτε από πληροφορίες που καταχωρεί ο ίδιος ο χρήστης. Ωστόσο, σημειώνεται ότι είναι εκτός σκοπού της παρούσας εργασίας η εμβάθυνση και υιοθέτηση μιας συγκεκριμένης υλοποίησης για την προέλευση και τη δημιουργία των συγκεκριμένων δομών.



Σχήμα 5.2: Επέκταση μοντελοποίησης για ενσωμάτωση πληροφοριών από κοινωνικά δίκτυα.

Η δυναμική της σύμπραξης των κοινωνικών δικτύων και των κλασικών τεχνικών σχεδίασης πρωτοκόλλων επικοινωνιών έχει πρόσφατα αναγνωριστεί και επισημανθεί στη

σύγχρονη βιβλιογραφία [99, 101, 102, 103]. Ενδεικτικά ερευνητικά προβλήματα που έχουν μελετηθεί με εφαρμογή σε δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας αποτελούν οι μηχανισμοί σύστασης δευτερευόντων καναλιών από κοινωνικά γειτονικούς χρήστες [101], ο βέλτιστος μερισμός των διαθέσιμων φασματικών οπών σε ομάδες δευτερευόντων χρηστών αξιοποιώντας τους κοινωνικούς δεσμούς των χρηστών και τις προδιαγεγραμμένες βάσεις δεδομένων φάσματος [102], η επίδραση των προτιμήσεων των χρηστών όσον αφορά τη δρομολόγηση πακέτων με βάση κοινωνικά κριτήρια (π.χ. σε πολυβηματικά δίκτυα όπου χρήστες προτιμούν να προωθούν πακέτα αποκλειστικά σε χρήστες που συνδέονται κοινωνικά (φίλους)) [103], κλπ.

### 5.5.1 Ενσωμάτωση πληροφοριών κοινωνικών δικτύων σε δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας

Η ενσωμάτωση κοινωνικών χαρακτηριστικών στη μοντελοποίηση της λειτουργίας των δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας συνεπάγεται αλλαγές στην ανάλυση και τη σχεδίαση της προτεινόμενης προσέγγισης που παρουσιάστηκε στην ενότητα 5.4. Συγκεκριμένα, οι παράμετροι  $\lambda_1$  και  $\lambda_2$  επανασχεδιάζονται με σκοπό την εισαγωγή των βαρών  $w(i, j, c)$  που σύμφωνα με τον ορισμό τους εκφράζουν κοινωνικές αλληλεπιδράσεις των χρηστών. Οι διαφορές μήκους των ουρών αναμονής μιας δευτερεύουσας ζεύξης  $s = (i, j)$  όσον αφορά τη ροή  $c$  κλιμακώνονται μέσω των βαρών  $w(i, j, c)$  έτσι ώστε

$$\lambda_1^a = \max \left\{ \max_c \left\{ w(i, j, c) \left( Q_i^{(c)} - Q_j^{(c)} \right) \right\}, 0 \right\} \quad (5.11)$$

ενώ, ομοίως, ο παράγοντας  $\lambda_2^a$  όσον αφορά το ζεύγος ζεύξεων (MRF σημείων)  $\{s, s'\}$  τροποποιείται ως

$$\lambda_2^a = \max \left\{ \max_c \left\{ w(i, j, c) \left( Q_i^{(c)} - Q_j^{(c)} \right) \right\}, \max_c \left\{ w(i', j', c) \left( Q_{i'}^{(c)} - Q_{j'}^{(c)} \right) \right\}, 1 \right\} \quad (5.12)$$

Η τροποποιημένη προτεινόμενη προσέγγιση στοχεύει, μέσω της αντικατάστασης των παραμέτρων  $\{\lambda_1, \lambda_2\}$  με  $\{\lambda_1^a, \lambda_2^a\}$ , στη θέσπιση προτεραιοτήτων κατά τη διαδικασία δρομολόγησης και χρονοπρογραμματισμού για ροές και ζεύξεις που παρουσιάζουν κοινωνικές σχέσεις υψηλότερης ποιότητας, δηλαδή υψηλότερες τιμές βάρους  $w(i, j, c)$ ,  $\forall i, j, c$ . Συγχρόνως, για τη μελέτη και επίτευξη ευστάθειας δικτύου λαμβάνονται υπόψη οι διαφορές των ουρών αναμονής μεταξύ των κόμβων. Έτσι, λοιπόν, ο νέος τροποποιημένος



αλγόριθμος συνεισφέρει στη βελτίωση των επιδόσεων του δικτύου λαμβάνοντας υπόψη την ετερογένεια των κοινωνικών χαρακτηριστικών των χρηστών (π.χ. προτίμηση δρομολόγησης πακέτων μέσω κοινωνικά συνδεδεμένων χρηστών, κλπ.), ωστόσο, θυσιάζοντας έως ένα βαθμό - όπως αναλύεται εκτενέστερα ακολούθως - τη βέλτιστη διεκπεραιωτικότητα του αλγορίθμου της ενότητας 5.4.

Όσον αφορά τα βάρη  $w(i, j, c)$  οι ακόλουθες υποθέσεις θα πρέπει να ικανοποιούνται. Πρώτον, οι τιμές τους είναι αμετάβλητες με τον χρόνο και δεύτερον, για κάθε ροή  $c$  υπάρχουν τιμές  $w_{\min}^c$  και  $w_{\max}^c$  έτσι ώστε  $w_{\min}^c \leq w(i, j, c) \leq w_{\max}^c, \forall i, j$ . Ορίζοντας  $\rho^c = \frac{w_{\max}^c}{w_{\min}^c}, \forall c$ , παρατηρείται ότι η μετρική  $\rho^c$  δύναται να εκφράζει την ανομοιογένεια των τιμών βάρους όλων των ζεύξεων για τη ροή  $c$ . Έτσι, λοιπόν, αν  $\rho^c$  λαμβάνει υψηλή τιμή τότε η ροή  $c$  χαρακτηρίζεται από υψηλά ανομοιογενείς κοινωνικές σχέσεις για το προκείμενο δίκτυο και αντίστροφα, μικρή τιμή  $\rho^c$  συνεπάγεται υψηλότερου βαθμού ομοιογένεια στις κοινωνικές σχέσεις όσον αφορά τη ροή  $c$ . Στην ειδική περίπτωση όπου τα βάρη δεν εξαρτώνται από τις ροές, δηλαδή  $w(i, j, c) = w(i, j), \forall c$ , ισχύει ότι  $\rho^c = \frac{w_{\max}}{w_{\min}}, \forall c$ , όπου  $w_{\min} = \min_{i,j} w(i, j)$  και  $w_{\max} = \max_{i,j} w(i, j)$ .

Η επόμενη πρόταση καθορίζει την ικανή συνθήκη επίτευξης ευστάθειας δικτύου για την προτεινόμενη προσέγγιση. Σημειώνεται ότι σύμφωνα με την εργασία [104] η ευστάθεια δικτύου για σταθμισμένες τεχνικές back-pressure (weighted back-pressure techniques) δύναται να επιτευχθεί για ένα μόνο μέρος της περιοχής χωρητικότητας του δικτύου.

**Πρόταση** *Ας υποθέσουμε ότι  $\varepsilon^c > 0, \forall c$  έτσι ώστε  $\frac{\varepsilon^c}{\lambda_i^c} \geq (\rho^c - 1), \forall c, i \in S(c)$ . Εάν το σύνολο  $\{\lambda_i^c + \varepsilon^c\}_{c,i \in S(c)}$  ανήκει στη περιοχή χωρητικότητας  $\mathcal{C}$ , τότε η προτεινόμενη προσέγγιση διασφαλίζει την ευστάθεια του δικτύου.*

*Απόδειξη:* Λαμβάνοντας υπόψη την απόδειξη της ενότητας 5.4 όπου το MRF πρόβλημα ελαχιστοποίησης της ενέργειας συστήματος ισοδυναμεί με το πρόβλημα βελτιστοποίησης των τεχνικών back-pressure και τροποποιώντας τις παραμέτρους στις συναρτήσεις δυναμικού πρώτης και δεύτερης τάξης σύμφωνα με τις σχέσεις (5.11) και (5.12) δύναται να αναλυθεί η ευστάθεια δικτύου μέσω της ευστάθειας κατά Lyapunov (ενότητα 5.2).

Η συνάρτηση Lyapunov ορίζεται ως  $L(Q(t)) = \sum_{i,c} w_{\max}^c Q_i^c(t)^2$  και η αναμενόμενη τιμή της χρονικής μεταβολής των συναρτήσεων Lyapunov (Lyapunov Drift) υπολογίζεται

ως εξής

$$\begin{aligned}
 E \left( L(Q(t+1)) - L(Q(t)) \mid Q(t) \right) &= E \left[ \sum_{i,c} w_{\max}^c (Q_i^c(t+1)^2 - Q_i^c(t)^2) \mid Q(t) \right] \leq \\
 &B_{\max} + 2 \sum_{i,c} w_{\max}^c Q_i^c(t) \lambda_i^c - 2 \sum_{i,c} w_{\max}^c Q_i^c(t) E \left[ \left( \sum_j \mu_{ij}^c(t) - \sum_j \mu_{ji}^c(t) \right) \mid Q(t) \right] \\
 &= B_{\max} + 2 \sum_{i,c} w_{\max}^c Q_i^c(t) \lambda_i^c - 2 \sum_c \sum_{(i,j)} w_{\max}^c E [\mu_{ij}^c(t) \mid Q(t)] (Q_i^c(t) - Q_j^c(t)), \quad (5.13)
 \end{aligned}$$

$$\text{όπου } B_{\max} = \max \left\{ \sum_{i,c} w_{\max}^c E \left[ \left( \sum_j \mu_{ij}^c(t) \right)^2 + \left( \sum_j \mu_{ji}^c(t) + A_i^c(t) \right)^2 \mid Q(t) \right] \right\}.$$

Για τις μεταβλητές  $\mu_{ij}^c(t)$ ,  $\forall i, j, c$ , όπως καθορίζονται από την νέα τροποποιημένη προσέγγιση της παρούσας ενότητας, ισχύει ότι

$$\begin{aligned}
 \sum_c \sum_{(i,j)} w(i, j, c) E [\mu_{ij}^c(t) \mid Q(t)] (Q_i^c(t) - Q_j^c(t)) &\leq \\
 \sum_c \sum_{(i,j)} w_{\max}^c E [\mu_{ij}^c(t) \mid Q(t)] (Q_i^c(t) - Q_j^c(t)), \quad (5.14)
 \end{aligned}$$

δεδομένου ότι  $\mu_{ij}^c(t) = 0$  αν  $Q_i^c(t) - Q_j^c(t) < 0$ . Επομένως, από τη Σχέση (5.13) προκύπτει ότι

$$\begin{aligned}
 E \left( L(Q(t+1)) - L(Q(t)) \mid Q(t) \right) &\leq \\
 B_{\max} + 2 \sum_{i,c} w_{\max}^c Q_i^c(t) \lambda_i^c - 2 \sum_c \sum_{(i,j)} w(i, j, c) E [\mu_{ij}^c(t) \mid Q(t)] (Q_i^c(t) - Q_j^c(t)). \quad (5.15)
 \end{aligned}$$

Αν  $\lambda_i^c + \epsilon^c$ ,  $\forall c, i \in S(c)$  ανήκει στην περιοχή χωρητικότητας του δικτύου, τότε από το Πρόγραμμα 3.9 της εργασίας [92], προκύπτει ότι υπάρχει στατικός τυχαιοποιημένος αλγόριθμος ελέγχου (stationary randomized control algorithm) που λαμβάνει έγκυρες αποφάσεις για τις μεταβλητές  $\hat{\mu}_{ij}^c(t)$  βάσει της τρέχουσας τοπολογίας του δικτύου έτσι ώστε

$$\lambda_i^c + \epsilon^c = E \left[ \sum_j \hat{\mu}_{ij}^c(t) - \sum_j \hat{\mu}_{ji}^c(t) \right] \quad \forall c, i \in S(c).$$

Κατά συνέπεια, ισχύει ότι

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i,c} w_{\min}^c Q_i^c(t) \lambda_i^c + \sum_{i,c} w_{\min}^c Q_i^c(t) \epsilon^c \\
 &= \sum_c \sum_{(i,j)} w_{\min}^c E [\hat{\mu}_{ij}^c(t)] (Q_i^c(t) - Q_j^c(t)) \\
 &\leq \max_{\mu'} \sum_c \sum_{(i,j)} w_{\min}^c E [\mu_{ij}^c(t)' | Q(t)] (Q_i^c(t) - Q_j^c(t)) \\
 &\leq \max_{\mu'} \sum_c \sum_{(i,j)} w(i,j,c) E [\mu_{ij}^c(t)' | Q(t)] (Q_i^c(t) - Q_j^c(t)) \\
 &= \sum_c \sum_{(i,j)} w(i,j,c) E [\mu_{ij}^c(t) | Q(t)] (Q_i^c(t) - Q_j^c(t)), \tag{5.16}
 \end{aligned}$$

όπου  $\mu_{ij}^c(t)$ ,  $\forall i, j, c$  επιλέγονται από τη νέα τροποποιημένη προσέγγιση. Τότε, για την αναμενόμενη χρονική μεταβολή της συνάρτησης Lyapunov (Lyapunov drift) της σχέσης (5.15) ισχύει ότι

$$\begin{aligned}
 & E[L(Q(t+1)) - L(Q(t)) | Q(t)] \leq \\
 & B_{\max} + 2 \sum_{i,c} (w_{\max}^c - w_{\min}^c) \lambda_i^c Q_i^c(t) - 2 \sum_{i,c} w_{\min}^c Q_i^c(t) \epsilon^c. \tag{5.17}
 \end{aligned}$$

Συνεπώς, αν ικανοποιείται η αρχική συνθήκη της ανωτέρω Πρότασης, δηλαδή

$$\epsilon^c > \frac{w_{\max}^c - w_{\min}^c}{w_{\min}^c} \lambda_i^c \Rightarrow \frac{\epsilon^c}{\lambda_i^c} > \rho^c - 1, \forall c, i \in S(c),$$

τότε μέσω του Λήμματος 4.1 της εργασίας [92] αποδεικνύεται ότι το δίκτυο είναι ισχυρά ευσταθές. ■

Οι δύο ακόλουθες παρατηρήσεις προκύπτουν άμεσα από την ανωτέρω Πρόταση.

### Παρατήρηση - 1 "Εξισορρόπηση μεταξύ κοινωνικών σχέσεων και ευστάθειας δικτύου"

Σύμφωνα με την ανωτέρω Πρόταση προκύπτει ότι η ικανή συνθήκη ευστάθειας δικτύου εξασφαλίζεται για ένα μόνο μέρος της περιοχής χωρητικότητας του δικτύου, δηλαδή για  $\epsilon^c > 0$  που ικανοποιεί τη σχέση  $\frac{\epsilon^c}{\lambda_i^c} \geq (\rho^c - 1)$ ,  $\forall c, i \in S(c)$  και όχι για κάθε  $\epsilon^c > 0$ ,  $\forall c$  που αποτελεί την αναγκαία συνθήκη επίτευξης βέλτιστης διεκπεραιωτικότητας [92]. Συνεπώς, η ενσωμάτωση των κοινωνικών σχέσεων στην προτεινόμενη προσέγγιση αντισταθμίζεται από το κόστος που επιφέρει στο σύνολο των ρυθμών αφίξεων πακέτων για τους οποίους αποδεικνύεται η επίτευξη ευστάθειας του δικτύου. Ειδικότερα, όταν η παράμετρος  $\rho^c$  αυξάνει για μια ροή  $c$ , τότε ο λόγος  $\frac{\epsilon^c}{\lambda_i^c}$ ,  $\forall i \in S(c)$  πρέπει να αυξηθεί, συνεπώς, μειώνοντας επακόλουθα το ρυθμό εξωγενών αφίξεων για τη συγκεκριμένη ροή  $c$

προκειμένου να διατηρηθεί η ευστάθεια του δικτύου. Με άλλα λόγια, μεγαλύτερη ανομοιογένεια στις κοινωνικές σχέσεις των χρηστών για μια ροή, η οποία εκφράζεται από το εύρος των αντίστοιχων βαρών, συμβάλλει σε μικρότερη διαθέσιμη διεκπεραιωτικότητα δικτύου για τον προτεινόμενο μηχανισμό ελέγχου έτσι ώστε οι ουρές αναμονής του δικτύου να διατηρούνται σταθερές. Συνεπώς, για την αύξηση της διεκπεραιωτικότητας του δικτύου χωρίς να παραβιάζεται η απαίτηση ευστάθειας του, πιο ομοιογενείς κοινωνικές σχέσεις θα πρέπει να εμφανίζονται στο δίκτυο. Σημειώνεται ότι στην ειδική περίπτωση πλήρους ομοιογένειας (ισοδύναμες τιμές βαρών για όλους τους κόμβους και όλες τις ροές, δηλαδή  $\rho^c = 1, \forall c$ ) καταλήγουμε σε αλγόριθμο βέλτιστης διεκπεραιωτικότητας.

### Παρατήρηση - 2 "Αναλυτικότερη εξέταση της επίδρασης των τιμών $w(i, j, c)$ "

Αν  $w_{\max}^c$  αυξάνεται για μια ροή  $c$ , τότε το σύνολο των ζεύξεων που χαρακτηρίζονται από τιμή  $w_{\max}^c$  λαμβάνουν μεγαλύτερη προτεραιότητα κατά τη φάση χρονοπρογραμματισμού (δηλαδή, ενεργοποίησης συγκεκριμένων ζεύξεων). Το γεγονός αυτό δύναται να οδηγήσει σε βελτίωση της επίδοσης όσον αφορά τη συγκεκριμένη ροή  $c$  (π.χ. αύξηση ρυθμοαπόδοσης, μείωση καθυστέρησης, βελτίωση ποιότητας των μονοπατιών δρομολόγησης, κλπ.), ωστόσο, υπό την εξάρτηση της υπόλοιπης κατάστασης του δικτύου. Γενικά, για σταθερή τιμή  $\rho^c$ , η αύξηση των τιμών  $\{w_{\max}^c, w_{\min}^c\}$  αναμένεται να επιδράσει θετικά τις μετρικές επίδοσης για τη συγκεκριμένη ροή. Αντίθετα, για σταθερή τιμή  $w_{\max}^c$ , μειώνοντας την παράμετρο  $w_{\min}^c$  η αντίστοιχη επίδραση αναμένεται αρνητική. Τέλος, επισημαίνεται ότι η ανωτέρω Πρόταση εξετάζει τη δυσμενέστερη περίπτωση εξασφάλισης της ικανής συνθήκη επίτευξης ευστάθειας δικτύου, χρησιμοποιώντας τις ελάχιστες και τις μέγιστες τιμές των βαρών και όχι τις ακριβείς τιμές τους. Για το λόγο αυτό, η μεταβολή των βαρών σε πολύ υψηλές ή χαμηλές τιμές για σχετικά μικρό αριθμό ζεύξεων (MRF σημείων) δύναται στην πράξη να εμφανίζει μικρότερο αντίκτυπο σε σχέση με τις προβλέψεις της ανωτέρω Πρότασης.

## 5.6 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται διαφορετικά δικτυακά σενάρια, προσομοιωμένα με βάση το προγραμματιστικό περιβάλλον του εργαλείου MATLAB [105], με σκοπό την αξιολόγηση των προτεινόμενων προσεγγίσεων αλλά και τη σύγκρισή τους με την

παραδοσιακή back-pressure τεχνική. Για τη διευκόλυνση της παρουσίασης των αποτελεσμάτων, η προτεινόμενη προσέγγιση της ενότητας 5.4 καλείται εφεξής ως BPeMRF (Back-Pressure enhanced MRF), ενώ η επέκταση της μεθοδολογίας για την ενσωμάτωση κοινωνικών χαρακτηριστικών, όπως περιγράφεται στην ενότητα 5.5, ονομάζεται για τη συνέχεια ως SeBPeMRF (Socially enhanced BPeMRF). Αφού μελετηθεί ένα απλό σενάριο δικτύου γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας, με σκοπό την επαλήθευση της εφαρμοσιμότητας του προτεινόμενου πλαισίου, εν συνεχεία συγκρίνεται η επίδοση της προτεινόμενης προσέγγισης BPeMRF με την παραδοσιακή back-pressure τεχνική όσον αφορά τις ιδιότητες βέλτιστης διεκπεραιωτικότητας. Τέλος, παρουσιάζεται μια μελέτη περίπτωσης όπου πληροφορίες κοινωνικού δικτύου, όπως η φήμη για τα σημεία εμφάνισης πρωτευόντων συστημάτων, λαμβάνονται υπόψη μέσω της προσέγγισης SeBPeMRF. Με τον τρόπο αυτό επιδεικνύονται τα προκύπτοντα οφέλη της ενσωμάτωσης κοινωνικών πληροφοριών σε δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας μέσω διαστρωματικών τεχνικών.

**Πίνακας 5.1:** Παράμετροι Προσομοίωσης

Παράμετροι	Τιμές	Ορισμός
$C_p^{thr}$	2	Κατώφλι σύλληψης (Capture threshold) - Σχέση (5.2)
$P_R^{thr}$	-90 dBm	Κατώφλι ευαισθησίας δευτερ. δέκτη - Σχέσεις (5.1), (5.2)
$N_0$	-98 dBm	Θόρυβος βάθους - Σχέση (4.3)
$G_t, G_r$	1	Κέρδη κεραιών - Σχέσεις (5.1), (5.3)
$d_0$	1 m	LOS απόσταση αναφοράς - Σχέσεις (5.1), (5.3)
$\eta$	4	Εκθέτης απωλειών διαδρομής - Σχέσεις (5.1), (5.3)
$\delta_1$	5	Θετική σταθερά (ποινή) - Σχέση (4.3)
$\delta_2$	2	Θετική σταθερά (ποινή) - Σχέση (4.4)
$Pkt_s$	1500 bytes	Μέγεθος πακέτου
$\max\{P_{i,m}\}$	100 mW	Μέγιστη ισχύς εκπομπής δευτερευόντων χρηστών
$T$	$\frac{2}{\ln(1+sweepID)}$	Πρόγραμμα ανόπτησης - Σχέση (4.6)

Στις ακόλουθες προσομοιώσεις υιοθετείται <sup>1</sup> το λογαριθμικό πρόγραμμα ανόπτησης  $T = \frac{2}{\ln(1+sweepID)}$  για την εφαρμογή του αλγορίθμου Gibbs sampling, ο οποίος τερματίζει-

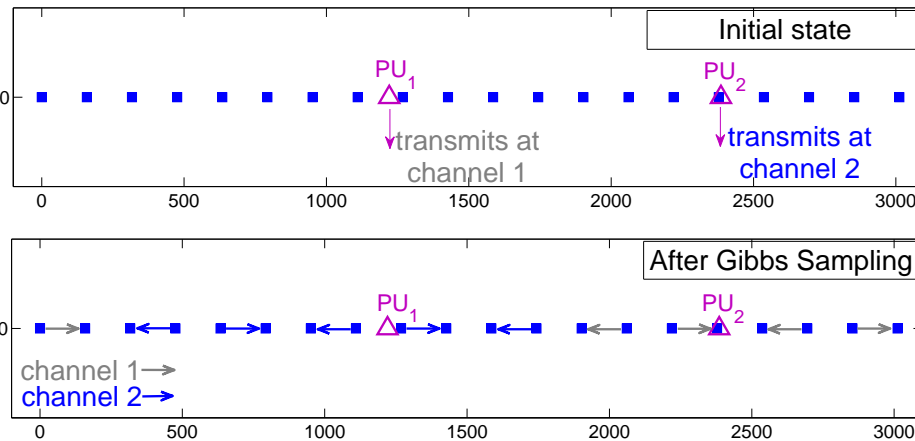
<sup>1</sup>Όμοια με το θεωρητικό πρόγραμμα ανόπτησης για το οποίο αποδεικνύεται [64] ότι το σύστημα συγκλίνει οριακά σε βέλτιστες λύσεις.

ται εφόσον επιτευχθεί σύγκλιση ή εφόσον εκτελεστεί ένας προκαθορισμένος πεπερασμένος αριθμός σαρώσεων (π.χ. 1000 σαρώσεις). Ο Πίνακας 5.1 συνοψίζει τις καθορισμένες τιμές των παραμέτρων του μοντέλου συστήματος (όπως ορίζονται στην ενότητα 5.3) για τις ακόλουθες προσομοιώσεις. Για τα εξεταζόμενα δικτυακά σενάρια υποθέτουμε  $M = 2$  αδειοδοτημένα κανάλια με κεντρικές συχνότητες  $f_1 = 300MHz$  και  $f_2 = 320MHz$ . Το εύρος ζώνης των καναλιών είναι ίσο με  $50kHz$ . Σημειώνεται ότι οι τιμές  $P_{i,m}$  καθορίζονται για κάθε δευτερεύον χρήστη  $i$  και κάθε κανάλι  $m$  βάσει της τρέχουσας θέσης του χρήστη και των ισχύων εκπομπής των πρωτεύοντων χρηστών, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται πάντα η ανεμπόδιστη λειτουργία των υποκείμενων πρωτεύοντων δικτύων. Συγκεκριμένα, υποθέτουμε ότι οι πρωτεύοντες χρήστες μεταδίδουν με ισχύ εκπομπής ίση με  $100mW$ , ενώ το κατώφλι ευαισθησίας δέκτη των πρωτεύοντων χρηστών ισούται με  $-74.2dBm$ . Για την προστασία ακόμη και των απομακρυσμένων πρωτεύοντων δεκτών, οι οποίοι βρίσκονται στα σύνορα του εύρους επικοινωνίας ενός πρωτεύοντος δικτύου (σενάριο δυσμενέστερης περίπτωσης), οι τιμές  $P_{i,m}$  τίθενται έτσι ώστε η ισχύς κάθε δευτερεύοντος σήματος (σε κάθε θέση της περιοχής επικοινωνίας των πρωτεύοντων συστημάτων) να είναι πάντα τουλάχιστον  $10dB$  μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή του πρωτεύοντος σήματος.

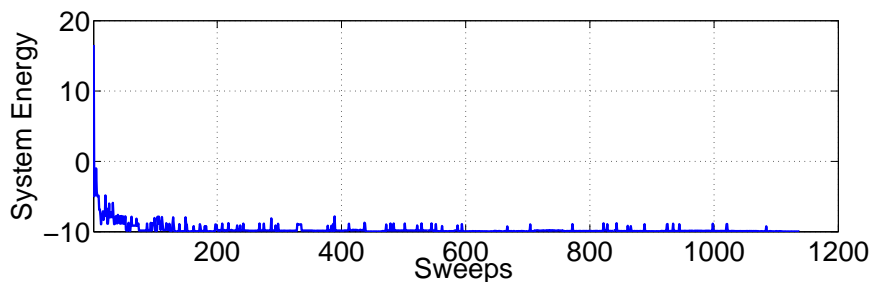
### 5.6.1 Εφαρμοσιμότητα της προτεινόμενης προσέγγισης σε δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας

Για την επίδειξη της διαδικασίας σύγκλισης του αλγορίθμου Gibbs Sampling της τεχνικής BPeMRF σε βέλτιστες καταστάσεις συστήματος ελαχίστης ενέργειας εξετάζεται η τετριμμένη περίπτωση μιας τοπολογίας γραμμής αποτελούμενη από δευτερεύοντες χρήστες (Σχήμα 5.3), όπου οι αποστάσεις μεταξύ των γειτονικών χρηστών επιτρέπουν επικοινωνία μόνο στη μέγιστη ισχύ μετάδοσης. Με τον τρόπο αυτό, διευκολύνεται η εποπτική εύρεση της βέλτιστης κατάστασης του συστήματος και, επομένως, η άμεση σύγκρισή της με τα αποτελέσματα της διαδικασίας Gibbs Sampling. Στο εξεταζόμενο σενάριο 20 δευτερεύοντες χρήστες συνυπάρχουν με 2 τυχαία τοποθετημένους πρωτεύοντες χρήστες, ενώ υποθέτουμε  $M = 2$  ομοιογενή αδειοδοτημένα κανάλια,  $L = 3$  διαθέσιμα επίπεδα ισχύος και  $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$ . Είναι εύκολο να παρατηρηθεί ότι οι βέλτιστες καταστάσεις, οι οποίες συνεισφέρουν σε μέγιστη χωρητικότητα δικτύου χωρίς συγκρούσεις πακέτων, για την εξεταζόμενη τοπολογία προκύπτουν από την ενεργοποίηση ζεύξεων μεταξύ των

κόμβων  $\{1 - 2, 3 - 4, \dots, 19 - 20\}$  σε κατάλληλες κατευθύνσεις και κανάλια, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται αποφυγή συγκρούσεων πακέτων.



**Σχήμα 5.3:** Εξεταζόμενη τοπολογία δευτερεύοντος δικτύου (πριν και μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου Gibbs sampling).



**Σχήμα 5.4:** Σύγκλιση σε καταστάσεις ελαχίστης ενέργειας.

Το Σχήμα 5.4 απεικονίζει τη μείωση της MRF ενέργειας συστήματος κατά τη διάρκεια του προγράμματος ανόπτησης και τη σύγκλιση στη βέλτιστη κατάσταση συστήματος που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.3. Παρατηρείται ότι η σύγκλιση επιτυγχάνεται περίπου μετά από 1000 σαρώσεις, ενώ οι φασματικοί πόροι (κανάλια) κατανέμονται έτσι ώστε να προστατεύουν την ανεμπόδιστη λειτουργία των πρωτευόντων χρηστών. Σημειώνεται ότι η μέγιστη τιμή του  $y$ -άξονα αναπαριστά το μέγιστο αριθμό συγκρούσεων (ο οποίος αντιπροσωπεύεται από τον αριθμό των ενεργοποιήσεων ζεύξεων που οδηγούν σε συγκρούσεις), όπως λαμβάνουν χώρα κυρίως στις αρχικές εποχές ανόπτησης. Για τις επόμενες προσομοιώσεις, ο πεπερασμένος μέγιστος αριθμός σαρώσεων ορίζεται ίσως με 1000, ενώ σε περίπτωση που ο αλγόριθμός Gibbs Sampling δεν έχει συγκλίνει μέσα σε 1000 σαρώσεις

υιοθετείται η βέλτιστη λύση που έχει βρεθεί έως τότε.

### 5.6.2 Επίδοση προτεινόμενης προσέγγισης

Στην παρούσα υποενότητα συγκρίνεται η επίδοση της BPeMRF προσέγγισης με τη θεωρητικά βέλτιστη επίδοση του αλγορίθμου back-pressure που στηρίζεται στην επίλυση ενός προβλήματος μέγιστης προσαρμογής βαρών (MWM - Maximum Weight Matching). Σε αντίθεση με την προσέγγιση BPeMRF, η κλασική μορφή του αλγορίθμου back-pressure δεν κατανέμει κανάλια εκπομπής και για το λόγο αυτό υιοθετούμε την ακόλουθη τροποποιημένη εκδοχή του αλγορίθμου back-pressure που διευκολύνει την άμεση σύγκριση των δυο μεθοδολογιών.

Ορίζεται η δυαδική συνάρτηση  $I_s$ , όπου  $I_s(m, t) = 1$  εάν το σημείο  $s = (i, j)$  χρησιμοποιεί το κανάλι  $m$  στη χρονική θυρίδα  $t$ , ενώ σε διαφορετική περίπτωση ισχύει ότι  $I_s(m, t) = 0$ . Επίσης, βάσει του υιοθετημένου μοντέλου συστήματος της ενότητας 5.3 ισχύει ότι  $\sum_m I_s(m, t) = 1$ . Η μέγιστη χωρητικότητα μιας κατευθυνόμενης ζεύξης  $s = (i, j)$  πάνω από το κανάλι  $m$  στη χρονική θυρίδα  $t$  συμβολίζεται ως  $\mu_{i,j}^m(t)$ . Με βάση τους ανωτέρω ορισμούς, ο χρονοπρογραμματισμός μεταδόσεων αποφασίζεται με την επίλυση του MWM προβλήματος

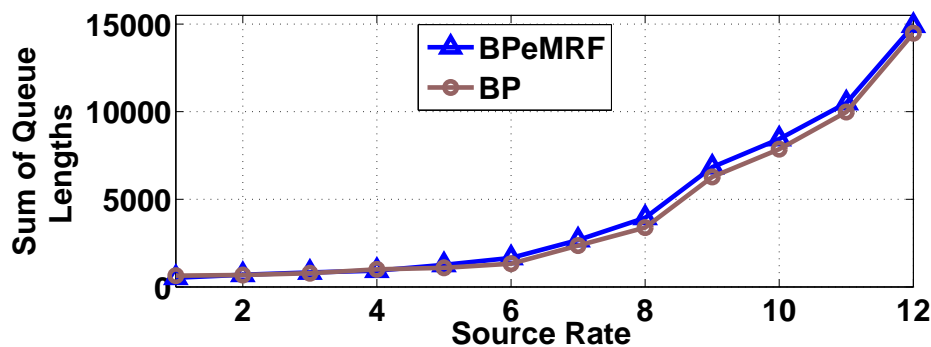
$$\begin{aligned} & \max_I \sum_{(i,j)} \left\{ \sum_m \mu_{i,j}^m(t) I_{i,j}(m, t) \right\} P_{ij}(t) \\ & \text{subject to } \sum_m I_s(m, t) = 1, I_s(m, t) \in \{0, 1\}, \text{ interference constraints} \end{aligned}$$

Για την επίλυση του ανωτέρου MWM προβλήματος θεωρείται γράφος δευτερευόντων χρηστών όπου κάθε σύνδεση  $(i, j)$  αντικαθίσταται με  $M$  συνδέσεις (για κάθε κανάλι  $m \in \{1 \dots M\}$ ) οι οποίες συμβολίζονται ως  $(i, j, m)$ . Στη συνέχεια, ορίζονται κατάλληλα τα μέγιστα σύνολα ανεξάρτητων συνδέσεων (σύνολο  $ID(t)$ ) υπό τους περιορισμούς παρεμβολής του νέου γράφου. Αναλυτικότερα, κάθε σημείο μπορεί να χρησιμοποιήσει το πολύ ένα κανάλι και ημιαμφίδρομη (half duplex) επικοινωνία, ενώ ικανοποιεί τους περιορισμούς του μοντέλου κατωφλίου σύλληψης της ενότητας 5.3 για τις επικαλυπτόμενες εκπομπές στο ίδιο κανάλι. Συμβολίζοντας με  $\mu_{i,j,m}(t) = \mu_{i,j}^m(t)$  τη χωρητικότητα κίνησης της σύνδεσης  $(i, j, m)$  και  $P_{ijm}(t) = P_{ij}(t), \forall m$ , το αρχικό MWM πρόβλημα είναι ισοδύναμο με το ακόλουθο MWM πρόβλημα εκφραζόμενο ως  $\max_{\mu \in ID(t)} \sum_{(i,j,m)} \mu_{i,j,m} P_{ijm}(t)$ . Κάθε σημείο  $s = (i, j)$  για το οποίο  $\mu_{i,j,m}(t) \neq 0$  στο κανάλι  $m$  εξυπηρετεί τη ροή  $c^*(i, j)$



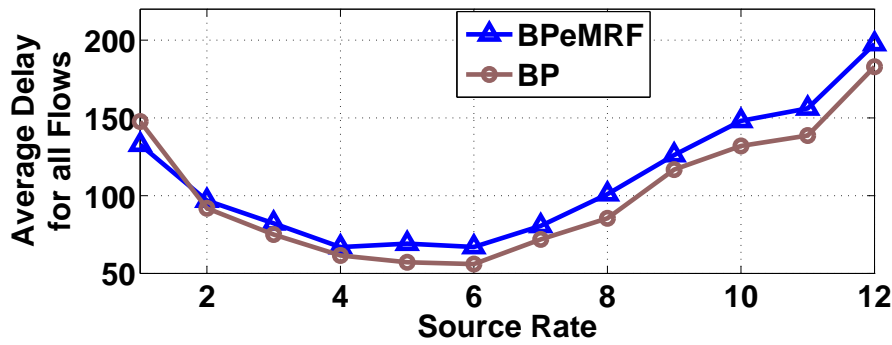
με ρυθμό  $\mu_{i,j}^m(t)$  στο κανάλι  $m$ .

Για τη σύγκριση μεταξύ της προτεινόμενης BPeMRF προσέγγισης και του αλγόριθμου back-pressure θεωρούνται 14 δευτερεύοντες χρήστες σε τοπολογία πλέγματος  $2 \times 7$ , όπου κάθε χρήστης παράγει πακέτα με προορισμό έναν τυχαία επιλεγμένο ομότιμο χρήστη για χρονικό διάστημα 1000 χρονοθυρίδων. Δεδομένου ότι ο κλασικός αλγόριθμος back-pressure δεν εκτελεί έλεγχο ισχύος και για λόγους άμεσης σύγκρισης θεωρείται ότι η προσέγγιση BPeMRF λειτουργεί με αποκλειστικά δύο επίπεδα ισχύος, δηλαδή,  $L = 2$ . Σε κάθε χρονική θυρίδα  $t$ , κάθε δευτερεύον χρήστης παράγει με πιθανότητα 20%  $n_s = 1 : 12$  πακέτα για τον αντίστοιχο κόμβο προορισμού. Στα Σχήματα 5.5, 5.6 και 5.7 συγκρίνεται η επίδοση του BPeMRF σε σχέση με τον αλγόριθμο βέλτιστης διεκπεραιωτικότητας back-pressure ως προς την περιοχή χωρητικότητας, την καθυστέρηση και το ρυθμό διεκπεραιωτικότητας (throughput rate), αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι για τις συγκεκριμένες προσομοιώσεις οι παράμετροι  $\lambda_1$  και  $\lambda_2$  ορίζονται σύμφωνα με την Πρόταση της ενότητας 5.4.

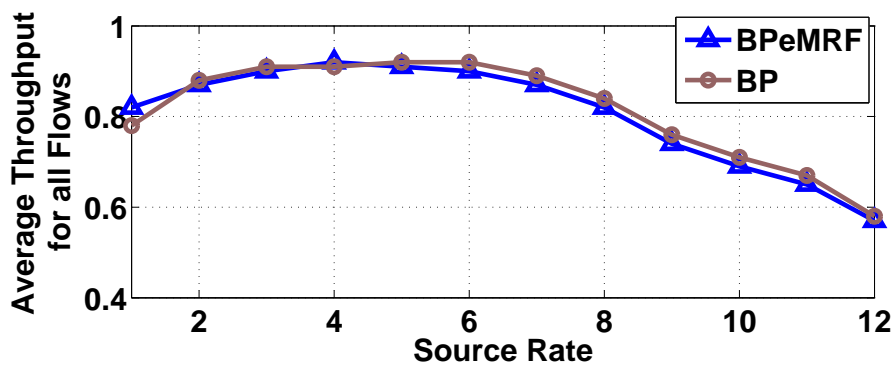


Σχήμα 5.5: Αθροισμα μήκους ουρών (εναπομείναντα πακέτα που δεν έχουν φτάσει στον κόμβο προορισμού) μετά τη πάροδο 1000 χρονικών θυρίδων.

Εκφράζοντας τη διεκπεραιωτικότητα κάθε ροής ως το ποσοστό των πακέτων που παραδόθηκαν στους κόμβους προορισμού προς τον συνολικό αριθμό πακέτων που παρήχθησαν για τη συγκεκριμένη ροή, το Σχήμα 5.7 απεικονίζει τη μέση διεκπεραιωτικότητα του δικτύου ως προς τις υπάρχουσες ροές. Ομοίως, εκφράζοντας τη διατεματική καθυστέρηση ως τη μέση χρονική διαφορά ανάμεσα στη παραγωγή ενός πακέτου από την πηγή έως την άφιξή του στον προορισμό, το Σχήμα 5.6 παρουσιάζει τη μέση καθυστέρηση για τις υπάρχουσες ροές του δικτύου. Τέλος, σύμφωνα με τον ορισμό της περιοχής χωρητικότητας ως το σύνολο των ρυθμών παραγωγής πακέτων που οδηγούν σε πεπερασμένα



Σχήμα 5.6: Μέση διατεταγμένη (από άκρο σε άκρο) καθυστέρηση για τις υπάρχουσες ροές.



Σχήμα 5.7: Μέση διεκπεραιωτικότητα δικτύου ως προς τις υπάρχουσες ροές.

μήκη ουρών, το Σχήμα 5.5 παρουσιάζει εποπτικά το σύνολο των επιτρεπών ρυθμών παραγωγής πακέτων (εντός περιοχής χωρητικότητας) που οριοθετείται από το σημείο όπου το άθροισμα μήκους των ουρών αναμονής αυξάνεται ραγδαία (δηλαδή, προσεγγιστικά έως την τιμή  $n_s = 8$ ). Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 5.5, η προσέγγιση BPeMRF και ο αλγόριθμος βέλτιστης διεκπεραιωτικότητας back-pressure παρουσιάζουν όμοια συμπεριφορά ως προς την περιοχή χωρητικότητας, γεγονός που συμφωνεί με τη πραγματοποιηθείσα θεωρητική ανάλυση (Πρόταση της ενότητας 5.4). Υπογραμμίζεται ότι ο αλγόριθμος BPeMRF εκτελείται για πεπερασμένο αριθμό εποχών ανόπτησης και επομένως θεωρητικά δεν εξασφαλίζεται τέλεια σύγκλιση σε βέλτιστες λύσεις. Ωστόσο, στην πράξη παρατηρείται όμοια συμπεριφορά, γεγονός που καθιστά τη μέθοδο BPeMRF κατάλληλη για εφαρμογή σε δυναμικά δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας, καθώς επιτρέπει βέλτιστης διεκπεραιωτικότητας διαστρωματική σχεδίαση χωρίς να απαιτεί την επίλυση του προβλήματος MWM. Τέλος, τα Σχήματα 5.6 και 5.7 ενισχύουν τις ανωτέρω παρατηρήσεις καθώς απεικονίζουν όμοια επίδοση μεταξύ των εξεταζόμενων προσεγγίσεων ως προς

τη μέση διεκπεραιωτικότητα και τη μέση διατερματική καθυστέρηση.

Συνοψίζοντας, η προσέγγιση BPeMRF συνεισφέρει στη συνδυασμένη κατανομή καναλιών και ενέργειας εκπομπής, καθώς και στην παροχή χρονοπρογραμματισμού μεταδόσεων και δρομολόγησης πακέτων βέλτιστης διεκπεραιωτικότητας. Σε πρακτικά σενάρια κεντρικοποιημένων δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας υπερτερεί του κλασικού αλγορίθμου back-pressure καθώς δεν απαιτεί την επίλυση του NP-hard [96] MWM προβλήματος. Το γεγονός αυτό αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας που χαρακτηρίζονται από δυναμικές τοπολογίες δευτερεύοντος δικτύου εξαιτίας των μεταβολών της λειτουργίας των πρωτεύοντων συστημάτων, και επομένως θα απαιτούσαν τον επαναλαμβανόμενο NP-hard υπολογισμό των μέγιστων συνόλων ανεξάρτητων συνδέσεων για την επίλυση του MWM προβλήματος.

### 5.6.3 Διαχείριση φήμης για την εμφάνιση πρωτεύοντων χρηστών

Στόχος των ακόλουθων προσομοιώσεων αποτελεί η ανάδειξη των οφελών της αξιοποίησης πληροφοριών κοινωνικών δικτύων από δευτερεύοντες χρήστες για την εύρεση κατάλληλων μονοπατιών προώθησης πακέτων σε δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας. Εξαιτίας της υψηλής επίδρασης της δραστηριότητας των πρωτεύοντων χρηστών στην επίδοση του δευτερεύοντος δικτύου - η οποία έγκειται στην απαίτηση διασφάλισης της ανεμπόδιστης λειτουργίας των πρωτεύοντων συστημάτων - εστιάζουμε στην εκμετάλλευση τοπικών πληροφοριών σχετικά με τη φήμη (επαν)εμφάνισης πρωτεύοντων χρηστών σε συγκεκριμένες τοποθεσίες. Με τον τρόπο αυτό δύναται να αποφευχθούν δευτερεύοντα μονοπάτια δρομολόγησης τα οποία διέρχονται από περιοχές που χαρακτηρίζονται από έντονη δυναμική δραστηριότητα των πρωτεύοντων χρηστών. Όπως επισημαίνεται στην εργασία [62], η δυναμική φύση των πρωτεύοντων μεταδόσεων μπορεί να προκαλέσει αλυσιδωτές αναπροσαρμογές στη λειτουργία των δευτερεύοντων χρηστών με αποτέλεσμα υψηλό κόστος αναδιάρθρωσης. Για τη μείωση ή αποφυγή τους, αξιοποιείται η προτεινόμενη προσέγγιση της ενότητας 5.5, SeBPeMRF, στόχος της οποίας αποτελεί η προώθηση πακέτων μέσω δυναμικά διαμορφωθέντων μονοπατιών που απαρτίζονται από επιλεγμένους δευτερεύοντες χρήστες και ανήκουν σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από φήμη μειωμένου ρυθμού επανεμφάνισης πρωτεύοντων χρηστών.

Στη συνέχεια υιοθετείται το μοντέλο ενός δευτερεύοντος δικτύου υποβοηθούμενο από

κεντρικές βάσεις δεδομένων φάσματος και υπηρεσίες κοινωνικής δικτύωσης που παρέχουν πληροφορίες σε κάθε χρήστη βάσει της γεωγραφικής του θέσης (Σχήμα 5.2). Τέτοιους είδους υπηρεσίες δύναται να διευκολύνουν την ανταλλαγή πληροφοριών και το διαμοιρασμό εμπειριών μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών σχετικά με τη διαθεσιμότητα φάσματος σε συγκεκριμένες γεωγραφικές θέσεις, αλλά και την απόκτηση συστάσεων για την αναμενόμενη συχνότητα επανεμφάνισης πρωτευόντων χρηστών. Με σκοπό την εύληπτη παρουσίαση των αποτελεσμάτων θεωρούμε μια τοπολογία πλέγματος  $5 \times 5$  δευτερευόντων χρηστών όπου δυο γειτονικοί δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να επικοινωνήσουν άμεσα εφόσον βρίσκονται σε απόσταση ενός άλματος, ενώ  $L = 2$ . Χωρίς βλάβη της γενικότητας, υποθέτουμε ότι η φήμη επανεμφάνισης πρωτευόντων χρηστών για κάθε θέση  $\mathbf{z} = [x \ y]^T$  ακολουθεί διμεταβλητή κανονική κατανομή  $\mathcal{N}(\mu, \Sigma)$  με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας που εκφράζεται ως

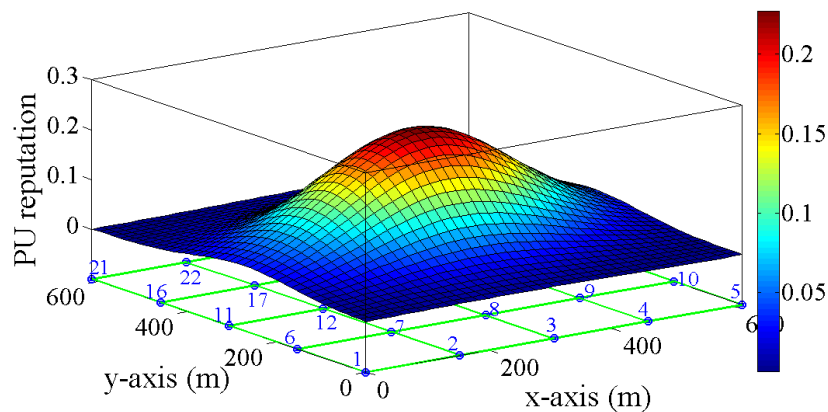
$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left(-\frac{1}{2}(\mathbf{z} - \mu)^T \Sigma^{-1}(\mathbf{z} - \mu)\right) \quad (5.18)$$

όπου  $\rho$  ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των αντίστοιχων μεταβλητών που περιγράφουν τις συντεταγμένες θέσης,  $\mu = \begin{pmatrix} \mu_x \\ \mu_y \end{pmatrix}$ , και  $\Sigma$  ο συμμετρικός θετικά ορισμένος πίνακας συμμεταβλητότητας  $\begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \rho\sigma_x\sigma_y \\ \rho\sigma_x\sigma_y & \sigma_y^2 \end{pmatrix}$ . Για το προκείμενο σενάριο το διάνυσμα μέσω  $\mu$  αντιστοιχίζεται στο κέντρο της εξεταζόμενης περιοχής και ο πίνακας συμμεταβλητότητας τίθεται έτσι ώστε  $\Sigma = \begin{pmatrix} 1 & 0.1 \\ 0.1 & 0.5 \end{pmatrix}$ . Τα Σχήματα 5.8 και 5.9 αναπαριστούν την εξεταζόμενη τοπολογία δευτερευόντος δικτύου, καθώς και τη σχετιζόμενη φήμη που αντιπροσωπεύει για κάθε θέση την πιθανότητα επανεμφάνισης πρωτευόντων χρηστών.

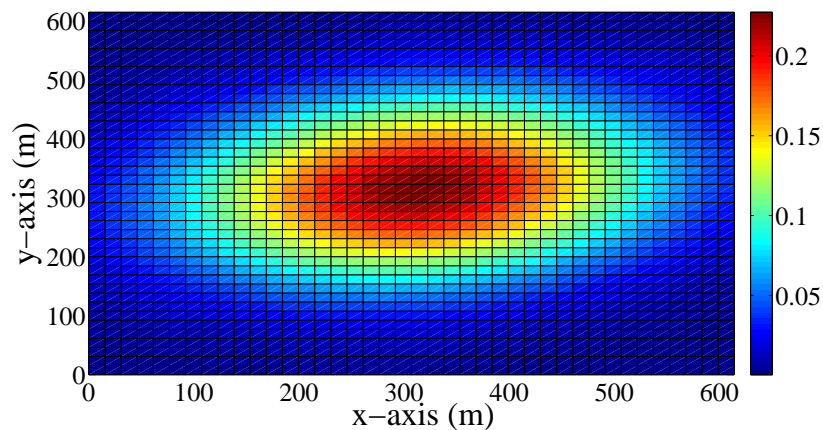
Όπως προτείνεται στην ενότητα 5.5.1 τα βάρη στις παραμέτρους  $\{\lambda_1, \lambda_2\}$  δύναται να ενσωματώσουν αποδοτικά ένα εύρος διαφορετικών κοινωνικών σχέσεων ανάλογα με τον ορισμό τους. Σε αυτό το πλαίσιο και στοχεύοντας στον περιορισμό των αναμενόμενων αναδιάρθρωσεων εξαιτίας της επανεμφάνισης πρωτευόντων χρηστών, τα βάρη  $w(i, j, c) = w(i, j)$ ,  $\forall c$  ορίζονται μέσω της Σχέσης (5.18) έτσι ώστε

$$w(i, j) = \max \left\{ 1 + \sigma_0 \times \left( f(x_i, y_i) - f(x_j, y_j) \right), w_m \right\} \quad \forall i, j \quad (5.19)$$

όπου ως  $(x_i, y_i)$  συμβολίζεται η θέση ενός δευτερευόντος χρήστη  $i$ , ως  $\sigma_0$  αναπαριστάται μια σταθερά (ίση με 100 για τις επόμενες προσομοιώσεις) για τον έλεγχο του βαθμού



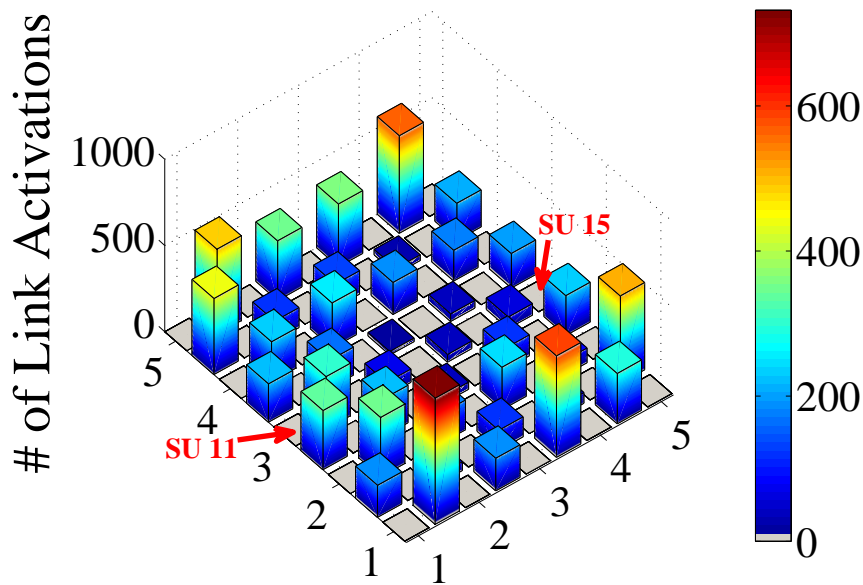
**Σχήμα 5.8:** Η εξεταζόμενη τοπολογία δευτερεύοντος δικτύου και η αντίστοιχη ενυπάρχουσα φήμη επανεμφάνισης πρωτευόντων χρηστών για κάθε θέση.



**Σχήμα 5.9:** Αναπαράσταση της σχετιζόμενης φήμης επανεμφάνισης πρωτευόντων χρηστών σε δύο διαστάσεις για το εξεταζόμενο σενάριο.

ανομοιογένειας των σχετιζόμενων βαρών και  $w_m$  η ελάχιστη δυνατή τιμή βάρους (ίση με  $10^{-6}$  για το εξεταζόμενο σενάριο). Επισημαίνεται ότι εάν  $j = c$ , δηλαδή,  $j$  αποτελεί τον τελικό προορισμό της ροής  $c$ , τότε  $w(i, j) = 1 + \sigma_0 \times f(x_i, y_i)$  έτσι ώστε να υποβοηθείται η παράδοση των πακέτων στον εκάστοτε τελικό προορισμό.

Το Σχήμα 5.10 απεικονίζει τον αριθμό ενεργοποιήσεων των δευτερεύοντων ζεύξεων για το εξεταζόμενο σενάριο όταν υπάρχει μόνο μία ενεργή ροή ανάμεσα στους δευτερεύοντες χρήστες 11 (πηγή) και 15 (προορισμός). Συγκεκριμένα, σε κάθε χρονική θυρίδα  $t$  η πηγή παράγει με πιθανότητα 50%  $n_s = 10$  πακέτα για τον αντίστοιχο προορισμό, ενώ οι προσομοιώσεις εκτελούνται για 1000 χρονικές θυρίδες. Παρατηρείται ότι χρησιμοποιώντας τις τιμές των ανωτέρω ορισμένων βαρών και αξιοποιώντας την προτεινόμενη μεθο-



**Σχήμα 5.10:** Ενεργοποιήσεις δευτερευόντων ζεύξεων για ροή δεδομένων μεταξύ του κόμβου πηγής 11 (στη θέση με συντεταγμένες (1,3) - βλέπε επίσης το Σχήμα 5.8) και του κόμβου προορισμού 15 (στη θέση με συντεταγμένες (5,3)).

δολογία της ενότητας 5.5, οι ενεργοποιήσεις ζεύξεων είναι περισσότερες στα σύνορα της εξετασθείσας περιοχής, δίνοντας έτσι προτεραιότητα στο χρονοπρογραμματισμό και δρομολόγηση ζεύξεων σε περιοχές με φήμη χαμηλής πιθανότητας επανεμφάνισης πρωτευόντων χρηστών (Σχήματα 5.8 και 5.9). Με τον τρόπο αυτό, μελλοντικές αναδιαρθρώσεις προκαλούμενες από πρωτεύοντα συστήματα είναι λιγότερο πιθανό να συμβούν δεδομένου ότι η πλειονότητα των δεδομένων μεταφέρονται από περιοχές χαμηλής δραστηριότητας πρωτευόντων συστημάτων και όχι από τη συντομότερη διαδρομή, δηλαδή, την ακολουθία κόμβων  $11 \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow 14 \rightarrow 15$ , η οποία διασχίζει το κέντρο της εξεταζόμενης τοπολογίας. Σημειώνεται ότι ο αριθμός των ενεργοποιήσεων δευτερευόντων ζεύξεων κοντά στην πηγή παρατηρείται υψηλότερος, όπως αναμένεται, για δύο βασικούς λόγους. Πρώτον, στο αρχικό στάδιο της προσομοίωσης τα πακέτα δεν έχουν προλάβει να φτάσουν στη γειτονιά του προορισμού και κατά συνέπεια η ενεργοποίηση ζεύξεων λαμβάνει χώρα μόνο όπου οι αντίστοιχες ουρές αναμονής δεν είναι άδειες. Δεύτερον, εξαιτίας της στοχαστικότητας που χαρακτηρίζει τη φύση της δρομολόγησης των τεχνικών backpressure, τα πακέτα δεν προωθούνται πάντα προς την κατεύθυνση του προορισμού<sup>2</sup> συμβάλλοντας σε

<sup>2</sup>Για παράδειγμα, όταν ένας μικρός αριθμός πακέτων εισάγεται σε ένα άδειο δίκτυο, τα πακέτα δύναται

μακρύτερες διαδρομές και υψηλότερο αριθμό ενεργοποιήσεων ζεύξεων κοντά στη πηγή. Αντιθέτως, στη γειτονική περιοχή ενός προορισμού ο αριθμός των ενεργοποιήσεων είναι μικρότερος, καθώς ο κόμβος προορισμού λειτουργεί ως τερματικός αποδέκτης των δεδομένων εξαφανίζοντας την τυχαιότητα της διαδικασίας προώθησης.

---

να συμμετέχουν σε μια τυχαία κίνηση στο δίκτυο εξαιτίας της έλλειψης ικανής πίεσης ώστε να τα οδηγήσει στους εκάστοτε προορισμούς.





## Κεφάλαιο 6

# Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εστίασε στη μελέτη χωροχρονικών τεχνικών μοντελοποίησης και διαστρωματικής σχεδίασης δευτερευόντων δικτύων που βασίζονται στην τεχνολογία των γνωσιακών ραδιοεπικοινωνιών. Προτού, ωστόσο, προταθούν και αναλυθούν οι καινοτόμες σχετικές τεχνικές κρίθηκε αναγκαία η ενδελεχής μελέτη του περιβάλλοντος ραδιοσυχνοτήτων για την εμπειριστατωμένη προσέγγιση των τρεχουσών προβλημάτων.

Μέσω της πραγματοποιηθείσας επισκόπησης κατάληψης φάσματος, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2, διαπιστώθηκε ότι οι ήδη εκχωρημένοι φασματικοί πόροι υποχρησιμοποιούνται ακόμη και σε πυκνοκατοικημένες περιοχές όπως η αστική περιοχή των Αθηνών. Βασικό συμπέρασμα αποτέλεσε η ύπαρξη φασματικών περιοχών με χρονικά μεταβαλλόμενη κατάσταση απασχόλησης, γεγονός που επιτάσσει την ανάγκη αποτελεσματικότερης πολιτικής διαχείρισης του ραδιοφάσματος και τη μετάβαση σε σχήματα δυναμικής φασματικής πρόσβασης. Ως καταλληλότερη τεχνολογία που δύναται να επιτρέψει την αύξηση της φασματικής αποδοτικότητας κρίνεται η τεχνολογία γνωσιακών ραδιοεπικοινωνιών βάσει της οποίας οι δευτερεύοντες χρήστες έχουν τη δυνατότητα να αξιοποιούν ευκαιριακά κάθε είδους φασματικές οπές που μπορούν να εμφανιστούν στα πεδία της συχνότητας, του χώρου και του χρόνου. Η περαιτέρω επεξεργασία του μεγάλου όγκου των ακατέργαστων δεδομένων φασματικής ανίχνευσης ανέδειξε, επίσης, κρυμμένες στατιστικές ιδιότητες του ραδιοφάσματος. Συγκεκριμένα, αποδείχθηκε η ύπαρξη ιδιοτήτων συ-

σχέτισης στη μετρούμενη ενέργεια μεταξύ γειτονικών φασματικών στοιχείων που δύναται να αξιοποιηθούν προς όφελος της ενημερότητας των δευτερευόντων χρηστών. Όπως αναλύεται στο Κεφάλαιο 3, συμπεραίνεται ότι μέσω μιας μεθοδολογίας στατιστικής ανάλυσης και ομαδοποίησης φασματικών στοιχείων είναι δυνατόν να επωφεληθούν τόσο θεωρητικές εργασίες, π.χ. με τον ορισμό της έννοιας των δευτερευόντων καναλιών, όσο και πρακτικές εφαρμογές. Ενδεικτικά, παρουσιάζεται και επαληθεύεται η βελτίωση που δύναται να επιτευχθεί στη σχέση μεταξύ ακρίβειας και χρόνου ανίχνευσης σε πρακτικές μεθοδολογίες ανίχνευσης που βασίζονται στη μεθοδολογία εντοπισμού ενέργειας σημάτων και ειδικότερα σε τεχνικές αδρομερούς-λεπτομερούς ανίχνευσης.

Κύριο θέμα μελέτης αποτέλεσε η χρησιμοποίηση της θεωρίας των τυχαίων πεδίων Markov κατά τη φάση μοντελοποίησης των ασύρματων δευτερευόντων δικτύων έτσι ώστε να λαμβάνονται εγγενώς υπόψη οι υφιστάμενες χωρικές εξαρτήσεις που εμφανίζονται εξαιτίας της τοπικής φύσης των εκάστοτε μεταδόσεων αλλά και των χωροχρονικών μεταβαλλόμενων φασματικών οπών. Διακρίνοντας τις περιπτώσεις κατανεμημένης και κεντρικοποιημένης λειτουργίας των δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας προτάθηκαν αντίστοιχα μοντέλα λειτουργίας των εν λόγω δικτύων διευκολύνοντας, έμμεσα, τη σχεδίαση βέλτιστων διαστρωματικών προσεγγίσεων. Πιο συγκεκριμένα, οι μοντελοποιημένες χωρικές εξαρτήσεις αξιοποιήθηκαν κατά τη φάση διαστρωματικής σχεδίασης έτσι ώστε οι τοπικές αποφάσεις των δευτερευόντων χρηστών να οδηγούν σε καθολικά βέλιστα αποτελέσματα. Με επίκεντρο τα τρία κατώτερα στρώματα της στοίβας πρωτοκόλλων, δηλαδή το φυσικό στρώμα, το στρώμα ελέγχου πρόσβασης στο μέσο και το στρώμα δικτύου, προτάθηκαν αντίστοιχες κατανεμημένες και κεντρικοποιημένες προσεγγίσεις που στοχεύουν στη βελτίωση της κατανομής πόρων μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών και τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών χρονοπρογραμματισμού και δρομολόγησης. Αναλυτικότερα, για κατανεμημένα δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας εξετάστηκαν στο Κεφάλαιο 4 συνδυαστικά τα προβλήματα α) διαμοιρασμού καναλιών μεταξύ των χρηστών, β) αντιμετώπισης του ανταγωνισμού για πρόσβαση στο μέσο βελτιώνοντας την επίδοση των υπαρχόντων αμιγών αλγορίθμων πρόσβασης και γ) βελτίωσης των επιλεγμένων διαδρομών δρομολόγησης παρέχοντας πρόσθετους φασματικούς πόρους με στόχο πιο σταθερά και υψηλότερης ποιότητας μονοπάτια δρομολόγησης. Αντίστοιχα, για κεντρικοποιημένα δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας μελετήθηκαν τα προβλήματα διαμοιρασμού φασμα-

τικών πόρων, ελέγχου ισχύος, χρονοπρογραμματισμού και δρομολόγησης πακέτων χρησιμοποιώντας, επιπρόσθετα, χαρακτηριστικά της τεχνικής Back-pressure. Η συνδυασμένη και διαστρωματική αντιμετώπιση των ανωτέρων προβλημάτων πραγματοποιήθηκε μέσω της αναγωγής τους σε προβλήματα ελαχιστοποίησης της MRF ενέργειας, ενώ πυρήνας και μηχανή επίλυσης της προτεινόμενης σχεδίασης αποτέλεσε η μέθοδος Gibbs Sampling που επιτρέπει τη λήψη συλλογικών, αλλά κατανεμημένων, αποφάσεων από τους δευτερεύοντες χρήστες για την κατάλληλη προσαρμογή του δικτύου στις εκάστοτε επικρατούσες συνθήκες και τη σύγκλιση σε βέλτιστες καταστάσεις λειτουργίας. Μέσω προσομοιώσεων εξετάστηκαν διαφορετικά δικτυακά σενάρια επιβεβαιώνοντας την ορθότητα των θεωρητικών μοντέλων και αναδεικνύοντας τα οφέλη των προτεινόμενων πλαισίων διαστρωματικής σχεδίασης.

Βασικό συμπέρασμα της παρούσας διδακτορικής διατριβής αποτέλεσε, επίσης, η χρησιμότητα και σπουδαιότητα της θεωρίας των τυχαίων πεδίων Markov στην ανάλυση και βελτιστοποίηση ασύρματων δικτύων επικοινωνιών. Παρότι η εν λόγω θεωρία έχει συνδεθεί με προβλήματα του κλάδου της στατιστικής φυσικής και εφαρμογές του τομέα της ανάλυσης εικόνας, συμπεραίνεται ότι μπορεί να μελετηθεί περαιτέρω, να αξιοποιηθεί και να εφαρμοστεί σε προβλήματα που εντάσσονται στην έρευνα των δικτύων επικοινωνιών.

Τέλος, αξίζει να αναφερθούν συνοπτικά ορισμένα ανοικτά προς επίλυση ερευνητικά θέματα που προέκυψαν κατά την τρέχουσα εργασία και δύναται να αποτελέσουν μελλοντικές επεκτάσεις της.

### **Επέκταση μελέτης σε ανώτερα στρώματα της στοίβας πρωτοκόλλων**

Οι προτεινόμενες διαστρωματικές προσεγγίσεις αντιμετωπίζουν συνδυαστικά προβλήματα που αναφέρονται στα τρία χαμηλότερα στρώματα της παραδοσιακής στοίβας πρωτοκόλλων, δηλαδή το φυσικό στρώμα, το στρώμα MAC και το στρώμα δικτύου. Ωστόσο, μια πιο ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική προσέγγιση απαιτεί επίσης τη μελέτη προβλημάτων που εντάσσονται στη λειτουργία των ανωτέρων επιπέδων, όπως για παράδειγμα ο έλεγχος συμφόρησης που πραγματοποιείται στο στρώμα μεταφοράς. Η βελτιστοποιημένη λειτουργία των ανωτέρων στρωμάτων οφείλει να λαμβάνει υπόψη παράμετρους που ανήκουν σε μη γειτονικά στρώματα, δικαιολογώντας με τον τρόπο αυτό τη διαστρωματική προσέγγιση. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι η στοχαστική φύση των

φασματικών οπών, ιδίως σε κατανεμημένα δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας που δεν συνεργάζονται με τα πρωτεύοντα συστήματα, οδηγεί σε συνθήκες ασύρματης δικτύωσης που χαρακτηρίζονται από αναπόφευκτες διακοπές οι οποίες συχνά μεταφράζονται σε απώλειες πακέτων. Οι εν λόγω απώλειες πακέτων δύναται να επιβαρύνουν σημαντικά την ποιότητα υπηρεσίας των χρηστών όταν συνοδεύονται από παραδοσιακά συνδεδεισμένη πρωτόκολλα μεταφοράς, π.χ. TCP, και για το λόγο αυτό εναλλακτικές προσεγγίσεις οφείλουν να ερευνηθούν. Συνεπώς, αναφορικά με το προτεινόμενο πλαίσιο διαστρωματικής σχεδίασης της παρούσας εργασίας οφείλει να διερευνηθεί η δυνατότητα αναθεώρησης και επέκτασης των συναρτήσεων δυναμικού με απώτερο σκοπό την εισαγωγή παραμέτρων ανώτερων στρωμάτων και τη μερική ή πλήρη τροποποίηση των υπάρχοντων σχετικών μηχανισμών.

### **Αποκατάσταση αδρομερούς εικόνας ραδιοφάσματος**

Η διαδικασία ανίχνευσης φασματικών οπών συνεπάγεται αναπόφευκτα κάποια χρονική επιβάρυνση, η οποία εξαρτάται άμεσα από το εύρος του εξεταζόμενου φάσματος ραδιοσυχνοτήτων. Όταν υλοποιείται από τους ίδιους τους δευτερεύοντες χρήστες, λειτουργεί εις βάρος της διαδικασίας μετάδοσης πραγματικών δεδομένων και κατ' επέκταση περιορίζει τη διεκπεραιωτικότητα του δικτύου. Οι τεχνικές αδρομερούς ανίχνευσης επιλύουν εν μέρει το εν λόγω πρόβλημα προσφέροντας ταχεία διαδικασία ανίχνευσης, ωστόσο, οδηγούν σε χαμηλότερης ακρίβειας αποτύπωση της εικόνας του ραδιοφάσματος. Η βελτίωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων της αδρομερούς φασματικής ανίχνευσης μέσω τεχνικών μετεπεξεργασίας, οι οποίες δεν δεσμεύουν το δέκτη της συσκευής και δεν απαιτούν υψηλό κόστους εξοπλισμό, αποτελούν, επομένως, ένα ανοικτό προς επίλυση ερευνητικό θέμα.

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3, η εικόνα του ραδιοφάσματος δύναται να παραλληλιστεί με μια πραγματική ψηφιακή εικόνα, όπου η έννοια των φασματικών στοιχείων αντιστοιχίζεται με την έννοια των εικονοστοιχείων. Μια πιθανή μελλοντική επέκταση των συμπερασμάτων της πραγματοποιηθείσας μελέτης αποτελεί η αξιοποίηση των αλληλεξαρτήσεων μεταξύ των γειτονικών φασματικών στοιχείων μέσω της θεωρίας τυχαίων πεδίων Markov για την εξάλειψη αβεβαιοτήτων που υπεισέρχονται κατά τη διαδικασία απόφασης κατάληψης ή μη ενός φασματικού στοιχείου. Πιο συγκεκριμένα, δύναται να

διερευνηθούν τεχνικές βελτίωσης της ποιότητας των αποτελεσμάτων της αδρομερούς ανίχνευσης μέσω μετεπεξεργασίας και σε αναλογία με τεχνικές ανάλυσης εικόνας που αξιοποιούνται στον καθαρισμό μιας θορυβώδους εικόνας βάσει των χωρικών αλληλεξαρτήσεων γειτονικών εικονοστοιχείων, π.χ. [64].

### **Μελέτη και σύγκριση διαφορετικών αλγορίθμων επίλυσης του προβλήματος ελαχιστοποίησης της ενέργειας συστήματος**

Η χρήση της θεωρίας των τυχαίων πεδίων Markov κατά τη φάση μοντελοποίησης των δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας (Κεφάλαια 4 και 5) και η διαστρωματική σχεδίαση του τρόπου λειτουργίας των εν λόγω δικτύων βάσει των συναρτήσεων δυναμικού ανάγουν την αντιμετώπιση των εξεταζόμενων προβλημάτων σε επίλυση ενός προβλήματος ελαχιστοποίησης της MRF ενέργειας συστήματος. Ως μηχανή επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης (optimization engine), π.χ. Σχήμα 5.1, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος στοχαστικής χαλάρωσης Gibbs Sampling. Ωστόσο, έχει ερευνητικό ενδιαφέρον να διερευνηθούν περαιτέρω και να αξιολογηθούν επιπρόσθετες εναλλακτικές μεθοδολογίες επίλυσης, καλύπτοντας τόσο ντετερμινιστικές όσο και στοχαστικές προσεγγίσεις, π.χ. [66]. Ενδεικτικά κριτήρια σύγκρισης και αξιολόγησης των προκείμενων μελετών αποτελούν η ποιότητα των λύσεων, η ταχύτητα σύγκλισης σε βέλτιστες λύσεις, η αλγοριθμική πολυπλοκότητα, η απαιτούμενη σηματοδοσία μεταξύ των κόμβων, κλπ.

### **Υλοποίηση και δοκιμή σε πειραματικές πλατφόρμες**

Παρά τη θεωρητική ανάλυση και την πραγματοποιηθείσα αξιολόγηση μέσω προσομοιώσεων των προτεινόμενων διαστρωματικών αρχιτεκτονικών, όπως παρουσιάστηκαν στα Κεφάλαια 4 και 5, θεωρείται άκρως αναγκαία η μελλοντική επέκταση της τρέχουσας εργασίας με σκοπό την πραγματική υλοποίηση των εξεταζόμενων μηχανισμών. Η υλοποίηση και η δοκιμή των προτεινόμενων τεχνικών σε πραγματικές πειραματικές πλατφόρμες που εντάσσονται στην έρευνα των δικτύων γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας, π.χ. USRP [12], αναμένεται να δώσουν σαφείς απαντήσεις όσον αφορά την πρακτικότητα των σχετικών θεωρητικών προσεγγίσεων, να αναδείξουν πιθανές αδυναμίες, αλλά και να δημιουργήσουν νέες κατευθύνσεις έρευνας όσον αφορά τα δίκτυα γνωσιακής ραδιοεπικοινωνίας.



# Παράρτημα Α΄

## Τυχαία Πεδία Markov - Markov Random Fields (MRFs)

Η θεωρία των MRFs εισήχθη αρχικά στο πεδίο της στατιστικής φυσικής ως προσπάθεια πιθανοτικής ανάλυσης ενός συγκεκριμένου μοντέλου (Ising model), το οποίο πήρε το όνομά του από το Γερμανό φυσικό Ernst Ising, με σκοπό την ερμηνεία εμπειρικά παρατηρήσιμων στοιχείων σε φερρομαγνητικά υλικά [65]. Αποτελεί μια γενίκευση της Μαρκοβιανής ιδιότητας στο χώρο και έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στο επιστημονικό πεδίο της ανάλυσης εικόνας [81, 64].

Ας θεωρήσουμε ένα πεπερασμένο σύνολο,  $S$  ( $|S| = n$ ), με στοιχεία  $s \in S$ , τα οποία αναφέρονται επίσης και ως MRF σημεία. Για κάθε σημείο  $s$  ορίζεται μια τυχαία μεταβλητή  $X_s$  που χαρακτηρίζει την κατάσταση του, ενώ το σύνολο των πιθανών καταστάσεων κάθε MRF σημείου (φασικός χώρος) συμβολίζεται με  $\Lambda$ , δηλαδή η τυχαία μεταβλητή  $X_s$  λαμβάνει μια τιμή  $x_s \in \Lambda$ . Η οικογένεια των τυχαίων μεταβλητών  $X = \{X_s, s \in S\}$  περιγράφει τη συνολική κατάσταση του συστήματος σε κάθε χρονική στιγμή, ενώ μια πιθανή κατάσταση του συστήματος συμβολίζεται ως  $\omega = (x_1, \dots, x_s, \dots, x_n) \in \Omega = \{(x_1, \dots, x_s, \dots, x_n) : x_s \in \Lambda, s \in S\}$ . Τέλος, ο πεπερασμένος  $n$ -διάστατος χώρος  $\Omega = \Lambda^n$  συμβολίζει το σύνολο όλων των πιθανών καταστάσεων του ολικού συστήματος.

Ένα *τυχαίο πεδίο* (RF - Random Field) περιγράφει μια οικογένεια χωρικά εξαρτώμενων τυχαίων μεταβλητών. Αναλυτικότερα, ένα RF αποτελεί ένα αυστηρά θετικό μέτρο πιθανότητας  $\mathbb{P}$  στο χώρο  $\Omega$ , όπου  $\mathbb{P}(X = \omega) > 0, \forall \omega \in \Omega$ . Δεδομένου ότι  $\mathbb{P}$  είναι

αυστηρά θετικό, μπορούν να ορισθούν για κάθε σημείο  $s$  οι δεσμευμένες πιθανότητες  $\mathbb{P}(X_s = x_s | X_r = x_r, r \neq s)$ , οι οποίες συχνά αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία ως "local characteristics". Ένα τυχαίο πεδίο είναι ένα Markov Random Field (MRF) ως προς ένα σύστημα γειτονιάς  $\mathcal{G}$ , εάν για κάθε σημείο  $s \in S$ ,

$$\mathbb{P}(X_s = x_s | X_r = x_r, r \neq s) = \mathbb{P}(X_s = x_s | X_r = x_r, r \in \mathcal{G}_s) \quad (\text{A'.1})$$

όπου ένα σύστημα γειτονιάς στο χώρο  $S$  ορίζεται ως μια οικογένεια  $\mathcal{G} = \{\mathcal{G}_s\}_{s \in S}$  αποτελούμενη από υποσύνολα  $\mathcal{G}_s \subset S$ , έτσι ώστε

- για κάθε  $s \in S$ ,  $s \notin \mathcal{G}_s$  και
- $r \in \mathcal{G}_s$  αν και μόνο αν  $s \in \mathcal{G}_r$ .

Συγκεκριμένα, ως  $\mathcal{G}_s$  συμβολίζεται η γειτονιά του MRF σημείου  $s$ . Ως εκ τούτου, ένα τυχαίο πεδίο Markov αποτελεί ένα μέτρο πιθανότητας στο χώρο  $\Omega$  για το οποίο η κατάσταση ενός MRF σημείου εξαρτάται μόνο από τη γνώση των καταστάσεων των αντίστοιχων γειτονικών σημείων. Η ιδιότητα αυτή μπορεί να φανεί ιδιαίτερα χρήσιμη για τον υπολογισμό βέλτιστων λύσεων (δηλαδή, βέλτιστων καταστάσεων του συστήματος) όταν ο αριθμός των πιθανών καταστάσεων του συστήματος είναι εξαιρετικά μεγάλος.

Μια ειδική κατηγορία τυχαίων πεδίων αποτελούν τα *τυχαία πεδία Gibbs* (GRFs - Gibbs Random Fields). Στην πραγματικότητα, κάθε αυστηρά θετική κατανομή  $\mathbb{P}$  μπορεί να αναπαρασταθεί ως κατανομή Gibbs, η οποία χαρακτηρίζεται από τη συνάρτηση ενέργειας  $U(\omega)$  και εκφράζεται ως:

$$\mathbb{P}(X = \omega) = \frac{1}{Z} e^{-\frac{U(\omega)}{T}} \quad (\text{A'.2})$$

όπου η παράμετρος συστήματος  $T$  αναφέρεται και ως θερμοκρασία συστήματος, ενώ ως  $Z := \sum_{\omega \in \Omega} e^{-\frac{U(\omega)}{T}}$  συμβολίζεται η καλούμενη συνάρτηση διαμέρισης (partition function). Η συνάρτηση ενέργειας  $U(\omega)$  ενός τυχαίου πεδίου GRF αναπαριστά μια μετρική ενέργειας για τη κατάσταση συστήματος  $\omega$  και μπορεί να αποδομηθεί σε μια οικογένεια συναρτήσεων, οι οποίες είναι γνωστές ως συναρτήσεις δυναμικού. Ως "γειτονικό" (neighbour) GRF ως προς ένα καθορισμένο σύστημα γειτονιάς ονομάζεται ένα τυχαίο πεδίο GRF όπου η συνάρτηση ενέργειας εκφράζεται ως άθροισμα συναρτήσεων δυναμικού με  $V_C = 0$  όταν το υποσύνολο σημείων  $C$  δεν αποτελεί μια κλίκα. Σημειώνεται



ότι ένα σύνολο σημείων σχηματίζει μια κλίκα όταν όλα τα σημεία του συνόλου είναι μεταξύ τους γείτονες, δεδομένου ενός προκαθορισμένου συστήματος γειτονιάς. Συνεπώς, η συνάρτηση ενέργειας ενός neighbour GRF μπορεί να εκφραστεί ως εξής

$$U(\omega) = \sum_{C \in \mathcal{C}} V_C(\omega) \quad (\text{A'.3})$$

όπου  $C$  συμβολίζει μια κλίκα και  $\mathcal{C}$  το σύνολο των δυνατών κλικών.

Με τη βοήθεια του Hammersley-Clifford θεωρήματος αποδεικνύεται ότι δεδομένου ενός καθορισμένου συστήματος γειτονιάς  $\mathcal{G}$ , ένα τυχαίο πεδίο είναι MRF ως προς  $\mathcal{G}$  αν και μόνο αν είναι neighbour GRF για το σύστημα γειτονιάς  $\mathcal{G}$  [81]. Σημειώνεται ότι το ανωτέρω θεώρημα, γνωστό και ως θεώρημα ισοδυναμίας, παρέχει έναν αποδοτικό και συχνά ευκολότερο τρόπο καθορισμού ενός MRF με τον προσδιορισμό των συναρτήσεων δυναμικού, και επομένως της συνάρτησης ενέργειας του συστήματος, σε αντίθεση με τον ακριβή προσδιορισμό των μοναδικών δεσμευμένων πιθανοτήτων (Α'.1) για κάθε MRF σημείο που είναι πρακτικά αδύνατο.

□



# Βιβλιογραφία

- [1] C. V. N. Index, ``Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2014–2019," Feb 2015.
- [2] J. Mitola III, ``Software radios: Survey, critical evaluation and future directions," *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE*, vol. 8, no. 4, pp. 25--36, 1993.
- [3] F. K. Jondral, ``Software-defined radio: basics and evolution to cognitive radio," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2005, no. 3, pp. 275--283, 2005.
- [4] J. Mitola III and G. Q. Maguire Jr, ``Cognitive radio: making software radios more personal," *Personal Communications, IEEE*, vol. 6, no. 4, pp. 13--18, 1999.
- [5] J. Mitola, ``Cognitive radio---an integrated agent architecture for software defined radio," Ph.D. dissertation, Royal Institute of Technology (KTH), 2000.
- [6] S. Haykin, ``Cognitive radio: brain-empowered wireless communications," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 23, no. 2, pp. 201--220, 2005.
- [7] B. Wang and K. R. Liu, ``Advances in cognitive radio networks: A survey," *Selected Topics in Signal Processing, IEEE Journal of*, vol. 5, no. 1, pp. 5--23, 2011.
- [8] P. Pawelczak, K. Nolan, L. Doyle, S. W. Oh, and D. Cabric, ``Cognitive radio: Ten years of experimentation and development," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 49, no. 3, pp. 90--100, 2011.
- [9] GNU Radio Website, accessed April 2014. [Online]. Available: {href="http://www.gnuradio.org"target="\_blank">http://www.gnuradio.org}

- [10] P. D. Sutton, J. Lotze, H. Lahlou, S. A. Fahmy, K. E. Nolan, B. Ozgul, T. W. Rondeau, J. Noguera, and L. E. Doyle, "Iris: an architecture for cognitive radio networking testbeds," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 48, no. 9, pp. 114--122, 2010.
- [11] C. R. A. González, C. B. Dietrich, S. Sayed, H. I. Volos, J. D. Gaeddert, P. M. Robert, J. H. Reed, and F. E. Kragh, "Open-source sca-based core framework and rapid development tools enable software-defined radio education and research," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 47, no. 10, pp. 48--55, 2009.
- [12] The USRP Platform , accessed April 2014. [Online]. Available: {href="http://www.ettus.com"target="\_blank">http://www.ettus.com}
- [13] S. M. Mishra, D. Cabric, C. Chang, D. Willkomm, B. Van Schewick, A. Wolisz, and R. W. Brodersen, "A real time cognitive radio testbed for physical and link layer experiments," in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*. IEEE, 2005, pp. 562--567.
- [14] P. Murphy, A. Sabharwal, and B. Aazhang, "Design of warp: a wireless open-access research platform," in *European Signal Processing Conference, 2006*, pp. 1804--1824.
- [15] G. J. Minden, J. B. Evans, L. Searl, D. DePardo, V. R. Petty, R. Rajbanshi, T. Newman, Q. Chen, F. Weidling, J. Guffey *et al.*, "Kuar: A flexible software-defined radio development platform," in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007. DySPAN 2007. 2nd IEEE International Symposium on*. IEEE, 2007, pp. 428--439.
- [16] J. Mitola, "Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications," in *Mobile Multimedia Communications, 1999.(MoMuC'99) 1999 IEEE International Workshop on*. IEEE, 1999, pp. 3--10.
- [17] Q. Zhao and B. M. Sadler, "A survey of dynamic spectrum access," *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol. 24, no. 3, pp. 79--89, 2007.

- [18] A. Durantini and M. Martino, "The spectrum policy reform paving the way to cognitive radio enabled spectrum sharing," *Telecommunications Policy*, vol. 37, no. 2, pp. 87--95, 2013.
- [19] R. S. P. GROUP, "Report on collective use of spectrum (cus) and other spectrum sharing approaches," 2011.
- [20] Shared Spectrum Company, "Spectrum occupancy measurements," accessed April 2014. [Online]. Available: {href="http://www.sharedspectrum.com"target="\_blank">http://www.sharedspectrum.com}
- [21] M. López-Benítez, F. Casadevall, A. Umberto, J. Pérez-Romero, R. Hachemani, J. Palicot, and C. Moy, "Spectral occupation measurements and blind standard recognition sensor for cognitive radio networks," in *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2009. CROWNCOM'09. 4th International Conference on*. IEEE, 2009, pp. 1--9.
- [22] M. Wellens, J. Wu, and P. Mahonen, "Evaluation of spectrum occupancy in indoor and outdoor scenario in the context of cognitive radio," in *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2007. CrownCom 2007. 2nd International Conference on*. IEEE, 2007, pp. 420--427.
- [23] M. H. Islam, C. L. Koh, S. W. Oh, X. Qing, Y. Y. Lai, C. Wang, Y.-C. Liang, B. E. Toh, F. Chin, G. L. Tan *et al.*, "Spectrum survey in singapore: Occupancy measurements and analyses," in *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2008. CrownCom 2008. 3rd International Conference on*. IEEE, 2008, pp. 1--7.
- [24] R. I. Chiang, G. B. Rowe, and K. W. Sowerby, "A quantitative analysis of spectral occupancy measurements for cognitive radio," in *Vehicular Technology Conference, 2007. VTC2007-Spring. IEEE 65th*. IEEE, 2007, pp. 3016--3020.
- [25] K. A. Qaraqe, H. Celebi, A. Gorcin, A. El-Saigh, H. Arslan, and M.-S. Alouini, "Empirical results for wideband multidimensional spectrum usage," in *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2009 IEEE 20th International Symposium on*. IEEE, 2009, pp. 1262--1266.

- [26] S. Arkoulis, E. Anifantis, V. Karyotis, S. Papavassiliou, and N. Mitrou, "Discovering and exploiting spectrum power correlations in cognitive radio networks: an experimentally driven approach," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2014, no. 1, p. 17, 2014.
- [27] V. Valenta, R. Marsalek, G. Baudoin, M. Villegas, M. Suarez, and F. Robert, "Survey on spectrum utilization in europe: Measurements, analyses and observations," in *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks & Communications (CROWNCOM), 2010 Proceedings of the Fifth International Conference on*. IEEE, 2010, pp. 1--5.
- [28] S. Yin, D. Chen, Q. Zhang, M. Liu, and S. Li, "Mining spectrum usage data: a large-scale spectrum measurement study," *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, vol. 11, no. 6, pp. 1033--1046, 2012.
- [29] M. López-Benítez and F. Casadevall, "Methodological aspects of spectrum occupancy evaluation in the context of cognitive radio," *European Transactions on Telecommunications*, vol. 21, no. 8, pp. 680--693, 2010.
- [30] National Instruments Corp., "2.7 GHz RF Vector Signal Analyzer with Digital Downconversion," accessed April 2014. [Online]. Available: [http://www.ni.com/pdf/products/us/cat\\_vectorsignalanalyzer.pdf](http://www.ni.com/pdf/products/us/cat_vectorsignalanalyzer.pdf)
- [31] NI PXI-1042 Series, accessed April 2015. [Online]. Available: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/13909>
- [32] LabVIEW System Design Software, accessed April 2015. [Online]. Available: <http://www.ni.com/labview/>
- [33] M. Wellens and P. Mähönen, "Lessons learned from an extensive spectrum occupancy measurement campaign and a stochastic duty cycle model," *Mobile networks and applications*, vol. 15, no. 3, pp. 461--474, 2010.

- [34] M. López Benítez, F. J. Casadevall Palacio *et al.*, "Spectrum occupancy in realistic scenarios and duty cycle model for cognitive radio," 2010.
- [35] T. Yucek and H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol. 11, no. 1, pp. 116--130, 2009.
- [36] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing (3rd Edition) (Prentice Hall Signal Processing)*, 3rd ed. Prentice Hall, 8 2009.
- [37] A. Papoulis, *Probability and Statistics*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 1990.
- [38] D. Cabric, A. Tkachenko, and R. W. Brodersen, "Experimental study of spectrum sensing based on energy detection and network cooperation," in *Proceedings of the first international workshop on Technology and policy for accessing spectrum*. ACM, 2006, p. 12.
- [39] Εθνικός Κανονισμός Κατανομής Ζωνών Συχνοτήτων, Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, accessed April 2015. [Online]. Available: {href="http://www.yme.gr/getfile.php?id=4650"target="\_blank">http://www.yme.gr/getfile.php?id=4650}
- [40] Hellenic Telecommunications and Post Commission, accessed April 2015. [Online]. Available: {href="http://www.eett.gr"target="\_blank">http://www.eett.gr}
- [41] S. Shakkottai, T. S. Rappaport, and P. C. Karlsson, "Cross-layer design for wireless networks," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 41, no. 10, pp. 74--80, 2003.
- [42] V. T. Raisinghani and S. Iyer, "Cross-layer design optimizations in wireless protocol stacks," *Computer Communications*, vol. 27, no. 8, pp. 720--724, 2004.
- [43] V. Srivastava and M. Motani, "Cross-layer design: a survey and the road ahead," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 43, no. 12, pp. 112--119, 2005.

- [44] F. Foukalas, V. Gazis, and N. Alonistioti, "Cross-layer design proposals for wireless mobile networks: a survey and taxonomy," *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol. 10, no. 1, pp. 70--85, 2008.
- [45] S.-J. Kim, E. Dall'Anese, J. A. Bazerque, K. Rajawat, and G. B. Giannakis, "Advances in spectrum sensing and cross-layer design for cognitive radio networks," *E-Reference Signal Processing*, 2013.
- [46] B. Fu, Y. Xiao, H. Deng, and H. Zeng, "A survey of cross-layer designs in wireless networks," *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol. 16, no. 1, pp. 110--126, 2014.
- [47] V. Kawadia and P. R. Kumar, "A cautionary perspective on cross-layer design," *Wireless Communications, IEEE*, vol. 12, no. 1, pp. 3--11, 2005.
- [48] L. Luo and S. Roy, "Modelling and analysis of detection time trade-offs for channel searching in cognitive radio networks," *IET communications*, vol. 6, no. 8, pp. 819--827, 2012.
- [49] K. Hossain and B. Champagne, "Wideband spectrum sensing for cognitive radios with correlated subband occupancy," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 18, no. 1, pp. 35--38, 2011.
- [50] M. Wellens, A. de Baynast, and P. Mahonen, "Exploiting historical spectrum occupancy information for adaptive spectrum sensing," in *Wireless Communications and Networking Conference, 2008. WCNC 2008. IEEE*. IEEE, 2008, pp. 717--722.
- [51] M. López-Benitez, F. Casadevall, D. López-Pérez, and A. Vasilakos, "Modeling and simulation of joint time-frequency properties of spectrum usage in cognitive radio," in *Proc. 4th Int'l. Conf. Cognitive Radio and Adv. Spect. Management (CogART 2011)*, 2011, pp. 1--5.
- [52] E. Visotsky, S. Kuffner, and R. Peterson, "On collaborative detection of tv transmissions in support of dynamic spectrum sharing," in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*. IEEE, 2005, pp. 338--345.



- [53] Y. Zeng, Y.-C. Liang, A. T. Hoang, and R. Zhang, "A review on spectrum sensing for cognitive radio: challenges and solutions," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2010, p. 2, 2010.
- [54] D. Xu, E. Jung, and X. Liu, "Optimal bandwidth selection in multi-channel cognitive radio networks: how much is too much?" in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2008. DySPAN 2008. 3rd IEEE Symposium on*. IEEE, 2008, pp. 1--11.
- [55] A. Palaios, J. Riihijarvi, O. Holland, A. Achtzehn, and P. Mahonen, "Measurements of spectrum use in london: exploratory data analysis and study of temporal, spatial and frequency-domain dynamics," in *Dynamic Spectrum Access Networks (DYSPAN), 2012 IEEE International Symposium on*. IEEE, 2012, pp. 154--165.
- [56] D. Hawkins, "Using u statistics to derive the asymptotic distribution of fisher's z statistic," *The American Statistician*, vol. 43, no. 4, pp. 235--237, 1989.
- [57] N. J. Cox, "Speaking stata: Correlation with confidence, or fisher'sz revisited," *Stata J*, vol. 8, pp. 413--439, 2008.
- [58] T. J. DiCiccio and B. Efron, "Bootstrap confidence intervals," *Statistical science*, pp. 189--212, 1996.
- [59] L. Luo, N. M. Neihart, S. Roy, and D. J. Allstot, "A two-stage sensing technique for dynamic spectrum access," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 6, pp. 3028--3037, 2009.
- [60] N. M. Neihart, S. Roy, and D. J. Allstot, "A parallel, multi-resolution sensing technique for multiple antenna cognitive radios," in *Circuits and Systems, 2007. ISCAS 2007. IEEE International Symposium on*. IEEE, 2007, pp. 2530--2533.
- [61] S. J. Shellhammer *et al.*, "Spectrum sensing in ieee 802.22," *IAPR Wksp. Cognitive Info. Processing*, pp. 9--10, 2008.

- [62] S. Arkoulis, E. Anifantis, V. Karyotis, S. Papavassiliou, and N. Mitrou, "On the optimal, fair and channel-aware cognitive radio network reconfiguration," *Computer Networks*, vol. 57, no. 8, pp. 1739--1757, 2013.
- [63] -----, "Channel switching-aware optimal reconfiguration in cognitive radio networks," in *European Wireless, 2012. EW. 18th European Wireless Conference*. VDE, 2012, pp. 1--8.
- [64] S. Geman and D. Geman, "Stochastic relaxation, gibbs distributions, and the bayesian restoration of images," *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, no. 6, pp. 721--741, 1984.
- [65] R. Kindermann, J. L. Snell *et al.*, *Markov random fields and their applications*. American Mathematical Society Providence, RI, 1980, vol. 1.
- [66] N. Komodakis, N. Paragios, and G. Tziritas, "Mrf energy minimization and beyond via dual decomposition," *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, vol. 33, no. 3, pp. 531--552, 2011.
- [67] M. Song, C. Xin, Y. Zhao, and X. Cheng, "Dynamic spectrum access: from cognitive radio to network radio," *Wireless Communications, IEEE*, vol. 19, no. 1, pp. 23--29, 2012.
- [68] J. Riihijärvi, M. Petrova, and P. Mähönen, "Frequency allocation for wlans using graph colouring techniques." in *WONS*, vol. 5, 2005, pp. 216--222.
- [69] K. R. Chowdhury, N. Nandiraju, P. Chanda, D. P. Agrawal, and Q.-A. Zeng, "Channel allocation and medium access control for wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 7, no. 2, pp. 307--321, 2009.
- [70] W. Wang and X. Liu, "List-coloring based channel allocation for open-spectrum wireless networks," in *IEEE Vehicular Technology Conference*, vol. 62, no. 1. Citeseer, 2005, p. 690.
- [71] K.-L. Yau, P. Komisarczuk, and P. D. Teal, "A context-aware and intelligent dynamic channel selection scheme for cognitive radio networks," in *Cognitive*

- Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2009. CROWNCOM'09. 4th International Conference on.* IEEE, 2009, pp. 1--6.
- [72] S. Perreau, M. Sigelle, P. Da Silva, and A. Jayasuriya, "Sensor networks protocol design using random markov field theory," in *Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, 2009. SECON'09. 6th Annual IEEE Communications Society Conference on.* IEEE, 2009, pp. 1--8.
- [73] E. Anifantis, V. Karyotis, and S. Papavassiliou, "A markov random field framework for channel assignment in cognitive radio networks," in *Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops), 2012 IEEE International Conference on.* IEEE, 2012, pp. 770--775.
- [74] X. Lin, N. B. Shroff, and R. Srikant, "A tutorial on cross-layer optimization in wireless networks," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 24, no. 8, pp. 1452--1463, 2006.
- [75] M. Cesana, F. Cuomo, and E. Ekici, "Routing in cognitive radio networks: Challenges and solutions," *Ad Hoc Networks*, vol. 9, no. 3, pp. 228--248, 2011.
- [76] M. Chiang, S. H. Low, A. R. Calderbank, and J. C. Doyle, "Layering as optimization decomposition: A mathematical theory of network architectures," *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 1, pp. 255--312, 2007.
- [77] L. Ding, T. Melodia, S. N. Batalama, J. D. Matyjas, and M. J. Medley, "Cross-layer routing and dynamic spectrum allocation in cognitive radio ad hoc networks," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 59, no. 4, pp. 1969--1979, 2010.
- [78] J. Ma, G. Y. Li, and B. H. Juang, "Signal processing in cognitive radio," *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 5, pp. 805--823, 2009.
- [79] B. F. Lo, "A survey of common control channel design in cognitive radio networks," *Physical Communication*, vol. 4, no. 1, pp. 26--39, 2011.
- [80] X. Tan, W. Xi, and J. S. Baras, "Decentralized coordination of autonomous swarms using parallel gibbs sampling," *Automatica*, vol. 46, no. 12, pp. 2068--2076, 2010.

- [81] G. Winkler, *Image analysis, random fields and Markov chain Monte Carlo methods: a mathematical introduction*. Springer, 2003, vol. 27.
- [82] L. Chen, B. Wang, X. Zhang, and D. Yang, "Utility-based resource allocation for mixed traffic in wireless networks," in *Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), 2011 IEEE Conference on*. IEEE, 2011, pp. 91--96.
- [83] M. Cesana, F. Cuomo, and E. Ekici, "Routing in cognitive radio networks: Challenges and solutions," *Ad Hoc Networks*, vol. 9, no. 3, pp. 228--248, 2011.
- [84] N. Metropolis, A. W. Rosenbluth, M. N. Rosenbluth, A. H. Teller, and E. Teller, "Equation of state calculations by fast computing machines," *The journal of chemical physics*, vol. 21, no. 6, pp. 1087--1092, 2004.
- [85] S. Kirkpatrick, M. Vecchi *et al.*, "Optimization by simulated annealing," *science*, vol. 220, no. 4598, pp. 671--680, 1983.
- [86] A. Trouvé, "Partially parallel simulated annealing: Low and high temperature approach of the invariant measure," in *Applied Stochastic Analysis*. Springer, 1992, pp. 262--278.
- [87] P. A. Ferrari, A. Frigessi, R. H. Schonmann *et al.*, "Convergence of some partially parallel gibbs samplers with annealing," *The Annals of Applied Probability*, vol. 3, no. 1, pp. 137--153, 1993.
- [88] The TOMLAB Optimization Environment, accessed April 2014. [Online]. Available: <http://tomopt.com/tomlab/>
- [89] FCC, "Second report and order and memorandum opinion and order," ET Docket Nos. 02-380 and 04-186, 23 FCC Rcd 16807, 2008.
- [90] Ofcom, "Tv white spaces: approach to coexistence," Technical report, September 2013.
- [91] L. Tassiulas and A. Ephremides, "Stability properties of constrained queueing systems and scheduling policies for maximum throughput in multihop radio

- networks," *Automatic Control, IEEE Transactions on*, vol. 37, no. 12, pp. 1936-1948, 1992.
- [92] L. Georgiadis, M. J. Neely, and L. Tassiulas, *Resource allocation and cross-layer control in wireless networks*. Now Publishers Inc, 2006.
- [93] M. J. Neely, "Stochastic network optimization with application to communication and queueing systems," *Synthesis Lectures on Communication Networks*, vol. 3, no. 1, pp. 1--211, 2010.
- [94] A. Eryilmaz, E. Modiano, and A. Ozdaglar, "Randomized algorithms for throughput-optimality and fairness in wireless networks," in *Decision and Control, 2006 45th IEEE Conference on*. IEEE, 2006, pp. 1936--1941.
- [95] A. Eryilmaz, A. Ozdaglar, D. Shah, and E. Modiano, "Distributed cross-layer algorithms for the optimal control of multihop wireless networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, vol. 18, no. 2, pp. 638--651, 2010.
- [96] M. Leconte, J. Ni, and R. Srikant, "Improved bounds on the throughput efficiency of greedy maximal scheduling in wireless networks," *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, vol. 19, no. 3, pp. 709--720, 2011.
- [97] A. Goldsmith, *Wireless communications*. Cambridge university press, 2005.
- [98] A. Iyer, C. Rosenberg, and A. Karnik, "What is the right model for wireless channel interference?" *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 5, pp. 2662--2671, 2009.
- [99] N. Kayastha, D. Niyato, P. Wang, and E. Hossain, "Applications, architectures, and protocol design issues for mobile social networks: A survey," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 12, pp. 2130--2158, 2011.
- [100] K.-C. Chen, M. Chiang, and H. V. Poor, "From technological networks to social networks." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 9-Supplement, pp. 548--572, 2013.

- [101] X. Chen, J. Huang, and H. Li, "Adaptive channel recommendation for dynamic spectrum access," in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), 2011 IEEE Symposium on*. IEEE, 2011, pp. 116--124.
- [102] X. Chen, X. Gong, L. Yang, and J. Zhang, "A social group utility maximization framework with applications in database assisted spectrum access," in *INFOCOM, 2014 Proceedings IEEE*. IEEE, 2014, pp. 1959--1967.
- [103] H. Li, W. Huang, C. Wu, Z. Li, and F. C. Lau, "Utility-maximizing data dissemination in socially selfish cognitive radio networks," in *Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS), 2011 IEEE 8th International Conference on*. IEEE, 2011, pp. 212--221.
- [104] E. Stai, J. S. Baras, and S. Papavassiliou, "A class of backpressure algorithms for networks embedded in hyperbolic space with controllable delay-throughput trade-off," in *Proceedings of the 15th ACM international conference on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*. ACM, 2012, pp. 15--22.
- [105] MATLAB – The Language of Technical Computing, accessed April 2015. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/products/matlab/> "target="\_blank"><https://www.mathworks.com/products/matlab/>

# Ευρετήριο

- Ακτινομετρία, 18
- Αδρομερής-λεπτομερής ανίχνευση, 50
- Βάσεις δεδομένων φάσματος, 98, 102
- Βέλτιστη διεκπεραιωτικότητα, 102
- Γνωσιακές ραδιοεπικοινωνίες, 2, 10
- Γνωσιακός κύκλος, 11
- Δειγματοληψία κατά Gibbs, 57, 59, 76
- Δευτερεύον δίκτυο, 2
- Δευτερεύον κανάλι, 37
- Δευτερεύον χρήστης, 12
- Διαστρωματική σχεδίαση, 4, 30, 67, 106
- Δυναμική φασματική πρόσβαση, 13
- Επισκόπηση κατάληψης φάσματος, 15, 16
- Ευστάθεια δικτύου, 101
- Ευστάθεια κατά Lyapunov, 101
- Ηδυσημείο, 22
- Κανάλι μέτρησης, 42
- Κοινωνικό δίκτυο, 112
- Λογισμικόριστη ραδιοεπικοινωνία, 10
- Περιοδόγραμμα, 18
- Περιοχή χωρητικότητας, 100
- Προσομοιωμένη ανόπτηση, 57
- Πρωτεύον δίκτυο, 2
- Πρωτεύον χρήστης, 12
- Πυκνότητα φασματικής ισχύος, 20
- Σήμα κατειλημμένου, 63, 64
- Συνάρτηση δυναμικού, 59, 69, 138
- Συνάρτηση χρησιμότητας, 70
- Συντελεστής συσχέτισης, 40
- Τυχαία πεδία Gibbs, 58, 138
- Τυχαία πεδία Markov, 57, 137
- Φασματική ανίχνευση βασισμένη στον εντοπισμό της ενέργειας σημάτων, 18, 50
- Φασματική οπή, 14, 29
- Φασματική ουδετερότητα, 12
- Φασματικό στοιχείο, 19, 35