



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

## **Αναδιάρθρωση Αναθέσεων Πόρων σε Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

Σταμάτιος Γ. Αρκουλής

Αθήνα, Φεβρουάριος 2014





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

## Αναδιάρθρωση Αναθέσεων Πόρων σε Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας

### ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Σταμάτιος Γ. Αρκουλής

**Συμβουλευτική Επιτροπή:** Νικόλαος Μήτρου  
Συμεών Παπαβασιλείου  
Γεώργιος Στασινόπουλος

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 25<sup>η</sup> Φεβρουαρίου 2014.

.....  
Ν. Μήτρου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

.....  
Γ. Στασινόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

.....  
Ε. Συκάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Φ. Κωνσταντίνου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Θ. Αποστολόπουλος  
Καθηγητής Ο.Π.Α.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2014

.....  
**Σταμάτιος Γ. Αρκουλής**  
Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

Copyright © Σταμάτιος Γ. Αρκουλής, 2014.  
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.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή υποστηρίχθηκε οικονομικά από τον Ειδικό Λογαριασμό Κονδυλίων Έρευνας του ΕΜΠ μέσω υποτροφίας για το χρονικό διάστημα 03/2009 – 03/2013.

# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1	Πλαίσιο Έρευνας	2
1.1.1	Γνωσιακή Ραδιοεπικοινωνία	2
1.1.2	Γνωσιακός Κύκλος	3
1.2	Δομή και συνεισφορά διατριβής	10
<b>2</b>	<b>Βέλτιστη αναδιάρθρωση αναθέσεων πόρων σε Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας</b>	<b>13</b>
2.1	Κίνητρα και οφέλη	14
2.2	Θεωρητικό και τεχνικό υπόβαθρο	20
2.2.1	Πολυ-αλματικά ασύρματα δίκτυα	20
2.2.2	Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός	22
2.2.3	Πρόβλημα Ροής Πολλαπλών Αγαθών	24
2.3	Σχετική βιβλιογραφία	25
2.4	Αρχιτεκτονική συστήματος και υποθέσεις	32
2.4.1	Αρχιτεκτονική συστήματος	33
2.4.2	Παράμετροι συστήματος και υποθέσεις	40
2.4.3	Μοντέλα μετάδοσης και παρεμβολών	43
2.4.4	Κόστος και πλαίσιο αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων	48
2.5	Μαθηματική μοντελοποίηση προβλήματος Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο	52
2.6	Μαθηματική μοντελοποίηση προβλήματος Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων	60
2.7	Αξιολόγηση μηχανισμού Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων βάσει προσομοιώσεων	67
2.7.1	Περιβάλλον εκτέλεσης προσομοιώσεων	67
2.7.2	Δίκτυο τοπολογίας πλέγματος	70
2.7.3	Δίκτυο τυχαίας τοπολογίας	77
2.8	Σύνοψη και συμπεράσματα	82
<b>3</b>	<b>Πλησιοβέλτιστη αναδιάρθρωση αναθέσεων πόρων σε Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας</b>	<b>85</b>
3.1	Κίνητρα και οφέλη	86
3.2	Θεωρητικό και τεχνικό υπόβαθρο	90
3.3	Σχετική βιβλιογραφία	93

3.4	Πλησιοβέλτιστη επίλυση προβλήματος Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο .....	98
3.5	Πλησιοβέλτιστη επίλυση προβλήματος Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων .....	103
3.6	Αξιολόγηση ευρετικής μεθόδου RSSR βάσει προσομοιώσεων .....	120
3.6.1	Περιβάλλον εκτέλεσης προσομοιώσεων .....	120
3.6.2	Αριθμητικά αποτελέσματα αξιολόγησης ευρετικής μεθόδου RSSR .....	124
3.6.3	Μελέτη κλιμακωσιμότητας λειτουργίας ευρετικής μεθόδου RSSR .....	133
3.7	Σύνοψη και συμπεράσματα .....	146
<b>4</b>	<b>Επισκόπηση Κατάληψης Φάσματος στην περιοχή των Αθηνών</b> .....	<b>149</b>
4.1	Κίνητρα και οφέλη .....	150
4.2	Θεωρητικό και τεχνικό υπόβαθρο .....	152
4.3	Σχετική βιβλιογραφία .....	156
4.4	Μεθοδολογία εκτέλεσης Επισκόπησης Κατάληψης Φάσματος .....	160
4.4.1	Αρχιτεκτονική επαίσθησης φάσματος .....	161
4.4.2	Παραμετροποίηση αρχιτεκτονικής επαίσθησης φάσματος .....	163
4.4.3	Ακολουθούμενη μεθοδολογία εκτέλεσης .....	166
4.5	Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων .....	169
4.6	Σύνοψη και συμπεράσματα .....	177
<b>5</b>	<b>Εντοπισμός και εκμετάλλευση συσχετίσεων στη μετρούμενη ενέργεια του ραδιοφάσματος</b> .....	<b>179</b>
5.1	Κίνητρα και οφέλη .....	180
5.2	Σχετική βιβλιογραφία .....	185
5.2.1	Ιδιότητες συσχέτισης καναλιών .....	185
5.2.2	Τεχνικές αδρομερούς-λεπτομερούς επαίσθησης .....	189
5.3	Εκμετάλλευση συσχετίσεων ενέργειας φασματικών στοιχείων ως μεθοδολογία εξαγωγής γνώσης .....	193
5.4	Σενάρια εκμετάλλευσης της εξαγόμενης γνώσης .....	200
5.4.1	Βελτίωση διαδικασίας εντοπισμού φασματικών οπών .....	200
5.4.2	Βελτίωση διαδικασίας επιλογής φασματικών οπών .....	206
5.4.3	Αντίκτυπος σε προσεγγίσεις σχετιζόμενες με τη Γνωσιακή Ραδιοεπικοινωνία .....	207
5.5	Επίδειξη πρακτικής εφαρμογής της προτεινόμενης μεθοδολογίας και αποτίμηση των οφελών της .....	209
5.5.1	Περιβάλλον εκτέλεσης πειραμάτων .....	210
5.5.2	Επίδειξη εφαρμογής της προτεινόμενης μεθοδολογίας στην πράξη .....	211
5.5.3	Πειραματική επαλήθευση βελτίωσης της διαδικασίας εντοπισμού φασματικών οπών .....	217
5.5.4	Πειραματική επαλήθευση βελτίωσης της διαδικασίας επιλογής φασματικών οπών .....	219
5.6	Σύνοψη και συμπεράσματα .....	221
<b>6</b>	<b>Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις</b> .....	<b>223</b>
	<b>Βιβλιογραφία</b> .....	<b>229</b>

# Κατάλογος σχημάτων

1.1	Γνωσιακός Κύκλος. ....	4
2.1	Τοπολογία και αρχιτεκτονική συστήματος. ....	32
2.2	Αλληλουχία ενεργειών αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων. ....	40
2.3	Σημειογραφία και γραφική αναπαράσταση ασύρματων συσκευών, διεπαφών δικτύου και ενεργών ζεύξεων. ....	42
2.4	Εμβέλεια μετάδοσης, εμβέλεια παρεμβολής και προϋποθέσεις απρόσκοπτης επικοινωνίας μεταξύ δυο ασύρματων συσκευών/διεπαφών δικτύου. ....	44
2.5	Σχηματική αναπαράσταση διαδικασίας αποδοτικής αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων. ....	61
2.6	Προγραμματιστική υποδομή εκτέλεσης σεναρίων προσομοιώσεων. ....	69
2.7	Δίκτυο τοπολογίας πλέγματος. ....	71
2.8	Επιτευχθείς Παράγοντας Κλίμακας $\lambda$ έναντι προκληθείσης επιβάρυνσης κατά την αναδιάρθρωση της ισχύουσας ανάθεσης πόρων του δικτύου τοπολογίας πλέγματος. ....	73
2.9	Αριθμός διεπαφών δικτύου οι οποίες προβαίνουν σε μεταγωγή καναλιού κατά την αναδιάρθρωση της ισχύουσας ανάθεσης πόρων του δικτύου τοπολογίας πλέγματος. ....	75
2.10	Αριθμός ζεύξεων οι οποίες παραμένουν ανέπαφες κατά την αναδιάρθρωση της ισχύουσας ανάθεσης πόρων του δικτύου τοπολογίας πλέγματος. ....	76
2.11	Δίκτυο τυχαίας τοπολογίας. ....	78
2.12	Επιτευχθείς Παράγοντας Κλίμακας $\lambda$ έναντι προκληθείσης επιβάρυνσης κατά την αναδιάρθρωση της ισχύουσας ανάθεσης πόρων του δικτύου τυχαίας τοπολογίας. ....	79
2.13	Αριθμός διεπαφών δικτύου οι οποίες προβαίνουν σε μεταγωγή καναλιού κατά την αναδιάρθρωση της ισχύουσας ανάθεσης πόρων του δικτύου τυχαίας τοπολογίας. ....	80
2.14	Αριθμός ζεύξεων οι οποίες παραμένουν ανέπαφες κατά την αναδιάρθρωση της ισχύουσας ανάθεσης πόρων του δικτύου τυχαίας τοπολογίας. ....	81
3.1	Εναλλακτικές ζεύξεις (/ μεταβλητές απόφασης $x_{i_m j_n}^u$ ) μεταξύ των διεπαφών δικτύου δυο ασύρματων συσκευών πάνω από δυο διαθέσιμα κανάλια. ....	106
3.2	Διάγραμμα ροής εκτέλεσης ευρετικής μεθόδου RSSR. ....	109

3.3	Ζεύξεις (/ μεταβλητές απόφασης $x_{i_m, j_n}^u$ ) οι οποίες συμμετέχουν στα υποσύνολα $K$ και $B_2$ των δυο πρώτων βημάτων εκτέλεσης της ευρετικής μεθόδου RSSR. ....	110
3.4	Διακριτό μοντέλο Gilbert-Elliot. ....	122
3.5	Δίκτυο τυχαίας τοπολογίας. ....	125
3.6	Σύγκριση απόδοσης ευρετικών μεθόδων επίλυσης προβλήματος Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο. ....	126
3.7	Προσθετική Αθροιστική Καθυστέρηση Μεταγωγών Καναλιού. ....	132
3.8	Προσθετικός αριθμός διεπαφών δικτύου οι οποίες προβαίνουν σε μεταγωγή καναλιού. ....	133
3.9	Προσθετικός αριθμός επανεγκαθιδρυόμενων ζεύξεων. ....	134
3.10	Τοπολογίες εξεταζόμενων Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. ....	137
3.11	Προοδευτικός εντοπισμός πλησιοβέλτιστων αναθέσεων πόρων βελτιωμένης ποιότητας από πλευράς της μεθόδου RSSR (περίπτωση VI-C2). ....	143
3.12	Προσθετική Αθροιστική Καθυστέρηση Μεταγωγών Καναλιού για τα σενάρια προσομοιώσεων I-VI. ....	145
4.1	Σχηματικό διάγραμμα ανιχνευτή ενέργειας. ....	154
4.2	Αρχιτεκτονική επαίσθησης ραδιοφάσματος. ....	161
4.3	Χρόνος σάρωσης ζώνης συχνοτήτων εύρους 50MHz για διαφορετικά μεγέθη φασματικού στοιχείου. ....	166
4.4	Βαθμός χρησιμοποίησης (επί τοις εκατό) φασματικών ζωνών ενδιαφέροντος (εκφρασμένων σε MHz) στη μητροπολιτική περιοχή των Αθηνών. ....	170
5.1	Πραγματική άποψη περιβάλλοντος ραδιοσυχνοτήτων έναντι άποψης λαμβανόμενης από πλευράς της τεχνικής επαίσθησης φάσματος βασισμένης στον εντοπισμό ενέργειας. ....	194
5.2	Πίνακας συσχετίσεων τιμών ενέργειας εξεταζόμενων φασματικών στοιχείων. ....	214
5.3	Συστάδες φασματικών στοιχείων των οποίων οι τιμές ενέργειας παρουσιάζουν συντελεστή συσχέτισης μεγαλύτερο του $r_{thr} = 0.75$ εντός του εξεταζόμενου εύρους συχνοτήτων 5 MHz. ....	216
5.4	Σύγκριση αποδοτικότητας εναλλακτικών μοντέλων αδρομερούς-λεπτομερούς επαίσθησης. ....	218



# Κατάλογος πινάκων

2.1	Σημειογραφία. ....	53
3.1	Αριθμητικά αποτελέσματα αξιολόγησης ευρετικής μεθόδου RSSR. ....	129
3.2	Διαστάσεις σχηματιζόμενων υπο-προβλημάτων από την ευρετική μέθοδο RSSR. ....	131
3.3	Χαρακτηριστικά εξεταζόμενων Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. . .	136
3.4	Αριθμητικά αποτελέσματα αξιολόγησης ευρετικής μεθόδου RSSR για τα σενάρια προσομοιώσεων I-III. ....	140
3.5	Αριθμητικά αποτελέσματα αξιολόγησης ευρετικής μεθόδου RSSR για τα σενάρια προσομοιώσεων IV-VI. ....	142
3.6	Αριθμητικά αποτελέσματα αξιολόγησης ευρετικής μεθόδου RSSR για το σενάριο προσομοίωσης VII. ....	144
4.1	Παράμετροι λειτουργίας αρχιτεκτονικής επαίσθησης φάσματος. ....	163
5.1	Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα διαστημάτων εμπιστοσύνης με επίπεδο εμπιστοσύνης της τάξεως του 95%. ....	213
5.2	Πιθανότητα για συγκεκριμένες υποζώνες της εξεταζόμενης φασματικής ζώνης εύρους 400 kHz να βρίσκονται κάθε στιγμή μη-κατειλημμένες. ....	220



*Στην οικογένειά μου*



# Περίληψη

Το στατικό μοντέλο διαχείρισης του ραδιοφάσματος αδυνατεί να ικανοποιήσει τη συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση πρόσβασης στον εν λόγω πόρο, αποτελώντας ουσιαστικά τροχοπέδη στην ανάπτυξη περαιτέρω καινοτόμων ασύρματων υπηρεσιών. Ως καταλληλότερη τεχνολογία για την αποκατάσταση της αποδοτικότητας στον τρόπο εκμετάλλευσης του ραδιοφάσματος θεωρείται σήμερα η Γνωσιακή Ραδιοεπικοινωνία. Η εν λόγω τεχνολογία παρέχει στις ασύρματες συσκευές την ευελιξία να εκμεταλλεύονται ευκαιριακά μη-χρησιμοποιούμενες μερίδες του ραδιοφάσματος, προδιαγράφοντας τρεις θεμελιώδεις διαδικασίες, ήτοι την "Παρακολούθηση Φάσματος", τον "Μερισμό Φάσματος" και την "Κινητικότητα Φάσματος". Η παρούσα διδακτορική διατριβή εντάσσεται στο ευρύτερο ερευνητικό πεδίο της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας και πραγματεύεται ανοιχτά θέματα τα οποία άπτονται και των τριών ανωτέρω διαδικασιών. Συγκεκριμένα, στην παρούσα διατριβή προσεγγίζεται το δημοφιλές πρόβλημα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης (διαδικασία "Μερισμού Φάσματος") υπό το πρίσμα των Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας και, βάσει αυτού, προτείνεται ένας μηχανισμός ελαχιστοποίησης της επιβάρυνσης η οποία προκαλείται στα εν λόγω δίκτυα κατά τη συχνότερη αναδιάρθρωση των αναθέσεων πόρων τους (διαδικασία "Κινητικότητας Φάσματος"). Τόσο το ανωτέρω πρόβλημα μερισμού φάσματος, όσο και ο μηχανισμός αποδοτικής αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων μοντελοποιούνται, αρχικά, ως προβλήματα βελτιστοποίησης, ενώ στη συνέχεια αναζητούνται κατάλληλες ευρετικές μέθοδοι με σκοπό την πλησιοβέλτιστη επίλυση των εν λόγω προβλημάτων και, κατ' επέκταση, την αποκατάσταση της δυνατότητας εφαρμογής τους σε πρακτικά Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Ειδικότερα, για τον προδιαγραφόμενο μηχανισμό βέλτιστης αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων, προτείνεται μια εξαιρετικά αποδοτική, εξειδικευμένη στο συγκεκριμένο πρόβλημα ευρετική μέθοδος. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής πραγματοποιείται, επίσης, μια Επισκόπηση Κατάληψης Φάσματος στη μητροπολιτική περιοχή των Αθηνών, ώστε να αξιολογηθεί η δυνατότητα του πραγματικού περιβάλλοντος ραδιοσυχνοτήτων να υποστηρίξει την εφαρμογή της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας στην πράξη και, κατ' επέκταση, να ενδυναμωθεί η πρακτικότητα της πραγματοποιούμενης έρευνας. Κατόπιν ενδελεχούς εξέτασης των συλλεγμένων δεδομένων μετρήσεων, τέλος, αναδεικνύεται η ύπαρξη συσχετίσεων στη μετρούμενη ενέργεια γειτονικών καναλιών και, εν συνεχεία, προτείνεται μια μεθοδολογία η οποία εκμεταλλεύεται την εν λόγω ιδιότητα, επιτρέποντας στις ασύρματες συσκευές να αυξάνουν την ενημερότητά τους επί του εξ ορισμού άγνωστου περιβάλλοντος ραδιοσυχνοτήτων τους επεξεργαζόμενες αποκλειστικά όσα δεδομένα συλλέγουν κατά την τυπικά εφαρμοζόμενη διαδικασία της "Παρακολούθησης Φάσματος". Η αποκτώμενη ενημερότητα, μάλιστα, δύναται να δράσει υποστηρικτικά επί του συνόλου των διαδικασιών τις οποίες ορίζει η τεχνολογία της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας και – σε συνδυασμό με τον προτεινόμενο μηχανισμό βέλτιστης αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων – να βελτιώσει σημαντικά την αποδοτικότητα των αντίστοιχων δικτύων.

**Λέξεις-κλειδιά:** Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, Συνδυασμένη Εκχώρηση Καναλιών και Δρομολόγηση, Αναδιάρθρωση αναθέσεων πόρων, Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός, Ευρετικές μέθοδοι, Επισκόπηση Κατάληψης Φάσματος, Επαίσθηση Φάσματος, Εντοπισμός ενέργειας, Συσχετίσεις ενέργειας.



# Abstract

The current statically established model of spectrum management is unable to satisfy the constantly growing demand of users and networks for spectrum access, essentially obstructing the deployment of new and innovative wireless services in practice. Cognitive Radio is considered a promising technology for restoring efficiency in spectrum utilization, by providing the wireless devices with the flexibility to opportunistically exploit unused spectrum portions that potentially exist in their wireless environment. Cognitive Radio technology specifies in practice three fundamental processes, namely the "Spectrum Monitoring", the "Spectrum Sharing" and the "Spectrum Mobility", and this thesis focuses on the study of open issues related to all these three layers of conception. More specifically, the popular problem of Joint Channel Assignment and Routing ("Spectrum Sharing" process) is considered from the perspective of Cognitive Radio Networks and, based on that, a novel mechanism is proposed with the ulterior view to minimize the overhead that is induced on such networks during their frequent resource allocation reconfigurations ("Spectrum Mobility" process). Both the Joint Channel Assignment and Routing problem, as well as the proposed reconfiguration mechanism are first modeled as optimization problems. Then, proper heuristic methods are investigated for quickly providing near-optimal solutions to the above problems and, thus, making it viable to be applied to realistic Cognitive Radio Networks scaling in commercial sizes. Especially for the proposed reconfiguration mechanism, a novel and efficient heuristic method is designed, which exploits the unique nature of the respective optimization problem. Furthermore, within the framework of this dissertation, a Spectrum Occupancy Survey is carried out in the metropolitan area of Athens, aiming at evaluating the ability of the real spectrum environment to support the application of the Cognitive Radio technology in practice and, thus, empower the practicality of the conducted research. Finally, by further processing the collected measurement data, the existence of correlation properties in the sensed power of measured neighboring channels is advocated and, based on them, a new methodology is proposed for enabling the wireless devices to raise their awareness on their otherwise unknown operating spectrum environment by simply leveraging data that are collected during the typically applied "Spectrum Monitoring" process. Notably, the acquired awareness can be well exploited for improving all the above processes defined by the Cognitive Radio technology and – in combination with the proposed reconfiguration mechanism – to further increase the efficiency of such networks.

**Keywords:** Cognitive Radio Networks, Joint Channel Assignment and Routing, Resource reconfiguration, Mixed Integer Linear Programming, Heuristic methods, Spectrum Occupancy Survey, Spectrum Sensing, Energy detection, Power correlation.





# Ευχαριστίες

Η ανά χείρας διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στη Σχολή ΗΜΜΥ του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Νικολάου Μήτρου, στον οποίο θα ήθελα από τη θέση αυτή να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ εις βάθος με το ερευνητικό πεδίο της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, για τον χρόνο που μου αφιέρωσε, καθώς και για την εμπιστοσύνη, την υποστήριξη, την καθοδήγηση και τις διαφωτιστικές υποδείξεις του.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω θερμά και τον καθηγητή κ. Συμεών Παπαβασιλείου για τις εποικοδομητικές συζητήσεις μας καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διατριβής, καθώς και τους καθηγητές κ. Γεώργιο Στασινόπουλο, Μιχαήλ Θεολόγου, Ευστάθιο Συκά και Φίλιππο Κωνσταντίνου για την τιμή που μου έκαναν να συμμετέχουν στην επιτροπή αξιολόγησης της διδακτορικής μου διατριβής.

Περαιτέρω, ιδιαίτερες ευχαριστίες προσήκουν στον καθηγητή του Τμήματος Πληροφορικής του Οικονομικού Πανεπιστημίου Αθηνών κ. Θεόδωρο Αποστολόπουλο, καθώς αυτός με μύησε στην έρευνα ως επιβλέπων της πτυχιακής μου εργασίας κατά το τελευταίο εξάμηνο της φοίτησής μου στο εν λόγω τμήμα και, παρά το βεβαρυμένο πρόγραμμά του, μου έκανε την τιμή να είναι εξωτερικός κριτής της διδακτορικής μου διατριβής. Επιπλέον, ευχαριστώ τους καθηγητές μου κ. Γεώργιο Πολύζο και Γιάννη Μαριά για την καθοδήγηση και την υποστήριξη στα πρώτα μου επιστημονικά βήματα κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας στο ΠΜΣ Πληροφοριακών Συστημάτων του ΟΠΑ.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω να εκφράσω, επίσης, στον συνεργάτη και φίλο Βαγγέλη Ανυφαντή, Υπ. Διδάκτορα της Σχολής ΗΜΜΥ, για την ευχάριστη και ουσιαστική συνεργασία μας. Θα ήταν παράλειψη, βέβαια, να μην ευχαριστήσω και τους Βασίλειο Καρυώτη, Αναστάσιο Ζαφειρόπουλο, Δημήτρη Σπανό, Περικλή Σταύρου, Ελένη Γιαννοπούλου, Άγγελο Αναγνωστόπουλο και Χρύσα Παπαγιάννη, καθώς οι συζητήσεις μας, αλλά και το ευχάριστο περιβάλλον που επικρατούσε στην μεταξύ μας συνεργασία, με ενθάρρυναν να

συνεχίσω και να φέρω εις πέρας την παρούσα επιστημονική προσπάθεια.

Τέλος, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Γιώργο και Ξένη, και την αδελφή μου, Κωνσταντίνα, για την ηθική υποστήριξη καθόλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διατριβής.

*Σταμάτιος Γ. Αρκουλής*  
*Αθήνα, Φεβρουάριος 2014*

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

Το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων, ή απλούστερα *ραδιοφάσμα* (radio spectrum), αποτελεί στις μέρες μας έναν σημαντικό κοινωνικό και οικονομικό πόρο. Ο συγκεκριμένος πόρος υποστηρίζει τη λειτουργία ενός μεγάλου αριθμού ασύρματων τεχνολογιών, όπως για παράδειγμα τη ραδιοφωνία, την τηλεόραση, την επίγεια κινητή τηλεφωνία, τη δορυφορική πλοήγηση και εντοπισμό θέσης κ.α., συμβάλλοντας ουσιαστικά στη βελτίωση της καθημερινότητας του άνθρωπου. Παράλληλα, ολοένα και περισσότεροι φορείς (πάροχοι υπηρεσιών, κ.α.) εκδηλώνουν έντονο ενδιαφέρον για την εκμετάλλευση επιπλέον μερίδων ραδιοφάσματος, φαινόμενο το οποίο έγκειται τόσο στις αυξανόμενες ανάγκες των τελικών χρηστών (π.χ. 'εν κινήσει' πρόσβαση στο *Διαδίκτυο* (Internet), ενοποιημένη διασύνδεση συσκευών, κ.α.), όσο και στα πρόσφατα τεχνολογικά επιτεύγματα τα οποία καθιστούν εφικτή την ανάπτυξη πρωτοποριακών υπηρεσιών με αρκετά προσιτό κόστος.

Το ραδιοφάσμα ρυθμίζεται σήμερα από *κανονιστικούς φορείς* (regulatory bodies) οι οποίοι πρόσκεινται στην κυβέρνηση κάθε χώρας, λαμβάνοντας προφανώς υπόψιν τα διεθνή κανονιστικά πλαίσια και υποδείξεις. Ακριβέστερα, οι εν λόγω φορείς αναθέτουν σε *αδειολήπτες* (license holders) το αποκλειστικό δικαίωμα χρήσης προκαθορισμένων και αμετάβλητων *φασματικών ζωνών* (spectrum bands) για πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα εντός εκτενών γεωγραφικών περιοχών. Παρά το γεγονός, όμως, ότι το στατικό αυτό μοντέλο διαχείρισης έχει αποδώσει ικανοποιητικά μέχρι σήμερα, η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση πρόσβασης στο ραδιοφάσμα, σε συνδυασμό με την πεπερασμένη φύση του, καθιστά προφανές ότι το εν λόγω μοντέλο αποτελεί πια τροχοπέδη για την αθρόα ανάπτυξη και παροχή νέων ασύρματων υπηρεσιών στους τελικούς χρήστες. Ταυτόχρονα, και ενώ

το ραδιοφάσμα θεωρείται ανεπαρκές για την κάλυψη της τρέχουσας ζήτησης, είναι γεγονός ότι το ανωτέρω μοντέλο οδηγεί στη συστηματική χρήση ορισμένων μόνο φασματικών ζωνών, ενώ άλλες παρουσιάζουν έντονη υποχρησιμοποίηση. Σύμφωνα, μάλιστα, με μελέτες οι οποίες πραγματοποιούνται τόσο από κυβερνητικές αρχές [1], όσο και από ανεξάρτητες εταιρείες [2] και πανεπιστήμια [3], ο βαθμός χρησιμοποίησης διαφόρων γνωστών φασματικών ζωνών κυμαίνεται σήμερα μεταξύ 15% και 85%, χαρακτηριζόμενος μάλιστα από έντονες χρονικές και χωρικές αποκλίσεις [4]. Θεωρείται, λοιπόν, επιβεβλημένη η έγκαιρη υιοθέτηση μιας νέας, πιο ευέλικτης, αλλά και πιο αποδοτικής *πολιτικής διαχείρισης* (management policy) ενός τόσο σημαντικού κοινωνικού και οικονομικού πόρου όπως το ραδιοφάσμα.

## 1.1 Πλαίσιο Έρευνας

### 1.1.1 Γνωσιακή Ραδιοεπικοινωνία

Η *Γνωσιακή Ραδιοεπικοινωνία* (Cognitive Radio, CR) θεωρείται σήμερα ως η καταλληλότερη τεχνολογία για την αποκατάσταση της αποδοτικότητας του τρόπου εκμετάλλευσης του ραδιοφάσματος. Παρά το γεγονός, όμως, ότι η συγκεκριμένη τεχνολογία προσελκύει τα τελευταία χρόνια το έντονο ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας και της βιομηχανίας, δεν υπάρχει ακόμα κάποιος επίσημος ορισμός της. Κοινά αποδεκτή, ωστόσο, θεωρείται η απαίτηση από τις εμπλεκόμενες στα αντίστοιχα δίκτυα ασύρματες συσκευές να προσαρμόζουν δυναμικά τις παραμέτρους λειτουργίας τους στο *περιβάλλον ραδιοσυχνοτήτων* (radio environment) με το οποίο αλληλεπιδρούν.

Αρχή λειτουργίας των επονομαζόμενων *Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας* (Cognitive Radio Networks) αποτελεί η *ευκαιριακή* (opportunistic) εκμετάλλευση *φασματικών οπών* (spectrum holes ή white spaces), ήτοι υποζωνών του ραδιοφάσματος οι οποίες δεν καταλαμβάνονται μια δεδομένη χρονική στιγμή και εντός μιας συγκεκριμένης γεωγραφικής περιοχής από τους έχοντες την αντίστοιχη άδεια χρήσης. Στα συγκεκριμένα δίκτυα απαντώνται εξ ορισμού δυο διαφορετικά είδη χρηστών, οι *Πρωτεύοντες Χρήστες* (Primary Users, PUs) και οι *Δευτερεύοντες Χρήστες* (Secondary Users, SUs). Ως Πρωτεύοντες θεωρούνται οι χρήστες οι οποίοι κατέχουν την άδεια αποκλειστικής εκμετάλλευσης συγκεκριμένων φασματικών υποζωνών, την οποία έχουν αποκτήσει κατόπιν νομίμων διαδικασιών

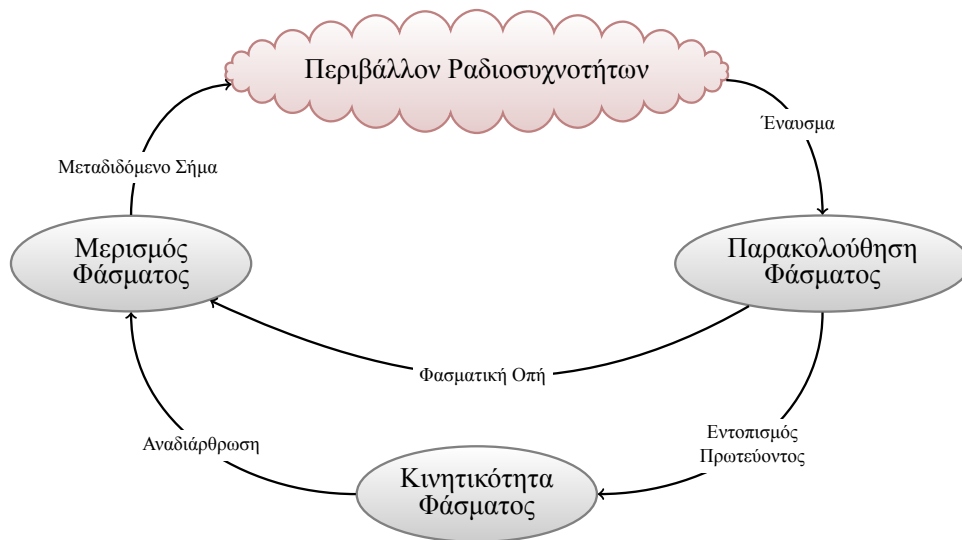
και συνεννόησης με τους αντίστοιχους κανονιστικούς φορείς. Ως Δευτερεύοντες, αντίθετα, θεωρούνται οι χρήστες οι οποίοι δύνανται να χρησιμοποιούν χωρίς σχετική άδεια τις ήδη ανατεθειμένες στους Πρωτεύοντες Χρήστες φασματικές υποζώνες, αρκεί βέβαια να έχουν πρώτα σιγουρευτεί ότι (1) οι τελευταίοι δεν πραγματοποιούν μεταδόσεις πάνω από αυτές, (2) οι μεταδόσεις τους δεν πρόκειται να προκαλέσουν *παρεμβολές* (interference) στις μεταδόσεις άλλων Πρωτευόντων ή Δευτερευόντων Χρηστών, και (3) σε περίπτωση επιστροφής των αντίστοιχων Πρωτευόντων Χρηστών θα τερματίσουν άμεσα οποιαδήποτε μετάδοσή τους, επιστρέφοντας τις δεσμευμένες φασματικές οπές στους έχοντες την υψηλότερη προτεραιότητα χρήσης. Καθίσταται, λοιπόν, προφανές ότι οι Δευτερεύοντες Χρήστες θα πρέπει να είναι σε θέση να εκτελούν νέες, πολύ πιο σύνθετες ενέργειες συγκριτικά με αυτές των χρηστών των συμβατικών ασύρματων δικτύων.

### 1.1.2 Γνωσιακός Κύκλος

Με σκοπό την πιο εύληπτη περιγραφή της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας επιστρατεύεται συχνά μια εξειδικευμένη διαγραμματική δομή ονόματι *Γνωσιακός Κύκλος* (Cognitive Cycle). Ο Γνωσιακός Κύκλος παρουσιάστηκε αρχικά από τον J. Mitola [5], το άτομο το οποίο εισήγαγε τον όρο Γνωσιακή Ραδιοεπικοινωνία στο ερευνητικό πεδίο των ασύρματων δικτύων, και έκτοτε χρησιμοποιείται ευρέως στη βιβλιογραφία. Η συγκεκριμένη δομή παρουσιάζει τα διάφορα στάδια της λεγόμενης *γνωσιακής διαδικασίας* (cognitive process), δηλαδή της διαδικασίας η οποία απαιτείται να ακολουθείται από κάθε ασύρματη συσκευή με σκοπό την απόκτηση ενημερότητας επί του περιβάλλοντος ραδιοσυχνοτήτων της και, εν συνεχεία, την προσαρμογή των παραμέτρων λειτουργίας της στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του.

Η Εικόνα 1.1 παρουσιάζει αναλυτικά μια αρκετά απλουστευμένη εκδοχή του προαναφερθέντος Γνωσιακού Κύκλου, η οποία βέβαια φέρει έντονες επιρροές από παρόμοιες προσπάθειες οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί κατά καιρούς στη σχετική βιβλιογραφία [4, 6, 7]. Σύμφωνα, λοιπόν, με την εν λόγω εικόνα η τεχνολογία της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας προδιαγράφει τρεις βασικές διαδικασίες:

- την *Παρακολούθηση Φάσματος* (Spectrum Monitoring),
- τον *Μερισμό Φάσματος* (Spectrum Sharing), και



Εικόνα 1.1: Γνωσιακός Κύκλος.

- την *Κινητικότητα Φάσματος* (Spectrum Mobility).

Για λόγους, μάλιστα, καλύτερης κατανόησης, αλλά και παροχής μιας σφαιρικότερης άποψης επί των προδιαγραφών της ανωτέρω τεχνολογίας, θεωρείται στο σημείο αυτό απαραίτητο να παρατεθεί μια συνοπτική περιγραφή καθεμίας εκ των ανωτέρω διαδικασιών.

### 1.1.2.1 Παρακολούθηση Φάσματος

Όπως προαναφέρθηκε, αρχή λειτουργίας της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας αποτελεί η ευκαιριακή εκμετάλλευση από πλευράς Δευτερευόντων Χρηστών των φασματικών οπών οι οποίες σχηματίζονται δυναμικά στο ραδιοφάσμα. Κατά τον συμβατικό ορισμό, 'ως φασματική οπή ονομάζεται κάθε φασματική υποζώνη η οποία έχει ανατεθεί σε έναν Πρωτεύοντα Χρήστη, αλλά σε μια συγκεκριμένη στιγμή και σε μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή δεν χρησιμοποιείται από αυτόν' [8]. Ο εν λόγω ορισμός, βέβαια, συνυπολογίζει μόνο τις τρεις βασικές διαστάσεις του ραδιοφάσματος, δηλαδή τη *χωρική* (spatial), τη *χρονική* (temporal) και αυτή της *συχνότητας* (frequency). Η τεχνολογική πρόοδος, ωστόσο, σε συνδυασμό με την προηγμένη φύση των ασύρματων συσκευών οι οποίες αναμένεται να χρησιμοποιηθούν στη Γνωσιακή Ραδιοεπικοινωνία, έχει οδηγήσει στην πρόταση πιο εξειδικευμένων σχετικών ορισμών (βλ. [9]), οι οποίοι συνυπολογίζουν επιπλέον διαστάσεις του ραδιοφάσματος, όπως αυτή του *κώδικα* (code) μετάδοσης και της *γωνίας πρόσπτωσης* (angle of arrival).

Πριν την πραγματοποίηση οποιασδήποτε μετάδοσης, λοιπόν, κάθε Δευτερεύων Χρήστης θεωρείται υποχρεωμένος να καθίσταται ενήμερος σχετικά με τις φασματικές οπές τις οποίες του προσφέρει το περιβάλλον ραδιοσυχνοτήτων λειτουργίας του. Ακόμα, μάλιστα, και μετά τη δέσμευση μιας σχετικής οπής, ο ίδιος χρήστης απαιτείται να παραμένει συνεχώς ενήμερος σχετικά με τη διαθεσιμότητά της, στοχεύοντας ουσιαστικά στον έγκαιρο εντοπισμό μιας πιθανής επιστροφής του αντίστοιχου Πρωτεύοντος Χρήστη και, κατ' επέκταση, στην έγκαιρη μεταφορά των μεταδόσεών του σε μια νέα ελεύθερη φασματική οπή.

Η προαναφερθείσα *ενημερότητα* (awareness) αποκτάται στα πλαίσια της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας μέσω της προδιαγραφόμενης διαδικασίας της 'Παρακολούθησης Φάσματος'. Η συγκεκριμένη διαδικασία δύναται σήμερα να έλθει εις πέρας με δυο εναλλακτικούς τρόπους, με την εφαρμογή τεχνικών *επαίσθησης φάσματος* (spectrum sensing) ή με την επικοινωνία με *βάσεις δεδομένων φάσματος* (spectrum databases). Αξιοσημείωτο, βέβαια, θεωρείται το γεγονός ότι αν και η πρώτη προσέγγιση θεωρείται πιο ελπιδοφόρα για το μέλλον της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, οι αρμόδιες διαχειριστικές αρχές δείχνουν επί του παρόντος σαφή προτίμηση προς τη δεύτερη, κυρίως λόγω της απλότητας και της ασφάλειας που τη χαρακτηρίζουν.

Όσον αφορά τις τεχνικές επαίσθησης φάσματος, αυτές δίνουν τη δυνατότητα στους Δευτερεύοντες Χρήστες να εντοπίζουν με ίδια μέσα μεταδόσεις ραδιοσημάτων πάνω από τις κατά περίπτωση εξεταζόμενες φασματικές ζώνες. Κύριο στόχο των εν λόγω τεχνικών αποτελεί ο χαρακτηρισμός των επιμέρους υποζωνών των τελευταίων είτε ως ελεύθερες, είτε ως κατειλημμένες, ενώ σε μερικές περιπτώσεις δύνανται να αναγνωρίσουν ακόμα και το είδος των μεταδιδόμενων ραδιοσημάτων. Η συγκεκριμένη ερευνητική περιοχή, μάλιστα, συνοδεύεται από πολύ πλούσια βιβλιογραφία, με το ενδιαφέρον να εστιάζεται κυρίως στην πρόταση προηγμένων *κεντροποιημένων* (centralized) ή *κατακεντρωμένων* (distributed) σχετικών τεχνικών, αλλά και στη βελτιστοποίηση των σχετιζόμενων με αυτές παραμέτρων (π.χ. διάρκεια, συχνότητα επαίσθησης, κ.α.). Ως επικρατέστερες κατηγορίες τεχνικών επαίσθησης φάσματος θεωρούνται σήμερα οι βασιζόμενες (1) σε *προσαρμοσμένα φίλτρα* (matched filter), όπου ο εντοπισμός ραδιοσημάτων στηρίζεται στον εντοπισμό γνωστών *σηματομορφών* (patterns) τους στο ραδιοφάσμα, (2) στην *ενέργεια* (energy), όπου κάθε εξεταζόμενη υποζώνη θεωρείται δεσμευμένη όταν η μετρούμενη σε αυτήν ενέργεια υπερβαίνει το επίπεδο θορύβου του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού, (3)

στον εντοπισμό γνωρισμάτων (feature detection), όπου ένα ραδιοσήμα εντοπίζεται ύστερα από εκτενή ανάλυση και συσχέτιση των γνωρισμάτων του, (4) στην αναγνώριση ραδιοταυτότητας (radio identification), καθώς και (5) στον υπολογισμό ιδιοτιμών (eigenvalues). Η εργασία [9] παρουσιάζει μια εκτενή επισκόπηση των προταθεισών στη σχετική βιβλιογραφία τεχνικών επαίσθησης φάσματος, ενώ ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης παραπέμπεται στη συγκεκριμένη εργασία για την άντληση περισσότερων πληροφοριών σχετικά με τους κατά περίπτωση εφαρμοζόμενους αλγορίθμους, τις λεπτομέρειες παραμετροποίησης και υλοποίησης σε υλισμικό, κ.α.

Στην περίπτωση επικοινωνίας με βάσεις δεδομένων φάσματος, αντίθετα, οι Δευτερεύοντες Χρήστες δεν απαιτείται να πραγματοποιούν κάποια εξεζητημένη διαδικασία εντοπισμού ραδιοσημάτων, αφού αρκεί απλά η προσπέλαση μιας σχετικής βάσης δεδομένων ώστε να λαμβάνουν την απαιτούμενη ενημερότητα επί των διαθέσιμων φασματικών οπών του ραδιοφάσματος. Οι συγκεκριμένες βάσεις δύνανται να παρέχουν ανά πάσα στιγμή πληροφορίες σχετικά με τις διαθέσιμες ανά γεωγραφική περιοχή φασματικές οπές, καθώς και λεπτομέρειες οι οποίες αφορούν τις πραγματοποιούμενες πάνω από κάθε φασματική ζώνη μεταδόσεις. Για να προσδώσουν, ωστόσο, τα αναμενόμενα οφέλη, οι ανωτέρω βάσεις δεδομένων θα πρέπει να ενημερώνονται ανελλιπώς, και μάλιστα από διαπιστευμένες οντότητες, καθώς και να παραμένουν αδιαλείπτως προσβάσιμες από τους Δευτερεύοντες Χρήστες.

### 1.1.2.2 Μερικός Φάσματος

Σε μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή, αλλά και μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, πολλοί Δευτερεύοντες Χρήστες, ή ακόμα και περισσότερα του ενός Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, ενδέχεται να απαιτούν την ταυτόχρονη πρόσβαση στο ραδιοφάσμα. Σε ένα τόσο ανταγωνιστικό περιβάλλον, λοιπόν, θεωρείται απαραίτητη η ύπαρξη μηχανισμών συντονισμού της πρόσβασης στον εν λόγω πόρο. Μόνο έτσι θα καταστεί δυνατή (α) η μεγιστοποίηση του συνολικού βαθμού χρησιμοποίησης των διαθέσιμων φασματικών οπών, (β) η μεγιστοποίηση της απολαμβανόμενης από πλευράς Δευτερευόντων Χρηστών Ποιότητας Υπηρεσίας, (γ) η αποφυγή συγκρούσεων ή εκτεταμένων απωλειών πακέτων, καθώς και (δ) η προστασία των αντίστοιχων Πρωτευόντων Χρηστών από επιζήμιες παρεμβολές.



Όπως στα συμβατικά ασύρματα δίκτυα, έτσι και στα Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας ως κύριοι άξονες μερισμού του ραδιοφάσματος θεωρούνται ο *χρόνος* (time), η *ισχύς μετάδοσης* (transmission power) και η *συχνότητα* (frequency). Στην πρώτη περίπτωση ο χρόνος πρόσβασης σε κάθε φασματική ζώνη τεμαχίζεται σε *θυρίδες* (slots) και στη δεύτερη κάθε χρήστης προσαρμόζει κατάλληλα την ισχύ μετάδοσης των ραδιοσημάτων του ώστε να αποφεύγει την πρόκληση παρεμβολών στις μεταδόσεις των γειτόνων του, ενώ στην τρίτη περίπτωση οι φασματικές ζώνες τεμαχίζονται σε διακριτά κανάλια τα οποία εν συνεχεία μοιράζονται μεταξύ των ανταγωνιζόμενων χρηστών. Στα πλαίσια της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, μάλιστα, τα προαναφερθέντα κανάλια δύνανται να ορίζονται δυναμικά, ενώ παρέχεται και η δυνατότητα για κανάλια μεγάλου εύρους ζώνης να *διαχωρίζονται* (split) σε στενότερα, ή για πολλά στενά κανάλια να *συνενώνονται* (merge) σε ευρύτερα, ακόμα και αν αυτά ανήκουν σε *ασυνεχείς* (non-continuous) φασματικές υποζώνες [10]. Στη σύγχρονη βιβλιογραφία, τέλος, εντοπίζονται ακόμα και τεχνικές μερισμού φάσματος οι οποίες εκμεταλλεύονται επιπλέον διαστάσεις του ραδιοφάσματος, όπως για παράδειγμα τον κώδικα, χρησιμοποιώντας μοντέλα *φασματικής εξάπλωσης* (spread spectrum) και *αναπήδησης συχνότητας* (frequency hopping), ή την γωνία πρόσπτωσης, χρησιμοποιώντας εξειδικευμένες κεραιές.

Οι τεχνικές μερισμού φάσματος χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες, στις κεντροποιημένες και στις κατανεμημένες τεχνικές. Στις προσεγγίσεις της πρώτης κατηγορίας μια κεντρική οντότητα – συχνά καλούμενη ως *εξυπηρετητής φάσματος* (spectrum server) [11] – συλλέγει πληροφορίες οι οποίες σχετίζονται τόσο με τις απαιτούμενες μεταδόσεις των διαχειριζόμενων Δευτερευόντων Χρηστών, όσο και με το περιβάλλον ραδιοσυχνότητων των τελευταίων και, εν συνεχεία, εξάγει τις αντίστοιχες βέλτιστες αναθέσεις πόρων ώστε να ικανοποιείται ένας προκαθορισμένος αντικειμενικός στόχος. Στις προσεγγίσεις της δεύτερης κατηγορίας, αντίθετα, οι Δευτερευόντες Χρήστες θεωρούνται απολύτως υπεύθυνοι στο να επιλέγουν μόνοι τους τις φασματικές οπές οι οποίες δύνανται να καλύψουν βέλτιστα τις ανάγκες τους και, εν συνεχεία, να ανταγωνίζονται για την απόκτηση πρόσβασης σε αυτές. Οι τεχνικές μερισμού φάσματος διαιρούνται, επίσης, σε *συνεργατικές* (cooperative) ή *μη-συνεργατικές* (non-cooperative), καθώς και σε *επικαλυπτικές* (overlay) ή *υποκαλυπτικές* (underlay). Δεδομένου, τέλος, ότι το σύνολο των κατά περίπτωση διαχειριζόμενων Δευτερευόντων Χρηστών ενδέχεται να μην ανήκει αποκλειστικά

στο ίδιο Δίκτυο Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, οι ανωτέρω τεχνικές δύνανται να διαιρεθούν περαιτέρω σε *ενδο-δικτυακές* (intra-network), οι οποίες εστιάζουν στον μερισμό του φάσματος μεταξύ Δευτερευόντων Χρηστών του ίδιου δικτύου, και σε *δια-δικτυακές* (inter-network), οι οποίες εστιάζουν στον μερισμό του φάσματος μεταξύ χρηστών γεωγραφικώς επικαλυπτόμενων δικτύων. Ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης παραπέμπεται στις εκτενείς επισκοπήσεις των εργασιών [4] και [6] για την άντληση περισσότερων πληροφοριών σχετικά με τις προταθείσες στη σύγχρονη βιβλιογραφία σχετικές τεχνικές.

Σημειώνεται, τέλος, ότι σύμφωνα με τις πρόσφατες δραστηριότητες κανονιστικής ρύθμισης των αρμοδίων αρχών [12], ο μερισμός φάσματος απαιτείται στα πλαίσια της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας να χαρακτηρίζεται από *δικαιοσύνη* (fairness). Πιο συγκεκριμένα, η πρόσβαση των ανταγωνιζόμενων Δευτερευόντων Χρηστών στο ραδιοφάσμα θα πρέπει να πραγματοποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε κανείς να μην μονοπωλεί ή να φέρεται εγωιστικά απέναντι στους υπολοίπους. Θεωρείται, ωστόσο, επιβεβλημένο από όλους τους χρήστες να εφαρμόζουν απαρέγκλιτα τις οδηγίες των αντίστοιχων μηχανισμών μερισμού φάσματος, διασφαλίζοντας ουσιαστικά τόσο την αρμονική τους συνύπαρξη, όσο και την αποδοτική εκμετάλλευση του ραδιοφάσματος. Μια εκτενής, μάλιστα, επισκόπηση των σχετικών αδυναμιών και ζητημάτων ασφαλείας τα οποία απειλούν την ομαλή λειτουργία των σύγχρονων Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας παρουσιάζεται αναλυτικά στην εργασία [13].

### 1.1.2.3 Κινητικότητα Φάσματος

Στα συμβατικά ασύρματα δίκτυα ένας χρήστης απαιτείται να προβαίνει στην αποδέσμευση ενός καναλιού και στη δέσμευση ενός άλλου είτε επειδή το πρώτο δεν καλύπτει πλέον τις ανάγκες του, είτε επειδή αυτός μετακινήθηκε σε μια θέση στην οποία αυτό δεν είναι πλέον διαθέσιμο, είτε λόγω του επηρεασμού του από αστάθμητους παράγοντες (π.χ. θερμικός θόρυβος, δυσμενείς καιρικές συνθήκες, κ.α.). Στα Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, αντίθετα, η συγκεκριμένη διαδικασία – συχνά καλούμενη και ως 'Κινητικότητα Φάσματος' – πυροδοτείται αρκετά συχνότερα. Όπως, άλλωστε, έχει ήδη αναφερθεί, κάθε Δευτερεύων Χρήστης απαιτείται να παρακολουθεί καθ' όλη τη διάρκεια δέσμευσης μιας φασματικής οπής το περιβάλλον ραδιοσυχνότητων του, ώστε μόλις αντιληφθεί μια ενδεχόμενη επιστροφή του αντίστοιχου Πρωτεύοντος Χρήστη να την αποδεσμεύει άμεσα και

να μεταφέρει τις επηρεαζόμενες μεταδόσεις του σε μια νέα ελεύθερη οπή.

Αν και φαινομενικά απλή, η ανωτέρω διαδικασία εισάγει σημαντικές προκλήσεις στον τρόπο λειτουργίας των Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Αναλυτικότερα, είναι γεγονός ότι η διαδικασία της κινητικότητας φάσματος επηρεάζεται σημαντικά από τον χρόνο ο οποίος απαιτείται για την τροποποίηση των παραμέτρων λειτουργίας των κατά περίπτωση αναδιαρθρούμενων ασύρματων συσκευών και, πιο συγκεκριμένα, από τη διάρκεια ολοκλήρωσης των απαιτούμενων από πλευράς τους *μεταγωγών καναλιού* (channel switchings). Σε αντίθεση, ωστόσο, με τα συμβατικά δίκτυα, στα Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας η προαναφερθείσα διάρκεια δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τις προδιαγραφές των χρησιμοποιούμενων ασύρματων συσκευών, αλλά και από την απόσταση η οποία χωρίζει στον άξονα της συχνότητας το τρέχον-κανάλι από το κανάλι-προορισμό κάθε αναδιαρθρούμενης συσκευής [14]. Η συγκεκριμένη παρατήρηση, μάλιστα, έχει ιδιαίτερη βαρύτητα στα πλαίσια της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, η οποία προδιαγράφει την εκμετάλλευση φασματικών οπών οι οποίες ενδέχεται να απέχουν έως και κάποια GHz μεταξύ τους. Οι χρονοβόρες μεταγωγές καναλιού, λοιπόν, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι κάθε τέτοια μεταγωγή απαιτεί την επιπλέον προσαρμογή των παραμέτρων λειτουργίας και άλλων στρωμάτων της στοίβας πρωτοκόλλων των αντίστοιχων ασύρματων συσκευών, καθιστούν προφανή τον αρνητικό αντίκτυπο της κινητικότητας φάσματος στην απολαμβανόμενη από τους Δευτερεύοντες Χρήστες Ποιότητα Υπηρεσίας. Αν, μάλιστα, δεν δοθεί η απαιτούμενη προσοχή, οι μεταγωγές καναλιού από πλευράς Δευτερευόντων Χρηστών ενδέχεται να πυροδοτήσουν αλυσιδωτές αντιδράσεις στο εσωτερικό των αναδιαρθρούμενων δικτύων, προκαλώντας την εμφάνιση του *φαινομένου της κυμάτωσης* (ripple effect). Θεωρείται, λοιπόν, επιβεβλημένος ο εφοδιασμός των μελλοντικών Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας με μηχανισμούς ελαχιστοποίησης της αναστάτωσης η οποία προκαλείται στο εσωτερικό τους από τη χρονικά μεταβαλλόμενη δραστηριότητα των Πρωτευόντων Χρηστών, διασφαλίζοντας ουσιαστικά τη σταθερότητα και, κατ' επέκταση, την αποδοτικότητα της λειτουργίας τους.

## 1.2 Δομή και συνεισφορά διατριβής

Η παρούσα διατριβή εντάσσεται στο ευρύτερο ερευνητικό πεδίο της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας και εξετάζει ανοιχτά θέματα τα οποία άπτονται και των τριών οντοτήτων της ανωτέρω δομής του Γνωσιακού Κύκλου (βλ. Παράγραφο 1.1.2). Ακριβέστερα, στα κεφάλαια 2 και 3 το ενδιαφέρον εστιάζεται στη βελτιστοποίηση των διαδικασιών του Μερισμού και της Κινητικότητας Φάσματος, ενώ τα κεφάλαια 4 και 5 πραγματεύονται θέματα τα οποία σχετίζονται με τη διαδικασία της Παρακολούθησης Φάσματος.

Αναλυτικότερα, στο Κεφάλαιο 2 μοντελοποιείται αρχικά ένας κεντρικοποιημένος ενδο-δικτυακός μηχανισμός μερισμού φάσματος, ο οποίος κρίνεται κατάλληλος για εφαρμογή σε Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας *πολυ-αλματικής* (multi-hop) αρχιτεκτονικής. Ακριβέστερα, μοντελοποιείται το πρόβλημα της *Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης* (Joint Channel Assignment and Routing, JCAR) με δίκαιο τρόπο, λαμβάνοντας υπόψιν τις αρχές λειτουργίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, τις πρόσφατες επιταγές των αρμοδίων για θέματα ραδιοφάσματος ρυθμιστικών αρχών, αλλά κυρίως τις προδιαγραφές των σύγχρονων συσκευών *Λογισμικόριστης Ραδιοεπικοινωνίας* (Software-Defined Radio). Εν συνεχεία, προδιαγράφεται ένας μηχανισμός Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων με σκοπό την ελαχιστοποίηση της επιβάρυνσης η οποία προκαλείται στα Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας κατά την αναδιάρθρωση των αναθέσεων πόρων οι οποίες υπολογίζονται βάσει του ανωτέρω μοντέλου μερισμού φάσματος. Τη συγκεκριμένη ανάγκη υπαγορεύει το γεγονός ότι η χρονικά μεταβαλλόμενη δραστηριότητα των Πρωτευόντων Χρηστών επηρεάζει έντονα τη διαθεσιμότητα καναλιών των αντίστοιχων Δευτερευόντων Χρηστών, καθιστώντας τις αναθέσεις πόρων των τελευταίων συχνά παρωχημένες. Ο εν λόγω μηχανισμός, μάλιστα, επιτρέπει και την ακόμα μεγαλύτερη μείωση της προαναφερθείσας επιβάρυνσης, με αντάλλαγμα ωστόσο από τη λειτουργία των αναδιαρθρούμενων δικτύων να μην επανέρχεται στο βέλτιστο δυνατό σημείο της. Σημειώνεται, τέλος, ότι ο προτεινόμενος μηχανισμός συμμορφώνεται πλήρως τόσο με τις προδιαγραφές των σύγχρονων συσκευών *Λογισμικόριστης Ραδιοεπικοινωνίας*, όσο και με τις λεπτομέρειες των κανονιστικών πλαισίων τα οποία διέπουν ήδη την ευκαιριακή εκμετάλλευση συγκεκριμένων ζωνών του ραδιοφάσματος.

Τα προβλήματα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δί-

και ο τρόπος και της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων μοντελοποιούνται στο Κεφάλαιο 2 ως προβλήματα βελτιστοποίησης *Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού* (Mixed Integer Linear Programming). Τα εν λόγω προβλήματα, ωστόσο, ανήκουν εξ ορισμού στην τάξη των δυσεπίλυτων προβλημάτων NP-hard [15] και, ως εκ τούτου, η δυσκολία επίλυσής τους αυξάνει εκθετικά με το μέγεθός τους, γεγονός το οποίο θέτει σε σημαντικό κίνδυνο τη δυνατότητα εφαρμογής τους σε πραγματικά Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Με σκοπό, λοιπόν, την αποκατάσταση της πρακτικότητας των ανωτέρω μηχανισμών, παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3 κατάλληλες ευρετικές μέθοδοι, οι οποίες δύνανται να παρέχουν γρήγορα ποιοτικές πλησιοβέλτιστες λύσεις στα αντίστοιχα προβλήματα, ακόμα και όταν αυτά αναπτύσσονται επί Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας μεγάλου μεγέθους. Πιο συγκεκριμένα, το πρόβλημα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο προσεγγίζεται πλησιοβέλτιστα με τη βοήθεια τριών ευρετικών γενικού σκοπού. Η εξαιρετικά απαιτητική φύση, αντίθετα, του προβλήματος της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων, σε συνδυασμό με τη μικρή σημασία η οποία δίδεται επ' αυτού στη σύγχρονη βιβλιογραφία, επιβάλλει την πρόταση μιας εξειδικευμένης στο συγκεκριμένο πρόβλημα ευρετικής μεθόδου. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, λοιπόν, προτείνεται η ευρετική μέθοδος 'Reduced Search Space Reconfiguration' (RSSR), η οποία εκμεταλλεύεται την ιδιαίτερη δομή του εν λόγω προβλήματος, προχωρώντας ουσιαστικά στην αποδόμησή του σε μια ακολουθία υπο-προβλημάτων σημαντικά μειωμένων διαστάσεων.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία εκτέλεσης μιας *Επισκόπησης Κατάληψης Φάσματος* (Spectrum Occupancy Survey) στη μητροπολιτική περιοχή των Αθηνών. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης μελέτης καταγράφονται και, εν συνεχεία, παρουσιάζονται λεπτομερώς πληροφορίες οι οποίες σχετίζονται με τη δραστηριότητα των πραγματικών Πρωτευόντων Χρηστών στο περιβάλλον ραδιοσυχνοτήτων της προαναφερθείσας γεωγραφικής περιοχής. Σκοπό της εν λόγω προσπάθειας αποτελεί η λήψη μιας ρεαλιστικής άποψης επί της πραγματικής κατάληψης διαφόρων ζωνών του ραδιοφάσματος και, κατ' επέκταση, η εξαγωγή σημαντικών συμπερασμάτων σχετικά με τη δυνατότητα μεταφοράς τόσο της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, όσο και της πραγματοποιούμενης έρευνας στο πραγματικό περιβάλλον. Το γεγονός, μάλιστα, ότι η ανωτέρω μελέτη ακολουθεί όμοια μεθοδολογία με το σύνολο των σχετικών μελετών της σύγχρονης

βιβλιογραφίας επιτρέπει την επαλήθευση και άμεση αντιπαραβολή των αποτελεσμάτων της με αυτά άλλων χωρών παγκοσμίως.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται μια μεθοδολογία η οποία καθιστά ικανούς τους Δευτερεύοντες Χρήστες των Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας να αυξάνουν με ίδια μέσα την ενημερότητά τους επί του εξ ορισμού άγνωστου περιβάλλοντος ραδιοσυχνοτήτων τους. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία βασίζεται, μάλιστα, στη στατιστική επεξεργασία των δεδομένων μετρήσεων ενέργειας τα οποία συλλέγουν οι ανωτέρω χρήστες κατά τη συμβατική διαδικασία επαίσθησης του ραδιοφάσματος (εφαρμόζοντας την τεχνική επαίσθησης βασισμένη στον εντοπισμό ενέργειας), χωρίς να απαιτείται από πλευράς τους η συλλογή πρόσθετων δεδομένων ή η επικοινωνία με εξωτερικές πηγές γνώσης. Ακρογωνιαίο λίθο της εν λόγω μεθοδολογίας αποτελεί η πρακτικά επαληθευμένη – βάσει των δεδομένων μετρήσεων τα οποία συλλέχθηκαν κατά την προαναφερθείσα Επισκόπηση Κατάληψης Φάσματος – παρατήρηση σχετικά με την ύπαρξη εξαιρετικά υψηλού βαθμού *συσχέτισης* (correlation) στις τιμές ενέργειας όσων φασματικών στοιχείων καταλαμβάνονται από τον ίδιο Πρωτεύοντα Χρήστη, ή αλλιώς εμπίπτουν εντός των φασματικών ορίων του ίδιου καναλιού συγκεκριμένης τεχνολογίας. Ένας Δευτερεύων Χρήστης, λοιπόν, δύναται απλά υπολογίζοντας τον βαθμό συσχέτισης ο οποίος χαρακτηρίζει τις τιμές ενέργειας των εξεταζόμενων από πλευράς του φασματικών στοιχείων και, εν συνεχεία, ομαδοποιώντας τα εν λόγω στοιχεία σε συστάδες ανάλογα με το ύψος του προαναφερθέντος βαθμού, να εξάγει γνώση επί των φασματικών ορίων των καναλιών συγκεκριμένης τεχνολογίας τα οποία σχηματίζονται στο περιβάλλον λειτουργίας του. Η συγκεκριμένη γνώση, μάλιστα, θεωρείται εξαιρετικά δύσκολο να αποκτηθεί ακόμα και ύστερα από επικοινωνία με εξωτερικές πηγές πληροφόρησης, δεδομένων των αστάθμητων παραγόντων από τους οποίους αυτή θεωρείται άμεσα εξαρτημένη.

Στο Κεφάλαιο 6, τέλος, συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα της παρούσας διατριβής, ενώ σκιαγραφούνται και οι μελλοντικές κατευθύνσεις της εν λόγω ερευνητικής προσπάθειας.

## Κεφάλαιο 2

# Βέλτιστη αναδιάρθρωση αναθέσεων πόρων σε Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας

Η πρόοδος η οποία συντελείται τα τελευταία χρόνια στο ερευνητικό πεδίο της Λογισμικόριστης Ραδιοεπικοινωνίας έχει ήδη θέσει τις βάσεις για τη μελλοντική εξάπλωση των Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας στην πράξη. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα συγκεκριμένα δίκτυα αντιμετωπίζουν αποτελεσματικά το φαινόμενο της υποχρησιμοποίησης του ραδιοφάσματος, παρέχοντας ουσιαστικά σε Δευτερεύοντες Χρήστες τη δυνατότητα εκμετάλλευσης των ευκαιριών μετάδοσης τις οποίες τους προσφέρει το περιβάλλον ραδιοσυχνοτήτων τους. Ωστόσο, η βέλτιστη εκμετάλλευση των εν λόγω ευκαιριών, σε συνδυασμό με την απαίτηση προστασίας των μεταδόσεων των αντίστοιχων Πρωτευόντων Χρηστών από καταστροφικές παρεμβολές, εισάγουν αναπόφευκτα ιδιαίτερες προκλήσεις στον τρόπο λειτουργίας των ανωτέρω δικτύων.

Η βέλτιστη εκμετάλλευση των προαναφερθεισών ευκαιριών μετάδοσης προσεγγίζεται στα πλαίσια της παρούσας μελέτης υπό το πρίσμα των ασύρματων δικτύων *πολυαλματικής* (multi-hop) αρχιτεκτονικής (εφεξής αποκαλούμενα ως 'δίκτυα'). Ιδιαίτερη βαρύτητα, μάλιστα, δίδεται στο πρόβλημα της *Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης* (Joint Channel Assignment and Routing, JCAR), ένα πρόβλημα *διαστρωματικού σχεδιασμού* (cross-layer design) το οποίο στοχεύει στη βέλτιστη ανάθεση πόρων σε ανταγωνιζόμενους χρήστες ώστε να ικανοποιούνται στον μέγιστο δυνατό βαθμό οι

απαιτήσεις τους. Σε αντίθεση, δε, με την πλειοψηφία των σχετικών εργασιών της βιβλιογραφίας, η παρούσα μελέτη προσεγγίζει το συγκεκριμένο πρόβλημα υπό το πρίσμα των Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Ιδιαίτερα έμφαση, επίσης, δίδεται στις αρνητικές επιπτώσεις τις οποίες προκαλεί στα εν λόγω δίκτυα η χρονικά μεταβαλλόμενη δραστηριότητα των Πρωτεύοντων Χρηστών τους. Η δυναμική συμπεριφορά των τελευταίων, άλλωστε, σε συνδυασμό με την υποχρέωση των Δευτερευόντων Χρηστών να αποδεσμεύουν άμεσα τα κανάλια των οποίων οι Πρωτεύοντες Χρήστες επιστρέφουν και ανακτούν πρόσβαση, αυξάνει σημαντικά τη συχνότητα αναδιάρθρωσης των αναθέσεων πόρων τους. Αν, μάλιστα, συνυπολογιστεί και το γεγονός ότι η διάρκεια *μεταγωγής καναλιού* (channel switching) από πλευράς ασύρματων συσκευών αναμένεται πολύ μεγαλύτερη στα ανωτέρω δίκτυα, καθίσταται προφανές ότι τέτοιου είδους αναδιάρθρωσεις αναμένεται να επιβαρύνουν σημαντικά την ομαλή λειτουργία τους. Στην παρούσα μελέτη, λοιπόν, προτείνεται ένας μηχανισμός ο οποίος όχι μόνο δεν αγνοεί την προαναφερθείσα επιβάρυνση, αλλά αντίθετα σκοπεύει πρωτίστως στην ελαχιστοποίησή της.

## 2.1 Κίνητρα και οφέλη

Σε μια δεδομένη γεωγραφική περιοχή, αλλά και χρονική στιγμή, περισσότεροι του ενός Δευτερεύοντες Χρήστες, ή ακόμα και περισσότερα του ενός Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, ενδέχεται να επιθυμούν την ταυτόχρονη εκμετάλλευση των ευκαιριών μετάδοσης τις οποίες τους προσφέρει το ραδιοφάσμα. Σε ένα τόσο ανταγωνιστικό περιβάλλον, λοιπόν, θεωρείται προφανής η ανάγκη εφαρμογής μηχανισμών συντονισμού της απαιτούμενης πρόσβασης στον εν λόγω πόρο. Μόνο έτσι αναμένεται να καταστεί εφικτή η μεγιστοποίηση του βαθμού ικανοποίησης των απαιτήσεων των Δευτερευόντων Χρηστών και, παράλληλα, να προστατευτούν οι μεταδόσεις των Πρωτεύοντων Χρηστών από επιζήμιες παρεμβολές.

Ένα πρόβλημα βέλτιστου μερισμού φάσματος το οποίο λαμβάνει αυξανόμενη προσοχή τα τελευταία χρόνια είναι αυτό της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης. Το εν λόγω πρόβλημα εμφανίζεται κυρίως στα πλαίσια της διαχείρισης ασύρματων δικτύων πολυ-αλματικής αρχιτεκτονικής, όπως για παράδειγμα τα *βροχωτά* (mesh) δίκτυα, στα οποία οι ασύρματες συσκευές αλληλοπροωθούν τα πακέτα των εξυπηρετούμενων *ροών δεδομένων* (data flows) ώστε να προσεγγίσουν επιτυχώς τον προορισμό τους.



Συνήθη στόχο του ανωτέρω προβλήματος αποτελεί ο εντοπισμός αναθέσεων πόρων οι οποίες μεγιστοποιούν τον βαθμό ικανοποίησης των απαιτήσεων των χρηστών των κατά περίπτωση διαχειριζόμενων δικτύων. Προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση απαιτείται, κατ' αρχήν, ο καθορισμός μιας *ανάθεσης καναλιών* (channel assignment) σε ασύρματες συσκευές ώστε να καθίσταται εφικτός ο σχηματισμός *ζεύξεων* (links) και, κατ' επέκταση, *μονοπατιών δρομολόγησης* (routing paths) μεταξύ των ασύρματων συσκευών των οποίων επιθυμείται η επικοινωνία, ενώ παράλληλα απαιτείται και ο καθορισμός του *ρυθμού μετάδοσης δεδομένων* (data transmission rate) τον οποίο θα πρέπει να υποστηρίζει η εκάστοτε σχηματιζόμενη ζεύξη για κάθε ροή δεδομένων η οποία αναπτύσσεται μεταξύ των προαναφερθεισών ασύρματων συσκευών. Καθίσταται, λοιπόν, προφανές ότι το ανωτέρω πρόβλημα απαιτείται να λαμβάνει συνδυαστικές αποφάσεις σχετικά με τις παραμέτρους λειτουργίας τόσο του *φυσικού στρώματος* (physical layer), όσο και του *στρώματος δικτύου* (network layer) της *στοίβας πρωτοκόλλων* (protocol stack) κάθε διαχειριζόμενης ασύρματης συσκευής, γεγονός το οποίο το εντάσσει στα πιο δύσκολα προβλήματα διαστρωματικού σχεδιασμού της σύγχρονης βιβλιογραφίας. Αν και αρκετά περίπλοκο, ωστόσο, το πρόβλημα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης θεωρείται θεμελιώδες στα πλαίσια των δικτύων πολυ-αλματικής αρχιτεκτονικής, αντικατοπτρίζοντας βέλτιστα τους πραγματικούς τους στόχους.

Παρά τη μεγάλη σημασία του προβλήματος της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης, ένας μικρός μόνο αριθμός εργασιών της βιβλιογραφίας φέρεται να το προσεγγίζει αποδοτικά, ενώ η πλειοψηφία τους εστιάζει σε ασύρματα δίκτυα συμβατικής τεχνολογίας. Στην παρούσα μελέτη το εν λόγω πρόβλημα προσεγγίζεται υπό το πρίσμα των Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας και μοντελοποιείται μαθηματικά ως ένα κεντρικοποιημένο *πρόβλημα βελτιστοποίησης* (optimization problem) *Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού* (Mixed Integer Linear Programming), κατά τα πρότυπα των σχετικών εργασιών [16] και [17]. Το προκύπτον μοντέλο ευθυγραμμίζεται, κατ' αρχήν, πλήρως με τις επιταγές των αρμοδίων ρυθμιστικών αρχών [12] περί του *δίκαιου* (fair) μερισμού των διαθέσιμων ευκαιριών μετάδοσης μεταξύ των ανταγωνιζόμενων Δευτερευόντων Χρηστών. Για τον λόγο αυτό, άλλωστε, ως αντικειμενικός στόχος του μοντελοποιούμενου προβλήματος επιλέγεται ο εντοπισμός μιας βέλτιστης ανάθεσης πόρων η οποία να ικανοποιεί στον μέγιστο, αλλά αυστηρά όμοιο βαθμό τις απαιτήσεις των χρηστών κάθε

εξεταζόμενου δικτύου. Ταυτόχρονα, η ακολουθούμενη μοντελοποίηση λαμβάνει υπόψη την εγγενή ετερογένεια η οποία χαρακτηρίζει τα διαθέσιμα κανάλια στα Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Τα εν λόγω κανάλια, άλλωστε, σχηματίζονται δυναμικά, δεν έχουν σταθερό εύρος ζώνης, ενώ ενδέχεται να ανήκουν ακόμα και σε εξαιρετικά απομακρυσμένες μεταξύ τους φασματικές ζώνες. Σημαντικότερο χαρακτηριστικό της ακολουθούμενης μοντελοποίησης, ωστόσο, θεωρείται η πλήρης συμμόρφωσή της με τις πραγματικές δυνατότητες των σύγχρονων συσκευών Λογισμικόριστης Ραδιοεπικοινωνίας.

Είναι γεγονός, βέβαια, ότι οι προκύπτουσες αναθέσεις πόρων δεν δύνανται να χαρακτηρίζονται από μονιμότητα, αλλά θα πρέπει να αναδιαρθρώνονται ώστε να συμμορφώνονται πλήρως με την κατάσταση των δικτύων στα οποία αυτές εφαρμόζονται. Στα πλαίσια των συμβατικών πολυ-αλματικών δικτύων, η ανάγκη αναδιάρθρωσης ισχυουσών αναθέσεων πόρων εμφανίζεται συνήθως είτε ύστερα από την τροποποίηση των απαιτήσεων μετάδοσης των εμπλεκόμενων σε αυτές χρηστών, είτε λόγω απρόβλεπτων παραγόντων, όπως είναι για παράδειγμα οι αστοχίες υλικού. Στα πλαίσια των Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, αντίθετα, η εν λόγω διαδικασία πυροδοτείται αρκετά συχνότερα. Όπως, άλλωστε, έχει ήδη αναφερθεί, κάθε Δευτερεύων Χρήστης απαιτείται να παρακολουθεί καθ' όλη τη διάρκεια δέσμευσης μιας φασματικής οπής το περιβάλλον ραδιοσυχνότητων του, ώστε μόλις αντιληφθεί μια ενδεχόμενη επιστροφή του αντίστοιχου Πρωτεύοντος Χρήστη, να την αποδεσμεύει άμεσα και να μεταφέρει τις επηρεαζόμενες μεταδόσεις του σε μια νέα ελεύθερη οπή. Καθίσταται, λοιπόν, προφανές ότι η χρονικά μεταβαλλόμενη δραστηριότητα των Πρωτευόντων Χρηστών επηρεάζει σημαντικά τη διαθεσιμότητα καναλιών των Δευτερευόντων Χρηστών, καθιστώντας συχνά τις αναθέσεις πόρων των τελευταίων *παρωχημένες* (obsolete). Η συγκεκριμένη κατάσταση, ωστόσο, επιβαρύνεται ακόμα περισσότερο από το γεγονός ότι στα Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας η διαδικασία μεταγωγής καναλιού αποτελεί μια αρκετά χρονοβόρα διαδικασία. Τα διαθέσιμα κανάλια των εν λόγω δικτύων, άλλωστε, ενδέχεται να ανήκουν σε εξαιρετικά απομακρυσμένες μεταξύ τους φασματικές ζώνες, ενώ ο χρόνος μεταγωγής καναλιού των ασύρματων συσκευών Λογισμικόριστης Ραδιοεπικοινωνίας θεωρείται άμεσα εξαρτημένος από τη συγκεκριμένη απόσταση (στον άξονα της συχνότητας).

Οι συχνότερες, αλλά και πιο χρονοβόρες αναδιαρθρώσεις αναθέσεων πόρων έχουν σημαντικό αρνητικό αντίκτυπο στην ομαλή λειτουργία των Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοε-

πικοινωνίας. Σε κάθε αναδιάρθρωση, άλλωστε, ένας αριθμός ασύρματων συσκευών απαιτείται αναπόφευκτα να προχωρά σε μεταγωγή καναλιού, τροποποιώντας τις παραμέτρους λειτουργίας του *φυσικού στρώματος* (physical layer) της στοίβας πρωτοκόλλων τους. Στα πλαίσια, μάλιστα, του προβλήματος της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης, κάθε ισχύουσα ανάθεση καναλιών θεωρείται αλληλεξαρτούμενη με το αντίστοιχο πλάνο δρομολόγησης. Ως εκ τούτου, οι ανωτέρω τροποποιήσεις απαιτούν αναπόφευκτα την αναπροσαρμογή των παραμέτρων λειτουργίας και άλλων στρωμάτων της στοίβας πρωτοκόλλων των αντίστοιχων ασύρματων συσκευών, όπως για παράδειγμα αυτών της ζεύξης και του δικτύου. Παράλληλα, είναι γνωστό ότι οι ασύρματες συσκευές των δικτύων πολυ-αλματικής αρχιτεκτονικής συνεργάζονται μεταξύ τους, αλληλοπροωθώντας ουσιαστικά τα πακέτα των εξυπηρετούμενων ροών δεδομένων τους. Αναπόφευκτα, λοιπόν, η τροποποίηση των παραμέτρων λειτουργίας έστω και ενός μικρού υποσυνόλου των ασύρματων συσκευών ενός σχετικού δικτύου, ενδέχεται να πυροδοτήσει εκτεταμένες και αλυσιδωτές αντιδράσεις στο εσωτερικό του, κατάσταση η οποία είναι γνωστή και ως *φαινόμενο κυμάτωσης* (ripple effect). Συμπερασματικά, η σημαντική αναστάτωση η οποία προκαλείται στα πολυ-αλματικά Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας κατά τη συχνότερη αναδιάρθρωση των αναθέσεων πόρων τους καθιστά επιτακτική την πρόταση κατάλληλων μηχανισμών βελτιστοποίησης της εν λόγω διαδικασίας στην πράξη.

Είναι γεγονός, ωστόσο, ότι η πλειοψηφία των προσεγγίσεων της σύγχρονης βιβλιογραφίας αγνοεί πλήρως την προαναφερθείσα αναγκαιότητα. Ύστερα, μάλιστα, από εκτενή επισκόπηση όχι μόνο της άμεσα, αλλά και της έμμεσα σχετιζόμενης με την παρούσα μελέτη βιβλιογραφίας, καθίσταται φανερή η απουσία εργασιών οι οποίες να στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση της ανωτέρω επιβάρυνσης στα πλαίσια της μελέτης του προβλήματος της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο υπό το πρίσμα είτε των συμβατικών, είτε των Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Στα πλαίσια, μάλιστα, των Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, σχετική μέριμνα δεν παρατηρείται σε καμία υπάρχουσα μελέτη, ανεξαρτήτως του μοντέλου μερισμού φάσματος στο οποίο αυτή εστιάζει. Αντίθετα, προδιαγράφονται μηχανισμοί οι οποίοι στοχεύουν αποκλειστικά στη μείωση της πιθανότητας εμφάνισης της ανάγκης αναδιάρθρωσης ισχυουσών αναθέσεων πόρων, και όχι στην αποδοτική τους αναδιάρθρωση κάθε φορά που αυτό κρίνεται απαραίτητο. Αξίζει, τέλος, να σημειωθεί ότι αν και ένας μικρός αριθμός μελετών της βι-

βλιογραφίας εστιάζει στη βέλτιστη αναδιάρθρωση αναθέσεων πόρων στα πλαίσια κυρίως συμβατικών ασύρματων δικτύων, στο σύνολό τους οι εν λόγω μελέτες λαμβάνουν υπόψιν μόνο το κόστος επαναδρομολόγησης πακέτων, και όχι αυτό της μεταγωγής καναλιού, γεγονός το οποίο τις καθιστά ακατάλληλες για εφαρμογή σε Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας.

Η παρούσα μελέτη, αντίθετα, εστιάζει στη βελτιστοποίηση της διαδικασίας της αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας κάθε φορά που κάποιος παράγοντας τις καθιστά παρωχημένες. Προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση προδιαγράφεται αρχικά το μέγεθος της *Αθροιστικής Καθυστέρησης Μεταγωγών Καναλιού* (Cumulative Switching Delay) με σκοπό την ποσοτικοποίηση της επιβάρυνσης η οποία προκαλείται στα αναδιαρθρούμενα δίκτυα κατά την προσαρμογή των παρωχημένων αναθέσεων πόρων τους στις αντίστοιχες νέες βέλτιστες αναθέσεις πόρων. Το συγκεκριμένο μέγεθος αντιστοιχεί ουσιαστικά στον αθροιστικό χρόνο ολοκλήρωσης των απαιτούμενων μεταγωγών καναλιού από πλευράς των αναδιαρθρούμενων ασύρματων συσκευών τους μέχρι να ολοκληρωθεί η προαναφερθείσα διαδικασία. Η ελαχιστοποίηση, άλλωστε, του εν λόγω χρόνου συνεπάγεται την ελαχιστοποίηση της *διακοπής υπηρεσίας* (service interruption) της οποίας καθίστανται οι αντίστοιχοι Δευτερεύοντες Χρήστες αποδέκτες και, κατ' επέκταση, την αύξηση τόσο της *Ποιότητας Υπηρεσίας* (Quality of Service), όσο και της *Ποιότητας Εμπειρίας* (Quality of Experience) την οποία αυτοί απολαμβάνουν. Ταυτόχρονα, συνεπάγεται την ελαχιστοποίηση των χαμένων ευκαιριών μετάδοσης και, κατ' επέκταση, την αύξηση του συνολικού βαθμού χρησιμοποίησης του διαθέσιμου ραδιοφάσματος. Τέλος, συνεπάγεται και την εξοικονόμηση ενέργειας από πλευράς ασυρμάτων συσκευών, δεδομένων των μειωμένων απαιτήσεων τροποποίησης των παραμέτρων λειτουργίας των διαφόρων στρωμάτων της στοίβας πρωτοκόλλων τους.

Κατά τη συμβατική πρακτική, όταν κάποιος παράγοντας επηρεάζει το περιβάλλον λειτουργίας ενός Δικτύου Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, το αντίστοιχο υιοθετούμενο πρόβλημα μερισμού φάσματος (εν προκειμένω αυτό της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο) θα πρέπει να επιλύεται εκ νέου λαμβάνοντας υπόψιν τη νέα κατάσταση του διαχειριζόμενου δικτύου. Αναπόφευκτα, βέβαια, η εκάστοτε προκύπτουσα νέα ανάθεση πόρων θα διαφέρει έντονα από την αντίστοιχη ήδη ισχύουσα, δεδομένου ότι κατά τον υπολογισμό της πρώτης αγνοούνται πλήρως οι λεπτομέρειες της

δεύτερης. Κατ' επέκταση, η εφαρμογή μιας τέτοιας νέας ανάθεσης πόρων σε ένα αναδιαρθρούμενο δίκτυο θα απαιτήσει την πραγματοποίηση εκτεταμένων τροποποιήσεων στις παραμέτρους λειτουργίας των ασύρματων συσκευών του, επιβαρύνοντας σημαντικά την ομαλή λειτουργία του. Στοχεύοντας, λοιπόν, στην ελαχιστοποίηση της εν λόγω επιβάρυνσης, μοντελοποιείται στα πλαίσια της παρούσας μελέτης το πρόβλημα της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων, ένα ακόμα πρόβλημα βελτιστοποίησης Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού το οποίο θεωρείται συμπληρωματικό στο ανωτέρω πρόβλημα μερισμού φάσματος. Το συγκεκριμένο πρόβλημα στοχεύει ουσιαστικά στον εντοπισμό εναλλακτικών νέων βέλτιστων αναθέσεων πόρων οι οποίες να μην ταυτίζονται από πλευράς αποδοτικότητας με αυτές του προβλήματος της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο, αλλά παράλληλα ελαχιστοποιούν την Αθροιστική Καθυστέρηση Μεταγωγών Καναλιού η οποία προκαλείται κατά την εφαρμογή τους στα αντίστοιχα αναδιαρθρούμενα δίκτυα. Το προτεινόμενο μοντέλο, μάλιστα, είναι κατάλληλα σχεδιασμένο ώστε να επιτρέπει και την ακόμα μεγαλύτερη μείωση της προαναφερθείσας επιβάρυνσης, με αντάλλαγμα ωστόσο από τη λειτουργία των αντίστοιχων δικτύων να μην επανέρχεται στο βέλτιστο δυνατό σημείο της. Η λήψη, βέβαια, μιας τόσο λεπτής απόφασης απαιτεί τον ενδελεχή συνυπολογισμό πολλαπλών παραγόντων και θα πρέπει να πραγματοποιείται με ιδιαίτερη προσοχή. Σημειώνεται, επίσης, ότι η ανωτέρω προσέγγιση δεν επηρεάζει καθ' οιονδήποτε τρόπο το βασικό μοντέλο της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο, επιτρέποντας ουσιαστικά σε όσα δίκτυα στηρίζουν ήδη την αποδοτική τους λειτουργία σε αυτό να συνεχίσουν να το χρησιμοποιούν χωρίς τροποποιήσεις.

Αξιοσημείωτο, τέλος, θεωρείται και το γεγονός ότι ο προτεινόμενος μηχανισμός αποδοτικής αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων δεν δεσμεύεται σε καμία περίπτωση από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και τις προτεραιότητες του ανωτέρω προβλήματος της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο. Αντίθετα, θα μπορούσε να είχε επιλεγεί στη θέση του είτε ένας διαφορετικός αντικειμενικός στόχος, ή ακόμα και ένα εντελώς διαφορετικό μοντέλο μερισμού φάσματος. Η συγκεκριμένη ευελιξία οφείλεται στο γεγονός ότι τα προβλήματα του βέλτιστου μερισμού φάσματος και της βέλτιστης αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων εξετάζονται εν προκειμένω ξεχωριστά, επιτρέποντας ουσιαστικά στο δεύτερο να προσαρμόζεται εύκολα στις προδιαγραφές του

πρώτου. Κύριο στόχο της παρούσας μελέτης, άλλωστε, αποτελεί η επίδειξη της αξίας ενός γενικού μηχανισμού αποδοτικής αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων, ο οποίος με ελάχιστες τροποποιήσεις θα δύναται να δρα συμπληρωματικά σε κάθε υπάρχον ή μελλοντικό μοντέλο μερισμού φάσματος.

## 2.2 Θεωρητικό και τεχνικό υπόβαθρο

### 2.2.1 Πολυ-αλματικά ασύρματα δίκτυα

Στα *πολυ-αλματικά ασύρματα δίκτυα* (multi-hop wireless networks) η συνδεσιμότητα των ασύρματων συσκευών δεν προϋποθέτει την ύπαρξη μιας κεντρικής υποδομής. Αντίθετα, για την εγκαθίδρυση κάθε από-άκρο-σε-άκρο συνόδου επικοινωνίας απαιτείται η συνεργατική προώθηση των επιθυμητών πακέτων από ενδιάμεσες ασύρματες συσκευές, δημιουργώντας ουσιαστικά την αίσθηση της ύπαρξης ιδεατών διαύλων. Είναι προφανές, λοιπόν, ότι τα πολυ-αλματικά ασύρματα δίκτυα διαφέρουν έντονα από τα κεντρικοποιημένα, εγείροντας προκλήσεις των οποίων η αποτελεσματική αντιμετώπιση θεωρείται επιβεβλημένη. Παρά τις όποιες αδυναμίες, βέβαια, τα εν λόγω δίκτυα αποτελούν μονόδρομο για την υποστήριξη εφαρμογών οι οποίες αναπτύσσονται σε απομακρυσμένες και εκτενείς γεωγραφικές περιοχές, ειδικά μάλιστα όταν απαιτείται η άμεση (π.χ. περιπτώσεις ανάγκης) και σχετικά οικονομική (π.χ. παροχή υπηρεσιών τηλεπικοινωνιών ή ψυχαγωγίας) εγκατάστασή τους.

Στις μέρες μας έχουν εμφανιστεί πολλές πολυ-αλματικές αρχιτεκτονικές ασύρματων δικτύων, με δημοφιλέστερες τις *επί-τούτω* (ad-hoc) και τις *βροχωτές* (mesh). Τα επί-τούτω πολυ-αλματικά δίκτυα είναι συνήθως μικρού μεγέθους και σχηματίζονται από ετερογενείς κόμβους οι οποίοι βρέθηκαν τυχαία σε μια μικρή γεωγραφική περιοχή, ενώ συχνά χαρακτηρίζονται και από μικρές ταχύτητες. Τα βροχωτά πολυ-αλματικά δίκτυα, αντίθετα, θεωρούνται καταλληλότερα για την παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών σε σχετικά εκτεταμένες γεωγραφικές περιοχές, προσφέροντας συγκριτικό πλεονέκτημα έναντι των ενσύρματων δικτύων λόγω της οικονομικότερης και ταχύτερης εγκατάστασής τους. Η ανάπτυξή τους, ωστόσο, απαιτεί πολύ προσεκτικό σχεδιασμό, ενώ στο εσωτερικό τους συχνά απαντώνται κεντρικοί μηχανισμοί διαμοιρασμού των διαθέσιμων πόρων.

Ως κυριότερες οντότητες των πολυ-αλματικών ασύρματων δικτύων θεωρούνται οι

κόμβοι και οι ζεύξεις. Ως κόμβοι θεωρούνται οποιεσδήποτε ασύρματες συσκευές φέρουν δυνατότητες συνδεσιμότητας, όπως οι φορητοί ηλεκτρονικοί υπολογιστές (laptops), οι έξυπνες τηλεοράσεις (smart TVs), τα κινητά τηλέφωνα νέας γενιάς (smartphones) κ.α. Όσον αφορά την επικοινωνία μεταξύ των εν λόγω κόμβων, αυτή επιτυγχάνεται με την εγκαθίδρυση ζεύξεων πάνω από τις οποίες μεταδίδονται τα επιθυμητά πακέτα, ενώ κάθε ροή δεδομένων εξυπηρετείται από μια ακολουθία σχετικών ζεύξεων ονόματι μονοπάτι δρομολόγησης.

Παρά, όμως, τη σημαντική αύξηση της διεκπεραιωτικότητας την οποία προσφέρουν τα πολυ-αλματικά ασύρματα δίκτυα, γρήγορα γεννήθηκε η ανάγκη για την περαιτέρω αύξηση των ταχυτήτων τους και την ακόμα αποδοτικότερη εκμετάλλευση των διαθέσιμων πόρων τους. Προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση προτάθηκε αρχικά ο εφοδιασμός των προαναφερθέντων κόμβων με πολλαπλές διεπαφές δικτύου, σχηματίζοντας ουσιαστικά τα λεγόμενα *Πολυ-Καναλικά Πολυ-Ραδιακά Πολυ-Αλματικά Ασύρματα Δίκτυα* (Multi-Channel Multi-Radio (MC-MR) Multi-hop Wireless Networks) [18]. Στα εν λόγω δίκτυα κάθε κόμβος θεωρείται εφοδιασμένος με πολλαπλές διεπαφές δικτύου συμβατικής τεχνολογίας, ενώ το σύνολο της παρεχόμενης λειτουργικότητας συνεχίζει να υλοποιείται σε επίπεδο υλισμικού (hardware). Ως εκ τούτου, κάθε διεπαφή δύναται να λειτουργεί σε ένα κανάλι κάθε στιγμή, ενώ αδυνατεί να εκμεταλλεύεται κανάλια τα οποία ανήκουν σε απομακρυσμένες μεταξύ τους φασματικές ζώνες. Επιπρόσθετα, όλες οι διεπαφές δικτύου θεωρούνται ότι έχουν στη διάθεσή τους τον ίδιο αριθμό καναλιών και, μάλιστα, πανομοιότυπων προδιαγραφών.

Η ανωτέρω τεχνολογία, ωστόσο, θεωρείται λιγότερο ευέλικτη από τη μετέπειτα εξέλιξή της, τη Γνωσιακή Ραδιοεπικοινωνία (βλ. τεκμηρίωση στην εργασία [16]). Η τελευταία, άλλωστε, αποφεύγει πολλά από τα προαναφερθέντα δεσμευτικά χαρακτηριστικά, αλλά η πολύπλοκη φύση της την καθιστά επί του παρόντος δύσκολα εφαρμόσιμη στην πράξη [6]. Ενδεικτικά, η Γνωσιακή Ραδιοεπικοινωνία απαιτεί από κάθε κόμβο να είναι εφοδιασμένος με μηχανισμούς έξυπνης επιλογής καναλιού, δεδομένης της ετερογένειας η οποία χαρακτηρίζει τα διαθέσιμα κανάλια του. Παράλληλα, απαιτεί από τους Δευτερεύοντες Χρήστες να παρακολουθούν συνεχώς το ραδιοφάσμα και να προχωρούν άμεσα στην αποδέσμευσή του όταν κάποιος χρήστης υψηλότερης προτεραιότητας επιστρέφει και απαιτεί πρόσβαση σε αυτό.

### 2.2.2 Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός

Ο Γραμμικός Προγραμματισμός (Linear Programming, LP) αποτελεί μια υποκατηγορία του Μαθηματικού Προγραμματισμού (Mathematical Programming) και θεωρείται ως ένα εργαλείο μαθηματικής μοντελοποίησης και επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης. Κάθε μοντέλο Γραμμικού Προγραμματισμού αποτελείται ουσιαστικά από μια γραμμική αντικειμενική συνάρτηση (η οποία εκφράζει μαθηματικά έναν αντικειμενικό στόχο), η οποία βρίσκεται πλαισιωμένη από έναν αριθμό γραμμικών (αν)ισοτήτων (οι οποίες εκφράζουν μαθηματικά αντίστοιχες απαιτήσεις). Οι εν λόγω (αν)ισότητες, μάλιστα, σχηματίζουν ένα κυρτό πολυέδρο, το οποίο περικλείει το σύνολο των εφικτών λύσεων του εκάστοτε μοντελοποιούμενου προβλήματος, ενώ η αντικειμενική συνάρτηση του τελευταίου προσπαθεί να εντοπίσει τη βέλτιστη λύση εξ αυτών.

Ο Γραμμικός Προγραμματισμός αναπτύχθηκε ως μέθοδος κατά την περίοδο του Β' Παγκοσμίου Πολέμου με σκοπό τη βέλτιστη διαχείριση στρατιωτικών πόρων και, κατ' επέκταση, την απόκτηση στρατηγικού πλεονεκτήματος έναντι του εχθρού. Έκτοτε έχει βρει αθρόα εφαρμογή σε πολλά πεδία της επιστήμης, αλλά και στη βιομηχανία. Η αξία του έγκειται σε μεγάλο βαθμό στην αποδεδειγμένη δυνατότητα επίλυσης κάθε σχετικού προβλήματος εντός *πολυωνυμικού χρόνου* (polynomial time), δηλαδή σε χρόνο του οποίου το *άνω φράγμα* (upper bound) εκφράζεται από μια πολυωνυμική σχέση ως προς το μέγεθος του αντίστοιχου προβλήματος. Προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση, βέβαια, συμβάλλει καθοριστικά η μέθοδος Simplex [19], η οποία επιταχύνει σημαντικά τον εντοπισμό βέλτιστων λύσεων σε τέτοιου είδους προβλήματα, εκμεταλλευόμενη αποκλειστικά τις δομικές ιδιαιτερότητες του προαναφερθέντος κυρτού πολυέδρου.

Οι μεταβλητές απόφασης κάθε προβλήματος Γραμμικού Προγραμματισμού απαιτείται να λαμβάνουν αυστηρά συνεχείς τιμές. Υπάρχουν, ωστόσο, περιπτώσεις όπου ένα μέρος ή ακόμα και το σύνολο των συγκεκριμένων μεταβλητών απαιτείται να λαμβάνει ακέραιες τιμές. Τα προβλήματα Γραμμικού Προγραμματισμού στα οποία το σύνολο των μεταβλητών απόφασης απαιτείται να λαμβάνει ακέραιες τιμές ονομάζονται *προβλήματα Ακεραίου Γραμμικού Προγραμματισμού* (Integer Linear Programming, ILP). Αν, μάλιστα, οι συγκεκριμένες τιμές απαιτείται να ανήκουν αυστηρά εντός του συνόλου  $\{0, 1\}$ , τα αντίστοιχα προβλήματα ονομάζονται *προβλήματα Δυαδικού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού* (Binary Integer Linear Programming, BILP). Όταν, δε, ένα υποσύνολο των



μεταβλητών απόφασης επιτρέπεται να λαμβάνει συνεχείς τιμές, ενώ ένα άλλο ακέραιες, τότε τα αντίστοιχα προβλήματα ονομάζονται προβλήματα *Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού* (Mixed Integer Linear Programming, MILP). Ειδικά για τα τελευταία προβλήματα ισχύει ότι:

$$Z(X) = \min_{x,y} \{cx + fy : (x, y) \in X\},$$

όπου  $X$  το σύνολο των εφικτών λύσεων το οποίο σχηματίζεται (1) από τις γραμμικές ισότητες και ανισότητες, (2) από τις απαιτήσεις μη-αρνητικότητας επί των μεταβλητών απόφασης  $x$  και  $y$ , και (3) από τις απαιτήσεις ακεραιότητας επί των μεταβλητών απόφασης  $y$  από τις οποίες συνοδεύεται κάθε σχετικό πρόβλημα [20]. Αξίζει, τέλος, να σημειωθεί ότι σε αντίθεση με τα προβλήματα Γραμμικού Προγραμματισμού, τα ανωτέρω προβλήματα ανήκουν στην τάξη NP-hard [15], γεγονός το οποίο καθιστά αδύνατη την επίλυσή τους εντός πολυωνυμικού χρόνου.

Τα προβλήματα Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού επιλύονται σήμερα με τη βοήθεια εξειδικευμένων λυτών, δηλαδή προηγμένου λογισμικού το οποίο λαμβάνει ως είσοδο ένα μοντέλο βελτιστοποίησης και τα κατάλληλα δεδομένα, ενώ παρέχει ως έξοδο είτε τη βέλτιστη, είτε απλά μια εφικτή λύση του αντίστοιχου προβλήματος. Ως πιο δημοφιλής θεωρείται σήμερα ο εμπορικός λύτης CPLEX [21], η δημοτικότητα του οποίου οφείλεται συνδυαστικά στην εξαιρετικά αποδοτική υλοποίηση της μεθόδου 'Branch & Bound' την οποία ενσωματώνει, στις πάμπολλες προηγμένες τεχνικές (π.χ. αλγόριθμος 'cutting planes', κ.α.) από τις οποίες αυτή βρίσκεται πλαισιωμένη, καθώς επίσης και στον συνεχή εμπλουτισμό του με τις πιο καινοτόμες σχετικές προσεγγίσεις της τρέχουσας βιβλιογραφίας. Όσον αφορά την αναπαράσταση κάθε επιθυμητού προβλήματος σε μορφή κατανοητή από τους εν λόγω λύτες, αυτή πραγματοποιείται μέσω είτε κοινά αποδεκτών γλωσσών, όπως η AMPL [22], είτε εξειδικευμένων γλωσσών, όπως η OPL [23]. Είναι γεγονός, τέλος, ότι τόσο οι προαναφερθείσες γλώσσες, όσο και οι μοντέρνοι λύτες θεωρούνται σήμερα αρκετά φιλικό προς τους τελικούς χρήστες, επιτρέποντας ακόμα και σε άτομα τα οποία δεν έχουν γνώσεις μαθηματικού προγραμματισμού ή προγραμματισμού υπολογιστών να μοντελοποιούν και, εν συνεχεία, να επιλύουν προβλήματα βελτιστοποίησης.

### 2.2.3 Πρόβλημα Ροής Πολλαπλών Αγαθών

Το πρόβλημα *Ροής Πολλαπλών Αγαθών* (Multi-Commodity Flow problem, MCF) είναι εξαιρετικά δημοφιλές τόσο στο πεδίο της Επιχειρησιακής Έρευνας, όσο και σε αυτό της Επιστήμης των Υπολογιστών. Το εν λόγω πρόβλημα εφαρμόζεται αποκλειστικά σε δικτυακές δομές (π.χ. οδικά, επικοινωνιακά ή μεταφορικά δίκτυα), απαιτώντας αρχικά τη μοντελοποίησή τους ως γράφους. Οι κόμβοι τέτοιου είδους γράφων αναπαριστούν συνήθως γεωγραφικά σημεία, εργοστάσια, αποθηκευτικούς χώρους, υπολογιστικούς πόρους, κ.α., ενώ οι ακμές τους υποδηλώνουν την ύπαρξη κάποιου είδους διαύλου επικοινωνίας μεταξύ των αντίστοιχων κόμβων. Βάσει των συγκεκριμένων γράφων, λοιπόν, μοντελοποιούνται, εν συνεχεία, προβλήματα βελτιστοποίησης με αντικειμενικό στόχο την αποδοτική μεταφορά όσο το δυνατόν περισσότερων μονάδων πάνω από τα αντίστοιχα δίκτυα, διατηρώντας παράλληλα το εισαγόμενο κόστος σε όσο το δυνατόν χαμηλότερα επίπεδα. Κλασικά παραδείγματα σχετικών προβλημάτων αποτελούν η δρομολόγηση πακέτων μεταξύ υπολογιστικών κόμβων, η μεταφορά τροφίμων, πρώτων υλών ή εξοπλισμού μεταξύ εργοστασίων, αποθηκών και σημείων διάθεσης, κ.α.

Στοχεύοντας στην πληρέστερη κατανόηση του ανωτέρω προβλήματος, παρατίθεται στο σημείο αυτό μια πιο ακριβής περιγραφή του σύμφωνα με την εργασία [24]. Πιο αναλυτικά, κάθε δίκτυο θεωρείται ότι αναπαρίσταται ως ένας (κατευθυντικός ή μη) γράφος  $G = (V, E)$ . Κάθε κόμβος του εν λόγω γράφου αντιπροσωπεύει μια οντότητα σαν αυτές που προαναφέρθηκαν, ενώ κάθε ακμή του χαρακτηρίζεται από μια προκαθορισμένη χωρητικότητα  $c : E \rightarrow R^+$ . Παράλληλα, θεωρείται ότι υφίσταται ένα σύνολο ζευγών κόμβων της μορφής  $(s_i, t_i)$ , καθένα εκ των οποίων χαρακτηρίζεται από μια ποσότητα ροής  $d_i$  η οποία απαιτείται να μεταφέρεται από τον κόμβο-αφετηρία  $s_i$  στον κόμβο-προορισμό  $t_i$  του ανωτέρω γράφου. Σκοπό, λοιπόν, κάθε σχετικού προβλήματος αποτελεί ο υπολογισμός της ποσότητας ροής  $f_i$  κάθε ζεύγους  $(s_i, t_i)$  η οποία απαιτείται να εξυπηρετείται από τις ακμές του εκάστοτε εξεταζόμενου γράφου ώστε να βελτιστοποιείται μια επιλεγμένη αντικειμενική συνάρτηση. Ταυτόχρονα, βέβαια, απαιτείται να διασφαλίζεται ότι η αθροιστική ποσότητα ροής η οποία διατρέχει κάθε τέτοια ακμή δεν υπερβαίνει τη μέγιστη χωρητικότητά της, καθώς επίσης και οποιαδήποτε άλλη απαίτηση έχει εκ των πρότερων οριστεί.

## 2.3 Σχετική βιβλιογραφία

Το πρόβλημα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης μελετάται ήδη εκτενώς στα πλαίσια των συμβατικών ασύρματων δικτύων, ενώ στη σύγχρονη βιβλιογραφία έχουν αρχίσει να εμφανίζονται και οι πρώτες μελέτες οι οποίες το προσεγγίζουν υπό το πρίσμα των Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Όσον αφορά τη δεύτερη κατηγορία προσεγγίσεων, η οποία άλλωστε θεωρείται άμεσα σχετιζόμενη με την παρούσα μελέτη, ως πιο δημοφιλής θεωρείται η εργασία [16], στην οποία το ανωτέρω πρόβλημα μοντελοποιείται μαθηματικά ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης *Μικτού Ακεραίου Μη-Γραμμικού Προγραμματισμού* (Mixed Integer Non-Linear Problem, MINLP). Αντικειμενικό στόχο του συγκεκριμένου προβλήματος αποτελεί η ελαχιστοποίηση της ποσότητας του ραδιοφάσματος η οποία απαιτείται να δεσμεύεται ώστε να ικανοποιούνται πλήρως οι απαιτήσεις των Δευτερευόντων Χρηστών των κατά περίπτωση εξεταζόμενων Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Αξίζει, μάλιστα, να σημειωθεί ότι η προτεινόμενη μοντελοποίηση εστιάζει συνδυαστικά στον μερισμό του διαθέσιμου ραδιοφάσματος, στον καταμερισμό φασματικών ζωνών σε υποζώνες μεταβλητού μήκους, στην αποφυγή παρεμβολών μεταξύ παρακείμενων μεταδόσεων, καθώς και στη δρομολόγηση ροών πάνω από τις σχηματιζόμενες ζεύξεις. Με όμοιο τρόπο προσεγγίζεται το πρόβλημα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης και στην εργασία [25], με τη διαφορά όμως ότι ως αντικειμενικός στόχος του αντίστοιχου μοντελοποιούμενου προβλήματος επιλέγεται η ελαχιστοποίηση των καναλιών τα οποία ανατίθενται στους Δευτερεύοντες Χρήστες των εξεταζόμενων Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Η εργασία [17], ωστόσο, προχωρά τις ανωτέρω μελέτες ένα βήμα πιο πέρα, εισάγοντας την έννοια του δίκαιου διανομισμού πόρων στη μοντελοποίηση του προβλήματος της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης στα πλαίσια της διαχείρισης Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Πιο συγκεκριμένα, οι συγγραφείς παρουσιάζουν ένα διαστρωματικό μοντέλο βελτιστοποίησης Μικτού Ακεραίου Γραμμικού Προγραμματισμού, επιλέγοντας ως αντικειμενικό στόχο του τη μεγιστοποίηση ενός εξειδικευμένου παράγοντα δικαιοσύνης (fairness factor). Η συγκεκριμένη μοντελοποίηση, βέβαια, θεωρείται άμεσα εμπνευσμένη από τη δημοφιλή εργασία [18], η οποία ουσιαστικά εισήγαγε πρώτη τον προαναφερθέντα παράγοντα δικαιοσύνης στο πρόβλημα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και

Δρομολόγησης στα πλαίσια της διαχείρισης συμβατικών *Βροχωτών Ασύρματων Δικτύων* (Wireless Mesh Networks, WMNs). Σημειώνεται, τέλος, ότι δεν θεωρούνται σχετικές με την παρούσα μελέτη όσες εργασίες εστιάζουν μεν στο πρόβλημα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης, αλλά παράλληλα υιοθετούν τεχνικές χρονοπρογραμματισμού μεταδόσεων. Είναι γεγονός, άλλωστε, ότι οι εν λόγω τεχνικές βασίζονται ως επί των πλείστον σε μη-πρακτικές υποθέσεις, όπως για παράδειγμα τη δυνατότητα τάχιστα μεταγωγής καναλιού από πλευράς ασύρματων συσκευών, ακόμα και σε επίπεδο πακέτου.

Το σύνολο των ανωτέρω προσεγγίσεων, βέβαια, αγνοεί πλήρως την επιβάρυνση η οποία προκαλείται στα εξεταζόμενα Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας κατά την αναδιάρθρωση των αναθέσεων πόρων τους. Ως εξαίρεση ίσως μπορεί να θεωρηθεί η εργασία [25], η οποία όμως στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της πιθανότητας απαίτησης αναδιάρθρωσης μιας ισχύουσας ανάθεσης πόρων, και όχι στην τάχιστα αναδιάρθρωσή της σε περίπτωση όπου αυτό κριθεί αναγκαίο. Ακριβέστερα, η εν λόγω προσέγγιση υποστηρίζει ότι κάθε ανάθεση πόρων θα πρέπει να εκμεταλλεύεται τα ελάχιστα δυνατά κανάλια, στοχεύοντας ουσιαστικά στην ελαχιστοποίηση της πιθανότητας για έναν Πρωτεύοντα Χρήστη ο οποίος ανακαταλαμβάνει κάποιο κανάλι να καταλάβει ένα εξ αυτών και να την καταστήσει παρωχημένη. Ομοίως, η εργασία [26] στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της πιθανότητας αναδιάρθρωσης μιας ισχύουσας ανάθεσης πόρων, αναθέτοντας σε κάθε ασύρματη συσκευή δυο κανάλια, ένα κύριο και ένα εφεδρικό. Σε περίπτωση, λοιπόν, ανακατάληψης ενός κύριου καναλιού από έναν Πρωτεύοντα Χρήστη, η αντίστοιχη συσκευή μεταβαίνει στο εφεδρικό της, αποφεύγοντας ουσιαστικά την πυροδότηση του μηχανισμού αναδιάρθρωσης της υποκείμενης ανάθεσης πόρων. Ωστόσο, η συγκεκριμένη προσέγγιση οδηγεί αναπόφευκτα σε υποχρησιμοποίηση του ραδιοφάσματος, αφήνοντας μεγάλες μερίδες του ανεκμετάλλευτες έως ότου κάποιο συμβάν πυροδοτήσει τη χρήση τους. Παράλληλα, δεν παύει να υφίσταται και η πιθανότητα για κάποιο εφεδρικό κανάλι να είναι ήδη κατειλημμένο από τον αντίστοιχο Πρωτεύοντα Χρήστη όταν τελικά απαιτηθεί η χρήση του.

Διευρύνοντας, μάλιστα, την παρούσα αναζήτηση σε μελέτες της βιβλιογραφίας οι οποίες εστιάζουν σε συμβατικά ασύρματα δίκτυα, είναι επίσης γεγονός ότι δεν εντοπίζονται εργασίες που να στοχεύουν στην αποδοτική αναδιάρθρωση αναθέσεων πόρων οι οποίες υπολογίζονται βάσει του προβλήματος της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών

και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο. Εντοπίζονται, ωστόσο, ελάχιστες σχετικές εργασίες οι οποίες εστιάζουν σε διάφορες εκδοχές του προαναφερθέντος προβλήματος στα πλαίσια της διαχείρισης κυρίως Βροχωτών Ασύρματων Δικτύων. Παρά το γεγονός, βέβαια, ότι καμία από τις εν λόγω μελέτες δεν θεωρείται κατάλληλη για εφαρμογή σε Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, κρίνεται στο σημείο αυτό απαραίτητη η παράθεση μιας συνοπτικής περιγραφής των κυριότερων εξ αυτών. Κατ' αρχήν, λοιπόν, αναφέρεται ότι η εργασία [27] εστιάζει στην ελαχιστοποίηση της διακοπής κίνησης η οποία προκαλείται στα Βροχωτά Ασύρματα Δίκτυα κατά την αναδιάρθρωση των αναθέσεων καναλιών τους. Ως αποκλειστική αιτία αναδιάρθρωσης ισχυουσών αναθέσεων θεωρείται στην προκειμένη περίπτωση η τροποποίηση των απαιτήσεων μετάδοσης των χρηστών των ανωτέρω δικτύων, ενώ το μέγεθος της διακοπής κίνησης αντιστοιχεί στον αριθμό των ροών δεδομένων οι οποίες επηρεάζονται κατά την αναδιάρθρωση της εκάστοτε ισχύουσας ανάθεσης πόρων. Βάσει της προτεινόμενης προσέγγισης, όλα τα πιθανά σύνολα απαιτήσεων μετάδοσης των χρηστών κάθε εξεταζόμενου δικτύου θα πρέπει αρχικά να μοντελοποιούνται ως πίνακες γειτνίασης, ενώ μια κεντρική οντότητα θα πρέπει να τους οργανώνει σε συστάδες ανάλογα με την ομοιότητα της ανάθεσης καναλιών η οποία τους ικανοποιεί σε αποδεκτό βαθμό. Όταν δυο διαδοχικά ενεργά σύνολα απαιτήσεων ανήκουν στην ίδια συστάδα, τότε προφανώς δεν απαιτείται η τροποποίηση της ισχύουσας ανάθεσης καναλιών του αντίστοιχου εξεταζόμενου δικτύου και, ως εκ τούτου, το κόστος αναδιάρθρωσής του θεωρείται μηδενικό. Σε αντίθετη περίπτωση επιλέγεται ως νέα ανάθεση καναλιών αυτή η οποία ικανοποιεί σε αποδεκτό βαθμό το νέο ενεργό σύνολο απαιτήσεων και, ταυτόχρονα, ελαχιστοποιεί τον αριθμό των ροών δεδομένων οι οποίες πρόκειται να επηρεαστούν κατά την εφαρμογή της στο προαναφερθέν δίκτυο. Ο ανωτέρω τρόπος συσταδοποίησης, ωστόσο, οδηγεί με βεβαιότητα σε μη-βέλτιστα αποτελέσματα, ενώ θεωρείται ακατάλληλος για την υποστήριξη της αποδοτικής αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων σε περιπτώσεις τροποποίησης της διαθεσιμότητας των καναλιών (και όχι των απαιτήσεων μετάδοσης) των χρηστών των εκάστοτε εξεταζόμενων δικτύων. Η τελευταία αδυναμία, μάλιστα, είναι και αυτή η οποία τελικά καθιστά την εν λόγω προσέγγιση ακατάλληλη για εφαρμογή σε Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Η εργασία [28] θεωρεί, επίσης, ως μοναδική αιτία αναδιάρθρωσης ισχυουσών αναθέσεων πόρων τη χρονικά μεταβαλλόμενη φύση των απαιτήσεων των χρηστών των εξεταζόμενων από πλευράς της δικτύων.

Στη συγκεκριμένη εργασία, μάλιστα, προτείνεται μια προσέγγιση η οποία εστιάζει στη μεγιστοποίηση της διεκπεραιωτικότητας των εν λόγω δικτύων, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα τον αριθμό των ροών δεδομένων οι οποίες επηρεάζονται κατά την αναδιάρθρωσή τους. Προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση κάθε νέα ανάθεση πόρων υπολογίζεται βάσει της αντίστοιχης ήδη ισχύουσας, ενώ ο συγκεκριμένος υπολογισμός πραγματοποιείται από έναν κεντρικοποιημένο *επι-γραμμής* (on-line) αλγόριθμο, ο οποίος αναθέτει κανάλια σε ζεύξεις, καθορίζει τα μονοπάτια δρομολόγησης και χρονοπρογραμματίζει κατάλληλα τις επιθυμητές μεταδόσεις στο εσωτερικό κάθε εξεταζόμενου δικτύου. Ωστόσο, και η παρούσα προσέγγιση αδυνατεί να υποστηρίξει την αποδοτική αναδιάρθρωση αναθέσεων πόρων σε περιπτώσεις όπου τροποποιείται η διαθεσιμότητα των καναλιών των ασύρματων συσκευών των εξεταζόμενων από πλευράς της δικτύων. Ως κυριότερη αδυναμία της, βέβαια, θεωρείται η απαίτηση εκτέλεσης του προαναφερθέντος αλγορίθμου ανά τακτά χρονικά διαστήματα, η εκτίμηση των οποίων δεν αποτελεί ακόμα και σήμερα μια τετριμμένη διαδικασία. Ο ανωτέρω μηχανισμός, μάλιστα, μοντελοποιείται και μαθηματικά στην εργασία [29] ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης Μικτού Ακεραίου Γραμμικού Προγραμματισμού πολλαπλών κριτηρίων. Στην ίδια εργασία, επίσης, προτείνεται και ένας μηχανισμός πρόβλεψης των μελλοντικών απαιτήσεων των χρηστών κάθε εξεταζόμενου δικτύου, επιτρέποντας ουσιαστικά τη στοιχειώδη εκτίμηση των προαναφερθέντων χρονικών διαστημάτων. Μια ακόμα ενδιαφέρουσα προσέγγιση παρουσιάζεται στην εργασία [30], στην οποία τροποποιείται μια ιδιαίτερα γνωστή ευρετική μεθοδική αποδομημένης επίλυσης των προβλημάτων της δρομολόγησης και της ανάθεσης καναλιών για συμβατικά ασύρματα δίκτυα. Βάσει της εν λόγω μεθοδολογίας, υπολογίζεται αρχικά ο *ρυθμός ροής* (flow rate) κίνησης τον οποίο θα πρέπει να υποστηρίζουν οι ζεύξεις κάθε εξεταζόμενου δικτύου ώστε να καθίσταται δυνατή η εξυπηρέτηση των ροών δεδομένων του, και στη συνέχεια αναζητείται μια ανάθεση καναλιών η οποία να δύναται να υποστηρίξει πλήρως τους προκύπτοντες αυτούς ρυθμούς ροής. Η καινοτομία της ανωτέρω προσέγγισης, ωστόσο, έγκειται στο γεγονός ότι κατά τον υπολογισμό κάθε νέας ανάθεσης πόρων λαμβάνεται υπόψη και η αντίστοιχη ήδη ισχύουσα, θέτοντας μάλιστα ένα όριο στον αριθμό των ασύρματων συσκευών οι οποίες επιτρέπεται να προβαίνουν σε μεταγωγή καναλιού σε κάθε αναδιάρθρωση. Αν και η συγκεκριμένη τεχνική, βέβαια, δύναται να διατηρήσει την αναστάτωση στο εσωτερικό των αναδιαρθρούμενων δικτύων σε αρκετά χαμηλά επί-

πεδα, ο εντοπισμός της κατά περίπτωση βέλτιστης τιμής του προαναφερθέντος ορίου δεν αποτελεί μια τετριμμένη διαδικασία. Όπως, μάλιστα, θα καταστεί φανερό και παρακάτω, η ελαχιστοποίηση του αριθμού των ασύρματων συσκευών οι οποίες προβαίνουν σε μεταγωγή καναλιού εντός ενός αναδιαρθρούμενου Δικτύου Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας δεν θεωρείται επαρκής για την ελαχιστοποίηση και του συνολικού κόστους αναδιάρθρωσής του. Σημειώνεται, τέλος, ότι καμία από τις ανωτέρω προσεγγίσεις δεν δίδει έμφαση – είτε από επιλογή, είτε λόγω δομικών δυσκολιών – σε θέματα δίκαιου διαμοιρασμού πόρων.

Στην τρέχουσα βιβλιογραφία εντοπίζονται, επίσης, εργασίες οι οποίες προσεγγίζουν το πρόβλημα της αποδοτικής αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων με ενδιαφέρον τρόπο, αν και δεν θεωρούνται άμεσα σχετιζόμενες με την παρούσα μελέτη. Πολύ συνοπτικά, η εργασία [31] μοντελοποιεί ένα πρόβλημα μαθηματικού προγραμματισμού το οποίο στοχεύει στη μεγιστοποίηση είτε του αριθμού των συνόδων επικοινωνίας, είτε της ποσότητας της από-άκρο-σε-άκρο κίνησης η οποία 'αποκαθίσταται' σε κάθε αναδιαρθρούμενο Δίκτυο Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Σε κάθε αναδιάρθρωση, μάλιστα, επιτρέπεται ο εκ νέου διαμοιρασμός μόνο όσων πόρων είτε παραμένουν ανεκχώρητοι, είτε ανατίθενται στις ροές δεδομένων οι οποίες επηρεάστηκαν κατά την τροποποίηση του περιβάλλοντος του αντίστοιχου εξεταζόμενου δικτύου. Η αποφυγή, ωστόσο, της πλήρους αναδιάρθρωσης κάθε παρωχημένης ανάθεσης πόρων μπορεί εύκολα να οδηγήσει σε μη-βέλιστα αποτελέσματα. Η εργασία [32], από την άλλη πλευρά, εστιάζει στον εντοπισμό της βέλτιστης ακολουθίας μονοπατιών δρομολόγησης τα οποία θα πρέπει να ακολουθήσει κάθε ροή δεδομένων ενός εξεταζόμενου δικτύου κατά τη διάρκεια ζωής της ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κόστος της συντήρησής της. Το συγκεκριμένο κόστος ποσοτικοποιείται αναθέτοντας υποθετικά βάρη στις διαδικασίες τόσο της μεταγωγής καναλιού, όσο και της εκτροπής κίνησης πάνω από εναλλακτικές ζεύξεις, ενώ η ελαχιστοποίησή του επιτυγχάνεται μοντελοποιώντας ένα κατάλληλο πρόβλημα Ακεραίου Γραμμικού Προγραμματισμού. Αν και πολύ ενδιαφέρουσα, η εν λόγω προσέγγιση δύναται να παρέχει βέλιστα αποτελέσματα μόνο υπό την προϋπόθεση ότι η μελλοντική δραστηριότητα των Πρωτευόντων Χρηστών είναι εκ των προτέρων γνωστή, απαίτηση η οποία θεωρείται εξαιρετικά δεσμευτική στην πράξη. Στην εργασία [33], τέλος, μοντελοποιούνται τρία εναλλακτικά προβλήματα Ακεραίου Γραμμικού Προγραμματισμού, τα οποία στοχεύουν στην αποδοτική αποκατάσταση παρωχημένων πλάνων δρομολόγησης συμβατικών ασύρματων δικτύων. Αναλυτικότερα,

μοντελοποιούνται (1) η μέθοδος της καθολικής αποκατάστασης, κατά την οποία ολόκληρη η κίνηση επαναδρομολογείται πάνω από το αναδιαρθρούμενο δίκτυο, (2) η μέθοδος της από-άκρο-σε-άκρο αποκατάστασης, κατά την οποία επαναδρομολογείται μόνο η κίνηση η οποία αντιστοιχεί στις επηρεασμένες από-άκρο-σε-άκρο συνόδους επικοινωνίας, και (3) η μέθοδος της τοπικής αποκατάστασης, κατά την οποία η επηρεασμένη κίνηση παρακάμπτει τοπικά τα προβληματικά σημεία της υποκείμενης τοπολογίας. Απώτερο στόχο της συγκεκριμένης μελέτης αποτελεί η σύγκριση των επικρατέστερων μοντέλων αναδιάρθρωσης παρωχημένων πλάνων δρομολόγησης όσον αφορά την επιτευχθείσα διεκπεραιωτικότητα των υποκείμενων δικτύων και της καθυστέρησης αποκατάστασης της βέλτιστης λειτουργίας τους. Στο σύνολό τους, ωστόσο, οι μέθοδοι αυτές αγνοούν την έννοια της δυναμικής ανάθεσης καναλιών σε ασύρματες συσκευές, γεγονός το οποίο τις καθιστά ακατάλληλες για εφαρμογή σε Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας.

Οι ανωτέρω μελέτες προδιαγράφουν αποκλειστικά κεντρικοποιημένους μηχανισμούς διαχείρισης ασύρματων δικτύων. Στη σύγχρονη βιβλιογραφία, ωστόσο, εντοπίζονται και κατανοημένες σχετικές προσεγγίσεις, οι οποίες απαιτούν ως επί το πλείστον την αυτοοργάνωση των διαχειριζόμενων συσκευών σε ομάδες και, εν συνεχεία, τη διαπραγμάτευση μεταξύ τους με σκοπό την αποδοτική προσαρμογή των παραμέτρων λειτουργίας τους στο εκάστοτε τροποποιημένο περιβάλλον. Αναλυτικότερα, οι εργασίες [34] και [35] εστιάζουν στην ανάνηψη Βροχωτών Ασύρματων Δικτύων από τυχούσες καταστροφές ζεύξεων, προδιαγράφοντας αρχικά μια μέθοδο εντοπισμού ανωμαλιών η οποία ενεργοποιεί έναν κατανοημένο μηχανισμό δημιουργίας συστάδων ασύρματων συσκευών. Οι προκύπτουσες συστάδες συνεργάζονται, εν συνεχεία, μεταξύ τους ανταλλάσσοντας διαθέσιμους ή ακόμα και δεσμευμένους πόρους, στοχεύοντας ουσιαστικά στην αποκατάσταση της λειτουργίας του αντίστοιχου δικτύου, προκαλώντας σε αυτό την ελάχιστη δυνατή επιβάρυνση. Η μελέτη [36], από την άλλη πλευρά, στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της υπολογιστικής και τηλεπικοινωνιακής επιβάρυνσης η οποία προκαλείται στα *Κινητά Επί-τούτω Δίκτυα* (Mobile Ad-hoc Networks, MANETs) κατά την αναδιάρθρωση των αναθέσεων πόρων τους λόγω της έντονης κινητικότητας των ασύρματων συσκευών τους. Ο προτεινόμενος μηχανισμός επιβάλλει αρχικά την αυτοοργάνωση των τελευταίων σε ομάδες και, εν συνεχεία, τη διαπραγμάτευση μεταξύ τους ώστε να αποκατασταθεί η αποδοτική τους λειτουργία με την ελάχιστη δυνατή επιβάρυνση. Στην εργασία [37], αντίθετα,



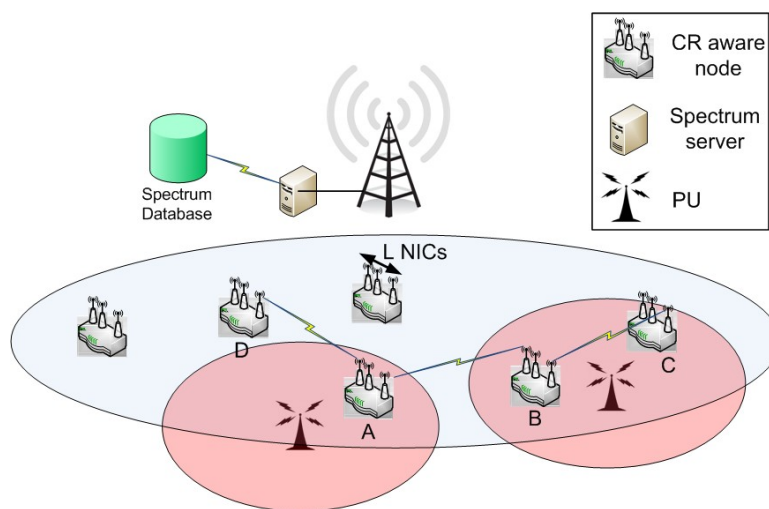
μοντελοποιείται και επιλύεται με τη βοήθεια κατανεμημένων αλγορίθμων ένα πρόβλημα αναδιάρθρωσης το οποίο ανάγεται σε ένα *πρόβλημα διμερούς αντιστοίχισης* (bipartite matching problem) μεγίστου βάρους, με τον αριθμό των σημείων τα οποία επιτρέπεται να διαφέρουν μεταξύ διαδοχικών βέλτιστων αντιστοιχίσεων να είναι αυστηρά προκαθορισμένος. Ο όρος αντιστοίχιση εδώ προφανώς αντιπροσωπεύει μια ανάθεση καναλιών ενός δικτύου, ενώ τα σημεία διαφοροποίησης αποτελούν τις ασύρματες συσκευές οι οποίες απαιτείται να προβούν σε μεταγωγή καναλιού κατά την εφαρμογή μιας νέας σχετικής αντιστοίχισης σε ένα αναδιαρθρούμενο δίκτυο. Στην εργασία [38], τέλος, προτείνεται μια κατανεμημένη προσέγγιση (καθώς και η κεντρικοποιημένη εναλλακτική της) η οποία επιτρέπει σε ασύρματες συσκευές να συνεννοούνται μεταξύ τους σχετικά με το ποιες και με ποια σειρά θα πραγματοποιούν τις απαιτούμενες μεταγωγές καναλιού κατά την αναδιάρθρωση παρωχημένων αναθέσεων πόρων συμβατικών ασύρματων δικτύων. Στόχο της εν λόγω προσέγγισης αποτελεί η διασφάλιση της διαρκούς συνδεσιμότητας κάθε διαχειριζομένου δικτύου, καθώς και η ελαχιστοποίηση του αριθμού των προαναφερθέντων κύκλων. Αξίζει, ωστόσο, να σημειωθεί ότι η πλειοψηφία των ανωτέρω μεθόδων αγνοεί την επιβάρυνση η οποία προκαλείται στα αναδιαρθρούμενα δίκτυα κατά τη μεταγωγή καναλιών από πλευράς των ασύρματων συσκευών τους, ενώ καμία εξ αυτών δεν λαμβάνει υπόψη τις ιδιαιτερότητες της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Ταυτόχρονα, οι ανωτέρω κατανεμημένοι μηχανισμοί θεωρούνται ανίκανοι να προσφέρουν βέλτιστα αποτελέσματα ή να υποστηρίξουν οποιαδήποτε μορφή δικαιοσύνης κατά την επανεκχώρηση των διαθέσιμων πόρων στα εξεταζόμενα δίκτυα.

Ολοκληρώνοντας την παρούσα παράγραφο αξίζει να σημειωθεί ότι το πρόβλημα της αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων θεωρείται, επίσης, εξαιρετικά δημοφιλές στα πλαίσια της διαχείρισης οπτικών δικτύων. Οι προδιαγραφές και οι στόχοι των εν λόγω δικτύων, βέβαια, διαφέρουν έντονα από αυτούς των ασύρματων δικτύων και, ως εκ τούτου, οι αντίστοιχες εργασίες δεν θεωρούνται σε καμία περίπτωση σχετικές με την παρούσα μελέτη. Αξίζει, ωστόσο, να αναφερθεί ότι το πρόβλημα της αναδιάρθρωσης παρωχημένων αναθέσεων πόρων μοντελοποιείται και στο συγκεκριμένο ερευνητικό πεδίο συνήθως ως πρόβλημα βελτιστοποίησης Μαθηματικού Προγραμματισμού, όπως άλλωστε συμβαίνει και στην περίπτωση των ασύρματων δικτύων (βλ. [29, 31, 32, 33, 38]). Δημοφιλή πρακτική, μάλιστα, αποτελεί ο πρότερος καθορισμός της έκτασης των τροποποιήσεων οι

οποίες επιτρέπεται να πραγματοποιούνται στα κατά περίπτωση αναδιαρθρούμενα οπτικά δίκτυα, προσθέτοντας κατάλληλες (αν)ισότητες στα αντίστοιχα προτεινόμενα μοντέλα βελτιστοποίησης (βλ. [39]). Παράλληλα, εντοπίζονται και μελέτες (βλ. [40]) οι οποίες προσεγγίζουν τον συνδυαστικό στόχο της μεγιστοποίησης της αποδοτικότητας των κατά περίπτωση εξεταζόμενων δικτύων (μέσω της ελαχιστοποίησης του μέσου αριθμού αλμάτων τα οποία διανύουν τα μεταδιδόμενα πακέτα μέχρι να φτάσουν στον προορισμό τους) και της ελαχιστοποίησης του κόστους αναδιάρθρωσής τους (μέσω της ελαχιστοποίησης του αριθμού των επηρεαζόμενων ζεύξεων τύπου 'lightpath') εφαρμόζοντας τη δημοφιλή στα πλαίσια του μαθηματικού προγραμματισμού τεχνική της αποδόμησης των επιμέρους στόχων σε αντίστοιχα υπο-προβλήματα βελτιστοποίησης (τεχνική ευρέως γνωστή και ως primal decomposition).

## 2.4 Αρχιτεκτονική συστήματος και υποθέσεις

Σκοπό της παρούσας παραγράφου αποτελεί η αναλυτική παρουσίαση τόσο της αρχιτεκτονικής, όσο και των προδιαγραφών των δικτύων επί των οποίων εστιάζει η παρούσα μελέτη, ενώ τόσο η τοπολογία τους, όσο και οι εμπλεκόμενες σε αυτά οντότητες απεικονίζονται γραφικά στην Εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1: Τοπολογία και αρχιτεκτονική συστήματος.

### 2.4.1 Αρχιτεκτονική συστήματος

Η παρούσα μελέτη εστιάζει σε Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας βροχωτής αρχιτεκτονικής. Στα εν λόγω δίκτυα κάθε ασύρματη συσκευή δεν διαδραματίζει αποκλειστικά τον ρόλο αποστολέα ή παραλήπτη δεδομένων, αλλά εκτελεί και χρέη αναμεταδότη, δεδομένου ότι η επικοινωνία μεταξύ Δευτερευόντων Χρηστών πραγματοποιείται μέσω πολλαπλών ενδιάμεσων βημάτων. Καθίσταται έτσι εφικτή η επικοινωνία μεταξύ εξαιρετικά απομακρυσμένων ασύρματων συσκευών, χωρίς να απαιτείται η πραγματοποίηση μεταδόσεων υψηλής ισχύος πάνω από ένα μόνο κανάλι. Αντίθετα, τα πακέτα των μεταδιδόμενων ροών προωθούνται στον προορισμό τους μέσω πολλαπλών διαδοχικών μεταδόσεων μικρότερης εμβέλειας, γεγονός το οποίο αυξάνει τον βαθμό επαναχρησιμοποίησης των διαθέσιμων καναλιών και μειώνει τις παρεμβολές μεταξύ των γειτονικών μεταδόσεων.

Οι Δευτερεύοντες Χρήστες των ανωτέρω δικτύων θεωρούνται στα πλαίσια της παρούσας μελέτης εξοπλισμένοι με ασύρματες συσκευές πλήρως συμμορφούμενες με τις προδιαγραφές της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι οικονομικά προσιτές και ευρέως διαθέσιμες στην αγορά ασύρματες συσκευές Λογισμικόριστης Ραδιοεπικοινωνίας USRP [41], οι οποίες λόγω του ευέλικτου σχεδιασμού τους θεωρούνται σήμερα κατάλληλες για την υποστήριξη υλοποιήσεων Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας στην πράξη. Κάθε τέτοια συσκευή θεωρείται, επίσης, εφοδιασμένη με πολλές διεπαφές δικτύου, διασφαλίζοντας ουσιαστικά τη δυνατότητα της μετάδοσης και λήψης πακέτων πάνω από πολλαπλά κανάλια ταυτόχρονα. Σημειώνεται, μάλιστα, ότι στην παρούσα μελέτη αποφεύγεται αυστηρά η υιοθέτηση μη-ρεαλιστικών υποθέσεων, όπως είναι για παράδειγμα αυτή της ύπαρξης συσκευών ικανών να μεταδίδουν και να λαμβάνουν πακέτα ταυτόχρονα πάνω από πολλαπλά κανάλια με μία μόνο διεπαφή δικτύου.

Σημειώνεται, επίσης, ότι οι ανωτέρω ασύρματες συσκευές θεωρούνται στα πλαίσια της υιοθετούμενης αρχιτεκτονικής συστήματος σταθερές, γεγονός το οποίο υπαγορεύει κυρίως η φύση των υπηρεσιών τις οποίες αυτές καλούνται να εξυπηρετήσουν. Πιο συγκεκριμένα, οι εν λόγω συσκευές ενδέχεται να αποτελούν έξυπνες τηλεοράσεις, αποκωδικοποιητές διαδικτυακού τηλεοπτικού σήματος, ή ακόμα και κονσόλες ηλεκτρονικών παιχνιδιών. Είναι γεγονός, άλλωστε, ότι οι απαιτήσεις πρόσβασης σε πολυμεσικό περιεχόμενο αυξάνουν με ταχείς ρυθμούς τα τελευταία χρόνια, ενώ η έλευση των Δικτύων Γνωσιακής

Ραδιοεπικοινωνίας αναμένεται να άρει τις όποιες δυσκολίες χαρακτηρίζουν την παροχή σχετικών υπηρεσιών στο ευρύ κοινό. Οι ανωτέρω συσκευές ενδέχεται, επίσης, να αποτελούν ασύρματους *διαποδιαμορφωτές* (modems) υποστήριξης υπηρεσιών σταθερής τηλεφωνίας και διαδικτύου σε αγροτικές ή προαστιακές περιοχές. Η δυνατότητα ανάπτυξης τέτοιου είδους δικτύων, μάλιστα, αναμένεται να καταστήσει ικανούς τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους να προσφέρουν τάχιστα οικονομικές και υψηλού επιπέδου υπηρεσίες στους τελικούς χρήστες τους, αποφεύγοντας την αγορά δικαιωμάτων διέλευσης και τη χρονοβόρα εγκατάσταση υπόγειων καλωδίων. Επιπρόσθετα, οι ανωτέρω συσκευές ενδέχεται να αποτελούν στοιχεία των λεγόμενων *Έξυπνων Πόλεων* (Smart Cities) και *Έξυπνων Πλεγμάτων* (Smart Grid). Σχετικά με τις υποδομές των Έξυπνων Πόλεων, αυτές αναμένεται να υποστηρίξουν την αυτοματοποιημένη συλλογή τιμών μετρήσεων κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, αέριου και νερού από οικίες ή εργοστάσια εντός εκτενών γεωγραφικών περιοχών, επιτρέποντας την εξοικονόμηση σημαντικών πόρων από πλευράς των αντίστοιχων κοινωφελών επιχειρήσεων. Σχετικές πλατφόρμες [42], μάλιστα, αναπτύσσονται ήδη από τις εταιρείες SpectrumBridge [43] και Neul [44], ενσωματώνοντας ακόμα και στοιχεία δανεισμένα από την τεχνολογία της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Όσον αφορά τα Έξυπνα Πλέγματα, σκοπό τους αποτελεί η βέλτιστη διαχείριση τόσο της παραγωγής, όσο και της διάθεσης της ηλεκτρικής ενέργειας εντός των ορίων εκτενών γεωγραφικών περιοχών, ενώ στη συγκεκριμένη τεχνολογία εντάσσονται διαδικασίες όπως η συλλογή δεδομένων τηλεμετρίας από συστήματα System Control and Data Acquisition (SCADA) τα οποία παρακολουθούν τη λειτουργία εργοστασίων παραγωγής ενέργειας, φωτοβολταϊκών συστημάτων, ανεμογεννητριών κ.α. Οι εταιρείες SpectrumBridge [43] και Plumas-Sierra Rural Electric Cooperative & Telecommunications [45], μάλιστα, έχουν ήδη αναπτύξει ένα σχετικό Έξυπνο Πλέγμα στην ομώνυμη κομητεία [46], ενσωματώνοντας ακόμα και στοιχεία και διαδικασίες δανεισμένες από την τεχνολογία της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Τέλος, οι ανωτέρω συσκευές ενδέχεται να αποτελούν κάμερες επίτηρησης δημόσιων (π.χ. πάρκα, οδοί, κρίσιμες υποδομές, κ.α.) ή ιδιωτικών χώρων (π.χ. σπίτια, εργοστάσια, φωτοβολταϊκά/αιολικά πάρκα, κ.α.) με σκοπό την αντιμετώπιση της εγκληματικότητας και την προστασία των πολιτών από κρούσματα βίας, κλοπών και καταστροφών. Η ασύρματη συλλογή ροών βίντεο, βέβαια, θεωρείται σήμερα κοινότητα, αλλά είναι αξιοσημείωτο ότι εμφανίζονται περιπτώσεις, όπως αυτές του νοσοκομείου Hocking

Valley Community Hospital [48] και του City of Wilmington του New Hanover County της North Carolina [47], στις οποίες οι αντίστοιχες υπηρεσίες ενσωματώνουν ήδη διαδικασίες δανεισμένες από την τεχνολογία της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Εν κατακλείδι, δεδομένης της φύσης των ανωτέρω ασύρματων συσκευών, οι τροποποιήσεις τόσο της θέσης τους, όσο και των απαιτήσεών τους (π.χ. ταυτότητα παραλήπτη, ρυθμός μετάδοσης, κ.α.) αναμένονται εξαιρετικά σπάνιες στην πράξη.

Παράλληλα, και με σκοπό τη διασφάλιση της πρακτικότητας των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης, η υιοθετούμενη αρχιτεκτονική συστήματος συμμορφώνεται πλήρως με τα επίσημα προτυποποιημένα κανονιστικά πλαίσια των ρυθμιστικών αρχών FCC [49] (Αμερική), OFCOM [50] (Αγγλία) και IDA [51] (Σιγκαπούρη), τα οποία διέπουν ήδη (ή πρόκειται να διέπουν στο άμεσο μέλλον) την ευκαιριακή εκμετάλλευση των λεγόμενων 'TV White Spaces' (TVWS). Τα TVWS αποτελούν ουσιαστικά τις υποζώνες της φασματικής ζώνης UHF/VHF οι οποίες φιλοξενούσαν μέχρι πριν λίγο καιρό αναλογικές τηλεοπτικές μεταδόσεις, ενώ μετά τη μετάβαση των τελευταίων στην ψηφιακή εποχή (διαδικασία γνωστή και ως *ψηφιακή μετάβαση* (digital switchover)) κατέστησαν διαθέσιμες προς εκμετάλλευση από την τεχνολογία της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Στα ανωτέρω κανονιστικά πλαίσια, μάλιστα, στηρίζεται και η ανάπτυξη των πρώτων σχετικών πρωτοκόλλων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, ήτοι τα IEEE 802.22 [52] και IEEE 802.11af [53]. Δεδομένης, ωστόσο, της εξαιρετικά πρώιμης φάσης στην οποία βρίσκεται ο σχεδιασμός των τελευταίων, η παρούσα μελέτη υιοθετεί τις γενικότερες προδιαγραφές των ανωτέρω πλαισίων, χωρίς να υπεισέρχεται στις ιδιαίτερες λεπτομέρειες καθενός εξ αυτών.

Θεμελιώδους σημασίας για τα εξεταζόμενα στην παρούσα μελέτη Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας αποτελεί, επίσης, η δυνατότητα ασφαλούς ενημέρωσης των Δευτερευόντων Χρηστών τους σχετικά με τα κανάλια τα οποία τους προσφέρει κάθε στιγμή προς ευκαιριακή εκμετάλλευση το περιβάλλον ραδιοσυχνοτήτων τους. Σε πλήρη συμφωνία, λοιπόν, με τις επιταγές των ανωτέρω κανονιστικών πλαισίων, η εν λόγω ενημερότητα επιλέγεται στην προκειμένη περίπτωση να αποκτάται μέσω ειδικών *Βάσεων Δεδομένων Φάσματος* (Spectrum Databases). Οι συγκεκριμένες οντότητες αναλαμβάνουν ουσιαστικά τη δημιουργία λιστών διαθέσιμων καναλιών για τους αιτούντες Δευτερεύοντες Χρήστες, συνυπολογίζοντας τη γεωγραφική τους θέση, τις προδιαγραφές του εξοπλισμού τους (είδος, ισχύς μετάδοσης, ύψος κεραίας από το έδαφος, κ.α.), τη γεωμορφολογία της δια-

χειριζόμενης περιοχής, τα περιγράμματα εμβέλειας μεταδόσεων των υποκείμενων Πρωτεύοντων Χρηστών, καθώς και τις προδιαγραφές των ισχυρόνων κανονιστικών πλαισίων. Οι λεπτομέρειες σχετικά με τον τρόπο ανακάλυψης, επιλογής (καθώς παραπάνω από μια σχετικές βάσεις ενδέχεται να λειτουργούν στην ίδια γεωγραφική περιοχή) και αλληλεπίδρασης (ακολουθία και μορφότυπα ανταλλασσόμενων μηνυμάτων, κ.α.) με τέτοιου είδους βάσεις δεδομένων θεωρούνται εκτός πεδίου έρευνας για την παρούσα μελέτη, ενώ ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης παραπέμπεται στις δραστηριότητες προτυποποίησης του 'Internet Engineering Task Force' (IETF) [54], και ειδικότερα στις προδιαγραφές του πρωτοκόλλου 'Protocol to Access White Space database' (PAWS) [55] για την άντληση περαιτέρω σχετικών πληροφοριών. Αξίζει, τέλος, να σημειωθεί ότι εταιρείες όπως οι Google [56], SpectrumBridge [43], Keybridge [57] και Telcordia [58] έχουν ήδη πιστοποιηθεί από την Αμερικανική ρυθμιστική αρχή FCC [59] και παρέχουν σχετικές υπηρεσίες Βάσεων Δεδομένων Φάσματος στο ευρύ κοινό.

Δεδομένης, βέβαια, της χρονικά μεταβαλλόμενης δραστηριότητας των Πρωτεύοντων Χρηστών, οι ανωτέρω λίστες διαθέσιμων καναλιών θα πρέπει να επικαιροποιούνται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, απαιτώντας από τους αντίστοιχους Δευτερεύοντες Χρήστες να επικοινωνούν περιοδικά με τις αρμόδιες Βάσεις Δεδομένων Φάσματος. Τα εν λόγω διαστήματα, μάλιστα, τίθενται στα προαναφερθέντα κανονιστικά πλαίσια της τάξεως μερικών ωρών, επιλογή την οποία υπαγορεύει κυρίως η φύση της δραστηριότητας των Πρωτεύοντων Χρηστών των ζωνών TVWS, οι οποίοι σύμφωνα με τη ρυθμιστική αρχή FCC [49] αποτελούν ψηφιακούς τηλεοπτικούς σταθμούς (digital television stations), ψηφιακούς και αναλογικούς σταθμούς τύπου *translator* και *booster* (digital and analog translator and booster stations), λειτουργίες τύπου *translator receiver* (translator receive operations), ζεύξεις βοηθητικών υπηρεσιών σταθερής εκπομπής (fixed broadcast auxiliary service links), υπηρεσίες *private land mobile service/commercial radio* (PLMRS/CMRS), υπηρεσίες υπεράκτιου ραδιοτηλεφώνου (offshore radiotelephone services), βοηθητικές υπηρεσίες ασύρματων μικροφώνων (wireless microphones) και παραλήπτες MVPD, καθώς και υπηρεσίες μη-αδειοδοτημένων ασύρματων μικροφώνων (unlicensed wireless microphones) τα οποία χρησιμοποιούνται σε εκδηλώσεις, τηλεοπτικές παραγωγές, δημοσιογραφικές καλύψεις ειδήσεων/γεγονότων, κ.α. Χαρακτηριστικό είναι, επίσης, το γεγονός ότι τα προαναφερθέντα κανονιστικά πλαίσια υποχρεώνουν τους Πρωτεύοντες Χρήστες των ανωτέρω υπηρεσιών

να ενημερώνουν εκ των προτέρων τις αντίστοιχες Βάσεις Δεδομένων Φάσματος σχετικά με την πρόθεση κατάληψης κάποιου καναλιού, αφήνοντας μάλιστα ένα περιθώριο τουλάχιστον 12 έως 24 ωρών στους Δευτερεύοντες Χρήστες ώστε να αναδιαρθρώσουν εγκαίρως τις αναθέσεις πόρων τους (σημειώνεται ότι τυχούσες έκτακτες μεταδόσεις εξυπηρετούνται από κανάλια τα οποία δεν διατίθενται προς ευκαιριακή εκμετάλλευση).

Ακριβέστερα, το κανονιστικό πλαίσιο της Αμερικανικής ρυθμιστικής αρχής FCC [49] επιβάλλει την επικαιροποίηση των υπολογιζόμενων λιστών διαθέσιμων καναλιών μια φορά την ημέρα. Ταυτόχρονα, σε κάθε τέτοια λίστα απαιτείται να επισυνάπτεται το πλήρες πρόγραμμα διαθεσιμότητας των περιεχόμενων καναλιών για τις επόμενες 48 ώρες, διασφαλίζοντας ουσιαστικά την ομαλή λειτουργία των Δευτερεύοντων Χρηστών ακόμα και σε περιπτώσεις περιστασιακής αδυναμίας επικοινωνίας με τις αρμόδιες Βάσεις Δεδομένων Φάσματος. Το κανονιστικό πλαίσιο της Αγγλικής OFCOM [50], από την άλλη πλευρά, επιβάλλει για κάθε περιεχόμενο κανάλι να συνοδεύεται και από το χρονικό διάστημα ισχύος της διαθεσιμότητάς του, ενώ οι αντίστοιχες λίστες θα πρέπει προφανώς να ανανεώνονται πριν παρέλθει το εν λόγω διάστημα. Και εδώ, μάλιστα, η περίοδος ανανέωσης αναμένεται της τάξεως μερικών ωρών, ενώ ο Βρετανικός τηλεπικοινωνιακός φορέας 'British Telecom' (BT) [60] εκτιμά το συγκεκριμένο διάστημα ίσο με 2 ώρες [61]. Παρεμφερείς προδιαγραφές υιοθετούνται και στο κανονιστικό πλαίσιο της ρυθμιστικής αρχής της Σιγκαπούρης IDA [51], στο οποίο συνυπολογίζοντας την έκταση της διαχειριζόμενης χώρας και τη συμπεριφορά των υπαρχόντων παρόχων υπηρεσιών εκτιμάται ότι το προαναφερθέν διάστημα ανανέωσης θα πρέπει να οριστεί μεταξύ 6 και 24 ωρών. Σημειώνεται, τέλος, ότι τα ανωτέρω κανονιστικά πλαίσια επιβάλλουν στους Δευτερεύοντες Χρήστες να ανανεώνουν τις λίστες διαθέσιμων καναλιών τους και κατά την ενεργοποίησή τους ή τη μετακίνησή τους πάνω από μια συγκεκριμένη απόσταση στον χώρο, ενώ προδιαγράφουν και μηχανισμούς ώστε οι ίδιες οι Βάσεις Δεδομένων Φάσματος να καλούν τους Δευτερεύοντες Χρήστες σε ανανέωση των σχετικών λιστών τους. Οι τελευταίοι μηχανισμοί, ωστόσο, έχουν ήδη καταστεί προαιρετικοί στο πλαίσιο της ρυθμιστικής αρχής FCC [49], ενώ εταιρείες όπως οι Adaptrum, Broadcom, CSR, Google, Jaguar Land Rover, Microsoft, Neul, Sky και Spectrum Bridge [62] προειδοποιούν την αρχή OFCOM [63] σχετικά με τους κινδύνους οι οποίοι ελλοχεύουν από μια πιθανή απαίτηση υλοποίησης τέτοιου είδους μηχανισμών στην πράξη.

Σε πλήρη συμμόρφωση με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, λοιπόν, κάθε εξεταζόμενο στα πλαίσια της παρούσας μελέτης Δίκτυο Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας θεωρείται ότι έχει πρόσβαση σε μια αρμόδια Βάση Δεδομένων Φάσματος, η οποία είναι επιφορτισμένη με την ευθύνη υπολογισμού των λιστών διαθέσιμων καναλιών των ασύρματων συσκευών των Δευτερευόντων Χρηστών του. Δεδομένης, δε, και της σταθερής εγκατάστασης των τελευταίων (βλ. παραπάνω), ως μόνος λόγος ανανέωσης των συγκεκριμένων λιστών θεωρείται η παρέλευση του χρονικού διαστήματος ισχύος τους, ενώ για λόγους συμβατότητας με το σύνολο των ανωτέρω κανονιστικών πλαισίων το συγκεκριμένο διάστημα ορίζεται της τάξεως μερικών ωρών.

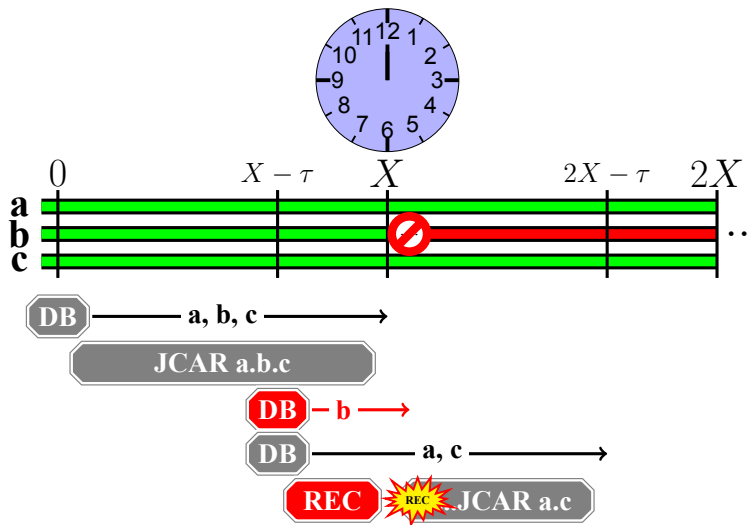
Μια ακόμα οντότητα η οποία διαδραματίζει εξέχον ρόλο στα πλαίσια της υιοθετούμενης αρχιτεκτονικής συστήματος θεωρείται και ο *Εξυπηρετητής Φάσματος* (Spectrum Server). Ο εν λόγω εξυπηρετητής θεωρείται επιφορτισμένος με την ευθύνη συλλογής τόσο των λιστών διαθέσιμων καναλιών, όσο και των απαιτήσεων μετάδοσης των διαχειριζόμενων Δευτερευόντων Χρηστών, ενώ βάσει αυτών υποχρεούται να υπολογίζει και τις αντίστοιχες βέλτιστες αναθέσεις πόρων τους. Σχετικές οντότητες, μάλιστα, χρησιμοποιούνται ήδη σε μελέτες της σύγχρονης βιβλιογραφίας [11], ενώ η εταιρεία SpectrumBridge [43] έχει ήδη προδιαγράψει και πατεντάρει την πλατφόρμα 'Authorized Shared Access' (ASA) [64] της οποίας βασικό συστατικό στοιχείο αποτελεί ο Εξυπηρετητής Φάσματος ονόματι 'Allocation Engine'. Όμοιες οντότητες υιοθετούνται, επίσης, τόσο στην πλατφόρμα COGEU [65], η οποία στοχεύει στην αποδοτικότερη εκμετάλλευση των μερίδων φάσματος TVWS στην Ευρώπη, όσο και από την 'Τεχνική Επιτροπή' (Technical Committee, TS) 'Reconfigurable Radio Systems' (RRS) του οργανισμού προτυποποίησης 'European Telecommunications Standards Institute' (ETSI) [66], η οποία ασχολείται με γενικότερα θέματα προτυποποίησης σχετικά με τη Λογισμικόριστη και τη Γνωσιακή Ραδιοεπικοινωνία. Αξίζει, τέλος, να σημειωθεί ότι ο τρόπος επικοινωνίας μεταξύ των Δευτερευόντων Χρηστών και των Εξυπηρετητών Φάσματος θεωρείται εκτός πεδίου έρευνας για την παρούσα μελέτη, επιτρέποντας ουσιαστικά την εφαρμογή οποιουδήποτε υπάρχοντος ή μελλοντικού σχετικού πρωτοκόλλου προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση.

Ανακεφαλαιώνοντας, και με σκοπό τη σύνδεση όλων των ανωτέρω, παρουσιάζεται στο σημείο αυτό ένα αντιπροσωπευτικό σενάριο επίδειξης της αλληλουχίας των ενεργειών οι οποίες απαιτείται να πραγματοποιούνται ώστε να υπολογίζονται και, σε δεύ-



τερη φάση, να αναδιαρθρώνονται οι αναθέσεις πόρων των εξεταζόμενων στα πλαίσια της παρούσας μελέτης Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Βάσει των Εικόνων 2.1 και 2.2, λοιπόν, θεωρείται ότι ένας Εξυπηρετητής Φάσματος ο οποίος διαχειρίζεται ένα Δίκτυο Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας επικοινωνεί τη χρονική στιγμή 0 με μια αρμόδια Βάση Δεδομένων Φάσματος με σκοπό τη συλλογή των λιστών διαθέσιμων καναλιών των υποκείμενων Δευτερευόντων Χρηστών. Χωρίς βλάβη της γενικότητας, οι προαναφερθείσες λίστες θεωρούνται στο παρόν σενάριο ταυτόσημες και περιέχουσες τα κανάλια  $a$ ,  $b$  και  $c$ , ενώ έστω ότι η επικαιροποίησή τους απαιτείται να έχει ολοκληρωθεί τουλάχιστον πριν τη χρονική στιγμή  $X$  (διάστημα της τάξεως μερικών ωρών). Βάσει των εν λόγω λιστών, λοιπόν, ο Εξυπηρετητής Φάσματος επιλύει το πρόβλημα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο, ενώ η προκύπτουσα βέλτιστη ανάθεση πόρων, συμβολιζόμενη εφεξής ως  $JCARa.b.c$ , εφαρμόζεται άμεσα στο εσωτερικό του ανωτέρω δικτύου. Εν συνεχεία, και ακριβέστερα τη χρονική στιγμή  $X - \tau$ , ο ανωτέρω Εξυπηρετητής Φάσματος απαιτείται να επικοινωνήσει εκ νέου με την αρμόδια Βάση Δεδομένων Φάσματος με σκοπό την επικαιροποίηση των προαναφερθεισών λιστών διαθέσιμων καναλιών. Σημειώνεται ότι το μέγεθος  $\tau$  αντιπροσωπεύει ουσιαστικά το εκτιμώμενο χρονικό διάστημα υπολογισμού βέλτιστων αναθέσεων πόρων από πλευράς του ανωτέρω Εξυπηρετητή Φάσματος, διάστημα το οποίο εξαρτάται συνδυαστικά από το μέγεθος του εκάστοτε επιλυόμενου προβλήματος και τη μεθοδολογία η οποία ακολουθείται προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση. Διασφαλίζεται έτσι ότι ακόμα και αν η ανάθεση πόρων  $JCARa.b.c$  καταστεί όντως παρωχημένη τη χρονική στιγμή  $X$ , υπάρχει επαρκής χρόνος ώστε να υπολογιστεί μια νέα βέλτιστη ανάθεση πόρων για την έγκαιρη αναδιάρθρωσή της. Σε αντίθετη περίπτωση, καθ' όλο το διάστημα υπολογισμού της τελευταίας το ανωτέρω δίκτυο θα έπρεπε να παραμείνει ανενεργό, ενώ δεν πρέπει να λησμονείται το γεγονός ότι το πρόβλημα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης θεωρείται ιδιαίτερα απαιτητικό σε υπολογιστικούς πόρους και χρόνο επίλυσης, γι' αυτό και σήμερα εκτελείται μόνο κατά την αρχική ανάπτυξη πολυ-αλματικών δικτύων, και όχι κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους. Έστω, λοιπόν, ότι τη χρονική στιγμή  $X - \tau$  ο Εξυπηρετητής Φάσματος ενημερώνεται ότι τη στιγμή  $X$  το κανάλι  $b$  θα παύσει να είναι διαθέσιμο και, ως εκ τούτου, η ισχύουσα ανάθεση  $JCARa.b.c$  θα καταστεί αναπόφευκτα παρωχημένη. Την ίδια στιγμή, προφανώς, ο εν λόγω εξυπηρετητής ξεκινά τον υπολογισμό της

επιθυμητής νέας βέλτιστης ανάθεσης πόρων, συμβολιζόμενης εφεξής ως  $JCAR_{a,b}$ , ενώ όταν πλησιάζει η στιγμή  $X$  προβαίνει τελικά στην προσαρμογή της ισχύουσας ανάθεσης  $JCAR_{a,b,c}$  στη νέα  $JCAR_{a,b}$ . Σε περίπτωση, μάλιστα, εφαρμογής του προτεινόμενου στην παρούσα μελέτη μηχανισμού βέλτιστης αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων, η νέα ανάθεση  $JCAR_{a,b}$  πρόκειται να διαφέρει ελάχιστα από την αντίστοιχη ήδη ισχύουσα  $JCAR_{a,b,c}$ , ελαχιστοποιώντας ουσιαστικά τη συνολική επιβάρυνση η οποία πρόκειται να προκληθεί στο ανωτέρω δίκτυο κατά τη φάση προσαρμογής της δεύτερης ανάθεσης στην πρώτη.



Εικόνα 2.2: Αλληλουχία ενεργειών αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων.

## 2.4.2 Παράμετροι συστήματος και υποθέσεις

Κάθε Δίκτυο Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας θεωρείται στα πλαίσια της παρούσας μελέτης ότι αποτελείται από  $N$  Δευτερεύοντες Χρήστες, καθένας εκ των οποίων φέρει μια ασύρματη συσκευή πλήρως συμμορφούμενη με τις προδιαγραφές της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Οι εν λόγω συσκευές θεωρούνται ικανές να εκμεταλλεύονται ευκαιριακά όσα κανάλια τους διατίθενται, καθώς και να προχωρούν σε μεταγωγή καναλιού όποτε αυτό κρίνεται αναγκαίο ώστε να διασφαλίζεται η διαφανής λειτουργία τους ως προς τους αντίστοιχους Πρωτεύοντες Χρήστες. Παράλληλα, κάθε τέτοια συσκευή θεωρείται εφοδιασμένη με  $L$  διεπαφές δικτύου πανομοιότυπων προδιαγραφών, καθεμία εκ των οποίων δύναται να λειτουργεί σε ένα κανάλι κάθε στιγμή και να υποστηρίζει αποκλειστικά ημιαμφίδρομες (half-duplex) ζεύξεις, δηλαδή ζεύξεις πάνω από τις οποίες δεν

επιτρέπεται η ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη πακέτων. Όσον αφορά το διαθέσιμο ραδιοφάσμα, αυτό θεωρείται διαιρεμένο σε ένα σύνολο καναλιών με *πληθάριθμο* (cardinality)  $|U|$ , ενώ οι παράμετροι  $W_u$  και  $f_c^{(u)}$  συμβολίζουν το εύρος ζώνης και τη *φέρουσα συχνότητα* (carrier frequency) κάθε καναλιού  $u$ , αντίστοιχα.

Όσον αφορά τις ζεύξεις των ανωτέρω δικτύων, αυτές θεωρούνται αποκλειστικά *μονοκατευθυντικές* (unidirectional), με το ένα άκρο τους να διαδραματίζει τον ρόλο αποστολέα και το άλλο τον ρόλο παραλήπτη πακέτων, χωρίς οι συγκεκριμένοι ρόλοι να δύνανται να αντιστρέφονται. Σημειώνεται, επίσης, ότι κάθε ζεύξη μεταξύ δυο ασύρματων συσκευών  $i$  και  $j$  αναπτύσσεται ουσιαστικά μεταξύ δυο προσκείμενων σε αυτές διεπαφών δικτύου  $i_m$  και  $j_n$ , αντίστοιχα (βλ. Εικόνα 2.3). Όσον αφορά τον μέγιστο ρυθμό μετάδοσης τον οποίο δύναται να υποστηρίξει η εκάστοτε σχηματιζόμενη ζεύξη, αυτός προκύπτει βάσει του θεωρήματος 'Shannon – Hartley' ως εξής:

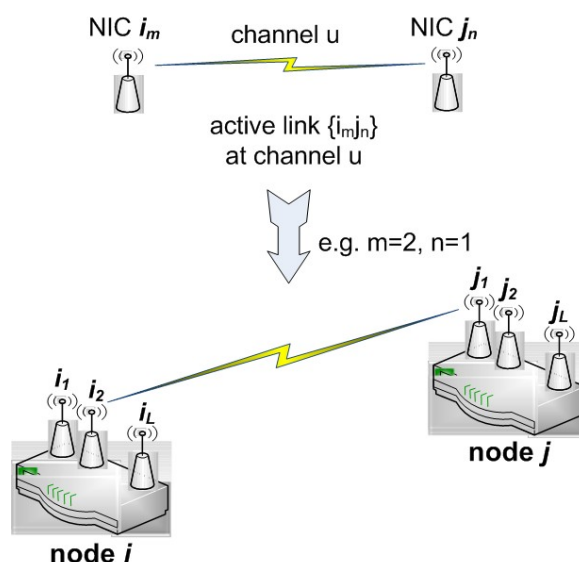
$$C_{i_m j_n}^u = W_u \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N_P} \right), \quad (2.1)$$

με τη μεταβλητή  $N_P$  να συμβολίζει τον *θόρυβο βάθους* (background noise) και τη μεταβλητή  $S$  να συμβολίζει την *ισχύ σήματος* (signal power) η οποία προσεγγίζει τη διεπαφή δικτύου η οποία διαδραματίζει τον ρόλο παραλήπτη στη συγκεκριμένη ζεύξη. Οι διεπαφές δικτύου, ωστόσο, δεν θεωρούνται στην προκειμένη περίπτωση ικανές να ελέγχουν την ισχύ των μεταδόσεων τους, ενώ δεδομένης της θεώρησης ότι όλες οι διεπαφές του ιδίου δικτύου φέρουν πανομοιότυπες προδιαγραφές, προκύπτει τελικά ότι οι διεπαφές αυτές εκπέμπουν σήματα με την ίδια ακριβώς ισχύ  $P$ . Συνδυάζοντας, μάλιστα, την τελευταία παρατήρηση με το γεγονός ότι στην παρούσα μοντελοποίηση υιοθετείται το *απλουστευμένο μοντέλο απωλειών διαδρομής* (simplified path-loss model) [67], η προαναφερθείσα ισχύς σήματος  $S$  δίδεται τελικά από την ακόλουθη εξίσωση:

$$S = P \cdot \left( \frac{c}{4\pi d_o f_c^{(u)}} \right)^2 \cdot \left( \frac{d_o}{d_{ij}} \right)^\alpha, \quad (2.2)$$

με την παράμετρο  $c$  να συμβολίζει την *ταχύτητα του φωτός* (speed of light) και τη μεταβλητή  $d_{ij}$  την *Ευκλείδεια απόσταση* (Euclidean distance) μεταξύ των ασύρματων συσκευών  $i$  και  $j$ . Οι παράμετροι  $d_o$  και  $\alpha$ , από την άλλη πλευρά, συμβολίζουν την *απόσταση αναφοράς οπτικής επαφής* (Line-of-Sight distance reference) και τον *εκθέτη απωλειών διαδρομής* (path-loss exponent) του προαναφερθέντος μοντέλου διάδοσης, αντίστοιχα, ενώ η

απολαβή (gain) κάθε κεραίας θεωρείται ίση με τη μονάδα. Σημειώνεται, τέλος, ότι η ακριβής εκτίμηση των απωλειών διαδρομής τις οποίες προκαλεί στα μεταδιδόμενα σήματα το πραγματικό περιβάλλον δεν αποτελεί ακόμα και σήμερα μια τετριμμένη διαδικασία, αλλά απεναντίας αποτελεί ένα περίπλοκο πρόβλημα το οποίο απαιτεί τον συνυπολογισμό πολλαπλών παραγόντων και την εφαρμογή προχωρημένων μαθηματικών μοντέλων. Υιοθετώντας, ωστόσο, το απλουστευμένο μοντέλο απωλειών διαδρομής, καθίσταται στην προκειμένη περίπτωση δυνατή η βέλτιστη προσέγγιση της σχέσης ανταλλαγής η οποία χαρακτηρίζει την ακριβή εκτίμηση των απωλειών διαδρομής του πραγματικού περιβάλλοντος και τη διατήρηση της πολυπλοκότητας των μοντελοποιούμενων προβλημάτων σε άκρως αποδεκτά επίπεδα [67].



**Εικόνα 2.3:** Σημειογραφία και γραφική αναπαράσταση ασύρματων συσκευών, διεπαφών δικτύου και ενεργών ζεύξεων.

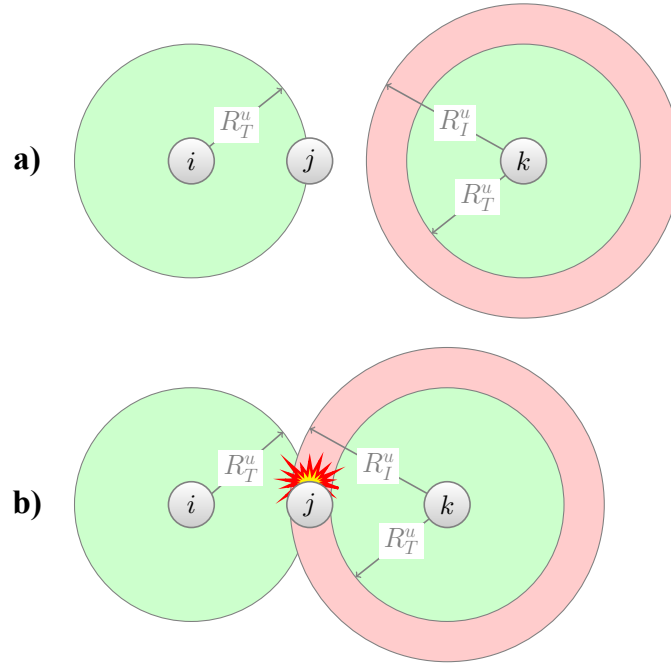
Τα ανωτέρω δίκτυα θεωρούνται, επίσης, ικανά να υποστηρίξουν μόνο μεταδόσεις *μονοεκπομπής* (unicast transmissions), δηλαδή μεταδόσεις στις οποίες ένας αποστολέας μεταδίδει πακέτα αποκλειστικά σε έναν παραλήπτη, εν αντιθέσει με τις μεταδόσεις *πολυεκπομπής* (multicast transmissions) στις οποίες πολλοί παραλήπτες δύνανται να λαμβάνουν ταυτόχρονα τα μεταδιδόμενα πακέτα ενός μόνο αποστολέα. Τα πακέτα κάθε εξυπηρετούμενης ροής, τέλος, δύνανται να δρομολογούνται στον προορισμό τους είτε μέσω ενός μοναδικού μονοπατιού (τεχνική 'single-path routing'), είτε μέσω πολλαπλών μονοπατιών (τεχνική 'multi-path routing'), ενώ οι πιθανές διακλαδώσεις των τελευταίων επιτρέπεται

να πραγματοποιούνται σε οποιαδήποτε ενδιάμεση ασύρματη συσκευή-αναμεταδότη. Η εν λόγω μοντελοποίηση, μάλιστα, συμβάλλει καθοριστικά στην ακριβέστερη προσέγγιση της πραγματικής λειτουργίας των σημερινών ασύρματων πολυ-αλματικών δικτύων, ενώ η ευελιξία του κατακερματισμού των υφιστάμενων ροών σε μικρότερες και η μετέπειτα ανεξάρτητη δρομολόγησή τους, επιτρέπει τη συνολικά αποδοτικότερη εξυπηρέτησή τους από τα αντίστοιχα δίκτυα.

### 2.4.3 Μοντέλα μετάδοσης και παρεμβολών

Ιδιαίτερης προσοχής χρήζουν στα πλαίσια της παρούσας μελέτης και τα υιοθετούμενα μοντέλα μετάδοσης και παρεμβολών, με το μεν πρώτο να καθορίζει τις προϋποθέσεις τις οποίες θα πρέπει να πληρούν δυο διεπαφές δικτύου ώστε η μία να μεταδίδει επιτυχώς σήματα στην άλλη πάνω από ένα συγκεκριμένο κανάλι, ενώ το δεύτερο να αποτρέπει την εμφάνιση παρεμβολών μεταξύ μεταδόσεων οι οποίες πραγματοποιούνται στον ίδιο χώρο πάνω από το ίδιο κανάλι. Αναλυτικότερα, και βάσει της Εικόνας 2.4, έστω ότι μια διεπαφή δικτύου  $i$  μεταδίδει σήματα πάνω από το κανάλι  $u$  με σκοπό τη λήψη τους από τη διεπαφή δικτύου  $j$ , ενώ μια τρίτη διεπαφή δικτύου  $k$  μεταδίδει σήματα επίσης πάνω από το κανάλι  $u$  προς κάποια άλλη διεπαφή (υποθέτοντας ότι και οι τρεις αυτές διεπαφές φέρουν όμοιες προδιαγραφές). Απαραίτητη προϋπόθεση, κατ' αρχήν, για την ορθή αποκωδικοποίηση των λαμβανόμενων σημάτων από τη διεπαφή δικτύου  $j$  θεωρείται ότι αποτελεί στην προκειμένη περίπτωση η απόστασή της από τη διεπαφή δικτύου  $i$  να είναι μικρότερη από την *εμβέλεια μετάδοσης* (transmission range) της τελευταίας πάνω από το κανάλι  $u$ . Η εν λόγω εμβέλεια θα συμβολίζεται εφεξής ως  $R_T^u$ , ενώ μαθηματικά απαιτείται να ισχύει ότι  $d_{ij} \leq R_T^u$ . Για να θεωρείται, ωστόσο, απρόσκοπτη η ανωτέρω λήψη, η διεπαφή δικτύου  $j$  θα πρέπει να προστατεύεται από επιζήμιες παρεμβολές, οπότε και κάθε άλλη διεπαφή δικτύου  $k$  η οποία πραγματοποιεί μεταδόσεις πάνω από το κανάλι  $u$  θεωρείται στην προκειμένη περίπτωση ότι θα πρέπει να απέχει από αυτή μια αντίστοιχη απόσταση ασφαλείας ονόματι *εμβέλεια παρεμβολής* (interference range). Διασφαλίζεται έτσι ότι η διεπαφή δικτύου  $j$  δεν θα λαμβάνει άλλα σήματα των οποίων η ισχύς είναι ικανή να αλλοιώσει αυτά τα οποία σκόπιμα μεταδίδονται προς αυτή. Η προαναφερθείσα εμβέλεια θα συμβολίζεται εφεξής ως  $R_I^u$ , ενώ μαθηματικά απαιτείται να ισχύει ότι  $d_{kj} \geq R_I^u$ .

Ακριβέστερα, η εμβέλεια μετάδοσης  $R_T^u$  αντιπροσωπεύει την απόσταση από μια διε-



**Εικόνα 2.4:** Εμβέλεια μετάδοσης, εμβέλεια παρεμβολής και προϋποθέσεις απρόσκοπτης επικοινωνίας μεταξύ δυο ασύρματων συσκευών/διεπαφών δικτύου.

παφή δικτύου η οποία μεταδίδει σήματα πάνω από ένα συγκεκριμένο κανάλι, εντός της οποίας θα πρέπει να βρίσκεται κάθε άλλη διεπαφή ώστε να λαμβάνει τα συγκεκριμένα σήματα με ισχύ επαρκή για την ορθή αποκωδικοποίησή τους. Η συγκεκριμένη εμβέλεια εξαρτάται προφανώς συνδυαστικά από πολλαπλούς παράγοντες, όπως (1) από την ισχύ  $P$  των μεταδιδόμενων σημάτων, (2) από τις προδιαγραφές του εξοπλισμού της διεπαφής η οποία επιθυμεί τη λήψη των συγκεκριμένων σημάτων, και ειδικότερα από το *κατώφλιο ευαισθησίας δέκτη* (receiver sensitivity threshold)  $P_{thr}$  το οποίο αντιπροσωπεύει το όριο το οποίο θα πρέπει να υπερβαίνει η ισχύς των λαμβανόμενων σημάτων ώστε να καθίσταται δυνατή η ορθή αποκωδικοποίησή τους, καθώς και (3) από τις λεπτομέρειες του *μοντέλου διάδοσης* (propagation model) το οποίο θεωρείται ότι χαρακτηρίζει το υποκείμενο περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα, λοιπόν, η εμβέλεια μετάδοσης αποτελεί τη μέγιστη απόσταση μεταξύ της διεπαφής δικτύου η οποία μεταδίδει σήματα με συγκεκριμένη ισχύ πάνω από ένα συγκεκριμένο κανάλι και της αντίστοιχης διεπαφής δικτύου η οποία επιθυμεί να τα λάβει, ώστε παρά την εξασθένηση την οποία προκαλεί σε αυτά το υποκείμενο περιβάλλον, η ισχύς τους να υπερβαίνει στη δεύτερη το αντίστοιχο κατώφλιο ευαισθησίας δέκτη καθιστώντας δυνατή την ορθή αποκωδικοποίησή τους. Βάσει της Εξίσωσης 2.2, μάλιστα, η οποία παρουσιάζει το υιοθετούμενο στην παρούσα μελέτη απλουστευ-

μένο μοντέλο απωλειών διαδρομής, και δεδομένου ότι κάθε διεπαφή δικτύου μεταδίδει στην προκειμένη περίπτωση σήματα με σταθερή ισχύ  $P$  πάνω από κάθε κανάλι  $u$  και φέρει κατώφλιο ευαισθησίας δέκτη  $P_{thr}$  (αντικαθιστά τη μεταβλητή  $S$  στην Εξίσωση 2.2), η εμβέλεια μετάδοσης  $R_T^u$  κάθε διεπαφής δικτύου (αντικαθιστά τη μεταβλητή  $d_{i,j}$  στην Εξίσωση 2.2) προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση:

$$R_T^u = d_o \left[ \frac{P}{P_{thr}} \cdot \left( \frac{c}{4\pi d_o f_c^{(u)}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{\alpha}}. \quad (2.3)$$

Δεδομένης, δε, και της θεώρησης ότι όλες οι διεπαφές του ιδίου δικτύου φέρουν στην προκειμένη περίπτωση πανομοιότυπες προδιαγραφές, άρα και όμοια ισχύ μετάδοσης σιμάτων  $P$  και όμοιο κατώφλιο ευαισθησίας δέκτη  $P_{thr}$ , προκύπτει τελικά ότι όλες οι ανωτέρω διεπαφές θα χαρακτηρίζονται και από την ίδια ακριβώς εμβέλεια μετάδοσης  $R_T^u$ . Η εν λόγω εμβέλεια, βέβαια, διαφοροποιείται ανάλογα με το κανάλι λειτουργίας κάθε διεπαφής δικτύου, δεδομένης της εμπλοκής της φέρουσας συχνότητας  $f_c^{(u)}$  στην ανωτέρω Εξίσωση 2.3.

Θα πρέπει, επίσης, να σημειωθεί ότι η δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ δυο διεπαφών δικτύου δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τη μεταξύ τους απόσταση, αλλά και από το κατά πόσο αυτές διαθέτουν ταυτόχρονα προς ευκαιριακή εκμετάλλευση ένα κοινό κανάλι. Το σύνολο, λοιπόν, των γειτονικών διεπαφών δικτύου στις οποίες μπορεί να μεταδώσει σήματα άμεσα κάθε διεπαφή δικτύου  $i_m$  η οποία λειτουργεί πάνω από ένα κανάλι  $u$ , δύναται στην προκειμένη περίπτωση να εκφραστεί μαθηματικά από την ακόλουθη εξίσωση:

$$T_{i_m}^u = \{NICs \ j_n : d_{ij} \leq R_T^u, \ i \neq j, \ u \in U_{ij}\},$$

με τη μεταβλητή  $U_{ij}$  να αναπαριστά το σύνολο των κοινών διαθέσιμων καναλιών μεταξύ των ασύρματων συσκευών  $i$  και  $j$ . Αξίζει, επίσης, να σημειωθεί ότι η απόσταση μεταξύ δυο διεπαφών δικτύου ( $d_{i_m j_n}$ ) ταυτίζεται ουσιαστικά με την απόσταση μεταξύ των αντίστοιχων ασύρματων συσκευών στις οποίες αυτές πρόσκεινται ( $d_{ij}$ ), οπότε και στην ανωτέρω εξίσωση οι δύο αυτές μεταβλητές δύναται να χρησιμοποιηθούν χωρίς διαφορά. Το ίδιο ακριβώς ισχύει και για το σύνολο των από κοινού διαθέσιμων καναλιών μεταξύ δυο ασύρματων συσκευών ( $U_{ij}$ ) και μεταξύ των προσκείμενων σε αυτές διεπαφών δικτύου ( $U_{i_m j_n}$ ). Η διαθεσιμότητα καναλιών ανά ασύρματη συσκευή, άλλωστε, εξαρτάται αποκλειστικά από τη δραστηριότητα των παρακείμενων Πρωτευόντων Χρηστών, ενώ

οι ακριβείς συντεταγμένες κάθε διεπαφής δικτύου ταυτίζονται με αυτές της αντίστοιχης ασύρματης συσκευής στην οποία πρόσκειται.

Συμπερασματικά, θεωρείται ότι στα πλαίσια της παρούσας μελέτης μια διεπαφή δικτύου  $i_m$  δύναται να επικοινωνεί πάνω από ένα κανάλι  $u$  με κάθε άλλη διεπαφή η οποία απέχει από αυτήν απόσταση μικρότερη της εμβέλειας μετάδοσής της  $R_T^u$  και, ταυτόχρονα, διαθέτει προς εκμετάλλευση το κανάλι  $u$ . Σημειώνεται, βέβαια, ότι απαγορεύεται αυστηρά η ανάπτυξη ζεύξεων μεταξύ διεπαφών δικτύου της ίδιας ασύρματης συσκευής, δεδομένης της δυνατότητας της τελευταίας να προωθεί εσωτερικά τα απαιτούμενα πακέτα μεταξύ των προσκείμενων διεπαφών της.

Αναφορικά με την εμβέλεια παρεμβολής  $R_I^u$ , αυτή εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το υιοθετούμενο στην παρούσα μελέτη μοντέλο παρεμβολών ονόματι *Μοντέλο Εμβέλειας Παρεμβολής* (Interference Range Model) [68]. Το συγκεκριμένο μοντέλο αποτελεί ουσιαστικά μια εκδοχή του δημοφιλούς *Μοντέλου Πρωτοκόλλου* (Protocol Model) [69], με τις μεταξύ τους διαφορές να εστιάζονται αποκλειστικά στη φύση των υποστηριζόμενων από τα αντίστοιχα δίκτυα ζεύξεων. Πιο συγκεκριμένα, και βάσει της βοηθητικής Εικόνας 2.4, το Μοντέλο Εμβέλειας Παρεμβολής θέτει ως προϋπόθεση για την αποφυγή της πρόκλησης παρεμβολών σε μια διεπαφή δικτύου  $j$  η οποία λαμβάνει τα μεταδιδόμενα σήματα μιας διεπαφής δικτύου  $i$  πάνω από ένα κανάλι  $u$ , ότι κάθε άλλη διεπαφή δικτύου  $k$  η οποία πραγματοποιεί μεταδόσεις πάνω από το κανάλι  $u$  θα απέχει από την πρώτη μια αντίστοιχη απόσταση ασφαλείας. Εναλλακτικά, η διεπαφή δικτύου  $j$  θα πρέπει να βρίσκεται εκτός της εμβέλειας παρεμβολής  $R_I^u$  κάθε σχετικής διεπαφής δικτύου  $k$  η οποία μεταδίδει σήματα πάνω από το κανάλι  $u$ . Ακριβέστερα, είναι ήδη γνωστό ότι η αποκωδικοποίηση των λαμβανόμενων σημάτων από μια διεπαφή δικτύου καθίσταται εφικτή μόνο όταν η ισχύς τους υπερβαίνει το κατώφλιο ευαισθησίας της, ή αλλιώς όταν αυτή βρίσκεται εντός της εμβέλειας μετάδοσης της διεπαφής δικτύου η οποία τα μεταδίδει. Στην περίπτωση, ωστόσο, όπου η πρώτη διεπαφή βρίσκεται ελάχιστα εκτός της εμβέλειας μετάδοσης της δεύτερης, η προκύπτουσα εξασθένηση των μεταδιδόμενων σημάτων μπορεί να μην επιτρέπει στην πρώτη να τα αποκωδικοποιήσει ορθά, αλλά αυτό δεν συνεπάγεται και την πλήρη εξάλειψή τους. Αντίθετα, τα εξασθενημένα αυτά σήματα δύνανται να παρεμβληθούν με τα υπόλοιπα σήματα τα οποία προσεγγίζουν την εν λόγω διεπαφή, εμποδίζοντάς την ουσιαστικά από το να αποκωδικοποιεί ορθά οποιοδήποτε λαμβανόμενο σήμα.



Για να αποφευχθεί, λοιπόν, η συγκεκριμένη κατάσταση, απαιτείται η ύπαρξη μιας αντίστοιχης ζώνης προστασίας – ονόματι εμβέλεια παρεμβολής – μεταξύ κάθε διεπαφής η οποία πραγματοποιεί μεταδόσεις πάνω από ένα συγκεκριμένο κανάλι και μιας διεπαφής δικτύου η οποία λαμβάνει σκόπιμα μεταδιδόμενα προς αυτή σήματα πάνω από το κανάλι αυτό, διασφαλίζοντας ουσιαστικά ότι τα σήματα των πρώτων προσεγγίζουν την τελευταία αρκούντως εξασθενημένα ώστε να μην της προκαλούν επιζήμιες παρεμβολές. Σύμφωνα, μάλιστα, με το Μοντέλο Εμβέλειας Παρεμβολής, η εμβέλεια παρεμβολής κάθε διεπαφής δικτύου θα πρέπει να ορίζεται μεγαλύτερη κατά ένα συγκεκριμένο ποσοστό από την εμβέλεια μετάδοσής της πάνω από το ίδιο κανάλι, απαίτηση η οποία εκφράζεται μαθηματικά από την εξίσωση  $R_I^u = (1 + \Delta)R_T^u$ , με την παράμετρο  $\Delta$  να καθορίζει την έκταση της προαναφερθείσας ζώνης ασφαλείας. Δεδομένου, δε, ότι η εμβέλεια μετάδοσης κάθε διεπαφής δικτύου διαφοροποιείται στην προκειμένη περίπτωση μόνο ανάλογα με το κανάλι λειτουργίας της (βλ. παραπάνω), προφανώς και η εμβέλεια παρεμβολής της θα διαφοροποιείται αποκλειστικά βάσει του ιδίου παράγοντα. Σημειώνεται, τέλος, ότι η ισχύς των σημάτων η οποία επιτρέπεται να προσεγγίζει μια διεπαφή δικτύου χωρίς να της δημιουργεί επιζήμιες παρεμβολές δύναται να υπολογιστεί αντικαθιστώντας στην ανωτέρω Εξίσωση 2.2 τη μεταβλητή  $d_{ij}$  με την αντίστοιχη επιλεγμένη εμβέλεια παρεμβολής  $R_I^u$  και, εν συνεχεία, επιλύοντας ως προς τη μεταβλητή  $S$ .

Συνυπολογίζοντας όλα τα παραπάνω, δύναται στο σημείο αυτό να μοντελοποιηθεί για κάθε διεπαφή δικτύου  $i_m$  η οποία επιθυμεί την απροβλημάτιστη λήψη σημάτων πάνω από ένα κανάλι  $u$ , το σύνολο των διεπαφών δικτύου των οποίων μια ενδεχόμενη μετάδοση πάνω από το συγκεκριμένο κανάλι θα της προκαλούσε επιζήμιες παρεμβολές. Το εν λόγω σύνολο, λοιπόν, εκφράζεται μαθηματικά από την ακόλουθη εξίσωση:

$$I_{i_m}^u = \{NICs \ j_n : d_{ij} \leq R_I^u, \ i_m \neq j_n, \ T_{j_n}^u \neq \emptyset\}.$$

Αξίζει, τέλος, να σημειωθεί ότι το Μοντέλο Εμβέλειας Παρεμβολής επελέγη στην παρούσα μελέτη κυρίως λόγω της ικανότητάς του να προσεγγίζει βέλτιστα το σημείο ισορροπίας μεταξύ της ρεαλιστικής απομόνωσης των παρεμβολών στα ασύρματα πολυαλματικά δίκτυα και της διατήρησης της πολυπλοκότητας της μοντελοποίησής τους σε απολύτως διαχειρίσιμα επίπεδα. Στη σύγχρονη βιβλιογραφία, άλλωστε, παρουσιάζονται ήδη μοντέλα τα οποία δύνανται να προσεγγίσουν ακριβέστερα το πραγματικό περιβάλλον των ανωτέρω δικτύων, όπως για παράδειγμα το 'Φυσικό ή Μοντέλο SINR' [68], τα οποία

όμως αυξάνουν σημαντικά την πολυπλοκότητα μοντελοποίησης των εν λόγω δικτύων. Στοχεύοντας, λοιπόν, στη διατήρηση του ενδιαφέροντος της παρούσας μελέτης στον προτεινόμενο μηχανισμό βέλτιστης αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων και, κατ' επέκταση, στην αποφυγή της εκτενούς ενασχόλησης με τις λεπτομέρειες του φυσικού επίπεδο των αντίστοιχων ασύρματων συσκευών, θεωρείται στην προκειμένη περίπτωση ως καταλληλότερη η υιοθέτηση του Μοντέλου Εμβέλειας Παρεμβολής. Σύμφωνα, μάλιστα, με την εργασία [70], το εν λόγω μοντέλο είναι ικανό να προσεγγίζει σημαντικά την απόδοση του ρεαλιστικότερου Φυσικού Μοντέλου, υπό την προϋπόθεση βέβαια ότι εκτιμάται βέλτιστα κάθε φορά η τιμή της αντίστοιχης μεταβλητής  $\Delta$ . Σύμφωνα με τις εργασίες [68] και [70], τέλος, το Μοντέλο Εμβέλειας Παρεμβολής υπερεκτιμά τις παρεμβολές οι οποίες εμφανίζονται στις ασύρματες συσκευές των εκάστοτε εξεταζόμενων δικτύων, δημιουργώντας ουσιαστικά ακραίες συνθήκες λειτουργίας για τον προτεινόμενο στην παρούσα μελέτη μηχανισμό και, κατ' επέκταση, διασφαλίζοντας τη δυνατότητά του να ανταπεξέρχεται ικανοποιητικά ακόμα και στις πιο δύσκολες καταστάσεις.

#### 2.4.4 Κόστος και πλαίσιο αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων

Είναι γεγονός ότι η πλειοψηφία των μελετών της σύγχρονης βιβλιογραφίας υποεκτιμά, ή ακόμα και αγνοεί, την επιβάρυνση η οποία προκαλείται στα ασύρματα δίκτυα κατά τη μεταγωγή καναλιού από πλευράς των ασύρματων συσκευών τους. Συχνά, μάλιστα, πραγματοποιείται η υπόθεση ότι αφού η διάρκεια μεταγωγής καναλιού αναμένεται να μειώνεται συνεχώς με το πέρασμα του χρόνου [71], δεν έχει νόημα ο συνυπολογισμός της στις προτεινόμενες προσεγγίσεις. Αν και τα πρόσφατα τεχνολογικά επιτεύγματα επιβεβαιώνουν σε κάποιο βαθμό την εν λόγω τάση, το γεγονός ότι με το πέρασμα του χρόνου αυξάνονται παράλληλα και οι ταχύτητες μετάδοσης των διαθέσιμων ασύρματων συσκευών, καθιστά προφανές ότι η ανωτέρω επιβάρυνση δεν πρόκειται ποτέ να καταστεί αμελητέα. Είναι χαρακτηριστικό, άλλωστε, ότι ακόμα και οι προηγμένες τεχνικές *Αναπήδησης Συχνότητας* (Frequency Hopping), οι οποίες υποχρεώνουν τις ασύρματες συσκευές να προβαίνουν σε συνεχείς μεταγωγές καναλιού, στηρίζουν την αποδοτικότητά τους σε εξαιρετικά δεσμευτικές απαιτήσεις, ενώ η μη-αμελητέα επιβάρυνση την οποία εισάγουν οι αδιάκοπες αυτές μεταγωγές μεταφράζεται άμεσα σε αδυναμία υποστήριξης υψηλών ρυθμών μετάδοσης από πλευράς τους [72]. Αξιοσημείωτο, τέλος, θεωρείται και το γεγονός ότι

ακόμα και όσες μελέτες δίδουν κάποια προσοχή στην ανωτέρω επιβάρυνση, υποθέτουν τη διάρκεια μεταγωγής καναλιού σταθερή και αυστηρά προκαθορισμένη, συμμορφούμενες προφανώς με τις προδιαγραφές των συσκευών των συμβατικών ασύρματων δικτύων.

Οι προδιαγραφές των ασύρματων συσκευών Λογισμικόριστης Ραδιοεπικοινωνίας, αντίθετα, καθιστούν τη διάρκεια μεταγωγής καναλιού ένα αρκετά δυναμικό μέγεθος, και μάλιστα άμεσα εξαρτημένο τόσο από το κανάλι στο οποίο λειτουργεί κάθε συσκευή, όσο και το κανάλι στο οποίο αυτή σκοπεύει να μεταβεί [14, 73]. Αξίζει, δε, να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη προδιαγραφή χαρακτηρίζει ήδη τη λειτουργία τόσο των δημοφιλών συσκευών USRP [41, 73], όσο και πιο εξελιγμένων στοιχείων σχετικού εξοπλισμού [74, 14]. Παράλληλα, τα διαθέσιμα στα Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας κανάλια αναμένεται να ανήκουν σε εξαιρετικά απομακρυσμένες μεταξύ τους φασματικές ζώνες, οι οποίες ενδέχεται να απέχουν στη διάσταση της συχνότητας ακόμα και κάποια GHz (προδιαγραφή η οποία υιοθετείται ήδη από το πρωτόκολλο κινητών επικοινωνιών LTE-Advanced [75]). Ο συνδυασμός των ανωτέρω παραγόντων, λοιπόν, καθιστά προφανές ότι η μεταγωγή καναλιού αποτελεί στα πλαίσια της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας μια εξαιρετικά απαιτητική διαδικασία.

Είναι γεγονός, επίσης, ότι η αναδιάρθρωση των αναθέσεων πόρων οι οποίες υπολογίζονται βάσει του μοντέλου της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης απαιτούν στη γενική περίπτωση την πραγματοποίηση εκτενών μεταγωγών καναλιού από πλευράς των εμπλεκόμενων σε αυτές ασύρματων συσκευών (βλ. Ενότητα 2.1). Αν δεν δοθεί, λοιπόν, η δέουσα προσοχή, η συνολική διάρκεια αναδιάρθρωσης των αναθέσεων πόρων των εξεταζόμενων στα πλαίσια της παρούσας μελέτης Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά. Δεδομένου, μάλιστα, ότι καθ' όλη τη διάρκεια μεταγωγής καναλιού οι αντίστοιχες ασύρματες συσκευές δεν δύνανται να μεταδίδουν ή να λαμβάνουν πακέτα, οι αντίστοιχοι Δευτερεύοντες Χρήστες αναμένεται αναπόφευκτα να καθίστανται αποδέκτες σημαντικών διακοπών υπηρεσίας. Οι συγκεκριμένες διακοπές, ωστόσο, επηρεάζουν σημαντικά τόσο την Ποιότητα Υπηρεσίας, όσο και την Ποιότητα Εμπειρίας την οποία απολαμβάνουν οι τελευταίοι, ενώ παράλληλα αυξάνουν τις χαμένες ευκαιρίες μετάδοσης και, κατ' επέκταση, μειώνουν τον συνολικό βαθμό χρησιμοποίησης του ραδιοφάσματος. Είναι προφανές, λοιπόν, ότι η ελαχιστοποίηση της 'Αθροιστικής Καθυστέρησης Μεταγωγών Καναλιού' η οποία εισάγεται στα Δίκτυα Γνω-

σιακής Ραδιοεπικοινωνίας κατά την αναδιάρθρωση των αναθέσεων πόρων τους θεωρείται επιβεβλημένη στην πράξη.

Προφανή προσέγγιση προς την ελαχιστοποίηση του ανωτέρω μεγέθους αποτελεί η ελαχιστοποίηση του αριθμού των ασύρματων συσκευών οι οποίες απαιτείται να προβαίνουν σε μεταγωγή καναλιού κατά την αναδιάρθρωση των κατά περίπτωση παρωχημένων αναθέσεων πόρων. Κάτι τέτοιο, ωστόσο, δεν θεωρείται επαρκές στα πλαίσια των Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, δεδομένου ότι ο χρόνος μεταγωγής καναλιού των ασύρματων συσκευών τους δεν θεωρείται σταθερός και προκαθορισμένος. Αντίθετα, και σύμφωνα με τις προδιαγραφές τόσο της Γνωσιακής, όσο και της Λογισμικόριστης Ραδιοεπικοινωνίας, ο χρόνος μεταγωγής καναλιού θεωρείται στα εν λόγω δίκτυα άμεσα εξαρτημένος από την απόλυτη απόσταση ( $D_{c,t}$ ) η οποία χωρίζει τη φέρουσα συχνότητα του καναλιού λειτουργίας κάθε ασύρματης συσκευής ( $f_c^{(u_c)}$ ) και τη φέρουσα συχνότητα του καναλιού στο οποίο αυτή επιθυμεί να μεταβεί ( $f_c^{(u_t)}$ ). Η συγκεκριμένη θεώρηση, μάλιστα, εκφράζεται μαθηματικά από την ακόλουθη εξίσωση:  $D_{c,t} = |f_c^{(u_c)} - f_c^{(u_t)}|$  (in Hz) και συμβάλλει καθοριστικά στην ακριβέστερη προσέγγιση του πραγματικού περιβάλλοντος λειτουργίας των μελλοντικών Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Είναι γεγονός, άλλωστε, ότι η ανωτέρω προδιαγραφή εντάσσεται ήδη στα επισήμως δημοσιευμένα λειτουργικά χαρακτηριστικά διαφόρων σύγχρονων ασύρματων συσκευών [14, 73, 74], αν και υιοθετείται επί του παρόντος από ελάχιστες μελέτες της σχετικής βιβλιογραφίας [76, 77]. Ενδεικτικά, στις μελέτες [76] και [77] ο χρόνος μεταγωγής καναλιού ορίζεται ίσος με 10 ms ανά 10 MHz απόστασης  $D_{c,t}$ , ενώ πιο προχωρημένα στοιχεία εξοπλισμού [74] θεωρούνται ικανά να ολοκληρώνουν τις επιθυμητές μεταγωγές σε 10 έως 100  $\mu s$ , ανάλογα πάντοτε με το μέγεθος της αντίστοιχης απόστασης  $D_{c,t}$ . Εν κατακλείδι, καθίσταται προφανές ότι στην περίπτωση των αναδιαρθρούμενων Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας η ελαχιστοποίηση του μεγέθους της Αθροιστικής Καθυστέρησης Μεταγωγών Καναλιού δύναται να επιτευχθεί μόνο μέσω της ελαχιστοποίησης της αθροιστικής απόστασης στον άξονα της συχνότητας την οποία καλούνται να καλύψουν οι ασύρματες συσκευές τους μέσω μεταγωγής καναλιού.

Για λόγους πληρέστερης κατανόησης της ανωτέρω μοντελοποίησης, μάλιστα, παρατίθεται στο σημείο αυτό ένα μικρό, αλλά αντιπροσωπευτικό σχετικό παράδειγμα. Αναλυτικότερα, υποθέτεται ότι μια ασύρματη συσκευή λειτουργεί στο κανάλι 40 της ζώνης

TVWS [50] (με φέρουσα συχνότητα 626 MHz) και δύναται να μεταβεί είτε στο κανάλι 50 (με φέρουσα συχνότητα 706 MHz), είτε στο κανάλι 58 (με φέρουσα συχνότητα 780 MHz) της ίδιας ζώνης. Στην πρώτη περίπτωση η εν λόγω συσκευή καλείται να καλύψει μια απόσταση της τάξεως των  $D_{c,t} = |626 - 706| = 80$  MHz, ενώ στη δεύτερη περίπτωση η αντίστοιχη απόσταση σχεδόν διπλασιάζεται (ήτοι  $D'_{c,t} = |626 - 780| = 154$  MHz). Θεωρώντας, λοιπόν, την ταχύτητα μεταγωγής καναλιού της προαναφερθείσας συσκευής ανάλογη της απόστασης  $D$ , ο χρόνος μεταγωγής καναλιού στη δεύτερη περίπτωση προκύπτει σχεδόν διπλάσιος από αυτόν της πρώτης.

Αξίζει, τέλος, να σημειωθεί ότι όσα πακέτα βρίσκονται ακόμα υπό μετάδοση κατά την αναδιάρθρωση των παραμέτρων λειτουργίας των αντίστοιχων ασύρματων συσκευών αδυνατούν να προσεγγίσουν τον προορισμό τους, γεγονός το οποίο εντείνει το φαινόμενο των *απωλειών πακέτων* (packet losses) στο εσωτερικό των αναδιαρθρούμενων δικτύων. Ταυτόχρονα, δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα η ενέργεια η οποία καταναλώνεται από πλευράς ασύρματων συσκευών κατά την τροποποίηση των παραμέτρων λειτουργίας τους. Το ίδιο, βέβαια, ισχύει και για την πρόσθετη κίνηση η οποία προκαλείται στα προαναφερθέντα δίκτυα από τα μεταδιδόμενα *πακέτα διαχείρισης* (control packets), δηλαδή τα πακέτα τα οποία ενημερώνουν τις αντίστοιχες ασύρματες συσκευές σχετικά με τις απαιτούμενες τροποποιήσεις των παραμέτρων λειτουργίας τους. Η ακριβής, ωστόσο, επιβάρυνση την οποία προκαλούν οι ανωτέρω παράγοντες στα κατά περίπτωση αναδιαρθρούμενα δίκτυα εξαρτάται αποκλειστικά από τις προδιαγραφές των αντίστοιχων εφαρμοζόμενων πρωτοκόλλων και τεχνικών. Χωρίς βλάβη της γενικότητας, λοιπόν, η παρούσα μελέτη δεν υπεισέρχεται σε τέτοιου είδους λεπτομέρειες, διασφαλίζοντας ουσιαστικά την ευελιξία του προτεινόμενου μηχανισμού αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων και επιτρέποντας την υιοθέτηση οποιωνδήποτε υπάρχουσών ή μελλοντικών σχετικών προσεγγίσεων προς τις αντίστοιχες κατευθύνσεις.

## 2.5 Μαθηματική μοντελοποίηση προβλήματος Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται αναλυτικά η μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο, η οποία συμμορφώνεται πλήρως με την αρχιτεκτονική συστήματος και τις υποθέσεις οι οποίες αναλύθηκαν λεπτομερώς στην αμέσως προηγούμενη ενότητα (βλ. Ενότητα 2.4). Υπενθυμίζεται ότι σκοπό του εν λόγω προβλήματος αποτελεί ο καθορισμός μιας ανάθεσης καναλιών σε ασύρματες συσκευές ώστε να καθίσταται εφικτός ο σχηματισμός ζεύξεων και, κατ' επέκταση, μονοπατιών δρομολόγησης μεταξύ των ασύρματων συσκευών των οποίων απαιτείται η επικοινωνία, ενώ παράλληλα καθορίζεται και ο ρυθμός μετάδοσης τον οποίο θα πρέπει να υποστηρίζει η εκάστοτε σχηματιζόμενη ζεύξη για κάθε ροή δεδομένων η οποία αναπτύσσεται μεταξύ των προαναφερθεισών ασύρματων συσκευών.

Όσον αφορά, κατ' αρχήν, την ανάθεση καναλιών, αυτή σημειώνεται ότι πραγματοποιείται στα πλαίσια του εν λόγω προβλήματος στο επίπεδο ζεύξης. Προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση ορίζονται οι δυαδικές μεταβλητές απόφασης  $x_{i_m j_n}^u$ , καθεμία εκ των οποίων χαρακτηρίζει ως ενεργή ή ανενεργή μια ζεύξη η οποία δύναται να αναπτυχθεί μεταξύ ενός διατεταγμένου ζεύγους διεπαφών δικτύου  $\langle i_m, j_n \rangle$  πάνω από ένα κανάλι  $u$ . Όταν, λοιπόν, μια τέτοια μεταβλητή λαμβάνει την τιμή 1, τότε το κανάλι  $u$  ανατίθεται στη ζεύξη  $\langle i_m, j_n \rangle$  και την καθιστά ενεργή, ενώ σε αντίθετη περίπτωση αυτή παραμένει ανενεργή. Μαθηματικά ισχύει ότι:

$$x_{i_m j_n}^u = \begin{cases} 1, & \text{αν η ζεύξη η οποία δύναται να αναπτυχθεί μεταξύ του διατεταγμένου} \\ & \text{ζεύγους διεπαφών δικτύου } \langle i_m, j_n \rangle \text{ πάνω από το κανάλι } u \text{ είναι ενεργή} \\ 0, & \text{διαφορετικά.} \end{cases}$$

Δεδομένου, μάλιστα, ότι κάθε κανάλι το οποίο ανατίθεται σε μια ενεργή ζεύξη ανατίθεται ουσιαστικά και στις δυο αντίστοιχες διεπαφές δικτύου μεταξύ των οποίων αυτή βρίσκεται ανεπτυγμένη, είναι προφανές ότι από μια ανάθεση καναλιών σε ζεύξεις μπορεί εύκολα να προκύψει και η αντίστοιχη ανάθεση καναλιών σε διεπαφές δικτύου.

Όσον αφορά, δε, τις διαδικασίες καθορισμού ενεργών ζεύξεων και δρομολόγησης

Πίνακας 2.1: Σημειογραφία.

Σύμβολο	Ερμηνεία
$N$	Αριθμός ασύρματων συσκευών Δευτερευόντων Χρηστών
$L$	Αριθμός διεπαφών δικτύου οι οποίες πρόσκεινται σε κάθε ασύρματη συσκευή
$i, j, k, l \in \{1, \dots, N\}$	Δείκτες ασύρματων συσκευών
$m, n, p, q \in \{1, \dots, L\}$	Δείκτες διεπαφών δικτύου
$i_m$	$m$ -οστή διεπαφή δικτύου της ασύρματης συσκευής $i$
$u, u_{old}$	Δείκτες καναλιών
$R_T^u$	Εμβέλεια μετάδοσης συσχετισμένη με το κανάλι $u$
$R_I^u$	Εμβέλεια παρεμβολής συσχετισμένη με το κανάλι $u$
$d_{ij}$	Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των ασύρματων συσκευών $i$ και $j$
$T_{i_m}^u$	Σύνολο των γειτονικών διεπαφών δικτύου της διεπαφής $i_m$ πάνω από το κανάλι $u$
$I_{i_m}^u$	Σύνολο διεπαφών δικτύου των οποίων οι μεταδόσεις πάνω από το κανάλι $u$ θα προκαλέσουν παρεμβολές στις λήψεις της διεπαφής δικτύου $i_m$
$U_{ij}$	Σύνολο κοινών καναλιών μεταξύ των ασύρματων συσκευών $i$ και $j$
$C_{i_m j_n}^u$	Χωρητικότητα της ζεύξης η οποία αναπτύσσεται μεταξύ του διατεταγμένου ζεύγους διεπαφών δικτύου $\langle i_m, j_n \rangle$ πάνω από το κανάλι $u$
$f_c^{(u)}$	Φέρουσα συχνότητα του καναλιού $u$
$W_u$	Εύρος ζώνης του καναλιού $u$
$h$	Δείκτης ροών δεδομένων
$s(h)$	Ακροσημείο πηγής της ροής δεδομένων $h$

Σύμβολο	Ερμηνεία
$d(h)$	Ακροσημείο προορισμού της ροής δεδομένων $h$
$r(h)$	Απαίτηση σε ρυθμό μετάδοσης δεδομένων της ροής $h$
$\lambda$	Παράγοντας Κλίμακας συστήματος
$x_{i_m j_n}^u$	Δυναμική μεταβλητή έκφρασης της κατάστασης της δύναμει αναπτυσσόμενης ζεύξης μεταξύ του διατεταγμένου ζεύγους διεπαφών δικτύου $\langle i_m, j_n \rangle$ πάνω από το κανάλι $u$
$f_{i_m j_n}^h$	Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων της ροής $h$ πάνω από τη ζεύξη η οποία σχηματίζεται μεταξύ του διατεταγμένου ζεύγους διεπαφών δικτύου $\langle i_m, j_n \rangle$

ροών, αυτές βασίζονται στα πλαίσια του εν λόγω προβλήματος στη δημοφιλή μοντελοποίηση Ροής Πολλαπλών Αγαθών (βλ. Παράγραφο 2.2.3). Πιο συγκεκριμένα, κάθε δίκτυο μοντελοποιείται αρχικά ως ένας κατευθυντικός γράφος  $G = (V, E)$  στον οποίο αναπαρίστανται ως κόμβοι οι διεπαφές δικτύου των ασύρματων συσκευών του, ως ακμές οι ζεύξεις οι οποίες δύνανται να αναπτυχθούν μεταξύ των διεπαφών αυτών πάνω από τα διαθέσιμα κανάλια, και ως αγαθά (commodities) οι απαιτήσεις σε ρυθμό μετάδοσης των εξυπηρετούμενων ροών δεδομένων του. Εν συνεχεία, και βάσει του ανωτέρω γράφου, καθορίζονται οι ενεργές ζεύξεις (ή ακμές) και, κατ' επέκταση, τα μονοπάτια (ή ακολουθίες ακμών) πάνω από τα οποία θα πρέπει να δρομολογούνται οι επιθυμητές ροές δεδομένων ώστε να προσεγγίζουν επιτυχώς τον προορισμό τους, ενώ παράλληλα καθορίζεται και ο ρυθμός μετάδοσης τον οποίο θα πρέπει να εξυπηρετεί κάθε ενεργή ζεύξη (ή ακμή) για καθεμία από τις ανωτέρω ροές, συνυπολογίζοντας προφανώς τη μέγιστη χωρητικότητά της, αλλά και τις ισχύουσες προϋποθέσεις επικοινωνίας και αποφυγής παρεμβολών (βλ. Παράγραφο 2.4.3).

Ως αντικειμενικός στόχος του εν λόγω προβλήματος επιλέγεται στην προκειμένη περίπτωση η αναλογική ικανοποίηση των απαιτήσεων σε ρυθμό μετάδοσης των Δευτερευόντων Χρηστών κάθε εξεταζόμενου Δικτύου Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, επιλογή η οποία συμμορφώνεται πλήρως με τις επιταγές των αρμοδίων ρυθμιστικών αρχών περί δίκαιου μερισμού του ραδιοφάσματος (βλ. [12]). Ακριβέστερα, απαιτείται η μεγιστοποί-



ηση ενός *Παράγοντα Κλίμακας* (Scale Factor) συστήματος  $\lambda$  ο οποίος αντιπροσωπεύει το ποσοστό εκ του απαιτούμενου ρυθμού μετάδοσης κάθε ροής το οποίο δύναται να εξυπηρετηθεί από τις ενεργές ζεύξεις του εκάστοτε εξεταζόμενου δικτύου. Εναλλακτικά, επιθυμείται η μεγιστοποίηση του κοινού για όλες τις ροές δεδομένων Παράγοντα Κλίμακας  $\lambda$  έτσι ώστε τουλάχιστον το συγκεκριμένο ποσοστό εκ των απαιτήσεων σε ρυθμό μετάδοσης καθεμίας εξ αυτών να δύναται να εξυπηρετηθεί από το υποκείμενο δίκτυο. Το συγκεκριμένο πρόβλημα, μάλιστα, θεωρείται εξαιρετικά δημοφιλές και στα πλαίσια των μοντέλων Ροής Πολλαπλών Αγαθών, ενώ είναι ευρέως γνωστό ως πρόβλημα *Μεγιστοποίησης Ταυτόχρονης Ροής Πολλαπλών Αγαθών* (Maximum Concurrent Flow).

Το πρόβλημα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο, εν τέλει, μοντελοποιείται μαθηματικά ως πρόβλημα βελτιστοποίησης ως εξής:

$$\mathbf{max} \quad \lambda$$

**subject to**

$$x_{i_m j_n}^u = 0 \quad \forall i, m, j_n \notin T_{i_m}^u, u \quad (2.4)$$

$$\sum_{j,n,u} x_{i_m j_n}^u + x_{j_n i_m}^u \leq 1 \quad \forall i, m \quad (2.5)$$

$$x_{i_m j_n}^u + \sum_{l_q \in T_{k_p}^u, k_p \neq i_m} x_{k_p l_q}^u \leq 1 \quad \forall u, j, n, k_p \in I_{j_n}^u, \forall i_m \in T_{j_n}^u \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} & \sum_m \sum_{j_n \in \bigcup_u T_{i_m}^u} (f_{i_m j_n}^h - f_{j_n i_m}^h) = \\ & = \begin{cases} \lambda \cdot r(h) & \text{if } i = s(h) \\ -\lambda \cdot r(h) & \text{if } i = d(h) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall i, \forall h \quad (2.7) \end{aligned}$$

$$\sum_h f_{i_m j_n}^h \leq \sum_{u \in U_{ij}} x_{i_m j_n}^u \cdot C_{i_m j_n}^u \quad \forall i, j, m, n \quad (2.8)$$

$$0 \leq \lambda \leq 1$$

$$x_{i_m j_n}^u \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, m, n, u$$

$$f_{i_m j_n}^h \geq 0 \quad \forall i, j, m, n, h$$

με τη σημειογραφία των χρησιμοποιούμενων μεταβλητών και παραμέτρων να συνοψίζεται στον Πίνακα 2.1.

Όπως προαναφέρθηκε, η αντικειμενική συνάρτηση του ανωτέρω μοντέλου στοχεύει ουσιαστικά στη μεγιστοποίηση του λεγόμενου Παράγοντα Κλίμακας συστήματος  $\lambda$  κάθε εξεταζόμενου δικτύου. Αξίζει, μάλιστα, να σημειωθεί ότι ο εν λόγω παράγοντας επηρεάζει άμεσα και την ολική διεκπεραιωτικότητα κάθε σχετικού δικτύου, δεδομένου ότι είναι αυτός ο οποίος τελικά καθορίζει τον ρυθμό μετάδοσης κάθε ροής δεδομένων που θα εξυπηρετείται από αυτό.

Όσον αφορά τις Εξισώσεις (2.4), (2.5) και (2.6), αυτές εκφράζουν τις προϋποθέσεις τις οποίες θα πρέπει να πλήρη η ανάθεση καναλιών κάθε προκύπτουσας εφικτής λύσης του ανωτέρω μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα, η Εξίσωση (2.4) εμποδίζει την ανάπτυξη μιας ενεργής ζεύξης μεταξύ ενός διατεταγμένου ζεύγους διεπαφών δικτύου πάνω από ένα κανάλι ( $x_{i_m j_n}^u = 0$ ), αν η δεύτερη διεπαφή δεν βρίσκεται εντός του συνόλου των άμεσα γειτονικών διεπαφών της πρώτης πάνω από το κανάλι αυτό ( $j_n \notin T_{i_m}^u$ ). Κάτι τέτοιο ενδέχεται να συμβαίνει είτε γιατί η δεύτερη διεπαφή βρίσκεται εκτός της εμβέλειας μετάδοσης της πρώτης, είτε γιατί το εν λόγω κανάλι δεν διατίθεται ταυτόχρονα προς ευκαιριακή εκμετάλλευση και στις δυο αυτές διεπαφές δικτύου (προϋπόθεση απαραίτητη για την εγκαθίδρυση μιας ζεύξης), είτε επειδή οι διεπαφές αυτές ανήκουν στην ίδια ασύρματη συσκευή Δευτερεύοντος Χρήστη.

Η Εξίσωση (2.5), από την άλλη πλευρά, δεν επιτρέπει σε καμία διεπαφή δικτύου να διαδραματίζει ταυτόχρονα τον ρόλο πομπού και δέκτη σε προφανώς διαφορετικές ενεργές ζεύξεις (λόγω της μονοκατευθυντικής και ημι-αμφίδρομης φύσης τους) οι οποίες αναπτύσσονται πάνω από το ίδιο κανάλι. Κάτι τέτοιο, άλλωστε, θα δημιουργούσε καταστροφικές *αυτο-παρεμβολές* (self-interference) στο φυσικό της επίπεδο. Παράλληλα, κάθε διεπαφή δικτύου αποτρέπεται από το να διαδραματίζει ταυτόχρονα τον ρόλο πομπού και δέκτη σε ενεργές ζεύξεις οι οποίες αναπτύσσονται πάνω από διαφορετικά κανάλια, δεδομένης της αδυναμίας της να λειτουργεί σε παραπάνω του ενός κανάλια την ίδια χρονική στιγμή. Πιο συγκεκριμένα, κάθε διεπαφή δικτύου η οποία διαδραματίζει τον ρόλο πομπού σε μια ενεργή μονοκατευθυντική ζεύξη η οποία αναπτύσσεται πάνω από κάποιο κανάλι ( $\sum_{j,n,u} x_{i_m j_n}^u = 1$ ), δεν δύναται να διαδραματίζει τον ρόλο δέκτη σε οποιαδήποτε άλλη ενεργή ζεύξη η οποία δύναται να σχηματιστεί είτε πάνω από το ίδιο, είτε πάνω από ένα διαφορετικό κανάλι ( $\sum_{j,n,u} x_{j_n i_m}^u = 0$ ). Παράλληλα, κάθε διεπαφή δικτύου η οποία διαδραματίζει τον ρόλο δέκτη σε μια ενεργή μονοκατευθυντική ζεύξη η οποία αναπτύσσεται

πάνω από κάποιο κανάλι ( $\sum_{j,n,u} x_{j_n i_m}^u = 1$ ), δεν δύναται να διαδραματίζει τον ρόλο πομπού σε οποιαδήποτε άλλη ενεργή ζεύξη η οποία δύναται να σχηματιστεί είτε πάνω από το ίδιο, είτε πάνω από ένα διαφορετικό κανάλι ( $\sum_{j,n,u} x_{i_m j_n}^u = 0$ ). Ταυτόχρονα, η Εξίσωση (2.5) διασφαλίζει ότι καμία διεπαφή δικτύου δεν πρόκειται να διαδραματίζει τον ρόλο πομπού σε παραπάνω από μια ενεργές ζεύξεις πάνω από το ίδιο κανάλι ( $\sum_{j,n,u} x_{i_m j_n}^u \leq 1$ ), δεδομένου ότι η υιοθετούμενη αρχιτεκτονική συστήματος δεν υποστηρίζει μεταδόσεις πολυεκπομπής (κατά τις οποίες ένας πομπός μεταδίδει ταυτόχρονα τα ίδια πακέτα σε πολλαπλούς δέκτες). Αντίστοιχα, διασφαλίζεται και ότι καμία διεπαφή δικτύου δεν πρόκειται να διαδραματίζει τον ρόλο πομπού σε παραπάνω από μια ενεργές ζεύξεις πάνω από διαφορετικά κανάλια ( $\sum_{j,n,u} x_{i_m j_n}^u \leq 1$ ), δεδομένου ότι κάθε διεπαφή θεωρείται ικανή να λειτουργεί σε ένα μόνο κανάλι κάθε στιγμή. Τέλος, διασφαλίζεται ότι καμία διεπαφή δικτύου δεν πρόκειται να διαδραματίζει τον ρόλο δέκτη σε παραπάνω από μια ενεργές ζεύξεις πάνω είτε από το ίδιο, είτε από διαφορετικά κανάλια ( $\sum_{j,n,u} x_{j_n i_m}^u \leq 1$ ), δεδομένου ότι καμία διεπαφή δεν δύναται εξ ορισμού να λαμβάνει πακέτα πάνω από το ίδιο κανάλι από πολλαπλούς πομπούς ταυτόχρονα ή να λειτουργεί σε παραπάνω του ενός κανάλια την ίδια χρονική στιγμή, αντίστοιχα.

Όσον αφορά την Εξίσωση (2.6), αυτή ουσιαστικά προλαμβάνει την εμφάνιση παρεμβολών μεταξύ των μεταδόσεων των Δευτερευόντων Χρηστών του ιδίου δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, διασφαλίζει ότι όταν μια διεπαφή δικτύου διαδραματίζει τον ρόλο δέκτη σε μια ενεργή ζεύξη η οποία αναπτύσσεται πάνω από κάποιο κανάλι ( $x_{i_m j_n}^u = 1$ ), κάθε άλλη διεπαφή η οποία ανήκει στο σύνολο διεπαφών των οποίων οι μεταδόσεις πάνω από το εν λόγω κανάλι είναι βέβαιο ότι θα της προκαλέσουν παρεμβολές ( $I_{j_n}^u$ ), δεν επιτρέπεται να διαδραματίζει τον ρόλο πομπού σε καμία ενεργή ζεύξη η οποία δύναται να αναπτυχθεί πάνω από το κανάλι αυτό ( $\sum_{l_q \in T_{k_p}^u, k_p \neq i_m} x_{k_p l_q}^u = 0$ ).

Στο σημείο αυτό κρίνεται απαραίτητο να σημειωθεί ότι στην ανωτέρω μοντελοποίηση η μεταβλητή  $h$  χρησιμοποιείται ως δείκτης για τις ροές δεδομένων τις οποίες καλείται να εξυπηρετήσει κάθε εξεταζόμενο δίκτυο. Οι μεταβλητές  $s(h)$  και  $d(h)$ , από την άλλη πλευρά, συμβολίζουν τις ασύρματες συσκευές οι οποίες διαδραματίζουν τον ρόλο ακροσημείου πηγής (source endpoint) και ακροσημείου προορισμού (destination endpoint) κάθε ροής  $h$ , αντίστοιχα. Αξίζει, επίσης, να αναφερθεί ότι η μονοκατευθυντική φύση των ζεύξεων της υιοθετούμενης στην παρούσα μελέτη αρχιτεκτονικής συστήματος υποχρεώ-

νει και τις ανωτέρω ροές σε μονοκατευθυντική λειτουργία, ενώ σε περίπτωση απαίτησης αμφίδρομης επικοινωνίας μεταξύ δύο ασύρματων συσκευών απαιτείται η ανάπτυξη δυο αντίστοιχων ροών αντίστροφης φοράς. Η μεταβλητή  $r(h)$ , τέλος, συμβολίζει την απαίτηση σε ρυθμό μετάδοσης μιας ροής δεδομένων  $h$ , ενώ κάθε μεταβλητή απόφασης  $f_{i_m j_n}^h$  αναπαριστά τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων της ροής  $h$  ο οποίος εξυπηρετείται από την ενεργή ζεύξη η οποία σχηματίζεται μεταξύ του διατεταγμένου ζεύγους διεπαφών δικτύου  $\langle i_m, j_n \rangle$ .

Συνυπολογίζοντας όλα τα παραπάνω, καθίσταται προφανές ότι η Εξίσωση (2.7) εισάγει στο ανωτέρω μοντέλο τις απαιτούμενες *προϋποθέσεις διατήρησης ροής* (flow conservation constraints). Οι εν λόγω προϋποθέσεις διασφαλίζουν ότι ο αθροιστικός ρυθμός με τον οποίο λαμβάνει μια ασύρματη συσκευή δεδομένα τα οποία σχετίζονται με κάποια ροή, ισούται με τον αθροιστικό ρυθμό με τον οποίο αυτή τα μεταδίδει (ή αλλιώς προωθεί) στις γειτονικές ασύρματες συσκευές της, εκτός βέβαια και αν η συγκεκριμένη συσκευή αποτελεί το ακροσημείο πηγής ή προορισμού της ροής αυτής. Αναλυτικότερα, διασφαλίζεται ότι όταν μια ασύρματη συσκευή διαδραματίζει τον ρόλο αναμεταδότη για μια συγκεκριμένη ροή, τότε προωθεί τη σχετιζόμενη με την εν λόγω ροή κίνηση σε γειτονικές ασύρματες συσκευές με τον ίδιο ακριβώς αθροιστικό ρυθμό με τον οποίο και την παραλαμβάνει ( $\sum_m \sum_{j_n \in \cup_u T_{i_m}^u} (f_{i_m j_n}^h - f_{j_n i_m}^h) = 0$ ). Όταν, όμως, μια ασύρματη συσκευή αποτελεί το ακροσημείο πηγής μιας συγκεκριμένης ροής ( $i = s(h)$ ), τότε προφανώς και οι διεπαφές δικτύου της δεν αναμένεται να λαμβάνουν ( $\sum_m \sum_{j_n \in \cup_u T_{i_m}^u} (f_{j_n i_m}^h) = 0$ ), αλλά μόνο να μεταδίδουν σχετιζόμενη με τη συγκεκριμένη ροή κίνηση σε διεπαφές δικτύου γειτονικών ασύρματων συσκευών, χωρίς βέβαια ο προκύπτον αθροιστικός ρυθμός μετάδοσης να υπερβαίνει τον μέγιστο αντίστοιχο ρυθμό τον οποίο επιτρέπει το υποκείμενο δίκτυο ( $\sum_m \sum_{j_n \in \cup_u T_{i_m}^u} (f_{i_m j_n}^h) = \lambda \cdot r(h)$ ). Αντίστοιχα, όταν μια ασύρματη συσκευή αποτελεί το ακροσημείο προορισμού μιας συγκεκριμένης ροής ( $i = d(h)$ ), τότε προφανώς και οι διεπαφές δικτύου της δεν αναμένεται να μεταδίδουν ( $\sum_m \sum_{j_n \in \cup_u T_{i_m}^u} (f_{i_m j_n}^h) = 0$ ), αλλά μόνο να λαμβάνουν σχετιζόμενη με τη συγκεκριμένη ροή κίνηση από διεπαφές δικτύου γειτονικών ασύρματων συσκευών, χωρίς επίσης ο προκύπτον αθροιστικός ρυθμός λήψης να υπερβαίνει τον μέγιστο αντίστοιχο ρυθμό τον οποίο επιτρέπει το υποκείμενο δίκτυο ( $\sum_m \sum_{j_n \in \cup_u T_{i_m}^u} (f_{j_n i_m}^h) = \lambda \cdot r(h)$ , γεγονός που δικαιολογεί και το αρνητικό πρόσημο στην Εξίσωση (2.7)). Παράλληλα, η εν λόγω εξίσωση προσφέρει και την ευελιξία κατα-

κερματισμού κάθε ροής σε υπο-ροές, και μάλιστα σε οποιαδήποτε ακραία ή ενδιάμεση ασύρματη συσκευή του μονοπατιού εξυπηρέτησής της, ενώ κάθε τέτοια υπο-ροή δύναται να δρομολογείται ανεξάρτητα στον προορισμό της (στον οποίο και αναδομείται). Η συγκεκριμένη δυνατότητα, εκτός του ότι αντικατοπτρίζει βέλτιστα την πραγματική λειτουργία των σημερινών πολυ-αλματικών δικτύων, επιτρέπει και την προώθηση των πακέτων κάθε ροής πάνω από πολλαπλά μονοπάτια των οποίων η αθροιστική χωρητικότητα ενδέχεται να υπερβαίνει κατά πολύ αυτή του καλύτερου σχετικού μονοπατιού του υποκείμενου δικτύου. Η Εξίσωση (2.7), τέλος, διασφαλίζει και ότι το υποκείμενο δίκτυο θα εξυπηρετεί εγγυημένα το ίδιο ακριβώς ποσοστό του απαιτούμενου ρυθμού μετάδοσης των ροών δεδομένων του ( $\lambda \cdot r(h)$ ), συμβάλλοντας ουσιαστικά στον δίκαιο διαμοιρασμό των διαθέσιμων πόρων μεταξύ των Δευτερευόντων Χρηστών του.

Η Εξίσωση (2.8) διασφαλίζει ότι ο αθροιστικός ρυθμός μετάδοσης των ροών δεδομένων τις οποίες εξυπηρετεί κάθε ενεργή ζεύξη του υποκείμενου δικτύου ( $\sum_h f_{i_m j_n}^h$ ) δεν υπερβαίνει τη μέγιστη χωρητικότητά της ( $C_{i_m j_n}^u$ ). Αναφορικά, δε, με τις τρεις τελευταίες εξισώσεις του ανωτέρω μοντέλου, σημειώνεται ότι η πρώτη διασφαλίζει ότι ο προαναφερθείς Παράγοντας Κλίμακας συστήματος θα λαμβάνει πάντοτε τιμές εντός του διαστήματος  $[0, 1]$ . Ένα δίκτυο, άλλωστε, δεν έχει νόημα να προσφέρει στις εξυπηρετούμενες ροές δεδομένων του ούτε αρνητικούς ρυθμούς μετάδοσης ( $\lambda \geq 0$ ), ούτε ρυθμούς μετάδοσης μεγαλύτερους από αυτούς που πραγματικά απαιτούν ( $\lambda \leq 1$ ). Η δεύτερη εξίσωση διασφαλίζει τη δυαδική φύση των μεταβλητών απόφασης  $x_{i_m j_n}^u$ , ενώ η τελευταία δεν επιτρέπει στον ρυθμό μετάδοσης κάθε ροής ο οποίος εξυπηρετείται από μια ενεργή ζεύξη να λαμβάνει αρνητικές τιμές.

Ολοκληρώνοντας την παρούσα ενότητα αξίζει να αναφερθεί ότι το μοντελοποιούμενο πρόβλημα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο ανάχθηκε ουσιαστικά σε ένα πρόβλημα Ροής Πολλαπλών Αγαθών επαυξημένο με δεσμεύσεις αποφυγής παρεμβολών μεταξύ παρακείμενων μεταδόσεων. Σύμφωνα, μάλιστα, με το σχετικό θεωρητικό υπόβαθρο της Παραγράφου 2.2.2, το ανωτέρω μοντέλο αποτελεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού, δεδομένης της γραμμικής φύσης τόσο της αντικειμενικής του συνάρτησης, όσο και των (αν)ισοτήτων από τις οποίες αυτή βρίσκεται πλαισιωμένη, καθώς επίσης και της εμπλοκής στις τελευταίες όχι μόνο συνεχών ( $f_{i_m j_n}^h$ ), αλλά και ακέραιων (συγκεκριμένα δυαδικών)

μεταβλητών απόφασης ( $x_{imjn}^u$ ).

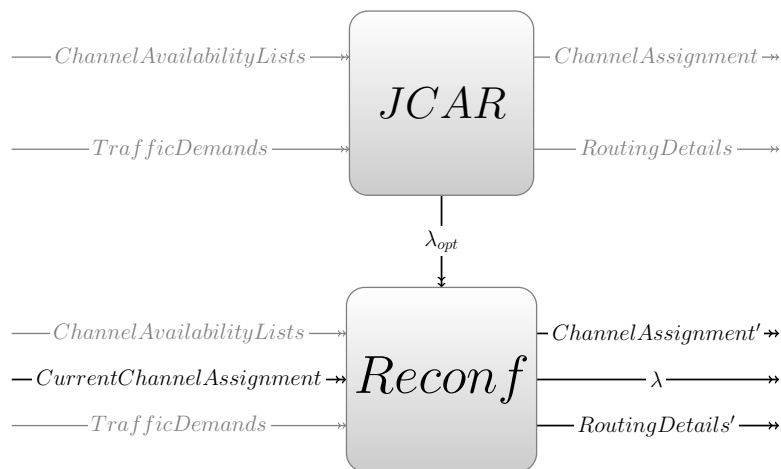
## 2.6 Μαθηματική μοντελοποίηση προβλήματος Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων

Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 2.4.1, την ευθύνη επίλυσης του ανωτέρω προβλήματος φέρει ένας αρμόδιος Εξυπηρετητής Φάσματος, ο οποίος υποχρεούται κατ' αρχήν να συλλέγει τις λίστες διαθέσιμων καναλιών και τις απαιτήσεις των ροών δεδομένων των Δευτερευόντων Χρηστών των εκάστοτε διαχειριζόμενων Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Ο ίδιος εξυπηρετητής, ωστόσο, θεωρείται επίσης επιφορτισμένος με την ευθύνη της περιοδικής επικαιροποίησης των ανωτέρω λιστών, στοχεύοντας ουσιαστικά στην έγκαιρη πληροφόρησή του σχετικά με τυχούσες τροποποιήσεις τους και, κατ' επέκταση, στον έγκαιρο υπολογισμό νέων βέλτιστων αναθέσεων πόρων οι οποίες να συμμορφώνονται πλήρως με τις καταστάσεις στις οποίες μεταπίπτουν τα εξεταζόμενα δίκτυα.

Προφανή πρακτική για την πλειοψηφία των υπαρχουσών μελετών της σχετικής βιβλιογραφίας αποτελεί ο υπολογισμός κάθε νέας βέλτιστης ανάθεσης πόρων απλά επανεκτελώντας το κατά περίπτωση εφαρμοζόμενο μοντέλο μερισμού φάσματος. Αγνοώντας, ωστόσο, την ήδη ισχύουσα ανάθεση πόρων ενός διαχειριζόμενου δικτύου, κάθε νέα ανάθεσή του θα διαφέρει αναπόφευκτα έντονα από την πρώτη, με ότι αυτό συνεπάγεται για την έκταση των αλλαγών οι οποίες θα πρέπει να πραγματοποιούνται κατά την εφαρμογή της σε αυτό. Η παρούσα μελέτη, αντίθετα, συμπληρώνει το ανωτέρω μοντέλο της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο (βλ. Ενότητα 2.5), προτείνοντας ουσιαστικά έναν μηχανισμό ο οποίος συνυπολογίζει τις λεπτομέρειες της εκάστοτε ισχύουσας ανάθεσης πόρων κατά τον υπολογισμό κάθε αντίστοιχης νέας βέλτιστης ανάθεσης πόρων.

Πιο αναλυτικά, έστω ότι ένας Εξυπηρετητής Φάσματος συλλέγει τις απαιτήσεις και τις λίστες διαθέσιμων καναλιών των ασύρματων συσκευών ενός Δικτύου Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας και, εν συνεχεία, υπολογίζει μια βέλτιστη ανάθεση πόρων του απλά επιλύοντας το πρόβλημα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο. Έστω, επίσης, ότι ο εν λόγω εξυπηρετητής ενημερώνεται κάποια στιγμή σχετικά με μια μελλοντική τροποποίηση των ανωτέρω λιστών, η οποία πρόκειται να καταστήσει

την προαναφερθείσα ανάθεση πόρων παρωχημένη. Ως υποχρεούται, ο εξυπηρετητής αυτός προχωρά άμεσα στον υπολογισμό μιας νέας βέλτιστης ανάθεσης πόρων η οποία θα διασφαλίσει τη συνέχεια της βέλτιστης λειτουργίας του ανωτέρω δικτύου. Προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση, και σύμφωνα με τη βοηθητική Εικόνα 2.5, επιλύει αρχικά εκ νέου το πρόβλημα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο (JCAR), λαμβάνοντας προφανώς υπόψιν τη νέα κατάσταση στην οποία πρόκειται να μεταπέσει το διαχειριζόμενο δίκτυο αναφορικά με τη διαθεσιμότητα καναλιών στις ασύρματες συσκευές του (ChannelAvailabilityLists). Υπολογίζει έτσι μια νέα βέλτιστη ανάθεση πόρων (ChannelAssignment, RoutingDetails) η οποία διαφέρει αναπόφευκτα έντονα από την αντίστοιχη ήδη ισχύουσα, αλλά ο Παράγοντας Κλίμακας της αποτελεί τον μέγιστο Παράγοντα Κλίμακας  $\lambda_{opt}$  τον οποίο δύναται να υποστηρίξει το ανωτέρω δίκτυο υπό τη νέα του κατάσταση. Στο σημείο αυτό, λοιπόν, ο ανωτέρω εξυπηρετητής επιλύει συμπληρωματικά και το προτεινόμενο στην παρούσα μελέτη πρόβλημα της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων (Reconf), το οποίο συνυπολογίζει την ήδη ισχύουσα ανάθεση του ανωτέρω δικτύου (CurrentChannelAssignment) στοχεύοντας στον εντοπισμό μιας εναλλακτικής νέας βέλτιστης ανάθεσης πόρων (ChannelAssignment', RoutingDetails'), της οποίας να μεν ο Παράγοντας Κλίμακας  $\lambda$  θα ταυτίζεται με τον μέγιστο υποστηριζόμενο από το ανωτέρω δίκτυο Παράγοντα Κλίμακας  $\lambda_{opt}$  (υπό τη νέα του κατάσταση), αλλά παράλληλα αυτή θα ελαχιστοποιεί την Αθροιστική Καθυστέρηση Μεταγωγών Καναλιού η οποία πρόκειται να προκληθεί στο εν λόγω δίκτυο κατά τη φάση προσαρμογής της ισχύουσας ανάθεσης πόρων του στη νέα αυτή βέλτιστη ανάθεση πόρων.



**Εικόνα 2.5:** Σχηματική αναπαράσταση διαδικασίας αποδοτικής αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων.

Εν τέλει, το πρόβλημα της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων μοντελοποιείται μαθηματικά ως πρόβλημα βελτιστοποίησης ως εξής:

$$\mathbf{min} \quad \sum_{i,m} \sum_u \left( \sum_{j_n \in T_{i_m}^u} (x_{i_m j_n}^u + x_{j_n i_m}^u) \cdot SWD(i_m, u) \right)$$

**subject to**

$$w \cdot \lambda_{opt} \leq \lambda \leq 1 \quad (2.9)$$

$$x_{i_m j_n}^u = 0 \quad \forall i, m, j_n \notin T_{i_m}^u, u \quad (2.10)$$

$$\sum_{j,n,u} x_{i_m j_n}^u + x_{j_n i_m}^u \leq 1 \quad \forall i, m \quad (2.11)$$

$$x_{i_m j_n}^u + \sum_{l_q \in T_{k_p}^u, k_p \neq i_m} x_{k_p l_q}^u \leq 1 \quad \forall u, j, n, k_p \in I_{j_n}^u, \forall i_m \in T_{j_n}^u \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} & \sum_m \sum_{j_n \in \bigcup_u T_{i_m}^u} (f_{i_m j_n}^h - f_{j_n i_m}^h) = \\ & = \begin{cases} \lambda \cdot r(h) & \text{if } i = s(h) \\ -\lambda \cdot r(h) & \text{if } i = d(h) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall i, \forall h \quad (2.13) \end{aligned}$$

$$\sum_h f_{i_m j_n}^h \leq \sum_{u \in U_{ij}} x_{i_m j_n}^u \cdot C_{i_m j_n}^u \quad \forall i, j, m, n \quad (2.14)$$

$$x_{i_m j_n}^u \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, m, n, u$$

$$f_{i_m j_n}^h \geq 0 \quad \forall i, j, m, n, h$$

Στο ανωτέρω μοντέλο οι δυαδικές μεταβλητές  $x_{old_{i_m j_n}}^u$  εκφράζουν την κατάσταση των ζεύξεων ενός αναδιαρθρούμενου δικτύου όταν σε αυτό εφαρμόζεται η λεγόμενη ισχύουσα ανάθεση πόρων του, αποτελώντας ουσιαστικά την ανάθεση-αναφορά από την οποία απαιτείται να διαφέρει ελάχιστα κάθε νέα βέλτιστη σχετική ανάθεσή του. Οι μεταβλητές  $u_{old}$  και  $u$ , από την άλλη πλευρά, εκφράζουν τα κανάλια τα οποία ανατίθενται σε μια συγκεκριμένη διεπαφή κατά την εφαρμογή της ισχύουσας και νέας βέλτιστης ανάθεσης πόρων του εν λόγω δικτύου, αντίστοιχα. Η μεταβλητή  $SWD(i_m, u)$ , τέλος, αναπαριστά την απόλυτη απόσταση στη διάσταση της συχνότητας μεταξύ των προαναφερθέντων καναλιών μιας δεδομένης διεπαφής, ενώ η τιμή της προκύπτει βάσει της ακόλουθης εξίσωσης:

$$SWD(i_m, u) \triangleq \left| f_c^{(u)} - \sum_{u_{old}} \sum_{k,p} (f_c^{(u_{old})} \cdot (x_{old_{i_m k_p}}^{u_{old}} + x_{old_{k_p i_m}}^{u_{old}})) \right|.$$



Η συγκεκριμένη εξίσωση εκφράζει ουσιαστικά την απόλυτη διαφορά μεταξύ της φέρουσας συχνότητας του καναλιού στο οποίο απαιτείται να μεταβεί μια συγκεκριμένη διεπαφή ( $i_m$ ) σύμφωνα με τη νέα βέλτιστη ανάθεση πόρων του εξεταζόμενου δικτύου ( $f_c^{(u)}$ ) και της φέρουσας συχνότητας του καναλιού της ενεργής ζεύξης στην οποία η συγκεκριμένη διεπαφή διαδραματίζει τον ρόλο είτε πομπού, είτε δέκτη κατά την ισχύουσα στο εν λόγω δίκτυο ανάθεση πόρων ( $\sum_{u_{old}} \sum_{k,p} (f_c^{(u_{old})} \cdot (x_{old_{i_m k p}}^{u_{old}} + x_{old_{k p i_m}}^{u_{old}}))$ ). Σε περίπτωση, μάλιστα, όπου η ανωτέρω διεπαφή δεν αποτελεί ακροσημείο καμιάς ενεργής ζεύξης της τελευταίας ανάθεσης, τότε και δεν της ανατίθεται κάποιο κανάλι, η τιμή του δεύτερου όρου λαμβάνει την τιμή 0 ( $\sum_{u_{old}} \sum_{k,p} (f_c^{(u_{old})} \cdot (x_{old_{i_m k p}}^{u_{old}} + x_{old_{k p i_m}}^{u_{old}})) = 0$ ).

Συνοπλοποιώντας, λοιπόν, όλα τα παραπάνω, προκύπτει τελικά ότι η αντικειμενική συνάρτηση του ανωτέρω μοντέλου στοχεύει ουσιαστικά στην ελαχιστοποίηση της αθροιστικής απόστασης στον άξονα της συχνότητας την οποία καλούνται να καλύψουν μέσω μεταγωγής καναλιού οι διεπαφές κάθε αναδιαρθρούμενου δικτύου κατά τη φάση προσαρμογής της ισχύουσας ανάθεσης πόρων του στην εντοπιζόμενη νέα βέλτιστη ανάθεση πόρων. Βάσει, μάλιστα, των όσων αναφέρθηκαν αναλυτικά στην Παράγραφο 2.4.4, η ελαχιστοποίηση του προαναφερθέντος μεγέθους συνεπάγεται και την ελαχιστοποίηση της Αθροιστικής Καθυστερήσης Μεταγωγών Καναλιού η οποία πρόκειται να προκληθεί στο εν λόγω δίκτυο κατά την αναδιάρθρωση της ισχύουσας ανάθεσης πόρων του. Αναλυτικότερα, η επιλεγμένη συνάρτηση υπολογίζει την απόλυτη απόσταση (στον άξονα της συχνότητας) την οποία καλείται να καλύψει μέσω μεταγωγής καναλιού κάθε αναδιαρθρούμενη διεπαφή ενός εξεταζόμενου δικτύου ( $SWD(i_m, u)$ ), στοχεύοντας ουσιαστικά στην ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των αντίστοιχων τιμών όσων διεπαφών του διαδραματίζουν τον ρόλο είτε πομπού, είτε δέκτη σε ενεργές ζεύξεις της εντοπιζόμενης νέας βέλτιστης ανάθεσης πόρων του ( $\sum_u \sum_{j_n \in T_{i_m}^u} (x_{i_m j_n}^u + x_{j_n i_m}^u) = 1$ ). Σε περίπτωση, μάλιστα, όπου κάποια διεπαφή δεν συμμετέχει σε μια τέτοια ενεργή ζεύξη ( $\sum_u \sum_{j_n \in T_{i_m}^u} (x_{i_m j_n}^u + x_{j_n i_m}^u) = 0$ ), η αντίστοιχη απόσταση αποφεύγεται να συμπεριληφθεί στο προαναφερθέν άθροισμα, δεδομένου ότι αυτή έχει όλο τον χρόνο στη διάθεσή της ώστε να μεταβεί είτε σε ανενεργή κατάσταση, είτε σε κατάσταση ύπνου, είτε ακόμα και σε κάποιο κανάλι αναμονής, χωρίς να επιβαρύνει καθόλου το αναδιαρθρούμενο δίκτυο.

Αναφορικά με τις Εξισώσεις (2.10) - (2.14) του ανωτέρω μοντέλου, αυτές φέρουν ταυ-

τόσημη ερμηνεία με τις αντίστοιχες εξισώσεις του μοντέλου της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο (βλ. Ενότητα 2.5). Όσον αφορά, δε, τη νέα Εξίσωση (2.9), αυτή διασφαλίζει ότι ο Παράγοντας Κλίμακας  $\lambda$  κάθε νέας βέλτιστης ανάθεσης πόρων θα είναι τουλάχιστον ίσος με τον μέγιστο Παράγοντα Κλίμακας  $\lambda_{opt}$  τον οποίο δύναται να υποστηρίξει το εξεταζόμενο δίκτυο υπό τη νέα του κατάσταση αναφορικά με τη διαθεσιμότητα καναλιών στις ασύρματες συσκευές του. Παράλληλα, η ίδια εξίσωση επιτρέπει την ακόμα μεγαλύτερη μείωση της Αθροιστικής Καθυστέρησης Μεταγωγών Καναλιού η οποία πρόκειται να προκληθεί στο εν λόγω δίκτυο, με αντάλλαγμα ωστόσο από τη λειτουργία του να μην επανέλθει στο βέλτιστο δυνατό σημείο της αναφορικά με το ποσοστό ικανοποίησης των απαιτήσεων των εξυπηρετούμενων ροών δεδομένων. Η συγκεκριμένη δυνατότητα επιτυγχάνεται μέσω του πολλαπλασιαστή  $w \in [0, 1]$ , ο οποίος ουσιαστικά καθορίζει το ελάχιστο ποσοστό στο οποίο ο Παράγοντας Κλίμακας  $\lambda$  κάθε νέας βέλτιστης ανάθεσης πόρων επιτρέπεται να προσεγγίζει τον μέγιστο Παράγοντα Κλίμακας  $\lambda_{opt}$  τον οποίο δύναται να υποστηρίξει το υποκείμενο δίκτυο υπό τη νέα του κατάσταση. Ενδεικτικά, όταν η τιμή της παραμέτρου  $w$  τίθεται ίση με τη μονάδα ( $w = 1$ ), τότε ο Παράγοντας Κλίμακας  $\lambda$  κάθε νέας βέλτιστης ανάθεσης πόρων θα πρέπει να ταυτίζεται με τον αντίστοιχο μέγιστο παράγοντα  $\lambda_{opt}$ . Η συγκεκριμένη απαίτηση, ωστόσο, θεωρείται εξαιρετικά αυστηρή, δεδομένου ότι κατά πάσα πιθανότητα υπάρχει μόνο μια ανάθεση πόρων σε κάθε δίκτυο η οποία να μπορεί να υποστηρίξει κάτι τέτοιο. Αντίθετα, όταν η τιμή της παραμέτρου  $w$  τίθεται ίση με 0.95 ( $w = 0.95$ ), τότε ο Παράγοντας Κλίμακας  $\lambda$  κάθε νέας ανάθεσης πόρων επιτρέπεται να προσεγγίζει σε ποσοστό τουλάχιστον 95% τον αντίστοιχο μέγιστο παράγοντα  $\lambda_{opt}$ . Όπως, μάλιστα, θα καταστεί φανερό και παρακάτω, θυσιάζοντας ένα τόσο μικρό ποσοστό του εν λόγω παράγοντα και, κατ' επέκταση, της διεκπεραιωτικότητας του αντίστοιχου δικτύου, παρέχονται πολύ περισσότερες ευκαιρίες στο ανωτέρω μοντέλο ώστε να εντοπίσει μια νέα ανάθεση πόρων η οποία να διαφέρει ελάχιστα από την αντίστοιχη ήδη ισχύουσα.

Η ανωτέρω παράμετρος  $w$  ορίζει ουσιαστικά το επιθυμητό σημείο ισορροπίας μεταξύ της μεγιστοποίησης του βαθμού ικανοποίησης των απαιτήσεων των ροών δεδομένων ενός εξεταζόμενου δικτύου και της ελαχιστοποίησης της επιβάρυνσης η οποία προκαλείται σε αυτό κατά την αναδιάρθρωση των αναθέσεων πόρων του. Είναι γεγονός, βέβαια, ότι η επιλογή της κατάλληλης τιμής της συγκεκριμένης παραμέτρου απαιτεί τον συνυπολογισμό

πολλών παραγόντων. Ενδεικτικά, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν οι προδιαγραφές και οι στόχοι κάθε εξεταζόμενου δικτύου, καθώς επίσης και η φύση των προσφερόμενων υπηρεσιών του. Οι πολυμεσικές ροές φωνής ή βίντεο, για παράδειγμα, θεωρούνται εξαιρετικά ευαίσθητες στο φαινόμενο της διακοπής υπηρεσίας, οπότε και στα αντίστοιχα αναδιαρθρούμενα δίκτυα έχει περισσότερη σημασία να ελαχιστοποιείται το συγκεκριμένο μέγεθος έναντι της μεγιστοποίησης της διεκπεραιωτικότητάς τους (αναθέτοντας προφανώς στην παράμετρο  $w$  τιμές μικρότερες της μονάδας). Ιδιαίτερη προσοχή κατά την επιλογή της τιμής της παραμέτρου  $w$  θα πρέπει να δίδεται επίσης (1) στην ευαισθησία της εφαρμοζόμενης τεχνικής δρομολόγησης στις τροποποιήσεις του εξεταζόμενου δικτύου, (2) στο αναμενόμενο χρονικό διάστημα ισχύος κάθε βέλτιστης ανάθεσης πόρων, και (3) στις προδιαγραφές του μηχανισμού ενημέρωσης των επηρεαζόμενων ασύρματων συσκευών σχετικά με τις απαιτούμενες τροποποιήσεις των παραμέτρων λειτουργίας τους.

Ολοκληρώνοντας την παρούσα ενότητα θεωρείται σκόπιμο να επισημανθούν και κάποια λιγότερο προφανή χαρακτηριστικά του ανωτέρω μηχανισμού βέλτιστης αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων. Κατ' αρχήν, λοιπόν, σημειώνεται ότι τα προβλήματα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο και της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων εξετάζονται εν προκειμένω ξεχωριστά, αποφεύγοντας τον περίπλοκο συνδυασμό των αντίστοιχων στόχων τους σε ένα πρόβλημα *βελτιστοποίησης πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων* (multi-objective optimization). Η επιλογή αυτή διατηρεί το μοντέλο της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης αυτούσιο, επιτρέποντας ουσιαστικά σε δίκτυα τα οποία στηρίζουν ήδη την αποδοτική τους λειτουργία σε αυτό να συνεχίσουν να το χρησιμοποιούν χωρίς τροποποιήσεις. Κατά δεύτερον, σημειώνεται ότι η παραμετροποίηση του ανωτέρω μηχανισμού επαφίεται αποκλειστικά στους διαχειριστές των αντίστοιχων δικτύων, οι οποίοι δύνανται ακόμα και να αναστείλουν την εκτέλεσή του όταν λόγω έλλειψης χρόνου η αποδοτική αναδιάρθρωση παρωχημένων αναθέσεων πόρων φαντάζει ως πολυτέλεια. Κατά τρίτον, είναι άξιο αναφοράς ότι η εν λόγω αποδομημένη προσέγγιση των ανωτέρω προβλημάτων βελτιστοποίησης ομοιάζει με τη δημοφιλή τεχνική *Προγραμματισμού Στόχου* (Goal Programming) [78, 79], η οποία ενδείκνυται για την αποδοτική επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης *πολλαπλών κριτηρίων* (multi-criteria). Βάσει της συγκεκριμένης τεχνικής, κάθε σχετικό πρόβλημα χωρίζεται σε μια ακολουθία υπο-προβλημάτων (ένα για κάθε επιμέρους αντι-

κειμενικό στόχο), τα οποία εν συνεχεία επιλύονται σειριακά. Υπογραμμίζοντας, μάλιστα, την αντιστοιχία μεταξύ της εν λόγω τεχνικής και του προτεινόμενου στην παρούσα μελέτη μηχανισμού, αναφέρεται ότι ο συνδυαστικός στόχος της μεγιστοποίησης της αποδοτικότητας ενός εξεταζόμενου δικτύου και της μείωσης του κόστους αναδιάρθρωσής του χωρίζεται εν προκειμένω στα προβλήματα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο και της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων, αντίστοιχα. Όπως, δε, επισημαίνεται εύστοχα στην εργασία [80], η προτεραιότητα βελτιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης του πρώτου προβλήματος, δηλαδή η μεγιστοποίηση του Παράγοντα Κλίμακας  $\lambda$  κάθε νέας βέλτιστης ανάθεσης πόρων, προκύπτει απείρως μεγαλύτερη από αυτή του δεύτερου, δηλαδή της ελαχιστοποίησης της Αθροιστικής Καθυστέρησης Μεταγωγών Καναλιού η οποία προκαλείται στα αντίστοιχα αναδιαρθρούμενα δίκτυα. Στην ίδια εργασία σημειώνεται, επίσης, ότι η πρώτη προτεραιότητα δύναται να χαλαρώσει κατά ένα απόλυτο ή σχετικό ποσοστό μόνο κατά την επίλυση του δεύτερου προβλήματος, δυνατότητα η οποία παρέχεται στην προκειμένη περίπτωση μέσω της παραμέτρου  $w$  της Εξίσωσης (2.9) του προβλήματος της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων. Αξίζει, τέλος, να αναφερθεί ότι δεδομένης της γραμμικής φύσης τόσο της αντικειμενικής συνάρτησης, όσο και των (αν)ισοτήτων του ανωτέρω μοντέλου, καθώς και της εμπλοκής στις τελευταίες όχι μόνο συνεχών ( $f_{i_m j_n}^h$ ), αλλά και ακέραιων μεταβλητών απόφασης ( $x_{i_m j_n}^u$ ), και το πρόβλημα της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων αποτελεί ουσιαστικά ένα πρόβλημα Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού. Προς αποφυγή, βέβαια, παρανοήσεων σχετικά με τη γραμμικότητα της αντικειμενικής συνάρτησης του εν λόγω προβλήματος σημειώνεται ότι η μαθηματική έκφραση της απόλυτης τιμής η οποία εμφανίζεται στον ορισμό της περικλείει αποκλειστικά πραγματικούς αριθμούς (υπενθυμίζοντας ότι οι μεταβλητές  $x_{old_{i_m j_n}}^u$  αποτελούν δεδομένα εισόδου για το πρόβλημα της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων), ενώ μόνο αν στη συγκεκριμένη έκφραση εμπλέκονταν και μεταβλητές απόφασης, τότε η αντίστοιχη αντικειμενική συνάρτηση θα καθίστατο μη-γραμμική.

## 2.7 Αξιολόγηση μηχανισμού Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων βάσει προσομοιώσεων

Στόχο της παρούσας παραγράφου αποτελεί η επαλήθευση της ορθότητας και η επίδειξη των δυνατοτήτων του προτεινόμενου στα πλαίσια της παρούσας μελέτης μηχανισμού βέλτιστης αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων. Προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση εκτελούνται εκτενείς προσομοιώσεις, συγκρίνοντας ουσιαστικά την επιβάρυνση η οποία προκαλείται στα εξεταζόμενα αναδιαρθρούμενα δίκτυα τόσο κατά την περίπτωση εφαρμογής, όσο και απουσίας του εν λόγω μηχανισμού. Παράλληλα, αξιολογείται η δυνατότητα του να μειώνει περαιτέρω την προαναφερθείσα επιβάρυνση, θυσιάζοντας ωστόσο ένα μέρος της αποδοτικότητας των αντίστοιχων δικτύων, ενώ πραγματοποιείται και μια αναφορά στα οφέλη τα οποία παρέχονται έμμεσα από αυτόν.

### 2.7.1 Περιβάλλον εκτέλεσης προσομοιώσεων

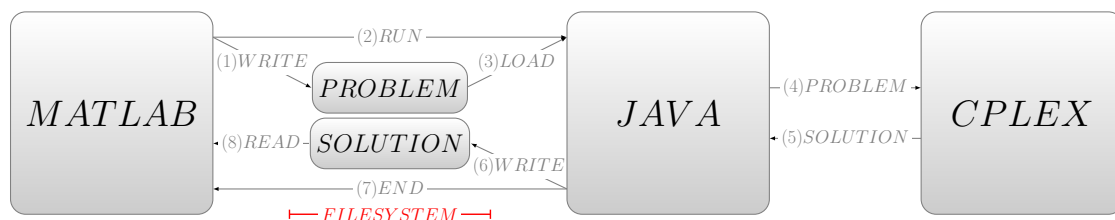
Στοχεύοντας στην αξιολόγηση του ανωτέρω μηχανισμού σε ένα περιβάλλον το οποίο προσεγγίζει βέλτιστα αυτό των πραγματικών Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, οι παράμετροι των εκτελούμενων στα πλαίσια της παρούσας μελέτης προσομοιώσεων συμμορφώνονται τόσο με τις τρέχουσες τεχνολογικές εξελίξεις, όσο και με τα προσφάτως προτυποποιημένα κανονιστικά πλαίσια. Ακριβέστερα, λαμβάνονται υπόψιν οι προδιαγραφές λειτουργίας των σύγχρονων συσκευών Λογισμικόριστης Ραδιοεπικοινωνίας, καθώς και οι λεπτομέρειες των κανονιστικών πλαισίων τα οποία διέπουν ήδη την ευκαιριακή εκμετάλλευση των μερίδων φάσματος TVWS.

Αναλυτικότερα, κάθε ασύρματη συσκευή Δευτερεύοντος Χρήστη θεωρείται εφοδιασμένη με τρεις (3) ημιαμφίδρομες διεπαφές δικτύου ( $L = 3$ ) πανομοιότυπων προδιαγραφών (βλ. Παράγραφο 2.4.2). Κάθε τέτοια διεπαφή δύναται να λειτουργεί σε ένα μόνο κανάλι κάθε στιγμή, ενώ τα διαθέσιμα κανάλια της ενδέχεται να ανήκουν σε οποιαδήποτε φασματική ζώνη του ραδιοφάσματος. Δεδομένου, μάλιστα, ότι ο χρόνος ολοκλήρωσης κάθε μεταγωγής καναλιού εξαρτάται εν προκειμένω άμεσα από την απόσταση (στη διάσταση της συχνότητας) μεταξύ των καναλιών αφετηρίας και προορισμού της εκάστοτε αναδιαρθρούμενης διεπαφής δικτύου (βλ. Παράγραφο 2.4.4), η υιοθέτηση ενός συνόλου καναλιών τα οποία ανήκουν σε εξαιρετικά απομακρυσμένες μεταξύ τους φασματικές ζώ-

νες θα μπορούσε να υπερεκτιμήσει τα οφέλη του αξιολογούμενου μηχανισμού. Στην παρούσα μελέτη, ωστόσο, υιοθετείται η δυσμενέστερη σχετική περίπτωση κατά την οποία τα διαθέσιμα κανάλια όχι μόνο ανήκουν στην ίδια φασματική ζώνη, αλλά είναι και διαδοχικά μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα, θεωρούνται ως διαθέσιμα τα οριζόμενα από την Αγγλική ρυθμιστική αρχή OFCOM [50] κανάλια TVWS 40 – 45 ( $|U| = 6$ ), με εύρος ζώνης 8 MHz ( $W_u = 8$  MHz) έκαστο και συνολικό εύρος συχνοτήτων το 622 – 670 MHz. Αναφορικά, τέλος, με την απόσταση την οποία θεωρείται ότι καλείται να καλύψει κάθε αναδιαρθρούμενη διεπαφή δικτύου μέσω μεταγωγής καναλιού, σημειώνεται ότι αυτή υπολογίζεται στην προκειμένη περίπτωση βάσει του μέγεθος  $uW_u$  αντί της φέρουσας συχνότητας  $f_c^{(u)}$  κάθε καναλιού  $u$ , θεωρώντας ουσιαστικά ότι κάθε ανενεργή διεπαφή μεταβαίνει σε κατάσταση αναμονής στο πρώτο κανάλι του ανωτέρω συνόλου  $U$ .

Αναφορικά με τη μέγιστη ισχύ μετάδοσης κάθε διεπαφής δικτύου, αυτή τίθεται στα πλαίσια των ακόλουθων σεναρίων προσομοιώσεων ίση με 100 mW ( $P = 100$  mW). Η συγκεκριμένη τιμή ορίζεται από το σχετικό κανονιστικό πλαίσιο της Αμερικανικής ρυθμιστικής αρχής FCC [49], θεωρώντας ουσιαστικά ότι οι ανωτέρω ασύρματες συσκευές αντιστοιχούν σε συσκευές τύπου 'Mode II' [49], γεγονός το οποίο υπαγορεύει κυρίως η φύση των υπηρεσιών τις οποίες αυτές θεωρείται ότι καλούνται να εξυπηρετήσουν (βλ. Παράγραφο 2.4.1). Όσον αφορά, δε, τις παραμέτρους του υιοθετούμενου απλουστευμένου μοντέλου απωλειών διαδρομής (βλ. Παράγραφο 2.4.2), η τιμή της απόστασης αναφοράς οπτικής επαφής τίθεται ίση με ένα (1) μέτρο ( $d_0 = 1$  m), ενώ ο εκθέτης απωλειών διαδρομής ίσος με τέσσερα (4) ( $\alpha = 4$ ), προδιαγράφοντας ουσιαστικά ένα περιβάλλον ραδιοσυχνοτήτων το οποίο απαντάται σε *προαστιακές περιοχές* (suburban areas). Παράλληλα, το επίπεδο θορύβου βάθους κάθε διεπαφής δικτύου ορίζεται ίσο με  $-98$  dBm ( $N_P = -98$  dBm), ενώ το αντίστοιχο κατώφλιο ευαισθησίας δέκτη ίσο με  $9.48 \cdot 10^{-13}$  W ( $P_{thr} = 9.48 \cdot 10^{-13}$  W). Αντικαθιστώντας, μάλιστα, τις προαναφερθείσες τιμές στην ανωτέρω Εξίσωση (2.3), προκύπτει τελικά τόσο η εμβέλεια μετάδοσης  $R_T^u$ , όσο και η εμβέλεια παρεμβολής  $R_I^u$  κάθε διεπαφής δικτύου, θεωρώντας βέβαια ότι η βέλτιστη τιμή της παραμέτρου  $\Delta$  ισούται εδώ με ένα (1). Σημειώνεται, τέλος, ότι όμοιες τιμές με αυτές των ανωτέρω παραμέτρων  $\alpha$ ,  $N_P$ , και  $d_0$  υιοθετούνται και σε μοντέλα της πλατφόρμας COGEU [81, 82], μιας πλατφόρμας Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας η οποία στοχεύει στην αποδοτικότερη εκμετάλλευση των μερίδων φάσματος TVWS στην Ευρώπη.

Όσον αφορά την εκτέλεση των ακόλουθων σεναρίων προσομοιώσεων, αυτή υποστηρίζεται από το προγραμματιστικό περιβάλλον του εργαλείου MATLAB [83], ενώ τα προβλήματα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο και της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων επιλύονται με τη βοήθεια του ισχυρού λύτη 'CPLEX 12.2' [21], αφού βέβαια πρώτα αναπαρασταθούν σε κατάλληλη μορφή μέσω της γλώσσας Optimization Programming Language (OPL) [23]. Πιο αναλυτικά, και σύμφωνα με την Εικόνα 2.6, κάθε επιθυμητό σενάριο σχεδιάζεται και εκτελείται με τη βοήθεια της γλώσσας προγραμματισμού του εργαλείου MATLAB (*MATLAB*). Κάθε φορά, δε, όπου απαιτείται η επίλυση ενός εκ των προαναφερθέντων προβλημάτων βελτιστοποίησης, τα επιθυμητά δεδομένα εισόδου αποθηκεύονται ((1)*WRITE*) αρχικά σε ένα αρχείο συστήματος (*FILESYSTEM*) σε μορφότυπο κατανοητό από τον λύτη CPLEX (*PROBLEM*) μέσω ενός ειδικά ανεπτυγμένου τμήματος κώδικα MATLAB. Εν συνεχεία, πυροδοτείται η εκτέλεση ((2)*RUN*) ενός μηχανισμού ανεπτυγμένου σε γλώσσα JAVA (*JAVA*), ο οποίος αναλαμβάνει την ανάγνωση ((3)*LOAD*) του σχετικού αρχείου και τη μετέπειτα διαμόρφωση του τελικού προβλήματος βελτιστοποίησης. Το προκύπτον πρόβλημα δίδεται ως είσοδος στον λύτη CPLEX ((4)*PROBLEM*), ο οποίος μετά την επιτυχή ολοκλήρωση της επίλυσής του ((5)*SOLUTION*) ενημερώνει τον προαναφερθέντα μηχανισμό ώστε να καταγράψει ((6)*WRITE*) την παρερχόμενη λύση σε ένα αρχείο συστήματος σε μορφότυπο κατανοητό από το εργαλείο MATLAB (*SOLUTION*). Το εργαλείο MATLAB, τέλος, ενημερώνεται σχετικά με την ολοκλήρωση της προαναφερθείσας διαδικασίας ((7)*END*) και διαβάζει το προκύπτον αρχείο ((8)*READ*), εντάσσοντας ουσιαστικά την περιεχόμενη λύση στο περιβάλλον εκτέλεσης του αντίστοιχου σεναρίου.



Εικόνα 2.6: Προγραμματιστική υποδομή εκτέλεσης σεναρίων προσομοιώσεων.

Σημειώνεται, τέλος, ότι παρά την υψηλή πολυπλοκότητα των προβλημάτων της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο και της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων (τα εν λόγω προβλήματα μοντελοποιήθηκαν παρα-

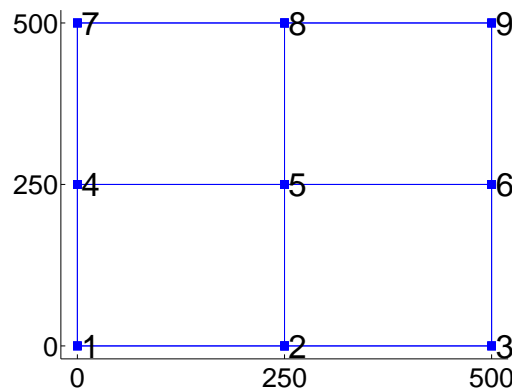
πάνω ως προβλήματα Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού, γεγονός το οποίο τα εντάσσει αυτόματα στην τάξη των δυσεπίλυτων προβλημάτων NP-hard [15] (βλ. Παράγραφο 2.2.2)), η ανάπτυξη των ακόλουθων σεναρίων προσομοιώσεων επί μικρών, αλλά αντιπροσωπευτικών δικτυακών τοπολογιών συνέβαλε καθοριστικά στην επίλυσή τους εντός άκρως αποδεκτών χρόνων. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι οι εν λόγω χρόνοι προκύπτουν της τάξεως μερικών δεκάδων δευτερολέπτων όταν η ανωτέρω προγραμματιστική υποδομή φιλοξενείται σε μια υπολογιστική μονάδα εφοδιασμένη με 6 GB μνήμης RAM και έναν *τετραπύρηνο επεξεργαστή* (quad-core CPU) χρονισμένο σε συχνότητα 2.50 GHz.

### 2.7.2 Δίκτυο τοπολογίας πλέγματος

Ένα πρώτο σύνολο προσομοιώσεων εκτελείται στα πλαίσια της παρούσας μελέτης επί ενός Δικτύου Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας το οποίο ακολουθεί μια *τοπολογία πλέγματος* (grid topology). Πιο συγκεκριμένα, εννέα (9) ασύρματες συσκευές Δευτερευόντων Χρηστών ( $N = 9$ ) θεωρούνται ανεπτυγμένες εντός μιας γεωγραφικής περιοχής  $500 \times 500 \text{ m}^2$  σχηματίζοντας ένα πλέγμα διαστάσεων  $3 \times 3$  (βλ. Εικόνα 2.7). Ως απόσταση μεταξύ των άμεσα γειτονικών ασύρματων συσκευών επιλέγονται τα 167 m, ενώ η ίδια τιμή θεωρείται ότι χαρακτηρίζει και την εμβέλεια μετάδοσης των προσκείμενων σε αυτές διεπαφών δικτύου ( $R_T^u = 167 \text{ m}$ , ανεξαρτήτως μοντέλου απωλειών διαδρομής ή καναλιού λειτουργίας). Ως εκ τούτου, ενεργές ζεύξεις δύνανται να αναπτύσσονται μόνο μεταξύ όσων ασύρματων συσκευών θεωρούνται γειτονικές είτε στον οριζόντιο, είτε στον κάθετο άξονα του ανωτέρω πλέγματος, και όχι μεταξύ όσων ανήκουν στις νοητές διαγωνίους του (βλ. *γράφημα συνδετικότητας δικτύου* (network connectivity graph) Εικόνας 2.7). Παράλληλα, το εν λόγω δίκτυο θεωρείται ότι καλείται να εξυπηρετήσει τις απαιτήσεις σε ρυθμό μετάδοσης τεσσάρων (4) ροών δεδομένων ( $h = 4$ ), με τις ασύρματες συσκευές 6, 7, 8, και 9 να αποτελούν τα ακροσημεία πηγής τους ( $s(h) = [6, 7, 8, 9]$ ) και την ασύρματη συσκευή 1 να αποτελεί το ακροσημείο προορισμού τους ( $d(h) = [1, 1, 1, 1]$ ), αντίστοιχα. Η απαίτηση σε ρυθμό μετάδοσης κάθε τέτοιας ροής τίθεται (τυχαία) ίση με 3 Mbps, ενώ ως μόνη εξαίρεση θεωρείται η δεύτερη ροή, της οποίας το αντίστοιχο μέγεθος τίθεται (επίσης τυχαία) ίσο με 2 Mbps ( $r(h) = [3, 2, 3, 3] \cdot 10^6$ ). Ταυτόχρονα, έξι (6) Πρωτεύοντες Χρήστες θεωρούνται τυχαία διασκορπισμένοι στο εσωτερικό της ανωτέρω τοπολογίας, αποτρέποντας όσους Δευτερεύοντες Χρήστες βρίσκονται εντός ακτίνας 250 m από αυτούς να εκμεταλ-



λεύονται τα (τυχαία) καταλαμβανόμενα κανάλια τους. Σε πλήρη συμφωνία, τέλος, με όσα αναφέρθηκαν στην Παράγραφο 2.4.1, την ευθύνη διαχείρισης του ανωτέρω δικτύου φέρει ένας Εξυπηρετητής Φάσματος, ενώ οι λίστες διαθέσιμων καναλιών των ασύρματων συσκευών του υπολογίζονται από μια αρμόδια Βάση Δεδομένων Φάσματος.



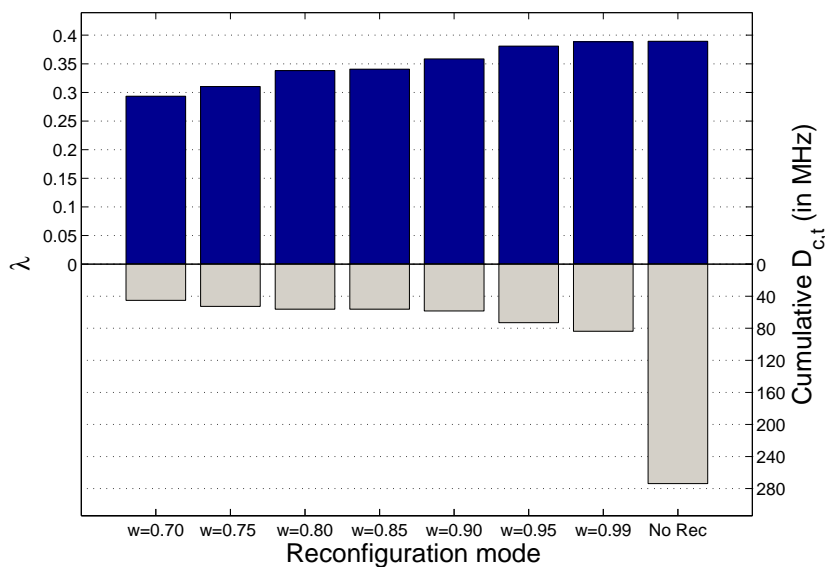
Εικόνα 2.7: Δίκτυο τοπολογίας πλέγματος.

Σύμφωνα με το παρόν σενάριο προσομοίωσης, ο προαναφερθείς εξυπηρετητής φάσματος θεωρείται ότι συλλέγει αρχικά τις λίστες διαθέσιμων καναλιών των ασύρματων συσκευών του ανωτέρω δικτύου και, εν συνεχεία, υπολογίζει την 'ισχύουσα ανάθεση πόρων' του επιλύοντας το πρόβλημα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο (βλ. Ενότητα 2.5). Ο ίδιος εξυπηρετητής θεωρείται, επίσης, επιφορτισμένος με την ευθύνη επικαιροποίησης των προαναφερθεισών λιστών (βλ. Παράγραφο 2.4.1) με σκοπό τον έγκαιρο εντοπισμό τυχόντων επηρεασμών τους από τη χρονικά μεταβαλλόμενη δραστηριότητα των αντίστοιχων Πρωτευόντων Χρηστών. Στα πλαίσια του παρόντος σεναρίου, μάλιστα, θεωρείται ότι κάποια στιγμή (στο προσεχές μέλλον) δυο (2) τυχαίοι ενεργοί Πρωτεύοντες Χρήστες θα παύσουν τις μεταδόσεις τους, ενώ τρεις (3) άλλοι θα εμφανιστούν σε τυχαίες θέσεις της ανωτέρω τοπολογίας. Ως εκ τούτου, νέα κανάλια θα καταστούν διαθέσιμα σε κάποιους Δευτερεύοντες Χρήστες, ενώ κάποια άλλα θα πρέπει να απελευθερωθούν άμεσα ώστε να προστατευθούν από επιζήμιες παρεμβολές οι μεταδόσεις των επιστρεφόντων Πρωτευόντων Χρηστών. Αναπόφευκτα, λοιπόν, η προαναφερθείσα ισχύουσα ανάθεση πόρων θα καταστεί παρωχημένη, απαιτώντας από τον ανωτέρω Εξυπηρετητή Φάσματος να υπολογίσει άμεσα μια νέα βέλτιστη ανάθεση πόρων η οποία να συμμορφώνεται πλήρως με τη νέα κατάσταση στην οποία πρόκειται να μεταπέσει το ανωτέρω δίκτυο.

Για λόγους διασφάλισης της εγκυρότητας των εξαγόμενων συμπερασμάτων αναφορικά με τις δυνατότητες του αξιολογούμενου μηχανισμού, το ανωτέρω σενάριο εκτελείται στα πλαίσια της παρούσας προσομοίωσης σε σαράντα (40) ανεξάρτητες μεταξύ τους επαναλήψεις. Πιο συγκεκριμένα, οι λίστες διαθέσιμων καναλιών των ασύρματων συσκευών του ανωτέρω δικτύου θεωρείται ότι επηρεάζονται με σαράντα (40) τυχαίους διαφορετικούς τρόπους από τους αντίστοιχους Πρωτεύοντες Χρήστες, διατηρώντας προφανώς την προαναφερθείσα ισχύουσα ανάθεση πόρων σταθερή. Ως εκ τούτου, σχηματίζονται και, εν συνεχεία, επιλύονται ισάριθμα προβλήματα αναδιάρθρωσης, ενώ οι τιμές των αντίστοιχων προκύπτων μεγεθών μεσοτιμούνται πριν παρουσιαστούν συγκεντρωτικά στα ακόλουθα διαγράμματα. Για λόγους, μάλιστα, ευκολότερης κατανόησης, τα εν λόγω αποτελέσματα προσεγγίζονται στην ακόλουθη περιγραφή ως σύνολο, δηλαδή αντιμετωπίζονται σαν να αφορούν μια μόνο εκτέλεση του ανωτέρω σεναρίου.

Επιστρέφοντας στο περιγραφόμενο σενάριο, ο ανωτέρω Εξυπηρετητής Φάσματος θεωρείται ότι αρχικά απλά επιλύει εκ νέου το πρόβλημα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο, λαμβάνοντας προφανώς υπόψιν τη νέα κατάσταση στην οποία πρόκειται να μεταπέσει το ανωτέρω δίκτυο. Στην Εικόνα 2.8, λοιπόν, και υπό την ετικέτα 'No Rec.', παρουσιάζονται τόσο ο Παράγοντας Κλίμακας  $\lambda$  της προκύπτουσας νέας βέλτιστης ανάθεσης πόρων (ο οποίος αποτελεί ουσιαστικά και τον παράγοντα  $\lambda_{opt}$  του ανωτέρω δικτύου υπό τη νέα του κατάσταση), όσο και η επιβάρυνση η οποία αναμένεται να προκληθεί στο ανωτέρω δίκτυο κατά τη φάση προσαρμογής της ισχύουσας ανάθεσης πόρων του στην εν λόγω νέα βέλτιστη ανάθεση πόρων. Η συγκεκριμένη επιβάρυνση, μάλιστα, ποσοτικοποιείται στην προκειμένη περίπτωση βάσει του μεγέθους της *αθροιστικής απόστασης σε MHz την οποία καλούνται να καλύψουν μέσω μεταγωγής καναλιού οι διεπαφές του ανωτέρω δικτύου κατά τη φάση αναδιάρθρωσης της ισχύουσας ανάθεσης πόρων του* (Cumulative  $D_{c,t}$  (in MHz)), μέγεθος το οποίο σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν αναλυτικά στην Παράγραφο 2.4.4 συναρτάται άμεσα με την Αθροιστική Καθυστέρηση Μεταγωγών Καναλιού η οποία εισάγεται στο εν λόγω δίκτυο κατά την αναδιάρθρωσή του. Παράλληλα, ο ανωτέρω Εξυπηρετητής Φάσματος θεωρείται ότι εφαρμόζει και τον προτεινόμενο στην παρούσα μελέτη μηχανισμό βέλτιστης αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων, επιλύοντας ουσιαστικά και το συμπληρωματικό πρόβλημα της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων. Στην Εικόνα 2.8, λοιπόν, και υπό την

ετικέτα ' $w = 0.99$ ', παρουσιάζεται για την αντίστοιχη προκύπτουσα νέα ανάθεση πόρων τόσο ο Παράγοντας Κλίμακας  $\lambda$ , όσο και η επιβάρυνση η οποία αναμένεται να προκληθεί στο ανωτέρω δίκτυο κατά τη φάση προσαρμογής της ισχύουσας ανάθεσης πόρων του σε αυτήν. Συγκρίνοντας, μάλιστα, τα ανωτέρω αντίστοιχα μεγέθη, επαληθεύεται πλήρως η δυνατότητα του προτεινόμενου μηχανισμού να εντοπίζει αναθέσεις πόρων των οποίων η εφαρμογή στο ανωτέρω αναδιαρθρούμενο δίκτυο προκαλεί σχεδόν 65% λιγότερη επιβάρυνση συγκριτικά με την περίπτωση απουσίας του. Η σημαντικά μειωμένη αυτή επιβάρυνση, βέβαια, συνεπάγεται και την αντίστοιχη μείωση τόσο των χαμένων ευκαιριών μετάδοσης, όσο και της διακοπής υπηρεσίας της οποίας καθίστανται οι αντίστοιχοι Δευτερεύοντες Χρήστες αποδέκτες.



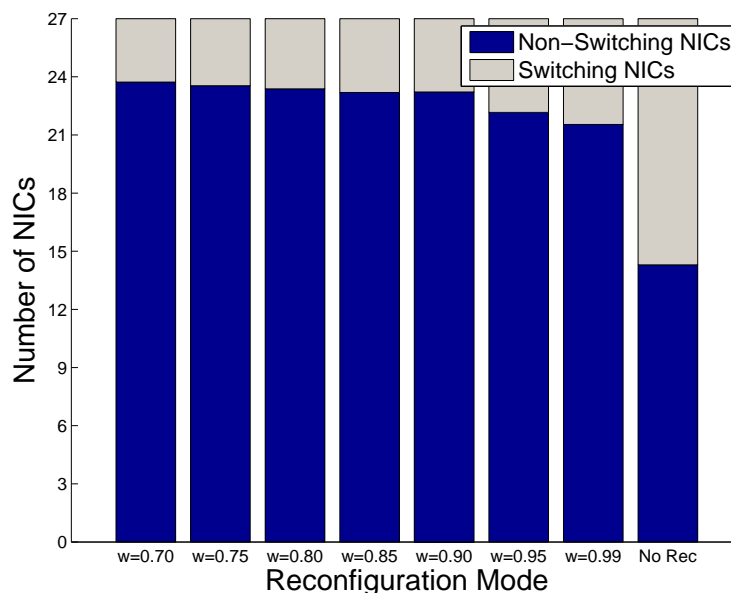
**Εικόνα 2.8:** Επιτυχηθείς Παράγοντας Κλίμακας  $\lambda$  έναντι προκληθείσης επιβάρυνσης κατά την αναδιάρθρωση της ισχύουσας ανάθεσης πόρων του δικτύου τοπολογίας πλέγματος.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο προτεινόμενος μηχανισμός δύναται επίσης να μειώσει ακόμα περισσότερο την προαναφερθείσα επιβάρυνση, θυσιάζοντας ωστόσο ένα μέρος του βαθμού ικανοποίησης των απαιτήσεων των ροών δεδομένων του ανωτέρω αναδιαρθρούμενου δικτύου. Στα πλαίσια του παρόντος σεναρίου, λοιπόν, και με σκοπό την πειραματική επαλήθευση της εν λόγω δυνατότητας, ο ανωτέρω Εξυπηρετητής Φάσματος θεωρείται ότι εκτελεί τον προαναφερθέντα μηχανισμό θέτοντας διαδοχικά την τιμή της παραμέτρου  $w$  ίση με 0.7, 0.75, 0.8, 0.85, 0.9 και 0.95. Ως εκ τούτου, ο Παράγοντας Κλί-

μακας  $\lambda$  κάθε νέας ανάθεσης πόρων επιτρέπεται να προσεγγίζει σε ποσοστό τουλάχιστον 70%, 75%, 80%, 85%, 90% και 95%, αντίστοιχα, τον μέγιστο Παράγοντα Κλίμακας  $\lambda_{opt}$  τον οποίο δύναται να υποστηρίξει το ανωτέρω δίκτυο υπό τη νέα του κατάσταση. Στην Εικόνα 2.8, λοιπόν, και υπό τις ετικέτες ' $w = 0.70$ ', ' $w = 0.75$ ', ' $w = 0.80$ ', ' $w = 0.85$ ', ' $w = 0.90$ ' και ' $w = 0.95$ ', παρουσιάζονται για τις αντίστοιχες προκύπτουσες νέες αναθέσεις πόρων τόσο ο Παράγοντας Κλίμακας  $\lambda$ , όσο και η επιβάρυνση η οποία αναμένεται να προκληθεί στο ανωτέρω δίκτυο κατά τη φάση προσαρμογής της ισχύουσας ανάθεσης πόρων του σε καθεμία εξ αυτών. Μέσω της συγκεκριμένης εικόνας, μάλιστα, καθίσταται προφανές ότι όσο μειώνεται η τιμή της παραμέτρου  $w$ , δηλαδή όσο διευρύνεται η επιτρεπτή απόκλιση μεταξύ του Παράγοντα Κλίμακας  $\lambda$  κάθε νέας ανάθεσης πόρων και του μέγιστου σχετικού παράγοντα  $\lambda_{opt}$  τον οποίο δύναται να υποστηρίξει το ανωτέρω δίκτυο υπό τη νέα του κατάσταση, τόσο μικρότερη επιβάρυνση προκαλείται στο εν λόγω δίκτυο κατά την αναδιάρθρωση της ισχύουσας ανάθεσης πόρων του. Η συγκεκριμένη συμπεριφορά οφείλεται στο γεγονός ότι όσο αυξάνεται η προαναφερθείσα απόκλιση, τόσο περισσότερες ευκαιρίες παρέχονται στο προτεινόμενο μοντέλο της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων ώστε να εντοπίσει μια ανάθεση πόρων η οποία να διαφέρει ελάχιστα από την αντίστοιχη ήδη ισχύουσα. Παράλληλα, η ανωτέρω εικόνα παρουσιάζει ότι όταν η παράμετρος  $w$  λαμβάνει τιμές εντός του διαστήματος  $[0.90, 1)$ , οι αντίστοιχες προκύπτουσες αναθέσεις πόρων δύνανται να μειώσουν αισθητά την προκληθείσα στο ανωτέρω δίκτυο επιβάρυνση, χωρίς ωστόσο να επηρεάζεται σημαντικά ο επιτευχθείς Παράγοντας Κλίμακας  $\lambda$ .

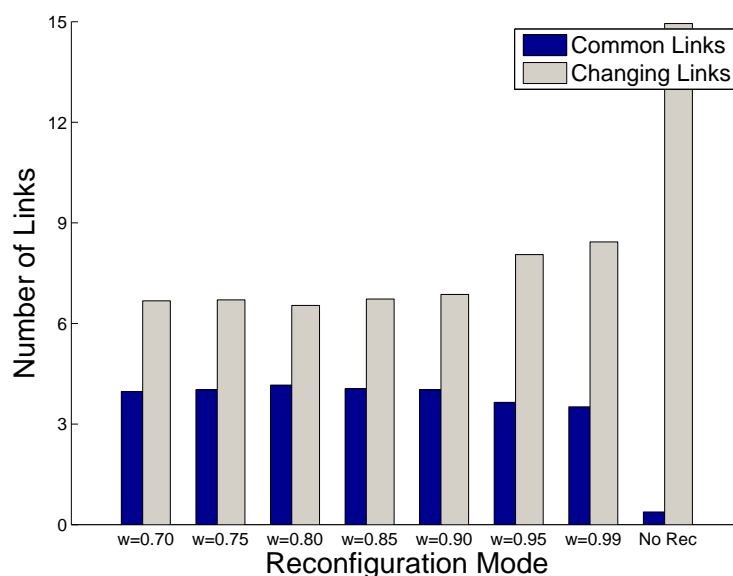
Όπως έχει επίσης αναφερθεί, η ελαχιστοποίηση του αριθμού των διεπαφών δικτύου οι οποίες προβαίνουν σε μεταγωγή καναλιού κατά την αναδιάρθρωση μιας ισχύουσας ανάθεσης πόρων δεν συνεπάγεται και την ελαχιστοποίηση της αντίστοιχης αθροιστικής απόστασης στον άξονα της συχνότητας την οποία αυτές καλούνται να καλύψουν (βλ. Παράγραφο 2.4.4). Ωστόσο, τα δυο αυτά μεγέθη δεν αναμένονται εντελώς ανεξάρτητα μεταξύ τους, γεγονός το οποίο επαληθεύεται πλήρως στην Εικόνα 2.9. Πιο συγκεκριμένα, όταν δεν εφαρμόζεται ο προτεινόμενος μηχανισμός (ετικέτα 'No Rec.'), η προκύπτουσα νέα βέλτιστη ανάθεση πόρων απαιτεί από σχεδόν τις μισές διεπαφές του ανωτέρω δικτύου να προβούν σε μεταγωγή καναλιού κατά τη φάση αναδιάρθρωσης της ισχύουσας ανάθεσης πόρων του. Το γεγονός αυτό, ωστόσο, αυξάνει σημαντικά τόσο τη συνολική ενέργεια

η οποία σπαταλιέται από πλευράς των ασύρματων συσκευών του, όσο και τον όγκο των πακέτων διαχείρισης τα οποία μεταδίδονται προς ολοκλήρωση των απαιτούμενων τροποποιήσεων των παραμέτρων λειτουργίας τους. Κατά την εφαρμογή του προτεινόμενου μηχανισμού (ετικέτα ' $w = 0.99$ '), αντίθετα, η προκύπτουσα νέα ανάθεση πόρων απαιτεί από σημαντικά λιγότερες διεπαφές να προβούν σε μεταγωγή καναλιού, γεγονός το οποίο μειώνει αισθητά την έκταση των προαναφερθεισών επιπτώσεων στην ομαλή λειτουργία του ανωτέρω δικτύου. Μέσω της Εικόνας 2.9, τέλος, καθίσταται επίσης προφανές ότι όσο μικρότερη επιλέγεται η τιμή της παραμέτρου  $w$  κατά την εκτέλεση του ανωτέρω μηχανισμού (ετικέτες ' $w = 0.95$ ', ' $w = 0.90$ ', ' $w = 0.85$ ', ' $w = 0.80$ ', ' $w = 0.75$ ' και ' $w = 0.70$ '), τόσο μειώνονται και οι διεπαφές δικτύου οι οποίες τελικά απαιτείται να προβούν σε μεταγωγή καναλιού κατά την αναδιάρθρωση της ισχύουσας ανάθεσης πόρων του ανωτέρω δικτύου. Η εν λόγω παρατήρηση, βέβαια, δικαιολογείται απόλυτα από το γεγονός ότι όσο μειώνεται η τιμή της παραμέτρου  $w$ , τόσο περισσότερες ευκαιρίες παρέχονται στο προτεινόμενο μοντέλο της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων ώστε να εντοπίσει μια νέα ανάθεση πόρων η οποία να διαφέρει ελάχιστα από την αντίστοιχη ήδη ισχύουσα.



**Εικόνα 2.9:** Αριθμός διεπαφών δικτύου οι οποίες προβαίνουν σε μεταγωγή καναλιού κατά την αναδιάρθρωση της ισχύουσας ανάθεσης πόρων του δικτύου τοπολογίας πλέγματος.

Δεδομένου, τέλος, ότι τα προβλήματα της Εκχώρησης Καναλιών και της Δρομολόγησης Ροών εξετάζονται εν προκειμένω συνδυαστικά, η μείωση των διαφορών μεταξύ



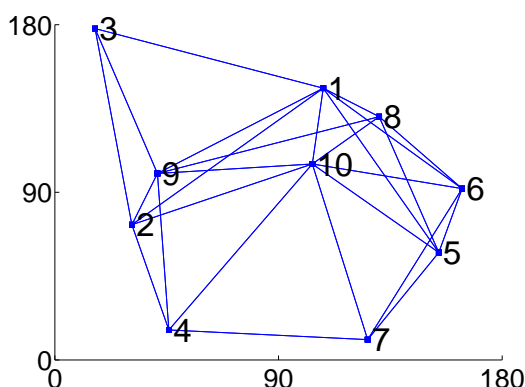
**Εικόνα 2.10:** Αριθμός ζεύξεων οι οποίες παραμένουν ανέπαφες κατά την αναδιάρθρωση της ισχύουσας ανάθεσης πόρων του δικτύου τοπολογίας πλέγματος.

διαδοχικών εντοπιζόμενων αναθέσεων πόρων αναμένεται να μειώσει σημαντικά και τον αριθμό των ζεύξεων οι οποίες τελικά απαιτείται να αναδιαρθρώνονται κατά την προσαρμογή της εκάστοτε ισχύουσας ανάθεσης πόρων ενός δικτύου στην αντίστοιχη νέα βέλτιστη ανάθεση πόρων του. Πιο συγκεκριμένα, και σύμφωνα με την Εικόνα 2.10, όταν δεν εφαρμόζεται ο προτεινόμενος μηχανισμός (ετικέτα 'No Rec.'), σχεδόν καμία ζεύξη της ισχύουσας ανάθεσης πόρων του ανωτέρω δικτύου δεν υφίσταται αυτούσια στην προκύπτουσα νέα βέλτιστη ανάθεση πόρων. Το γεγονός αυτό, ωστόσο, αυξάνει σημαντικά τον όγκο των πακέτων διαχείρισης τα οποία απαιτείται να μεταδοθούν προς ενημέρωση των αντίστοιχων ασύρματων συσκευών σχετικά με τις τροποποιήσεις του υφιστάμενου πλάνου δρομολόγησης, ενώ παράλληλα οδηγεί στην εμφάνιση εκτενών απωλειών πακέτων, δεδομένου ότι όσα πακέτα βρίσκονται ακόμα υπό μετάδοση κατά τη διάλυση των αντίστοιχων ζεύξεων αδυνατούν να προσεγγίσουν τον προορισμό τους. Κατά την εφαρμογή του προτεινόμενου μηχανισμού (ετικέτα ' $w = 0.99$ '), αντίθετα, σημαντικά περισσότερες ζεύξεις παραμένουν ανέπαφες κατά την αναδιάρθρωση της προαναφερθείσας ισχύουσας ανάθεσης πόρων, γεγονός το οποίο μειώνει σημαντικά την προκαλούμενη αναστάτωση στο ανωτέρω δίκτυο. Μέσω της Εικόνας 2.10, τέλος, καθίσταται επίσης προφανές ότι όσο μικρότερη επιλέγεται η τιμή της παραμέτρου  $w$  κατά την εκτέλεση του ανωτέρω μηχανι-

σμού (ετικέτες ' $w = 0.95$ ', ' $w = 0.90$ ', ' $w = 0.85$ ', ' $w = 0.80$ ', ' $w = 0.75$ ' και ' $w = 0.70$ '), τόσο αυξάνονται και οι όμοιες ζεύξεις μεταξύ της ισχύουσας και της αντίστοιχης νέας ανάθεσης πόρων του ανωτέρω δικτύου. Η συγκεκριμένη παρατήρηση, μάλιστα, θεωρείται απολύτως δικαιολογημένη, δεδομένου ότι όσο μειώνεται η τιμή της παραμέτρου  $w$ , τόσο περισσότερες ευκαιρίες παρέχονται στο προτεινόμενο μοντέλο της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων ώστε να εντοπίσει μια νέα ανάθεση πόρων η οποία διαφέρει ελάχιστα από την αντίστοιχη ήδη ισχύουσα.

### 2.7.3 Δίκτυο τυχαίας τοπολογίας

Ένα δεύτερο σύνολο προσομοιώσεων εκτελείται στα πλαίσια της παρούσας μελέτης επί ενός Δικτύου Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας το οποίο αποτελείται από δέκα (10) τυχαία ανεπτυγμένες ασύρματες συσκευές Δευτερευόντων Χρηστών ( $N = 10$ ) εντός μιας γεωγραφικής περιοχής  $180 \times 180 m^2$ . Σε αντίθεση, μάλιστα, με την προηγούμενη τοπολογία πλέγματος, η εμβέλεια μετάδοσης κάθε διεπαφής δικτύου θεωρείται στην προκειμένη περίπτωση άμεσα εξαρτημένη τόσο από το υιοθετούμενο μοντέλο απωλειών διαδρομής, όσο και από το κανάλι λειτουργίας της, ενώ ένα ενδεικτικό γράφημα συνδετικότητας του εν λόγω δικτύου παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.11. Το ίδιο δίκτυο θεωρείται, επίσης, ότι καλείται να εξυπηρετήσει τις απαιτήσεις σε ρυθμό μετάδοσης τεσσάρων (4) ροών δεδομένων ( $h = 4$ ), με τις ασύρματες συσκευές 10, 4, 3, και 9 να αποτελούν τα ακροσημεία πηγής ( $s(h) = [10, 4, 3, 9]$ ) και την ασύρματη συσκευή 8 να αποτελεί το ακροσημείο προορισμού τους ( $d(h) = [8, 8, 8, 8]$ ), αντίστοιχα. Η απαίτηση, δε, σε ρυθμό μετάδοσης κάθε τέτοιας ροής τίθεται (τυχαία) ίση με 40 Mbps, τιμή η οποία θεωρείται επαρκής για να εξυπηρετήσει ακόμα και τις πιο απαιτητικές ροές πολυμεσικού περιεχομένου. Ταυτόχρονα, πέντε (5) Πρωτεύοντες Χρήστες θεωρούνται τυχαία διασκορπισμένοι στο εσωτερικό της ανωτέρω τοπολογίας, αποτρέποντας όσους Δευτερευόντες Χρήστες βρίσκονται εντός ακτίνας 80 m από αυτούς να εκμεταλλεύονται τα (τυχαία) καταλαμβανόμενα κανάλια τους (ενώ το TVWS κανάλι 45 θεωρείται κατελημμένο σε ολόκληρη την έκταση της εν λόγω τοπολογίας). Σε πλήρη συμφωνία, τέλος, με όσα αναφέρθηκαν στην Παράγραφο 2.4.1, την ευθύνη διαχείρισης του ανωτέρω δικτύου φέρει ένας Εξυπηρετητής Φάσματος, ενώ οι λίστες διαθέσιμων καναλιών των ασύρματων συσκευών του υπολογίζονται από μια αρμόδια Βάση Δεδομένων Φάσματος.



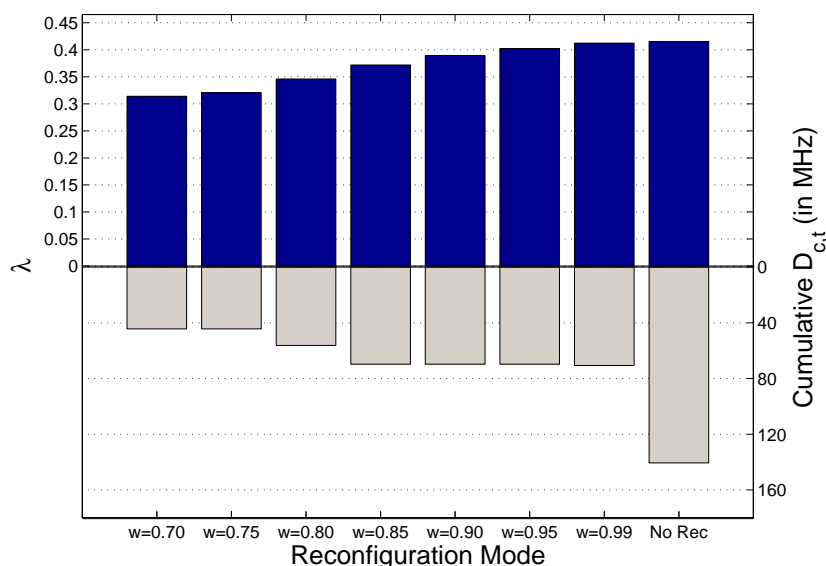
Εικόνα 2.11: Δίκτυο τυχαίας τοπολογίας.

Σύμφωνα και με το παρόν σενάριο προσομοίωσης ο προαναφερθείς εξυπηρετητής φάσματος θεωρείται ότι συλλέγει αρχικά τις λίστες διαθέσιμων καναλιών των ασύρματων συσκευών του ανωτέρω δικτύου και, εν συνεχεία, υπολογίζει την 'ισχύουσα ανάθεση πόρων' του επιλύοντας το πρόβλημα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο (βλ. Ενότητα 2.5). Ο ίδιος εξυπηρετητής θεωρείται, επίσης, επιφορτισμένος με την ευθύνη επικαιροποίησης των προαναφερθεισών λιστών (βλ. Παράγραφο 2.4.1), ενώ στα πλαίσια του παρόντος σεναρίου θεωρείται ότι κάποια στιγμή (στο προσεχές μέλλον) τρεις (3) τυχαίοι ενεργοί Πρωτεύοντες Χρήστες θα παύσουν τις μεταδόσεις τους, ενώ δυο (2) άλλοι θα εμφανιστούν σε τυχαίες θέσεις της ανωτέρω τοπολογίας. Αναπόφευκτα, λοιπόν, η προαναφερθείσα ισχύουσα ανάθεση πόρων θα καταστεί παρωχημένη, απαιτώντας ουσιαστικά από τον ανωτέρω Εξυπηρετητή Φάσματος να υπολογίσει άμεσα μια νέα βέλτιστη ανάθεση πόρων η οποία να συμμορφώνεται πλήρως με τη νέα κατάσταση στην οποία πρόκειται να μεταπέσει το ανωτέρω δίκτυο. Σημειώνεται, τέλος, ότι και το παρόν σενάριο εκτελείται σε σαράντα (40) ανεξάρτητες μεταξύ τους επαναλήψεις (για λόγους οι οποίοι αναφέρθηκαν αναλυτικά στην Παράγραφο 2.7.2), ενώ οι τιμές των αντίστοιχων προκύπτόντων μεγεθών μεσοτιμούνται πριν παρουσιαστούν συγκεντρωτικά στα ακόλουθα διαγράμματα.

Ο ανωτέρω Εξυπηρετητής Φάσματος θεωρείται ότι αρχικά απλά επιλύει εκ νέου το πρόβλημα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο, λαμβάνοντας προφανώς υπόψιν τη νέα κατάσταση στην οποία πρόκειται να μεταπέσει το ανωτέρω δίκτυο. Στην Εικόνα 2.12, λοιπόν, και υπό την ετικέτα 'No Rec.', παρουσιάζονται τόσο ο Παράγοντας Κλίμακας  $\lambda$  της προκύπτουσας νέας βέλτιστης ανάθεσης πόρων,



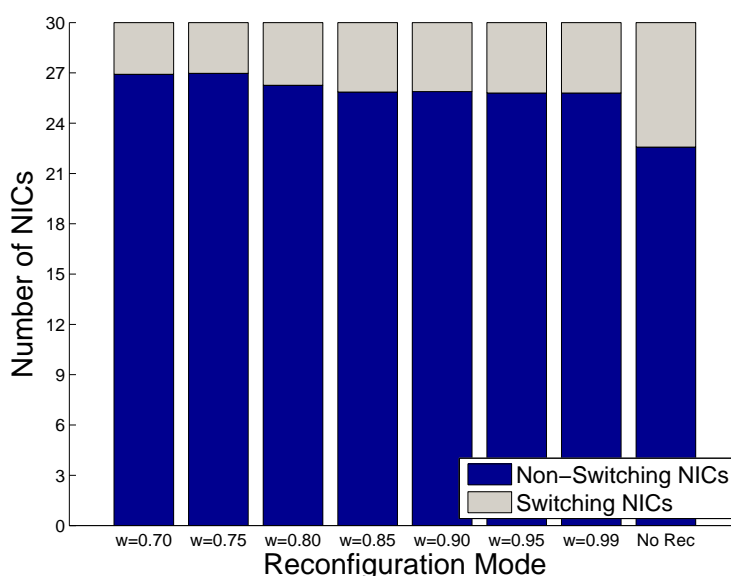
όσο και η επιβάρυνση η οποία αναμένεται να προκληθεί στο ανωτέρω δίκτυο κατά τη φάση προσαρμογής της ισχύουσας ανάθεσης πόρων του σε αυτήν. Παράλληλα, ο ανωτέρω εξυπηρετητής θεωρείται ότι εφαρμόζει και τον προτεινόμενο στην παρούσα μελέτη μηχανισμό βέλτιστης αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων, ενώ υπό την ετικέτα ' $w = 0.99$ ' παρουσιάζονται τα αντίστοιχα μεγέθη τα οποία χαρακτηρίζουν τη νέα ανάθεση πόρων η οποία εντοπίστηκε βάσει αυτού. Συγκρίνοντας, λοιπόν, τα ανωτέρω μεγέθη, καθίσταται προφανής η δυνατότητα του προτεινόμενου μηχανισμού να εντοπίζει αναθέσεις πόρων των οποίων η εφαρμογή στο ανωτέρω αναδιαρθρούμενο δίκτυο προκαλεί σημαντικά μειωμένη επιβάρυνση συγκριτικά με την περίπτωση απουσίας του.



**Εικόνα 2.12:** Επιτευχθείς Παράγοντας Κλίμακας  $\lambda$  έναντι προκληθείσης επιβάρυνσης κατά την αναδιάρθρωση της ισχύουσας ανάθεσης πόρων του δικτύου τυχαίας τοπολογίας.

Ο ανωτέρω Εξυπηρετητής Φάσματος θεωρείται, επίσης, ότι εκτελεί τον προαναφερθέντα μηχανισμό θέτοντας διαδοχικά την τιμή της παραμέτρου  $w$  ίση με 0.7, 0.75, 0.8, 0.85, 0.9 και 0.95. Ως εκ τούτου, ο Παράγοντας Κλίμακας  $\lambda$  κάθε νέας ανάθεσης πόρων επιτρέπεται να προσεγγίζει σε ποσοστό τουλάχιστον 70%, 75%, 80%, 85%, 90% και 95%, αντίστοιχα, τον μέγιστο Παράγοντα Κλίμακας  $\lambda_{opt}$  τον οποίο δύναται να υποστηρίξει το ανωτέρω δίκτυο υπό τη νέα του κατάσταση. Στην Εικόνα 2.12, λοιπόν, και υπό τις ετικέτες ' $w = 0.70$ ', ' $w = 0.75$ ', ' $w = 0.80$ ', ' $w = 0.85$ ', ' $w = 0.90$ ' και ' $w = 0.95$ ', παρουσιάζονται για τις αντίστοιχες προκύπτουσες αναθέσεις πόρων τόσο ο Παράγοντας Κλίμακας

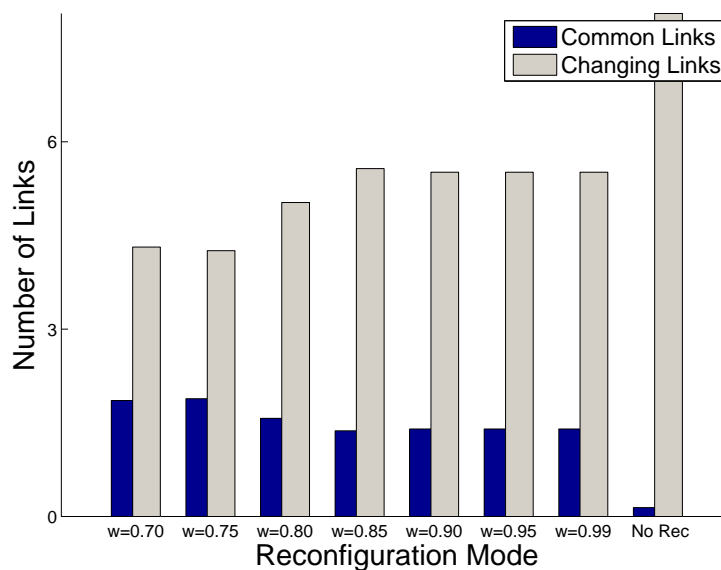
λ, όσο και η επιβάρυνση η οποία αναμένεται να προκληθεί στο ανωτέρω δίκτυο κατά την προσαρμογή της ισχύουσας ανάθεσης πόρων του σε καθεμία εξ αυτών. Μέσω της συγκεκριμένης εικόνας, μάλιστα, καθίσταται προφανές ότι όσο μειώνεται η τιμή της παραμέτρου  $w$ , τόσο μειώνεται και η επιβάρυνση η οποία προκαλείται στο ανωτέρω δίκτυο κατά την αναδιάρθρωση της ισχύουσας ανάθεσης πόρων του. Παράλληλα, επαληθεύεται ότι όταν η παράμετρος  $w$  λαμβάνει τιμές εντός του διαστήματος  $[0.90, 1)$ , οι προκύπτουσες αναθέσεις πόρων δύνανται να μειώσουν αισθητά την προκληθείσα στο ανωτέρω δίκτυο επιβάρυνση, χωρίς μάλιστα να επηρεάζεται σημαντικά ο επιτευχθείς Παράγοντας Κλίμακας  $\lambda$ .



**Εικόνα 2.13:** Αριθμός διεπαφών δικτύου οι οποίες προβαίνουν σε μεταγωγή καναλιού κατά την αναδιάρθρωση της ισχύουσας ανάθεσης πόρων του δικτύου τυχαίας τοπολογίας.

Σε πλήρη αντιστοιχία, επίσης, με την ανωτέρω Εικόνα 2.9, η Εικόνα 2.13 επιδεικνύει ότι όταν δεν εφαρμόζεται ο προτεινόμενος μηχανισμός (ετικέτα 'No Rec. '), η προκύπτουσα νέα βέλτιστη ανάθεση πόρων απαιτεί από έναν μεγάλο αριθμό διεπαφών να προβούν σε μεταγωγή καναλιού κατά την αναδιάρθρωση της ισχύουσας ανάθεσης πόρων του ανωτέρω δικτύου. Σε περίπτωση, αντίθετα, εφαρμογής του προαναφερθέντος μηχανισμού (ετικέτα ' $w = 0.99$ '), ο εν λόγω αριθμός μειώνεται αισθητά, μειώνοντας αντίστοιχα τόσο τη συνολική ενέργεια η οποία σπαταλιέται από πλευράς των αναδιαρθρούμενων ασύρματων συσκευών, όσο και τον όγκο των πακέτων διαχείρισης τα οποία μεταδίδονται προς

ολοκλήρωση των απαιτούμενων τροποποιήσεων των παραμέτρων λειτουργίας τους. Παράλληλα, καθίσταται προφανές ότι όσο μικρότερη επιλέγεται η τιμή της παραμέτρου  $w$  κατά την εκτέλεση του ανωτέρω μηχανισμού (ετικέτες ' $w = 0.95$ ', ' $w = 0.90$ ', ' $w = 0.85$ ', ' $w = 0.80$ ', ' $w = 0.75$ ' και ' $w = 0.70$ '), τόσο μειώνονται και οι διεπαφές οι οποίες απαιτείται να προβούν σε μεταγωγή καναλιού κατά την αναδιάρθρωση της ισχύουσας ανάθεσης πόρων του ανωτέρω δικτύου.



**Εικόνα 2.14:** Αριθμός ζεύξεων οι οποίες παραμένουν ανέπαφες κατά την αναδιάρθρωση της ισχύουσας ανάθεσης πόρων του δικτύου τυχαίας τοπολογίας.

Όμοια με την Εικόνα 2.10, τέλος, η Εικόνα 2.14 επιδεικνύει ότι όταν δεν εφαρμόζεται ο προτεινόμενος μηχανισμός (ετικέτα 'No Rec.'), σχεδόν καμία ζεύξη της ισχύουσας ανάθεσης πόρων του ανωτέρω δικτύου δεν υφίσταται αυτούσια στην προκύπτουσα νέα βέλτιστη ανάθεση πόρων του. Κατά την εφαρμογή του εν λόγω μηχανισμού (ετικέτα ' $w = 0.99$ '), αντίθετα, σημαντικά περισσότερες ζεύξεις παραμένουν ανέπαφες, γεγονός το οποίο μειώνει τόσο τον όγκο των πακέτων διαχείρισης τα οποία απαιτείται να μεταδοθούν προς ενημέρωση των αντίστοιχων ασύρματων συσκευών σχετικά με τις τροποποιήσεις του υφιστάμενου πλάνου δρομολόγησης, όσο και την έκταση του φαινομένου των απωλειών πακέτων. Παράλληλα, καθίσταται προφανές ότι όσο μικρότερη επιλέγεται η τιμή της παραμέτρου  $w$  κατά την εκτέλεση του ανωτέρω μηχανισμού (ετικέτες ' $w = 0.95$ ', ' $w = 0.90$ ', ' $w = 0.85$ ', ' $w = 0.80$ ', ' $w = 0.75$ ' και ' $w = 0.70$ '), τόσο περισσότερες ζεύξεις

παραμένουν ανέπαφες κατά την αναδιάρθρωση της ισχύουσας ανάθεσης πόρων του ανωτέρω δικτύου. Η συγκεκριμένη αύξηση, ωστόσο, δεν προκύπτει ομοιόμορφη, γεγονός το οποίο θεωρείται απόλυτα δικαιολογημένο, δεδομένου ότι το εν λόγω όφελος αποτελεί μια έμμεση προσφορά του ανωτέρω μηχανισμού, και όχι κάποιον άμεσο στόχο του.

## 2.8 Σύνοψη και συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο μοντελοποιήθηκε αρχικά μια εκδοχή του δημοφιλούς προβλήματος της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης λαμβάνοντας υπόψιν τις αρχές λειτουργίας των προηγμένων Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, τις πρόσφατες επιταγές των αρμοδίων ρυθμιστικών αρχών, αλλά κυρίως τις προδιαγραφές των σύγχρονων συσκευών Λογισμικόριστης Ραδιοεπικοινωνίας. Το προκύπτον μοντέλο αποτελεί ουσιαστικά ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού, και πιο συγκεκριμένα ένα πρόβλημα Ροής Πολλαπλών Αγαθών επαυξημένο με δεσμεύσεις αποφυγής παρεμβολών μεταξύ παρακείμενων μεταδόσεων.

Με βάση το ανωτέρω πρόβλημα προδιαγράφηκε εν συνεχεία ένας μηχανισμός ελαχιστοποίησης της επιβάρυνσης η οποία προκαλείται στα Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας κατά την αναδιάρθρωση των αναθέσεων πόρων τους. Τη συγκεκριμένη ανάγκη υπαγορεύει το γεγονός ότι η χρονικά μεταβαλλόμενη δραστηριότητα των Πρωτευόντων Χρηστών επηρεάζει έντονα τη διαθεσιμότητα των καναλιών των αντίστοιχων Δευτερευόντων Χρηστών, καθιστώντας τις αναθέσεις πόρων των τελευταίων συχνά παρωχημένες. Ταυτόχρονα, η αναδιάρθρωση αναθέσεων πόρων αποτελεί στα πλαίσια των ανωτέρω δικτύων μια εξαιρετικά απαιτητική διαδικασία, γεγονός το οποίο οφείλεται συνδυαστικά στις προδιαγραφές μεταγωγής καναλιού των σύγχρονων συσκευών Λογισμικόριστης Ραδιοεπικοινωνίας και στην έντονη ετερογένεια η οποία χαρακτηρίζει τα διαθέσιμα κανάλια στη Γνωσιακή Ραδιοεπικοινωνία. Ακριβέστερα, ο προαναφερθείς μηχανισμός μοντελοποιήθηκε ως ένα – συμπληρωματικό στο ανωτέρω – πρόβλημα βελτιστοποίησης Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού με αντικειμενικό στόχο τον εντοπισμό αναθέσεων πόρων οι οποίες εισάγουν την ελάχιστη δυνατή επιβάρυνση κατά την εφαρμογή τους στα αναδιαρθρούμενα δίκτυα. Εναλλακτικά, ο προτεινόμενος μηχανισμός στοχεύει στον εντοπισμό αναθέσεων πόρων οι οποίες φέρουν ελάχιστες διαφορές από αυτές που ισχύουν ήδη στα αντίστοιχα αναδιαρθρούμενα δίκτυα, επιτυγχάνοντας έτσι την ολοκλή-

ρωση της διαδικασίας προσαρμογής των δεύτερων αναθέσεων στις πρώτες στον ελάχιστο δυνατό χρόνο. Ο ίδιος μηχανισμός επιτρέπει, μάλιστα, και την ακόμα μεγαλύτερη μείωση της προαναφερθείσας επιβάρυνσης, με αντάλλαγμα ωστόσο από τη λειτουργία των αναδιαρθρούμενων δικτύων να μην επανέρχεται στο βέλτιστο δυνατό σημείο της. Σημειώνεται, τέλος, ότι ο εν λόγω μηχανισμός συμμορφώνεται πλήρως τόσο με τις προδιαγραφές των σύγχρονων συσκευών Λογισμικόριστης Ραδιοεπικοινωνίας, όσο και με τις λεπτομέρειες των κανονιστικών πλαισίων τα οποία διέπουν ήδη την ευκαιριακή εκμετάλλευση συγκεκριμένων ζωνών του ραδιοφάσματος.

Οι δυνατότητες και τα οφέλη του προδιαγραφόμενου μηχανισμού αποδοτικής αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων αξιολογήθηκαν στο παρόν κεφάλαιο βάσει εκτενών σεναρίων προσομοιώσεων, τα οποία αναπτύχθηκαν σε ένα περιβάλλον που προσεγγίζει βέλτιστα αυτό των πραγματικών Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Βάσει των εν λόγω προσομοιώσεων επαληθεύθηκε, κατ' αρχήν, η δυνατότητα του προτεινόμενου μηχανισμού να εντοπίζει αναθέσεις πόρων των οποίων η εφαρμογή στα αναδιαρθρούμενα δίκτυα δύναται να προκαλέσει σημαντικά μειωμένη επιβάρυνση συγκριτικά με τη συμβατική τεχνική αναδιάρθρωσης. Η μειωμένη αυτή επιβάρυνση, μάλιστα, μεταφράζεται άμεσα σε λιγότερες χαμένες ευκαιρίες μετάδοσης και, κατ' επέκταση, σε αύξηση του βαθμού χρησιμοποίησης του ραδιοφάσματος, ενώ παράλληλα συμβάλλει και στην προστασία της Ποιότητας Υπηρεσίας και Εμπειρίας των αντίστοιχων Δευτερευόντων Χρηστών. Ταυτόχρονα, επαληθεύθηκε η δυνατότητα του ανωτέρω μηχανισμού να μειώνει περαιτέρω την εν λόγω επιβάρυνση, με αντάλλαγμα ωστόσο από τη λειτουργία των αναδιαρθρούμενων δικτύων να μην επανέρχεται στο βέλτιστο δυνατό σημείο της. Παράλληλα, ο ίδιος μηχανισμός απεδείχθη ικανός να μειώνει αισθητά και τον αριθμό των διεπαφών δικτύου οι οποίες προβαίνουν σε μεταγωγή καναλιού κατά την αναδιάρθρωση παρωχημένων αναθέσεων πόρων. Η συγκεκριμένη δυνατότητα, μάλιστα, συνεπάγεται άμεσα και τη μείωση τόσο της ενέργειας η οποία σπαταλιέται από πλευράς των αντίστοιχων ασύρματων συσκευών, όσο και του όγκου των πακέτων διαχείρισης τα οποία απαιτείται να μεταδίδονται προς ολοκλήρωση των τροποποιήσεων των παραμέτρων λειτουργίας τους. Ο ανωτέρω μηχανισμός, τέλος, απεδείχθη ικανός να διατηρεί και περισσότερες ζεύξεις ανέπαφες μεταξύ διαδοχικών εντοπιζόμενων αναθέσεων πόρων, μειώνοντας αντίστοιχα τόσο τον όγκο των πακέτων διαχείρισης τα οποία απαιτείται να μεταδίδονται προς ανανέωση των υφιστά-

μενων πλάνων δρομολόγησης, όσο και την έκταση του ανακúπτοντος φαινομένου των απωλειών πακέτων.

## Κεφάλαιο 3

# Πλησιοβέλτιστη αναδιάρθρωση αναθέσεων πόρων σε Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας

Στο προηγούμενο κεφάλαιο μοντελοποιήθηκε αρχικά μια εκδοχή του προβλήματος της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο, η οποία θεωρείται κατάλληλη για εφαρμογή σε πολυ-αλματικά Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Εν συνεχεία, μοντελοποιήθηκε το συμπληρωματικό πρόβλημα της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων, το οποίο στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της επιβάρυνσης η οποία προκαλείται στα εν λόγω δίκτυα κατά τη συχνότερη και πιο χρονοβόρα αναδιάρθρωση των αναθέσεων πόρων τους. Και τα δυο αυτά προβλήματα, ωστόσο, μοντελοποιήθηκαν μαθηματικά ως προβλήματα βελτιστοποίησης Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού, γεγονός το οποίο τα εντάσσει στην κατηγορία των δυσεπίλυτων προβλημάτων NP-hard [15]. Αναπόφευκτα, λοιπόν, η δυσκολία επίλυσής τους αυξάνει εκθετικά με το μέγεθός τους, χαρακτηριστικό το οποίο θέτει σε κίνδυνο τη δυνατότητα εφαρμογής τους σε πραγματικά Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας.

Στοχεύοντας στην αποκατάσταση της πρακτικότητας των ανωτέρω μηχανισμών, παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο κατάλληλες μέθοδοι οι οποίες δύνανται να παρέχουν εξαιρετικά γρήγορα ποιοτικές – αλλά όχι βέλτιστες – λύσεις στα ανωτέρω προβλήματα βελτιστοποίησης, ακόμα και όταν αυτά αναπτύσσονται επί Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας μεγάλου μεγέθους. Ιδιαίτερη έμφαση, βέβαια, δίδεται στη μέθοδο επίλυσης του

προβλήματος της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων, κυρίως λόγω της ελάχιστης προσοχής την οποία αυτό λαμβάνει στη σύγχρονη βιβλιογραφία.

### 3.1 Κίνητρα και οφέλη

Το πρόβλημα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο μοντελοποιήθηκε στην Ενότητα 2.5 ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης και, πιο συγκεκριμένα, ως ένα πρόβλημα Μεγιστοποίησης Ταυτόχρονης Ροής Πολλαπλών Αγαθών επαυξημένο με δεσμεύσεις αποφυγής παρεμβολών μεταξύ παρακείμενων μεταδόσεων. Εν συνεχεία, μοντελοποιήθηκε – επίσης ως πρόβλημα βελτιστοποίησης – το συμπληρωματικό πρόβλημα της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων (βλ. Ενότητα 2.6) με σκοπό τον υπολογισμό εναλλακτικών αναθέσεων πόρων, οι οποίες να μην ταυτίζονται από πλευράς αποδοτικότητας με αυτές του προβλήματος της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο, αλλά παράλληλα ελαχιστοποιούν την Αθροιστική Καθυστέρηση Μεταγωγών Καναλιού η οποία προκαλείται κατά την εφαρμογή τους στα αναδιαρθρούμενα Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας.

Η γραμμική φύση τόσο των αντικειμενικών συναρτήσεων των ανωτέρω μοντελοποιούμενων προβλημάτων, όσο και των (αν)ισοτήτων από τις οποίες αυτές βρίσκονται πλαισιωμένες, σε συνδυασμό με την εμπλοκή στις τελευταίες όχι μόνο συνεχών, αλλά και ακέραιων μεταβλητών απόφασης, εντάσσουν τα εν λόγω προβλήματα στην κατηγορία των προβλημάτων βελτιστοποίησης Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού. Ο εντοπισμός βέλτιστων λύσεων σε τέτοιου είδους προβλήματα, ωστόσο, αποτελεί ακόμα και σήμερα μια εξαιρετικά περίπλοκη και απαιτητική διαδικασία. Αναλυτικότερα, είναι γεγονός ότι η εξαντλητική απαρίθμηση και αξιολόγηση του συνόλου των εφικτών λύσεων κάθε σχετικού προβλήματος, ήτοι του συνόλου των λύσεων οι οποίες περιέχονται εντός του αντίστοιχου κυρτού πολυέδρου (βλ. Παράγραφο 2.2.2), θεωρείται αδύνατη στην πράξη. Ο αριθμός των εν λόγω λύσεων, άλλωστε, προκύπτει εξαιρετικά μεγάλος ακόμα και για τα πιο μικρά προβλήματα Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού, γεγονός το οποίο καθιστά τη διαχείρισή τους εξαιρετικά δύσκολη με τα υπάρχοντα τεχνολογικά μέσα. Η συγκεκριμένη δυσκολία συχνά αντιμετωπίζεται με την εφαρμογή των λεγόμενων τεχνικών *ακριβούς* (exact) επίλυσης. Οι εν λόγω μέθοδοι στοχεύουν στην επιλεκτική απαρίθμηση των προαναφερθέντων συνόλων, υποβαθμίζοντας έτσι δραστικά τον



συνολικό χρόνο που απαιτεί ο εντοπισμός βέλτιστων λύσεων στο εσωτερικό τους. Οι συγκεκριμένες τεχνικές, ωστόσο, απαιτούν την εκμετάλλευση σημαντικών υπολογιστικών πόρων (μνήμη, επεξεργαστική ισχύς, κ.α.), ενώ αν και βελτιωμένος, ο συνολικός χρόνος εκτέλεσής τους θεωρείται ακόμα απαγορευτικός σε περιπτώσεις εφαρμογής τους σε προβλήματα μεγάλου μεγέθους. Συχνά, λοιπόν, οι τεχνικές ακριβούς επίλυσης πλαισιώνονται από προσεγγιστικές μεθόδους, οι οποίες αν και δεν θεωρούνται ικανές να εντοπίζουν από μόνες τους βέλτιστες λύσεις στα επιλυόμενα προβλήματα, δύνανται να παρέχουν ενδείξεις σχετικά με τα σημεία των αντίστοιχων χώρων εφικτών λύσεων στα οποία αυτές είναι πιθανότερο να εντοπιστούν. Είναι γεγονός, ωστόσο, ότι αν και η συνδυαστική αυτή προσέγγιση δύναται υπό προϋποθέσεις να παρέχει πολύ καλά αποτελέσματα, η αποδοτικότητά της εξαρτάται άμεσα από τη δομή των κατά περίπτωση επιλυόμενων προβλημάτων βελτιστοποίησης. Στη γενική περίπτωση, μάλιστα, και η συγκεκριμένη τεχνική θεωρείται ανίκανη να εντοπίζει βέλτιστες λύσεις σε προβλήματα Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού μεγάλου μεγέθους εντός αποδεκτών χρονικών διαστημάτων εκτέλεσης. Μονόδρομο, λοιπόν, για την αποδοτική προσέγγιση τέτοιου είδους προβλημάτων αποτελούν σήμερα οι λεγόμενες *ευρετικές μέθοδοι* (heuristic methods) ή απλά *ευρετικές* (heuristics). Οι εν λόγω τεχνικές στοχεύουν ουσιαστικά στη δραματική μείωση της πολυπλοκότητας και, κατ' επέκταση, του χρόνου επίλυσης προβλημάτων Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού, εις βάρος όμως της ποιότητας των λύσεων τις οποίες αυτές δύνανται να παρέχουν. Ακριβέστερα, οι ευρετικές μέθοδοι δύνανται να υπολογίζουν αποκλειστικά *πλησιοβέλτιστες* (near-optimal) λύσεις, δηλαδή λύσεις οι οποίες είναι μεν εφικτές για τα επιλυόμενα προβλήματα, αλλά αποκλίνουν από τις αντίστοιχες βέλτιστες κατά ένα άγνωστο ποσοστό.

Είναι γεγονός, βέβαια, ότι αρκετές μελέτες της σύγχρονης βιβλιογραφίας ασχολούνται ήδη με την προσέγγιση διαφόρων εκδοχών του προβλήματος της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης μέσω ευρετικών μεθόδων. Συνήθη πρακτική τους, ωστόσο, αποτελεί η *κάθετη αποδόμηση* (vertical decomposition) [84] του εν λόγω προβλήματος στα δύο επιμέρους υπο-προβλήματά του. Ακριβέστερα, η πλειοψηφία των σχετικών μεθόδων απαιτούν την αρχική επίλυση του προβλήματος της δρομολόγησης με σκοπό τον καθορισμό τόσο των ζεύξεων των εξεταζόμενων δικτύων οι οποίες θα πρέπει να καθίστανται ενεργές, όσο και του ρυθμού μετάδοσης τον οποίο θα πρέπει να υποστηρίζει καθεμία

εξ αυτών, ενώ σε δεύτερη φάση απαιτούν την επίλυση του προβλήματος της εκχώρησης καναλιών σε ασύρματες συσκευές με σκοπό τον εντοπισμό σχετικών αναθέσεων οι οποίες να μπορούν να υποστηρίξουν την απροβλημάτιστη λειτουργία των προαναφερθεισών ζεύξεων. Δεδομένου, ωστόσο, ότι κατά την επίλυση του πρώτου προβλήματος αγνοούνται πλήρως οι απαιτήσεις του δεύτερου, ο εντοπισμός αναθέσεων καναλιών οι οποίες να δύνανται να υποστηρίξουν την ταυτόχρονη ενεργοποίηση των απαιτούμενων ζεύξεων προκύπτει αδύνατος στην πράξη. Ως εκ τούτου, οι ανωτέρω μέθοδοι επιβάλουν τον *χρονοπρογραμματισμό* (scheduling) των επιθυμητών μεταδόσεων, απαιτώντας ουσιαστικά από τις ασύρματες συσκευές των διαχειριζόμενων δικτύων να εφαρμόζουν διαφορετικές αναθέσεις μη-παρεμβαλλόμενων καναλιών σε κάθε χρονοθυρίδα. Τέτοιου είδους τεχνικές, ωστόσο, υποθέτουν ότι οι μεταγωγές καναλιών πραγματοποιούνται χωρίς κανένα απολύτως κόστος για τα αντίστοιχα δίκτυα, θεώρηση η οποία αντιτίθεται στις αρχές λειτουργίας τόσο της Γνωσιακής, όσο και της Λογισμικόριστης Ραδιοεπικοινωνίας.

Όσες εργασίες, αντίθετα, αποφεύγουν την προαναφερθείσα μη-πρακτική υπόθεση προσεγγίζουν το ανωτέρω πρόβλημα εφαρμόζοντας *ευρετικές μεθόδους γενικού σκοπού* (general-purpose heuristics), ήτοι μεθόδους οι οποίες δύνανται να προσεγγίζουν πλησιοβέλτιστα οποιοδήποτε πρόβλημα Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού, ανεξαρτήτως της δομής ή των ιδιαιτεροτήτων του. Με όμοιο τρόπο, λοιπόν, επιλέγεται να προσεγγιστεί το πρόβλημα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο και στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, εφαρμόζοντας κατ' αρχήν τη δημοφιλή ευρετική μέθοδο γενικού σκοπού ονόματι 'Diving' [20]. Η συγκεκριμένη μέθοδος, ωστόσο, αν και πολυωνυμικού χρόνου (βλ. Παράγραφο 2.2.2), αδυνατεί να εντοπίζει πάντοτε εφικτές λύσεις στα κατά περίπτωση επιλυόμενα προβλήματα (ή αλλιώς παγιδεύεται συχνά σε χώρους ανέφικτων λύσεων). Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, λοιπόν, και με σκοπό την αντιμετώπιση της εν λόγω αδυναμίας, προδιαγράφεται ένας μηχανισμός *υπαναχώρησης* (backtrack), ο οποίος εισάγεται στην τυπική διαδικασία εκτέλεσης της ανωτέρω μεθόδου και της επιτρέπει να ανανήφει από πιθανές παγιδεύσεις σε χώρους ανέφικτων λύσεων. Τέλος, το παρόν πρόβλημα ενδιαφέροντος προσεγγίζεται και με τη βοήθεια της τετριμμένης ευρετικής μεθόδου 'Truncated MIP' [20], η οποία ουσιαστικά εκμεταλλεύεται την ιδιότητα των σύγχρονων λυτών να εντοπίζουν γρήγορα εφικτές λύσεις στα επιλυόμενα προβλήματα Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού και, εν συνεχεία, να τις

βελτιώνουν προοδευτικά έως ότου καταλήξουν στις αντίστοιχες βέλτιστες λύσεις.

Υπενθυμίζεται, ωστόσο, ότι κύριο στόχο της παρούσας μελέτης αποτελεί η πρόταση ενός καινοτόμου μηχανισμού αποδοτικής αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων, οπότε η εξαντλητική ενασχόληση με την πλησιοβέλτιστη επίλυση του προβλήματος της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο δεν εντάσσεται στους άμεσους στόχους της. Δεδομένης, δε, και της γενικότητας του προτεινόμενου μηχανισμού, διαφορετικοί αντικειμενικοί στόχοι ή μοντέλα μερισμού φάσματος θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στη θέση του προαναφερθέντος προβλήματος, γεγονός το οποίο καθιστά προφανές ότι η περαιτέρω εμβάθυνση σε αυτό θα έστρεφε το ενδιαφέρον της παρούσας ερευνητικής προσπάθειας προς τη λάθος κατεύθυνση.

Όσον αφορά, λοιπόν, το καινοφανές πρόβλημα της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων, είναι γεγονός ότι η ελάχιστη σημασία η οποία δίδεται επ' αυτού στη σύγχρονη βιβλιογραφία δυσκολεύει σημαντικά την προσπάθεια της πλησιοβέλτιστης επίλυσής του. Μια προφανή επιλογή, βέβαια, θα αποτελούσε η προσέγγισή του με τη βοήθεια μιας εκ των ανωτέρω ευρετικών μεθόδων, δεδομένης της γενικότητάς τους και της δυνατότητας εφαρμογής τους σε οποιοδήποτε πρόβλημα Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού. Και οι τρεις ανωτέρω μέθοδοι, ωστόσο, αποδεικνύονται στην προκειμένη περίπτωση αδύναμες να προσεγγίσουν αποδοτικά το μακράν πιο απαιτητικό και περίπλοκο πρόβλημα της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων. Χαρακτηριστικό είναι, μάλιστα, το γεγονός ότι ακόμα και η αποδοτικότερη σχετική μέθοδος – ονόματι 'Truncated MIP' – αδυνατεί συχνά να εντοπίσει όχι ποιοτικές, αλλά ούτε καν εφικτές λύσεις στο ανωτέρω πρόβλημα, ακόμα και ύστερα από απαγορευτικά μεγάλα χρονικά διαστήματα εκτέλεσης. Δεδομένης, λοιπόν, της δυσμενούς αυτής κατάστασης, προτείνεται στα πλαίσια της παρούσας μελέτης η *εξειδικευμένη στο συγκεκριμένο πρόβλημα ευρετική μέθοδος* (problem-specific heuristic) ονόματι 'Reduced Search Space Reconfiguration' (RSSR). Η εν λόγω μέθοδος εκμεταλλεύεται ουσιαστικά την ιδιαίτερη δομή του ανωτέρω προβλήματος, προχωρώντας στην αποδόμησή του σε μια ακολουθία υπο-προβλημάτων σημαντικά μειωμένων διαστάσεων. Ακριβέστερα, κάθε σχετικό υπο-πρόβλημα αποτελεί ένα ακόμα πρόβλημα Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων, στο οποίο όμως εμπλέκονται σημαντικά λιγότερες ακέραιες μεταβλητές απόφασης και, ως εκ τούτου, αυτό χαρακτηρίζεται από δραματικά μειωμένη πολυπλοκότητα. Όπως, μάλιστα, θα καταστεί φανερό και

παρακάτω, η συγκεκριμένη μέθοδος δύναται να παρέχει ποιοτικές πλησιοβέλτιστες λύσεις εντός άκρως αποδεκτών χρονικών διαστημάτων ακόμα και σε προβλήματα τα οποία αναπτύσσονται επί Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνία μεγάλου μεγέθους, αποκαθιστώντας έτσι την πρακτικότητα του προτεινόμενου μηχανισμού αποδοτικής αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων.

## 3.2 Θεωρητικό και τεχνικό υπόβαθρο

Είναι γεγονός ότι η εξαντλητική απαρίθμηση του συνόλου των εφικτών λύσεων κάθε προβλήματος Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού με σκοπό τον εντοπισμό της βέλτιστης εξ αυτών θεωρείται αδύνατη στην πράξη. Ο αριθμός των εν λόγω λύσεων, άλλωστε, προκύπτει δύσκολα διαχειρίσιμος ακόμα και για τα πιο μικρά σχετικά προβλήματα. Συχνά, λοιπόν, εφαρμόζονται μέθοδοι επιλεκτικής απαρίθμησης των προαναφερθέντων συνόλων, οι οποίες δύνανται να χωριστούν σε δυο μεγάλες κατηγορίες, στις ακριβείς και στις ευρετικές τεχνικές. Οι τεχνικές της πρώτης κατηγορίας δεν πραγματοποιούν καμία υποχώρηση όσον αφορά τη βελτιστότητα των εντοπιζόμενων λύσεων, αλλά χαρακτηρίζονται από αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστικούς πόρους και χρόνο εκτέλεσης. Οι τεχνικές της δεύτερης κατηγορίας, αντίθετα, δίδουν μεγαλύτερη έμφαση στην υψηλή ταχύτητα υπολογισμού των απαιτούμενων λύσεων, με αντάλλαγμα ωστόσο από τις τελευταίες να αποκλίνουν από τις αντίστοιχες βέλτιστες κατά ένα άγνωστο ποσοστό.

Ως δημοφιλέστερες τεχνικές ακριβούς επίλυσης θεωρούνται σήμερα οι μέθοδοι 'Branch & Bound' [20], 'Branch & Cut' [20], 'Column Generation' [85] και 'Lagrange Relaxation' [86]. Συνοπτικά, η μέθοδος 'Branch & Bound' βασίζεται στην ιδέα της αποδόμησης κάθε προβλήματος Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού σε πολλαπλά ευκολότερα υπο-προβλήματα. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη τεχνική, κάθε πρόβλημα Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού ανάγεται αρχικά σε ένα πρόβλημα Γραμμικού Προγραμματισμού 'χαλαρώνοντας' (δηλαδή εξαλείφοντας) τις απαιτήσεις ακεραιότητας των εμπλεκόμενων σε αυτό ακέραιων μεταβλητών απόφασης. Το νέο αυτό πρόβλημα επιλύεται και, εν συνεχεία, επιλέγεται μια (πρώην ακέραια) μεταβλητή της προκύπτουσας λύσης, βάσει της οποίας προστίθενται στο αρχικό πρόβλημα ανισότητες οι οποίες της επιβάλουν να λαμβάνει τιμές είτε μικρότερες ή ίσες από τη στρογγυλοποιημένη προς τα κάτω αντίστοιχη δεκαδική τιμή της, είτε μεγαλύτερες ή ίσες από τη στρογγυλοποιημένη προς τα

πάνω αντίστοιχη δεκαδική τιμή της. Ως εκ τούτου, σχηματίζονται δυο νέα, μικρότερα υπο-προβλήματα Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού, τα οποία προσεγγίζονται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, αν βέβαια έχει νόημα η περαιτέρω εξέτασή τους, ενώ η επαναληπτική αυτή διαδικασία συνεχίζεται έως ότου εντοπιστεί η βέλτιστη λύση του αρχικού προβλήματος Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού. Όσον αφορά την τεχνική 'Branch & Cut', αυτή ουσιαστικά επεκτείνει την προαναφερθείσα μέθοδο εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο 'cutting plane', επιτυγχάνοντας έτσι τον σχηματισμό προβλημάτων Γραμμικού Προγραμματισμού μειωμένου χώρου εφικτών λύσεων. Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος 'Column Generation' θεωρείται καταλληλότερη για την επίλυση προβλημάτων των οποίων η αυξημένη πολυπλοκότητα έγκειται στον υψηλό αριθμό των εμπλεκόμενων σε αυτά μεταβλητών απόφασης. Πιο συγκεκριμένα, η εν λόγω τεχνική απαιτεί την αρχική επίλυση ενός υπο-προβλήματος στο οποίο εμπλέκεται ένα μικρό μόνο υποσύνολο των μεταβλητών απόφασης του αντίστοιχου πρωτότυπου προβλήματος, ενώ ύστερα από την αξιολόγηση της προκύπτουσας λύσης, απαιτείται ο εντοπισμός των μεταβλητών εκείνων οι οποίες αν είχαν συμπεριληφθεί στο προαναφερθέν υπο-πρόβλημα θα βελτίωναν σημαντικά την ποιότητα της λύσης αυτής. Οι εντοπισθείσες μεταβλητές προστίθενται, εν συνεχεία, στο προαναφερθέν υποσύνολο, σχηματίζοντας έτσι ένα νέο υπο-πρόβλημα το οποίο προσεγγίζεται με όμοιο τρόπο, ενώ η επαναληπτική αυτή διαδικασία συνεχίζεται έως ότου εντοπιστεί η βέλτιστη λύση του αντίστοιχου πρωτότυπου προβλήματος. Η τεχνική 'Lagrange Relaxation', τέλος, βασίζεται στη χαλάρωση των (αν)ισοτήτων οι οποίες ευθύνονται σε μεγαλύτερο βαθμό για την αύξηση της πολυπλοκότητας κάθε επιλυόμενου προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα, οι εν λόγω (αν)ισότητες απαιτείται να σταθμίζονται κατάλληλα και, εν συνεχεία, να μεταφέρονται στην αντικειμενική συνάρτηση του εξεταζόμενου προβλήματος, σχηματίζοντας έτσι ένα ταχύτερα επιλύσιμο πρόβλημα ονόματι 'lagrangian dual'.

Οι ευρετικές μέθοδοι, από την άλλη πλευρά, δύνανται να χωριστούν σε τρεις μεγάλες υποκατηγορίες, στις *βασικές ευρετικές μεθόδους* (primal heuristics), στις *μετα-ευρετικές μεθόδους* (meta-heuristics) και στις *εξειδικευμένες σε ένα συγκεκριμένο πρόβλημα ευρετικές μεθόδους* (problem-specific heuristics). Οι τεχνικές της πρώτης υποκατηγορίας εκμεταλλεύονται αποκλειστικά τη μαθηματική φύση των προβλημάτων Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού, ενώ δύνανται να διαιρεθούν περαιτέρω στις *κατασκευαστι-*

κές (construction) και στις βελτιωτικές (improvement) ευρετικές μεθόδους [20]. Οι κατασκευαστικές ευρετικές μέθοδοι στοχεύουν στον τάχιστο εντοπισμό εφικτών λύσεων στα κατά περίπτωση επιλυόμενα προβλήματα, ενώ ως πιο γνωστές θεωρούνται οι τεχνικές 'Diving', 'Rounding', 'LP-and-Fix' και 'Relax-and-Fix' (βλ. [20]). Οι βελτιωτικές ευρετικές μέθοδοι, αντίθετα, στοχεύουν στη βελτίωση της ποιότητας ήδη γνωστών σχετικών λύσεων, ενώ ως πιο δημοφιλείς θεωρούνται οι τεχνικές 'Local Branching' και 'Relaxation Induced Neighborhood Search' (RINS) (βλ. [20]). Συνοπτικά, η μέθοδος 'Diving' επιβάλλει την αναγωγή κάθε προβλήματος Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού σε ένα πρόβλημα Γραμμικού Προγραμματισμού χαλαρώνοντας τις απαιτήσεις ακεραιότητας των εμπλεκόμενων σε αυτό ακέραιων μεταβλητών απόφασης. Το νέο αυτό πρόβλημα επιλύεται και στην προκύπτουσα λύση αναζητείται μια (πρώην ακέραια) μεταβλητή της οποίας η τιμή προσεγγίζει εγγύτερα έναν ακέραιο αριθμό στον οποίο και εν συνεχεία αυτή σταθεροποιείται, ήτοι προστίθεται μια αντίστοιχη ισότητα στις υπάρχουσες απαιτήσεις, σχηματίζοντας έτσι ένα νέο πρόβλημα Γραμμικού Προγραμματισμού. Το εν λόγω πρόβλημα προσεγγίζεται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, ενώ η επαναληπτική αυτή διαδικασία συνεχίζεται έως ότου το σύνολο των μεταβλητών μιας προκύπτουσας λύσης λαμβάνει αποκλειστικά ακέραιες τιμές και, κατ' επέκταση, αποτελεί εφικτή λύση και για το αντίστοιχο πρόβλημα Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού. Παρεμφερής διαδικασία ακολουθείται, επίσης, στη μέθοδο 'Rounding', με το σύνολο όμως των (πρώην ακέραιων) μεταβλητών οι οποίες φέρουν δεκαδικές τιμές και απέχουν έως μια συγκεκριμένη απόσταση από τους πλησιέστερους ακέραιους να σταθεροποιούνται στους τελευταίους στις αντίστοιχες επαναλήψεις. Όσον αφορά, δε, τη μέθοδο 'LP-and-Fix', αυτή επιβάλλει αρχικά την επίλυση του προαναφερθέντος χαλαρωμένου προβλήματος Γραμμικού Προγραμματισμού και, εν συνεχεία, τον εντοπισμό όσων μεταβλητών της προκύπτουσας λύσης λαμβάνουν αποκλειστικά ακέραιες τιμές. Οι εν λόγω μεταβλητές απαιτείται να σταθεροποιηθούν στις αντίστοιχες τιμές τους και, εν τέλει, να επιλυθεί το μειωμένων διαστάσεων προκύπτον πρόβλημα Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού κατά τη συμβατική τεχνική. Η τεχνική 'Relax-and-Fix', τέλος, επιβάλλει τον διαχωρισμό των ακέραιων μεταβλητών απόφασης κάθε επιλυόμενου προβλήματος σε μια ακολουθία διακριτών συνόλων και, εν συνεχεία, την επίλυση ισάριθμων υπο-προβλημάτων Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού, σε καθένα εκ των οποίων επιτρέπεται να λαμβάνουν ακέραιες τιμές μόνο

όσες μεταβλητές απόφασης ανήκουν στο αντίστοιχο σύνολο, ενώ οι υπόλοιπες θα πρέπει είτε να έχουν ήδη σταθεροποιηθεί σε ακέραιες τιμές κατά την επίλυση κάποιου προηγούμενου υπο-προβλήματος, είτε να είναι χαλαρωμένες και να δύνανται να λαμβάνουν και δεκαδικές τιμές. Η βελτιωτική μέθοδος 'Local Branching' [87], από την άλλη πλευρά, στοχεύει στη βελτίωση ήδη γνωστών εφικτών λύσεων προβλημάτων Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού εξετάζοντας κάθε φορά τη γειτονιά τους στους αντίστοιχους χώρους εφικτών λύσεων (ή αλλιώς πολύεδρα). Ομοίως, η μέθοδος 'Relaxation Induced Neighborhood Search' [88] αναζητά βελτιωμένες εφικτές λύσεις εντός του υποχώρου κάθε πολυέδρου εφικτών λύσεων τον οποίο οριοθετεί μια ήδη γνωστή εφικτή λύση του αντίστοιχου προβλήματος και η δεκαδική λύση της χαλαρωμένης εναλλακτικής του. Αντίθετα, οι τεχνικές οι οποίες ανήκουν στην υποκατηγορία των μετα-ευρετικών μεθόδων πραγματοποιούν επαναληπτικούς έλεγχους τοπικού χαρακτήρα, αναζητώντας κάθε φορά ποιοτικές πλησιοβέλτιστες λύσεις σε μικρά μέρη του χώρου εφικτών λύσεων κάθε επιλυόμενου προβλήματος. Αξίζει, επίσης, να σημειωθεί ότι οι εν λόγω μέθοδοι στοχεύουν ως επί το πλείστον είτε στη βελτίωση της ποιότητας, είτε στην επαναφορά της εφικτότητας ήδη γνωστών σχετικών λύσεων. Ως δημοφιλέστερες μετα-ευρετικές τεχνικές, δε, θεωρούνται σήμερα οι τεχνικές 'Simulated Annealing', 'Tabu Search', 'Variable Neighborhood Search' και 'Genetic Algorithms' (βλ. [89]), ενώ δεδομένης της πολυπλοκότητάς τους, αλλά και της χαμηλής τους αξίας για την παρούσα μελέτη, η ανάλυσή τους στο σημείο αυτό παραλείπεται. Τέλος, οι τεχνικές οι οποίες ανήκουν στην υποκατηγορία των εξειδικευμένων σε ένα συγκεκριμένο πρόβλημα ευρετικών μεθόδων σχεδιάζονται με γνώμονα την εκμετάλλευση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών κάθε εξεταζόμενου προβλήματος και, ως εκ τούτου, βρίσκουν αποκλειστική χρήση σε καθένα εξ αυτών.

### 3.3 Σχετική βιβλιογραφία

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιείται μια ενδελεχής επισκόπηση των εργασιών της σύγχρονης βιβλιογραφίας οι οποίες εστιάζουν στην πλησιοβέλτιστη επίλυση διαφόρων εκδοχών του προβλήματος της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης (δεδομένης της απουσίας σχετικών μελετών οι οποίες να προσεγγίζουν πλησιοβέλτιστα το πρόβλημα της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων, αλλά και της άμεσης σχέσης μεταξύ των δυο αυτών προβλημάτων). Θεωρείται, ωστόσο, απαραίτητο

να σημειωθεί ότι ως σχετικές με την παρούσα μελέτη θεωρούνται μόνο όσες εργασίες εστιάζουν αποκλειστικά στη συνδυαστική προσέγγιση των δυο αντίστοιχων επιμέρους προβλημάτων και αναπτύσσονται επί ασύρματων πολυ-αλματικών δικτύων οποιασδήποτε τεχνολογίας.

Αναλυτικότερα, στη δημοφιλέστερη σχετική εργασία [18] το ανωτέρω πρόβλημα μοντελοποιείται αρχικά ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού με αντικειμενικό στόχο τον δίκαιο μερισμό των διαθέσιμων πόρων μεταξύ των ανταγωνιζομένων χρηστών κάθε εξεταζόμενου Ασύρματου Βροχωτού Δικτύου. Το προκύπτον πρόβλημα προσεγγίζεται, επίσης, πλησιοβέλτιστα, απαιτώντας σε πρώτη φάση την αναγωγή του σε ένα πρόβλημα Γραμμικού Προγραμματισμού χαλαρώνοντας τις απαιτήσεις ακεραιότητας των αντίστοιχων μεταβλητών απόφασης. Επιλύοντας, εν συνεχεία, το νέο αυτό πρόβλημα, καθορίζεται ο ρυθμός μετάδοσης τον οποίο θα πρέπει να υποστηρίζει κάθε ζεύξη του εξεταζόμενου δικτύου για κάθε εξυπηρετούμενη ροή, ενώ δεδομένης της χαλάρωσης των προαναφερθεισών απαιτήσεων ακεραιότητας, η υπολογιζόμενη ανάθεση καναλιών δεν πρόκειται σε καμία περίπτωση να προκύψει εφικτή. Ακόμα χειρότερα, ο εντοπισμός μιας σχετικής ανάθεσης η οποία να δύναται να υποστηρίξει την ταυτόχρονη ενεργοποίηση των ανωτέρω ζεύξεων και παράλληλα να εξαλείφει τις μεταξύ τους παρεμβολές θεωρείται αδύνατος στην πράξη. Αναπόφευκτα, λοιπόν, οι απαιτούμενες μεταδόσεις θα πρέπει να χρονοπρογραμματίζονται, επιβάλλοντας ουσιαστικά στις αντίστοιχες ασύρματες συσκευές να εφαρμόζουν διαφορετικές αναθέσεις μη-παρεμβαλλόμενων καναλιών ανά χρονοθυρίδα. Οι προαναφερθέντες ρυθμοί μετάδοσης, τέλος, θα πρέπει να επανακαθορίζονται, αποκαθιστώντας έτσι την εφικτότητα της αρχικής λύσης. Ομοίως, η εργασία [90] προσεγγίζει τα προβλήματα της εκχώρησης καναλιών και της δρομολόγησης ξεχωριστά, στοχεύοντας ουσιαστικά στη μεγιστοποίηση της διεκπεραιωτικότητας κάθε εξεταζόμενου Ασύρματου Βροχωτού Δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, ένας αλγόριθμος δρομολόγησης καθορίζει αρχικά τους ρυθμούς μετάδοσης τους οποίους θα πρέπει να υποστηρίζουν οι ζεύξεις κάθε εξεταζόμενου δικτύου, ενώ στη συνέχεια ένας άπληστος αλγόριθμος αναθέτει σε αυτές κανάλια, προσαρμόζοντας παράλληλα τους προαναφερθέντες ρυθμούς ώστε να διατηρείται η εφικτότητα της αρχικής λύσης. Δεδομένης, ωστόσο, της άπληστης φύσης του τελευταίου αλγορίθμου, θεωρείται αδύνατος ο εντοπισμός μιας ανάθεσης καναλιών η οποία να μπορεί να υποστηρίξει την ταυτόχρονη ενεργοποίηση των



απαιτούμενων ζεύξεων χωρίς να εμφανίζονται μεταξύ τους παρεμβολές, γεγονός το οποίο καθιστά επιβεβλημένο τον χρονοπρογραμματισμό των επιθυμητών μεταδόσεων. Στην εργασία [91], τέλος, εξετάζεται το πρόβλημα της στατικής εκχώρησης καναλιών σε ασύρματες συσκευές Ασύρματων Βροχωτών Δικτύων των οποίων οι απαιτήσεις μετάδοσης μεταβάλλονται δυναμικά στο χρόνο. Προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση μοντελοποιείται αρχικά ένα πρόβλημα Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού με αντικειμενικό στόχο τη μεγιστοποίηση του πιθανού φόρτου τον οποίο θα μπορεί να εξυπηρετεί κάθε διαχειριζόμενο δίκτυο, ενώ ο υπολογισμός των επιθυμητών αναθέσεων καναλιών πραγματοποιείται βάσει ενός αλγορίθμου *προσομοιωμένης απόπτωσης* (simulated annealing). Κάθε φορά, δε, όπου οι απαιτήσεις μετάδοσης των διαχειριζόμενων χρηστών τροποποιούνται, επιβάλλεται η εκ νέου εκτέλεση ενός αλγορίθμου *συντομότερου μονοπατιού* (shortest path), ο οποίος προχωρά στη βέλτιστη δρομολόγηση των απαιτούμενων ροών δεδομένων πάνω από το αντίστοιχο δίκτυο.

Στη σχετική βιβλιογραφία εντοπίζεται, επίσης, μια ομάδα εργασιών οι οποίες προσεγγίζουν πλησιοβέλτιστα το πρόβλημα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με τη βοήθεια ειδικών δομών γράφων. Αναλυτικότερα, η εργασία [92] μοντελοποιεί το συγκεκριμένο πρόβλημα ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού, βασισμένη αποκλειστικά σε έναν *πολυδιάστατο γράφο συγκρούσεων* (multi-dimensional conflict-graph). Κάθε *Μέγιστο Ανεξάρτητο Σύνολο* (Maximal Independent Set, MIS) του εν λόγω γράφου, μάλιστα, αντιστοιχεί σε ένα σύνολο ζεύξεων του εξεταζόμενου δικτύου οι οποίες δύνανται να καθίστανται ταυτόχρονα ενεργές χωρίς να εμφανίζονται παρεμβολές μεταξύ τους, ενώ μέσω της εξαντλητικής απαρίθμησης των εν λόγω συνόλων δύνανται τελικά να εντοπιστεί αυτό το οποίο ουσιαστικά αντιστοιχεί στη βέλτιστη λύση του επιλυόμενου προβλήματος. Δεδομένου, ωστόσο, ότι η τελευταία διαδικασία ανήκει στην τάξη NP-complete [15], στην ανωτέρω εργασία προτείνεται επίσης μια ευρετική μέθοδος πολυωνυμικού χρόνου με σκοπό τον εντοπισμό μιας ομάδας σχετικών συνόλων τα οποία ύστερα από τον κατάλληλο χρονοπρογραμματισμό θα μπορούν να προσφέρουν μια ποιοτική πλησιοβέλτιστη λύση στο αντίστοιχο επιλυόμενο πρόβλημα. Ομοίως, η εργασία [11] βασίζεται σε έναν *πολυκαναλικό γράφο ανταγωνισμού* (multi-channel contention graph, MCCG) με σκοπό την αναπαράσταση του φαινομένου των παρεμβολών στο εσωτερικό των Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Βάσει του

εν λόγω γράφου μοντελοποιούνται, εν συνεχεία, τρία σχετικά προβλήματα Γραμμικού Προγραμματισμού με αντικειμενικό στόχο τη μεγιστοποίηση της διεκπεραιωτικότητας κάθε εξεταζόμενου δικτύου με δίκαιο τρόπο. Κάθε τέτοιο πρόβλημα, μάλιστα, απαιτεί ως είσοδο το σύνολο των Μέγιστων Ανεξάρτητων Συνόλων του προαναφερθέντος γράφου, καθένα εκ των οποίων αναπαριστά ζεύγη ασύρματων συσκευών και καναλιών τα οποία δύνανται να καθίστανται ταυτόχρονα ενεργά στο εξεταζόμενο δίκτυο χωρίς να εμφανίζονται παρεμβολές μεταξύ τους. Δεδομένου, ωστόσο, ότι η πολυπλοκότητα των ανωτέρω προβλημάτων αυξάνει σημαντικά με τον αριθμό των συνόλων τα οποία τους παρέχονται ως είσοδος, η συγκεκριμένη εργασία προδιαγράφει και μια ευρετική μέθοδο πολυωνυμικού χρόνου με σκοπό την επιλεκτική εξέταση μόνο όσων σχετικών συνόλων είναι πιθανότερο να οδηγήσουν τα προαναφερθέντα προβλήματα στον εντοπισμό μιας ποιοτικής πλησιοβέλτιστης λύσης. Στον *διαστρωματωμένο γράφο* (layered graph) της εργασίας [93], από την άλλη πλευρά, αναπαρίστανται ως κόμβοι οι Δευτερεύοντες Χρήστες και ως επίπεδα τα διαθέσιμα κανάλια κάθε εξεταζόμενου Δικτύου Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, ενώ οι ακμές του μπορούν ύστερα από κατάλληλη στάθμιση να αποτελέσουν βάση για την ανάπτυξη μετρικών δρομολόγησης υψηλού επιπέδου. Κάθε πρόβλημα ενδιαφέροντος, λοιπόν, ανάγεται ουσιαστικά σε ένα πρόβλημα εύρεσης συντομότερων μονοπατιών στον εν λόγω γράφο, ενώ ένας άπληστος αλγόριθμος αναλαμβάνει τη δρομολόγηση των απαιτούμενων ροών πάνω από αυτόν. Στην εργασία [94], τέλος, χρησιμοποιείται μια καινοφανής δομή γράφου με σκοπό τη μοντελοποίηση της ετερογένειας η οποία χαρακτηρίζει το εσωτερικό των Ασύρματων Βροχωτών Δικτύων, ενώ βάσει της δομής αυτής διατυπώνεται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με αντικειμενικό στόχο τη μεγιστοποίηση της διεκπεραιωτικότητας κάθε διαχειριζόμενου σχετικού δικτύου. Όσον αφορά την πλησιοβέλτιστη προσέγγιση του εν λόγω προβλήματος, αυτή απαιτεί σε πρώτη φάση τον υπολογισμό των ρυθμών μετάδοσης τους οποίους θα πρέπει να υποστηρίζουν οι ζεύξεις κάθε εξεταζόμενου δικτύου και, εν συνεχεία, την εκτέλεση ενός άπληστου αλγορίθμου με σκοπό τον χρονοπρογραμματισμό των επιθυμητών μεταδόσεων με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απαιτούμενες μεταγωγές καναλιών από πλευράς των υποκείμενων ασύρματων συσκευών.

Είναι γεγονός, ωστόσο, ότι το σύνολο των ανωτέρω προσεγγίσεων θέτει ως προϋπόθεση για την πλησιοβέλτιστη επίλυση του προβλήματος της Συνδυασμένης Εκχώρησης

Καναλιών και Δρομολόγησης τον χρονοπρογραμματισμό των απαιτούμενων μεταδόσεων, θεωρώντας μάλιστα αμελητέα την επιβάρυνση την οποία προκαλεί στα εξεταζόμενα δίκτυα η εν λόγω διαδικασία. Όπως, βέβαια, τεκμηριώθηκε αναλυτικά στην Παράγραφο 2.4.4, η ανωτέρω υπόθεση αντιτίθεται στις αρχές λειτουργίας τόσο της Γνωσιακής, όσο και της Λογισμικόριστης Ραδιοεπικοινωνίας, ενώ στην πραγματικότητα είναι ελάχιστες οι προσεγγίσεις της σχετικής βιβλιογραφίας οι οποίες τελικά την αποφεύγουν. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η εργασία [16], στην οποία το προαναφερθέν πρόβλημα μοντελοποιείται ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης Μικτού Ακέραιου Μη-Γραμμικού Προγραμματισμού με αντικειμενικό στόχο την ελαχιστοποίηση της ποσότητας του ραδιοφάσματος η οποία απαιτείται να δεσμεύεται ώστε να ικανοποιούνται πλήρως οι απαιτήσεις των Δευτερευόντων Χρηστών κάθε εξεταζόμενου Δικτύου Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Το εν λόγω πρόβλημα προσεγγίζεται πλησιοβέλτιστα βάσει μιας εκδοχής της δημοφιλούς ευρετικής μεθόδου γενικού σκοπού 'Diving' (βλ. Ενότητα 3.2), αφού βέβαια πρώτα αντικατασταθούν οι σχέσεις οι οποίες ευθύνονται για την προαναφερθείσα μη γραμμικότητα με αντίστοιχες γραμμικές εκφράσεις. Στην εργασία [25], αντίθετα, το προαναφερθέν πρόβλημα μοντελοποιείται ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού με αντικειμενικό στόχο την ελαχιστοποίηση των καναλιών τα οποία απαιτείται να δεσμεύονται ώστε να ικανοποιούνται πλήρως οι απαιτήσεις μετάδοσης των Δευτερευόντων Χρηστών κάθε εξεταζόμενου Δικτύου Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Η πλησιοβέλτιστη επίλυση του εν λόγω προβλήματος βασίζεται επίσης σε μια εκδοχή της μεθόδου 'Diving', ενώ σε περιπτώσεις παγίδευσης της τελευταίας σε χώρους ανέφικτων λύσεων προσαρτάται στο αρχικά μικρό υποσύνολο εξεταζόμενων καναλιών ένα ακόμα ελεύθερο κανάλι, καθιστώντας έτσι εφικτό τον τάχιστο απεγκλωβισμό της και τη συνέχιση της αναζήτησης της απαιτούμενης ποιοτικής πλησιοβέλτιστης λύσης. Ομοίως, το ανωτέρω πρόβλημα μοντελοποιείται στις μελέτες [17] και [95] ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης Μικτού Ακέραιου Γραμμικού και Μη-Γραμμικού Προγραμματισμού, αντίστοιχα, με αντικειμενικό στόχο τη μεγιστοποίηση της διεκπεραιωτικότητας κάθε εξεταζόμενου Δικτύου Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας με δίκαιο τρόπο. Όσον αφορά, δε, την πλησιοβέλτιστη επίλυση κάθε σχετικού προβλήματος, αυτή απαιτεί αρχικά τον εντοπισμό μιας εφικτής λύσης εφαρμόζοντας μια εκδοχή της μεθόδου 'Diving' και, εν συνεχεία, την προοδευτική βελτίωση της λύσης αυτής βάσει μιας τεχνικής βελτιστοποίη-

σης τοπικού χαρακτήρα. Η τελευταία τεχνική, μάλιστα, βασίζεται στην *ανα-κανάλι απαρίθμηση* (per-channel enumeration) των ανεξάρτητων συνόλων ενός ειδικού γράφου που μοντελοποιεί κάθε εξεταζόμενο δίκτυο, ενώ ύστερα από αξιολόγηση των εν λόγω συνόλων ενσωματώνονται τελικά στην προαναφερθείσα λύση μόνο όσα εξ αυτών συμβάλλουν ουσιαστικά στη βελτίωσή της. Στην εργασία [96], τέλος, το ανωτέρω πρόβλημα μοντελοποιείται επίσης ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού με αντικειμενικό στόχο τη μεγιστοποίηση της διεκπεραιωτικότητας κάθε εξεταζόμενου Βροχωτού Ασύρματου Δικτύου με δίκαιο τρόπο. Η συγκεκριμένη μελέτη, ωστόσο, αποφεύγει την πρόταση οποιασδήποτε προσεγγιστικής μεθόδου, θεωρώντας τους σύγχρονους λύτες ικανούς να εντοπίζουν βέλτιστες λύσεις στο εν λόγω πρόβλημα υπό οποιαδήποτε συνθήκες, και μάλιστα εντός εύλογων χρονικών διαστημάτων εκτέλεσης.

Αξίζει, τέλος, να αναφερθεί ότι οι προσπάθειες πλησιοβέλτιστης επίλυσης του προβλήματος της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης στρέφονται τον τελευταίο καιρό και σε νέες, πιο αποδοτικές κατευθύνσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η εργασία [97], στην οποία το εν λόγω πρόβλημα διασπάται βάσει της τεχνικής *διαίρει-και-βασίλευε* (divide-and-conquer) σε ένα σύνολο μικρότερων υπο-προβλημάτων Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού, ο αριθμός των οποίων ισούται με τον μέγιστο αριθμό αλμάτων τα οποία διατρέχουν τα πακέτα κάθε εξεταζόμενου δικτύου μέχρι να φτάσουν στον κόμβο-προορισμό τους.

### **3.4 Πλησιοβέλτιστη επίλυση προβλήματος Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο**

Στην παρούσα ενότητα περιγράφονται αναλυτικά τρεις εναλλακτικές ευρετικές μέθοδοι οι οποίες δύνανται να παρέχουν ποιοτικές πλησιοβέλτιστες λύσεις στο πρόβλημα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο στα πλαίσια της διαχείρισης Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Πριν τη λεπτομερή παρουσίαση των εν λόγω μεθόδων, ωστόσο, απαιτείται να πραγματοποιηθεί μια αναφορά σε ορισμένα στοιχεία του ανωτέρω προβλήματος τα οποία θα βοηθήσουν σημαντικά στη βαθύτερη κατανόησή τους. Κατ' αρχήν, λοιπόν, σημειώνεται ότι το συγκεκριμένο πρόβλημα απο-

τελεί – σύμφωνα με τη μοντελοποίηση της Ενότητας 2.5 – ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης Γραμμικού Προγραμματισμού, δεδομένης της γραμμικής φύσης τόσο της αντικειμενικής του συνάρτησης, όσο και των (αν)ισοτήτων από τις οποίες αυτή βρίσκεται πλαισιωμένη. Σύμφωνα, δε, με όσα αναφέρθηκαν στην Ενότητα 2.2.2, τέτοιου είδους προβλήματα δύνανται να επιλύονται σε πολυωνυμικό χρόνο ως προς το μέγεθός τους. Η τελευταία δυνατότητα, ωστόσο, καταστρέφεται από την παρουσία των μεταβλητών απόφασης  $x_{i_m, j_n}^u$  στις προαναφερθείσες (αν)ισότητες, δεδομένου ότι κάθε τέτοια μεταβλητή εκφράζει την κατάσταση μιας δυνάμει αναπτυσσόμενης ζεύξης μεταξύ ενός διατεταγμένου ζεύγους διεπαφών δικτύου  $\langle i_m, j_n \rangle$  πάνω από ένα κανάλι  $u$  και, ως εκ τούτου, επιτρέπεται να λαμβάνει αποκλειστικά δυαδικές τιμές (ένα (1) σε περίπτωση ενεργής και μηδέν (0) σε περίπτωση ανενεργής ζεύξης). Αναπόφευκτα, λοιπόν, το ανωτέρω πρόβλημα εντάσσεται στα δυσεπίλυτα (NP-hard [15]) προβλήματα Ακέραιου (Δυαδικού) Γραμμικού Προγραμματισμού (βλ. Ενότητα 2.2.2), ενώ δεδομένης και της παρουσίας των συνεχών μεταβλητών απόφασης  $f_{i_m, j_n}^h$  στις προαναφερθείσες (αν)ισότητες, το ανωτέρω πρόβλημα αποτελεί τελικά ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (βλ. Ενότητα 2.2.2).

Το δυσεπίλυτο πρόβλημα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο δύναται να προσεγγιστεί πλησιοβέλτιστα κατ' αρχήν βάσει της δημοφιλούς ευρετικής μεθόδου γενικού σκοπού ονόματι 'Diving' [20]. Η εν λόγω μέθοδος, μάλιστα, θεωρείται γενική και εφαρμόσιμη σε οποιοδήποτε πρόβλημα Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού, ενώ υιοθετείται ήδη τόσο από σύγχρονους λύτες, όσο και από εργασίες οι οποίες εστιάζουν στην επίλυση διαφόρων εκδοχών του ανωτέρω προβλήματος (βλ. Ενότητα 3.3). Πιο συγκεκριμένα, και σύμφωνα με τον Αλγόριθμο 1 ο οποίος συνοψίζει την προσαρμοσμένη στο ανωτέρω πρόβλημα διαδικασία εκτέλεσης της μεθόδου 'Diving', κάθε πρωτότυπο πρόβλημα Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού ανάγεται αρχικά σε ένα πρόβλημα Γραμμικού Προγραμματισμού χαλαρώνοντας τις απαιτήσεις ακεραιότητας των εμπλεκόμενων σε αυτό ακέραιων μεταβλητών απόφασης  $x_{i_m, j_n}^u$  (γραμμή 1). Εν συνεχεία, επιλύεται το νέο αυτό πρόβλημα (γραμμή 2), αλλά το γεγονός ότι στην προκύπτουσα λύση οι χαλαρωμένες μεταβλητές  $x_{i_m, j_n}^u$  ενδέχεται να λαμβάνουν και συνεχείς τιμές καθιστά αβέβαιο το κατά πόσο η εν λόγω λύση θα θεωρείται εφικτή και για το αντίστοιχο πρωτότυπο πρόβλημα (Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προ-

γραμματισμού). Σε επόμενη φάση, λοιπόν, ελέγχεται αν κάποιες χαλαρωμένες μεταβλητές της συγκεκριμένης λύσης λαμβάνουν όντως συνεχείς τιμές, ενώ σε περίπτωση αρνητικής απάντησης, η εν λόγω λύση αποτελεί ουσιαστικά μια εφικτή λύση – ή καλύτερα την επιθυμητή πλησιοβέλτιστη λύση – του αντίστοιχου πρωτότυπου προβλήματος, οπότε και η εκτέλεση του περιγραφόμενου αλγορίθμου μπορεί να τερματιστεί (γραμμή 3). Σε αντίθετη περίπτωση αναζητούνται στην ανωτέρω λύση οι μεταβλητές  $x_{i_m j_n}^u$  οι οποίες λαμβάνουν μεν τιμή ίση με τη μονάδα ( $x_{i_m j_n}^u = 1$ ), αλλά δεν έχουν σταθεροποιηθεί σε αυτή σε κάποια προηγούμενη επανάληψη του εκτελούμενου αλγορίθμου (γραμμή 4). Αν τελικά εντοπιστούν κάποιες σχετικές μεταβλητές, τότε αυτές σταθεροποιούνται στην τιμή 1, ενώ σε αντίθετη περίπτωση σταθεροποιείται στη συγκεκριμένη τιμή η μεταβλητή η οποία φέρει τη μεγαλύτερη δεκαδική τιμή (γραμμή 5). Προκύπτει, λοιπόν, ένα νέο πρόβλημα Γραμμικού Προγραμματισμού (γραμμή 6) το οποίο προσεγγίζεται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο (γραμμή 2-6), ενώ η επαναληπτική αυτή διαδικασία συνεχίζεται έως ότου προκύψει μια σχετική λύση της οποίας το σύνολο των μεταβλητών  $x_{i_m j_n}^u$  λαμβάνει αποκλειστικά ακέραιες τιμές ( $\in \{0, 1\}$ ) (βλ. γραμμή 3).

---

#### **Αλγόριθμος 1** Ευρετική μέθοδος Diving.

---

- 1: Relax  $x_{i_m j_n}^u$  variable to obtain a LP.
  - 2: Solve obtained LP.
  - 3: **if** solution is integer **then STOP**.
  - 4: **if** some non-fixed  $x_{i_m j_n}^u = 1$  **then** fix them to 1
  - 5: **else** fix to 1 the maximum fractional  $x_{i_m j_n}^u$ .
  - 6: Update LP and Goto 2.
- 

Ως σημαντικότερο πλεονεκτήματα της ανωτέρω μεθόδου θεωρείται ο πολυωνυμικός χρόνος εκτέλεσής της. Στη θέση κάθε πρωτότυπου προβλήματος Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού, άλλωστε, απαιτεί την επίλυση μιας ακολουθίας προβλημάτων Γραμμικού Προγραμματισμού, τα οποία είναι εξ ορισμού πολυωνυμικού χρόνου (βλ. Παράγραφο 2.2.2). Το συγκεκριμένο πλεονέκτημα, ωστόσο, επισκιάζεται από την εγγενή αδυναμία της εν λόγω μεθόδου να εντοπίζει εφικτές λύσεις υπό οποιεσδήποτε συνθήκες, γεγονός το οποίο οφείλεται κυρίως στον κοντόφθαλμο τρόπο με τον οποίο σταθεροποιούνται οι διάφορες μεταβλητές απόφασης κατά τα ενδιάμεσα βήματα της εκτέλεσής της. Για να καταστεί, μάλιστα, ο συγκεκριμένος ισχυρισμός πλήρως κατανοητός, παρατίθεται

στο σημείο αυτό ένα απλό, αλλά αντιπροσωπευτικό σχετικό παράδειγμα. Αναλυτικότερα, έστω ότι δυο κοντινές ζεύξεις έχουν στη διάθεσή τους τα κανάλια  $\{1, 2, 3\}$  και  $\{1\}$ , αντίστοιχα, ενώ σε κάποια επανάληψη της ανωτέρω μεθόδου η μεταβλητή απόφασης  $x_{i_m j_n}^u$  η οποία αντιστοιχεί στην ανάθεση του καναλιού 1 στην πρώτη ζεύξη τυχαίνει να λαμβάνει τη μεγαλύτερη δεκαδική τιμή στην προκύπτουσα λύση του αντίστοιχου ενδιάμεσου προβλήματος Γραμμικού Προγραμματισμού. Σύμφωνα με τον Αλγόριθμο 1, λοιπόν, η συγκεκριμένη μεταβλητή θα σταθεροποιηθεί αναπόφευκτα στη μονάδα, αναθέτοντας ουσιαστικά στην πρώτη ανωτέρω ζεύξη το μόνο διαθέσιμο κανάλι της δεύτερης. Δεδομένου, ωστόσο, ότι για λόγους αποφυγής παρεμβολών οι κοντινές αυτές ζεύξεις δεν επιτρέπεται να χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι, σε καμία από τις επόμενες επαναλήψεις δεν πρόκειται να καταστεί δυνατή η ανάθεση ενός καναλιού στη δεύτερη ζεύξη, με ότι αυτό συνεπάγεται για τη στοιχειώδη – πόσο μάλλον τη βέλτιστη – λειτουργία του αντίστοιχου Δικτύου Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας.

Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, λοιπόν, προτείνεται μια ελαφρώς τροποποιημένη εκδοχή της ευρετικής μεθόδου 'Diving', ονόματι 'Diving with Backtracking', η οποία θεωρείται ικανή να ανανήφει από πιθανές παγιδεύσεις σε χώρους ανέφικτων λύσεων σαν και αυτές που μόλις προαναφέρθηκαν. Προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση εισάγεται στην τυπική διαδικασία εκτέλεσης της ανωτέρω μεθόδου ένας μηχανισμός υπαναχώρησης, ο οποίος της επιτρέπει να επιστρέφει – όταν αυτό κρίνεται απαραίτητο – στην επανάληψη εκείνη κατά την οποία ελήφθη η φαινομενικά πιο αβέβαιη απόφαση σχετικά με τη σταθεροποίηση μιας μεταβλητής  $x_{i_m j_n}^u$  στη μονάδα. Πιο συγκεκριμένα, και σύμφωνα με τον βελτιωμένο Αλγόριθμο 2, όταν κατά την επίλυση ενός εκ των προαναφερθέντων ενδιάμεσων προβλημάτων Γραμμικού Προγραμματισμού εντοπιστεί είτε μια ανέφικτη λύση με Παράγοντα Κλίμακας  $\lambda$  ίσο με μηδέν (0), είτε μια λύση φαινομενικά χαμηλής ποιότητας, τότε ενεργοποιείται αυτόματα ένας μηχανισμός υπαναχώρησης. Ο εν λόγω μηχανισμός αναζητεί το ενδιάμεσο βήμα της εκτελούμενης επαναληπτικής διαδικασίας κατά το οποίο μια μεταβλητή απόφασης  $x_{i_m j_n}^u$  σταθεροποιήθηκε στη μονάδα με τον μεγαλύτερο βαθμό αβεβαιότητας, ή αλλιώς το βήμα εκείνο όπου στη λύση του αντίστοιχου προβλήματος Γραμμικού Προγραμματισμού παρατηρήθηκε η μικρότερη διαφορά μεταξύ της πρώτης και δεύτερης μεγαλύτερης (δεκαδικής) τιμής των μεταβλητών  $x_{i_m j_n}^u$ . Η εκτέλεση της ανωτέρω διαδικασίας, λοιπόν, επιστρέφει στο συγκεκριμένο βήμα και αναιρεί την ειλημμένη

αυτή απόφαση, σταθεροποιώντας αυτήν τη φορά στη μονάδα τη μεταβλητή  $x_{i_m j_n}^u$  η οποία λαμβάνει τη δεύτερη μεγαλύτερη (δεκαδική) τιμή στην αντίστοιχη λύση. Εν συνεχεία, η τυπική διαδικασία εκτέλεσης της μεθόδου 'Diving' προχωρά από αυτό ακριβώς το σημείο, επιχειρώντας έτσι εκ νέου τον εντοπισμό μια επιθυμητής πλησιοβέλτιστης λύσης για το αντίστοιχο πρωτότυπο πρόβλημα. Αν μάλιστα αυτό κριθεί αναγκαίο, ο προαναφερθείς μηχανισμός δύναται να πυροδοτηθεί ξανά, επιστρέφοντας αυτήν τη φορά στην επανάληψη κατά την οποία ελήφθη η δεύτερη πιο αβέβαιη απόφαση σχετικά με τη σταθεροποίηση μιας μεταβλητής απόφασης  $x_{i_m j_n}^u$  στη μονάδα, έχοντας βέβαια πάντοτε ως σημείο αναφοράς την πρώτη πλήρη εκτέλεση του Αλγορίθμου 2. Ο αριθμός των φορών πυροδότησης του προτεινόμενου μηχανισμού, ωστόσο, επηρεάζει σημαντικά τον συνολικό χρόνο εκτέλεσης της μεθόδου 'Diving with Backtracking', αν και σε κάθε περίπτωση αυτός παραμένει πολυωνυμικός για τους ίδιους ακριβώς λόγους που αναφέρθηκαν και στην περίπτωση της μεθόδου 'Diving'.

---

**Αλγόριθμος 2** Ευρετική μέθοδος Diving with Backtracking.

---

- 1: Relax  $x_{i_m j_n}^u$  variable to obtain a LP.
  - 2: Solve the obtained LP.
  - 3: **if** solution is integer/infeasible & backtrack permitted  
**then BACKTRACK** and Goto 2
  - 4: **else** provide best solution & **STOP**.
  - 5: **if** some non-fixed **then**  $x_{i_m j_n}^u = 1$ , fix them to 1
  - 6: **else** fix to 1 the maximum fractional  $x_{i_m j_n}^u$ .
  - 7: Update LP and Goto 2.
- 

Το πρόβλημα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο, τέλος, δύναται να προσεγγιστεί πλησιοβέλτιστα και με τη βοήθεια της τετριμμένης ευρετικής μεθόδου γενικού σκοπού ονόματι 'Truncated MIP' [20]. Η εν λόγω μέθοδος απαιτεί ουσιαστικά από έναν σύγχρονο λύτη να αναλάβει την επίλυση του ανωτέρω προβλήματος, αλλά επιβάλλει την παύση της εκτέλεσής του ύστερα από ένα μέγιστο προκαθορισμένο χρονικό διάστημα. Συνυπολογίζοντας, λοιπόν, ότι οι σύγχρονοι λύτες δύνανται να εντοπίζουν γρήγορα εφικτές λύσεις και, εν συνεχεία, να τις βελτιώνουν προοδευτικά μέχρι να καταλήξουν στις αντίστοιχες βέλτιστες, θεωρείται πολύ πιθανό για την καλύτερη μέχρι τη στιγμή διακοπής του ανωτέρω λύτη εντοπισθείσα εφικτή λύση να αποτελεί μια



ποιοτική πλησιοβέλτιστη λύση για το αντίστοιχο επιλυόμενο πρόβλημα. Αξίζει, βέβαια, να σημειωθεί ότι η εν λόγω ιδιότητα οφείλεται στο γεγονός ότι στους σύγχρονους λύτες οι υλοποιούμενες τεχνικές ακριβούς επίλυσης (π.χ. Branch & Bound) πλαισιώνονται από μια πλειάδα προηγμένων βοηθητικών αλγορίθμων (π.χ. 'cutting plane') και ευρετικών μεθόδων (κατασκευαστικές και βελτιωτικές, συμπεριλαμβανόμενης της 'Diving').

### 3.5 Πλησιοβέλτιστη επίλυση προβλήματος Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων

Η ελάχιστη προσοχή, αντίθετα, την οποία λαμβάνει το πρόβλημα της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων στη σύγχρονη βιβλιογραφία επιβάλλει την προσπάθεια πλησιοβέλτιστης προσέγγισής του σχεδόν από μηδενική βάση. Η δυσμενής αυτή κατάσταση, μάλιστα, περιπλέκεται ακόμα περισσότερο από το γεγονός ότι οι ανωτέρω ευρετικές μέθοδοι γενικού σκοπού αποδεικνύονται στην προκειμένη περίπτωση αδύναμες να προσεγγίσουν αποδοτικά το μακράν πιο απαιτητικό και περίπλοκο αυτό πρόβλημα. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, λοιπόν, προτείνεται μια καινοφανής ευρετική μέθοδος ονόματι 'Reduced Search Space Reconfiguration' (RSSR), η οποία αποδεικνύεται ικανή να παρέχει ποιοτικές πλησιοβέλτιστες λύσεις στο πρόβλημα της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων εντός εύλογων χρονικών διαστημάτων εκτέλεσης, ακόμα και όταν αυτό αναπτύσσεται επί πρακτικών Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας μεγάλου μεγέθους. Η εν λόγω μέθοδος, μάλιστα, ανήκει στην κατηγορία των εξειδικευμένων σε ένα συγκεκριμένο πρόβλημα ευρετικών μεθόδων (βλ. Ενότητα 3.2), δεδομένου ότι εκμεταλλεύεται την ιδιαίτερη δομή του ανωτέρω προβλήματος, ενώ ανάμεσα στα κυριότερα χαρακτηριστικά της συγκαταλέγονται η κλιμακωσιμότητα της λειτουργίας της, η αποφυγή κοντόφθαλμων αποφάσεων, καθώς και η δραστική αντιμετώπιση του φαινομένου της παγίδευσης σε χώρους ανέφικτων λύσεων.

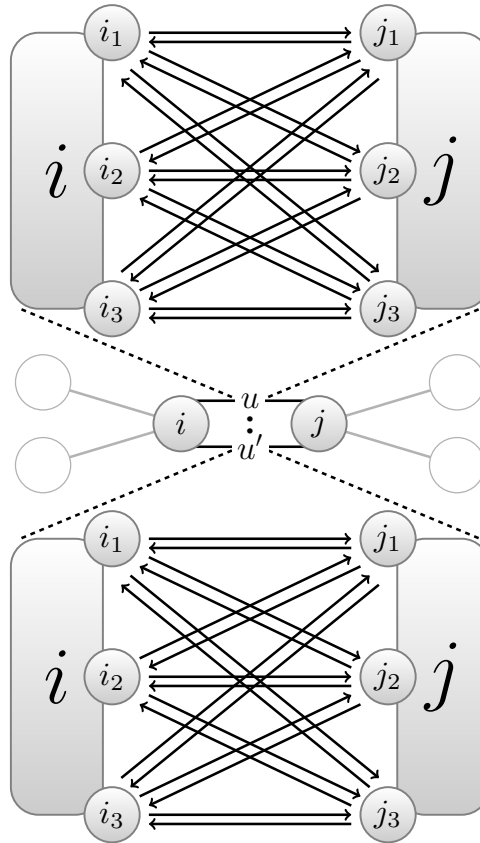
Πριν όμως από κάθε άλλη αναφορά αξίζει να σημειωθεί ότι η προτεινόμενη στην παρούσα μελέτη μέθοδος RSSR δέχεται έντονες επιρροές από τις τεχνικές του πεδίου της Επιχειρησιακής Έρευνας ονόματι 'Kernel Search' [98] και 'αποδόμησης προβλημάτων Ροής Πολλαπλών Αγαθών σε υπο-προβλήματα Ροής Μονού Αγαθού (Single-Commodity Flow, SCF)' [99, 100], ενώ παράλληλα εκμεταλλεύεται και τις προηγμένες δυνατότη-

τες των σύγχρονων λυτών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Συνοπτικά, η μέθοδος 'Kernel Search' αποτελεί ένα γενικό πλαίσιο πλησιοβέλτιστης επίλυσης προβλημάτων Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού, ενώ στην εργασία [98] η εφαρμογή της εξειδικεύεται σε μια δημοφιλή εκδοχή του *προβλήματος σακιδίου* (knapsack problem). Αρχή λειτουργίας της εν λόγω μεθόδου αποτελεί η αποδόμηση κάθε πρωτότυπου προβλήματος σε μια ακολουθία υπο-προβλημάτων μειωμένων διαστάσεων και, κατ' επέκταση, μειωμένης πολυπλοκότητας. Προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση επιλύεται αρχικά το πρόβλημα Γραμμικού Προγραμματισμού το οποίο σχηματίζεται χαλαρώνοντας τις απαιτήσεις ακεραιότητας των μεταβλητών απόφασης του αντίστοιχου πρωτότυπου προβλήματος Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού, ενώ οι μεταβλητές της προκύπτουσας λύσης ομαδοποιούνται σε μια ακολουθία υποσύνολων ονόματι *πυρήνας* (kernel) και *κάδοι* (buckets) ακολουθώντας προκαθορισμένα κριτήρια. Εν συνεχεία, επιλύεται – με τη βοήθεια κάποιου σύγχρονου λύτη – ένα πρώτο υπο-πρόβλημα, το οποίο αν και αντίγραφο του πρωτοτύπου όσον αφορά το εφαρμοζόμενο μοντέλο βελτιστοποίησης, εμπλέκει μόνο τις ακέραιες μεταβλητές απόφασης οι οποίες εντάσσονται στο ανωτέρω υποσύνολο πυρήνα. Με όμοιο τρόπο προσεγγίζονται, επίσης, τόσα ακόμα υπο-προβλήματα όσοι και οι ανωτέρω κάδοι, ενώ σε καθένα εξ αυτών εμπλέκονται, εκτός από τις μεταβλητές απόφασης του αντίστοιχου κάδου, και αυτές του τρέχοντος πυρήνα. Αξιολογώντας, δε, κάθε προκύπτουσα λύση, προστίθενται μόνιμα στον τελευταίο όσες μεταβλητές απόφασης του αντίστοιχου κάδου θεωρούνται ως οι πιο ελπιδοφόρες για να συμμετέχουν σε μια ποιοτική πλησιοβέλτιστη λύση του πρωτότυπου προβλήματος. Η ανωτέρω τεχνική, ωστόσο, αν και ικανή να παρέχει αποδεκτά αποτελέσματα στην περίπτωση του προβλήματος σακιδίου, είναι βέβαιο ότι θα παγιδευτεί σε χώρους ανέφικτων λύσεων κατά την εφαρμογή της στο μακράν πιο απαιτητικό πρόβλημα της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων, γεγονός το οποίο οφείλεται κυρίως στον *απλοϊκό* (naive) τρόπο με τον οποίο σχηματίζονται τα προαναφερθέντα υποσύνολα μεταβλητών απόφασης. Όπως προαναφέρθηκε, τέλος, η προτεινόμενη ευρετική μέθοδος RSSR εκμεταλλεύεται – παράλληλα με την τεχνική 'Kernel Search' – και τη μοντελοποίηση του ανωτέρω προβλήματος ως ένα πρόβλημα Ροής Πολλαπλών Αγαθών, αποδομώντας το ουσιαστικά σε πολλαπλά προβλήματα Ροής Μονού Αγαθού με σκοπό την προοδευτική, αλλά άπληστη βελτίωση ήδη γνωστών εφικτών λύσεων του.

Πριν όμως παρατεθεί μια λεπτομερής περιγραφή της μεθόδου RSSR κρίνεται σκόπιμο

να πραγματοποιηθεί και μια αναφορά σε ορισμένα στοιχεία του προβλήματος της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων τα οποία αναμένεται να βοηθήσουν σημαντικά στη βαθύτερη κατανόησή της. Κατ' αρχήν, λοιπόν, σημειώνεται ότι η αυξημένη πολυπλοκότητα του εν λόγω προβλήματος οφείλεται κυρίως στις εμπλεκόμενες σε αυτό μεταβλητές απόφασης  $x_{i_m j_n}^u$ , καθεμία εκ των οποίων εκφράζει την κατάσταση μιας δυνάμει αναπτυσσόμενης ζεύξης μεταξύ ενός διατεταγμένου ζεύγους διεπαφών δικτύου  $\langle i_m, j_n \rangle$  πάνω από ένα κανάλι  $u$  και, ως εκ τούτου, απαιτείται να λαμβάνει αποκλειστικά ακέραιες τιμές (ένα (1) σε περίπτωση ενεργής και μηδέν (0) σε περίπτωση ανενεργής ζεύξης). Παρά τη γραμμική φύση, λοιπόν, τόσο της αντικειμενικής συνάρτησης του ανωτέρω προβλήματος, όσο και των (αν)ισοτήτων από τις οποίες αυτή βρίσκεται πλαισιωμένη, η παρουσία των προαναφερθεισών ακέραιων μεταβλητών στις τελευταίες (αν)ισότητες το εντάσσουν αυτόματα στην τάξη των δυσεπίλυτων (NP-hard [15]) προβλημάτων Ακέραιου (Δυαδικού) Γραμμικού Προγραμματισμού (βλ. Ενότητα 2.2.2). Δεδομένης, δε, και της ταυτόχρονης παρουσίας στις προαναφερθείσες (αν)ισότητες των συνεχών μεταβλητών απόφασης  $f_{i_m j_n}^h$ , καθεμία εκ των οποίων εκφράζει τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων μιας ροής  $h$  πάνω από τη ζεύξη η οποία σχηματίζεται μεταξύ του διατεταγμένου ζεύγους διεπαφών δικτύου  $\langle i_m, j_n \rangle$ , το ανωτέρω πρόβλημα ανάγεται τελικά σε ένα πρόβλημα Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (βλ. Ενότητα 2.2.2). Παράλληλα, είναι γνωστό από θεωρία ότι η πολυπλοκότητα τέτοιου είδους προβλημάτων εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τον αριθμό των εμπλεκόμενων σε αυτά ακέραιων μεταβλητών απόφασης [101]. Στα πλαίσια του προβλήματος της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων, ωστόσο, ο αριθμός των εν λόγω μεταβλητών (ήτοι οι ακέραιες μεταβλητές απόφασης  $x_{i_m j_n}^u$ ) γιγαντώνεται όσο το μέγεθος των εξεταζόμενων Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας προσεγγίζει αυτό ρεαλιστικών υλοποιήσεων. Για να καταστεί, μάλιστα, σαφέστερος ο συγκεκριμένος ισχυρισμός, η Εικόνα 3.1 παρουσιάζει γραφικά τις πιθανές ζεύξεις – και κατ' επέκταση τις μεταβλητές απόφασης  $x_{i_m j_n}^u$  – οι οποίες δύνανται να αναπτυχθούν μεταξύ δυο ασύρματων συσκευών εφοδιασμένων με τρεις διεπαφές δικτύου έκαστη πάνω από δυο μόλις διαθέσιμα κανάλια. Λαμβάνοντας, λοιπόν, υπόψιν όλα τα παραπάνω, η προτεινόμενη ευρετική μέθοδος RSSR στοχεύει στη μείωση της βάσης της πολυπλοκότητας κάθε επιλύμενου προβλήματος Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων, επιλύοντας στη θέση του μια ακολουθία υπο-προβλημάτων τα οποία αν και αντίγραφα του όσον

αφορά το εφαρμοζόμενο μοντέλο βελτιστοποίησης, εμπλέκουν σημαντικά λιγότερες μεταβλητές απόφασης  $x_{i_m j_n}^u$  και, κατ' επέκταση, χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά μειωμένη πολυπλοκότητα επίλυσης.



**Εικόνα 3.1:** Εναλλακτικές ζεύξεις (/ μεταβλητές απόφασης  $x_{i_m j_n}^u$ ) μεταξύ των διεπαφών δικτύου δυο ασύρματων συσκευών πάνω από δυο διαθέσιμα κανάλια.

Η διαδικασία εκτέλεσης της ευρετικής μεθόδου RSSR παρουσιάζεται αναλυτικά στον Αλγόριθμο 3, αλλά και σχηματικά στην Εικόνα 3.2, ενώ στη συνέχεια της παρούσα ενότητας παρατίθεται μια λεπτομερής περιγραφή της με σκοπό την εις βάθος κατανόηση και τεκμηρίωση του σχεδιασμού της. Για λόγους πιο εύληπτης παρουσίασης, μάλιστα, η ισχύουσα ανάθεση πόρων κάθε εξεταζόμενου Δικτύου Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας θα συμβολίζεται εφεξής ως  $J1$ , ενώ η αντίστοιχη κατάσταση του περιβάλλοντός του όσον αφορά τη διαθεσιμότητα καναλιών στις ασύρματες συσκευές των Δευτερευόντων Χρηστών του θα συμβολίζεται ως  $T1$ . Κάθε φορά, δε, όπου η χρονικά μεταβαλλόμενη δραστηριότητα κάποιων Πρωτευόντων Χρηστών επηρεάζει την κατάσταση  $T1$ , η ισχύουσα ανάθεση πόρων του εξεταζόμενου δικτύου θα πρέπει να αναδιαρθρώνεται ώστε να συμμορφώνεται πλήρως με τη νέα κατάσταση στην οποία αυτό μεταπίπτει – η οποία θα συμβολίζεται

εφεξής ως  $T2$ . Εφαρμόζοντας, μάλιστα, τον μηχανισμό αποδοτικής αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων ο οποίος προδιαγράφηκε αναλυτικά στην Ενότητα 2.6, σε κάθε τέτοια περίπτωση θα πρέπει αρχικά να επιλύεται εκ νέου το πρόβλημα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο με σκοπό τον εντοπισμό μιας νέας βέλτιστης ανάθεσης πόρων – συμβολιζόμενης εφεξής ως  $J2$  – της οποίας ο Παράγοντας Κλίμακας  $\lambda$  θα αποτελεί τον μέγιστο Παράγοντα Κλίμακας  $\lambda_{opt}$  τον οποίο θα δύναται να υποστηρίξει το εξεταζόμενο δίκτυο υπό τη νέα του κατάσταση  $T2$ . Εν συνεχεία, θα πρέπει να επιλύεται και το συμπληρωματικό πρόβλημα της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων – καλούμενο εφεξής ως πρωτότυπο πρόβλημα – στοχεύοντας στον εντοπισμό μιας εναλλακτικής ανάθεσης πόρων – συμβολιζόμενης εφεξής ως  $AJ2$  – της οποίας ο Παράγοντας Κλίμακας  $\lambda$  θα προσεγγίζει μεν τον προαναφερθέντα παράγοντα  $\lambda_{opt}$  σε ποσοστό το οποίο καθορίζεται από την παράμετρο  $w \in [0, 1]$ , αλλά παράλληλα αυτή θα ελαχιστοποιεί την Αθροιστική Καθυστέρηση Μεταγωγής Καναλιού η οποία πρόκειται να προκληθεί κατά την εφαρμογή της στο εν λόγω δίκτυο. Είναι αυτό ακριβώς το σημείο, λοιπόν, στο οποίο θα πρέπει να εφαρμόζεται η προτεινόμενη ευρετική μέθοδος RSSR – λαμβάνοντας προφανώς ως είσοδο τόσο την ισχύουσα ανάθεση πόρων  $J1$ , όσο και την ήδη γνωστή ανάθεση πόρων  $J2$  του εξεταζόμενου δικτύου – με σκοπό την πλησιοβέλτιστη επίλυση του ανωτέρω πρωτότυπου προβλήματος και, κατ' επέκταση, τον εντοπισμό ποιοτικών πλησιοβέλτιστων αναθέσεων πόρων  $AJ2$  εντός εύλογων χρονικών διαστημάτων εκτέλεσης.

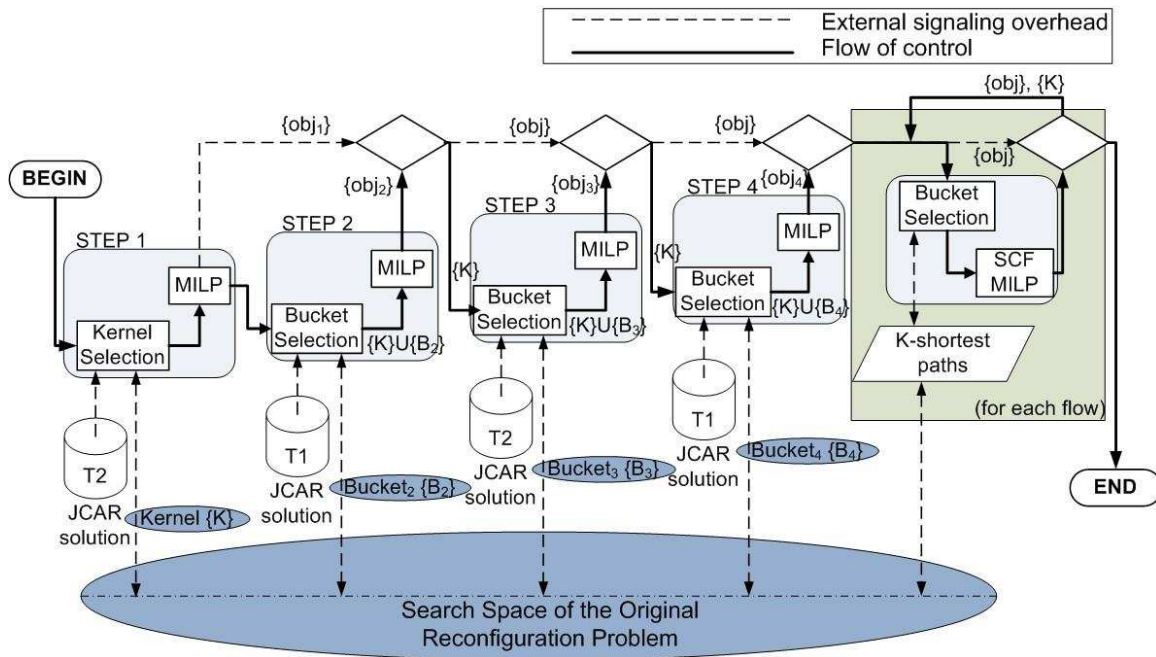
Σύμφωνα με την προδιαγραφόμενη διαδικασία εκτέλεσης της μεθόδου RSSR, κατά το πρώτο βήμα της (γραμμή 1) επιλέγεται ένα αρχικό υποσύνολο ακέραιων μεταβλητών απόφασης  $x_{i_m j_n}^u$  του πρωτότυπου προβλήματος Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων, το οποίο θα αποτελεί εφεξής τον πυρήνα  $K$ . Το εν λόγω υποσύνολο θα πρέπει να είναι μικρό ώστε να μην επιβαρύνει τη διαδικασία επίλυσης των μετέπειτα σχηματιζόμενων υπο-προβλημάτων, αλλά και να κρίνεται επαρκές για τον εντοπισμό τουλάχιστον μιας σχετικής ανάθεσης πόρων  $AJ2$ . Ως εκ τούτου, ο σχηματισμός του πυρήνα  $K$  επιλέγεται στην προκειμένη περίπτωση να βασίζεται στις λεπτομέρειες της γνωστής ανάθεσης πόρων  $J2$  του εξεταζόμενου δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε ζεύξη η οποία αναπτύσσεται μεταξύ ενός διατεταγμένου ζεύγους διεπαφών δικτύου  $\langle i_m, j_n \rangle$  πάνω από ένα κανάλι  $u$  και η οποία ορίζεται ως ενεργή ( $x_{i_m j_n}^u = 1$ ) στην ήδη γνωστή ανάθεση πόρων  $J2$ , προστί-

---

**Αλγόριθμος 3** Ευρετική μέθοδος RSSR.

---

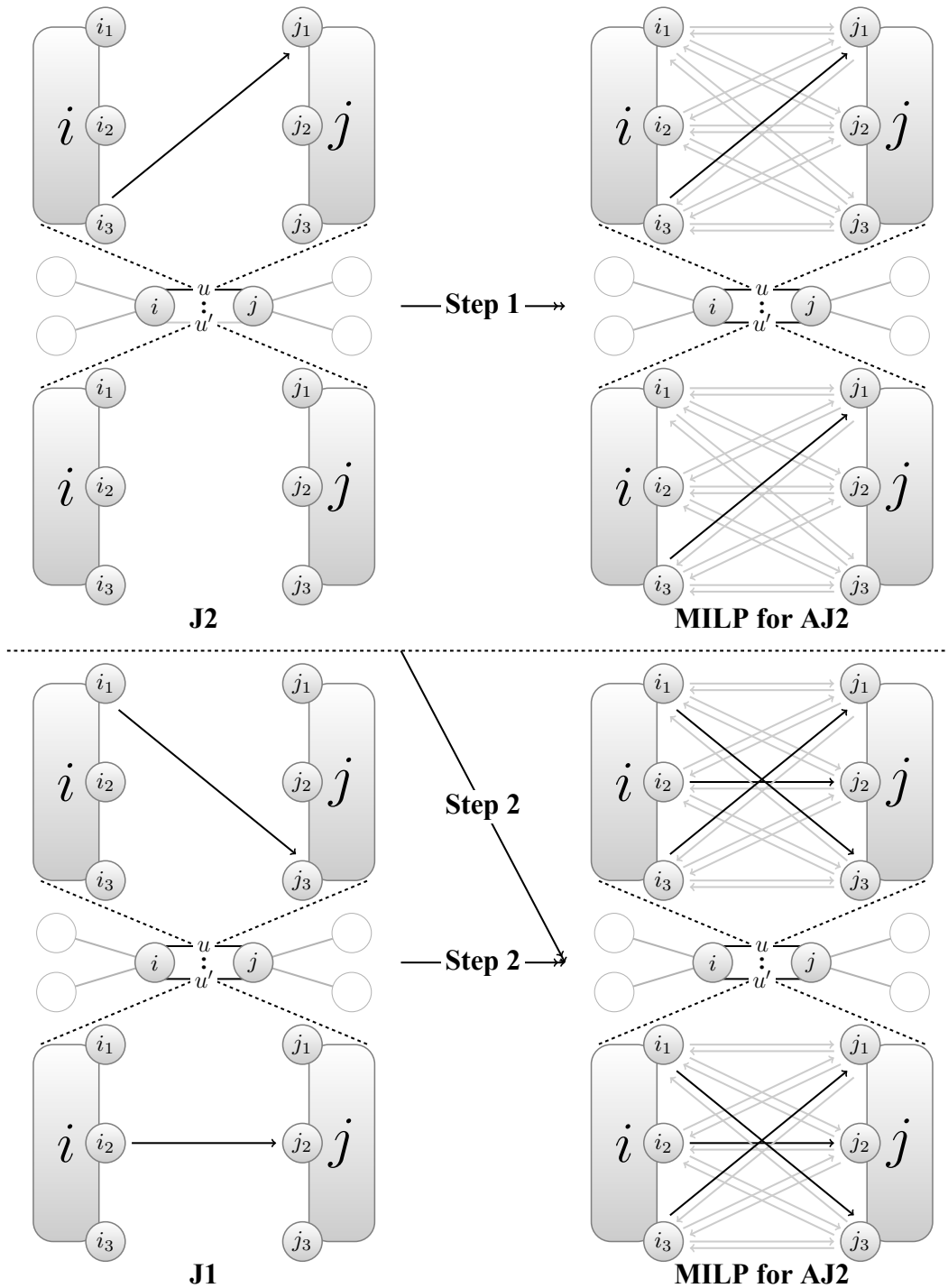
- 1: Step 1:
  - 2:  $\{Kernel\} \leftarrow \{x_{ij}^u : \exists u', x_{ij}^{u'} = 1 \text{ in T2 JCAR solution}\}$
  - 3: Current Search Space  $\leftarrow \{Kernel\}$
  - 4:  $obj \leftarrow$  MILP Reconfiguration Model
  - 5: Step 2:
  - 6:  $\{Bucket_2\} \leftarrow \{x_{ij}^u : \exists u', x_{ij}^{u'} = 1 \text{ in T1 JCAR solution}\}$
  - 7: Search Space  $\leftarrow \{Kernel\} \cup \{Bucket_2\}$
  - 8:  $obj_2 \leftarrow$  MILP Reconfiguration Model
  - 9: **if**  $obj_2 < obj$  **then**
  - 10:   update  $obj$  & current solution
  - 11:    $\{Kernel\} \leftarrow \{Kernel\} \cup \{Bucket_2\}$
  - 12: **end if**
  - 13: Step 3:
  - 14:  $\{Bucket_3\} \leftarrow \{x_{ij}^u : \exists u', m', n', x_{i'm'j'n'}^{u'} = 1 \text{ in T2 JCAR solution}\}$
  - 15: Search Space  $\leftarrow \{Kernel\} \cup \{Bucket_3\}$
  - 16:  $obj_3 \leftarrow$  MILP Reconfiguration Model
  - 17: **if**  $obj_3 < obj$  **then**
  - 18:   update  $obj$  & current solution
  - 19:    $\{Kernel\} \leftarrow \{Kernel\} \cup \{Bucket_3\}$
  - 20: **end if**
  - 21: Step 4:
  - 22:  $\{Bucket_4\} \leftarrow \{x_{ij}^u : \exists u', m', n', x_{i'm'j'n'}^{u'} = 1 \text{ in T1 JCAR solution}\}$
  - 23: Search Space  $\leftarrow \{Kernel\} \cup \{Bucket_4\}$
  - 24:  $obj_4 \leftarrow$  MILP Reconfiguration Model
  - 25: **if**  $obj_4 < obj$  **then**
  - 26:   update  $obj$  & current solution
  - 27:    $\{Kernel\} \leftarrow \{Kernel\} \cup \{Bucket_4\}$
  - 28: **end if**
  - 29: Sort flows in descending order based on the corresponding 'Channel Switching Distance'
  - 30: **for** each flow  $h$  **do**
  - 31:    $\{Bucket_h\} \leftarrow \{x_{ij}^u : i, j \text{ nodes} \in \mathbf{K}\text{-shortest paths of } h_{th} \text{ flow}\}$
  - 32:   Search Space  $\leftarrow \{Bucket_h\}$
  - 33:   Solve the Single Commodity Flow (SCF) MILP Problem
  - 34:   **if**  $\exists$  *improvement* **then**
  - 35:     update current *solution* &  $\{Kernel\}$
  - 36:   **end if**
  - 37: **end for**
-



Εικόνα 3.2: Διάγραμμα ροής εκτέλεσης ευρετικής μεθόδου RSSR.

θενται στον πυρήνα  $K$  όσες μεταβλητές απόφασης  $x_{i_m j_n}^u$  του πρωτότυπου προβλήματος αντιστοιχούν στις δυνάμει αναπτυσσόμενες ζεύξεις μεταξύ του ανωτέρω διατεταγμένου ζεύγους διεπαφών δικτύου  $\langle i_m, j_n \rangle$  πάνω από κάθε διαθέσιμο μεταξύ τους κανάλι (γραμμή 2). Για λόγους, μάλιστα, καλύτερης κατανόησης του τρόπου σχηματισμού του πυρήνα  $K$  παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.3 ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα, στο οποίο μια ζεύξη μεταξύ ενός διατεταγμένου ζεύγους διεπαφών δικτύου  $\langle i_3, j_1 \rangle$  πάνω από το κανάλι  $u$  καθίσταται ενεργή (ήτοι  $x_{i_3 j_1}^u = 1$ ) σε μια υποτιθέμενη ανάθεση πόρων  $J2$ . Στη συγκεκριμένη περίπτωση, λοιπόν, προστίθενται στον πυρήνα  $K$  όσες μεταβλητές απόφασης του πρωτότυπου προβλήματος αντιστοιχούν σε ζεύξεις οι οποίες δύνανται να αναπτυχθούν μεταξύ του ίδιου διατεταγμένου ζεύγους διεπαφών δικτύου  $\langle i_3, j_1 \rangle$ , πάνω όμως από κάθε διαθέσιμο μεταξύ τους κανάλι, ήτοι οι  $x_{i_3 j_1}^u$  και  $x_{i_3 j_1}^{u'}$  (βλ. Εικόνα 3.3 (πάνω δεξιά)).

Εν συνεχεία, σχηματίζεται ένα υπο-πρόβλημα Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων, το οποίο αποτελεί αντίγραφο του πρωτότυπου όσον αφορά το εφαρμοζόμενο μοντέλο βελτιστοποίησης, αλλά φέρει ως μεταβλητές απόφασης  $x_{i_m j_n}^u$  μόνο όσες μεταβλητές περιέχονται στον προαναφερθέντα πυρήνα  $K$  (γραμμή 3). Οι σημαντικά μειωμένες διαστάσεις του εν λόγω υπο-προβλήματος, ωστόσο, επιτρέπουν τη γρήγορη επίλυσή του από σύγχρονους λύτες, διευκολύνοντας έτσι τον εντοπισμό μιας πρώτης εφικτής ανάθεσης πόρων  $AJ2$  του πρωτότυπου προβλήματος (γραμμή 4). Στην πράξη το ανωτέρω υπο-



**Εικόνα 3.3:** Ζεύξεις (/ μεταβλητές απόφασης  $x_{i_m, j_n}^u$ ) οι οποίες συμμετέχουν στα υποσύνολα  $K$  και  $B_2$  των δυο πρώτων βημάτων εκτέλεσης της ευρετικής μεθόδου RSSR.

πρόβλημα επιτρέπει στις ροές δεδομένων του εξεταζόμενου δικτύου να εξυπηρετούνται στην ανάθεση  $AJ_2$  από τις ίδιες ακριβώς ζεύξεις (δηλαδή διατεταγμένα ζεύγη διεπαφών δικτύου, ανεξαρτήτως καναλιών) από τις οποίες αυτές εξυπηρετούνται και στη γνωστή



ανάθεση  $J2$ , ενώ παράλληλα εξετάζει το κατά πόσο τα κανάλια τα οποία ανατίθενται στις αντίστοιχες διεπαφές δικτύου δύνανται να ταυτίζονται ή έστω να απέχουν ελάχιστα στη διάσταση της συχνότητας από τα αντίστοιχα κανάλια τα οποία ενδεχομένως ανατίθεντο σε αυτές στην ισχύουσα ανάθεση  $J1$ . Κατά την επίλυση του εν λόγω υπο-προβλήματος, μάλιστα, είναι βέβαιο ότι θα εντοπιστεί τουλάχιστον μια εφικτή ανάθεση πόρων  $AJ2$ , η οποία στη χειρότερη περίπτωση θα ταυτίζεται με την  $J2$ , δεδομένου ότι το σύνολο των μεταβλητών  $x_{i_m j_n}^u$  της τελευταίας περιλαμβάνονται ήδη στο προαναφερθέν υποσύνολο πυρήνα .

Κατά το δεύτερο βήμα εκτέλεσης της μεθόδου RSSR (γραμμή 5), ο πυρήνας  $K$  συμπεριλαμβάνει ένα ακόμα σχετικό υποσύνολο μεταβλητών απόφασης ονόματι κάδος  $B_2$ , το οποίο σχηματίζεται αυτήν τη φορά βάσει των λεπτομερειών της ισχύουσας ανάθεσης πόρων  $J1$  του εξεταζόμενου δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε ζεύξη η οποία αναπτύσσεται μεταξύ ενός διατεταγμένου ζεύγους διεπαφών δικτύου  $\langle i_m, j_n \rangle$  πάνω από ένα κανάλι  $u$  και η οποία ορίζεται ως ενεργή ( $x_{i_m j_n}^u = 1$ ) στην ισχύουσα ανάθεση πόρων  $J1$ , προστίθενται στον κάδο  $B_2$  όσες μεταβλητές απόφασης  $x_{i_m j_n}^u$  του πρωτότυπου προβλήματος αντιστοιχούν στις δυνάμει αναπτυσσόμενες ζεύξεις μεταξύ του ανωτέρω διατεταγμένου ζεύγους διεπαφών δικτύου  $\langle i_m, j_n \rangle$  πάνω από κάθε διαθέσιμο μεταξύ τους κανάλι (γραμμή 6). Ο κάδος  $B_2$  συνενώνεται, εν συνεχεία, με τον πυρήνα  $K$  (γραμμή 7), σχηματίζοντας ουσιαστικά το ευρύτερο υποσύνολο μεταβλητών απόφασης  $K \cup B_2$ . Επιστρέφοντας, μάλιστα, στο παράδειγμα της Εικόνας 3.3, πραγματοποιείται η υπόθεση ότι στην αντίστοιχη ισχύουσα ανάθεση πόρων  $J1$  ορίζονται ως ενεργές οι ζεύξεις οι οποίες αναπτύσσονται μεταξύ των διατεταγμένων ζευγών διεπαφών δικτύου  $\langle i_1, j_3 \rangle$  και  $\langle i_2, j_2 \rangle$  πάνω από τα κανάλια  $u$  και  $u'$ , αντίστοιχα (ήτοι  $x_{i_1 j_3}^u = 1$  και  $x_{i_2 j_2}^{u'} = 1$ ). Στην περίπτωση αυτή, λοιπόν, θα προστεθούν στο υποσύνολο κάδου  $B_2$  όσες μεταβλητές απόφασης αντιστοιχούν σε ζεύξεις οι οποίες δύνανται να αναπτυχθούν μεταξύ των ιδίων διατεταγμένων ζευγών διεπαφών δικτύου  $\langle i_1, j_3 \rangle$  και  $\langle i_2, j_2 \rangle$ , πάνω όμως από κάθε διαθέσιμο μεταξύ τους κανάλι, ήτοι οι  $x_{i_1 j_3}^u$ ,  $x_{i_1 j_3}^{u'}$ ,  $x_{i_2 j_2}^u$  και  $x_{i_2 j_2}^{u'}$ . Στην Εικόνα 3.3 (κάτω δεξιά), δε, παρουσιάζονται και γραφικά για το συγκεκριμένο παράδειγμα οι σημαντικά λιγότερες μεταβλητές απόφασης  $x_{i_m j_n}^u$  οι οποίες θα συμμετέχουν τελικά στο προκύπτον υποσύνολο  $K \cup B_2$  (μαύρες ακμές), συγκριτικά πάντοτε με το σύνολο των σχετικών μεταβλητών του αντίστοιχου πρωτότυπου προβλήματος (γκρι ακμές).

Εν συνεχεία, σχηματίζεται ένα ακόμα υπο-πρόβλημα Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων, το οποίο αποτελεί αντίγραφο του πρωτοτύπου όσον αφορά το εφαρμοζόμενο μοντέλο βελτιστοποίησης, αλλά φέρει ως μεταβλητές απόφασης  $x_{i_m j_n}^u$  μόνο όσες μεταβλητές περιέχονται στο συνενωμένο υποσύνολο  $K \cup B_2$ . Οι σημαντικά μειωμένες διαστάσεις του εν λόγω υπο-προβλήματος, λοιπόν, επιτρέπουν τη γρήγορη επίλυσή του από σύγχρονους λύτες, διευκολύνοντας ουσιαστικά τον εντοπισμό μιας ακόμα εφικτής ανάθεσης πόρων  $AJ2$  του πρωτότυπου προβλήματος (γραμμή 8). Στην πράξη το ανωτέρω υπο-πρόβλημα θεωρεί ως υφιστάμενες στο εξεταζόμενο δίκτυο, εκτός από τις ζεύξεις οι οποίες περιγράφηκαν αναλυτικά στο αμέσως προηγούμενο βήμα (δεδομένης της συμμετοχής του πυρήνα  $K$  στο ανωτέρω υποσύνολο), και τις ζεύξεις (δηλαδή διατεταγμένα ζεύγη διεπαφών δικτύου, ανεξαρτήτως καναλιών) οι οποίες εξυπηρετούν τις ροές δεδομένων του στην ισχύουσα ανάθεση πόρων  $J1$ . Επιπλέον, δηλαδή, των όσων αναφέρθηκαν στα πλαίσια του αμέσως προηγούμενου βήματος, εξετάζεται στην προκειμένη περίπτωση και το κατά πόσο είναι εφικτό να διατηρηθούν ανέπαφες στην ανάθεση  $AJ2$  κάποιες ενεργές ζεύξεις της ανάθεσης  $J1$ , επιτρέποντας ουσιαστικά στις αντίστοιχες διεπαφές να μην προβούν σε μεταγωγή καναλιού ή τουλάχιστον να προβούν σε μεταγωγή σε κοντινά μεταξύ τους κανάλια (στη διάσταση της συχνότητας). Είναι γεγονός, μάλιστα, ότι και κατά την επίλυση του εν λόγω υπο-προβλήματος είναι βέβαιο ότι θα εντοπιστεί τουλάχιστον μια ακόμα εφικτή ανάθεση πόρων  $AJ2$ , η οποία στη χειρότερη περίπτωση θα ταυτίζεται με αυτή του αμέσως προηγούμενου βήματος, δεδομένου ότι το σύνολο των μεταβλητών απόφασης  $x_{i_m j_n}^u$  της τελευταίας περιλαμβάνονται ήδη στο υποσύνολο  $K \cup B_2$ . Σε κάθε περίπτωση, βέβαια, πραγματοποιείται ένας έλεγχος σχετικά με το κατά πόσο η νέα προκύπτουσα ανάθεση  $AJ2$  είναι ποιοτικότερη από την καλύτερη μέχρι το τρέχον βήμα γνωστή (γραμμή 9), ενώ σε περίπτωση θετικής απάντησης αυτή αποκτά αυτόματα τη θέση της τελευταίας (γραμμή 10) και οι μεταβλητές απόφασης του κάδου  $B_2$  προστίθενται μόνιμα στον πυρήνα  $K$  (γραμμή 11) (επιτρέποντας σε κάθε επόμενο υπο-πρόβλημα να επωφελείται από τις ευκαιρίες εντοπισμού ποιοτικών αναθέσεων πόρων τις οποίες οι εν λόγω μεταβλητές δύνανται να προσφέρουν). Σε αντίθετη περίπτωση η ανωτέρω ανάθεση απλά απορρίπτεται, ενώ ο πυρήνας επιστρέφει στην πρότερή του κατάσταση, δεδομένου ότι μια πιθανή διεύρυνσή του θα αύξανε τη δυσκολία επίλυσης κάθε επόμενου υπο-προβλήματος χωρίς κανένα απολύτως όφελος.

Κατά το τρίτο βήμα εκτέλεσης της μεθόδου RSSR (γραμμή 13), ο πιθανώς διευρυμένος πυρήνας  $K$  συνενώνεται με ένα ακόμα σχετικό υποσύνολο μεταβλητών απόφασης ονόματι κάδος  $B_3$ , το οποίο σχηματίζεται ξανά βάσει των λεπτομερειών της γνωστής ανάθεσης πόρων  $J2$  του εξεταζόμενου δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε ενεργή ζεύξη της ανάθεσης πόρων  $J2$  η οποία αναπτύσσεται πάνω από ένα κανάλι  $u$  μεταξύ ενός διατεταγμένου ζεύγους διεπαφών δικτύου  $\langle i_m, j_n \rangle$ , προστίθενται στον κάδο  $B_3$  όσες μεταβλητές απόφασης  $x_{i_m j_n}^u$  του πρωτότυπου προβλήματος αντιστοιχούν στις δυνάμει αναπτυσσόμενες ζεύξεις μεταξύ κάθε πιθανού διατεταγμένου ζεύγους διεπαφών οι οποίες πρόσκεινται στο αντίστοιχο διατεταγμένο ζεύγος ασύρματων συσκευών  $\langle i, j \rangle$  πάνω από κάθε διαθέσιμο μεταξύ τους κανάλι (γραμμή 14). Ο κάδος  $B_3$  συνενώνεται, εν συνεχεία, προσωρινά με τον πυρήνα  $K$  (γραμμή 15) και σχηματίζεται ένα νέο υπο-πρόβλημα Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων, το οποίο αποτελεί αντίγραφο του πρωτότυπου όσον αφορά το εφαρμοζόμενο μοντέλο βελτιστοποίησης, αλλά φέρει ως μεταβλητές απόφασης  $x_{i_m j_n}^u$  μόνο όσες μεταβλητές περιέχονται στο υποσύνολο  $K \cup B_3$ . Δεδομένων, ωστόσο, τόσο των κριτηρίων σχηματισμού του κάδου  $B_3$ , όσο και της πιθανής διεύρυνσης του πυρήνα  $K$  κατά τα δυο προηγούμενα βήματα εκτέλεσης της μεθόδου RSSR, το σχετικά ευρύτερο μέγεθος του υποσυνόλου  $K \cup B_3$  ενδέχεται να θέσει σε κίνδυνο τη δυνατότητα γρήγορης επίλυσης του προκύπτοντος υπο-προβλήματος από σύγχρονους λύτες. Με σκοπό, λοιπόν, την προστασία της μεθόδου RSSR από πιθανές μεγάλες καθυστερήσεις, τίθεται στο σημείο αυτό ένα μέγιστο χρονικό όριο στη διαδικασία επίλυσης του εν λόγω υπο-προβλήματος, εφαρμόζοντας ουσιαστικά την ευρετική μέθοδο γενικού σκοπού 'Truncated MIP' [20]. Το εύλογο μέγεθος του υποσυνόλου  $K \cup B_3$ , βέβαια, σε συνδυασμό με την ιδιότητα των σύγχρονων λύτων να εντοπίζουν γρήγορα εφικτές λύσεις και, εν συνεχεία, να τις βελτιώνουν προοδευτικά μέχρι να καταλήξουν στις αντίστοιχες βέλτιστες λύσεις, διασφαλίζουν ότι και στο παρόν βήμα θα εντοπιστεί μια ακόμα εφικτή ανάθεση πόρων  $AJ2$  για το πρωτότυπο πρόβλημα (γραμμή 16). Στην πράξη το ανωτέρω υπο-πρόβλημα θεωρεί ως υφιστάμενες στο εξεταζόμενο δίκτυο, εκτός από τις ζεύξεις οι οποίες περιγράφηκαν αναλυτικά στα προηγούμενα βήματα και συμπεριλαμβάνονται ήδη στον πυρήνα  $K$ , και τις ζεύξεις σε επίπεδο ασύρματων συσκευών (ανεξαρτήτως καναλιών) από τις οποίες εξυπηρετούνται οι ροές δεδομένων του στην ανάθεση  $J2$  (θεωρώντας ότι μια ζεύξη σε επίπεδο διατεταγμένου ζεύγους ασύρματων συσκευών αντιστοιχεί σε όλες τις δυνάμει αναπτυσ-

σόμενες ζεύξεις μεταξύ κάθε πιθανού όμοια διατεταγμένου ζεύγους των προσκείμενων σε αυτές διεπαφών δικτύου πάνω από κάθε διαθέσιμο μεταξύ τους κανάλι). Με άλλα λόγια, το ανωτέρω υπο-πρόβλημα θεωρεί – εκτός των όσων αναφέρθηκαν στα προηγούμενα βήματα των οποίων τα αντίστοιχα υποσύνολα μεταβλητών απόφασης εντάσσονται ήδη στον πυρήνα  $K$  – ότι οι ροές δεδομένων του εξεταζόμενου δικτύου επιτρέπεται να εξυπηρετούνται στην ανάθεση  $AJ2$  από τις ίδιες ακριβώς ζεύξεις σε επίπεδο ασύρματων συσκευών από τις οποίες αυτές εξυπηρετούνται και στην ανάθεση  $J2$ , ενώ προσπαθεί να επιλέξει τις καταλληλότερες ζεύξεις μεταξύ των αντίστοιχων διεπαφών δικτύου (με όμοια προφανώς διάταξη με αυτή των εξεταζόμενων ζευγών ασύρματων συσκευών) ώστε να επιτραπεί σε κάποιες από τις τελευταίες να μην προβούν σε μεταγωγή καναλιού, ή τουλάχιστον να προβούν σε μεταγωγή σε κοντινά μεταξύ τους κανάλια, έχοντας πάντοτε ως σημείο αναφοράς την ισχύουσα ανάθεση  $J1$ . Αξίζει, μάλιστα, να σημειωθεί ότι και κατά την επίλυση του ανωτέρω υπο-προβλήματος είναι βέβαιο ότι θα εντοπιστεί τουλάχιστον μια εφικτή ανάθεση πόρων  $AJ2$  (εκτός και αν ο χρόνος επίλυσής του υπερβεί το μέγιστο επιτρεπτό όριο), η οποία στη χειρότερη περίπτωση θα ταυτίζεται με την καλύτερη μέχρι το τρέχον βήμα γνωστή σχετική ανάθεση, δεδομένου ότι το σύνολο των μεταβλητών απόφασης  $x_{i_m, j_n}^u$  της τελευταίας περιλαμβάνονται ήδη στο υποσύνολο  $K \cup B_3$ . Σε κάθε περίπτωση, βέβαια, αν η προκύπτουσα ανάθεση πόρων  $AJ2$  κρίνεται ποιοτικότερη από την καλύτερη μέχρι το τρέχον βήμα γνωστή σχετική ανάθεση (γραμμή 17), αυτή αποκτά αυτόματα τη θέση της τελευταίας (γραμμή 18) και οι μεταβλητές απόφασης του κάδου  $B_3$  προστίθενται μόνιμα στον πυρήνα  $K$  (γραμμή 19), ενώ σε αντίθετη περίπτωση η ανωτέρω ανάθεση απορρίπτεται και ο πυρήνας επιστρέφει στην πρότερή του κατάσταση.

Κατά το τέταρτο βήμα εκτέλεσης της μεθόδου RSSR (γραμμή 21), ο πυρήνας  $K$  συνενώνεται με ένα ακόμα σχετικό υποσύνολο μεταβλητών απόφασης ονόματι κάδος  $B_4$ , το οποίο σχηματίζεται ξανά βάσει των λεπτομερειών της ισχύουσας ανάθεσης πόρων  $J1$  του εξεταζόμενου δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε ενεργή ζεύξη της ανάθεσης πόρων  $J1$  η οποία αναπτύσσεται πάνω από ένα κανάλι  $u$  μεταξύ ενός διατεταγμένου ζεύγους διεπαφών δικτύου  $\langle i_m, j_n \rangle$  οι οποίες πρόσκεινται στο αντίστοιχο διατεταγμένο ζεύγος ασύρματων συσκευών  $\langle i, j \rangle$ , προστίθενται στον κάδο  $B_4$  όσες μεταβλητές απόφασης  $x_{i_m, j_n}^u$  του πρωτότυπου προβλήματος αντιστοιχούν στις δυνάμει αναπτυσσόμενες ζεύξεις μεταξύ κάθε πιθανού διατεταγμένου ζεύγους διεπαφών οι οποίες πρόσκεινται στο ανω-

τέρω διατεταγμένο ζεύγος ασύρματων συσκευών  $\langle i, j \rangle$  πάνω από κάθε διαθέσιμο μεταξύ τους κανάλι (γραμμή 22). Όμοια με παραπάνω, ο κάδος  $B_4$  συνενώνεται προσωρινά με τον πυρήνα  $K$  (γραμμή 23) και σχηματίζεται ένα νέο υπο-πρόβλημα Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων, το οποίο αποτελεί αντίγραφο του πρωτοτύπου όσον αφορά το εφαρμοζόμενο μοντέλο βελτιστοποίησης, αλλά φέρει ως μεταβλητές απόφασης  $x_{i_m j_n}^u$  μόνο όσες μεταβλητές περιέχονται στο υποσύνολο  $K \cup B_4$ . Το εν λόγω υπο-πρόβλημα επιλύεται, εν συνεχεία, εφαρμόζοντας την τετριμμένη ευρετική μέθοδο 'Truncated MIP' [20] (για λόγους που προαναφέρθηκαν), εντοπίζοντας τελικά μια ακόμα εφικτή ανάθεση πόρων  $AJ2$  του πρωτότυπου προβλήματος (γραμμή 24). Στην πράξη το ανωτέρω υπο-πρόβλημα θεωρεί ως υφιστάμενες στο εξεταζόμενο δίκτυο, εκτός από τις ζεύξεις οι οποίες περιγράφηκαν αναλυτικά στα προηγούμενα βήματα και συμπεριλαμβάνονται ήδη στον πυρήνα  $K$ , και τις ζεύξεις σε επίπεδο ασύρματων συσκευών (ανεξαρτήτως καναλιών) από τις οποίες εξυπηρετούνται οι ροές δεδομένων του στην ισχύουσα ανάθεση  $J1$ . Με άλλα λόγια, το ανωτέρω υπο-πρόβλημα θεωρεί – εκτός των όσων αναφέρθηκαν στα προηγούμενα βήματα των οποίων τα αντίστοιχα υποσύνολα μεταβλητών απόφασης εντάσσονται ήδη στον πυρήνα  $K$  – ότι οι ροές δεδομένων του εξεταζόμενου δικτύου επιτρέπεται να εξυπηρετούνται στην ανάθεση  $AJ2$  από τις ίδιες ακριβώς ζεύξεις σε επίπεδο ασύρματων συσκευών από τις οποίες αυτές εξυπηρετούνται και στην ισχύουσα ανάθεση  $J1$ , ενώ προσπαθεί να επιλέξει τις καταλληλότερες ζεύξεις μεταξύ των αντίστοιχων διεπαφών δικτύου (με όμοια προφανώς διάταξη με αυτή των εξεταζόμενων ζευγών ασύρματων συσκευών) ώστε να επιτραπεί σε κάποιες από τις τελευταίες να μην προβούν σε μεταγωγή καναλιού ή τουλάχιστον να προβούν σε μεταγωγή σε κοντινά μεταξύ τους κανάλια. Σημειώνεται, μάλιστα, ότι και κατά την επίλυση του ανωτέρω υπο-προβλήματος είναι βέβαιο ότι θα προκύψει τουλάχιστον μια εφικτή ανάθεση πόρων  $AJ2$  (εκτός και αν ο χρόνος επίλυσής του υπερβεί το μέγιστο επιτρεπτό όριο), η οποία στη χειρότερη περίπτωση θα ταυτίζεται με την καλύτερη μέχρι το τρέχον βήμα γνωστή σχετική ανάθεση, δεδομένου ότι το σύνολο των μεταβλητών απόφασης  $x_{i_m j_n}^u$  της τελευταίας περιλαμβάνονται ήδη στο υποσύνολο  $K \cup B_4$ . Σε κάθε περίπτωση, βέβαια, αν η προκύπτουσα ανάθεση πόρων  $AJ2$  κρίνεται ποιοτικότερη από την καλύτερη μέχρι το τρέχον βήμα γνωστή σχετική ανάθεση (γραμμή 25), αυτή αποκτά αυτόματα τη θέση της τελευταίας (γραμμή 26) και οι μεταβλητές απόφασης του κάδου  $B_4$  προστίθενται μόνιμα στον πυρήνα  $K$  (γραμμή 27), ενώ σε

αντίθετη περίπτωση η ανωτέρω ανάθεση απορρίπτεται και ο πυρήνας επιστρέφει στην πρότερή του κατάσταση.

Στα τέσσερα ανωτέρω βήματα η αναζήτηση της επιθυμητής ανάθεσης πόρων  $AJ2$  επικεντρώνεται αποκλειστικά σε μονοπάτια και ζεύξεις τα οποία εμπλέκονται στις ήδη γνωστές αναθέσεις  $J1$  (υπό την αρχική κατάσταση  $T1$ ) και  $J2$  (υπό την τροποποιημένη κατάσταση  $T2$ ) του εξεταζόμενου δικτύου. Ενδέχεται, ωστόσο, να υπάρχουν και άλλα ελπιδοφόρα μονοπάτια και ζεύξεις τα οποία να μπορούν να βελτιώσουν ακόμα περισσότερο την ποιότητα της καλύτερης μέχρι το τέταρτο προαναφερθέν βήμα εντοπισθείσας ανάθεσης πόρων  $AJ2$ . Στοχεύοντας, λοιπόν, στην επέκταση της πραγματοποιούμενης αναζήτησης σε νέους χώρους εφικτών λύσεων, η ευρετική μέθοδος RSSR επιλύει ένα ακόμα σύνολο υπο-προβλημάτων, εκμεταλλευόμενη αυτήν τη φορά τη μοντελοποίηση του προβλήματος της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων ως πρόβλημα Ροής Πολλαπλών Αγαθών. Ακριβέστερα, η εν λόγω μέθοδος προχωρά στην αποδόμηση του ανωτέρω πρωτότυπου προβλήματος σε πολλαπλά υπο-προβλήματα Ροής Μονού Αγαθού, καθένα εκ των οποίων εστιάζει στην αποδοτική αναδιάρθρωση του μέρους εκείνου της ισχύουσας ανάθεσης πόρων  $J1$  το οποίο εξυπηρετεί μια εκ των ροών δεδομένων του εξεταζόμενου δικτύου. Η ακολουθιακή επίλυση των εν λόγω υπο-προβλημάτων, μάλιστα, θεωρείται ότι δύναται να συμβάλει καθοριστικά στην προοδευτική βελτίωση της ποιότητας της καλύτερης μέχρι το τέταρτο προαναφερθέν βήμα εντοπισθείσας ανάθεσης πόρων  $AJ2$ .

Πιο αναλυτικά, για κάθε ροή δεδομένων του εξεταζόμενου δικτύου υπολογίζεται αρχικά η συνολική απόσταση στη διάσταση της συχνότητας την οποία θα κληθούν να καλύψουν μέσω μεταγωγής καναλιού οι διεπαφές δικτύου τις οποίες αυτή διαπερνά σε περίπτωση εφαρμογής της ποιοτικότερης μέχρι το τέταρτο προαναφερθέν βήμα εντοπισθείσας ανάθεσης πόρων  $AJ2$ . Σε δεύτερη φάση οι ανωτέρω ροές ταξινομούνται κατά φθίνουσα σειρά βάσει της προαναφερθείσας απόστασης (γραμμή 29), ενώ στη συνέχεια σχηματίζονται και επιλύονται ισάριθμα υπο-προβλήματα Ροής Μονού Αγαθού. Αξίζει, μάλιστα, να σημειωθεί ότι την ανάγκη της συγκεκριμένης ταξινόμησης υπαγορεύει κυρίως η άπληστη φύση των τελευταίων υπο-προβλημάτων, η οποία δεν τους επιτρέπει να εξετάζουν το κατά πόσο κάποιος πόρος θα συνέβαλε στην ακόμα μεγαλύτερη μείωση του συνολικού κόστους αναδιάρθρωσης του εξεταζόμενου δικτύου σε περίπτωση συμπερίληψής του στη λύση ενός υπο-προβλήματος που αντιστοιχεί σε μια μετέπειτα εξεταζόμενη ροή

δεδομένων. Δίδεται έτσι η ευκαιρία σε όσα υπο-προβλήματα εξετάζουν ροές δεδομένων των οποίων το κόστος αναδιάρθρωσης θεωρείται υψηλότερο να εκμεταλλεύονται πρώτα τους πιο 'βολικούς' διαθέσιμους πόρους του εξεταζόμενου δικτύου και, κατ' επέκταση, να συμβάλουν στη δραστικότερη μείωση του συνολικού κόστους αναδιάρθρωσής του. Για λόγους, βέβαια, εξοικονόμησης χρόνου και πόρων θα πρέπει να αποφεύγεται αυστηρά η εξέταση των ροών δεδομένων των οποίων η προαναφερθείσα απόσταση (ή αλλιώς το κόστος αναδιάρθρωσης) προκύπτει μηδενική, δεδομένου ότι είναι αδύνατο για αυτές να εντοπιστεί μια ανάθεση πόρων ποιοτικότερη από την ήδη γνωστή.

Όπως προαναφέρθηκε, για κάθε ροή δεδομένων της ανωτέρω ακολουθίας σχηματίζεται ένα αντίστοιχο υπο-προβλήματα Ροής Μονού Αγαθού, το οποίο αποτελεί αντίγραφο του πρωτότυπου προβλήματος Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων όσον αφορά το εφαρμοζόμενο μοντέλο βελτιστοποίησης, αλλά εστιάζει στην ελαχιστοποίηση του κόστους αναδιάρθρωσης αποκλειστικά μιας ροής δεδομένων του εξεταζόμενου δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, κατά τον σχηματισμό κάθε τέτοιου υπο-προβλήματος απαιτείται αρχικά από κάθε μεταβλητή απόφασης  $x_{i_m j_n}^u$  (ζεύξεις) και  $f_{i_m j_n}^h$  (ρυθμοί μετάδοσης) η οποία σχετίζεται με οποιαδήποτε άλλη ροή δεδομένων εκτός της εξεταζόμενης, να σταθεροποιείται στην τιμή την οποία αυτή λαμβάνει στην ανάθεση πόρων  $AJ2$  την οποία το εν λόγω υπο-πρόβλημα σκοπεύει να βελτιώσει. Σκοπό της συγκεκριμένης ενέργειας αποτελεί η διασφάλιση της εφικτότητας κάθε νέας προκύπτουσας ανάθεσης πόρων  $AJ2$ , αφού σε αντίθετη περίπτωση η άπληστη φύση του ανωτέρω υπο-προβλήματος θα το οδηγούσε στην εκμετάλλευση των πιο 'βολικών' πόρων του εξεταζόμενου δικτύου, αδιαφορώντας πλήρως για την αδυναμία εξυπηρέτησης των υπόλοιπων ροών την οποία αναπόφευκτα θα προκαλούσε μια τέτοια συμπεριφορά. Παράλληλα, σε κάθε υπο-πρόβλημα Ροής Μονού Αγαθού απαιτείται να εμπλέκονται μόνο όσες (αν)ισότητες και συνεχείς μεταβλητές απόφασης  $f_{i_m j_n}^h$  αφορούν τη μοναδική εξεταζόμενη ροή δεδομένων, γεγονός το οποίο καθίστα προφανές ότι ο αριθμός τους θα είναι σημαντικά μικρότερος από τον αντίστοιχο αριθμό του πρωτότυπου προβλήματος. Όμοια μείωση, ωστόσο, δεν παρατηρείται και στον αριθμό των ακέραιων μεταβλητών απόφασης  $x_{i_m j_n}^u$  οι οποίες εμπλέκονται σε κάθε τέτοιο υπο-πρόβλημα, δεδομένου ότι κάθε εξεταζόμενη ροή επιτρέπεται να δρομολογείται πάνω από κάθε ζεύξη (άρα και μεταβλητή  $x_{i_m j_n}^u$ ) του εξεταζόμενου δικτύου. Το γεγονός αυτό, βέβαια, θέτει σε σημαντικό κίνδυνο τη δυνατότητα γρήγορης επίλυσης των εν λόγω υπο-

προβλημάτων από σύγχρονους λύτες, οπότε και η ευρετική μέθοδος RSSR προχώρα στην επιλεκτική εμπλοκή σε καθένα εξ αυτών ενός μικρότερου υποσυνόλου μεταβλητών απόφασης  $x_{i_m j_n}^u$  ονόματι κάδος  $B_h$  (γραμμή 32). Κάθε τέτοιος κάδος δημιουργείται βάσει των  $k$ -κοντινότερων μονοπατιών ( $k$ -shortest paths) τα οποία σχηματίζονται στο εξεταζόμενο δίκτυο μεταξύ των ασύρματων συσκευών-ακροσημείων της εξεταζόμενης ροής, ενώ στα πλαίσια της παρούσας μεθόδου τα συγκεκριμένα μονοπάτια υπολογίζονται βάσει του αποδοτικού αλγορίθμου Yen [102]. Αξίζει, βέβαια, να σημειωθεί ότι η εν λόγω τεχνική θεωρείται εμπνευσμένη από τον αλγόριθμο Edmonds-Karp [103] (μιας δημοφιλούς εκδοχής του αλγορίθμου Ford-Fulkerson [104]), ο οποίος προσεγγίζει πλησιοβέλτιστα κάθε πρόβλημα Ροής Μονού Αγαθού δρομολογώντας διαδοχικά τη μέγιστη δυνατή κίνηση της επιθυμητής ροής πάνω από τα ταξινομημένα κατά φθίνουσα εγγύτητα μονοπάτια τα οποία σχηματίζονται μεταξύ των κόμβων-ακροσημείων της ροής αυτής πάνω από το εξεταζόμενο δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε ζεύξη η οποία ανήκει στα  $k$ -κοντινότερα μονοπάτια τα οποία σχηματίζονται στο εξεταζόμενο δίκτυο μεταξύ των ασύρματων συσκευών-ακροσημείων μιας εξεταζόμενης ροής και αναπτύσσεται μεταξύ ενός διατεταγμένου ζεύγους ασύρματων συσκευών  $\langle i, j \rangle$ , προστίθενται στον αντίστοιχο κάδο  $B_h$  όσες μεταβλητές απόφασης  $x_{i_m j_n}^u$  του πρωτότυπου προβλήματος αντιστοιχούν στις δυνάμει αναπτυσσόμενες ζεύξεις μεταξύ κάθε πιθανού διατεταγμένου ζεύγους διεπαφών δικτύου οι οποίες πρόσκεινται στο ανωτέρω διατεταγμένο ζεύγος ασύρματων συσκευών  $\langle i, j \rangle$  πάνω από κάθε διαθέσιμο μεταξύ τους κανάλι (γραμμή 31). Στην πράξη κάθε σχηματιζόμενο υπο-πρόβλημα Ροής Μονού Αγαθού αναζητά υψηλής ποιότητας αναθέσεις πόρων  $AJ2$  αποκλειστικά σε μονοπάτια του εξεταζόμενου δικτύου πάνω από τα οποία φαντάζει λογικότερη η δρομολόγηση της εξεταζόμενης ροής. Είναι προφανές, βέβαια, ότι ο αριθμός των εν λόγω μονοπατιών επηρεάζει άμεσα τον αριθμό των ακέραιων μεταβλητών απόφασης  $x_{i_m j_n}^u$  που εμπλέκονται στα αντίστοιχα υπο-προβλήματα και, κατ' επέκταση, την πολυπλοκότητά τους, ενώ η κατά περίπτωση βέλτιστη τιμή της μεταβλητής  $k$  εξαρτάται από παράγοντες όπως ο διαθέσιμος χρόνος εκτέλεσης της μεθόδου RSSR, ο αριθμός και η πυκνότητα ανάπτυξης των ασύρματων συσκευών των εξεταζόμενων δικτύων κ.α. Στοχεύοντας, λοιπόν, στην προστασία της αποδοτικότητας της ευρετικής μεθόδου RSSR από πιθανές μεγάλες καθυστερήσεις, τίθεται στο σημείο αυτό ένα μέγιστο χρονικό όριο στη διαδικασία επίλυσης κάθε σχηματιζόμενου υπο-προβλήματος Ροής Μονού Αγαθού, εφαρ-



μόζοντας ουσιαστικά την τετριμμένη ευρετική μέθοδο 'Truncated MIP' [20] (γραμμή 33). Κάθε προκύπτουσα ανάθεση πόρων  $AJ2$ , τέλος, θα πρέπει να αξιολογείται και αν βελτιώνει την καλύτερη μέχρι το αντίστοιχο βήμα γνωστή σχετική ανάθεση (γραμμή 34) να αποκτά αυτόματα τη θέση της τελευταίας (γραμμή 35), ενώ σε αντίθετη περίπτωση απλά να απορρίπτεται.

Ολοκληρώνοντας την παρούσα ενότητα θεωρείται απαραίτητο να πραγματοποιηθεί και μια αναφορά επί της υπολογιστικής πολυπλοκότητας της προδιαγραφόμενης ευρετικής μεθόδου RSSR. Κατ' αρχήν, λοιπόν, υπενθυμίζεται ότι η πολυπλοκότητα κάθε προβλήματος Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού επηρεάζεται σημαντικά από τον αριθμό των εμπλεκόμενων σε αυτό ακέραιων μεταβλητών απόφασης [101]. Ταυτόχρονα, οι ακέραιες μεταβλητές απόφασης  $x_{i_m j_n}^u$  κάθε προβλήματος Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων αυξάνονται σημαντικά με το μέγεθος του εξεταζόμενου Δικτύου Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, γεγονός το οποίο οδηγεί σε αντίστοιχη αύξηση και της πολυπλοκότητάς του. Η προτεινόμενη μέθοδος RSSR, λοιπόν, στοχεύει στη μείωση της βάσης της πολυπλοκότητας κάθε επιλυόμενου προβλήματος Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων, επιλύοντας στη θέση του μια ακολουθία υπο-προβλημάτων τα οποία αν και αντίγραφα του όσον αφορά το εφαρμοζόμενο μοντέλο βελτιστοποίησης, εμπλέκουν σημαντικά λιγότερες μεταβλητές απόφασης  $x_{i_m j_n}^u$  και, κατ' επέκταση, δύναται να επιλυθούν γρήγορα από σύγχρονους λύτες. Εναλλακτικά, αν  $|\mathcal{X}|$  ο αριθμός των ακέραιων μεταβλητών απόφασης ενός πρωτότυπου προβλήματος Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων, σε κάθε σχηματιζόμενο υπο-πρόβλημα θα εμπλέκεται ένα σημαντικά μικρότερο υποσύνολο των εν λόγω μεταβλητών  $\ll |\mathcal{X}|$ , γεγονός το οποίο αναμένεται να επιτρέψει την τάχιστα επίλυσή τους και, κατ' επέκταση, τη σημαντική υποβάθμιση του συνολικού χρόνου υπολογισμού μιας πλησιοβέλτιστης λύσης για το αντίστοιχο πρωτότυπο πρόβλημα. Όσον αφορά, τέλος, τον αριθμό των βημάτων εκτέλεσης της προτεινόμενης μεθόδου RSSR, αυτός προκύπτει πολυωνυμικός και άνω-φραγμένος από τη σχέση  $4 + |\mathcal{H}|$ . Υπενθυμίζεται, άλλωστε, ότι η εν λόγω μέθοδος απαιτεί την επίλυση τεσσάρων (4) αρχικών υπο-προβλημάτων Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων και, εν συνεχεία, την επίλυση το πολύ τόσων υπο-προβλημάτων Ροής Μονού Αγαθού όσες και οι εξυπηρετούμενες από το εξεταζόμενο δίκτυο ροές δεδομένων  $|\mathcal{H}|$ , παραλείποντας την επίλυση όσων σχετικών υπο-προβλημάτων αντιστοιχούν σε ροές οι οποίες χαρακτηρίζονται

από μηδενικό κόστος αναδιάρθρωσης.

## 3.6 Αξιολόγηση ευρετικής μεθόδου RSSR βάσει προσομοιώσεων

Στόχο της παρούσας παραγράφου αποτελεί η επαλήθευση της δυνατότητας της προτεινόμενης ευρετικής μεθόδου RSSR να εντοπίζει ποιοτικές πλησιοβέλτιστες λύσεις σε προβλήματα Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων εντός αποδεκτών χρονικών διαστημάτων εκτέλεσης. Παράλληλα, αξιολογείται η κλιμακωσιμότητα της λειτουργίας της εν λόγω μεθόδου, καθώς και η ιδιότητά της να εντοπίζει πλησιοβέλτιστες λύσεις κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες, ακόμα και πριν την ολοκλήρωση της διαδικασίας εκτέλεσής της.

### 3.6.1 Περιβάλλον εκτέλεσης προσομοιώσεων

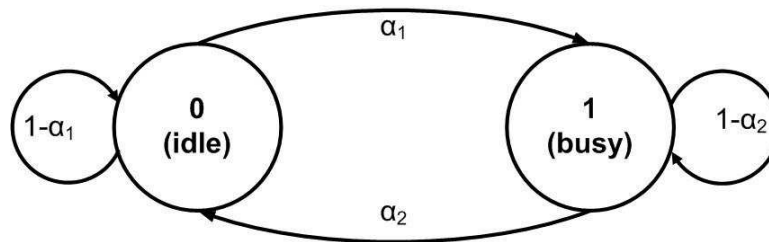
Στοχεύοντας στην αξιολόγηση της ευρετικής μεθόδου RSSR σε ένα περιβάλλον το οποίο προσεγγίζει βέλτιστα αυτό των πραγματικών Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, οι παράμετροι των σεναρίων προσομοιώσεων τα οποία αναπτύσσονται στα πλαίσια της παρούσας μελέτης συμμορφώνονται τόσο με τις προδιαγραφές λειτουργίας των σύγχρονων ασύρματων συσκευών Λογισμικόριστης Ραδιοεπικοινωνίας, όσο και με τις λεπτομέρειες των κανονιστικών πλαισίων τα οποία διέπουν την ευκαιριακή εκμετάλλευση των μερίδων φάσματος TVWS. Για λόγους συνέχειας, μάλιστα, το εν λόγω περιβάλλον φέρει αρκετά κοινά χαρακτηριστικά με αυτό που περιγράφηκε αναλυτικά στην Παράγραφο 2.7.1.

Αναλυτικότερα, κάθε ασύρματη συσκευή Δευτερεύοντος Χρήστη θεωρείται εφοδιασμένη με τρεις (3) ημιαμφίδρομες διεπαφές δικτύου ( $L = 3$ ) πανομοιότυπων προδιαγραφών. Κάθε τέτοια διεπαφή δύναται να λειτουργεί σε ένα μόνο κανάλι κάθε στιγμή, ενώ τα διαθέσιμα κανάλια της θεωρούνται σχεδόν γειτονικά, δημιουργώντας ουσιαστικά ακραίες συνθήκες λειτουργίας για τον εφαρμοζόμενο μηχανισμό αποδοτικής αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων. Παράλληλα, η μέγιστη ισχύς μετάδοσης κάθε σχετικής διεπαφής τίθεται ίση με 100 mW ( $P = 100 \text{ mW}$ ) (τιμή συμμορφούμενη με το κανονιστικό πλαίσιο της ρυθμιστικής αρχής FCC [49]), το επίπεδο θορύβου βάθους της ίσο με  $-98 \text{ dBm}$  ( $N_P = -98 \text{ dBm}$ ) και το κατώφλιο ευαισθησίας δέκτη ίσο με  $9.48 \cdot 10^{-13} \text{ W}$  ( $P_{thr} = 9.48 \cdot 10^{-13}$

W). Όσον αφορά, δε, το υιοθετούμενο απλουστευμένο μοντέλο απωλειών διαδρομής (βλ. Παράγραφο 2.4.2), η σχετική απόσταση αναφοράς οπτικής επαφής τίθεται ίση με ένα (1) μέτρο ( $d_0 = 1$  m), ενώ ο εκθέτης απωλειών διαδρομής ορίζεται ίσος με τέσσερα (4) ( $\alpha = 4$ ). Αντικαθιστώντας, μάλιστα, τις ανωτέρω τιμές στην Εξίσωση (2.3) προκύπτει τόσο η εμβέλεια μετάδοσης  $R_T^u$ , όσο και η εμβέλεια παρεμβολής  $R_I^u$  κάθε διεπαφής δικτύου, ορίζοντας στην προκειμένη περίπτωση την τιμή της παραμέτρου  $\Delta$  ίση με 0.5 (βλ. [17]).

Κάθε σενάριο προσομοίωσης το οποίο αναπτύσσεται στα πλαίσια της παρούσας μελέτης εστιάζει σε ένα διευρυμένο χρονικό διάστημα λειτουργίας ενός αντίστοιχου Δικτύου Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Κατά το εν λόγω διάστημα, η κατάσταση κάθε τέτοιου δικτύου αναφορικά με τη διαθεσιμότητα καναλιών στις ασύρματες συσκευές των Δευτερευόντων Χρηστών του θεωρείται ότι επηρεάζεται έντονα από τη χρονικά μεταβαλλόμενη δραστηριότητα κάποιων Πρωτεύοντων Χρηστών, γεγονός το οποίο καθιστά τις ισχύουσες αναθέσεις πόρων του συχνά παρωχημένες. Στοχεύοντας, μάλιστα, στη λήψη αποτελεσμάτων υψηλού βαθμού εμπιστοσύνης, οι προαναφερθείσες καταστάσεις δημιουργούνται στα πλαίσια των ακόλουθων σεναρίων βάσει ενός προηγμένου ρεαλιστικού μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα, κάθε Πρωτεύων Χρήστης  $i$  μοντελοποιείται ως ένα κόμβος Bernoulli και θεωρείται ως ενεργός (ανενεργός) σε μια κατάσταση  $Cx$  ενός εξεταζόμενου δικτύου με πιθανότητα  $p_i$  ( $1 - p_i$ ). Όμοια μοντελοποίηση ακολουθείται, μάλιστα, σε αρκετές μελέτες της σύγχρονης βιβλιογραφίας, στοχεύοντας ως επί το πλείστον στην αναπαράσταση της κινητικότητας ασύρματων συσκευών στο χώρο, ή της μετάβασης αυτών μεταξύ των καταστάσεων ύπνου και αφύπνισης. Όσον αφορά τα κανάλια τα οποία καταλαμβάνει κάθε Πρωτεύων Χρήστης  $i$ , αυτά καθορίζονται στην προκειμένη περίπτωση ανεξάρτητα μεταξύ τους, ενώ η εξέλιξή τους στις διαδοχικές καταστάσεις των εξεταζόμενων δικτύων ακολουθεί το διακριτό μοντέλο Gilbert-Elliot (discrete Gilbert-Elliot model) [105] της Εικόνας 3.4. Με άλλα λόγια, ένα κανάλι το οποίο θεωρείται ως μη-κατειλημμένο (κατειλημμένο) σε μια κατάσταση  $Cx$  ενός εξεταζόμενου δικτύου πρόκειται να καταστεί κατειλημμένο (μη-κατειλημμένο) στην αμέσως επόμενη κατάσταση με πιθανότητα  $\alpha_1$  ( $\alpha_2$ ). Ειδικότερα, δε, για τα ακόλουθα σενάρια, ένας Πρωτεύων Χρήστης  $i$  θεωρείται σε μια κατάσταση  $Cx$  ενός εξεταζόμενου δικτύου ως ενεργός (ανενεργός) με πιθανότητα  $p = 0.8$  ( $1 - p = 0.2$ ), ενώ στην ίδια κατάσταση θεωρείται ότι καταλαμβάνει (δεν καταλαμβάνει)

ένα κανάλι το οποίο δεν καταλάμβανε (καταλάμβανε) στην αμέσως προηγούμενη κατάσταση με πιθανότητα  $\alpha_1 = 0.15$  ( $\alpha_2 = 0.8$ ). Είναι προφανές, βέβαια, ότι όσοι Δευτερεύοντες Χρήστες βρίσκονται εντός της ακτίνας εμβέλειας κάποιου ενεργού Πρωτεύοντος Χρήστη  $i$  δεν επιτρέπεται να εκμεταλλεύονται τα (τυχαία) καταλαμβανόμενα κανάλια του, διασφαλίζοντας έτσι την προστασία των μεταδόσεών του από πιθανές καταστροφικές παρεμβολές.



Εικόνα 3.4: Διακριτό μοντέλο Gilbert-Elliott.

Η εκτέλεση των ακόλουθων σεναρίων προσομοιώσεων υποστηρίζεται στα πλαίσια της παρούσας μελέτης από την προγραμματιστική υποδομή η οποία περιγράφηκε αναλυτικά στην Παράγραφο 2.7.1 (βλ. Εικόνα 2.6). Παράλληλα, το σύνολο των ανωτέρω ευρετικών μεθόδων υλοποιείται στο προγραμματιστικό περιβάλλον του εργαλείου MATLAB [83], ενώ τα σχηματιζόμενα προβλήματα βελτιστοποίησης, είτε αυτά αποτελούν πρωτότυπα προβλήματα, είτε υπο-προβλήματα ευρετικών μεθόδων, είτε είναι Γραμμικού, είτε Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού, επιλύονται με τη βοήθεια του ισχυρού λύτη 'CPLEX 12.2' [21] (αφού πρώτα αναπαρασταθούν σε κατάλληλη μορφή μέσω της γλώσσας OPL [23]). Όσον αφορά, δε, τον υπολογισμό των  $k$ -κοντινότερων μονοπατιών μεταξύ των ασύρματων συσκευών των κατά περίπτωση εξεταζόμενων δικτύων, αυτός πραγματοποιείται με τη βοήθεια μιας ήδη υλοποιημένης στο προγραμματιστικό περιβάλλον του εργαλείου MATLAB εκδοχής του αλγορίθμου Yen [106]. Σημειώνεται, μάλιστα, ότι η τιμή της μεταβλητής  $k$  τίθεται στο σύνολο των ακόλουθων σεναρίων ίση με 20 ( $k = 20$ ), θεωρώντας ότι η συγκεκριμένη τιμή προσεγγίζει βέλτιστα το σημείο ισορροπίας μεταξύ του αριθμού των ακέραιων μεταβλητών απόφασης  $x_{i_m j_n}^u$  οι οποίες εμπλέκονται στα αντίστοιχα σχηματιζόμενα υπο-προβλήματα και των παρεχόμενων σε αυτά ευκαιριών ώστε να ελαχιστοποιήσουν το κόστος αναδιάρθρωσης των αντίστοιχων εξεταζόμενων ροών δεδομένων.

Πολύ σημαντική για την παρούσα μελέτη θεωρείται, τέλος, και η επιλογή του χρό-

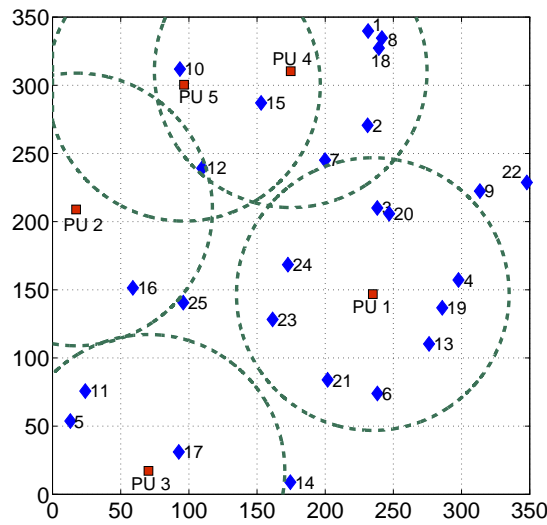
νου υπολογισμού (computation time) ως το μέτρο απόδοσης (performance metric) κατά την αξιολόγηση της ευρετικής μεθόδου RSSR. Όμοια πρακτική ακολουθείται, μάλιστα, σε αρκετές μελέτες της σύγχρονης βιβλιογραφίας, οι οποίες ανήκουν ως επί το πλείστον στα ερευνητικά πεδία της Επιχειρησιακής Έρευνας [98] και της Επιστήμης των Υπολογιστών [97]. Τη συγκεκριμένη επιλογή υπαγορεύει κυρίως το γεγονός ότι η θεωρητική ανάλυση πολυπλοκότητας χειρότερης περίπτωσης (complexity worst-case analysis) αποτυγχάνει στη γενική περίπτωση να αντικατοπτρίσει την πραγματική δυσκολία επίλυσης των προβλημάτων βελτιστοποίησης [107]. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι σύγχρονοι λύτες δύνανται να επιταχύνουν σημαντικά την εν λόγω διαδικασία, πλαισιώνοντας τις υλοποιούμενες τεχνικές ακριβούς επίλυσης με πολυάριθμες προηγμένες προσεγγιστικές μεθόδους. Η συμπεριφορά των τελευταίων μεθόδων, ωστόσο, εξαρτάται άμεσα από τις ιδιαιτερότητες κάθε επιλυόμενου προβλήματος, γεγονός το οποίο καθιστά αδύνατη την εκ των πρότερον εκτίμηση της κατά περίπτωση επιτευχθείσας σχετικής επιτάχυνσης. Δεδομένου, λοιπόν, ότι η ευρετική μέθοδος RSSR βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην επίλυση υπο-προβλημάτων βελτιστοποίησης με σκοπό τον εντοπισμό των απαιτούμενων πλησιοβέλτιστων λύσεων στα αντίστοιχα επιλυόμενα προβλήματα, είναι προφανές ότι το μέγεθος του χρόνου υπολογισμού αποτελεί ένα μακράν πιο έμπιστο και ακριβές μέτρο για την αξιολόγηση της απόδοσής της. Θα πρέπει, βέβαια, να σημειωθεί ότι στην προκειμένη περίπτωση ως χρόνος υπολογισμού θεωρείται μόνο ο χρόνος κατά τον οποίο ο επεξεργαστής της διαθέσιμης υπολογιστικής υποδομής (εφοδιασμένης με 6 GB μνήμης RAM και ένα τετραπύρρηνο επεξεργαστή χρονισμένο σε συχνότητα 2.50 GHz) εξυπηρετεί τον λύτη CPLEX [21] ώστε να επιλύσει ένα ή μια ακολουθία προβλημάτων βελτιστοποίησης (μέγεθος γνωστό και ως 'CPU time'). Αγνοείται, αντίθετα, ο χρόνος εκτέλεσης των ειδικών τμημάτων κώδικα MATLAB/JAVA τα οποία διαμορφώνουν τα τελικά προς επίλυση (υπο-)προβλήματα, ο χρόνος εγγραφής/ανάγνωσης βοηθητικών αρχείων στον/από τον σκληρό δίσκο, ο χρόνος φόρτωσης προβλημάτων στη μνήμη RAM, καθώς και ο χρόνος ανάγνωσης/γραφής μεταξύ μνήμης RAM και σκληρού δίσκου. Τα εν λόγω μεγέθη, άλλωστε, εξαρτώνται αποκλειστικά από τις προδιαγραφές της εκάστοτε χρησιμοποιούμενης υπολογιστικής υποδομής και δεν θεωρούνται αντιπροσωπευτικά της πολυπλοκότητας επίλυσης των αντίστοιχων (υπο-)προβλημάτων. Για να αποδειχθεί, ωστόσο, η αμελητέα συνεισφορά τους στον συνολικό χρόνο εκτέλεσης της ευρετικής μεθόδου RSSR, οι εν

λόγω χρόνοι συνυπολογίζονται τελικά στα σενάρια προσομοιώσεων τα οποία εκτελούνται στα πλαίσια της ακόλουθης Παραγράφου 3.6.3.

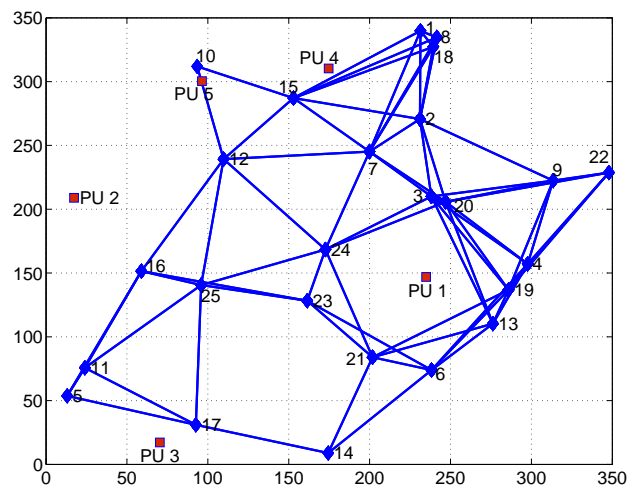
### 3.6.2 Αριθμητικά αποτελέσματα αξιολόγησης ευρετικής μεθόδου RSSR

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζεται ένα πρώτο ολοκληρωμένο σενάριο προσομοίωσης που αναπτύσσεται επί ενός Δικτύου Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας το οποίο αποτελείται από εικοσιπέντε (25) τυχαία διασκορπισμένες ασύρματες συσκευές Δευτερευόντων Χρηστών ( $N = 25$ ) εντός μιας γεωγραφικής περιοχής  $350 \times 350 \text{ m}^2$  (βλ. γράφημα συνδετικότητας δικτύου Εικόνας 3.5(β')). Το εν λόγω δίκτυο θεωρείται ότι έχει στη διάθεσή του δεκαπέντε ( $|U| = 15$ ) διαδοχικά κανάλια εύρους ζώνης 1 MHz έκαστο ( $W_u = 1 \text{ MHz}$ ), τα οποία ανήκουν στο εύρος συχνοτήτων 622 – 637 MHz των μερίδων φάσματος TVWS [50]. Το ίδιο δίκτυο θεωρείται, επίσης, ότι καλείται να εξυπηρετήσει τις απαιτήσεις σε ρυθμό μετάδοσης πέντε (5) ροών δεδομένων ( $h = 5$ ), με τις ασύρματες συσκευές 11, 10, 12, 24, και 6 να αποτελούν τα ακροσημεία πηγής ( $s(h) = [11, 10, 12, 24, 6]$ ) και τις ασύρματες συσκευές 14, 18, 9, 22, και 20 τα ακροσημεία προορισμού τους ( $d(h) = [14, 18, 9, 22, 20]$ ), αντίστοιχα, ενώ η απαίτηση σε ρυθμό μετάδοσης κάθε τέτοιας ροής ισούται με 5 Mbps. Πέντε (5) Πρωτεύοντες Χρήστες θεωρούνται, ακόμα, τυχαία διασκορπισμένοι στο εσωτερικό του ανωτέρω δικτύου (βλ. Εικόνα 3.5(α') για θέσεις και ακτίνες εμβέλειας), επηρεάζοντας συχνά την κατάσταση λειτουργίας του όσον αφορά τη διαθεσιμότητα καναλιών στις ασύρματες συσκευές των Δευτερευόντων Χρηστών του. Το παρόν σενάριο, μάλιστα, εστιάζει σε είκοσι (20) διαδοχικές σχετικές καταστάσεις (C1 – C20), οι οποίες προκύπτουν βάσει του ρεαλιστικού μοντέλου το οποίο περιγράφηκε αναλυτικά στην Παράγραφο 3.6.1.

Κάθε φορά που το περιβάλλον λειτουργίας του ανωτέρω δικτύου μεταπίπτει σε μια νέα κατάσταση  $Cx$ , η αναπόφευκτα παρωχημένη ισχύουσα ανάθεση πόρων του θα πρέπει να αναδιαρθρώνεται βάσει του προτεινόμενου στην παρούσα μελέτη σχετικού μηχανισμού. Προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση θα πρέπει αρχικά να επιλύεται το πρόβλημα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο (βλ. Ενότητα 2.5), στοχεύοντας ουσιαστικά στον εντοπισμό του μέγιστου Παράγοντα Κλίμακας  $\lambda_{opt}$  τον οποίο θα δύναται να υποστηρίξει το ανωτέρω δίκτυο υπό τη νέα του κατάσταση. Δεδομένου, ωστόσο, του μεγάλου μεγέθους του συγκεκριμένου δικτύου, ο εντοπισμός των



(α') Θέσεις και εμβέλεια Πρωτεύοντων Χρηστών.

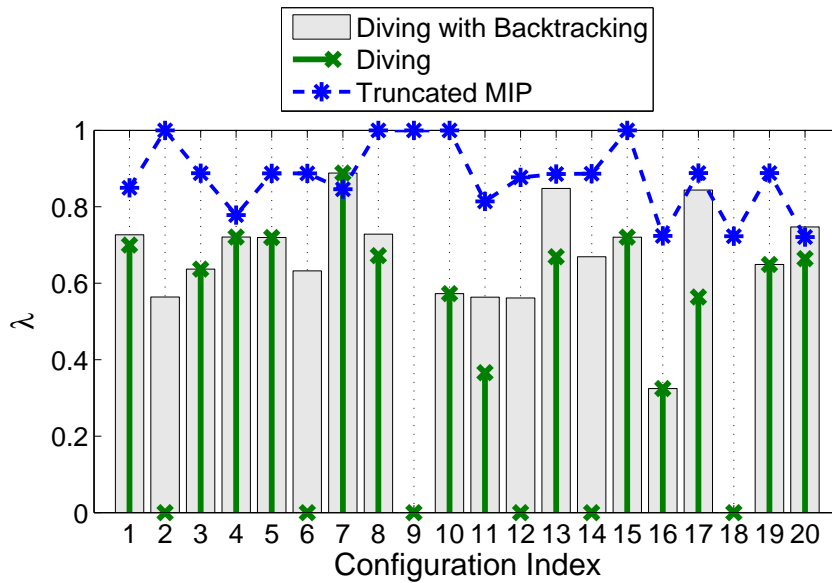


(β') Γράφημα συνδετικότητας δικτύου.

**Εικόνα 3.5:** Δίκτυο τυχαίας τοπολογίας.

κατά περίπτωση βέλτιστων λύσεων στο εν λόγω πρόβλημα προκύπτει ανέφικτος στην πράξη. Το συγκεκριμένο πρόβλημα, λοιπόν, προσεγγίζεται στα πλαίσια του παρόντος σεναρίου εφαρμόζοντας τις τρεις ευρετικές μεθόδους οι οποίες περιγράφηκαν αναλυτικά στην Ενότητα 3.4, ενώ η Εικόνα 3.6 παρουσιάζει τις τιμές του Παράγοντα Κλίμακας  $\lambda_{opt}$  ο οποίος χαρακτηρίζει τις αντίστοιχες προκύπτουσες λύσεις για καθεμία από τις είκοσι (20) διαδοχικές καταστάσεις  $Cx$  στις οποίες μεταπίπτει το ανωτέρω δίκτυο.

Συνοπτικά, η Εικόνα 3.6 αποτυπώνει, κατ' αρχήν, την εξαιρετικά χαμηλή ποιότητα



**Εικόνα 3.6:** Σύγκριση απόδοσης ευρετικών μεθόδων επίλυσης προβλήματος Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο.

των λύσεων της ευρετικής μεθόδου 'Diving', καθώς και την εγγενή της αδυναμία να εντοπίζει εφικτές λύσεις για το πρόβλημα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες (περιπτώσεις C2, C6, C9, C12, C14 και C18). Η ίδια εικόνα παρουσιάζει, επίσης, τη βελτιωμένη απόδοση της προτεινόμενης στην παρούσα μελέτη εκδοχής της ανωτέρω μεθόδου ονόματι 'Diving with Backtracking', ακόμα μάλιστα και κατά την πυροδότηση του προδιαγραφόμενου μηχανισμού υπαναχώρησης μία μόνο φορά, για λόγους διατήρησης του χρόνου εκτέλεσης σε αποδεκτά επίπεδα. Εκτός, βέβαια, από λύσεις ανώτερης ποιότητας (περιπτώσεις C1, C8, C11, C13, C17 και C20), η μέθοδος 'Diving with Backtracking' αποδεικνύεται ικανή να εντοπίζει εφικτές λύσεις ακόμα και σε περιπτώσεις όπου η 'Diving' αδυνατεί πλήρως (περιπτώσεις C2, C6, C12 και C14), γεγονός το οποίο επαληθεύει την ικανότητά της να αναηφεί από παγιδεύσεις σε χώρους ανέφικτων λύσεων. Καθίσταται, ωστόσο, προφανές ότι η μέθοδος 'Truncated MIP' δύναται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων να παρέχει λύσεις υψηλότερης ποιότητας και από τις δυο προαναφερθείσες μεθόδους, χωρίς μάλιστα ποτέ να παγιδεύεται σε χώρους ανέφικτων λύσεων. Για λόγους, βέβαια, δίκαιης σύγκρισης των ανωτέρω μεθόδων, ο μέγιστος χρόνος εκτέλεσης της τελευταίας προσεγγίζει στην προκειμένη περίπτωση τον μέσο χρόνο εκτέλεσης των άλλων δυο, ήτοι τα 1800 δευτερόλε-



πα. Αξίζει, τέλος, να σημειωθεί ότι δεδομένης της ανωτερότητας της μεθόδου 'Truncated MIP', κάθε πρόβλημα Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο το οποίο σχηματίζεται στα πλαίσια της εκτέλεσης των ακόλουθων σεναρίων προσομοιώσεων επιλέγεται να προσεγγίζεται πλησιοβέλτιστα βάσει αυτής ακριβώς της μεθόδου.

Σύμφωνα με τον εφαρμοζόμενο μηχανισμό αποδοτικής αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων, ωστόσο, για κάθε νέα κατάσταση  $Cx$  στην οποία μεταπίπτει το ανωτέρω δίκτυο θα πρέπει να επιλύεται συμπληρωματικά και το πρόβλημα της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων, στοχεύοντας ουσιαστικά στον υπολογισμό (αλλά προς το παρόν όχι στην εφαρμογή) μιας εναλλακτικής ανάθεσης πόρων της οποίας ο Παράγοντας Κλίμακας  $\lambda$  θα ταυτίζεται με τον αντίστοιχο παράγοντα  $\lambda_{opt}$  (θέτοντας την παράμετρο  $w$  ίση με τη μονάδα <sup>1</sup>), αλλά ταυτόχρονα αυτή θα ελαχιστοποιεί την επιβάρυνση η οποία πρόκειται να προκληθεί κατά την εφαρμογή της στο ανωτέρω δίκτυο. Δεδομένου, δε, του μεγάλου μεγέθους του εν λόγω δικτύου, ο εντοπισμός των κατά περίπτωση βέλτιστων λύσεων στο ανωτέρω πρόβλημα προκύπτει ανέφικτος στην πράξη, οπότε και στην προκειμένη περίπτωση αυτό προσεγγίζεται πλησιοβέλτιστα βάσει της ευρετικής μεθόδου RSSR (βλ. Ενότητα 3.5). Λαμβάνοντας, μάλιστα, υπόψιν την προαναφερθείσα δυσκολία εντοπισμού των αντίστοιχων βέλτιστων λύσεων, οι πλησιοβέλτιστες λύσεις της μεθόδου RSSR αντιπαραβάλλονται στα πλαίσια του παρόντος σεναρίου τόσο με τις αντίστοιχες λύσεις τις οποίες δύναται να παρέχει ο λύτης CPLEX [21] ύστερα από το πολύ 18000 δευτερόλεπτα (ήτοι 5 ώρες) συνεχούς εκτέλεσης (διάστημα απαγορευτικό στην πράξη), όσο και με τα αντίστοιχα άνω φράγματα επιβάρυνσης τα οποία θα παρουσιάζονταν στο ανωτέρω δίκτυο κατά την πλήρη απουσία του προδιαγραφόμενου μηχανισμού αποδοτικής αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων. Ο Πίνακας 3.1, λοιπόν, παρουσιάζει για κάθε πρόβλημα Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων το οποίο σχηματίζεται σε κάθε νέα κατάσταση στην οποία μεταπίπτει το ανωτέρω δίκτυο τόσο τον χρόνο υπολογισμού των εφαρμοζόμε-

---

<sup>1</sup> Ο ορισμός της παραμέτρου  $w$  ίσης με τη μονάδα ( $w = 1$ ) στο σύνολο των ακόλουθων σεναρίων προσομοιώσεων μειώνει σημαντικά τον αριθμό των υφιστάμενων εφικτών λύσεων στα σχηματιζόμενα προβλήματα Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων και, κατ' επέκταση, αυξάνει την προσπάθεια η οποία απαιτείται να καταβληθεί για τον εντοπισμό τους. Δημιουργείται έτσι ένα ιδιαίτερα απαιτητικό (αν όχι ακραίο) περιβάλλον λειτουργίας για την προτεινόμενη μέθοδο RSSR, επιτρέποντας την ακριβέστερη αξιολόγηση των δυνατοτήτων της.

νων επ' αυτού μεθόδων επίλυσης εκφρασμένο σε δευτερόλεπτα (ετικέτα 'Comput. Time (sec)'), όσο και την αντίστοιχη προκύπτουσα επιβάρυνση εκφρασμένη ως απόσταση σε MHz την οποία καλούνται να καλύψουν οι διεπαφές του ανωτέρω δικτύου μέσω μεταγωγής καναλιού (ετικέτα 'Cumul. switching dist. (MHz)'). Η εν λόγω απόσταση, άλλωστε, συνδέεται άμεσα με την Αθροιστική Καθυστέρηση Μεταγωγών Καναλιού η οποία εισάγεται στο ανωτέρω δίκτυο κατά την αναδιάρθρωση των αναθέσεων πόρων του (βλ. Παράγραφο 2.4.4), ενώ στην προκειμένη περίπτωση αυτή υπολογίζεται βάσει του μεγέθους  $uW_u$  αντί της φέρουσας συχνότητας  $f_c^{(u)}$  κάθε καναλιού  $u$ , θεωρώντας ουσιαστικά ότι κάθε ανενεργή διεπαφή δικτύου μεταβαίνει σε κατάσταση αναμονής στο πρώτο κανάλι του προαναφερθέντος συνόλου  $U$ .

Συνοπτικά, ο Πίνακας 3.1 επαληθεύει, κατ' αρχήν, τη δυνατότητα της μεθόδου RSSR (ετικέτα 'RSSR') να εντοπίζει πάντοτε εφικτές πλησιοβέλτιστες λύσεις στα επιλυόμενα προβλήματα Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων, εν αντιθέσει με τον λύτη CPLEX ο οποίος αδυνατεί συχνά να εντοπίσει έστω και μια σχετική λύση ακόμα και ύστερα από 5 ώρες συνεχούς εκτέλεσης (ετικέτα 'CPLEX' παρουσία σύμβολου [-], περιπτώσεις C8, C9, C12, C13 και C17). Στο σύνολο των εξεταζόμενων περιπτώσεων, μάλιστα, οι εντοπισθείσες αναθέσεις πόρων της μεθόδου RSSR (ετικέτα 'RSSR') δύνανται να μειώσουν σημαντικά το κόστος αναδιάρθρωσης του ανωτέρω δικτύου συγκριτικά με τα αντίστοιχα άνω φράγματα επιβάρυνσης (ετικέτα 'No Rec. '), ενώ όποτε καθίσταται εφικτή η σύγκρισή τους με τις αντίστοιχες βέλτιστες αναθέσεις πόρων οι μεταξύ τους αποκλίσεις προκύπτουν από αμελητέες έως μηδενικές (ετικέτα 'CPLEX' απουσία συμβόλων [-] και [+], περιπτώσεις C3, C4, C6, C10, C11 και C20). Στη συντριπτική πλειοψηφία των εξεταζόμενων περιπτώσεων, επίσης, η μέθοδος RSSR δύνανται να παρέχει λύσεις ανώτερης ποιότητας από αυτές του λύτη CPLEX, ενώ στις μόνες περιπτώσεις όπου η συγκεκριμένη κατάσταση αντιστρέφεται, ο λύτης CPLEX απαιτεί έως και διακόσιες (200) φορές περισσότερο χρόνο για τον εντοπισμό ελάχιστα ποιοτικότερων σχετικών αναθέσεων (περιπτώσεις C4, C7, C16 και C18). Ο χρόνος υπολογισμού της ευρετικής μεθόδου RSSR, τέλος, προκύπτει κατά μέσο όρο 38 φορές μικρότερος από αυτόν του λύτη CPLEX, γεγονός το οποίο επαληθεύει πλήρως τη δυνατότητα της εν λόγω μεθόδου να επιταχύνει σημαντικά τη διαδικασία πλησιοβέλτιστης επίλυσης σχετικών προβλημάτων Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων.

**Πίνακας 3.1:** Αριθμητικά αποτελέσματα αξιολόγησης ευρετικής μεθόδου RSSR.

Config. Index	Cumul. Switching Dist. (MHz)			Comput. Time (sec)		RSSR vs. CPLEX (× faster)
	No Rec.	RSSR	CPLEX	RSSR	CPLEX	
C1	–	–	–	–	–	–
C2	243	<b>40</b>	40 <sup>+</sup>	1266.39	18000	14.21
C3	198	<b>0</b>	0	46.32	66.51	1.44
C4	146	8	<b>7</b>	65.24	878.54	13.47
C5	193	<b>37</b>	46 <sup>+</sup>	1258.62	18000	14.30
C6	215	<b>2</b>	2	54.51	69.75	1.28
C7	261	15	<b>10<sup>+</sup></b>	715.93	18000	25.14
C8	239	<b>35</b>	–	753.36	18000	23.89
C9	220	<b>45</b>	–	1264.45	18000	14.24
C10	271	<b>0</b>	0	43.88	51.43	1.17
C11	135	<b>0</b>	0	42.94	54.22	1.26
C12	240	<b>43</b>	–	806.09	18000	22.33
C13	229	<b>27</b>	–	1264.77	18000	14.23
C14	227	<b>16</b>	16 <sup>+</sup>	67.07	18000	268.38
C15	256	<b>54</b>	54 <sup>+</sup>	1265.29	18000	14.23
C16	201	10	<b>7<sup>+</sup></b>	100.47	18000	179.16
C17	291	<b>50</b>	–	767.78	18000	23.44
C18	169	22	<b>18<sup>+</sup></b>	236.13	18000	76.23
C19	202	<b>63</b>	108 <sup>+</sup>	1266.90	18000	14.21
C20	197	<b>0</b>	0	46.55	58.01	1.25
Avg.	217.53	24.58	-	596.46	12377.81	38.10

<sup>+</sup> συμβολίζει την καλύτερη λύση την οποία εντόπισε ο λύτης CPLEX εντός του τιθέμενου χρονικού ορίου εκτέλεσης.

<sup>-</sup> συμβολίζει την αποτυχία του λύτη CPLEX να εντοπίσει μια εφικτή λύση.

Όπως τεκμηριώθηκε στην Ενότητα 3.5, η αποδοτικότητα της προτεινόμενης μεθόδου RSSR στηρίζεται στην επίλυση μιας ακολουθίας υπο-προβλημάτων σημαντικά μειωμένων διαστάσεων στη θέση κάθε πρωτότυπου προβλήματος Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων. Στα πλαίσια του παρόντος σεναρίου, λοιπόν, ο εν λόγω ισχυρισμός επαληθεύεται πλήρως στον Πίνακα 3.2, ο οποίος παρουσιάζει αναλυτικά τα σημαντικά μειωμένα ποσοστά ακέραιων μεταβλητών απόφασης τα οποία εμπλέκονται στα υπο-προβλήματα τα οποία επιλύει η μέθοδος RSSR στη θέση των αντίστοιχων σχηματιζόμενων προβλημάτων Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων. Τα συγκεκριμένα ποσοστά, μάλιστα, υπολογίζονται αμέσως μετά τη φάση 'Presolve' του λύτη CPLEX, η οποία αφαιρεί, σταθεροποιεί και υποκαθιστά άχρηστες και χαμηλής αξίας μεταβλητές, παρέχοντας ουσιαστικά μια ακριβέστερη εκτίμηση σχετικά με τον πραγματικό αριθμό ακέραιων μεταβλητών απόφασης οι οποίες εμπλέκονται σε κάθε σχετικό (υπο-)πρόβλημα. Σύμφωνα, δε, με τον ίδιο πίνακα, και δεδομένου ότι η πολυπλοκότητα κάθε (υπο-)προβλήματος εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό των εμπλεκόμενων σε αυτό ακέραιων μεταβλητών απόφασης [101], καθίσταται προφανές ότι οι εξαιρετικά μειωμένες διαστάσεις των υπο-προβλημάτων τα οποία σχηματίζονται κατά τα δυο πρώτα βήματα εκτέλεσης της μεθόδου RSSR επιτρέπουν την τάχιση επίλυσή τους από σύγχρονους λύτες. Αντίθετα, οι σχετικά μεγαλύτερες διαστάσεις των υπο-προβλημάτων τα οποία σχηματίζονται κατά τα δυο επόμενα βήματα της εν λόγω μεθόδου καθιστούν επιτακτική την οριοθέτηση του χρόνου επίλυσής τους, ενώ στην προκειμένη περίπτωση το συγκεκριμένο όριο τίθεται ίσο με 600 δευτερόλεπτα (και αυξάνεται στα 900 δευτερόλεπτα στις μεγαλύτερες τοπολογίες της επόμενης παραγράφου). Εξαιρετικά μειωμένο, τέλος, παρουσιάζεται και το μέγεθος των υπο-προβλημάτων Ροής Μονού Αγαθού τα οποία σχηματίζονται κατά τα τελευταία βήματα εκτέλεσης της μεθόδου RSSR, δεδομένου άλλωστε ότι καθένα εξ αυτών εστιάζει μόνο στα είκοσι (20) κοντινότερα μονοπάτια τα οποία υφίστανται στο ανωτέρω δίκτυο μεταξύ των ασύρματων συσκευών-ακροσημείων της αντίστοιχης εξεταζόμενης ροής δεδομένων.

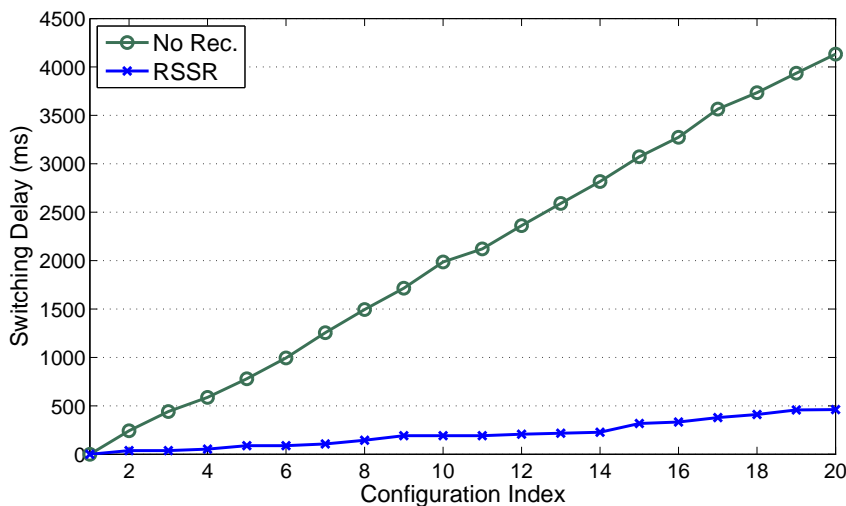
Αφού αξιολογήθηκε η αποδοτικότητα της ευρετικής μεθόδου RSSR, θεωρείται στο σημείο αυτό απαραίτητο να πραγματοποιηθεί και μια συνοπτική αναφορά τόσο στα άμεσα, όσο και στα έμμεσα οφέλη τα οποία πηγάζουν από την εφαρμογή της στο ανωτέρω Δίκτυο Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Κατ' αρχήν, λοιπόν, η Εικόνα 3.7 παρουσιάζει την προ-

**Πίνακας 3.2:** Διαστάσεις σχηματιζόμενων υπο-προβλημάτων από την ευρετική μέθοδο RSSR.

Config. Index	Original Reconfiguration Problem = 100%									
	Step	Step	Step	Step	SCF (%)					
	1 (%)	2 (%)	3 (%)	4 (%)	Flow 1	Flow 2	Flow 3	Flow 4	Flow 5	
C1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
C2	1.69	3.29	12.62	18.06	5.06	1.33	0.22	1.32	0.73	
C3	1.55	3.09	12.06	12.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
C4	1.40	2.89	11.01	11.54	0.00	0.46	3.13	2.31	0.00	
C5	1.39	2.70	10.11	13.24	5.37	0.00	2.58	3.09	3.29	
C6	1.46	2.76	12.36	15.31	0.00	0.00	2.08	0.00	0.00	
C7	1.74	3.31	15.95	21.53	0.00	0.00	1.67	3.73	0.00	
C8	1.90	3.53	15.33	23.35	3.94	1.65	1.21	0.00	0.00	
C9	1.70	3.48	14.70	15.72	3.29	1.48	0.27	0.30	0.87	
C10	1.73	3.30	16.10	14.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
C11	1.13	2.66	9.71	16.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
C12	1.40	2.41	11.62	15.47	7.62	0.83	1.96	4.75	3.75	
C13	1.22	2.64	8.62	11.98	5.44	2.70	1.86	1.55	0.98	
C14	1.48	2.70	11.06	8.85	6.84	2.14	0.00	3.19	5.69	
C15	1.83	3.44	14.63	17.31	5.80	0.00	0.00	0.35	1.95	
C16	0.00	2.88	11.91	13.94	0.00	0.00	0.80	3.79	0.00	
C17	1.52	2.66	12.53	17.96	4.80	2.38	1.00	0.09	0.10	
C18	0.00	2.64	11.42	18.13	0.00	2.94	1.17	5.07	1.39	
C19	1.26	2.33	10.80	14.53	5.97	3.89	4.13	3.25	1.94	
C20	1.11	2.58	13.06	11.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

σθετική Αθροιστική Καθυστέρηση Μεταγωγών Καναλιού η οποία εισάγεται στο ανωτέρω δίκτυο κατά τις είκοσι (20) διαδοχικές αναδιαρθρώσεις των αναθέσεων πόρων του. Πιο συγκεκριμένα, υπό την ετικέτα 'No Rec.' παρουσιάζεται η εξέλιξη του προαναφερθέντος μεγέθους κατά τη συμβατική πρακτική όπου κάθε επόμενη ανάθεση πόρων υπολογίζεται απλά επιλύοντας εκ νέου το πρόβλημα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο, ενώ υπό την ετικέτα 'RSSR' παρουσιάζεται η αντίστοιχη εξέλιξη κατά την επιπλέον επίλυση του συμπληρωματικού προβλήματος της Βέλτιστης

Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων βάσει της μεθόδου RSSR<sup>2</sup>. Η εν λόγω εικόνα, μάλιστα, αποτυπώνει ότι η μέθοδος RSSR κατάφερε στην προκειμένη περίπτωση να μειώσει κατά σχεδόν 700% την προσθετική Αθροιστική Καθυστέρηση Μεταγωγών Καναλιού η οποία εισήχθη στο ανωτέρω δίκτυο ύστερα από μόλις είκοσι (20) διαδοχικές αναδιρθρώσεις των αναθέσεων πόρων του. Σε όμοιο ποσοστό, κατ' επέκταση, επετεύχθη μείωση τόσο των χαμένων ευκαιριών μετάδοσης, όσο και της διακοπής υπηρεσίας της οποίας κατέστησαν αποδέκτες οι αντίστοιχοι Δευτερεύοντες Χρήστες, ενώ παράλληλα αυξήθηκε τόσο η απολαμβανόμενη από πλευράς των τελευταίων Ποιότητα Υπηρεσίας και Εμπειρίας, όσο και ο συνολικός βαθμός χρησιμοποίησης του διαθέσιμου ραδιοφάσματος.

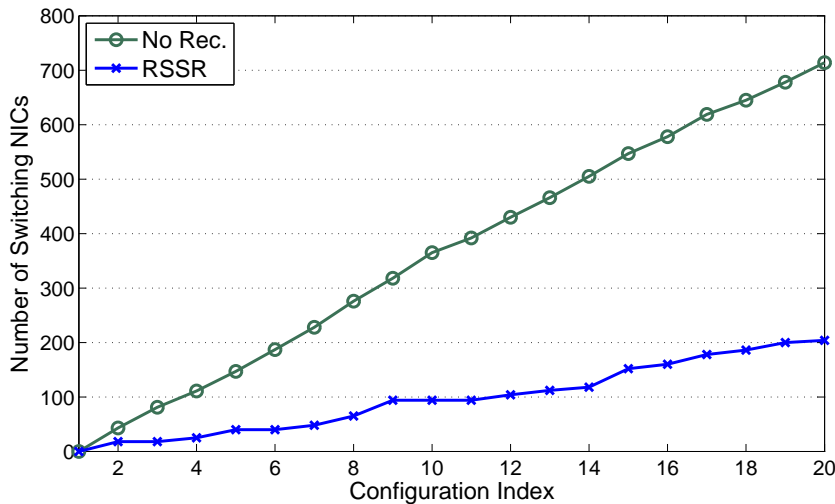


**Εικόνα 3.7:** Προσθετική Αθροιστική Καθυστέρηση Μεταγωγών Καναλιού.

Κατ' αντιστοιχία με την Εικόνα 3.7, η Εικόνα 3.8 παρουσιάζει τον προσθετικό αριθμό διεπαφών οι οποίες απαιτήθηκε να προβούν σε μεταγωγή καναλιού κατά τις διαδοχικές αναδιρθρώσεις των αναθέσεων πόρων του ανωτέρω δικτύου. Ακριβέστερα, και παρά το γεγονός ότι δεν λαμβάνεται ρητή μέριμνα προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση, η Εικόνα 3.8 αποδεικνύει ότι η ευρετική μέθοδος RSSR κατάφερε να μειώσει κατά σχεδόν 250% το εν λόγω μέγεθος ύστερα από μόλις είκοσι (20) διαδοχικές αναδιρθρώσεις των αναθέσεων πόρων. Σε όμοιο ποσοστό, κατ' επέκταση, επετεύχθη μείωση τόσο της συνο-

<sup>2</sup>Η Αθροιστική Καθυστέρηση Μεταγωγών Καναλιού η οποία εισάγεται στο ανωτέρω δίκτυο κατά την αναδιάρθρωση των αναθέσεων πόρων του συνδέεται στην προκειμένη περίπτωση με την αθροιστική απόσταση σε MHz την οποία καλούνται να καλύψουν μέσω μεταγωγής καναλιού οι αντίστοιχες διεπαφές δικτύου μέσω της αναλογίας 10 ms ανά 10 MHz [76, 77].

λικής ενέργειας η οποία σπαταλήθηκε από πλευράς των αναδιαρθρούμενων ασύρματων συσκευών του ανωτέρω δικτύου, όσο και του όγκου των πακέτων διαχείρισης τα οποία μεταδόθηκαν πάνω από αυτό προς ολοκλήρωση των απαιτούμενων τροποποιήσεων των παραμέτρων λειτουργίας τους.

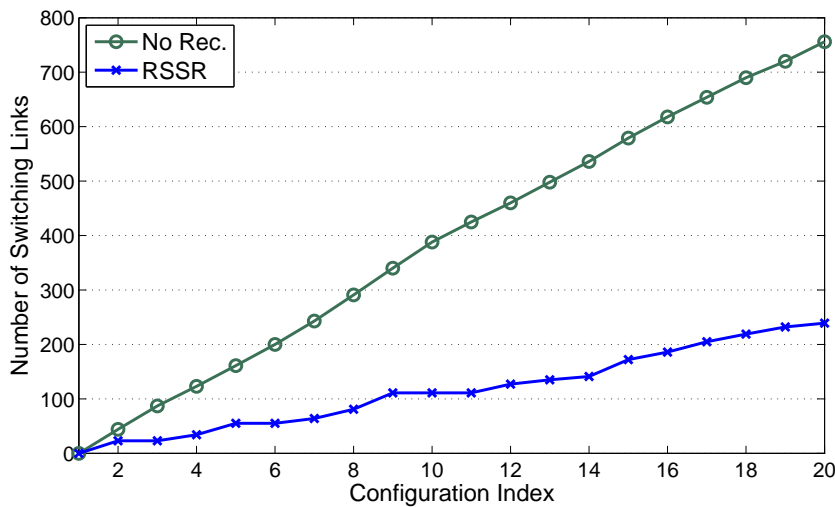


**Εικόνα 3.8:** Προσθετικός αριθμός διεπαφών δικτύου οι οποίες προβαίνουν σε μεταγωγή καναλιού.

Σύμφωνα με την Εικόνα 3.9, τέλος, η ευρετική μέθοδος RSSR κατάφερε να μειώσει σημαντικά και τον προσθετικό αριθμό ζεύξεων οι οποίες επηρεάστηκαν κατά την αναδιάρθρωση των αναθέσεων πόρων του ανωτέρω δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος RSSR φέρεται να ενθάρρυνε τη διατήρηση και, κατ' επέκταση, να αποθάρρυνε τη δημιουργία και τη διαγραφή ζεύξεων κατά τις είκοσι (20) διαδοχικές αναδιαρθρώσεις των αναθέσεων πόρων του ανωτέρω δικτύου, μειώνοντας αντίστοιχα τόσο τον όγκο των πακέτων διαχείρισης τα οποία απαιτήθηκε να μεταδοθούν προς ενημέρωση των ασύρματων συσκευών του περί του εκάστοτε τροποποιημένου πλάνου δρομολόγησης, όσο και την έκταση του ανακύπτοντος φαινομένου των απωλειών πακέτων (υπενθυμίζεται ότι όσα πακέτα βρίσκονται ακόμα υπό μετάδοση κατά την αναδιάρθρωση των υποκείμενων ζεύξεων αδυνατούν να προσεγγίσουν τον προορισμό τους και θεωρούνται αναπόφευκτα ως απωλεσθέντα).

### 3.6.3 Μελέτη κλιμακωσιμότητας λειτουργίας ευρετικής μεθόδου RSSR

Στόχο της παρούσας παραγράφου αποτελεί η επίδειξη της κλιμακωσιμότητας της λειτουργίας της προτεινόμενης ευρετικής μεθόδου RSSR, δηλαδή της δυνατότητας της να



**Εικόνα 3.9:** Προσθετικός αριθμός επανεγκαθιδρυόμενων ζεύξεων.

παρέχει γρήγορα ποιοτικές πλησιοβέλτιστες λύσεις ακόμα και σε προβλήματα Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων τα οποία αναπτύσσονται επί Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας μεγάλου μεγέθους. Προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση επεκτείνεται το σενάριο προσομοίωσης της αμέσως προηγούμενης παραγράφου σε δίκτυα αυξημένου αριθμού τόσο ασύρματων συσκευών, όσο και ροών δεδομένων. Ακριβέστερα, σε πρώτη φάση αυξάνεται προοδευτικά ο αριθμός των ροών δεδομένων τις οποίες καλείται να εξυπηρετήσει το προαναφερθέν Δίκτυο Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, ενώ σε δεύτερη φάση εξετάζονται εναλλακτικά δίκτυα αυξημένου αριθμού ασύρματων συσκευών. Σε τρίτη φάση, δε, εξετάζεται ένα ρεαλιστικό Δίκτυο Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας το οποίο χαρακτηρίζεται από αυξημένο αριθμό τόσο ροών δεδομένων, όσο και ασύρματων συσκευών, επαληθεύοντας ουσιαστικά τη δυνατότητα της μεθόδου RSSR να αντεπεξέρχεται ικανοποιητικά ακόμα και σε εξαιρετικά απαιτητικές συνθήκες λειτουργίας. Ο Πίνακας 3.3 συνοψίζει τις διαφορές μεταξύ των ανωτέρω δικτύων, ενώ σημειώνεται ότι κάθε σενάριο προσομοίωσης το οποίο αναπτύσσεται στα πλαίσια της παρούσας παραγράφου εστιάζει σε οκτώ (8) διαδοχικές καταστάσεις λειτουργίας (όσον αφορά τη διαθεσιμότητα καναλιών σε ασύρματες συσκευές Δευτερευόντων Χρηστών) ενός αντίστοιχου εξεταζόμενου δικτύου ( $x - Cx$ ).

Σε πλήρη συμφωνία με το σενάριο προσομοίωσης το οποίο περιγράφηκε αναλυτικά στην αμέσως προηγούμενη παράγραφο, κάθε φορά που το περιβάλλον λειτουργίας ενός εκ των ανωτέρω δικτύων μεταπίπτει σε μια νέα κατάσταση η ισχύουσα ανάθεση πόρων



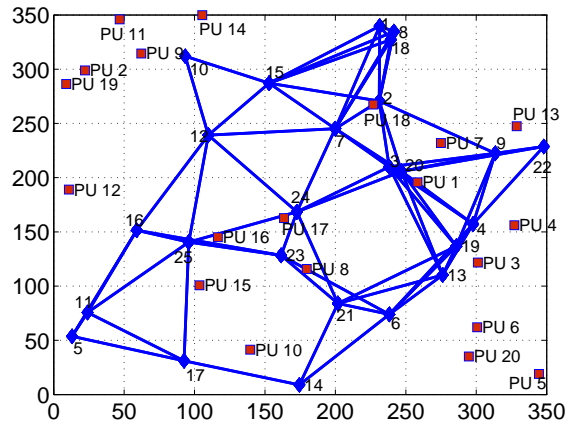
του θα πρέπει να αναδιαρθρώνεται, επιλύοντας αρχικά εκ νέου το πρόβλημα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο βάσει της ευρετικής μεθόδου 'Truncated MIP' (για λόγους που αναφέρθηκαν αναλυτικά στην Παράγραφο 3.6.2). Εν συνεχεία, θα πρέπει να επιλύεται συμπληρωματικά και το πρόβλημα της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων, στοχεύοντας ουσιαστικά στον υπολογισμό μιας εναλλακτικής ανάθεσης πόρων, της οποίας ο Παράγοντας Κλίμακας  $\lambda$  θα ταυτίζεται με τον αντίστοιχο παράγοντα  $\lambda_{opt}$ , αλλά παράλληλα αυτή θα ελαχιστοποιεί την επιβάρυνση η οποία πρόκειται να προκληθεί κατά την εφαρμογή της στο αντίστοιχο αναδιαρθρούμενο δίκτυο. Το μεγάλο μέγεθος των εν λόγω δικτύων, ωστόσο, καθιστά ανέφικτο τον εντοπισμό των κατά περίπτωση βέλτιστων λύσεων στο ανωτέρω πρόβλημα, επιβάλλοντας ουσιαστικά την πλησιοβέλτιστη προσέγγισή του βάσει της ευρετικής μεθόδου RSSR (βλ. Ενότητα 3.5). Κατ' αντιστοιχία, μάλιστα, με το σενάριο της αμέσως προηγούμενης παραγράφου, οι πλησιοβέλτιστες λύσεις της μεθόδου RSSR αντιπαραβάλλονται στα πλαίσια των ακόλουθων σεναρίων τόσο με τις αντίστοιχες λύσεις τις οποίες δύναται να παρέχει ο λύτης CPLEX [21] ύστερα από το πολύ 300 λεπτά (ήτοι 5 ώρες) συνεχούς εκτέλεσης, όσο και με τα αντίστοιχα άνω φράγματα επιβάρυνσης τα οποία θα παρουσιάζονταν στα ανωτέρω δίκτυα κατά την πλήρη απουσία του προδιαγραφόμενου μηχανισμού αποδοτικής αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων. Όμοια, δε, με τον Πίνακα 3.1 οι ακόλουθοι πίνακες παρουσιάζουν για κάθε πρόβλημα Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων το οποίο σχηματίζεται σε κάθε νέα κατάσταση στην οποία μεταπίπτει καθένα εκ των ανωτέρω δικτύων τόσο τον χρόνο υπολογισμού των εφαρμοζόμενων επ' αυτού μεθόδων επίλυσης εκφρασμένο σε λεπτά (ετικέτα 'Comput. Time (min)'), όσο και την αντίστοιχη προκύπτουσα επιβάρυνση εκφρασμένη ως απόσταση σε MHz την οποία καλούνται να καλύψουν οι διεπαφές των ανωτέρω δικτύων μέσω μεταγωγής καναλιού (ετικέτα 'Cumul. switching dist. (MHz)'). Η εν λόγω απόσταση, μάλιστα, υπολογίζεται στην προκειμένη περίπτωση βάσει της φέρουσας συχνότητας  $f_c^{(u)}$  κάθε καναλιού  $u$ , επιβάλλοντας ουσιαστικά την πλήρη απενεργοποίηση κάθε διεπαφής δικτύου στην οποία δεν ανατίθεται κάποιο κανάλι.

**Πίνακας 3.3:** Χαρακτηριστικά εξεταζόμενων Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας.

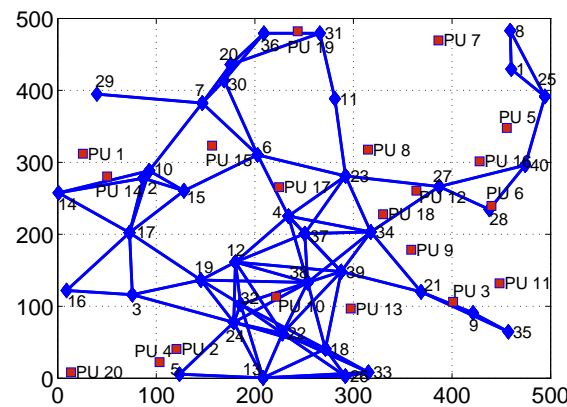
Net. Topologies Index	Simulation Parameters				
	SUs	PUs	Active Flows	Spectrum Bands (MHz)	Bandwidth per Channel (MHz)
I	25	5	5	622 – 637	15x1
II	25	5	7	622 – 637	15x1
III	25	5	8	622 – 637	15x1
IV	25	20	5	542 – 550	4x2
				627 – 638	11x1
V	40	20	5	542 – 550	4x2
				627 – 638	11x1
VI	50	20	5	542 – 550	4x2
				627 – 638	11x1
VII	50	20	8	542 – 550	4x2
				627 – 638	11x1

Σε πρώτη φάση, λοιπόν, εκτελούνται τρία σενάρια προσομοιώσεων, τα οποία αναπτύσσονται επί των τοπολογιών I, II και III του Πίνακα 3.3, αντίστοιχα. Αναλυτικότερα, τα τρία αυτά σενάρια αναπτύσσονται επί ενός Δικτύου Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας το οποίο αποτελείται από εικοσιπέντε (25) ασύρματες συσκευές Δευτερευόντων Χρηστών ( $N = 25$ ) και ακολουθεί την τυχαία τοπολογία της Εικόνας 3.10(α'). Το εν λόγω δίκτυο θεωρείται ότι καλείται να εξυπηρετήσει τις απαιτήσεις σε ρυθμό μετάδοσης πέντε (5), επτά (7) και οκτώ (8) ροών δεδομένων ( $h = 5, 7, 8$ ), αντίστοιχα, ενώ στο σημείο αυτό αποφεύγεται η περαιτέρω αναφορά στα ακροσημεία και στον ρυθμό μετάδοσης καθεμίας εξ αυτών, δεδομένης της χαμηλής τους σημασίας για την παρούσα περιγραφή. Παράλληλα, το ανωτέρω δίκτυο θεωρείται ότι διαθέτει προς εκμετάλλευση δεκαπέντε ( $|U| = 15$ ) διαδοχικά κανάλια εύρους ζώνης 1 MHz έκαστο ( $W_u = 1$  MHz), τα οποία ανήκουν στο εύρος συχνοτήτων 622 – 637 MHz των μερίδων φάσματος TVWS [50]. Τέλος, πέντε (5) Πρωτεύοντες Χρήστες θεωρούνται τυχαία διασκορπισμένοι στο εσωτερικό της ανωτέρω τοπολογίας, επηρεάζοντας συχνά την κατάσταση λειτουργίας του εν λόγω δικτύου όσον

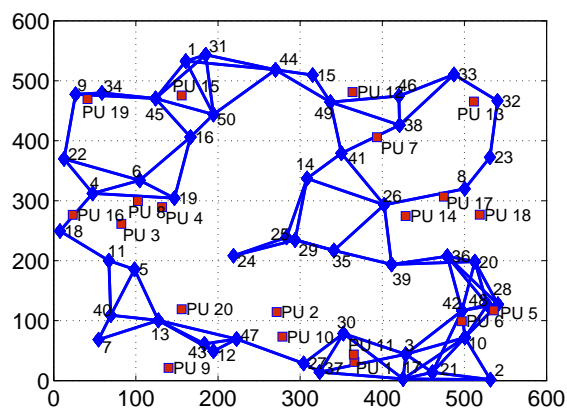
αφορά τη διαθεσιμότητα καναλιών στις ασύρματες συσκευές των Δευτερευόντων Χρηστών του.



(α')



(β')



(γ')

Εικόνα 3.10: Τοπολογίες εξεταζόμενων Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας.

Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης των τριών ανωτέρω σεναρίων παρουσιάζονται αναλυτικά στον ακόλουθο Πίνακα 3.4, ο οποίος επαληθεύει, κατ' αρχήν, τη δυνατότητα της ευρετικής μεθόδου RSSR (ετικέτα 'RSSR') να εντοπίζει πάντοτε εφικτές πλησιοβέλτιστες λύσεις στα επιλυόμενα προβλήματα Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων, εν αντιθέσει με τον λύτη CPLEX ο οποίος αδυνατεί συχνά να εντοπίσει σχετικές λύσεις ακόμα και ύστερα από 5 ώρες συνεχούς εκτέλεσης (ετικέτα 'CPLEX' παρουσία σύμβολου [-], περιπτώσεις I-C2, I-C5, I-C8, II-C3, II-C4, III-C4 και III-C7). Στο σύνολο των εξεταζόμενων περιπτώσεων, μάλιστα, οι εντοπισθείσες αναθέσεις πόρων της μεθόδου RSSR (ετικέτα 'RSSR') δύνανται να μειώσουν σημαντικά το κόστος αναδιάρθρωσης του ανωτέρω δικτύου συγκριτικά με τα αντίστοιχα άνω φράγματα επιβάρυνσης (ετικέτα 'No Rec. '), ενώ όποτε καθίσταται εφικτή η σύγκρισή τους με τις αντίστοιχες βέλτιστες αναθέσεις πόρων οι μεταξύ τους αποκλίσεις προκύπτουν από αμελητέες έως μηδενικές (ετικέτα 'CPLEX' απουσία συμβόλων [-] και [+], περιπτώσεις I-C3, I-C6, I-C7, II-C2, II-C5, II-C7, III-C2, III-C5 και III-C6). Αξιοσημείωτη, ωστόσο, θεωρείται η περίπτωση II-C7, κατά την οποία η μέθοδος RSSR φέρεται να εντόπισε μια λύση ποιοτικότερη από αυτήν που ανέφερε ο λύτης CPLEX ως βέλτιστη (!). Η εν λόγω συμπεριφορά οφείλεται στο γεγονός ότι οι σύγχρονοι λύτες αποφεύγουν την εξαντλητική απαρίθμηση του συνόλου των εφικτών λύσεων κάθε επιλυόμενου προβλήματος, αλλά αντίθετα προχωρούν στην επιλεκτική απαρίθμηση τους βάσει προσεγγιστικών ορίων ακεραιότητας και βελτιστότητας. Η τεχνική αυτή, ωστόσο, ενδέχεται να οδηγήσει στην παράβλεψη της εκάστοτε ολικά βέλτιστης λύσης του αντίστοιχου προβλήματος, οδηγώντας έτσι στην αναφορά ως βέλτιστης μιας απλά εφικτής λύσης του (όπως ακριβώς συνέβη και στην παρούσα περίπτωση). Στην πλειοψηφία των εξεταζόμενων περιπτώσεων, επίσης, ο χρόνος υπολογισμού της μεθόδου RSSR προκύπτει σημαντικά μικρότερος από αυτόν του λύτη CPLEX (περιπτώσεις I-C4, II-C4, II-C6, III-C3, III-C7 κτλ.), ενώ είναι ελάχιστες οι περιπτώσεις στις οποίες η συγκεκριμένη κατάσταση αντιστρέφεται (I-C3, I-C7, II-C2, II-C5 και III-C6). Το τελευταίο φαινόμενο, βέβαια, έγκειται στο γεγονός ότι στον χρόνο υπολογισμού κάθε εφαρμοζόμενης μεθόδου επίλυσης συμπεριλαμβάνονται στην προκειμένη περίπτωση και οι περιφερειακοί χρόνοι οι οποίοι αναφέρθηκαν αναλυτικά στην Παράγραφο 3.6.1. Ακριβέστερα, οι εν λόγω χρόνοι προστίθενται μια μόνο φορά στον χρόνο υπολογισμού του λύτη CPLEX, αλλά πολύ περισσότερες σε αυτόν της μεθόδου RSSR, και μάλιστα τόσες φορές όσες και τα κατά

περίπτωση σχηματιζόμενα από αυτήν υπο-προβλήματα. Παρά το γεγονός, λοιπόν, ότι οι ανωτέρω χρόνοι θεωρούνται αμελητέοι μπροστά στη σημαντική επιτάχυνση της διαδικασίας επίλυσης προβλημάτων Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Αναθέσεων Πόρων την οποία επιτυγχάνει η μέθοδος RSSR, στις σπάνιες περιπτώσεις όπου τα εξεταζόμενα προβλήματα δύνανται να επιλυθούν τάχιστα από τον λύτη CPLEX οι προαναφερθέντες χρόνοι φέρονται να επιβαρύνουν (ελάχιστα) την απόδοσή της. Ο Πίνακας 3.4, τέλος, επαληθεύει και το γεγονός ότι ο χρόνος υπολογισμού της μεθόδου RSSR δεν επηρεάζεται έντονα από τον αριθμό των ροών δεδομένων τις οποίες εξυπηρετούν τα κατά περίπτωση εξεταζόμενα δίκτυα. Ο αριθμός των εν λόγω ροών, άλλωστε, συναρτάται αποκλειστικά με τον αριθμό των συνεχών μεταβλητών απόφασης  $f_{imjn}^h$  οι οποίες εμπλέκονται στα αντίστοιχα σχηματιζόμενα προβλήματα Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων, αφήνοντας προφανώς ανέπαφη τη βάση της πολυπλοκότητάς τους, δηλαδή τον αριθμό των εμπλεκόμενων σε αυτά ακέραιων μεταβλητών απόφασης  $x_{imjn}^u$  (ο αριθμός των οποίων εξαρτάται αποκλειστικά από τον αριθμό των ζεύξεων και, κατ' επέκταση, την τοπολογία του εκάστοτε εξεταζόμενου δικτύου).

Σε δεύτερη φάση εκτελούνται τρία ακόμα σενάρια προσομοιώσεων τα οποία αναπτύσσονται επί των τοπολογιών VI, V και IV του Πίνακα 3.3, αντίστοιχα. Αναλυτικότερα, τα εν λόγω σενάρια αναπτύσσονται επί τριών Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας τα οποία αποτελούνται από εικοσιπέντε (25), σαράντα (40) και πενήντα (50) ασύρματες συσκευές Δευτερευόντων Χρηστών ( $N = 25, 40, 50$ ), αντίστοιχα, και τα οποία σχηματίζουν τις τυχαίες τοπολογίες των Εικόνων 3.10(α'), 3.10(β') και 3.10(γ'). Παράλληλα, τα ανωτέρω δίκτυα θεωρείται ότι διαθέτουν προς εκμετάλλευση δεκαπέντε ( $|U| = 15$ ) κανάλια, τα οποία όμως αυτήν τη φορά επιλέγονται ετερογενή με σκοπό την καλύτερη προσέγγιση των πραγματικών συνθηκών λειτουργίας των σύγχρονων Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Καθένα εκ των ανωτέρω δικτύων, τέλος, θεωρείται ότι καλείται να εξυπηρετήσει τις απαιτήσεις σε ρυθμό μετάδοσης πέντε (5) ροών δεδομένων ( $h = 5$ ), ενώ στο εσωτερικό τους θεωρείται ότι λειτουργούν είκοσι (20) τυχαία διασκορπισμένοι Πρωτεύοντες Χρήστες.

Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης των ανωτέρω σεναρίων συνοψίζονται στον Πίνακα 3.5, ο οποίος επαληθεύει, κατ' αρχήν, τη δυνατότητα της ευρετικής μεθόδου RSSR (ετικέτα 'RSSR') να εντοπίζει πάντοτε εφικτές πλησιοβέλτιστες λύσεις στα επιλυόμενα προ-

**Πίνακας 3.4:** Αριθμητικά αποτελέσματα αξιολόγησης ευρετικής μεθόδου RSSR για τα σενάρια προσομοιώσεων I-III.

Config. Index	Cumul. Switching Dist. (MHz)			Comput. Time (min)		RSSR vs. CPLEX (× faster)
	No Rec.	RSSR	CPLEX	RSSR	CPLEX	
I-C1	—	—	—	—	—	—
I-C2	7079	<b>2547</b>	—	25.5614	300.4524	11.7541
I-C3	5775	0	0	2.5995	1.2701	0.4886
I-C4	6373	<b>14</b>	16 <sup>+</sup>	13.4670	300.4043	22.3067
I-C5	8263	<b>2519</b>	—	19.0879	300.4329	15.7394
I-C6	5175	0	0	2.5129	1.2744	0.5071
I-C7	10819	11	<b>6</b>	5.0506	2.6388	0.5225
I-C8	13344	<b>8185.5</b>	—	26.0297	300.4424	11.5423
Avg.	8118.2	1909.2	-	13.4727	172.4165	8.9801
II-C1	—	—	—	—	—	—
II-C2	7656	0	0	2.5992	1.3440	0.5171
II-C3	12698	<b>1893.5</b>	—	35.8262	245.0542*	6.8401
II-C4	12681	<b>1263</b>	—	7.3168	300.4302	41.0606
II-C5	7653	6	6	3.5427	1.3154	0.3713
II-C6	7026	<b>6</b>	10 <sup>+</sup>	4.1632	300.4075	72.1584
II-C7	11399	<b>6</b>	8	2.9796	3.0934	1.0382
II-C8	9594	<b>2502</b>	2528 <sup>+</sup>	34.6414	300.4151	8.6721
Avg.	9815.1	810.9286	-	13.0098	164.58	18.6654
III-C1	—	—	—	—	—	—
III-C2	12622	<b>14</b>	14	5.7552	9.5243	1.6549
III-C3	11409	<b>644.5</b>	651.5 <sup>+</sup>	6.2940	300.4238	47.7321
III-C4	13320	<b>7541</b>	—	37.6566	300.4502	7.9787
III-C5	12183	19	16	6.4499	116.5971	18.0775
III-C6	7682	10	<b>4</b>	4.5402	1.4852	0.3271
III-C7	10146	<b>20</b>	—	5.7433	300.4386	52.3113
III-C8	12723	<b>2516</b>	5094 <sup>+</sup>	36.3663	300.4464	8.2617
Avg.	11441	1537.8	-	14.6865	189.9094	19.4776

\* συμβολίζει την προειδοποίηση εξάντλησης της μνήμης RAM.

<sup>+</sup> συμβολίζει την καλύτερη λύση την οποία εντόπισε ο λύτης CPLEX εντός του τιθέμενου χρονικού ορίου εκτέλεσης.

<sup>-</sup> συμβολίζει την αποτυχία του λύτη CPLEX να εντοπίσει μια εφικτή λύση.

βλήματα Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων, εν αντιθέσει με τον λύτη CPLEX ο οποίος αδυνατεί συχνά να εντοπίσει σχετικές λύσεις ακόμα και ύστερα από 5 ώρες συνεχούς εκτέλεσης (ετικέτα 'CPLEX' παρουσία σύμβολου [-]). Στο σύνολο των εξεταζόμενων περιπτώσεων, μάλιστα, οι εντοπισθείσες αναθέσεις πόρων της μεθόδου RSSR (ετικέτα 'RSSR') δύνανται να μειώσουν σημαντικά το κόστος αναδιάρθρωσης των ανωτέρω δικτύων συγκριτικά με τα αντίστοιχα άνω φράγματα επιβάρυνσης (ετικέτα 'No Rec. '), ενώ όποτε καθίσταται εφικτή η σύγκρισή τους με τις αντίστοιχες βέλτιστες αναθέσεις πόρων, οι μεταξύ τους αποκλίσεις προκύπτουν σχεδόν μηδενικές (ετικέτα 'CPLEX' απουσία συμβόλων [-] και [+], περιπτώσεις IV-C3, V-C2, V-C6 και VI-C7). Σημειώνεται, επίσης, ότι η περίπτωση V-C6, κατά την οποία η μέθοδος RSSR φέρεται να εντόπισε μια λύση ποιοτικότερη από την αντίστοιχη βέλτιστη, δικαιολογείται με όμοιο τρόπο με την ανωτέρω περίπτωση II-C7, ενώ είναι γεγονός ότι στη συντριπτική πλειοψηφία των εξεταζόμενων περιπτώσεων ο χρόνος υπολογισμού της μεθόδου RSSR προκύπτει σημαντικά μικρότερος από αυτόν του λύτη CPLEX (περιπτώσεις IV-C7, V-C7, κτλ.), εντοπίζοντας μάλιστα σχεδόν πάντοτε λύσεις υψηλότερης ποιότητας.

Ο ανωτέρω Πίνακας 3.5, ωστόσο, επαληθεύει και το γεγονός ότι ο χρόνος υπολογισμού της μεθόδου RSSR επηρεάζεται έντονα από τον αριθμό των ασύρματων συσκευών οι οποίες απαρτίζουν τα δίκτυα επί των οποίων αναπτύσσονται τα κατά περίπτωση επιλυόμενα προβλήματα Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων. Το γεγονός αυτό, βέβαια, θεωρείται απόλυτα δικαιολογημένο, δεδομένου ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των εν λόγω συσκευών, τόσο αυξάνεται και ο αριθμός των ακέραιων μεταβλητών απόφασης  $x_{m,j_n}^u$  οι οποίες εμπλέκονται στα αντίστοιχα σχηματιζόμενα προβλήματα και, κατ'επέκταση, τόσο αυξάνεται η βάση της πολυπλοκότητάς τους. Αξιοσημείωτο, ωστόσο, θεωρείται το γεγονός ότι στο σύνολο των ανωτέρω περιπτώσεων ο χρόνος υπολογισμού της μεθόδου RSSR διατηρήθηκε σε απολύτως λογικά επίπεδα, συνυπολογίζοντας βέβαια τόσο την προδραστική φύση του προτεινόμενου μηχανισμού αναδιάρθρωσης, όσο και τη συχνότητα αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων την οποία επιβάλουν τα προσφάτως προτυποποιημένα σχετικά κανονιστικά πλαίσια. Ακόμα, όμως, και σε εξαιρετικές περιπτώσεις κατά τις οποίες δεν επαρκεί ο διαθέσιμος χρόνος για την ολοκλήρωση της διαδικασίας εκτέλεσης της προτεινόμενης μεθόδου RSSR, υπάρχει πάντοτε η δυνατότητα για τους διαχειριστές δικτύων να εκμεταλλεύονται την ιδιότητά της να εντοπίζει ποιοτικές πλη-

**Πίνακας 3.5:** Αριθμητικά αποτελέσματα αξιολόγησης ευρετικής μεθόδου RSSR για τα σενάρια προσομοιώσεων IV-VI.

Config. Index	Cumul. Switching Dist. (MHz)			Comput. Time (min)		RSSR vs. CPLEX (× faster)
	No Rec.	RSSR	CPLEX	RSSR	CPLEX	
IV-C1	–	–	–	–	–	–
IV-C2	9073	<b>1524</b>	–	19.5755	195.3378*	9.9787
IV-C3	7628	0	0	1.8559	0.8817	0.4751
IV-C4	14253	<b>5404</b>	–	24.0905	241.6176*	10.0296
IV-C5	19662	<b>13374</b>	–	23.5331	300.2532	12.7588
IV-C6	7897	<b>1995</b>	–	23.5469	300.2526	12.7512
IV-C7	9948	<b>4449</b>	–	3.3462	212.2038*	63.4168
IV-C8	10679	<b>3630</b>	15733 <sup>+</sup>	13.9917	300.2200	21.4569
Avg.	11306	4339.3	-	15.7057	221.5381	18.6953
V-C1	–	–	–	–	–	–
V-C2	11636	<b>1132</b>	1132	38.3459	295.1152	7.6961
V-C3	16927	<b>3376.5</b>	–	53.8027	300.5569	5.5863
V-C4	17596	<b>5027</b>	–	38.3716	300.5313	7.8321
V-C5	19273	<b>8050</b>	8414 <sup>+</sup>	39.0596	300.5770	7.6953
V-C6	14482	<b>101.5</b>	102.5	5.4658	5.3442	0.9778
V-C7	14840	<b>842.5</b>	862.5 <sup>+</sup>	7.3102	300.4370	41.0985
V-C8	4741	<b>375</b>	–	8.0997	0.9068	0.1119
Avg.	14214	2700.6	-	27.2079	214.7812	10.1426
VI-C1	–	–	–	–	–	–
VI-C2	30318	<b>13748</b>	–	90.2669	300.0000	3.3235
VI-C3	12881	<b>3895</b>	–	74.8834	300.0000	4.0062
VI-C4	15442	<b>5434</b>	–	55.0921	119.0387*	2.1607
VI-C5	9335	1034	1018.5 <sup>+</sup>	56.4359	300.7031	5.3282
VI-C6	18123	<b>2174</b>	–	52.7529	57.1687*	1.0837
VI-C7	16264	177	177	8.5179	7.8571	0.9224
VI-C8	15815	<b>7947</b>	–	71.1994	300.6221	4.2223
Avg.	16883	4915.5	-	58.4498	197.9128	3.0067

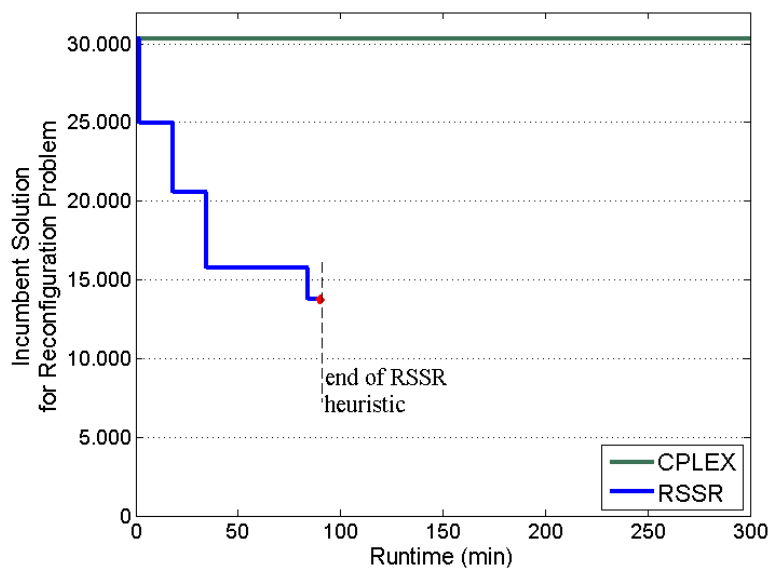
\* συμβολίζει την προειδοποίηση εξάντλησης της μνήμης RAM.

<sup>+</sup> συμβολίζει την καλύτερη λύση την οποία εντόπισε ο λύτης CPLEX εντός του τιθέμενου χρονικού ορίου εκτέλεσης.

– συμβολίζει την αποτυχία του λύτη CPLEX να εντοπίσει μια εφικτή λύση.



σιοβέλτιστες αναθέσεις πόρων ακόμα και κατά τα ενδιάμεσα βήματά της. Η αντιπροσωπευτική Εικόνα 3.11, μάλιστα, αποτυπώνει εμφανώς ότι η μέθοδος RSSR δύναται να εντοπίζει ποιοτικές σχετικές αναθέσεις πόρων από τα πρώτα κιόλας βήματα εκτέλεσής της, εν αντιθέσει με τον λύτη CPLEX ο οποίος αδυνατεί συχνά να εντοπίσει έστω και μια σχετική ανάθεση ακόμα και ύστερα από 5 ώρες συνεχούς εκτέλεσης (οπότε και ως νέα ανάθεση πόρων επιλέγεται αυτή που προκύπτει κατά την επίλυση του αντίστοιχου προβλήματος Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο).



**Εικόνα 3.11:** Προοδευτικός εντοπισμός πλησιοβέλτιστων αναθέσεων πόρων βελτιωμένης ποιότητας από πλευράς της μεθόδου RSSR (περίπτωση VI-C2).

Σε τρίτη φάση, τέλος, εκτελείται ένα ακόμα σενάριο προσομοίωσης, αυτήν τη φορά επί της τοπολογίας VII του Πίνακα 3.3. Αναλυτικότερα, το εν λόγω σενάριο αναπτύσσεται επί του μεγαλύτερου μέχρι το παρόν σημείο εξετασμένου Δικτύου Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, το οποίο αποτελείται από πενήντα (50) ασύρματες συσκευές Δευτερευόντων Χρηστών ( $N = 50$ ) και είκοσι (20) ασύρματες συσκευές Πρωτευόντων Χρηστών (βλ. τοπολογία Εικόνας 3.10(γ')). Το συγκεκριμένο δίκτυο θεωρείται ότι καλείται να εξυπηρετήσει τις απαιτήσεις σε ρυθμό μετάδοσης οκτώ (8) ροών δεδομένων ( $h = 8$ ), ενώ διαθέτει προς εκμετάλλευση δεκαπέντε ετερογενή κανάλια ( $|U| = 15$ ) (έντεκα (11) εύρους ζώνης 1 MHz και τέσσερα (4) εύρους ζώνης 2 MHz, τα οποία ανήκουν στα εύρη συχνοτήτων 627 – 638 και 542 – 550 MHz των μερίδων φάσματος TVWS [50], αντίστοιχα).

**Πίνακας 3.6:** Αριθμητικά αποτελέσματα αξιολόγησης ευρετικής μεθόδου RSSR για το σενάριο προσομοίωσης VII.

Config. Index	Cumul. Switching Dist. (MHz)			Comput. Time (min)		RSSR vs. CPLEX (× faster)
	No Rec.	RSSR	CPLEX	RSSR	CPLEX	
VII-C1	–	–	–	–	–	–
VII-C2	10432	<b>1255</b>	–	36.6713	117.0000*	3.1905
VII-C3	13055	4	4	6.7099	1.4053	0.2094
VII-C4	13494	<b>1557.5</b>	–	72.1560	300.7346	4.1678
VII-C5	14852	2472.5	1919.5 <sup>+</sup>	47.0440	300.7006	6.3919
VII-C6	14468	<b>732</b>	748 <sup>+</sup>	23.5879	300.7226	12.7490
VII-C7	12603	<b>1929.5</b>	–	48.0387	300.6509	6.2585
VII-C8	11946	<b>2918</b>	2924 <sup>+</sup>	42.9987	300.6704	6.9925
VII-C9	11235	1542.5	918 <sup>+</sup>	9.3905	300.6699	32.0186
Avg.	12761	1551.4	–	35.8246	240.3193	8.9973

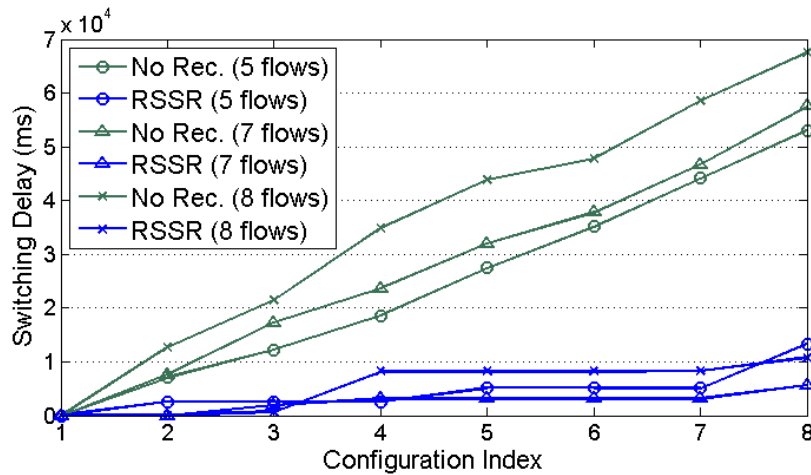
\* συμβολίζει την προειδοποίηση εξάντλησης της μνήμης RAM.

<sup>+</sup> συμβολίζει την καλύτερη λύση την οποία εντόπισε ο λύτης CPLEX εντός του τιθέμενου χρονικού ορίου εκτέλεσης.

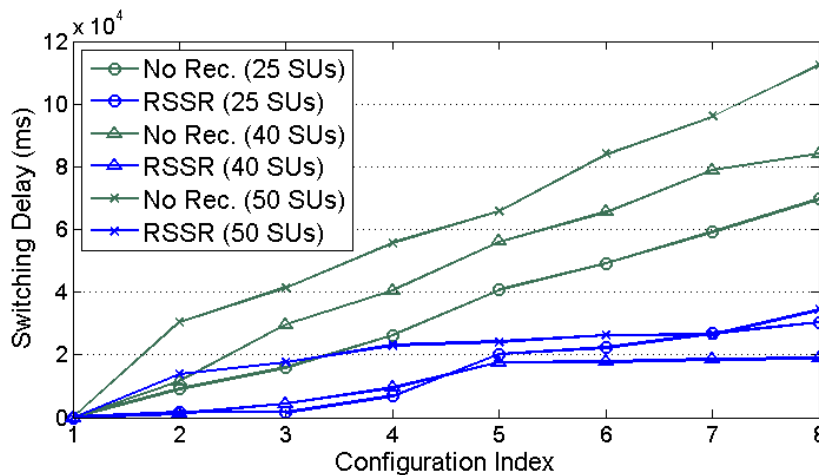
– συμβολίζει την αποτυχία του λύτη CPLEX να εντοπίσει μια εφικτή λύση.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του εν λόγω σεναρίου, αυτά συνοψίζονται στον Πίνακα 3.6, ο οποίος επαληθεύει κατ' αρχήν τη δυνατότητα της ευρετικής μεθόδου RSSR (ετικέτα 'RSSR') να εντοπίζει πάντοτε εφικτές πλησιοβέλτιστες λύσεις στα επιλυόμενα προβλήματα Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων, ακόμα και όταν αυτά αναπτύσσονται επί εξαιρετικά μεγάλων Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Στο σύνολο των εξεταζόμενων περιπτώσεων, μάλιστα, οι εντοπισθείσες αναθέσεις πόρων της μεθόδου RSSR (ετικέτα 'RSSR') δύνανται να μειώσουν σημαντικά το κόστος αναδιάρθρωσης του ανωτέρω δικτύου συγκριτικά με τα αντίστοιχα άνω φράγματα επιβάρυνσης (ετικέτα 'No Rec.'), ενώ στη μόνη περίπτωση στην οποία καθίσταται δυνατός ο εντοπισμός της αντίστοιχης βέλτιστης ανάθεσης πόρων η μεταξύ τους απόκλιση προκύπτει μηδενική (περίπτωση VII-C3). Σημειώνεται, τέλος, ότι στη συντριπτική πλειοψηφία των εξεταζόμενων περιπτώσεων ο χρόνος υπολογισμού της μεθόδου RSSR προκύπτει σημαντικά μι-

κρότερος από αυτόν του λύτη CPLEX.



(α')



(β')

**Εικόνα 3.12:** Προσθετική Αθροιστική Καθυστέρηση Μεταγωγών Καναλιού για τα σενάρια προσομοιώσεων I-VI.

Αφού αξιολογήθηκε εκτενώς η κλιμακωσιμότητα της λειτουργίας της ευρετικής μεθόδου RSSR, θεωρείται στο σημείο αυτό απαραίτητο να πραγματοποιηθεί και μια αναφορά στα άμεσα οφέλη τα οποία πηγάζουν από την εφαρμογή της στα ανωτέρω Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Αναλυτικότερα, στις Εικόνες 3.12(α') και 3.12(β') παρουσιάζεται η προσθετική Αθροιστική Καθυστέρηση Μεταγωγών Καναλιού η οποία εισάγεται στα ανωτέρω δίκτυα (τοπολογίες I-IV) κατά τις οκτώ (8) διαδοχικές αναδιρθρώσεις των αναθέσεων πόρων τους. Πιο συγκεκριμένα, υπό την ετικέτα 'No Rec.' παρουσιάζεται η εξέλιξη του προαναφερθέντος μεγέθους κατά τη συμβατική πρακτική όπου κάθε επόμενη ανάθεση πόρων υπολογίζεται απλά επιλύοντας εκ νέου το πρόβλημα της Συνδυασμένης

Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο, ενώ υπό την ετικέτα 'RSSR' παρουσιάζεται η αντίστοιχη εξέλιξη κατά την επιπλέον επίλυση του συμπληρωματικού προβλήματος της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων βάσει της μεθόδου RSSR<sup>3</sup>. Σύμφωνα με τις Εικόνες 3.12(α') και 3.12(β'), λοιπόν, προκύπτει ότι η μέθοδος RSSR κατάφερε στην προκειμένη περίπτωση να μειώσει σημαντικά την προσθετική Αθροιστική Καθυστέρηση Μεταγωγών Καναλιού η οποία εισήχθη στα ανωτέρω δίκτυα κατά τη διαδοχική αναδιάρθρωση των παρωχημένων αναθέσεων πόρων τους. Κατ' επέκταση, επετεύχθη η μείωση τόσο των χαμένων ευκαιριών μετάδοσης, όσο και της διακοπής υπηρεσίας της οποίας κατέστησαν οι αντίστοιχοι Δευτερεύοντες Χρήστες αποδέκτες, ενώ παράλληλα αυξήθηκε τόσο η απολαμβανόμενη από πλευράς των τελευταίων Ποιότητα Υπηρεσίας και Εμπειρίας, όσο και ο συνολικός βαθμός χρησιμοποίησης του διαθέσιμου ραδιοφάσματος.

### 3.7 Σύνοψη και συμπεράσματα

Τα προβλήματα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο και της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων μοντελοποιήθηκαν στα πλαίσια του Κεφαλαίου 2 ως προβλήματα βελτιστοποίησης Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού. Τέτοιου είδους προβλήματα, ωστόσο, ανήκουν εξ ορισμού στην τάξη των δυσεπίλυτων προβλημάτων NP-hard [15], γεγονός το οποίο θέτει σε κίνδυνο τη δυνατότητα εφαρμογής τους σε πραγματικά Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Με σκοπό, λοιπόν, την αποκατάσταση της πρακτικότητας των εν λόγω μηχανισμών, παρουσιάστηκαν στο παρόν κεφάλαιο κατάλληλες μέθοδοι οι οποίες δύνανται να παρέχουν εξαιρετικά γρήγορα ποιοτικές πλησιοβέλτιστες λύσεις στα ανωτέρω προβλήματα βελτιστοποίησης, ακόμα και όταν αυτά αναπτύσσονται επί Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας μεγάλου μεγέθους.

Όσον αφορά το πρόβλημα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο, αυτό προσεγγίστηκε πλησιοβέλτιστα με τη βοήθεια τριών εναλλα-

---

<sup>3</sup> Η Αθροιστική Καθυστέρηση Μεταγωγών Καναλιού η οποία εισάγεται στα ανωτέρω δίκτυα κατά την αναδιάρθρωση των αναθέσεων πόρων τους συνδέεται στην προκειμένη περίπτωση με την αθροιστική απόσταση σε MHz την οποία καλούνται να καλύψουν μέσω μεταγωγής καναλιού οι αντίστοιχες διεπαφές τους μέσω της αναλογίας 10 ms ανά 10 MHz [76, 77].

κτικών ευρετικών μεθόδων οι οποίες αποφεύγουν ρητά υποθέσεις που αντιτίθενται στις αρχές λειτουργίας τόσο της Γνωσιακής, όσο και της Λογισμικόριστης Ραδιοεπικοινωνίας. Ακριβέστερα, επιστρατεύτηκαν οι δημοφιλείς ευρετικές μέθοδοι γενικού σκοπού 'Diving' και 'Truncated MIP', ενώ προτάθηκε και μια βελτιωμένη εκδοχή της πρώτης, ονόματι 'Diving with Backtracking'.

Όσον αφορά το πιο περίπλοκο πρόβλημα της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων, αντίθετα, αυτό απαιτήθηκε να προσεγγιστεί πλησιοβέλτιστα με τη βοήθεια μιας εξειδικευμένης στο συγκεκριμένο πρόβλημα ευρετικής μεθόδου. Προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση προδιαγράφηκε η μέθοδος 'Reduced Search Space Reconfiguration' (RSSR), η οποία εκμεταλλεύεται την ιδιαίτερη δομή του ανωτέρω προβλήματος, προχωρώντας ουσιαστικά στην αποδόμησή του σε μια ακολουθία υπο-προβλημάτων σημαντικά μειωμένων διαστάσεων. Ανάμεσα, μάλιστα, στα κυριότερα πλεονεκτήματα της εν λόγω μεθόδου συγκαταλέγονται η κλιμακωσιμότητα της λειτουργίας της, η αποφυγή λήψης κοντόφθαλμων αποφάσεων, η δραστική αντιμετώπιση του φαινομένου της παγίδευσης σε χώρους ανέφικτων λύσεων, καθώς και η ιδιότητά της να παρέχει εφικτές λύσεις ακόμα και πριν την ολοκλήρωση της διαδικασίας εκτέλεσής της.

Οι δυνατότητες και τα οφέλη της ευρετικής μεθόδου RSSR αξιολογήθηκαν στο παρόν κεφάλαιο βάσει εκτενών σεναρίων προσομοιώσεων που αναπτύχθηκαν σε ένα περιβάλλον το οποίο προσεγγίζει βέλτιστα αυτό των πραγματικών Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Βάσει των εν λόγω προσομοιώσεων επαληθεύθηκε, κατ' αρχήν, η δυνατότητα της προτεινόμενης μεθόδου να εντοπίζει ποιοτικές πλησιοβέλτιστες λύσεις σε κάθε επιλυόμενο πρόβλημα Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων εντός άκρως αποδεκτών χρονικών διαστημάτων εκτέλεσης. Παράλληλα, επαληθεύθηκε η κλιμακωσιμότητα της λειτουργίας της, δηλαδή η δυνατότητά της να παρέχει γρήγορα πλησιοβέλτιστες λύσεις ακόμα και σε προβλήματα τα οποία αναπτύσσονται επί ρεαλιστικών Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας μεγάλου μεγέθους. Επιπρόσθετα, η μέθοδος RSSR απεδείχθη ικανή να αντιμετωπίζει αποτελεσματικά το φαινόμενο της παγίδευσης σε χώρους ανέφικτων λύσεων, δυνάμενη μάλιστα να παρέχει πλησιοβέλτιστες λύσεις ακόμα και πριν την ολοκλήρωση της διαδικασίας εκτέλεσής της. Ταυτόχρονα, η εν λόγω μέθοδος απεδείχθη ικανή να μειώνει σημαντικά την προσθετική Αθροιστική Καθυστέρηση Μεταγωγών Καναλιού η οποία εισάγεται στα κατά περίπτωση αναδιαρθρούμενα δίκτυα, αυξάνοντας

κατ' επέκταση τόσο την Ποιότητα Υπηρεσίας και Εμπειρίας την οποία απολαμβάνουν οι αντίστοιχοι Δευτερεύοντες Χρήστες τους, όσο και τον συνολικό βαθμό χρησιμοποίησης του ραδιοφάσματος. Παράλληλα, κατέστη εμφανής η δυνατότητα της μεθόδου RSSR να μειώνει σημαντικά τον προσθετικό αριθμό διεπαφών δικτύου οι οποίες απαιτείται να προβαίνουν σε μεταγωγή καναλιού κατά την αναδιάρθρωση παρωχημένων αναθέσεων πόρων, μειώνοντας αντίστοιχα τόσο την ενέργεια η οποία σπαταλιέται από πλευράς των εμπλεκόμενων σε αυτές ασύρματων συσκευών, όσο και τον όγκο των πακέτων διαχείρισης τα οποία απαιτείται να μεταδίδονται προς τροποποίηση των παραμέτρων λειτουργίας τους. Τέλος, η ανωτέρω μέθοδος απεδείχθη ικανή να διατηρεί και αρκετές ζεύξεις ανέπαφες στο εσωτερικό των κατά περίπτωση αναδιαρθρούμενων δικτύων, συμβάλλοντας έτσι στη μείωση τόσο του όγκου των πακέτων διαχείρισης τα οποία απαιτείται να μεταδίδονται προς ανανέωση των υφιστάμενων πλάνων δρομολόγησης, όσο και της έκτασης του ανακύπτοντος φαινομένου των απωλειών πακέτων.

## Κεφάλαιο 4

# Επισκόπηση Κατάληψης Φάσματος στην περιοχή των Αθηνών

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγική Ενότητα 1, κανονιστικοί φορείς οι οποίοι πρόσκαινται στην κυβέρνηση κάθε χώρας αναθέτουν σήμερα το αποκλειστικό δικαίωμα χρήσης συγκεκριμένων φασματικών ζωνών σε Πρωτεύοντες Χρήστες. Υπάρχουν, ωστόσο, ισχυρές ενδείξεις ότι το συγκεκριμένο μοντέλο διαχείρισης οδηγεί στην έντονη υποχρησιμοποίηση του ραδιοφάσματος, αφήνοντας ανεκμετάλλευτες σημαντικές ευκαιρίες μετάδοσης. Τις συγκεκριμένες ακριβώς ευκαιρίες στοχεύει να εκμεταλλευτεί η τεχνολογία της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας με σκοπό τη μετρίαση της σπατάλης ενός τόσο σημαντικού κοινωνικού και οικονομικού πόρου όπως το ραδιοφάσμα.

Είμαι γεγονός, ωστόσο, ότι απαραίτητη προϋπόθεση για την υλοποίηση της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας στην πράξη αποτελεί η επαλήθευση της εμφάνισης των προαναφερθεισών ευκαιριών μετάδοσης στο πραγματικό περιβάλλον ραδιοσυχνότητων. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, λοιπόν, εκτελείται μια *Επισκόπηση Κατάληψης Φάσματος* (Spectrum Occupancy Survey) η οποία καταγράφει και, εν συνεχεία, παρουσιάζει λεπτομερώς πληροφορίες σχετικά με τη δραστηριότητα των πραγματικών Πρωτευόντων Χρηστών στο ραδιοφάσμα εντός της μητροπολιτικής περιοχής των Αθηνών. Μέσω της συγκεκριμένης μελέτης αναμένεται να καταστεί δυνατή η λήψη μιας ρεαλιστικότερης άποψης τόσο επί της πραγματικής κατάστασης κατάληψης διαφόρων ζωνών του ραδιοφάσματος, όσο και επί του τρόπου πρόσβασης των αντίστοιχων Πρωτευόντων Χρηστών σε αυτές. Απώτερο σκοπό της εν λόγω προσπάθειας, βέβαια, αποτελεί η εξαγωγή σημαντι-

κών συμπερασμάτων σχετικά με τη δυνατότητα άμεσης μεταφοράς της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας και, κατ' επέκταση, της πραγματοποιούμενης έρευνας στο πραγματικό περιβάλλον ραδιοσυχνότητων.

## 4.1 Κίνητρα και οφέλη

Οι Πρωτεύοντες Χρήστες φέρονται σήμερα αδύναμοι να εκμεταλλευτούν πλήρως τις νόμιμα ανατεθειμένες σε αυτούς φασματικές ζώνες. Αναπόφευκτα, λοιπόν, σημαντικά μέρη του ραδιοφάσματος παραμένουν αχρησιμοποίητα τόσο στη διάσταση του χρόνου (ήτοι συγκεκριμένες ώρες της ημέρας ή της εβδομάδας), όσο και στη διάσταση του χώρου (ήτοι σε συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές). Από την άλλη πλευρά, τα σύγχρονα τεχνολογικά επιτεύγματα επιτρέπουν ήδη την παροχή ασύρματων υπηρεσιών οι οποίες μέχρι πριν λίγα χρόνια φάνταζαν ως ανέφικτες, αλλά η μαζική τους ανάπτυξη καθυστερεί λόγω της έλλειψης ελεύθερων φασματικών ζωνών.

Τη λύση στα ανωτέρω προβλήματα υπόσχεται να δώσει η τεχνολογία της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας μέσω της έξυπνης εκμετάλλευσης των προαναφερθεισών ευκαιριών μετάδοσης. Παρά την εντατική έρευνα, ωστόσο, η οποία πραγματοποιείται τα τελευταία χρόνια στο πεδίο της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, είναι γεγονός ότι η δυνατότητα μεταφοράς των οφελών της στο πραγματικό περιβάλλον εξαρτάται άμεσα από το κατά πόσον υφίστανται σε αυτό ευκαιρίες μετάδοσης οι οποίες θεωρούνται άξιες εκμετάλλευσης στην πράξη. Με σκοπό, λοιπόν, τον έλεγχο της συγκεκριμένης υπόθεσης, πραγματοποιούνται τον τελευταίο καιρό παγκοσμίως οι λεγόμενες Επισκοπήσεις Κατάληψης Φάσματος. Οι εν λόγω μελέτες απαιτούν την περιοδική επαίσθηση σχετικά ευρέων ζωνών συχνοτήτων με σκοπό την καταγραφή της δραστηριότητας των Πρωτευόντων Χρηστών τους στις αντίστοιχες γεωγραφικές περιοχές ενδιαφέροντος. Κύριο στόχο της συγκεκριμένης πρακτικής αποτελεί η αποτύπωση διαφόρων στατιστικών μεγεθών σχετικά με την κατάσταση κατάληψης του ραδιοφάσματος και, κατ' επέκταση, η προσφορά μιας αντιπροσωπευτικής βάσης για την εξαγωγή σημαντικών συμπερασμάτων επί του τρόπου εκμετάλλευσής του. Αναλυτικότερα, οι Επισκοπήσεις Κατάληψης Φάσματος καθιστούν, κατ' αρχήν, εφικτό τον εντοπισμό φασματικών ζωνών των οποίων η κατάληψη παρουσιάζει ασυνέχειες στις διαστάσεις του χρόνου και χώρου. Είναι, άλλωστε, αυτή ακριβώς η συμπεριφορά η οποία θέτει πρόσφορο έδαφος για την εφαρμογή της τεχνολογίας της



Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας στην πράξη. Παράλληλα, καθιστούν δυνατό τον εντοπισμό φασματικών ζωνών οι οποίες παρουσιάζουν είτε συνεχή κατάληψη στη διάσταση του χρόνου, είτε πλήρη ελευθερία (π.χ. όσες δεν εκχωρούνται ακόμα σε υπηρεσίες), με τις μεν πρώτες να μην αφήνουν περιθώρια ευκαιριακής εκμετάλλευσης, ενώ τις δεύτερες να καθιστούν υπερβολική την εφαρμογή των πολύπλοκων διαδικασιών τις οποίες προδιαγράφει η ανωτέρω τεχνολογία. Ταυτόχρονα, οι Επισκοπήσεις Κατάληψης Φάσματος συμβάλλουν στη βαθύτερη κατανόηση του τρέχοντα τρόπου πρόσβασης των πραγματικών Πρωτευόντων Χρηστών στο ραδιοφάσμα, αναδεικνύοντας συμπεριφορές ή παράγοντες οι οποίοι ενδεχομένως να δυσχεράνουν ή να διευκολύνουν την εφαρμογή της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας στην πράξη. Παράλληλα, αναδεικνύουν τα ανοιχτά ζητήματα στα οποία θα πρέπει να επικεντρωθούν οι μελλοντικές ερευνητικές προσπάθειες, ενώ δρουν επικουρικά και στον σχεδιασμό των επόμενων ρυθμιστικών βημάτων ώστε να διευκολυνθεί η μεταφορά της καινοφανούς αυτής τεχνολογίας στο πραγματικό περιβάλλον. Η επιτυχής, άλλωστε, έκβαση ενός τόσο σημαντικού εγχειρήματος όπως η ριζική τροποποίηση της πολιτικής διαχείρισης του ραδιοφάσματος εξαρτάται από πολλαπλούς παράγοντες, ενώ δεν υπάρχει χώρος για λανθασμένες εκτιμήσεις και παρανοήσεις. Σημειώνεται, τέλος, ότι οι Επισκοπήσεις Κατάληψης Φάσματος συμβάλλουν καθοριστικά και στην παρατήρηση, επαλήθευση και μετέπειτα μοντελοποίηση διαφόρων ιδιοτήτων του ραδιοφάσματος, επιτρέποντας έτσι σε μελλοντικές προσεγγίσεις να λαμβάνουν υπόψη από τη φάση κιόλας σχεδιασμού τους τις συνθήκες τις οποίες πρόκειται να αντιμετωπίσουν κατά την εφαρμογή τους στο πραγματικό περιβάλλον.

Σχετικές Επισκοπήσεις Κατάληψης Φάσματος έχουν ήδη πραγματοποιηθεί σε διάφορες περιοχές παγκοσμίως, είτε με πρωτοβουλία κυβερνητικών αρχών, είτε ως ανεξάρτητες πρωτοβουλίες εταιρειών και πανεπιστημίων. Στο σύνολό τους, μάλιστα, οι εν λόγω μελέτες χρησιμοποιούν αναλύτες φάσματος για τη συλλογή των απαιτούμενων δεδομένων μετρήσεων, ενώ η απόφαση σχετικά με την κατάσταση κατάληψης των κατά περίπτωση εξεταζόμενων φασματικών ζωνών βασίζεται στην εφαρμογή της τεχνικής επαίσθησης φάσματος βασισμένης στον εντοπισμό ενέργειας. Η πλειοψηφία των εν λόγω μελετών, επίσης, εστιάζει στην εξέταση της ζώνης συχνοτήτων 100 – 3000 MHz, μιας ζώνης η οποία συχνά αποκαλείται και ως *ηδυσσημείο* (sweet-spot) [108], κυρίως λόγω των εξαιρετικά δημοφιλών υπηρεσιών τις οποίες αυτή υποστηρίζει (π.χ. τηλεόραση, ραδιοφωνία, κινητή

τηλεφωνία, κ.α.). Σημαντικές διαφορές μεταξύ των ανωτέρω μελετών, αντίθετα, παρατηρούνται κυρίως στον αριθμό και το είδος των εξεταζόμενων περιοχών (μεγάλα αστικά κέντρα έναντι αγροτικών περιοχών), καθώς και στον χώρο εγκατάστασης του διαθέσιμου εξοπλισμού (οροφές υψηλών κτηρίων έναντι εδάφους ή εσωτερικών χώρων).

Παρά το γεγονός, ωστόσο, ότι αρκετές Επισκοπήσεις Κατάληψης Φάσματος έχουν ήδη πραγματοποιηθεί σε διάφορες χώρες ανά τον κόσμο, ο αριθμός τους δεν θεωρείται ακόμα επαρκής για την εξαγωγή ασφαλών και άμεσα εκμεταλλεύσιμων από τη Γνωσιακή Ραδιοεπικοινωνία συμπερασμάτων. Ως εκ τούτου, επιπλέον μελέτες θα πρέπει να πραγματοποιηθούν σε νέες γεωγραφικές περιοχές, καθιστώντας έτσι δυνατή τόσο την επαλήθευση των υπαρχουσών παρατηρήσεων, όσο και την επέκτασή τους μέσω του εντοπισμού επιπλέον παραγόντων οι οποίοι ασκούν σημαντική επίδραση στην κατάσταση κατάληψης του ραδιοφάσματος (π.χ. γεωμορφολογία, καιρικές συνθήκες, λεπτομέρειες ανάθεσης ζωνών, κ.α.). Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, λοιπόν, πραγματοποιείται για πρώτη φορά στην Ελλάδα μια Επισκόπηση Κατάληψης Φάσματος στη μητροπολιτική περιοχή των Αθηνών. Για λόγους, μάλιστα, επαναχρησιμοποίησης των αποτελεσμάτων της, αλλά και άμεσης σύγκρισής τους με αυτά των υπολοίπων χωρών παγκοσμίως, η παρούσα μελέτη ακολουθεί όμοια μεθοδολογία με τη συντριπτική πλειοψηφία των σχετικών μελετών της σύγχρονης βιβλιογραφίας.

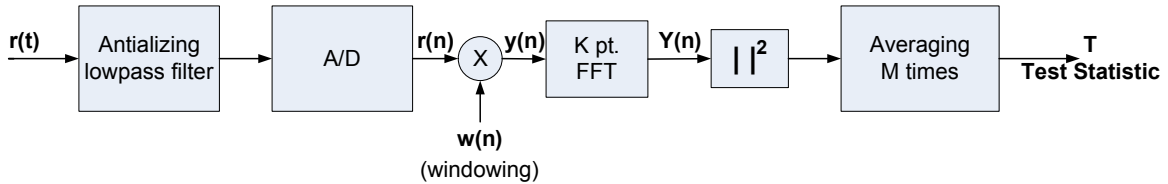
## 4.2 Θεωρητικό και τεχνικό υπόβαθρο

Ως δημοφιλέστερη μέθοδος επαίσθησης φάσματος θεωρείται σήμερα η λεγόμενη *τεχνική επαίσθησης φάσματος βασισμένη στον εντοπισμό ενέργειας* (energy detection based spectrum sensing technique) ή αλλιώς *ραδιομετρία* (radiometry). Δεν είναι τυχαίο, άλλωστε, ότι η συγκεκριμένη τεχνική υλοποιείται ήδη στην πλειοψηφία των υπαρχουσών πλατφορμών Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας [109]. Η ιδιαίτερη αυτή προτίμηση οφείλεται κυρίως στην υψηλή ταχύτητα και στη χαμηλή πολυπλοκότητα υλοποίησης της εν λόγω τεχνικής στην πράξη, καθώς και στην απουσία απαίτησης εκμετάλλευσης περίπλοκου και ακριβού εξοπλισμού. Ως σημαντικότερο χαρακτηριστικό της, ωστόσο, θεωρείται η ανεξαρτησία της από οποιαδήποτε πρότερη γνώση επί των υποκείμενων μεταδιδόμενων σημάτων, απαίτηση την οποία θέτει το σύνολο των υπόλοιπων σχετικών τεχνικών επαίσθησης φάσματος της βιβλιογραφίας. Η συγκεκριμένη απαίτηση, άλλωστε, έρχεται σε μερική

αντίθεση με τις προδιαγραφές της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, η οποία δεν προβλέπει εξ ορισμού την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ Πρωτευόντων και Δευτερευόντων Χρηστών. Θα πρέπει, τέλος, να σημειωθεί ότι η χαμηλή απόδοση της εν λόγω τεχνικής σε περιπτώσεις εφαρμογής της σε περιβάλλοντα χαμηλού λόγου σήματος-προς-θόρυβο (signal-to-noise ratio) [9] δεν δείχνει να επηρεάζει σημαντικά τη δημοτικότητα της.

Βάσει των προδιαγραφών της τεχνικής επαίσθησης φάσματος βασισμένης στον εντοπισμό ενέργειας, η απόφαση σχετικά με την κατάσταση κατάληψης κάθε εξεταζόμενης φασματικής ζώνης στηρίζεται στη σύγκριση της μετρούμενης σε αυτή ενέργειας με ένα αντίστοιχο *κατώφλιο απόφασης* (decision threshold). Όσον αφορά, δε, την υλοποίηση της συγκεκριμένης μεθόδου στην πράξη, αυτή απαιτεί κατ' αρχήν τη χρήση ενός *ανιχνευτή ενέργειας* (energy detector), ο οποίος ακολουθεί συνήθως τον σχεδιασμό της Εικόνας 4.1. Σύμφωνα με τον συγκεκριμένο σχεδιασμό, κάθε συνεχές λαμβανόμενο σήμα  $r(t)$  διέρχεται αρχικά από ένα *φίλτρο αντιμετώπισης αναδίπλωσης* (antialiasing filter) με σκοπό την ελαχιστοποίηση του φαινομένου της αναδίπλωσης φάσματος και την εξασθένιση των φασματικών συνιστωσών οι οποίες βρίσκονται κάτω από το μισό της συχνότητας δειγματοληψίας όταν το συνεχές αυτό σήμα *ψηφιακοποιείται* (digitized) με *δειγματοληψία* (sampling). Εν συνεχεία, εφαρμόζεται στο προκύπτον σήμα  $r(n)$  ένα *παράθυρο πεπερασμένης διάρκειας* (finite duration window) με σκοπό την επιλογή *τμημάτων πεπερασμένου μεγέθους* (finite-length segments) ( $K$  δείγματα) τα οποία συμβολίζονται από τη μεταβλητή  $y(n)$ , ενώ οι αντίστοιχοι *συντελεστές συχνότητας* (frequency coefficients)  $Y(n)$  και η ολική μετρούμενη φασματική ενέργεια (ή αλλιώς *φασματική πυκνότητα ισχύος* (power spectral density, PSD) σε μονάδες W/Hz) υπολογίζονται με τη βοήθεια των υπομονάδων FFT και *ύψωσης στο τετράγωνο* (squaring) [110]. Τέλος, εφαρμόζεται και η πράξη της *μεσοτίμησης* (averaging) με σκοπό τη βελτίωση της εκτίμησης της προκύπτουσας τιμής ενέργειας, δεδομένης της αναπόφευκτης παρουσίας του θορύβου. Πιο συγκεκριμένα, εντός ενός χρονικού διαστήματος παρατήρησης  $N$  μια ακολουθία δεδομένων  $y(n)$  διαιρείται σε τμήματα (με εφαρμογή της τεχνικής της *παραθύρωσης* (windowing)) ώστε να ισχύει η σχέση  $N = K \times M$ , ενώ στη συνέχεια υπολογίζεται η *μέση φασματική ενέργεια* (average spectrum energy) κάθε αντίστοιχου συντελεστή συχνότητας με εφαρμογή της πράξης της μεσοτίμησης πάνω στα  $M$  αυτά τμήματα. Αξίζει, τέλος, να σημειωθεί

ότι τόσο ο αριθμός  $K$  των σημείων FFT, ο οποίος καθορίζει ταυτόχρονα και τη λεγόμενη *ανάλυση φασματικού στοιχείου* (frequency bin resolution), όσο και ο αριθμός  $M$  των μεσοτιμημένων τμημάτων επηρεάζουν καθοριστικά την επίδοση του εκάστοτε υλοποιούμενου ανιχνευτή ενέργειας [111].



Εικόνα 4.1: Σχηματικό διάγραμμα ανιχνευτή ενέργειας.

Όσον αφορά το καθαυτό πρόβλημα του εντοπισμού ενέργειας, αυτό μοντελοποιείται μαθηματικά ως ένα πρόβλημα δυαδικού έλεγχου των δυο ακόλουθων υποθέσεων:

$$\begin{cases} H_0 : & y(n) = \vartheta(n) \text{ αν το σήμα είναι απών} \\ H_1 : & y(n) = s(n) + \vartheta(n) \text{ αν το σήμα είναι παρών} \end{cases} \quad (4.1)$$

με τις μεταβλητές  $s(n)$  και  $\vartheta(n)$  να υποδηλώνουν ένα *σήμα Πρωτεύοντος Χρήστη διακριτού χρόνου* (discrete-time PU signal) και τον *προσθετικό θόρυβο* (additive noise), αντίστοιχα, με  $n = 1, \dots, N$ . Σύμφωνα, δε, με το θεώρημα Parseval, ο υπολογισμός της επιθυμητής φασματικής ενέργειας μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο στη διάσταση του χρόνου, όσο και σε αυτήν της συχνότητας. Ως εκ τούτου, το *μεσοτιμημένο περιοδόγραμμα* (averaged periodogram) ή αλλιώς η μέση φασματική πυκνότητα ισχύος (PSD) κάθε φασματικού στοιχείου  $k$  δύναται να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση:

$$P(k) = \frac{1}{M} \sum_{M} \frac{1}{K} |Y(k)|^2 \quad k = 0, \dots, K - 1 \quad (4.2)$$

ενώ για κάθε φασματικό στοιχείο μοντελοποιείται ένα πρόβλημα λήψης απόφασης ως ένα πρόβλημα ελέγχου υποθέσεων με στατιστική συνάρτηση έλεγχου  $T$  ίση με την αντίστοιχη τιμή PSD και  $\gamma$  το αντίστοιχο κατώφλιο απόφασης, ήτοι:

$$\begin{cases} T < \gamma & \text{όταν το φασματικό στοιχείο είναι μη-κατειλημμένο} \\ T > \gamma & \text{όταν το φασματικό στοιχείο είναι κατειλημμένο.} \end{cases} \quad (4.3)$$

Όσον αφορά, δε, την αποδοτικότητα της εν λόγω τεχνικής επαίσθησης, αυτή εξαρτάται άμεσα από τις αντίστοιχες πιθανότητες *αποτυχίας εντοπισμού* (miss detection)  $P_{md}$  και

ψευδούς συναγερμού (false alarm)  $P_{fa}$ , πιθανότητες οι οποίες εκφράζονται μαθηματικά από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$P_{md} = Pr(T < \gamma | H_1) \quad (4.4)$$

$$P_{fa} = Pr(T > \gamma | H_0). \quad (4.5)$$

Σχετικά με το προαναφερθέν κατώφλιο απόφασης  $\gamma$ , αυτό αντιστοιχεί ουσιαστικά στη στάθμη θερμικού θορύβου του χρησιμοποιούμενου ανιχνευτή ενέργειας, την οποία προφανώς δύναται να υπερβεί η ενέργεια μιας εξεταζόμενης φασματικής ζώνης μόνο κατά την παρουσία μεταδιδόμενων ραδιοσημάτων πάνω από αυτή. Το συγκεκριμένο κατώφλιο, μάλιστα, δύναται να εκτιμηθεί βάσει των εξισώσεων (4.4), (4.5) και του λήμματος 'Neyman-Pearson' [112], ενώ πρακτικά επιλέγεται βάσει μιας σταθερής προεπιλεγμένης τιμής ρυθμού ψευδούς συναγερμού, δεδομένου ότι κάτι τέτοιο δεν απαιτεί καμία προϋπάρχουσα γνώση επί της κατανομής ισχύος των υποκείμενων μεταδιδόμενων ραδιοσημάτων (signal power distribution). Αναλυτικές εκφράσεις σχετικά με τις πιθανότητες  $P_{md}$  και  $P_{fa}$ , το κατώφλιο  $\gamma$  και την κατανομή της συνάρτησης  $T$  στην περίπτωση προσθετικού, λευκού, Γκαουσιανού θορύβου (additive white Gaussian noise, AWGN) και υψηλής τιμής της μεταβλητής  $N$ , καθώς και διαγράμματα τύπου 'Receiver Operating Curves' (ROC) για διαφορετικές τιμές λόγου σήματος-προς-θόρυβο παρουσιάζονται διεξοδικά σε αρκετές μελέτες της σχετικής βιβλιογραφίας [9, 111, 113], ενώ για λόγους οικονομίας χώρου η αναλυτική τους παρουσίαση στο σημείο αυτό παραλείπεται.

Αξίζει, τέλος, να σημειωθεί ότι η ακρίβεια εκτίμησης της κατάστασης κατάληψης κάθε φασματικού στοιχείου  $k$  επηρεάζεται στην προκειμένη περίπτωση σημαντικά από την τιμή του αντιστοίχου επιλεγμένου κατωφλίου απόφασης  $\gamma$ . Ενδεικτικά, ένα υψηλό σχετικό κατώφλιο ενδέχεται να οδηγήσει στον χαρακτηρισμό ενός φασματικού στοιχείου ως μη-κατειλημμένο ακόμα και όταν ένα σήμα χαμηλότερης ισχύος μεταδίδεται πάνω από αυτό. Αντίθετα, ένα πολύ χαμηλό σχετικό κατώφλιο ενδέχεται να οδηγήσει στον χαρακτηρισμό ενός φασματικού στοιχείου ως κατειλημμένο ακόμα και όταν παρατηρηθεί μια μικρή μόνο διακύμανση στην ενέργεια του υποκείμενου θορύβου. Ο υπολογισμός της τιμής η οποία διατηρεί τη βέλτιστη ισορροπία ανάμεσα στις δυο προαναφερθείσες ακραίες καταστάσεις, ωστόσο, δεν αποτελεί ακόμα και σήμερα μια τετριμμένη διαδικασία. Σύμφωνα, δε, με τις δημοφιλέστερες μελέτες της σχετικής βιβλιογραφίας, η εκτίμηση του εν λόγω κατωφλίου δεν θα πρέπει να στηρίζεται σε αβέβαιης ισχύος θεωρητικά μοντέλα,

αλλά να προκύπτει ύστερα από επεξεργασία πραγματικών δεδομένων μετρήσεων [114]. Ενδεικτικά, θα πρέπει αρχικά να συλλέγονται επαρκή δείγματα ενέργειας θορύβου για κάθε εξεταζόμενο φασματικό στοιχείο, αντικαθιστώντας την κεραία του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού επαίσθησης με ένα *εικονικό φορτίο* (dummy load). Εν συνεχεία, και στην απλούστερη περίπτωση της μεθόδου *m-dB κριτήριο* (*m-dB criterion*) [114], το κατώφλιο απόφασης  $\gamma$  κάθε φασματικού στοιχείου θα πρέπει να ορίζεται κατά *m-dB* μεγαλύτερο από τη *μέση στάθμη θορύβου* (average noise level) η οποία προέκυψε κατά τη μεσοτίμηση των αντίστοιχων δειγμάτων ενέργειας θορύβου. Ως μακράν αποδοτικότερη, ωστόσο, θεωρείται η τεχνική *PFA-κριτήριο* (*PFA-criterion*), η οποία εκμεταλλεύεται την προαναφερθείσα πιθανότητα ψευδούς συναγερμού  $P_{fa}$ , σταθεροποιώντας ουσιαστικά την τιμή της σε ένα προκαθορισμένο επίπεδο-στόχο. Πιο απλά, η τιμή του κατωφλίου απόφασης  $\gamma$  κάθε φασματικού στοιχείου θα πρέπει να επιλέγεται κατάλληλα ώστε το ποσοστό των αντίστοιχων δειγμάτων ενέργειας θορύβου των οποίων οι τιμές προκύπτουν μεγαλύτερες από αυτή να ταυτίζεται με την επιθυμητή πιθανότητα  $P_{fa}$ . Όμοια φιλοσοφία ακολουθούν πολλές ακόμα σχετικές τεχνικές της σύγχρονης βιβλιογραφίας (βλ. [114]), ενώ παρουσιάζονται ήδη και αρκετά πιο εξειδικευμένες προσεγγίσεις, όπως για παράδειγμα το προδιαγραφόμενο στην εργασία [115] προσαρμόσιμο κατώφλιο, το οποίο δανείζεται χαρακτηριστικά εμπνευσμένα από το ερευνητικό πεδίο της επεξεργασίας εικόνας.

### 4.3 Σχετική βιβλιογραφία

Στη σύγχρονη βιβλιογραφία εντοπίζεται ένας σχετικά μικρός αριθμός Επισκοπήσεων Κατάληψης Φάσματος οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί σε διάφορες περιοχές ανά τον κόσμο. Στην πλειοψηφία των μελετών αυτών χρησιμοποιούνται προηγμένοι αναλύτες φάσματος για τη συλλογή των απαιτούμενων δεδομένων μετρήσεων ενέργειας, ενώ υλοποιείται η τεχνική επαίσθησης φάσματος βασισμένη στον εντοπισμό ενέργειας. Σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των εν λόγω μελετών, αντίθετα, παρατηρούνται στον τρόπο υπολογισμού των απαιτούμενων κατωφλίων απόφασης, στο είδος και τις προδιαγραφές των χρησιμοποιούμενων κεραιών, στον αριθμό και το είδος των εξεταζόμενων περιοχών (μεγάλα αστικά κέντρα έναντι αγροτικών περιοχών), καθώς και στον χώρο εγκατάστασης του διαθέσιμου εξοπλισμού (οροφές υψηλών κτηρίων έναντι εδάφους ή εσωτερικών χώρων).

Οι πρώτες χρονολογικά Επισκοπήσεις Κατάληψης Φάσματος πραγματοποιήθηκαν σε πόλεις των ΗΠΑ από την εταιρεία Shared Spectrum Company [2]. Οι συγκεκριμένες μελέτες εστίασαν στη ζώνη συχνοτήτων 30 – 3000 MHz, ενώ ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός επαίσθησης εγκαταστάθηκε σε οροφές υψηλών κτηρίων και στο έδαφος με ανοιχτή θέα στον ορίζοντα. Η διάρκεια συλλογής των απαιτούμενων δεδομένων μετρήσεων ορίστηκε της τάξεως λίγων ημερών ή εβδομάδας, ενώ οι επιλεγμένες παράμετροι επαίσθησης βελτιστοποιήθηκαν ανά φασματική ζώνη. Τα, δε, κατώφλια απόφασης επιλέχθηκαν διασθητικά ύστερα από την ενδελεχή παρατήρηση ενός επαρκούς συνόλου συλλεγόμενων δειγμάτων ενέργειας θορύβου. Ειδικά, βέβαια, για την περίπτωση του Σικάγο έχει πραγματοποιηθεί μια ακόμα σχετική μελέτη [116], η οποία εστίασε επίσης στο προαναφερθέν εύρος συχνοτήτων, ενώ ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός επαίσθησης εγκαταστάθηκε στην οροφή ενός υψηλού πύργου ο οποίος βρίσκεται σε κεντρική περιοχή. Αξιοσημείωτη, ωστόσο, θεωρείται η διάρκεια της συγκεκριμένης επισκόπησης, η οποία προσέγγισε τα τρία (3) χρόνια και, ως εκ τούτου, επέτρεψε την εξαγωγή συμπερασμάτων εξαιρετικά υψηλού βαθμού εμπιστοσύνης. Αναφορικά, δε, με το απαιτούμενο κατώφλιο απόφασης, αυτό επελέγη μεταξύ 5 και 10 dB υψηλότερο από το επίπεδο θορύβου του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού, αναλόγως του έτους και της εξεταζόμενης φασματικής ζώνης. Μια αντίστοιχη μελέτη πραγματοποιήθηκε και στη Σιγκαπούρη [3], η οποία όμως εστίασε στην ευρύτερη ζώνη συχνοτήτων 80 – 5850 MHz, ενώ διήρκησε δώδεκα (12) ημέρες, ούσα η δεύτερη εκτενέστερη σχετική επισκόπηση της βιβλιογραφίας. Ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός επαίσθησης εγκαταστάθηκε στην οροφή ενός υψηλού κτηρίου το οποίο βρίσκεται σε κεντρική περιοχή, ενώ το κατώφλιο απόφασης τέθηκε ανά φασματική ζώνη 6 dB υψηλότερο από την ελάχιστη τιμή ενέργειας η οποία μετρήθηκε σε αυτή στη διάρκεια μιας ολόκληρης ημέρας. Στη Νέα Ζηλανδία, αντίθετα, η αντίστοιχη μελέτη [117] εστίασε στη ζώνη συχνοτήτων 800–2750 MHz και επαναλήφθηκε τόσο στο μπαλκόνι, όσο και στο εσωτερικό ενός υψηλού κτηρίου το οποίο βρίσκεται σε κεντρική περιοχή. Όπως αναμενόταν, ο βαθμός χρησιμοποίησης του ραδιοφάσματος στη δεύτερη περίπτωση προέκυψε σαφώς μικρότερος από αυτόν της πρώτης, δεδομένης της εξασθένησης την οποία υφίστανται τα ραδιοσήματα κατά τη διέλευση τους μέσα από τους τοίχους κτηρίων. Αναφορικά με την περίπτωση της Κίνας, η αντίστοιχη πραγματοποιηθείσα μελέτη [118] εστίασε στη ζώνη συχνοτήτων 20 – 3000 MHz και επανελήφθη σε τέσσερις (4) διαφορετικές περιοχές,

δυο αστικές και δυο επαρχιακές. Ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός επαίσθησης τοποθετήθηκε σε οροφές υψηλών κτηρίων, ενώ η συλλογή δεδομένων διήρκησε επτά (7) ημέρες. Το κατώφλιο απόφασης ορίστηκε ανά φασματικό στοιχείο ίσο με 3 dB υψηλότερο από την ελάχιστη τιμή ενέργειας η οποία μετρήθηκε σε αυτό καθ' όλη τη διάρκεια της παρατήρησής του, επιλογή η οποία βασίστηκε στην παρατήρηση ότι σε ζώνες στις οποίες δεν πραγματοποιούνται μεταδόσεις – και, ως εκ τούτου, υφίσταται μόνο θόρυβος – η απόκλιση μεταξύ μέγιστης και ελαχίστης μετρούμενης ενέργειας – ή αλλιώς η διακύμανση της ισχύος θορύβου – ισούται με 3 dB. Αναφορικά, δε, με την περίπτωση του Κατάρ [117], η αντίστοιχη επισκόπηση επανελήφθη επίσης σε τέσσερις (4) διαφορετικές τοποθεσίες, με τη διαφορά όμως ότι αυτές επιλέχθηκαν στο σύνολό τους κεντρικές. Η συλλογή δεδομένων εστιάστηκε στη ζώνη συχνοτήτων 700 – 3000 MHz και διήρκησε τρεις (3) ημέρες ανά περιοχή, ενώ το απαιτούμενο κατώφλιο απόφασης ορίστηκε 3 dB υψηλότερο από το επίπεδο θερμικού θορύβου του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού επαίσθησης. Στην περίπτωση της Ισπανίας, αντίστοιχα, η πραγματοποιούμενη επισκόπηση [119] εστίασε στη ζώνη συχνοτήτων 75 – 7075 MHz, ενώ ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός επαίσθησης τοποθετήθηκε στην οροφή ενός κεντρικού κτηρίου και συνέλεξε μετρήσεις για μία (1) μόνο ημέρα. Το κατώφλιο απόφασης υπολογίστηκε ανά φασματικό στοιχείο βάσει της προηγμένης μεθόδου *PFA*-κριτήριο (βλ. Ενότητα 4.2), οπότε και η τιμή του ορίστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε μόνο το 1% των αντίστοιχων συλλεγμένων δειγμάτων ενέργειας θορύβου να την υπερβαίνουν. Τη συγκεκριμένη επισκόπηση, μάλιστα, επέκτεινε η εργασία [120] σε νέες τοποθεσίες, όπως για παράδειγμα σε οροφές κτηρίων, στο έδαφος, σε ανοιχτούς χώρους, σε σημεία περιτριγυρισμένα από κτήρια και σε εσωτερικούς χώρους. Όπως ήταν αναμενόμενο, ο βαθμός χρησιμοποίησης του ραδιοφάσματος προέκυψε σημαντικά μικρότερος όταν ο εξοπλισμός επαίσθησης τοποθετήθηκε σε εσωτερικούς χώρους και στο έδαφος, δεδομένης της εξασθένησης την οποία υφίστανται τα ραδιοσήματα κατά τη διέλευσή τους μέσα από τοίχους κτηρίων και της έλλειψης απευθείας οπτικής επαφής με τους σχετικούς πομπούς, αντίστοιχα. Αναφορικά, δε, με την περίπτωση της Γερμανίας [121], η αντίστοιχη μελέτη εστίασε στη ζώνη συχνοτήτων 20 – 6000 MHz και η συλλογή δεδομένων μετρήσεων διήρκησε επτά (7) ημέρες, ενώ το κατώφλιο απόφασης ορίστηκε 3 dB υψηλότερο από το επίπεδο θερμικού θορύβου του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού επαίσθησης. Είναι γεγονός, ωστόσο, ότι και η συγκεκριμένη μελέτη πάσχει από τις ίδιες



ακριβώς αδυναμίες με την επισκόπηση η οποία πραγματοποιήθηκε στη χώρα της Κίνας [118], κυρίως λόγω του μεγάλου μεγέθους φασματικού στοιχείου με το οποίο σαρώθηκαν οι επιθυμητές ζώνες συχνοτήτων. Ο εξοπλισμός επαίσθησης τοποθετήθηκε και εδώ στο εσωτερικό ενός γραφείου και στην οροφή ενός κεντρικού κτηρίου, ενώ σε μια επόμενη εργασία [122] αυτός τοποθετήθηκε και στο μπαλκόνι ενός κεντρικού κτηρίου. Όπως αναμενόταν, βέβαια, ο βαθμός χρησιμοποίησης του ραδιοφάσματος προέκυψε μεγαλύτερος στη δεύτερη περίπτωση, δεδομένης της ύπαρξης ανεμπόδιστης οπτικής επαφής με τους αντίστοιχους πομπούς ραδιοσημάτων και, κατ' επέκταση, της λήψης των τελευταίων με σημαντικά υψηλότερη ενέργεια. Αναφορικά, δε, με τη σχετική επισκόπηση η οποία πραγματοποιήθηκε από κοινού στη Γαλλία και στην Τσεχία [123], το ενδιαφέρον στράφηκε επίσης στη ζώνη συχνοτήτων 400 – 3000 MHz, ενώ η συλλογή μετρήσεων επανελήφθη τόσο σε αστικές, όσο και σε προαστιακές περιοχές. Η διάρκεια επαίσθησης ορίστηκε ίση με μια (1) ημέρα ανά περιοχή, ενώ το σχετικό κατώφλιο απόφασης ορίστηκε 7 dB υψηλότερο από το επίπεδο θερμικού θορύβου του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού. Αξίζει, τέλος, να γίνει μια αναφορά και στην περίπτωση της Μασαχουσέτης [124], στην οποία η αντίστοιχη πραγματοποιηθείσα μελέτη εστίασε στη ζώνη συχνοτήτων 100 – 3000 MHz και χρησιμοποίησε – έκτος των άλλων – και ένα ειδικό όχημα το οποίο έφερε εγκατεστημένο τον εξοπλισμό επαίσθησης με σκοπό τη συλλογή δεδομένων μετρήσεων εντός μιας ευρύτερης γεωγραφικής περιοχής.

Παρά τις όποιες διαφορές μεταξύ των ανωτέρω μελετών, είναι γεγονός ότι τα αποτελέσματά τους παρουσιάζουν σε γενικές γραμμές σημαντικότερες ομοιότητες. Ενδεικτικά, η φασματική ζώνη 30 – 3000 MHz παρουσιάζεται παγκοσμίως έντονα υποχρησιμοποιούμενη, γεγονός το οποίο θέτει τις βάσεις για την άμεση εφαρμογή της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας στην πράξη. Επιπρόσθετα, ο βαθμός χρησιμοποίησης της ζώνης 30 – 1000 MHz προκύπτει πάντοτε μεγαλύτερος από αυτόν της ζώνης 1 έως 2.7 GHz, παρατήρηση, η οποία δικαιολογείται από το γεγονός ότι η πρώτη ζώνη εξυπηρετεί δημοφιλείς υπηρεσίες, οι οποίες θεωρούνται συνυφασμένες με την καθημερινότητα του ανθρώπου, ενώ πάνω από τη δεύτερη ζώνη πραγματοποιούνται συνήθως μεταδόσεις χαμηλής ισχύος, οι οποίες συχνά αδυνατούν να υπερβούν τα όρια ευαισθησίας των αντίστοιχων χρησιμοποιούμενων αρχιτεκτονικών επαίσθησης φάσματος.

## 4.4 Μεθοδολογία εκτέλεσης Επισκόπησης Κατάληψης Φάσματος

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται και τεκμηριώνονται όλες οι τεχνικές λεπτομέρειες οι οποίες σχετίζονται με την Επισκόπηση Κατάληψης Φάσματος η οποία διεξάγεται στα πλαίσια της παρούσας μελέτης στη μητροπολιτική περιοχή των Αθηνών. Πριν από κάθε άλλη αναφορά, ωστόσο, απαιτείται να σημειωθεί ότι για λόγους συμμόρφωσης με το σύνολο των σχετικών μελετών της βιβλιογραφίας (βλ. Ενότητα 4.3), η παρούσα επισκόπηση στηρίζεται στην τεχνική επαίσθησης φάσματος βασισμένη στον εντοπισμό ενέργειας για τη συλλογή των απαιτούμενων δεδομένων μετρήσεων. Σύμφωνα, μάλιστα, με την ανάλυση η οποία παρατέθηκε στην Ενότητα 4.2, η συγκεκριμένη μέθοδος αποφαίνεται σχετικά με την κατάσταση κατάληψης κάθε εξεταζόμενης ζώνης συχνοτήτων τεμαχίζοντάς τη σε φασματικά στοιχεία. Ο τελευταίος όρος υποδηλώνει ουσιαστικά την ελάχιστη φασματική υποζώνη για την οποία ένας αναλύτης φάσματος δύναται να πραγματοποιήσει μια μέτρηση ενέργειας εντός μιας σάρωσης, ενώ για λόγους καλύτερης κατανόησης ένα φασματικό στοιχείο δύναται να παρομοιαστεί με ένα *εικονοστοιχείο* (pixel) μιας ψηφιακής εικόνας. Για κάθε φασματικό στοιχείο, λοιπόν, απαιτείται η μέτρηση της μέσης φασματικής πυκνότητας ισχύος του (PSD) και, εν συνεχεία, η σύγκρισή της με ένα αντίστοιχο κατώφλιο απόφασης. Όταν η πρώτη τιμή υπερβαίνει τη δεύτερη, τότε το εξεταζόμενο φασματικό στοιχείο χαρακτηρίζεται ως κατειλημμένο, ενώ σε αντίθετη περίπτωση αυτό χαρακτηρίζεται ως μη-κατειλημμένο.

Την επιλογή της ανωτέρω τεχνικής με σκοπό την παρακολούθηση της δραστηριότητας των πραγματικών Πρωτευόντων Χρηστών στο ραδιοφάσμα υπαγορεύει τόσο η ευκολία υλοποίησής της με χρήση ώριμου και ευρέως διαθέσιμου στην αγορά εξοπλισμού, όσο και η ανεξαρτησία της από οποιαδήποτε προϋπάρχουσα γνώση επί των υποκείμενων μεταδιδόμενων ραδιοσημάτων. Η εν λόγω γνώση, άλλωστε, θα ήταν εξαιρετικά δύσκολο να αποκτηθεί στα πλαίσια μιας Επισκόπησης Κατάληψης Φάσματος, κυρίως λόγω του μεγάλου εύρους των εξεταζόμενων φασματικών ζωνών και της έντονης ετερογένειας η οποία χαρακτηρίζει τα πρωτόκολλα τα οποία εφαρμόζονται πάνω από αυτές.

#### 4.4.1 Αρχιτεκτονική επαίσθησης φάσματος

Καθοριστικής σημασίας για την πραγματοποίηση μιας ποιοτικής Επισκόπησης Κατάληψης Φάσματος θεωρείται η χρήση του κατάλληλου εξοπλισμού επαίσθησης για την καταγραφή της δραστηριότητας των πραγματικών Πρωτεύοντων Χρηστών στο εξεταζόμενο ραδιοφάσμα. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, λοιπόν, και με σκοπό τη συλλογή δεδομένων μετρήσεων ενέργειας με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια, χρησιμοποιείται η προηγμένη αρχιτεκτονική επαίσθησης φάσματος της Εικόνας 4.2.



**Εικόνα 4.2:** Αρχιτεκτονική επαίσθησης ραδιοφάσματος.

Ως βασικότερο στοιχείο της εν λόγω αρχιτεκτονικής θεωρείται ο αναλύτης φάσματος μοντέλου PXI-5661 RF Vector Signal Analyzer [125] της εταιρείας National Instruments. Ο συγκεκριμένος αναλύτης χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά προηγμένες προδιαγραφές, ενώ προσφέρει τεράστιες δυνατότητες παραμετροποίησης. Παράλληλα, δύναται να εξετάσει αποδοτικά την ευρεία ζώνη συχνοτήτων 9 kHz έως 2700 MHz, συμπεριλαμβάνοντας μάλιστα τη λεγόμενη ζώνη-ηδυσημείο [108].

Ο προαναφερθείς αναλύτης φιλοξενείται σε ένα πλαίσιο (chassis) μοντέλου PXI-1042Q [126] του ίδιου κατασκευαστή, το οποίο πρακτικά αποτελεί έναν ισχυρό προσωπικό υπολογιστή συνοδευόμενο από τις κατάλληλες διεπαφές επικοινωνίας και ελέγχου των αντίστοιχων *δομοστοιχείων* (modules). Το συγκεκριμένο πλαίσιο εξοπλίζεται με έναν ισχυρό

διπύρρηνο επεξεργαστή και επαρκή μνήμη RAM, ενώ εκτελεί το λειτουργικό σύστημα Microsoft Windows XP. Στην ίδια συσκευή εκτελείται, επίσης, και το προηγμένο λογισμικό LabVIEW [127] στην έκδοση 8.5, ενώ μέσω αυτού επιτυγχάνεται η παραμετροποίηση του ανωτέρω αναλύτη και η αυτοματοποίηση της διαδικασίας συλλογής και οργανωμένης αποθήκευσης των απαιτούμενων για την παρούσα μελέτη δεδομένων μετρήσεων ενέργειας.

Ένα ακόμα σημαντικό δομικό στοιχείο της διαθέσιμης αρχιτεκτονικής αποτελεί και η *ευρυζωνική παγκατευθυντική δισκοκωνική κεραία* (wideband omni-directional disccone antenna) της εταιρείας Sirio μοντέλου SD 3000N [128]. Η συγκεκριμένη κεραία θεωρείται εξαιρετικά υψηλής απόδοσης, ενώ κρίνεται κατάλληλη για τη λήψη σημάτων εντός της ευρείας ζώνης συχνοτήτων 300 – 3000 MHz. Το συγκεκριμένο εύρος, μάλιστα, ευθυγραμμίζεται σε μεγάλο βαθμό με αυτό του προαναφερθέντος αναλύτη φάσματος, συμπεριλαμβάνοντας προφανώς την επιθυμητή ζώνη-ηδυσημείο. Στοχεύοντας, δε, στην ελαχιστοποίηση τόσο της εξασθένισης, όσο και της παραμόρφωσης την οποία υποφέρουν τα υπό επαίσθηση σήματα, τα δυο ανωτέρω στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους με ένα *θωρακισμένο ομοαξονικό καλώδιο εξαιρετικά χαμηλών απωλειών* (shielded ultra low loss coaxial cable) τύπου RG213-U [129] και μήκους δέκα (10) μέτρων.

Αναφορικά με το σημείο εγκατάστασης της ανωτέρω αρχιτεκτονικής, αυτό θεωρείται στρατηγικά επιλεγμένο και ικανό να διασφαλίσει την εξαγωγή αντιπροσωπευτικών συμπερασμάτων για τη μητροπολιτική περιοχή των Αθηνών. Πιο συγκεκριμένα, ο αναλύτης φάσματος τοποθετείται εντός ενός προστατευμένου δωματίου στον τρίτο όροφο του κεντρικού κτηρίου της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στην πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, ενώ η κεραία εγκαθίσταται στην οροφή του ίδιου κτηρίου. Λόγω της θέσης της, μάλιστα, η εν λόγω κεραία έχει θέα στο μεγαλύτερο μέρος της μητροπολιτικής περιοχής των Αθηνών, χωρίς να παρεμβάλλονται μεταξύ τους είτε τεχνητά (π.χ. υψηλότερα κτήρια ή τοίχοι), είτε φυσικά εμπόδια (π.χ. βουνά). Ως εκ τούτου, αυτή λαμβάνει απευθείας ραδιοσήματα από αρκετούς πομπούς μετάδοσης, όπως για παράδειγμα σταθμούς βάσης κινητής τηλεφωνίας, πομπούς ραδιοφωνίας, κ.α. Ταυτόχρονα, διαθέτει άμεση οπτική επαφή με το κέντρο εκπομπής ραδιοσημάτων του Υμηττού (βλ. Εικόνα 4.2), καθώς και με το αντίστοιχο απομακρυσμένο κέντρο της Πάρνηθας. Αξίζει, τέλος, να σημειωθεί ότι η ανωτέρω αρχιτεκτονική δεν φέ-

**Πίνακας 4.1:** Παράμετροι λειτουργίας αρχιτεκτονικής επαίσθησης φάσματος.

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 duration	7 days
Sensing interval	30 sec

ρει χαρακτηριστικά κινητικότητας, κυρίως λόγω του όγκου της, της απαίτησης σύνδεσής της στο δίκτυο παροχής ρεύματος τάσης 220 V, καθώς και της επιβεβλημένης προστασίας της από τις καιρικές συνθήκες. Το στρατηγικά επιλεγμένο σημείο εγκατάστασής της, ωστόσο, μειώνει σημαντικά τις επιπτώσεις της αδυναμίας επέκτασης της παρούσας Επισκόπησης Κατάληψης Φάσματος σε πολλαπλές διαφορετικές τοποθεσίες εντός της πόλης των Αθηνών.

#### 4.4.2 Παραμετροποίηση αρχιτεκτονικής επαίσθησης φάσματος

Οι λεπτομέρειες οι οποίες αφορούν την παραμετροποίηση της χρησιμοποιούμενης στην παρούσα μελέτη αρχιτεκτονικής επαίσθησης φάσματος συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1, ενώ περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια της παρούσας παραγράφου.

Κατ' αρχήν, λοιπόν, σημειώνεται ότι ως εύρος συχνοτήτων ενδιαφέροντος ορίζεται στα πλαίσια της παρούσας Επισκόπησης Κατάληψης Φάσματος το εύρος 300–2700 MHz. Η συγκεκριμένη ζώνη φέρει ιδιαίτερα ελκυστικά χαρακτηριστικά διάδοσης και, ως εκ τούτου, θεωρείται ιδανική για την υποστήριξη υπηρεσιών ευρείας κλίμακας στην πράξη. Τον συγκεκριμένο ισχυρισμό, άλλωστε, επιβεβαιώνει και το γεγονός ότι η εν λόγω ζώνη εξυπηρετεί σήμερα την πλειοψηφία των ασύρματων υπηρεσιών οι οποίες θεωρούνται συνυφασμένες με την καθημερινότητα του ανθρώπου (π.χ. τηλεόραση, κινητή τηλεφωνία, κ.α), ενώ για τον ίδιο προφανώς λόγο συγκεντρώνει και το ενδιαφέρον της τεχνολογίας

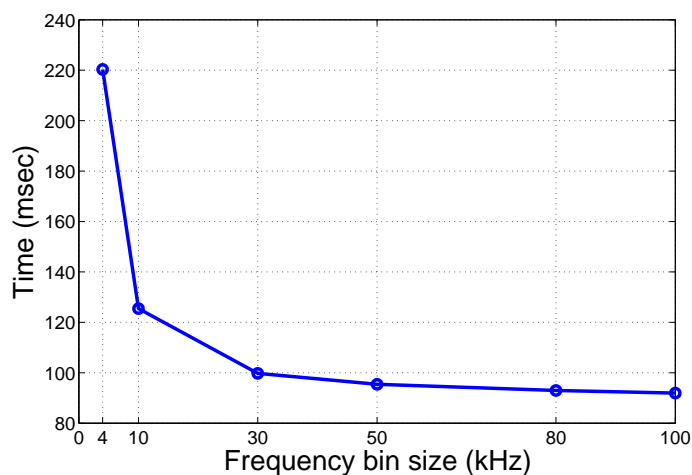
της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Για λόγους, βέβαια, καλύτερης οργάνωσης και δομημένης αποθήκευσης των συλλεγόμενων δεδομένων μετρήσεων, η ανωτέρω ζώνη τεμαχίζεται στην προκειμένη περίπτωση σε πολλαπλές υποζώνες (frequency span) εύρους 50 MHz. Οι προκύπτουσες υποζώνες εξετάζονται από τον διαθέσιμο αναλύτη σειριακά και ανεξάρτητα μεταξύ τους, ενώ οι κεντρικές τους συχνότητες (central frequencies) εκτείνονται από τα 325 MHz έως και τα 2675 MHz, βαίνοντας αυξανόμενες με βήμα 50 MHz.

Μια πρώτη παράμετρος, η οποία φέρει εξαιρετικά μεγάλο αντίκτυπο στην ακρίβεια της πραγματοποιούμενης Επισκόπησης Κατάληψης Φάσματος, θεωρείται το ζωνικό εύρος διακριτικής ικανότητας (resolution bandwidth) του χρησιμοποιούμενου αναλύτη φάσματος. Πιο αναλυτικά, και σύμφωνα με τις πειραματικές μελέτες [114] και [?], όσο μικρότερη επιλέγεται η τιμή της εν λόγω παραμέτρου, τόσο μεγαλύτερη εμφανίζεται η δυνατότητα του διαθέσιμου εξοπλισμού να εντοπίζει μεταδιδόμενα σήματα στο εξεταζόμενο περιβάλλον ραδιοσυχνοτήτων. Ως ενδεδειγμένη τιμή, μάλιστα, για τέτοιου είδους επισκοπήσεις θεωρούνται τα 10 kHz [114], εύρος το οποίο διασφαλίζει ότι κανένα εκ των ραδιοσημάτων τα οποία μεταδίδονται σήμερα στην πράξη δεν πρόκειται να βρεθεί πιο στενό και, ως εκ τούτου, να μην καταστεί δυνατός ο εντοπισμός του. Σε πλήρη συμμόρφωση, λοιπόν, με τις επιταγές της σχετικής βιβλιογραφίας, το ζωνικό εύρος διακριτικής ικανότητας του χρησιμοποιούμενου αναλύτη φάσματος τίθεται στην παρούσα μελέτη ίσο με 10 kHz. Σε συνδυασμό, μάλιστα, με τον ορισμό της *στάθμης αναφοράς* (reference level) του ιδίου αναλύτη στα  $-30$  dBm (τιμή η οποία καθορίστηκε πειραματικά ώστε οι λαμβανόμενες μετρήσεις να αντικατοπτρίζουν βέλτιστα την πραγματική εικόνα του εξεταζόμενου ραδιοφάσματος), η προαναφερθείσα τιμή αποδεικνύεται ικανή να μειώσει αισθητά και τη στάθμη θερμικού θορύβου της ανωτέρω αρχιτεκτονικής ως σύνολο, και μάλιστα στο εξαιρετικά χαμηλό επίπεδο των  $-140$  dBm / 10 kHz (μέσος όρος). Καθίσταται έτσι δυνατή η ακριβής διάκριση μεταξύ θορύβου και ραδιοσημάτων ακόμα και σε περιπτώσεις όπου τα τελευταία θεωρούνται εξαιρετικά ασθενή (π.χ. σήματα κινητών τερματικών ή απομακρυσμένων πομπών), εξαλείφοντας ουσιαστικά την πιθανότητα αποτυχίας εντοπισμού τους. Εν κατακλείδι, οι επιλεγμένες τιμές των δυο προαναφερθεισών παραμέτρων συμβάλλουν καθοριστικά στη διασφάλιση της ορθότητας και της ακριβείας των αποτελεσμάτων της παρούσας Επισκόπησης Κατάληψης Φάσματος.

Μια ακόμα παράμετρος η οποία επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα της εκτελούμενης

επισκόπησης είναι και αυτή του *μεγέθους φασματικού στοιχείου* (frequency bin size) με το οποίο σαρώνεται η ανωτέρω ζώνη συχνοτήτων ενδιαφέροντος. Υπενθυμίζεται ότι ο όρος φασματικό στοιχείο υποδηλώνει ουσιαστικά την ελάχιστη φασματική υποζώνη για την οποία ένας αναλύτης φάσματος δύναται να πραγματοποιήσει μια μέτρηση ενέργειας εντός μιας σάρωσης, όποτε και καθίσταται προφανές ότι όσο μικρότερο επιλέγεται το μέγεθος του συγκεκριμένου στοιχείου, τόσο μεγαλύτερη προκύπτει και η ανάλυση της πραγματοποιούμενης επαίσθησης, ενώ όσο το μέγεθος αυτό μεγαλώνει, τόσο πιο χοντροκομμένες προκύπτουν οι λαμβανόμενες μετρήσεις ενέργειας. Στην παρούσα περίπτωση, μάλιστα, όπου υιοθετείται η τεχνική επαίσθησης φάσματος βασισμένη στον εντοπισμό ενέργειας, η τελευταία κατάσταση αυξάνει την πιθανότητα χαρακτηρισμού ενός ολόκληρου φασματικού στοιχείου ως κατειλημμένο ακόμα και αν ένα μικρό μόνο μέρος του καταλαμβάνεται από ένα ραδιοσήμα, κυρίως λόγω της αναπόφευκτης αύξησης της συνολικής του ενέργειας και, κατ' επέκταση, της υπέρβασης του αντίστοιχου κατωφλίου απόφασης. Ειδικότερα για την παρούσα μελέτη, λοιπόν, το μέγεθος φασματικού στοιχείου ορίζεται ίσο με 4.02 kHz, τιμή η οποία προκύπτει αυτόματα βάσει του προαναφερθέντος επιλεγμένου ζωνικού εύρους διακριτικής ικανότητας όταν το μέγιστο επιτρεπόμενο ποσό πτώσης της προκύπτουσας απόκρισης ορίζεται ίσο με '3-dB' και χρησιμοποιείται το παράθυρο '7-term Blackman-Harris' (βλ. Ενότητα 4.2). Η συγκεκριμένη τιμή, μάλιστα, θεωρείται εξαιρετικά μικρή και ικανή να διασφαλίσει την υψηλή ανάλυση της πραγματοποιημένης Επισκόπησης Κατάληψης Φάσματος, συμβάλλοντας έτσι καθοριστικά στη λήψη έγκυρων αποτελεσμάτων υψηλής ακρίβειας.

Η προαναφερθείσα υψηλή ανάλυση επαίσθησης, ωστόσο, έχει έναν εξαιρετικά σημαντικό αντίκτυπο τόσο στο χρόνο συλλογής των απαιτούμενων δεδομένων μετρήσεων, όσο και στους πόρους (αποθηκευτικός χώρος, επεξεργαστική ισχύ, κ.α.) οι οποίοι απαιτούνται για την περαιτέρω διαχείρισή τους. Όσον αφορά, κατ' αρχήν, τον χρόνο επαίσθησης της ανωτέρω ζώνης συχνοτήτων ενδιαφέροντος, είναι γεγονός ότι αυτός θεωρείται αντιστρόφως ανάλογος του αντίστοιχου επιλεγμένου μεγέθους φασματικού στοιχείου. Ο συγκεκριμένος ισχυρισμός, μάλιστα, επαληθεύεται και πρακτικά στην παρούσα μελέτη, με την Εικόνα 4.3 να παρουσιάζει χαρακτηριστικά ότι ο χρόνος σάρωσης μιας ζώνης συχνοτήτων εύρους 50 MHz χρησιμοποιώντας την ανωτέρω αρχιτεκτονική επαίσθησης αυξάνει σχεδόν εκθετικά προς το επιλεγμένο μέγεθος φασματικού στοιχείου. Αναφορικά, δε, με τον



**Εικόνα 4.3:** Χρόνος σάρωσης ζώνης συχνοτήτων εύρους 50MHz για διαφορετικά μεγέθη φασματικού στοιχείου.

όγκο των συλλεγόμενων δεδομένων, καθίσταται εύκολα αντιληπτό ότι όσο αυξάνεται η ανάλυση της πραγματοποιούμενης επαίσθησης, τόσο περισσότερα δεδομένα μετρήσεων αποθηκεύονται και, κατ' επέκταση, χρήζουν περαιτέρω στατιστικής επεξεργασίας για το ίδιο εξεταζόμενο εύρος συχνοτήτων. Στην προκειμένη περίπτωση, επί παραδείγματι, όπου η ευρεία ζώνη συχνοτήτων 300 – 2700 MHz σαρώνεται με μέγεθος φασματικού στοιχείου ίσο με 4.02 kHz συλλέγονται περίπου 600.000 εγγραφές τιμών ενέργειας ανά σάρωση. Συνυπολογίζοντας, μάλιστα, και το γεγονός ότι η προαναφερθείσα ζώνη σαρώνεται περιοδικά για σχεδόν 20.000 φορές (μια σάρωση κάθε 30 δευτερόλεπτα επί επτά (7) ημέρες), οι συνολικές συλλεγόμενες εγγραφές τιμών ενέργειας ανέρχονται στις 12.096.000.000 και καταλαμβάνουν σχεδόν 100 Gb χώρου όταν αποθηκεύονται σε έναν εξωτερικό σκληρό δίσκο ως ασυμπίεστα αρχεία κωδικοποίησης ASCII.

#### 4.4.3 Ακολουθούμενη μεθοδολογία εκτέλεσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην παρούσα Επισκόπηση Κατάληψης Φάσματος εφαρμόζεται η τεχνική επαίσθησης φάσματος βασισμένη στον εντοπισμό ενέργειας με σκοπό την παρακολούθηση της δραστηριότητας των πραγματικών Πρωτευόντων Χρηστών στο ραδιοφάσμα εντός της μητροπολιτικής περιοχής των Αθηνών. Τη συγκεκριμένη επιλογή υπαγορεύει κυρίως η χαμηλή πολυπλοκότητα και η υψηλή ταχύτητα εκτέλεσης της εν λόγω τεχνικής, καθώς και η ανεξαρτησία της από οποιαδήποτε προϋπάρχουσα γνώση επί



των υποκείμενων μεταδιδόμενων ραδιοσημάτων.

Παρά την απλότητά της, ωστόσο, η πρακτική υλοποίηση της ανωτέρω τεχνικής έργεται αντιμέτωπη με μια εξαιρετικά μεγάλη πρόκληση, αυτή της ακριβούς εκτίμησης του κατωφλίου απόφασης με το οποίο θα πρέπει να συγκρίνεται η ενέργεια κάθε εξεταζόμενου φασματικού στοιχείου ώστε να καθίσταται εφικτός ο καθορισμός της κατάστασης κατάληψης του (βλ. Ενότητα 4.2). Είναι γεγονός, άλλωστε, ότι μια πιθανή υπερεκτίμηση του ανωτέρω κατωφλίου αναμένεται να οδηγήσει αυτόματα σε αδυναμία υπέρβασής του από σήματα χαμηλής ισχύος, αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα για κάθε αντίστοιχο φασματικό στοιχείο να χαρακτηριστεί εσφαλμένα ως μη-κατειλημμένο ακόμα και όταν μεταδίδονται ασθενή σήματα πάνω από αυτό. Αντίθετα, μια πιθανή υποεκτίμηση του ανωτέρω κατωφλίου ενδέχεται να προκαλέσει την υπέρβασή του ακόμα και σε περιπτώσεις μικρών διακυμάνσεων της ενέργειας του υποκείμενου θορύβου, οδηγώντας έτσι στον χαρακτηρισμό του αντίστοιχου φασματικού στοιχείου ως κατειλημμένο ακόμα και όταν δεν μεταδίδεται κανένα ραδιοσήμα πάνω από αυτό. Η ακριβής εκτίμηση των εν λόγω κατωφλίων, ωστόσο, δεν αποτελεί ακόμα και σήμερα μια τετριμμένη διαδικασία. Ακόμα χειρότερα, η πλειοψηφία των σχετικών μεθόδων της τρέχουσας βιβλιογραφίας θεωρούνται ακατάλληλες για εφαρμογή στην πράξη, κυρίως λόγω της υψηλής τους πολυπλοκότητας, της υιοθέτησης αβέβαιων θεωρήσεων, καθώς και της απαίτησης εκμετάλλευσης προϋπάρχουσας γνώσης επί των υποκείμενων μεταδιδόμενων ραδιοσημάτων [114]. Οι πρακτικές μέθοδοι, αντίθετα, θεωρούνται ελάχιστες, ενώ οι δημοφιλέστερες εξ αυτών – ονόματι *PFA*-κριτήριο και *m*dB-κριτήριο (βλ. Ενότητα 4.2) – υιοθετούνται σήμερα από το σύνολο των Επισκοπήσεων Κατάληψης Φάσματος της σχετικής βιβλιογραφίας. Στην παρούσα μελέτη, δε, επιλέγεται η υιοθέτηση μιας υβριδικής σχετικής προσέγγισης, η οποία ύστερα από εκτενείς πειραματικές δοκιμές και παρατηρήσεις αποδεικνύεται ικανή να προσεγγίζει βέλτιστα το σημείο ισορροπίας μεταξύ της υπερεκτίμησης και της υποεκτίμησης των αντίστοιχων κατωφλίων απόφασης. Πιο αναλυτικά, η υιοθετούμενη προσέγγιση επιβάλλει κατ' αρχήν τη συλλογή ενός ικανού αριθμού δειγμάτων ενέργειας θορύβου για κάθε φασματικό στοιχείο του οποίου το κατώφλιο απόφασης απαιτείται να υπολογιστεί. Η συγκεκριμένη συλλογή πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας την ήδη διαθέσιμη αρχιτεκτονική επαίσθησης, ακολουθώντας προφανώς όμοια παραμετροποίηση με αυτήν της εκτελούμενης Επισκόπησης Κατάληψης Φάσματος. Ως μόνη διαφορά, ωστόσο, θεωρείται

η αντικατάσταση της χρησιμοποιούμενης κεραίας με μια αντίσταση 50 Ω, στοχεύοντας ουσιαστικά στην εξασθένηση των λαμβανόμενων ραδιοσημάτων και, κατ' επέκταση, στη μέτρηση μόνο του θερμικού θορύβου του διαθέσιμου εξοπλισμού. Όπως, όμως, είναι ήδη γνωστό, η συγκεκριμένη εξασθένηση δεν δύναται πάντοτε να είναι τέλεια [130], οπότε και στην προκειμένη περίπτωση λαμβάνονται υπόψιν τόσο η ονομαστική στάθμη θερμικού θορύβου του χρησιμοποιούμενου αναλύτη φάσματος, όσο και οι παρατηρήσεις των εκάστοτε γειτονικών εξεταζόμενων φασματικών στοιχείων. Εν συνεχεία, και σε πρώτη φάση, η τιμή του κατωφλίου απόφασης κάθε φασματικού στοιχείου ορίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε το ποσοστό των αντίστοιχων δειγμάτων ενέργειας θορύβου των οποίων οι τιμές την υπερβαίνουν να προκύπτει μικρότερο του 1% (μέθοδος γνωστή και ως *PFA*-κριτήριο). Σε δεύτερη φάση, προστίθεται σε κάθε προκύπτουσα τιμή και το ποσό των 5 dB, διαμορφώνοντας έτσι το τελικό κατώφλιο απόφασης κάθε εξεταζόμενου φασματικού στοιχείου. Αξίζει, δε, να σημειωθεί ότι οι τιμές των κατωφλίων οι οποίες υπολογίζονται βάσει της ανωτέρω υβριδικής μεθόδου προσεγγίζουν σημαντικά τις αντίστοιχες τιμές οι οποίες προκύπτουν κατά την απλή πρόσθεση 7 dB στη μέση τιμή των συλλεγμένων για κάθε φασματικό στοιχείο δειγμάτων ενέργειας θορύβου (μέθοδος 7dB-κριτήριο, βλ. Ενότητα 4.2), μια τεχνική, η οποία εφαρμόστηκε στην Επισκόπηση Κατάληψης Φάσματος που πραγματοποιήθηκε από κοινού στις χώρες της Γαλλίας και της Τσεχίας [123]. Σημειώνεται, τέλος, ότι η ανωτέρω προσέγγιση εφαρμόζεται σε κάθε σημείο της παρούσας μελέτης στο οποίο απαιτείται η εκτίμηση του κατωφλίου απόφασης ενός εξεταζόμενου φασματικού στοιχείου, τόσο στο παρόν, όσο και στο επόμενο κεφάλαιο.

Ένας ακόμα καθοριστικός παράγοντας για την ακριβή εκτίμηση της κατάστασης κατάληψης κάθε εξεταζόμενου φασματικού στοιχείου βάσει της ανωτέρω τεχνικής θεωρείται και ο αριθμός των δειγμάτων μετρήσεων τα οποία μεσοτιμούνται κατά την εκτίμηση της ενέργειάς του (βλ. Ενότητα 4.2). Όπως, μάλιστα, επαληθεύεται και πειραματικά στην εργασία [113], όσο περισσότερα σχετικά δείγματα μεσοτιμούνται κατά τον υπολογισμό μιας τιμής PSD, τόσο λιγότερο αυτή επηρεάζεται από τις τυχαίες στιγμιαίες διακυμάνσεις της υποκείμενης ενέργειας και, κατ' επέκταση, τόσο αυξάνεται η ακρίβεια της απόφασης σχετικά με την κατάσταση κατάληψης του αντίστοιχου φασματικού στοιχείου. Είναι γεγονός, ωστόσο, ότι ο βέλτιστος αριθμός των συγκεκριμένων δειγμάτων θεωρείται εξαιρετικά δύσκολο να εκτιμηθεί στην πράξη, δεδομένης της έντονης εξάρτησής του από τις

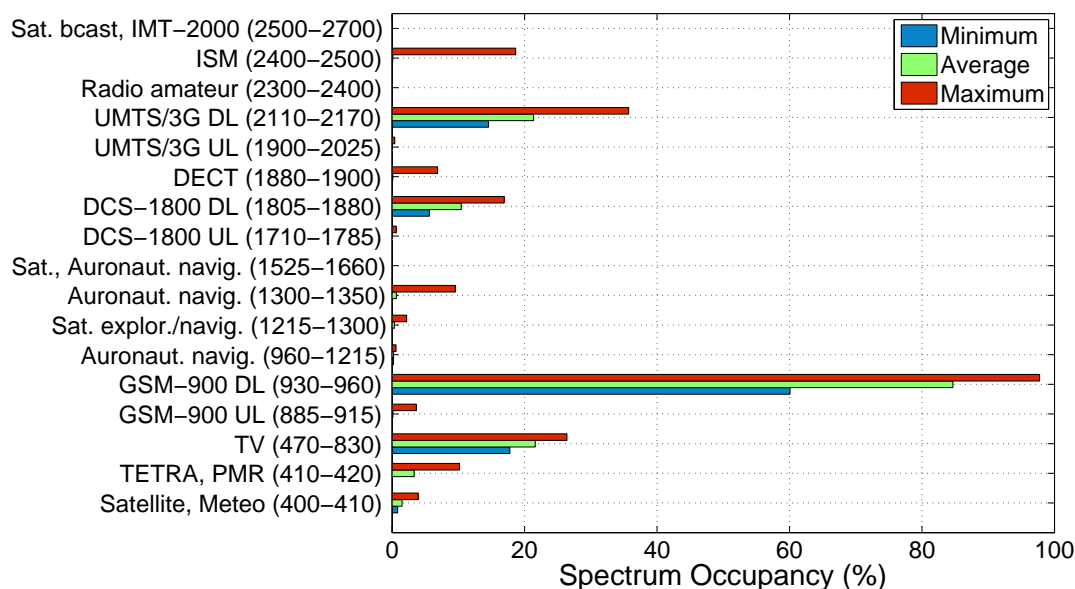
προδιαγραφές των ραδιοσημάτων τα οποία μεταδίδονται πάνω από τις εκάστοτε εξεταζόμενες φασματικές ζώνες [113]. Ύστερα, λοιπόν, από εκτενείς πειραματικές δοκιμές και παρατηρήσεις, αλλά και συνυπολογίζοντας τη χρονική επιβάρυνση η οποία προκαλείται στη διαδικασία εκτίμησης των επιθυμητών τιμών PSD, ο αριθμός των μεσοτιμούμενων δειγμάτων ενέργειας τίθεται στα πλαίσια της παρούσας Επισκόπησης Κατάληψης Φάσματος ίσος με 10, ενώ θεωρείται προτιμητέα η εφαρμογή του τύπου *εκτιμητή* (detector type) 'Root Mean Square' (RMS).

Αξίζει, τέλος, να σημειωθεί ότι η *διάρκεια παρακολούθησης* (sensing duration) του ραδιοφάσματος ορίζεται στην παρούσα Επισκόπηση Κατάληψης Φάσματος ίση με επτά (7) ημερολογιακές ημέρες, ή αλλιώς μια (1) πλήρη εβδομάδα. Το συγκεκριμένο διάστημα θεωρείται ικανό να αποτυπώσει τυχούσες διαφοροποιήσεις στην κατάσταση κατάληψης των εξεταζόμενων φασματικών ζωνών τόσο σε επίπεδο ωρών (νυχτερινές έναντι ωρών αιχμής), όσο και ημερών (καθημερινές έναντι σαββατοκύριακων), παρέχοντας έτσι μια πιο σφαιρική άποψη επί του πραγματικού τρόπου πρόσβασης των υπαρχόντων Πρωτεύοντων Χρηστών στο ραδιοφάσμα. Ταυτόχρονα, το εν λόγω διάστημα διασφαλίζει ότι τα λαμβανόμενα αποτελέσματα δεν επηρεάζονται από τυχαίους παράγοντες, όπως για παράδειγμα την απουσία μεταδόσεων λόγω εργασιών συντήρησης πομπών ή την παρουσία μεταδόσεων λόγω έκτακτων γεγονότων, επιτρέποντας ουσιαστικά τη λήψη μιας αντιπροσωπευτικής εικόνας επί της πραγματικής κατάστασης κατάληψης του ραδιοφάσματος και, κατ' επέκταση, την εξαγωγή έγκυρων και ασφαλών σχετικών συμπερασμάτων.

## 4.5 Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται και σχολιάζονται εκτενώς τα αποτελέσματα της Επισκόπησης Κατάληψης Φάσματος, η οποία εκτελέστηκε στα πλαίσια της παρούσας μελέτης στη μητροπολιτική περιοχή των Αθηνών. Τα εν λόγω αποτελέσματα συνοψίζονται στην Εικόνα 4.4, η οποία αποτυπώνει τον ελάχιστο, μέγιστο και μέσο βαθμό χρησιμοποίησης των κυριότερων φασματικών ζωνών οι οποίες εμπίπτουν στο εξεταζόμενο εύρος συχνοτήτων 300 – 2700 MHz. Σημειώνεται, βέβαια, ότι ο συγκεκριμένος τρόπος παρουσίασης έρχεται σε αντίθεση με την πλειοψηφία των σχετικών μελετών της τρέχουσας βιβλιογραφίας, οι οποίες συνήθως παρουσιάζουν σε ειδικά γραφήματα τα πρωτογενή δεδομένα κατάληψης των κατά περίπτωση εξεταζόμενων φασματικών στοιχείων. Στην

προκειμένη περίπτωση, ωστόσο, η εκτενής διάρκεια παρακολούθησης του ραδιοφάσματος αυξάνει απαγορευτικά την πολυπλοκότητα των τελευταίων γραφημάτων, ενώ η παράθεση ενός τόσο μεγάλου όγκου ανεπεξέργαστων δεδομένων θα απαιτούσε από τον παρατηρητή την καταβολή πολύ μεγάλης προσπάθειας για την εξαγωγή ουσιαστικής πληροφορίας από αυτά. Στοχεύοντας, λοιπόν, στην πιο εύληπτη παρουσίαση των αποτελεσμάτων της εκτελεσθείσας Επισκόπησης Κατάληψης Φάσματος, αλλά και στη διευκόλυνση του παρατηρητή για την άμεση εξαγωγή πολύτιμων συμπερασμάτων εξ αυτών, η παρούσα μελέτη επιλέγει τη συγκεντρωτική παρουσίαση των συλλεγμένων δεδομένων στα πρότυπα της ποιοτικότερης μέχρι στιγμής σχετικής εργασίας της βιβλιογραφίας [116].



**Εικόνα 4.4:** Βαθμός χρησιμοποίησης (επί τοις εκατό) φασματικών ζωνών ενδιαφέροντος (εκφρασμένων σε MHz) στη μητροπολιτική περιοχή των Αθηνών.

Ακριβέστερα, η δημιουργία της ανωτέρω Εικόνας 4.4 απαιτεί, κατ' αρχήν, τον ορισμό των φασματικών ζωνών για τις οποίες επιβάλλεται ο υπολογισμός των αντίστοιχων βαθμών χρησιμοποίησης. Ειδικότερα μάλιστα για την παρούσα μελέτη, τα φασματικά όρια των ζωνών συχνοτήτων ενδιαφέροντος προκύπτουν βάσει της επίσημης ανάθεσης φασματικών ζωνών σε χρήσεις και υπηρεσίες, η οποία καθορίζεται τόσο από την εθνική αρχή διαχείρισης και ελέγχου του ραδιοφάσματος ονόματι 'Ελληνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων' (ΕΕΤΤ) [131], όσο και από το Υπουργείο Υποδομών Μεταφορών και Δικτύων της Ελλάδος μέσω του πρόσφατα ενημερωμένου Εθνικού Κανονισμού Κα-

τανομής Ζωνών Συχνοτήτων [132]. Εν συνεχεία, απαιτείται ο υπολογισμός του βαθμού χρησιμοποίησης κάθε τέτοιας ζώνης για καθεμία από τις συνολικά 20.000 σαρώσεις της (βλ. Παράγραφο 4.4.2), διαιρώντας ουσιαστικά τον αριθμό των φασματικών στοιχείων τα οποία εμπίπτουν σε αυτήν και βρέθηκαν κατειλημμένα στην αντίστοιχη σάρωση με τον συνολικό αριθμό των φασματικών στοιχείων τα οποία εμπίπτουν σε αυτήν. Βάσει των εν λόγω αποτελεσμάτων, λοιπόν, υπολογίζεται τελικά ο ελάχιστος, μέσος και μέγιστος βαθμός χρησιμοποίησης κάθε φασματικής ζώνης ενδιαφέροντος για το διάστημα της επταήμερης παρακολούθησής της. Το γεγονός, μάλιστα, ότι τα συγκεκριμένα μεγέθη προκύπτουν ύστερα από την επεξεργασία ενός τόσο μεγάλου αριθμού δειγμάτων, ελαχιστοποιεί την πιθανότητα εμφάνισης στατιστικών λαθών και, κατ' επέκταση, μεγιστοποιεί τον βαθμό εμπιστοσύνης των παρεχόμενων αποτελεσμάτων. Αξίζει, τέλος, να σημειωθεί ότι η ανωτέρω στατιστική επεξεργασία πραγματοποιείται εξ ολοκλήρου στο προγραμματιστικό περιβάλλον του εργαλείου MATLAB [83].

Με μια πρώτη ματιά επί των αποτελεσμάτων της Εικόνας 4.4 καθίσταται προφανής η έντονη υποχρησιμοποίηση του ραδιοφάσματος ακόμα και στην πυκνοκατοικημένη μητροπολιτική περιοχή των Αθηνών. Ως εκ τούτου, επαληθεύεται πλήρως ότι το πραγματικό περιβάλλον αφήνει όντως περιθώρια για την εφαρμογή της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας στην πράξη. Στην ίδια εικόνα, μάλιστα, εμφανίζονται και οι πρώτες φασματικές ζώνες οι οποίες πληρούν ήδη τις προδιαγραφές της εν λόγω τεχνολογίας, αν και η απουσία ευελιξίας η οποία διέπει τους σύγχρονους κανονισμούς εκμετάλλευσής τους θέτει ένα σημαντικό κώλυμα στην εφαρμογή της επ' αυτών. Μέσω της Εικόνας 4.4, τέλος, αποδεικνύεται και το γεγονός ότι ο βαθμός χρησιμοποίησης της ζώνης συχνοτήτων 300 – 1000 MHz προκύπτει μακράν μεγαλύτερος από αυτόν της ζώνης 1000 – 2700 MHz.

Με μια πιο προσεκτική ματιά επί της Εικόνας 4.4, βέβαια, δύνανται να εξαχθούν επιπλέον σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με τον τρόπο πρόσβασης των πραγματικών Πρωτευόντων Χρηστών στο ραδιοφάσμα. Πιο αναλυτικά, θεωρείται, κατ' αρχήν, αξιοσημείωτο το γεγονός ότι η φασματική ζώνη η οποία ανατίθεται στις αναλογικές και ψηφιακές τηλεοπτικές μεταδόσεις (TV) χαρακτηρίζεται από μέσο βαθμό χρησιμοποίησης ελάχιστα ανώτερο του 20%. Πριν τον χαρακτηρισμό, ωστόσο, της συγκεκριμένης ζώνης ως έντονα υποχρησιμοποιούμενης θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι το εύρος της προσεγγίζει τα 400 MHz και είναι μακράν μεγαλύτερο από κάθε άλλης επίσημα ανατεθειμένης φασματικής

ζώνης. Σε κάθε περίπτωση, λοιπόν, η εν λόγω ζώνη αφήνει ανεκμετάλλευτες σημαντικές ευκαιρίες μετάδοσης, αν και ως πιο ενδιαφέρουσα θεωρείται η συμπεριφορά των Πρωτεύοντων Χρηστών της. Πιο αναλυτικά, και ύστερα από την περαιτέρω στατιστική επεξεργασία των συλλεγμένων στα πλαίσια της παρούσας μελέτης δεδομένων μετρήσεων, καθίσταται προφανές ότι οι υπάρχοντες τηλεοπτικοί σταθμοί εκπέμπουν αδιαλείπτως (στη διάσταση του χρόνου) πάνω από τα νομίμως αποκτηθέντα κανάλια τους. Οι λίγες, δε, παύσεις οι οποίες παρατηρούνται, οφείλονται κυρίως σε προγραμματισμένες εργασίες συντήρησης και πραγματοποιούνται ως επί το πλείστον βράδυνες ώρες όπου η τηλεθέαση είναι χαμηλότερη και οι διακοπές υπηρεσίας δημιουργούν την ελάχιστη δυνατή αναστάτωση. Απαιτείται, ωστόσο, να σημειωθεί ότι στα πλαίσια της επταήμερης παρακολούθησης της εν λόγω ζώνης παρατηρήθηκε η οριστική παύση λειτουργίας κάποιων τηλεοπτικών σταθμών, καθώς και η εμφάνιση νέων σε μέχρι πρότινος ελεύθερες φασματικές υποζώνες. Η συγκεκριμένη παρατήρηση οφείλεται στο γεγονός ότι το γειτονικό κέντρο εκπομπής τηλεοπτικών σημάτων του Υμηττού συμμετείχε κατά την περίοδο εκτέλεσης της παρούσας επισκόπησης στη διαδικασία μετάβασης από την αναλογική στην ψηφιακή εκπομπή ραδιοσημάτων, διαδικασία γνωστή ως *ψηφιακή μετάβαση* (digital switchover). Η συγκεκριμένη μετάβαση έχει δρομολογηθεί και πρόκειται να ολοκληρωθεί στο άμεσο μέλλον τόσο στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, όσο και στις ΗΠΑ, κυρίως για λόγους εξοικονόμησης φάσματος. Παρά το γεγονός, βέβαια, ότι κατά την περίοδο πραγματοποίησης της παρούσας Επισκόπησης Κατάληψης Φάσματος η εν λόγω μετάβαση θα έπρεπε να βρίσκεται ήδη σε προχωρημένο στάδιο, η ανωτέρω φασματική ζώνη φέρεται να εξυπηρετεί ακόμα πολυάριθμα αναλογικά κανάλια. Η συγκεκριμένη παρατήρηση οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι πολλοί τηλεοπτικοί σταθμοί συνεχίζουν να χρησιμοποιούν τα απερχόμενα αναλογικά κανάλια για να μεταδίδουν ενημερωτικά μηνύματα στους τηλεθεατές σχετικά με τις μετέπειτα ενέργειές τους ώστε να συνεχίσουν να παρακολουθούν το πρόγραμμά τους. Ορισμένες, βέβαια, από τις λαμβανόμενες αναλογικές μεταδόσεις προέρχονται και από το απομακρυσμένο κέντρο εκπομπής τηλεοπτικών σημάτων της Πάρνηθας, το οποίο δεν συμμετείχε τη δεδομένη χρονική περίοδο στην προαναφερθείσα διαδικασία ψηφιακής μετάβασης. Το σύνολο των ανωτέρω παρατηρήσεων, λοιπόν, δικαιολογεί απόλυτα την απόκλιση η οποία παρατηρείται στην Εικόνα 4.4 μεταξύ του ελάχιστου, μέσου και μέγιστου βαθμού χρησιμοποίησης της φασματικής ζώνης TV, αφού σε αντίθετη περί-

πτωση οι τιμές αυτές θα έπρεπε να ταυτίζονται, δεδομένου ότι οι υπάρχοντες τηλεοπτικοί σταθμοί εκπέμπουν αδιαλείπτως πάνω από τα καταλαμβανόμενα κανάλια τους. Συμπερασματικά, η φασματική ζώνη η οποία ανατίθεται σε τηλεοπτικές μεταδόσεις προσφέρει αρκετές ανεκμετάλλευτες ευκαιρίες μετάδοσης και, κατ' επέκταση, θέτει πρόσφορο έδαφος για την εφαρμογή της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας στην πράξη. Είναι γεγονός, άλλωστε, ότι οι αρμόδιες ρυθμιστικές αρχές χωρών όπως η Αμερική (FCC [49]), η Αγγλία (OFCOM [50]) και η Σιγκαπούρη (IDA [51]) βρίσκονται ήδη σε προχωρημένο στάδιο προδιαγραφής κατάλληλων κανονιστικών πλαισίων με σκοπό την απρόσκοπτη εκμετάλλευση των προαναφερθεισών ευκαιριών από Δευτερεύοντες Χρήστες. Αξίζει, τέλος, να σημειωθεί ότι παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σύνολο των σχετικών Επισκοπήσεων Κατάληψης Φάσματος της βιβλιογραφίας, αν και σε αυτές οι αντίστοιχοι βαθμοί χρησιμοποίησης προκύπτουν σαφώς μεγαλύτεροι. Το γεγονός αυτό ενδέχεται να οφείλεται είτε στη διαφορετική παραμετροποίηση του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού επαίσθησης (π.χ. αυστηρότερη επιλογή κατωφλίων απόφασης), είτε στον μεγαλύτερο αριθμό τηλεοπτικών σταθμών οι οποίοι εκπέμπουν στις αντίστοιχες εξεταζόμενες μεγαλουπόλεις.

Μια ακόμα κατηγορία φασματικών ζωνών οι οποίες παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στα πλαίσια της παρούσας Επισκόπησης Κατάληψης Φάσματος είναι οι ανατεθειμένες στις *κατερχόμενες ζώνες μεταδόσεων* (downlink) των πρωτοκόλλων κινητής τηλεφωνίας 'Global System for Mobile communications' (GSM-900 DL), 'Digital Cellular System' (DCS-1800 DL) και 'Universal Mobile Telecommunication System' (UMTS/3G DL). Όσον αφορά, κατ' αρχήν, τη φασματική ζώνη η οποία ανατίθεται στο δημοφιλέστερο πρωτόκολλο GSM-900, αυτή φέρεται να χαρακτηρίζεται από υψηλότατο βαθμό χρησιμοποίησης με μέση και μέγιστη τιμή 84.7% και 100%, αντίστοιχα. Οι υψηλές αυτές τιμές οφείλονται κυρίως στο γεγονός ότι το συνολικό εύρος συχνοτήτων της συγκεκριμένης ζώνης ανατίθεται ήδη σε παρόχους σχετικών υπηρεσιών, οι οποίες μάλιστα τυγχάνουν ιδιαίτερα ευρείας χρήσης στις μέρες μας. Στις περιπτώσεις των πρωτοκόλλων DCS-1800 και UMTS/3G, αντίθετα, ένα μέρος των αντίστοιχων φασματικών ζωνών παραμένει *ανεκχώρητο* (unallocated) και, ως εκ τούτου, οι μέσοι βαθμοί χρησιμοποίησής τους προκύπτουν φανερά μειωμένοι, ήτοι 10.4% και 21.4%, αντίστοιχα. Ειδικά για τις δυο τελευταίες περιπτώσεις, βέβαια, οι χαμηλοί βαθμοί χρησιμοποίησης οφείλονται και

στη χαμηλότερη ισχύ με την οποία μεταδίδονται τα ραδιοσήματα, ισχύς η οποία μερικές φορές αδυνατεί εκ των πραγμάτων να ξεπεράσει τη στάθμη θερμικού θορύβου της χρησιμοποιούμενης αρχιτεκτονικής επαίσθησης φάσματος. Ως σημαντικότερο χαρακτηριστικό των τριών αυτών ζωνών, ωστόσο, θεωρείται η έντονη απόκλιση η οποία παρουσιάζεται μεταξύ του ελάχιστου, μέσου και μέγιστου βαθμού χρησιμοποίησης καθεμίας εξ αυτών. Η εν λόγω απόκλιση οφείλεται στο γεγονός ότι οι αντίστοιχοι σταθμοί βάσης δεν παρουσιάζουν αδιάλειπτη λειτουργία στη διάσταση του χρόνου, όπως για παράδειγμα συμβαίνει στην περίπτωση των τηλεοπτικών μεταδόσεων, αλλά κάποιοι από αυτούς αναστέλλουν τη λειτουργία τους τις βραδινές ώρες όπου οι απαιτήσεις των χρηστών τους μειώνονται αισθητά. Η συγκεκριμένη επιλογή στοχεύει ουσιαστικά στην εξοικονόμηση ενέργειας, αλλά και στην προστασία του ακριβού χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού από άσκοπη λειτουργία, χωρίς προφανώς να επηρεάζεται η ποιότητα της απολαμβανόμενης υπηρεσίας από πλευράς των λιγοστών εκείνες τις ώρες ενεργών χρηστών. Οι τρεις ανωτέρω φασματικές ζώνες, λοιπόν, παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στα πλαίσια της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, όχι μόνο γιατί κάποια τμήματά τους παραμένουν ανεκμετάλλευτα στη διάσταση της συχνότητας, αλλά κυρίως γιατί οι ήδη εκχωρημένες υποζώνες τους παρουσιάζουν δυναμική κατάληψη στη διάσταση του χρόνου, εισάγοντας έτσι σημαντικές προκλήσεις στον τρόπο της ευκαιριακής τους εκμετάλλευσης από Δευτερεύοντες Χρήστες.

Από την άλλη πλευρά, οι φασματικές ζώνες οι οποίες ανατίθενται στις *ανερχόμενες ζώνες μεταδόσεων* (uplink) των προαναφερθέντων πρωτοκόλλων GSM-900 UL, DCS-1800 UL και UMTS/3G UL φέρονται να χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά μικρούς βαθμούς χρησιμοποίησης. Αν και αρκετά περίεργη, η συγκεκριμένη παρατήρηση πραγματοποιείται στο σύνολο των σχετικών Επισκοπήσεων Κατάληψης Φάσματος της βιβλιογραφίας, ενώ θεωρείται ότι οφείλεται σε έναν συνδυασμό πολλαπλών παραγόντων [3, 133, 119]. Πιο συγκεκριμένα, είναι γεγονός ότι οι σύγχρονες κινητές συσκευές πραγματοποιούν μεταδόσεις εξαιρετικά χαμηλής ισχύος για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας, ενώ λειτουργούν ως επί το πλείστον σε εσωτερικούς χώρους ή στο επίπεδο οδών. Αναπόφευκτα, λοιπόν, τα ήδη ασθενή μεταδιδόμενα ραδιοσήματά τους υφίστανται ακόμα μεγαλύτερη εξασθένηση κατά τη διέλευσή τους μέσα από τοίχους ή κατά την ανάκλασή τους σε τεχνητά και φυσικά εμπόδια, με αποτέλεσμα να αδυνατούν τις περισσότερες φορές να ξεπεράσουν τη στάθμη



θερμικού θορύβου της χρησιμοποιούμενης αρχιτεκτονικής επαίσθησης. Ειδικά, δε, για το πρωτόκολλο UMTS/3G, η τεχνική της *φασματικής εξάπλωσης* (spread spectrum) – και πιο συγκεκριμένα η τεχνική 'Wideband Code Division Multiple Access' (WCDMA) – την οποία ακολουθούν οι προδιαγραφόμενες μεταδόσεις ραδιοσημάτων δυσκολεύει ακόμα περισσότερο τον εντοπισμό τους από στοιχεία εξοπλισμού όπως οι αναλύτες φάσματος. Η αβεβαιότητα, λοιπόν, η οποία χαρακτηρίζει τα αντίστοιχα προκύπτοντα αποτελέσματα δεν επιτρέπει την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σχετικά με την καταλληλότητα των ανωτέρω φασματικών ζωνών για τη φιλοξενία μιας πιθανής εφαρμογής της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας στην πράξη.

Σημαντικά υποχρησιμοποιούμενες, επίσης, προκύπτουν σύμφωνα με Εικόνα 4.4 τόσο η φασματική ζώνη η οποία ανατίθεται σε μεταδόσεις τύπου DECT, όσο και η λεγόμενη *ζώνη Βιομηχανικών, Επιστημονικών και Ιατρικών μεταδόσεων* (Industrial, Scientific and Medical (ISM) band). Ο μέσος βαθμός χρησιμοποίησης και των δυο αυτών ζωνών, μάλιστα, προσεγγίζει το εξαιρετικά χαμηλό ποσοστό του 0.1%, παρά το γεγονός ότι η μεν πρώτη εξυπηρετεί τις μεταδόσεις των ασύρματων τηλεφώνων σταθερής γραμμής τα οποία απαντώνται κατά κόρων σε οικιακά και εργασιακά περιβάλλοντα, ενώ η δεύτερη εξυπηρετεί τις μεταδόσεις των ευρέως διαδεδομένων ασύρματων δικτύων Wi-Fi τα οποία αναπτύσσονται σήμερα σχεδόν σε κάθε δημόσιο και ιδιωτικό χώρο. Αν και μη-αναμενόμενη, ωστόσο, και η συγκεκριμένη παρατήρηση θεωρείται απόλυτα δικαιολογημένη λόγω ενός συνδυασμού πολλαπλών παραγόντων. Αναλυτικότερα, είναι γεγονός ότι πάνω από τις ανωτέρω ζώνες πραγματοποιούνται μεταδόσεις εξαιρετικά χαμηλής ισχύος, τόσο για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας από πλευράς των αντίστοιχων ασύρματων συσκευών, όσο και για την αποφυγή παρεμβολών μεταξύ γειτονικών μεταδόσεων και, κατ' επέκταση, την αύξηση της χωρητικότητας και του βαθμού επαναχρησιμοποίησης του διαθέσιμου ραδιοφάσματος. Παράλληλα, οι προαναφερθείσες μεταδόσεις πραγματοποιούνται ως επί το πλείστον σε εσωτερικούς χώρους, γεγονός το οποίο οδηγεί τα ήδη ασθενή μεταδιδόμενα ραδιοσήματα σε ακόμα μεγαλύτερη εξασθένηση κατά τη διέλευσή τους μέσα από τοίχους κτηρίων. Ταυτόχρονα, οι ανωτέρω ζώνες εξυπηρετούν συνήθως βραχείες μεταδόσεις, χαρακτηριστικό το οποίο υπαγορεύει κυρίως η φύση των υποστηριζόμενων από πλευράς τους υπηρεσιών, όπως είναι για παράδειγμα οι τηλεφωνικές συνδιαλέξεις ή οι περιηγήσεις στο διαδίκτυο. Όσον αφορά την περίπτωση της παρούσας Επισκόπησης Κατάληψης

Φάσματος, λοιπόν, η διαθέσιμη αρχιτεκτονική επαίσθησης λαμβάνει τις περιστασιακές μεταδόσεις των σχετικών δικτύων τα οποία αναπτύσσονται αποκλειστικά στον τελευταίο όροφο του κτηρίου στο οποίο αυτή βρίσκεται εγκατεστημένη, γεγονός το οποίο δικαιολογεί απόλυτα τον εξαιρετικά μικρό μέσο ( $< 1\%$ ), αλλά και τον σχετικά μεγάλο μέγιστο ( $< 20\%$ ) βαθμό χρησιμοποίησης ο οποίος χαρακτηρίζει τις ανωτέρω φασματικές ζώνες. Συμπερασματικά, οι εν λόγω ζώνες προσφέρουν σημαντικές ανεκμετάλλευτες ευκαιρίες μετάδοσης και θεωρούνται κατάλληλες για την υποστήριξη μιας πιθανής εφαρμογής της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας στην πράξη.

Σημαντικά υποχρησιμοποιούμενες παρουσιάζονται, επίσης, και όσες φασματικές ζώνες ανατίθενται σε δορυφορικές εφαρμογές, όπως για παράδειγμα στη *δορυφορική εξερεύνηση της γης* (satellite earth exploration), στη *δορυφορική πλοήγηση* (satellite navigation) και στην *παρατήρηση μετεωρολογικών φαινομένων* (meteorological applications). Όμοιες παρατηρήσεις πραγματοποιούνται, μάλιστα, στο σύνολο των σχετικών μελετών της βιβλιογραφίας, ενώ σύμφωνα με τις εργασίες [3, 119, 133] το συγκεκριμένο φαινόμενο οφείλεται στις ιδιαίτερες προδιαγραφές των κατά περίπτωση χρησιμοποιούμενων αρχιτεκτονικών επαίσθησης. Πιο συγκεκριμένα, είναι γεγονός ότι τα δορυφορικά σήματα προσεγγίζουν τη Γη εξαιρετικά εξασθενημένα, κυρίως λόγω της μεγάλης απόστασης την οποία αυτά καλούνται να διανύσουν, αλλά και του έντονου επηρεασμού τους από τα επικρατούντα καιρικά φαινόμενα. Ως εκ τούτου, η ορθή λήψη τους απαιτεί τη χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού, όπως για παράδειγμα *κεραίες υψηλού κέρδους* (high gain antennas) τύπου *πίατου* (dish), ενισχυτές, κ.α., καθιστώντας πρακτικά αδύνατο τον εντοπισμό τους από αρχιτεκτονικές επαίσθησης σαν αυτές που χρησιμοποιεί η πλειοψηφία των πραγματοποιηθεισών Επισκοπήσεων Κατάληψης Φάσματος της βιβλιογραφίας.

Σημαντικά υποχρησιμοποιούμενες, τέλος, προκύπτουν σύμφωνα με Εικόνα 4.4 και οι φασματικές ζώνες οι οποίες ανατίθενται τόσο σε εφαρμογές *αεροναυτικής πλοήγησης* (aeronautical navigation), όσο και σε *ραδιοερασιτεχνικές* (radio amateur) μεταδόσεις. Όσον αφορά την πρώτη περίπτωση, η χαμηλή παρατηρούμενη δραστηριότητα οφείλεται τόσο στη φύση των υποστηριζόμενων υπηρεσιών, όσο και στα φυσικά εμπόδια (σ.σ. βουνά) τα οποία παρεμβάλλονται μεταξύ της μητροπολιτικής περιοχής των Αθηνών και του γειτονικού εθνικού αερολιμένα 'Ελ. Βενιζέλος'. Αναφορικά, δε, με τη δεύτερη περίπτωση, η σχεδόν ανύπαρκτη παρατηρούμενη δραστηριότητα ενδέχεται να οφείλεται είτε

στην απουσία ραδιοερασιτεχνών στην εξεταζόμενη περιοχή, είτε στη χρήση από πλευράς τους εναλλακτικών φασματικών ζωνών για την πραγματοποίηση των επιθυμητών μεταδόσεων τους. Σε κάθε περίπτωση, η ασάφεια η οποία χαρακτηρίζει τον βαθμό χρησιμοποίησης των δυο ανωτέρω φασματικών ζωνών δεν επιτρέπει την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σχετικά με την καταλληλότητά τους να φιλοξενήσουν πιθανές εφαρμογές της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας στην πράξη.

## 4.6 Σύνοψη και συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε αναλυτικά η διαδικασία εκτέλεσης μιας Επισκόπησης Κατάληψης Φάσματος στη μητροπολιτική περιοχή των Αθηνών. Η συγκεκριμένη μελέτη συνέβαλε καθοριστικά στην απόκτηση μιας ρεαλιστικότερης και πληρέστερης άποψης επί του τρόπου πρόσβασης των πραγματικών Πρωτευόντων Χρηστών στο ραδιοφάσμα στην εν λόγω γεωγραφική περιοχή. Παράλληλα, επέτρεψε την εξαγωγή σημαντικών συμπερασμάτων σχετικά με τη δυνατότητα εφαρμογής της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας στο πραγματικό περιβάλλον ραδιοσυχνοτήτων, ενώ ανέδειξε και τις φασματικές ζώνες οι οποίες πληρούν ήδη τις τιθέμενες από τη συγκεκριμένη τεχνολογία προδιαγραφές. Σημειώνεται, μάλιστα, ότι δεδομένης της συμμόρφωσης της εν προκειμένω ακολουθούμενης μεθοδολογίας με αυτή του συνόλου των σχετικών επισκοπήσεων της τρέχουσας βιβλιογραφίας, τα συμπεράσματα της παρούσας μελέτης κατέστη δυνατό να αντιπαραβληθούν άμεσα και με αυτά άλλων χωρών παγκοσμίως.

Αναφορικά με τα αποτελέσματα της ανωτέρω Επισκόπησης Κατάληψης Φάσματος, αυτά απέδειξαν, κατ' αρχήν, ότι το ραδιοφάσμα υποχρησιμοποιείται έντονα ακόμα και στην εξαιρετικά πυκνοκατοικημένη μητροπολιτική περιοχή των Αθηνών, ενώ επαλήθευσαν και την ύπαρξη ανεκμετάλλετων ευκαιριών μετάδοσης σχεδόν στο σύνολο της εξεταζόμενης ζώνης συχνοτήτων 300 – 2700 MHz. Οι σημαντικότερες σχετικές ευκαιρίες, μάλιστα, εμφανίστηκαν στις φασματικές ζώνες οι οποίες ανατίθενται στις τηλεοπτικές και στις DECT μεταδόσεις. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον, επίσης, φέρεται να παρουσιάζει στα πλαίσια της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας και η ευκαιριακή εκμετάλλευση των φασματικών ζωνών οι οποίες ανατίθενται σε υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας, κυρίως λόγω των προκλήσεων τις οποίες εισάγει η δυναμική συμπεριφορά των Πρωτευόντων Χρηστών τους.

Εν κατακλείδι, η παρούσα μελέτη επαλήθευσε την εφικτότητα της άμεσης μεταφο-

ράς της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας στο πραγματικό περιβάλλον, αν και πριν από κάθε άλλο βήμα απαιτείται πρώτα η άρση των ανακυπτόντων νομικών και διαχειριστικών σχετικών κωλυμάτων από πλευράς των αρμοδίων ρυθμιστικών αρχών. Η πρακτική εφαρμογή του σαφώς πιο ευέλικτου αυτού μοντέλου διαχείρισης αναμένεται να καταστήσει πιο αποδοτική την εκμετάλλευση του ραδιοφάσματος και, κατ' επέκταση, να παράσχει πρόσφορο έδαφος για την ανάπτυξη νέων, ακόμα πιο προηγμένων ασύρματων υπηρεσιών προς όφελος των τελικών χρηστών.

## Κεφάλαιο 5

# Εντοπισμός και εκμετάλλευση συσχετίσεων στη μετρούμενη ενέργεια του ραδιοφάσματος

Τα αποτελέσματα της Επισκόπησης Κατάληψης Φάσματος η οποία παρουσιάστηκε αναλυτικά στο αμέσως προηγούμενο κεφάλαιο κατέστησαν ξεκάθαρη την ύπαρξη σημαντικών ανεκμετάλλευστων ευκαιριών μετάδοσης στο ραδιοφάσμα. Για να καταστεί, ωστόσο, δυνατή η εκμετάλλευση τους στα πλαίσια της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, οι Δευτερεύοντες Χρήστες απαιτείται να παραμένουν συνεχώς ενήμεροι σχετικά με όσες ευκαιρίες τους προσφέρει το περιβάλλον ραδιοσυχνοτήτων τους. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η συγκεκριμένη ενημερότητα δύναται σήμερα να αποκτηθεί με δυο εναλλακτικούς τρόπους, με την επικοινωνία με Βάσεις Δεδομένων Φάσματος ή με την εφαρμογή κατάλληλων τεχνικών επαίσθησης φάσματος (βλ. Παράγραφο 1.1.2.1). Αξιοσημείωτο, βέβαια, θεωρείται το γεγονός ότι οι αρμόδιες ρυθμιστικές αρχές δείχνουν επί του παρόντος ιδιαίτερη προτίμηση στην πρώτη προσέγγιση, κυρίως για λόγους απλότητας και ασφάλειας, αν και η δεύτερη προσέγγιση θεωρείται μακράν πιο ευέλικτη και ελπιδοφόρα για το μέλλον της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις, ωστόσο, τις οποίες καλούνται να αντιμετωπίσουν οι τεχνικές επαίσθησης φάσματος θεωρείται η πλήρης άγνοια επί των προδιαγραφών του περιβάλλοντος στο οποίο αυτές καλούνται να λειτουργήσουν. Η τεχνολογία της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, άλλωστε, δεν προβλέπει επίσημα ούτε την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ Πρωτευόντων και Δευτερευόντων

Χρηστών, ούτε την ύπαρξη εξωτερικών πηγών οι οποίες να προσφέρουν στους τελευταίους την απαιτούμενη ενημερότητα.

Ως αντιστάθμισμα στην ανωτέρω δυσκολία προτείνεται στα πλαίσια της παρούσας μελέτης μια μεθοδολογία η οποία δίνει τη δυνατότητα στους Δευτερεύοντες Χρηστές να δημιουργούν γνώση επί του εξ ορισμού άγνωστου περιβάλλοντος ραδιοσυχνοτήτων τους με απολύτως ίδια μέσα. Η συγκεκριμένη γνώση δύναται να δράσει υποστηρικτικά στη λήψη σημαντικών αποφάσεων από πλευράς τους, βελτιώνοντας ουσιαστικά το σύνολο των διαδικασιών τις οποίες προδιαγράφει η τεχνολογία της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Σημειώνεται, μάλιστα, ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία βασίζεται στην παρατήρηση ότι οι τιμές ενέργειας όσων φασματικών στοιχείων επηρεάζονται από τις μεταδόσεις του ιδίου Πρωτεύοντος Χρήστη παρουσιάζουν υψηλό βαθμό *συσχέτισης* (correlation), μια παρατήρηση η οποία προέκυψε ύστερα από ενδελεχή στατιστική επεξεργασία των δεδομένων μετρήσεων ενέργειας τα οποία συλλέχθηκαν στα πλαίσια της προαναφερθείσας εκτελεσθείσας Επισκόπησης Κατάληψης Φάσματος στη μητροπολιτική περιοχή των Αθηνών (βλ. Κεφάλαιο 4).

## 5.1 Κίνητρα και οφέλη

Τα τελευταία χρόνια πραγματοποιείται εντατική έρευνα με σκοπό την επιτάχυνση της διαδικασίας εντοπισμού φασματικών οπών από πλευράς Δευτερευόντων Χρηστών εντός ευρέων ζωνών συχνοτήτων. Είναι γεγονός, ωστόσο, ότι η πλειοψηφία των προταθεισών σχετικών προσεγγίσεων βασίζεται σε υπεραπλουστευμένες ή ακόμα και μη-πρακτικές υποθέσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι *τεχνικές επαίσθησης ευρείας ζώνης* (wideband sensing techniques) [134], οι οποίες θεωρούνται ικανές να εντοπίζουν τάχιστα φασματικές οπές εξετάζοντας μονομιάς εξαιρετικά ευρείες φασματικές ζώνες. Παρά τις προηγμένες δυνατότητές τους, βέβαια, οι συγκεκριμένες τεχνικές δεν αναμένεται να βρουν πρακτική εφαρμογή στο άμεσο μέλλον, κυρίως λόγω της δυσκολίας και του κόστους υλοποίησής τους σε υλισμικό [135]. Η υψηλή τους πολυπλοκότητα, άλλωστε, απαιτεί την ανάπτυξη νέου, εξειδικευμένου και αναπόφευκτα ακριβού εξοπλισμού, τη στιγμή που η αντίστοιχη τεχνολογία δεν θεωρείται ακόμα ώριμη στην πράξη. Ως πρακτικότερες, αντίθετα, θεωρούνται οι *τεχνικές επαίσθησης στενής ζώνης* (narrowband sensing techniques) [9], οι οποίες απαιτούν τον τεμαχισμό των εκάστοτε εξεταζόμενων ζωνών σε

πολλές στενότερες και, εν συνεχεία, τον καθορισμό της κατάστασης κατάληψης καθεμίας εξ αυτών ξεχωριστά. Οι εν λόγω τεχνικές, μάλιστα, θεωρούνται αρκετά αποδοτικές, ενώ η χαμηλότερή τους πολυπλοκότητα καθιστά την υλοποίησή τους σε υλισμικό απλούστερη και οικονομικά βιώσιμη στην πράξη.

Κοινό μειονέκτημα, ωστόσο, της πλειοψηφίας των τεχνικών επαίσθησης στενής ζώνης αποτελεί η απαίτηση εκμετάλλευσης προϋπάρχουσας γνώσης επί των ραδιοσημάτων τα οποία μεταδίδονται πάνω από τις κατά περίπτωση εξεταζόμενες φασματικές ζώνες. Η συγκεκριμένη απαίτηση, άλλωστε, έρχεται σε αντίθεση με τις αρχές λειτουργίας της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, η οποία εξ ορισμού δεν προδιαγράφει την ύπαρξη μηχανισμών ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ Πρωτευόντων και Δευτερευόντων Χρηστών. Η μόνη τεχνική, αντίθετα, η οποία δεν θεωρείται εξαρτημένη από την προαναφερθείσα γνώση είναι η λεγόμενη τεχνική επαίσθησης φάσματος βασισμένη στον εντοπισμό ενέργειας (βλ. Ενότητα 4.2). Η συγκεκριμένη τεχνική επιβάλλει τον τεμαχισμό κάθε εξεταζόμενης ζώνης σε στενότερες υπο-ζώνες, ονόματι φασματικά στοιχεία, ενώ η κατάσταση κατάληψης καθενός εξ αυτών προκύπτει απλά συγκρίνοντας τη μετρούμενη σε αυτό ενέργεια με ένα αντίστοιχο κατώφλιο απόφασης. Η τεχνική αυτή, μάλιστα, χαρακτηρίζεται από υψηλή ταχύτητα και χαμηλή πολυπλοκότητα, ενώ η υλοποίησή της σε υλισμικό θεωρείται απλή και οικονομικά βιώσιμη στην πράξη. Η τεχνολογία των ανιχνευτών ενέργειας, άλλωστε, είναι εξαιρετικά ώριμη σήμερα, ενώ σχετικό υλισμικό διατίθεται ευρέως στην αγορά σε πολύ προσιτές τιμές. Δικαιολογημένα, λοιπόν, η εν λόγω τεχνική θεωρείται σήμερα ως καταλληλότερη για υλοποίηση στα πρώιμα στάδια εφαρμογής της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας στην πράξη.

Η τεχνική επαίσθησης φάσματος βασισμένη στον εντοπισμό ενέργειας, ωστόσο, ανάγεται σε μια πολύ απαιτητική διαδικασία σε περιπτώσεις επαίσθησης εξαιρετικά ευρέων φασματικών ζωνών, γεγονός το οποίο οφείλεται στην ανάγκη εξαντλητικής εξέτασης ενός υπερβολικά μεγάλου αριθμού στενών φασματικών στοιχείων. Η δυσμενής αυτή κατάσταση, βέβαια, θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά αν οι Δευτερεύοντες Χρήστες διάθεταν κάποια στοιχειώδη γνώση επί του περιβάλλοντος ραδιοσυχνοτήτων με το οποίο αλληλεπιδρούν. Μια πιθανή, όμως, απόκτηση της συγκεκριμένης γνώσης από εξωτερικές πηγές θα κατέστρεφε την πρακτικότητα της ανωτέρω τεχνικής, ενώ θα την ενέτασσε αναπόφευκτα στο σύνολο των υπόλοιπων τεχνικών επαίσθησης στενής ζώνης

με το γνωστό προαναφερθέν μειονέκτημα. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, λοιπόν, προτείνεται μια μεθοδολογία η οποία καθιστά τους Δευτερεύοντες Χρήστες ικανούς να δημιουργούν μόνοι τους την απαιτούμενη γνώση επί του εξ ορισμού άγνωστου περιβάλλοντος ραδιοσυχνοτήτων λειτουργίας τους. Προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση, μάλιστα, δεν απαιτείται η σπατάλη πόρων για τη συλλογή εξειδικευμένων δεδομένων μετρήσεων, αλλά αρκεί η επεξεργασία όσων δεδομένων συγκεντρώνει σε βάθος χρόνου κάθε Δευτερεύων Χρήστης κατά τη συμβατική επαίσθηση του ραδιοφάσματος, εφαρμόζοντας προφανώς την τεχνική επαίσθησης φάσματος βασισμένη στον εντοπισμό ενέργειας.

Ακρογωνιαίο λίθο της προτεινόμενης μεθοδολογίας αποτελεί η πρακτικά επαληθευμένη παρατήρηση ότι οι τιμές ενέργειας όσων φασματικών στοιχείων επηρεάζονται από τις μεταδόσεις του ίδιου Πρωτεύοντος Χρήστη παρουσιάζουν υψηλό βαθμό συσχέτισης. Η συγκεκριμένη παρατήρηση, μάλιστα, προέκυψε ύστερα από ενδελεχή στατιστική επεξεργασία των δεδομένων μετρήσεων τα οποία συλλέχθηκαν στο πλαίσιο της εκτελεσθείσας Επισκόπησης Κατάληψης Φάσματος στη μητροπολιτική περιοχή των Αθηνών (βλ. Κεφάλαιο 4), ενώ είναι γεγονός ότι η εν λόγω παρατήρηση δεν λαμβάνει τη δέουσα προσοχή στην τρέχουσα βιβλιογραφία. Μέχρι σήμερα, άλλωστε, πραγματοποιούνται μόνο ασαφείς και αβέβαιες υποθέσεις περί της ισχύος της στο πραγματικό περιβάλλον ([136, 137]), ενώ τον τελευταίο καιρό εμφανίζονται εργασίες οι οποίες εξετάζουν μεν διάφορες ιδιότητες συσχέτισης μεταξύ γειτονικών φασματικών στοιχείων, αλλά επεξεργάζονται δεδομένα τα οποία αφορούν αποκλειστικά την κατάσταση κατάληψης ([118, 138]) ή τον *Κύκλο Δράσης* (Duty Cycle) ([139]) των στοιχείων αυτών. Τα εν λόγω δεδομένα, ωστόσο, θεωρούνται εγγενείς φορείς αβεβαιότητας (βλ. Ενότητα 4.2) και δεν θέτουν πρόσφορο έδαφος για την εξαγωγή ενός τόσο λεπτού συμπεράσματος όσο το προαναφερθέν.

Σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία, λοιπόν, κάθε Δευτερεύων Χρήστης απαιτείται κατ' αρχήν να επεξεργάζεται τα δεδομένα μετρήσεων ενέργειας τα οποία συλλέγει σε βάθος χρόνου, στοχεύοντας ουσιαστικά στον υπολογισμό του βαθμού συσχέτισης των τιμών ενέργειας κάθε ζεύγους εκ των εξεταζόμενων από πλευράς του φασματικών στοιχείων. Σε δεύτερη φάση, δε, ο ίδιος χρήστης απαιτείται να ομαδοποιεί τα συγκεκριμένα στοιχεία σε συστάδες ανάλογα με το ύψος του προαναφερθέντος βαθμού συσχέτισης. Όπως προαναφέρθηκε, βέβαια, είναι οι τιμές ενέργειας όσων φασματικών στοιχείων επηρεάζονται από τις μεταδόσεις του ίδιου Πρωτεύοντος Χρήστη αυτές τελικά οι οποίες



αναμένεται να παρουσιάζουν υψηλό βαθμό συσχέτισης μεταξύ τους. Ως εκ τούτου, καθεμία από τις ανωτέρω συστάδες πρόκειται να εμπίπτει στα φασματικά όρια ενός αντίστοιχου καναλιού συγκεκριμένης τεχνολογίας (technology-specific channel), δηλαδή ενός καναλιού το οποίο ανατίθεται σε έναν Πρωτεύοντα Χρήστη βάσει κάποιου εφαρμοζόμενου πρωτοκόλλου. Μέσω της ανωτέρω μεθοδολογίας, λοιπόν, κάθε Δευτερεύων Χρήστης καθίσταται ικανός να συμπεραίνει με απολύτως ίδια μέσα τα φασματικά όρια των καναλιών συγκεκριμένης τεχνολογίας τα οποία σχηματίζονται από τα Πρωτεύοντα Συστήματα στο περιβάλλον ραδιοσυχνότητων λειτουργίας του.

Είναι γεγονός, μάλιστα, ότι η προαναφερθείσα γνώση θεωρείται εξαιρετικά δύσκολο να καταστεί διαθέσιμη στους Δευτερεύοντες Χρήστες με εναλλακτικό τρόπο. Τα φασματικά όρια των καναλιών συγκεκριμένης τεχνολογίας, άλλωστε, εξαρτώνται άμεσα από την ισχύουσα σε κάθε γεωγραφική περιοχή ανάθεση φασματικών ζωνών σε υπηρεσίες. Η εν λόγω ανάθεση, ωστόσο, καθορίζεται από τις κατά τόπους αρμόδιες ρυθμιστικές αρχές, ενώ προς το παρόν δεν υφίστανται υπηρεσίες οι οποίες να παρέχουν ηλεκτρονικά τέτοιου είδους ενημέρωση στους τελικούς χρήστες. Παράλληλα, απαιτείται η ύπαρξη πλήρους γνώσης επί των προδιαγραφών των πρωτοκόλλων τα οποία εφαρμόζονται πάνω από κάθε ανατεθειμένη φασματική ζώνη, ενώ τα φασματικά όρια των καναλιών συγκεκριμένης τεχνολογίας επηρεάζονται και από αστάθμητους παράγοντες οι οποίοι θεωρείται αδύνατο να μοντελοποιηθούν στην πράξη. Η προτεινόμενη στα πλαίσια της παρούσας μελέτης μεθοδολογία, λοιπόν, αποδεικνύεται ένα πολύ ισχυρό εργαλείο στα χέρια των Δευτερευόντων Χρηστών των μελλοντικών Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, παρέχοντάς τους ουσιαστικά την ευκαιρία να δημιουργούν μόνοι τους εξειδικευμένη γνώση επί του εξ ορισμού άγνωστου περιβάλλοντος λειτουργίας τους.

Αξιοσημείωτο, τέλος, θεωρείται και το γεγονός ότι η γνώση επί των φασματικών ορίων των καναλιών συγκεκριμένης τεχνολογίας τα οποία σχηματίζονται στο ραδιοφάσμα σε μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή δύναται να συμβάλει καθοριστικά στη βελτίωση του συνόλου των διαδικασιών τις οποίες προδιαγράφει η τεχνολογία της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Η συγκεκριμένη γνώση, άλλωστε, μεταφράζεται άμεσα σε ενημερότητα επί των υποζωνών του ραδιοφάσματος των οποίων το εσωτερικό παρουσιάζει συνεπή συμπεριφορά, δεδομένου ότι καθεμία εξ αυτών αναμένεται να βρίσκεται είτε ολόκληρη κατειλημμένη, είτε ολόκληρη μη-κατειλημμένη από έναν αντίστοιχο Πρωτεύοντα

Χρήστη. Η έξυπνη εκμετάλλευση της ανωτέρω γνώσης, λοιπόν, δύναται κατ' αρχήν να βελτιώσει την αποδοτικότητα δημοφιλών τεχνικών επαίσθησης φάσματος, όπως αυτές της *αδρομερούς-λεπτομερούς επαίσθησης* (coarse-fine sensing). Οι εν λόγω τεχνικές, μάλιστα, θεωρούνται επί του παρόντος ως οι πιο κατάλληλες για υλοποίηση στα πρώιμα στάδια εφαρμογής της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας στην πράξη, οπότε και κάθε πιθανή βελτίωσή τους θεωρείται σημαντική ακόμα και για την ίδια τη βιωσιμότητα της εν λόγω τεχνολογίας. Κατά δεύτερον, η ανωτέρω γνώση δίνει τη δυνατότητα στους Δευτερεύοντες Χρήστες να αξιολογούν τις κατά περίπτωση διαθέσιμες φασματικές οπές αναφορικά με την ευαισθησία τους στη χρονικά μεταβαλλόμενη δραστηριότητα των Πρωτεύοντων Χρηστών τους. Είναι γεγονός, δε, ότι η κατάληψη λιγότερο ευαίσθητων σχετικών οπών ελαχιστοποιεί τη συχνότητα αναδιάρθρωσης των αντίστοιχων αναθέσεων πόρων και, κατ' επέκταση, τις δυσμενείς επιπτώσεις οι οποίες συνοδεύουν την εν λόγω διαδικασία. Κατά τρίτον, η ανωτέρω γνώση θέτει τις βάσεις για την πρόταση ακόμα πιο αποδοτικών τεχνικών επαίσθησης, ενώ παράλληλα τις βοηθά να αποφεύγουν μη-πρακτικές υποθέσεις και να αντιμετωπίζουν έγκαιρα τις προκλήσεις τις οποίες θέτει το πραγματικό περιβάλλον. Κατά τέταρτον, η ανωτέρω γνώση δύναται να αποκαταστήσει την πρακτικότητα όσων μελετών στηρίζονται απλά σε υποθέσεις αναφορικά με την ύπαρξη ιδιοτήτων συσχέτισης μεταξύ γειτονικών φασματικών στοιχείων. Ταυτόχρονα, και δεδομένης της γενικότητάς της, η ανωτέρω μεθοδολογία δύναται να δράσει συμπληρωματικά και σε προσεγγίσεις οι οποίες ναι μεν λαμβάνουν υπόψιν τους τις προαναφερθείσες ιδιότητες συσχέτισης, αλλά δεν ορίζουν μαθηματικά τεκμηριωμένες μεθοδολογίες ποσοτικοποίησης των αντίστοιχων συντελεστών. Κατά πέμπτον, η ανωτέρω γνώση καθιστά εφικτό τον σχηματισμό των λεγόμενων *δευτερευόντων καναλιών* (secondary channels), δηλαδή καναλιών των οποίων το συνεκτικό εσωτερικό τα καθιστά ελκυστικότερα προς εκμετάλλευση από τους Δευτερεύοντες Χρήστες. Είναι γεγονός, άλλωστε, ότι αν και η τεχνολογία της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας αποφεύγει για λόγους ευελιξίας τον ορισμό τέτοιου είδους καναλιών, η πλειοψηφία των μελετών της σύγχρονης βιβλιογραφίας θεωρούν την ύπαρξή τους ως δεδομένη. Ως εκ τούτου, η δυνατότητα σχηματισμού τέτοιου είδους καναλιών από πλευράς Δευτερευόντων Χρηστών – και μάλιστα με απολύτως ίδια μέσα – δύναται να αποκαταστήσει την πρακτικότητα πολλών υπαρχουσών σχετικών μελετών.

## 5.2 Σχετική βιβλιογραφία

Η παρούσα ενότητα παρουσιάζει εν συντομία τις προσεγγίσεις της σύγχρονης βιβλιογραφίας οι οποίες θεωρούνται άμεσα σχετιζόμενες με την παρούσα μελέτη. Θεωρείται, ωστόσο, απαραίτητο να σημειωθεί ότι στην πλειονότητα των ακόλουθων εργασιών ο όρος κανάλι ταυτίζεται με την έννοια του *καναλιού μέτρησης* (measurement channel) [139], δηλαδή της ελάχιστης φασματικής υποζώνης για την οποία δύναται να ληφθεί μια απόφαση σχετικά με την παρουσία ή όχι ενός ραδιοσήματος. Λιγότερες εργασίες, αντίθετα, εστιάζουν στην παρατήρηση δευτερευόντων καναλιών ή καναλιών συγκεκριμένης τεχνολογίας, ενώ για λόγους γενικότητας η παρούσα ενότητα εστιάζει κάθε φορά στην ουσία της περιγραφόμενης προσέγγισης και όχι στο είδος των καναλιών τα οποία αυτή μελετά.

### 5.2.1 Ιδιότητες συσχέτισης καναλιών

Στη σύγχρονη βιβλιογραφία εντοπίζεται ένας σχετικά μικρός αριθμός μελετών οι οποίες εστιάζουν στην εξέταση διαφόρων ιδιοτήτων συσχέτισης καναλιών. Ενδεικτικά, η εργασία [141] μελετά τους συντελεστές *αυτο-συσχέτισης* (auto-correlation) καναλιών με σκοπό τον εντοπισμό περιοδικοτήτων στην κατάσταση κατάληψης των τελευταίων. Στόχο της συγκεκριμένης εργασίας αποτελεί η δυνατότητα πρόβλεψης της μελλοντικής κατάστασης των εξεταζόμενων καναλιών και, κατ' επέκταση, η κατά προτεραιότητα επαίσθηση όσων εξ αυτών είναι πιθανότερο να βρίσκονται μη-κατειλημμένα μια δεδομένη χρονική στιγμή. Ομοίως, η εργασία [142] εξετάζει τον βαθμό συσχέτισης της διάρκειας των περιόδων κατά τις οποίες ένα κανάλι βρίσκεται κατειλημμένο ή μη-κατειλημμένο, ενώ απώτερο σκοπό της αποτελεί ο σχεδιασμός μοντέλων τα οποία αντικατοπτρίζουν βέλτιστα τη δραστηριότητα των Πρωτευόντων Χρηστών στο ραδιοφάσμα. Δίδεται έτσι η ευκαιρία σε κάθε μελλοντική προσέγγιση να λαμβάνει υπόψιν από τη φάση κιάλας σχεδιασμού της τα χαρακτηριστικά του πραγματικού περιβάλλοντος, αποφεύγοντας αποτελεσματικά πιθανές παγιδεύσεις στο ελεγχόμενο εργαστηριακό περιβάλλον. Από την άλλη πλευρά, προσεγγίσεις όπως οι [143] και [144] εστιάζουν στη *χωρική συσχέτιση* (spatial correlation) η οποία χαρακτηρίζει τις τιμές ενέργειας των εξεταζόμενων καναλιών σε γειτονικούς Δευτερεύοντες Χρήστες. Ένας υψηλός σχετικός βαθμός συσχέτισης, μάλιστα, αποκαλύπτει ασφαλώς τη μετάδοση ενός ραδιοσήματος πάνω από ένα αντίστοιχο κανάλι, αφού σε αντίθετη

περίπτωση η τυχαιότητα του θορύβου δεν θα επέτρεπε την εμφάνιση της εν λόγω συμπεριφοράς. Στη σύγχρονη βιβλιογραφία, τέλος, εντοπίζονται ακόμα και εργασίες – όπως η [145] – στις οποίες εξετάζεται η συσχέτιση της κατάστασης κατάληψης διαφόρων καναλιών με εξωτερικούς παράγοντες (π.χ. ποδοσφαιρικούς αγώνες).

Παρά το γεγονός ότι οι ιδιότητες συσχέτισης καναλιών στις διαστάσεις του χρόνου και του χώρου έχει ήδη κινήσει το ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας, δεν ισχύει το ίδιο και για τις αντίστοιχες ιδιότητες στη διάσταση της συχνότητας. Πολύ συνοπτικά, η εργασία [118] εκμεταλλεύεται τη συσχέτιση η οποία χαρακτηρίζει την κατάσταση κατάληψης γειτονικών καναλιών μέτρησης με σκοπό την πρόταση σύνθετων μοντέλων πρόβλεψης της μελλοντικής τους κατάστασης. Πιο συγκεκριμένα, η εν λόγω μελέτη διαιρεί τις εξεταζόμενες φασματικές ζώνες σε κανάλια μέτρησης εύρους 200 kHz, ενώ εφαρμόζει την τεχνική επαίσθησης φάσματος βασισμένη στον εντοπισμό ενέργειας με σκοπό τον περιοδικό καθορισμό της κατάστασης κατάληψης καθενός εξ αυτών. Επεξεργαζόμενη, δε, ένα σύνολο πραγματικών δεδομένων καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η κατάσταση κατάληψης όσων καναλιών μέτρησης εντάσσονται στην ίδια υπηρεσία (π.χ. κινητή τηλεφωνία GSM) παρουσιάζει έντονο βαθμό συσχέτισης. Η κατάσταση κατάληψης κάθε καναλιού, ωστόσο, θεωρείται φορέας εγγενούς αβεβαιότητας, κυρίως λόγω της αδυναμίας ακριβούς εκτίμησης του κατωφλίου απόφασης με το οποίο απαιτείται να συγκρίνεται η μετρούμενη ενέργειά του. Το γεγονός αυτό, λοιπόν, θέτει αυτόματα σε κίνδυνο την εγκυρότητα του ανωτέρω συμπεράσματος. Παράλληλα, το εξαιρετικά μεγάλο μέγεθος των εξεταζόμενων στην ανωτέρω μελέτη καναλιών μέτρησης αλλοιώνει την πραγματική εικόνα του ραδιοφάσματος, οδηγώντας ουσιαστικά στην πραγματοποίηση χοντροκομμένων παρατηρήσεων επ' αυτού. Ένα κανάλι μέτρησης εύρους ζώνης 200 kHz, άλλωστε, ενδέχεται να εκτείνεται πάνω από πολλαπλά κανάλια συγκεκριμένης τεχνολογίας, των οποίων η ανεξάρτητη συμπεριφορά αλλοιώνει αναπόφευκτα τις όποιες ιδιότητες συσχέτισης παρουσιάζονται στο εσωτερικό του. Ακόμα, δε, και στην εξαιρετική περίπτωση όπου τα αντίστοιχα εύρη των καναλιών μέτρησης και συγκεκριμένης τεχνολογίας ταυτίζονται, η εγγενής αδυναμία ευθυγράμμισης των κεντρικών τους συχνοτήτων αναμένεται να οδηγήσει με βεβαιότητα στη λήψη ασαφών συμπερασμάτων.

Ομοίως, η εργασία [138] εκμεταλλεύεται τη συσχέτιση η οποία χαρακτηρίζει την κατάσταση κατάληψης των γειτονικών καναλιών μέτρησης με σκοπό τη βελτιστοποίηση της

διαδικασίας επιλογής καναλιού (channel selection) από πλευράς των Δευτερευόντων Χρηστών. Η ύπαρξη της προαναφερθείσας συσχέτισης, ωστόσο, επαληθεύεται στη συγκεκριμένη εργασία βάσει οπτικών παρατηρήσεων επί ενός συνόλου συλλεγμένων πραγματικών δεδομένων μετρήσεων. Το γεγονός, λοιπόν, ότι δεν χρησιμοποιείται μια μαθηματικά τεκμηριωμένη μεθοδολογία για την ποσοτικοποίηση των αντίστοιχων συντελεστών συσχέτισης μειώνει σημαντικά τον βαθμό εμπιστοσύνης των εξαγόμενων συμπερασμάτων, ενώ ελλείπει ρεαλιστικών τιμών οι παράμετροι της πραγματοποιούμενης ανάλυσης λαμβάνουν πάντοτε υποθετικές τιμές. Αξιοσημείωτη, επίσης, θεωρείται και η υπόθεση ότι η εμφάνιση της προαναφερθείσας συσχέτισης οφείλεται αποκλειστικά στο φαινόμενο της *Παρεμβολής Παρακείμενου Καναλιού* (Adjacent Channel Interference, ACI), δηλαδή στη διαρροή ενέργειας από τις μεταδόσεις ενός καναλιού στα αμέσως γειτονικά του. Αν και η εμφάνιση του συγκεκριμένου φαινομένου επαληθεύεται πρακτικά και στην παρούσα μελέτη, είναι γεγονός ότι αυτό δεν αποτελεί την κύρια αιτία πρόκλησης της ανωτέρω συσχέτισης. Αξίζει, τέλος, να αναφερθεί ότι η εν λόγω μελέτη αποδεικνύει – εκτός των άλλων – και ότι μια φασματική οπή της οποίας τα επιμέρους φασματικά στοιχεία χαρακτηρίζονται από έντονα συσχετισμένη κατάσταση κατάληψης χαρακτηρίζεται από αυξημένη αναμενόμενη διάρκεια διαθεσιμότητας.

Οι εργασίες [136] και [137], από την άλλη πλευρά, προχωρούν σε απλές υποθέσεις περί της ύπαρξης συσχετίσεων στην κατάσταση κατάληψης γειτονικών καναλιών μέτρησης. Πιο συγκεκριμένα, η εργασία [136] προτείνει ένα μοντέλο επαίσθησης στο οποίο όταν η κατάσταση κατάληψης του αμέσως επόμενου προς επαίσθηση καναλιού παρουσιάζει έντονη συσχέτιση με αυτή του τρέχοντος, ενώ παράλληλα το τελευταίο κανάλι εντοπίζεται ως κατειλημμένο, τότε η επαίσθηση ενός αριθμού  $n$  επόμενων καναλιών παραλείπεται, θεωρώντας ως πιθανότερο να βρίσκονται και αυτά κατειλημμένα. Η δε εργασία [137] μοντελοποιεί έναν εκτιμητή ο οποίος εκμεταλλεύεται τα δεδομένα μετρήσεων τα οποία αφορούν τα επιμέρους κανάλια μέτρησης κάθε εξεταζόμενου καναλιού ευρείας ζώνης με σκοπό την απόφαση επί της κατάστασης κατάληψής του. Δεδομένου, όμως, ότι η πολυπλοκότητα της συγκεκριμένης δομής αυξάνει εκθετικά με τον αριθμό των εξεταζόμενων καναλιών μέτρησης, προτείνεται παράλληλα ένας εναλλακτικός εκτιμητής ο οποίος λαμβάνει τις αντίστοιχες αποφάσεις ύστερα από τον γραμμικό συνδυασμό των δεδομένων μετρήσεων ενός υποσυνόλου εκ των καναλιών αυτών. Αξιοσημείωτο, βέβαια,

θεωρείται ότι οι επιδόσεις και των δύο ανωτέρω προσεγγίσεων εξετάζονται βάσει αναλύσεων και προσομοιώσεων, στις οποίες όμως οι αντίστοιχοι συντελεστές συσχέτισης λαμβάνουν αποκλειστικά υποθετικές τιμές, γεγονός το οποίο θέτει εν αμφιβόλω τη δυνατότητα εφαρμογής των εν λόγω τεχνικών στο πραγματικό περιβάλλον.

Η εργασία [146], αντίθετα, παρουσιάζει την έντονη συσχέτιση η οποία χαρακτηρίζει τους Κύκλους Δράσης (ήτοι τα ποσοστά του χρόνου κατά τα οποία τα αντίστοιχα κανάλια βρίσκονται κατειλημμένα) όσων καναλιών μέτρησης εμπίπτουν σε συγκεκριμένα σημεία των ευρών συχνοτήτων ενός συνόλου καναλιών συγκεκριμένης τεχνολογίας ενδιαφέροντος. Όμοια ευρήματα παρουσιάζονται, επίσης, στην εργασία [139], η οποία όμως υποστηρίζει ότι μονό τα δεδομένα τα οποία αφορούν κανάλια συγκεκριμένης τεχνολογίας θα πρέπει να υφίστανται στατιστική επεξεργασία και, εν συνεχεία, η ισχύς των προκύπτουσών παρατηρήσεων να μεταφέρεται αναγωγικά στα αντίστοιχα επιμέρους κανάλια μέτρησης. Η συγκεκριμένη αντιστοίχιση, ωστόσο, απαιτεί την πλήρη γνώση επί των φασματικών ορίων των καναλιών συγκεκριμένης τεχνολογίας τα οποία σχηματίζονται στο εξεταζόμενο ραδιοφάσμα, απαίτηση η οποία θεωρείται εξαιρετικά δεσμευτική στην πράξη. Οι δυο ανωτέρω μελέτες, τέλος, χαρακτηρίζονται από τα ίδια ακριβώς μειονεκτήματα με την προαναφερθείσα εργασία [118], ενώ απαιτείται να σημειωθεί ότι η ύπαρξη συσχετίσεων στους Κύκλους Δράσης γειτονικών καναλιών μέτρησης δεν συνεπάγεται σε καμία περίπτωση ότι τα αντίστοιχα κανάλια βρίσκονται κατειλημμένα τις ίδιες ακριβώς απόλυτες χρονικές στιγμές.

Η εργασία [140], τέλος, είναι η μόνη εργασία η οποία εξετάζει τη συσχέτιση που χαρακτηρίζει τη μετρούμενη ενέργεια σε γειτονικά φασματικά στοιχεία, επεξεργαζόμενη δεδομένα μετρήσεων τα οποία συλλέχθηκαν στα πλαίσια μιας εκτελεσθείσας Επισκόπησης Κατάληψης Φάσματος στην περιοχή του Λονδίνου. Δεδομένης, μάλιστα, της επανάληψης της συγκεκριμένης επισκόπησης σε τρεις διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές, η εργασία αυτή εξετάζει ακόμα και τις χωρικές συσχετίσεις οι οποίες χαρακτηρίζουν την ενέργεια των εξεταζόμενων φασματικών στοιχείων. Πολύ πιο ενδιαφέρουσα, ωστόσο, θεωρείται η μελέτη των ιδιοτήτων συσχέτισης οι οποίες χαρακτηρίζουν την ενέργεια των στοιχείων αυτών συνδυαστικά στις διαστάσεις του χρόνου και της συχνότητας. Οι δισδιάστατες αυτές ιδιότητες υπολογίζονται με τη βοήθεια του εκτιμητή 'empirical image semivariogram', ενώ ένα ειδικό διάγραμμα παρουσιάζει τον βαθμό συσχέτισης της ενέργειας κάθε εξεταζό-

μενου φασματικού στοιχείου με την ενέργεια κάθε γειτονικού του η οποία μετράται τόσο στην ίδια, όσο και σε μεταγενέστερες σαρώσεις. Απομονώνοντας, μάλιστα, τον άξονα της συχνότητας του συγκεκριμένου διαγράμματος καθίσταται προφανές ότι και στην περίπτωση του Λονδίνου η μετρούμενη ενέργεια των γειτονικών φασματικών στοιχείων παρουσιάζει έντονο βαθμό συσχέτισης. Η συγκεκριμένη εργασία, ωστόσο, δεν προβαίνει στην ερμηνεία των ανωτέρω συσχετίσεων, αλλά αρκείται απλά στην παρουσίασή τους.

### 5.2.2 Τεχνικές αδρομερούς-λεπτομερούς επαίσθησης

Ο εντοπισμός φασματικών οπών στο εσωτερικό ευρέων φασματικών ζωνών δεν αποτελεί ακόμα και σήμερα μια τετριμμένη διαδικασία. Κατά τη συμβατική τεχνική, κάθε τέτοια ζώνη απαιτείται να διαιρείται σε πολλαπλά κανάλια μέτρησης και, εν συνεχεία, να καθορίζεται η κατάσταση κατάληψης καθενός εξ αυτών ξεχωριστά. Είναι γεγονός, ωστόσο, ότι για την αποφυγή πραγματοποίησης εσφαλμένων εκτιμήσεων το μέγεθος των εν λόγω καναλιών θα πρέπει να επιλέγεται αρκετά μικρό [114]. Σε αντίθετη περίπτωση, η μειωμένη ακρίβεια των λαμβανόμενων μετρήσεων ενδέχεται να θέσει σε σημαντικό κίνδυνο την εγκυρότητα των εξαγόμενων συμπερασμάτων. Η συγκεκριμένη απαίτηση, ωστόσο, αυξάνει σημαντικά τον συνολικό χρόνο επαίσθησης της εκάστοτε εξεταζόμενης φασματικής ζώνης.

Την ισορροπία στην ανωτέρω σχέση ανταλλαγής θεωρείται σήμερα ότι προσεγγίζουν βέλτιστα οι τεχνικές *δυο-βημάτων* (two-stage) ή αλλιώς *αδρομερούς-λεπτομερούς επαίσθησης* (coarse-fine sensing). Οι εν λόγω τεχνικές τεμαχίζουν αρχικά κάθε ζώνη ενδιαφέροντος σε κανάλια μέτρησης μεγάλου μεγέθους (ή αλλιώς μεγάλου εύρους ζώνης – οι δυο όροι θα φέρουν εφεξής ταυτόσημη σημασία) (βήμα αδρομερούς επαίσθησης), ενώ μέσω του καθορισμού της κατάστασης κατάληψης καθενός εξ αυτών προκύπτουν τάχιστα οι υποζώνες οι οποίες θεωρείται πιθανότερο να περιέχουν φασματικές οπές. Εν συνεχεία, οι τελευταίες υποζώνες τεμαχίζονται εκ νέου σε κανάλια μέτρησης μικρότερου μεγέθους (ή αλλιώς μικρότερου εύρους ζώνης) (βήμα λεπτομερούς επαίσθησης), λαμβάνοντας έτσι μία πιο ακριβή εκτίμηση επί της κατάστασης κατάληψής καθεμίας εξ αυτών. Ως εκ τούτου, αποφεύγεται η χρονοβόρα επαίσθηση υψηλής ανάλυσης του πλήρους εύρους της εκάστοτε εξεταζόμενης φασματικής ζώνης, χωρίς ωστόσο να επηρεάζεται σημαντικά η ποιότητα και η ποσότητα των εντοπιζόμενων φασματικών οπών.

Η πλειοψηφία των προσεγγίσεων αδρομερούς-λεπτομερούς επαίσθησης της σχετικής βιβλιογραφίας εφαρμόζουν και στα δυο αντίστοιχα βήματα την τεχνική επαίσθησης φάσματος βασισμένη στον εντοπισμό ενέργειας. Δεδομένου, δε, ότι η μόνη διαφορά μεταξύ των δυο αυτών βημάτων εντοπίζεται στην ανάλυση της πραγματοποιούμενης επαίσθησης, οι εν λόγω τεχνικές συχνά αποκαλούνται και ως *πολλαπλής ανάλυσης* (multi-resolution). Συνοπτικά, η εργασία [147] προτείνει μια σχετική αρχιτεκτονική επαίσθησης και επαληθεύει αναλυτικά την αποδοτικότητά της. Παρά το γεγονός, μάλιστα, ότι η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική στηρίζεται σε υποθέσεις των οποίων η ισχύς κρίνεται αβέβαιη στην πράξη, ο συνυπολογισμός ρεαλιστικών παραμέτρων, όπως για παράδειγμα το κόστος αναδιάρθρωσης υλισμικού, ενδυναμώνει το συμπέρασμα ότι η αποδοτικότητά της υπερβαίνει υπό προϋποθέσεις αυτή των συμβατικών μεθόδων *ενός-βήματος* (one-stage). Η εργασία [148], από την άλλη πλευρά, στοχεύει στην ακόμα μεγαλύτερη επιτάχυνση της διαδικασίας επαίσθησης δυο-βημάτων εφαρμόζοντας μια τεχνική παραλληλισμού η οποία βασίζεται στη χρήση πολλαπλών κεραιών. Η τελευταία απαίτηση, ωστόσο, αυξάνει σημαντικά το κόστος και την πολυπλοκότητα υλοποίησης της εν λόγω προσέγγισης σε υλισμικό, θέτοντας έτσι σε κίνδυνο την οικονομική της βιωσιμότητα. Αξίζει, βέβαια, να σημειωθεί ότι οι πρώτες σχετικές εργασίες της βιβλιογραφίας [149, 150] υλοποιούσαν την τεχνική της αδρομερούς-λεπτομερούς επαίσθησης στο αναλογικό πεδίο, με την ανάλυση κάθε βήματος να διαφοροποιείται μέσω της κατάλληλης παραμετροποίησης ενός εξειδικευμένου *συντελεστή κυματιδιακού μετασχηματισμού* (wavelet transform coefficient). Ωστόσο, οι τεχνικές οι οποίες βασίζονται στη μέθοδο FFT θεωρούνται μακράν πιο πρακτικές, κυρίως λόγω του απλούστερου και φθηνότερου υλισμικού το οποίο απαιτείται για την υλοποίησή τους στην πράξη. Σε πλήρη συμφωνία, μάλιστα, με τον τελευταίο ισχυρισμό, η εργασία [151] προτείνει έναν λιγότερο πολύπλοκο αλγόριθμο FFT ο οποίος κρίνεται κατάλληλος για εφαρμογή σε τεχνικές αδρομερούς-λεπτομερούς επαίσθησης, ενώ προχωρά και σε μια πρώτη υλοποίησή του σε υλισμικό.

Η πρακτικότητα των τεχνικών αδρομερούς-λεπτομερούς επαίσθησης έχει ήδη κινήσει το ενδιαφέρον και της ομάδας εργασίας IEEE 802.22 [52], η οποία εξετάζει ακόμη και την ενσωμάτωσή τους στο αντίστοιχο προδιαγραφόμενο πρωτόκολλο. Η εργασία [152], από την άλλη πλευρά, παρουσιάζει ένα εναλλακτικό μοντέλο αδρομερούς-λεπτομερούς επαίσθησης το οποίο θεωρείται κατάλληλο για εφαρμογή στο πρωτόκολλο 'Long-Term



Evolution' (LTE). Το συγκεκριμένο μοντέλο, ωστόσο, θεωρείται εξαιρετικά πολύπλοκο, κυρίως λόγω της προηγμένης φύσης των τεχνικών επαίσθησης οι οποίες εφαρμόζονται στα αντίστοιχα βήματα. Στη σχετική βιβλιογραφία, τέλος, εντοπίζονται και εργασίες όπως η [153], στην οποία η προσοχή στρέφεται στον εντοπισμό της βέλτιστης ανάλυσης η οποία θα πρέπει να χαρακτηρίζει την εφαρμοζόμενη σε κάθε βήμα τεχνική επαίσθησης. Η προδιαγραφόμενη διαδικασία, ωστόσο, απαιτεί τον συνυπολογισμό πληροφοριών οι οποίες θεωρείται εξαιρετικά δύσκολο να αποκτηθούν στην πράξη, όπως είναι για παράδειγμα οι παράμετροι λειτουργίας του διαθέσιμου εξοπλισμού επαίσθησης, οι προδιαγραφές των εφαρμοζόμενων αλγορίθμων, καθώς και τα ιδιαίτερα γνωρίσματα των μεταδιδόμενων ραδιοσημάτων πάνω από τις εξεταζόμενες φασματικές ζώνες.

Μια άλλη ομάδα σχετικών προσεγγίσεων θεωρεί προτιμητέα την εφαρμογή πιο σύνθετων τεχνικών στα αντίστοιχα βήματα του μοντέλου αδρομερούς-λεπτομερούς επαίσθησης. Πιο συγκεκριμένα, στην εργασία [154] το φάσμα διαιρείται αρχικά σε κανάλια μέτρησης μεγάλου μεγέθους και, εν συνεχεία, εντοπίζεται αυτό που χαρακτηρίζεται από τη χαμηλότερη μετρούμενη ενέργεια. Σε δεύτερη φάση εφαρμόζεται επί του τελευταίου μια προηγμένη μέθοδος εντοπισμού γνωρισμάτων, στοχεύοντας ουσιαστικά στην επαλήθευση της υποφαινόμενης διαθεσιμότητάς του και στον εντοπισμό των ορίων των υφιστάμενων φασματικών οπών στο εσωτερικό του. Όμοια πρακτική ακολουθείται επίσης στην εργασία [155], με τη διαφορά όμως ότι στην προκειμένη περίπτωση προωθείται άμεσα στο δεύτερο βήμα κάθε κανάλι του οποίου η ενέργεια δεν υπερβαίνει ένα προκαθορισμένο κατώφλιο. Ως εκ τούτου, η συγκεκριμένη τεχνική δύναται να μειώνει σημαντικά τον χρόνο ο οποίος μεσολαβεί μέχρι τον εντοπισμό της πρώτης διαθέσιμης φασματικής οπής εντός κάθε εξεταζόμενης φασματικής ζώνης. Ίδια μεθοδολογία ακολουθείται και στην εργασία [156], με τη διαφορά όμως ότι σε αυτή παραλείπεται η εκτέλεση του βήματος της λεπτομερούς επαίσθησης όταν ο βαθμός εμπιστοσύνης των αποφάσεων του βήματος της αδρομερούς επαίσθησης κρίνεται επαρκής για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Η συγκεκριμένη τεχνική, βέβαια, θεωρείται ως καταλληλότερη για εφαρμογή σε περιβάλλοντα ραδιοσυχνότητων τα οποία χαρακτηρίζονται από σχετικά υψηλό λόγο σήματος-προς-θόρυβο. Στην εργασία [157], τέλος, τα βήματα της αδρομερούς και της λεπτομερούς επαίσθησης διαφέρουν αποκλειστικά ως προς τον αριθμό των δειγμάτων ενέργειας τα οποία μεσοτιμούνται κατά την εφαρμογή της τεχνικής επαίσθησης φάσμα-

τος βασισμένης στον εντοπισμό ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, απαιτείται αρχικά η μεσοτίμηση ενός μικρού αριθμού δειγμάτων για κάθε εξεταζόμενο κανάλι μέτρησης με σκοπό την απόκτηση μιας πρώτης εκτίμησης σχετικά με την κατάσταση κατάληψής του. Εάν τελικά υπάρχουν ενδείξεις ότι κάποιο σχετικό κανάλι είναι μη-κατειλημμένο, τότε ο αριθμός των μεσοτιμούμενων δειγμάτων του αυξάνεται, βελτιώνοντας έτσι την εκτίμηση της τιμής της ενέργειάς του και, κατ' επέκταση, της ακρίβειας της προκύπτουσας απόφασης σχετικά με την κατάσταση κατάληψής του. Η εργασία [158], τέλος, παρουσιάζει αναλυτικά μια μεθοδολογία εκτίμησης του βέλτιστου αριθμού μεσοτιμούμενων δειγμάτων ενέργειας για καθένα από τα ανωτέρω βήματα.

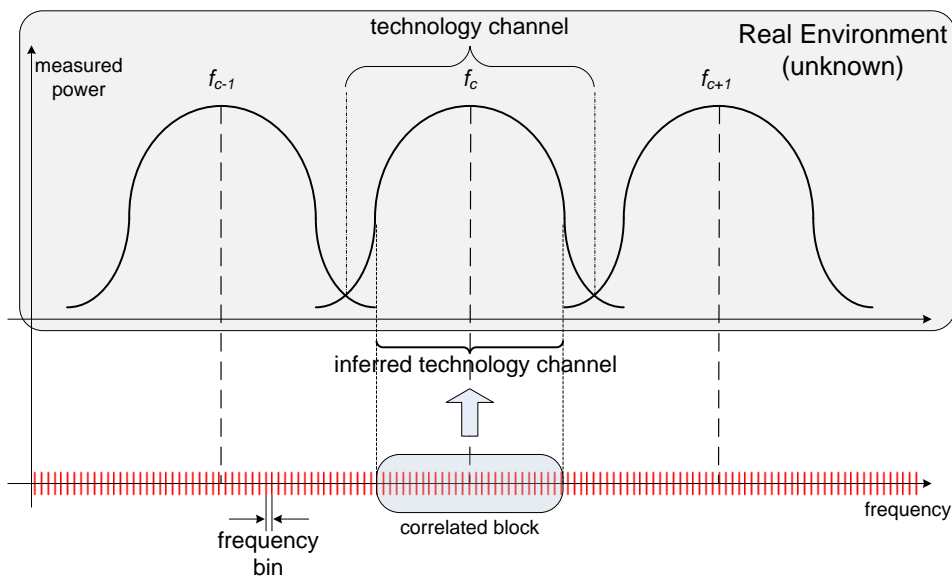
Αξίζει, τέλος, να σημειωθεί ότι η πλειοψηφία των προαναφερθεισών προσεγγίσεων [147, 152, 154, 155, 156, 157, 158] θεωρεί ως δεδομένο τον σχηματισμό δευτερευόντων καναλιών στο ραδιοφάσμα, απαίτηση η οποία καλύπτεται μόνο όταν κάποιο σχετικό πρωτόκολλο αναλαμβάνει τον αυστηρό ορισμό τους. Αντίθετα, ως απαλλαγμένες από τέτοιου είδους απαιτήσεις θεωρούνται οι τεχνικές [149, 150, 151], με αποτέλεσμα να θεωρούνται καταλληλότερες για υλοποίηση στα πρώιμα στάδια εφαρμογής της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας στην πράξη.

### 5.3 Εκμετάλλευση συσχετίσεων ενέργειας φασματικών στοιχείων ως μεθοδολογία εξαγωγής γνώσης

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται αναλυτικά η προτεινόμενη μεθοδολογία, η οποία δίνει τη δυνατότητα στους Δευτερεύοντες Χρήστες να δημιουργούν γνώση επί εξειδικευμένων χαρακτηριστικών του περιβάλλοντος ραδιοσυχνοτήτων λειτουργίας τους. Ανάμεσα μάλιστα στα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της εν λόγω μεθοδολογίας θεωρούνται η ευελιξία της και ο σεβασμός της προς τις αρχές λειτουργίας της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Δεν απαιτεί, άλλωστε, την αλληλεπίδραση με εξωτερικές πηγές γνώσης ή την εκμετάλλευση εξειδικευμένων δεδομένων μετρήσεων, αλλά αντίθετα στηρίζεται αποκλειστικά στην επεξεργασία δεδομένων μετρήσεων ενέργειας τα οποία συλλέγονται από πλευράς των Δευτερευόντων Χρηστών στα πλαίσια της συμβατικά εφαρμοζόμενης τεχνικής επαίσθησης φάσματος βασισμένης στον εντοπισμό ενέργειας επί των φασματικών ζωνών ενδιαφέροντός τους.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ακρογωνιαίο λίθο της προτεινόμενης μεθοδολογίας αποτελεί η παρατήρηση ότι οι τιμές ενέργειας οι οποίες μετρώνται σε φασματικά στοιχεία τα οποία καταλαμβάνονται από τον ίδιο Πρωτεύοντα Χρήστη παρουσιάζουν μεταξύ τους υψηλό βαθμό συσχέτισης. Η συγκεκριμένη παρατήρηση, μάλιστα, προέκυψε ύστερα από ενδελεχή στατιστική επεξεργασία των δεδομένων μετρήσεων ενέργειας τα οποία συλλέχθηκαν στα πλαίσια της Επισκόπησης Κατάληψης Φάσματος η οποία πραγματοποιήθηκε στη μητροπολιτική περιοχή των Αθηνών (βλ. Κεφάλαιο 4), ενώ δικαιολογείται απόλυτα από έναν συνδυασμό παραγόντων. Πιο συγκεκριμένα, είναι γεγονός ότι οι πραγματικοί Πρωτεύοντες Χρήστες εκπέμπουν ραδιοσήματα πάνω από κανάλια συγκεκριμένης τεχνολογίας, τα φασματικά όρια των οποίων εξαρτώνται τόσο από την κατά περίπτωση επιβαλλόμενη (από τις αρμόδιες ρυθμιστικές αρχές) ανάθεση φασματικών ζωνών σε υπηρεσίες, όσο και από τα πρωτόκολλα, τα οποία εφαρμόζονται πάνω από τις αντίστοιχες φασματικές ζώνες. Την ίδια στιγμή, η τεχνική επαίσθησης φάσματος βασισμένη στον εντοπισμό ενέργειας τεμαχίζει κάθε εξεταζόμενη ζώνη συχνοτήτων σε πολλαπλά διαδοχικά φασματικά στοιχεία (ή αλλιώς κανάλια μέτρησης), καθένα εκ των οποίων φέρει τα δικά του φασματικά όρια. Το μέγεθος των συγκεκριμένων στοιχείων, ωστόσο, απαιτείται από θεωρία να επιλέγεται αρκετά στενότερο από αυτό κάθε καναλιού συγκεκριμένης τεχνολογίας που

ορίζεται στην πράξη [114], διασφαλίζοντας έτσι την ακρίβεια της πραγματοποιούμενης επαίσθησης και, κατ' επέκταση, την αντιπροσωπευτικότητα της λαμβανόμενης εικόνας επί της κατάστασης κατάληψης του εξεταζόμενου ραδιοφάσματος. Συνδυάζοντας, λοιπόν, όλα τα παραπάνω, προκύπτει άμεσα ότι στη γενική περίπτωση πολλαπλά φασματικά στοιχεία αναμένεται να εμπίπτουν στα φασματικά όρια κάθε καναλιού συγκεκριμένης τεχνολογίας, ισχυρισμός ο οποίος αποτυπώνεται και σχηματικά στην Εικόνα 5.1. Δεδομένου, δε, ότι κάθε κανάλι συγκεκριμένης τεχνολογίας ανατίθεται αποκλειστικά σε έναν Πρωτεύοντα Χρήστη, οι μεταδόσεις του τελευταίου αναμένεται να επηρεάζουν με συνεπή τρόπο την ενέργεια των αντίστοιχων επιμέρους φασματικών στοιχείων, προσδίδοντας τους μάλιστα συγκεκριμένες ιδιότητες συσχέτισης.



**Εικόνα 5.1:** Πραγματική άποψη περιβάλλοντος ραδιοσυχνοτήτων έναντι άποψης λαμβανόμενης από πλευράς της τεχνικής επαίσθησης φάσματος βασισμένης στον εντοπισμό ενέργειας.

Είναι, λοιπόν, ακριβώς η ανωτέρω ιδιότητα η οποία αν αντιστραφεί δίνει τη δυνατότητα στους Δευτερεύοντες Χρήστες να δημιουργούν σημαντική γνώση επί του εξ ορισμού άγνωστου περιβάλλοντος ραδιοσυχνοτήτων με το οποίο αλληλεπιδρούν. Πιο συγκεκριμένα, κάθε τέτοιος χρήστης δύναται, κατ' αρχήν, να υπολογίζει – βάσει των δεδομένων μετρήσεων τα οποία συλλέγει σε βάθος χρόνου κατά τη συμβατική επαίσθηση του ραδιοφάσματος – τον βαθμό συσχέτισης των τιμών ενέργειας κάθε ζεύγους εκ των εξεταζόμενων από πλευράς του φασματικών στοιχείων. Παράλληλα, και ανάλογα με το ύψος του προαναφερθέντος βαθμού συσχέτισης, ο ίδιος Δευτερεύων Χρήστης δύναται να προχωρεί

στην ομαδοποίηση των εν λόγω φασματικών στοιχείων σε συστάδες. Δεδομένης, ωστόσο, της τεκμηριωμένης ιδιότητας περί της ύπαρξης υψηλού βαθμού συσχέτισης μεταξύ των τιμών ενέργειας όσων φασματικών στοιχείων καταλαμβάνονται από τον ίδιο Πρωτεύοντα Χρήστη, καθεμία από τις προαναφερθείσες συστάδες αναμένεται να εμπίπτει στα φασματικά όρια ενός αντίστοιχου καναλιού συγκεκριμένης τεχνολογίας. Εφαρμόζοντας, λοιπόν, την ανωτέρω μεθοδολογία, κάθε Δευτερεύων Χρήστης καθίσταται ικανός να συμπεραίνει τα φασματικά όρια των καναλιών συγκεκριμένης τεχνολογίας τα οποία σχηματίζονται στο περιβάλλον λειτουργίας του, εκμεταλλευόμενος μάλιστα αποκλειστικά ίδιες παρατηρήσεις.

Αναλυτικότερα, κάθε Δευτερεύων Χρήστης απαιτείται, κατ' αρχήν, να εξετάζει τις γραμμικές εξαρτήσεις (linear dependencies) οι οποίες χαρακτηρίζουν τις τιμές ενέργειας τις οποίες συλλέγει σε βάθος χρόνου κατά τη συμβατική επαίσθηση του ραδιοφάσματος (βάσει της τεχνικής επαίσθησης φάσματος βασισμένης στον εντοπισμό ενέργειας). Προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση οι τιμές ενέργειας οι οποίες συλλέγονται για κάθε εξεταζόμενο φασματικό στοιχείο εντός ενός διαστήματος  $\mathcal{I}$  θεωρούνται ότι σχηματίζουν μια χρονολογική σειρά (time series) παρατηρήσεων. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε τέτοιο στοιχείο ορίζεται μια συνεχής τυχαία μεταβλητή (continuous random variable)  $X_f$  η οποία αναπαριστά τη μετρούμενη σε αυτό ενέργεια και λαμβάνει τιμές  $x_f \in \mathfrak{R}$ . Για να εκτιμηθεί, λοιπόν, επαρκώς η γραμμική εξάρτηση η οποία παρουσιάζεται μεταξύ δυο τέτοιων μεταβλητών, επιστρατεύεται στην παρούσα μεθοδολογία ο συντελεστής συσχέτισης Pearson (Pearson correlation coefficient). Για την ακρίβεια, η μελέτη της στατιστικής εξάρτησης μεταξύ δυο σχετικών μεταβλητών  $X_{f_1}$  και  $X_{f_2}$  βασίζεται στον υπολογισμό του συντελεστή συσχέτισης Pearson product-moment (Pearson product-moment correlation coefficient), ο οποίος συμβολίζεται ως  $\rho$  και εκφράζεται από τη σχέση:

$$\rho_{X_{f_1}X_{f_2}} = \frac{\text{cov}(X_{f_1}, X_{f_2})}{\sigma_{X_{f_1}} \cdot \sigma_{X_{f_2}}}. \quad (5.1)$$

Στη συγκεκριμένη εξίσωση ο όρος  $\text{cov}(X_{f_1}, X_{f_2}) = E[(X_{f_1} - m_{X_{f_1}}) \cdot (X_{f_2} - m_{X_{f_2}})]$  αναπαριστά τη λεγόμενη συνδιασπορά ή συνδιακύμανση (covariance) των τυχαίων μεταβλητών  $X_{f_1}$  και  $X_{f_2}$ , μέτρο το οποίο εκφράζει τη μέση ταυτόχρονη μεταβλητότητά τους γύρω από τις αντίστοιχες μέσες τιμές τους. Οι μεταβλητές  $m_{X_f}$  και  $\sigma_{X_f}$ , από την άλλη πλευρά, εκφράζουν την αναμενόμενη μέση τιμή (expected value, mean) και την τυπική απόκλιση (standard deviation) κάθε μεταβλητής  $X_f$ , αντίστοιχα. Η διαίρεση, λοιπόν, του

συντελεστή συνδιακύμανσης των δυο εξεταζόμενων τυχαίων μεταβλητών με το γινόμενο των τυπικών τους αποκλίσεων απαλλάσσει τον πρώτο από μονάδες μέτρησης και τελικά οδηγεί στον υπολογισμό του επιθυμητού συντελεστή συσχέτισης. Θα πρέπει, βέβαια, να σημειωθεί ότι στη σχετική βιβλιογραφία εντοπίζονται πολυάριθμα είδη εναλλακτικών συντελεστών συσχέτισης, καθένας εκ των οποίων φέρει τα δικά του ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Επί παραδείγματι, ο συντελεστής συσχέτισης Spearman's Rank Correlation [159] ενδείκνυται για την εκτίμηση γραμμικών και μη-γραμμικών συσχετίσεων μεταξύ συνεχών μεταβλητών, ενώ σκοπό του αποτελεί η έκφραση του κατά πόσο η μεταξύ τους στατιστική εξάρτηση δύναται να περιγραφεί μέσω μιας *μονοτονικής* (monotonic) συνάρτησης. Ύστερα, ωστόσο, από εκτενή πειράματα επί πραγματικών δεδομένων μετρήσεων, ο συντελεστής Pearson απεδείχθη ως ο καταλληλότερος για τον υπολογισμό των εξεταζόμενων στα πλαίσια της παρούσας μεθοδολογίας ιδιοτήτων συσχέτισης, συνεκτιμώντας πάντοτε τόσο την εξαιρετική του απλότητα, όσο και την αυξημένη ταχύτητα υπολογισμού του.

Ο συντελεστής συσχέτισης Pearson, βέβαια, δύναται να εκτιμήσει τη γραμμική στατιστική εξάρτηση μεταξύ δύο συνεχών τυχαίων μεταβλητών υπό την προϋπόθεση ότι οι *κατανομές πιθανότητας* (probability distributions) των αντίστοιχων πληθυσμών τους είναι εκ των προτέρων γνωστές. Σε πρακτικές περιπτώσεις, αντίθετα, όπως στην παρούσα μελέτη όπου είναι γνωστή μόνο μια ακολουθία τιμών ενέργειας για κάθε εξεταζόμενο φασματικό στοιχείο  $X_f$  (ακολουθία η οποία σχηματίζει την χρονολογική σειρά  $\{x_f^{(1)}, x_f^{(2)} \dots x_f^{(T)}\}$ ), χρησιμοποιείται συνήθως ο *συντελεστής συσχέτισης Pearson δείγματος* (sample Pearson correlation coefficient)  $r$  για την εκτίμηση του συντελεστή συσχέτισης του αντίστοιχου πληθυσμού. Ο συγκεκριμένος συντελεστής, μάλιστα, υπολογίζεται βάσει της σχέσης:

$$r = \frac{\sum_i (x_{f_1}^{(i)} - \bar{x}_{f_1}) \cdot (x_{f_2}^{(i)} - \bar{x}_{f_2})}{\sqrt{\sum_i (x_{f_1}^{(i)} - \bar{x}_{f_1})^2 \cdot \sum_i (x_{f_2}^{(i)} - \bar{x}_{f_2})^2}} \quad (5.2)$$

όπου  $\bar{x}_f = \frac{x_f^{(1)} + x_f^{(2)} + \dots + x_f^{(T)}}{T}$ . Προσεγγίζοντας, δε, τον εν λόγω συντελεστή συσχέτισης από μια πιο πρακτική σκοπιά, αναφέρεται ότι αυτός εκφράζει το κατά πόσο η συμπεριφορά μιας εξεταζόμενης τυχαίας μεταβλητής συσχετίζεται γραμμικά με τη συμπεριφορά μιας άλλης. Εναλλακτικά, εκφράζει το κατά πόσο ο τρόπος με τον οποίο μία μεταβλητή μεταβάλλεται γύρω από τη μέση τιμή της συναρτάται γραμμικά με τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται μια έτερη μεταβλητή γύρω από τη δική της μέση τιμή. Όσον αφορά τις δυ-

νατές τιμές του συγκεκριμένου συντελεστή, αυτές απαιτείται να ανήκουν αποκλειστικά εντός του διαστήματος  $[-1, +1]$ . Ενδεικτικά, η τιμή  $-1$  εκφράζει την *τέλεια αρνητική συσχέτιση* (perfect negative correlation) μεταξύ των δυο αντίστοιχων μεταβλητών, γεγονός το οποίο φανερώνει ότι όταν η μια μεταβλητή αυξάνει γύρω από τον μέσο όρο της, η άλλη μειώνεται γύρω από τον δικό της. Η τιμή  $+1$ , αντίθετα, εκφράζει την *τέλεια θετική συσχέτιση* (perfect positive correlation) μεταξύ των αντίστοιχων μεταβλητών, γεγονός το οποίο φανερώνει ότι όταν η μια μεταβλητή αυξάνει γύρω από τον μέσο όρο της, η άλλη αυξάνει γύρω από τον δικό της βάσει μιας γραμμικής σχέσης μεταξύ τους. Η τιμή  $0$ , τέλος, υποδηλώνει ότι οι αντίστοιχες μεταβλητές είναι *ασυσχέτιστες* (uncorrelated), χωρίς βέβαια αυτό να συνεπάγεται ότι είναι και *ανεξάρτητες* (independent) μεταξύ τους.

Ακολουθώντας την ανωτέρω μαθηματική προσέγγιση, βέβαια, ένας Δευτερεύων Χρήστης δύναται να εκτιμήσει τον συντελεστή συσχέτισης ο οποίος χαρακτηρίζει τις μετρούμενες τιμές ενέργειας ενός μόνο ζεύγους φασματικών στοιχείων. Στα πλαίσια της προτεινόμενης μεθοδολογίας, ωστόσο, κάθε χρήστης απαιτείται να εκτιμά τον συντελεστή συσχέτισης ο οποίος χαρακτηρίζει τις τιμές ενέργειας μιας ομάδας  $n$  φασματικών στοιχείων. Σύμφωνα με την Εικόνα 5.1, άλλωστε, πολλαπλά φασματικά στοιχεία αναμένεται στη γενική περίπτωση να εμπίπτουν εντός των φασματικών ορίων κάθε καναλιού συγκεκριμένης τεχνολογίας. Η προαναφερθείσα εκτίμηση, λοιπόν, επιτυγχάνεται στην προκειμένη περίπτωση με τη βοήθεια μιας ειδικής δομής ονόματι *πίνακας συσχετίσεων* (correlation matrix). Ο συγκεκριμένος πίνακας είναι δισδιάστατος, ενώ κάθε  $\{i, j\}$ -εγγραφή του ισούται με τον συντελεστή συσχέτισης Pearson ο οποίος χαρακτηρίζει τις τιμές ενέργειας του αντίστοιχου ζεύγους εκ των κατά περίπτωση εξεταζόμενων φασματικών στοιχείων. Βάσει του ανωτέρω πίνακα, λοιπόν, υπολογίζεται ο συντελεστής συσχέτισης ο οποίος χαρακτηρίζει τις τιμές ενέργειας μιας ομάδας  $n$  φασματικών στοιχείων ως ο ελάχιστος συντελεστής συσχέτισης Pearson ο οποίος εντοπίζεται στα επιμέρους ζεύγη φασματικών στοιχείων από τα οποία αποτελείται η συγκεκριμένη ομάδα.

Εκμεταλλεύομενος, λοιπόν, την ανωτέρω δομή, κάθε Δευτερεύων Χρήστης δύναται να προχωρεί στην απαιτούμενη συσταδοποίηση των εξεταζόμενων από πλευράς του φασματικών στοιχείων βάσει του συντελεστή συσχέτισης ο οποίος χαρακτηρίζει τις τιμές της ενέργειάς τους. Προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση αρκεί απλά ο εντοπισμός ομάδων φασματικών στοιχείων των οποίων οι συντελεστές συσχέτισης των τιμών ενέργειας των

επιμέρους σχετικών ζευγών τους υπερβαίνουν μια προκαθορισμένη τιμή-κατώφλιο  $r_{thr}$ . Η συγκεκριμένη ομαδοποίηση, μάλιστα, δύναται να πραγματοποιείται είτε βάσει της τεχνικής της εξαντλητικής αναζήτησης, είτε με τη βοήθεια ευρετικών μεθόδων, επιλογή η οποία εξαρτάται κατά κύριο λόγο τόσο από το μέγεθος του εκάστοτε επεξεργαζόμενου δείγματος, όσο και από τους κατά περίπτωση διαθέσιμους υπολογιστικούς πόρους. Αξίζει, βέβαια, να σημειωθεί ότι η προτεινόμενη στην παρούσα μελέτη μεθοδολογία παρέχει την ευελιξία εφαρμογής οποιασδήποτε υπάρχουσας ή μελλοντικής σχετικής μεθόδου συσταδοποίησης, ενώ ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης παραπέμπεται στην εργασία [160] για την άντληση περισσότερων πληροφοριών σχετικά με τις σημαντικότερες εναλλακτικές σχετικές μεθόδους της τρέχουσας βιβλιογραφίας.

Εν τέλει, και σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην αρχή της παρούσας ενότητας, καθμία από τις προαναφερθείσες συστάδες φασματικών στοιχείων πρόκειται να εμπίπτει σε ένα αντίστοιχο κανάλι συγκεκριμένης τεχνολογίας το οποίο σχηματίζεται στο ραδιοφάσμα από κάποιο παρακείμενο ενεργό Πρωτεύον Σύστημα. Ως εκ τούτου, η ανωτέρω μεθοδολογία καθιστά κάθε Δευτερεύοντα Χρήστη ικανό να συμπεραίνει τα φασματικά όρια των καναλιών συγκεκριμένης τεχνολογίας τα οποία σχηματίζονται στο περιβάλλον ραδιοσυχνοτήτων λειτουργίας του, εκμεταλλευόμενος μάλιστα αποκλειστικά ίδιες παρατηρήσεις.

Αξίζει, τέλος, να αναφερθεί ότι για τη διασφάλιση τόσο της ακρίβειας των υπολογιζόμενων συντελεστών συσχέτισης Pearson, όσο και της ανοχής τους σε τυχούσες παρπλανητικές παρατηρήσεις, κάθε Δευτερεύον Χρήστης θα πρέπει να έχει στη διάθεσή του προς επεξεργασία ένα αρκετά μεγάλο σύνολο δεδομένων μετρήσεων ενέργειας. Για να αξιολογηθεί, μάλιστα, το κατά πόσο ένα δείγμα θεωρείται ικανού μεγέθους ώστε ο συντελεστής συσχέτισης Pearson product-moment  $\rho$  να εκτιμείται επαρκώς από τον συντελεστή συσχέτισης Pearson δείγματος  $r$  απαιτείται ο υπολογισμός του λεγόμενου *διαστήματος εμπιστοσύνης* (confidence interval) του συντελεστή  $r$  ως προς τον αριθμό των διαθέσιμων δεδομένων μετρήσεων και τον συντελεστή  $\rho$ . Προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση εφαρμόζεται συνήθως ο *μετασχηματισμός Fisher* (Fisher's transformation) [112], ο οποίος δίδεται από την ακόλουθη σχέση:

$$z = \frac{1}{2} \ln \frac{1+r}{1-r} = \operatorname{artanh}(r), \quad (5.3)$$

θεωρώντας τον αριθμό των διαθέσιμων δεδομένων μετρήσεων ( $\mathcal{I}$ ) αρκετά μεγάλο. Δε-



δομένου, δε, ότι δύναται να αποδειχθεί ότι η κατανομή της τυχαίας μεταβλητής  $z$  προσεγγίζει την κανονική (normal) με μέσο (mean)  $m_z \simeq \frac{1}{2} \ln \frac{1+\rho}{1-\rho}$  και διακύμανση (variance)  $\sigma_z^2 \simeq \frac{1}{\mathcal{I}-3}$ , το  $\gamma$ -διάστημα εμπιστοσύνης ( $\gamma$ -confidence interval) το οποίο χαρακτηρίζει τον συντελεστή συσχέτισης Pearson δείγματος  $r$  δύναται να εκτιμηθεί προσεγγιστικά μέσω της σχέσης:

$$Pr\{\rho_1 < \hat{r} < \rho_2\} = \gamma, \quad (5.4)$$

όπου

$$\rho_1 = \frac{\exp 2z_1 - 1}{\exp 2z_1 + 1} \quad \text{και} \quad \rho_2 = \frac{\exp 2z_2 - 1}{\exp 2z_2 + 1} \quad (5.5)$$

$$z_1 = m_z - \frac{z_{\frac{1+\gamma}{2}}}{\sqrt{\mathcal{I}-3}} \quad \text{και} \quad z_2 = m_z + \frac{z_{\frac{1+\gamma}{2}}}{\sqrt{\mathcal{I}-3}} \quad (5.6)$$

και  $z_{\frac{1+\gamma}{2}}$  το λεγόμενο κανονικό εκατοστημόριο (normal percentile) το οποίο εκφράζει την τιμή την οποία δεν υπερβαίνει ένα δεδομένο ποσοστό παρατηρήσεων του διαθέσιμου δείγματος.

Ο προαναφερθείς μετασχηματισμός Fisher υλοποιείται σήμερα από την πλειοψηφία των σύγχρονων στατιστικών πακέτων, ενώ θεωρείται στη γενική περίπτωση ικανός να παρέχει ορθά και έγκυρα αποτελέσματα. Απαιτεί, ωστόσο, από την ασυμπτωτική διακύμανση (asymptotic variance) της τιμής  $z$  να είναι ανεξάρτητη από τον συντελεστή  $\rho$ , κάτι το οποίο ισχύει μόνο όταν η βασική διμεταβλητή κατανομή (parent bivariate distribution) των διαθέσιμων δεδομένων φέρει μια πολύ συγκεκριμένη δομή, όπως για παράδειγμα τη διμεταβλητή κανονική κατανομή (bivariate normal distributions) [161, 162]. Παρά το γεγονός, βέβαια, ότι η συγκεκριμένη απαίτηση δεν καλύπτεται από τα επεξεργαζόμενα από την ανωτέρω μεθοδολογία δεδομένα, είναι γεγονός ότι ο μετασχηματισμός Fisher παραμένει κατάλληλος για τον ακριβή υπολογισμό των προαναφερθέντων διαστημάτων εμπιστοσύνης του συντελεστή  $r$ . Όπως, μάλιστα, θα καταστεί φανερό και παρακάτω, τα αποτελέσματα του εν λόγω μετασχηματισμού επηρεάζονται ελάχιστα από την ανωτέρω ασυμβατότητα, γεγονός το οποίο επαληθεύθηκε εκτελώντας μια σειρά πειραμάτων επί πραγματικών δεδομένων μετρήσεων και, παράλληλα, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του μετασχηματισμού Fisher με αυτά της λιγότερο αυστηρής μεθόδου Bootstrap [162, 163].

## 5.4 Σενάρια εκμετάλλευσης της εξαγόμενης γνώσης

Η ανωτέρω μεθοδολογία δίνει τη δυνατότητα στους Δευτερεύοντες Χρήστες να αυξάνουν σημαντικά την ενημερότητά τους επί του εξ ορισμού άγνωστου περιβάλλοντος ραδιοσυχνοτήτων με το οποίο αλληλεπιδρούν. Πιο συγκεκριμένα, τους καθιστά κατ' αρχήν ικανούς να εντοπίζουν τα φασματικά όρια των καναλιών συγκεκριμένης τεχνολογίας τα οποία σχηματίζονται στο ραδιοφάσμα από τα παρακείμενα ενεργά Πρωτεύοντα Συστήματα. Η συγκεκριμένη γνώση, μάλιστα, μεταφράζεται άμεσα και σε ενημερότητα επί των *συνεκτικών φασματικών υποζωνών* (coherent spectrum subbands) του ραδιοφάσματος, ήτοι υποζωνών όπου το εσωτερικό της καθεμίας παρουσιάζει συνεπή συμπεριφορά όσον αφορά την κατάσταση κατάληψής του, δεδομένου ότι επηρεάζεται από τις μεταδόσεις ενός μόνο αντίστοιχου Πρωτεύοντος Χρήστη.

Όπως θα καταστεί φανερό και παρακάτω, η ανωτέρω γνώση δύναται να προσφέρει πολλαπλά οφέλη στους Δευτερεύοντες Χρήστες, βελτιώνοντας ουσιαστικά το σύνολο των διαδικασιών τις οποίες προδιαγράφει η τεχνολογία της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας (βλ. Ενότητα 1.1). Επί παραδείγματι, δύναται να συμβάλει στον ταχύτερο και ακριβέστερο εντοπισμό φασματικών οπών, καθώς και στην απομόνωση όσων εξ αυτών θεωρούνται λιγότερο ευαίσθητες στη χρονικά μεταβαλλόμενη δραστηριότητα των αντίστοιχων Πρωτεύοντων Χρηστών. Παράλληλα, δύναται να δράσει υποστηρικτικά τόσο σε μελλοντικές, όσο και σε υπάρχουσες προσεγγίσεις, όχι μόνο βελτιώνοντας την αποδοτικότητά τους, αλλά και αποκαθιστώντας τη δυνατότητα εφαρμογής τους στο πραγματικό περιβάλλον.

### 5.4.1 Βελτίωση διαδικασίας εντοπισμού φασματικών οπών

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η τεχνική επαίσθησης φάσματος βασισμένη στον εντοπισμό ενέργειας θεωρείται σήμερα ως η πρακτικότερη τεχνική επαίσθησης στα πλαίσια της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας (βλ. Ενότητα 4.2). Η συγκεκριμένη τεχνική απαιτεί τον τεμαχισμό κάθε εξεταζόμενης φασματικής ζώνης σε φασματικά στοιχεία και, εν συνεχεία, τον καθορισμό της κατάστασης κατάληψης καθενός εξ αυτών ξεχωριστά. Για να διασφαλιστεί, ωστόσο, η υψηλή ακρίβεια της πραγματοποιούμενης επαίσθησης, το μέγεθος (ή αλλιώς το εύρος ζώνης) των εν λόγω φασματικών στοιχείων θα πρέπει να επιλέγεται μικρό, και μάλιστα μικρότερο από κάθε κανάλι συγκεκριμένης τεχνολογίας

το οποίο ορίζεται στην πράξη [114]. Η συγκεκριμένη απαίτηση, βέβαια, αυξάνει σημαντικά τη συνολική διάρκεια επαίσθησης της εκάστοτε εξεταζόμενης φασματικής ζώνης. Όπως, άλλωστε, έχει ήδη επαληθευθεί τόσο θεωρητικά (βλ. Ενότητα 4.2), όσο και πρακτικά (βλ. Εικόνα 4.3), ο χρόνος επαίσθησης μιας φασματικής ζώνης θεωρείται αντιστρόφως ανάλογος του εκάστοτε επιλεγμένου μεγέθους φασματικού στοιχείου. Από την άλλη πλευρά, μια πιθανή επιλογή ενός μεγαλύτερου μεγέθους φασματικού στοιχείου να μην θα αύξανε σημαντικά την ταχύτητα της πραγματοποιούμενης επαίσθησης, αλλά παράλληλα θα αλλοίωνε τη λαμβανόμενη εικόνα επί της πραγματικής κατάστασης κατάληψης του ραδιοφάσματος. Η ελλιπής αυτή ακρίβεια, μάλιστα, θα μπορούσε να οδηγήσει στον χαρακτηρισμό ενός φασματικού στοιχείου ως κατειλημμένο ακόμα και αν μέρη αυτού είναι μη-κατειλημμένα, ή ακόμα χειρότερα στον χαρακτηρισμό του ως μη-κατειλημμένο ακόμα και αν μέρη αυτού βρίσκονται όντως κατειλημμένα.

Το σημείο ισορροπίας στην ανωτέρω σχέση ανταλλαγής θεωρείται σήμερα ότι προσεγγίζουν βέλτιστα οι τεχνικές *αδρομερούς-λεπτομερούς επαίσθησης* (coarse-fine sensing). Η συγκεκριμένη κατηγορία τεχνικών επιβάλλει τη σάρωση κάθε ζώνης συχνοτήτων ενδιαφέροντος σε δυο διακριτά βήματα. Κατά το βήμα της *αδρομερούς επαίσθησης* (coarse sensing) κάθε επιθυμητή ζώνη τεμαχίζεται σε φασματικά στοιχεία μεγάλου μεγέθους (ή αλλιώς μεγάλου εύρους ζώνης), γεγονός το οποίο αυξάνει την ταχύτητα ολοκλήρωσης της απαιτούμενης επαίσθησης, αλλά αλλοιώνει την ακρίβεια των λαμβανόμενων αποτελεσμάτων. Παρά τη μειωμένη τους ακρίβεια, ωστόσο, τα συγκεκριμένα αποτελέσματα θεωρούνται ικανά να παρέχουν μια πρώτη εκτίμηση σχετικά με τις φασματικές υποζώνες του ραδιοφάσματος οι οποίες είναι πιθανότερο να περιέχουν φασματικές οπές. Με σκοπό, λοιπόν, την αποκατάσταση της προαναφερθείσας ελλιπούς ακρίβειας εφαρμόζεται μόνο επί των τελευταίων υποζωνών ένα ακόμα βήμα επαίσθησης, αυτό της *λεπτομερούς επαίσθησης* (fine sensing). Στο βήμα αυτό οι επιθυμητές υποζώνες τεμαχίζονται σε φασματικά στοιχεία αρκετά μικρότερου μεγέθους, επιτρέποντας ουσιαστικά τον εντοπισμό των ορίων των φασματικών οπών οι οποίες υφίστανται στο εσωτερικό τους με πολύ υψηλό βαθμό εμπιστοσύνης. Συμπερασματικά, το ανωτέρω μοντέλο επιτρέπει την αποφυγή της χρονοβόρας επαίσθησης υψηλής ανάλυσης του πλήρους εύρους της εκάστοτε εξεταζόμενης φασματικής ζώνης, χωρίς ωστόσο να επηρεάζεται σημαντικά η ποιότητα και η ποσότητα των εντοπιζόμενων φασματικών οπών.

Ο Αλγόριθμος 4 περιγράφει με μεγαλύτερη ακρίβεια το συμβατικό μοντέλο της αδρομερούς-λεπτομερούς επαίσθησης, αγνοώντας προφανώς τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των εναλλακτικών προσεγγίσεων οι οποίες εμφανίζονται στη σχετική βιβλιογραφία. Εν συντομία, ο συγκεκριμένος αλγόριθμος απαιτεί ως είσοδο (1) τα φασματικά όρια μιας προς εξέταση ζώνης συχνοτήτων (*Spectrum*), (2) τα μεγέθη φασματικών στοιχείων τα οποία θα υιοθετηθούν στα αντίστοιχα βήματα επαίσθησης (*CoarseBinSize* και *FineBinSize*), καθώς και (3) δυο διανύσματα τα οποία περιέχουν τα κατώφλια απόφασης των αντίστοιχων φασματικών στοιχείων στα οποία θα τεμαχιστεί η ανωτέρω ζώνη σε κάθε βήμα (*NoiseLevelCoarse[i]* και *NoiseLevelFine[j]*). Εν συνεχεία, και κατά το βήμα της αδρομερούς επαίσθησης (γραμμές 1-7), η ανωτέρω ζώνη τεμαχίζεται σε φασματικά στοιχεία αρκετά μεγάλου μεγέθους (*CoarseBinSize*) (γραμμή 1), ενώ για κάθε τέτοιο στοιχείο (*CoarseBin[i]*) (γραμμή 2) μετράται η στιγμιαία του ενέργεια (*Power*) (γραμμή 3) και συγκρίνεται με ένα αντίστοιχο κατώφλιο απόφασης (*NoiseLevelCoarse[i]*). Αν η πρώτη τιμή δεν υπερβαίνει τη δεύτερη (γραμμή 4), τότε το εξεταζόμενο στοιχείο χαρακτηρίζεται ως μη-κατειλημμένο (*Idle*) (γραμμή 5). Μετά το πέρας της εν λόγω διαδικασίας σειρά έχει η εκτέλεση του βήματος της λεπτομερούς επαίσθησης (γραμμές 8-16). Το παρόν βήμα εφαρμόζεται μόνο επί όσων φασματικών στοιχείων χαρακτηρίστηκαν ως μη-κατειλημμένα στο αμέσως προηγούμενο βήμα (γραμμή 8), ενώ οι αντίστοιχες φασματικές υποζώνες τεμαχίζονται αυτήν τη φορά σε φασματικά στοιχεία αρκετά μικρότερου μεγέθους (*FineBinSize*) (γραμμή 9). Για κάθε τέτοιο στοιχείο (*FineBin[j]*) (γραμμή 10) μετράται η στιγμιαία του ενέργεια (*Power*) (γραμμή 11) και συγκρίνεται με ένα αντίστοιχο κατώφλιο απόφασης (*NoiseLevelFine[j]*), ενώ αν η πρώτη τιμή δεν υπερβαίνει τη δεύτερη (γραμμή 12), τότε το εξεταζόμενο στοιχείο χαρακτηρίζεται ως μη-κατειλημμένο (*Idle*) (γραμμή 13). Μετά την ολοκλήρωση και του δεύτερου αυτού βήματος παρέχεται τελικά ως έξοδος ένα σύνολο μη-κατειλημμένων φασματικών στοιχείων στενού εύρους, τα οποία αποτελούν ουσιαστικά τις υφιστάμενες φασματικές οπές της κατά περίπτωση εξεταζόμενης ζώνης.

Αν και το ανωτέρω μοντέλο θεωρείται εξαιρετικά αποδοτικό στην πράξη, είναι γεγονός ότι θα μπορούσε να επωφεληθεί σημαντικά από την προσφερόμενη από την προτεινόμενη μεθοδολογία γνώση. Πιο συγκεκριμένα, το συμβατικό μοντέλο αδρομερούς-λεπτομερούς επαίσθησης επιβάλλει την εφαρμογή του βήματος της λεπτομερούς επαίσθησης μόνο επί

---

**Αλγόριθμος 4** Συμβατικό μοντέλο αδρομερούς-λεπτομερούς επαίσθησης.

---

**Input:** *Spectrum* : frequency band to examine

*CoarseBinSize*: size of coarse bins

*FineBinSize*: size of fine bins

*NoiseLevelCoarse[i]*: equipment's thermal noise level for coarse bins

*NoiseLevelFine[j]*: equipment's thermal noise level for fine bins

**Output:** *FineBins* found *Idle*

**Coarse Sensing:**

- 1: Divide *Spectrum* to *CoarseBin[i]* acc. to *CoarseBinSize*
- 2: **for each** *CoarseBin[i]* **do**
- 3:   measure *Power*
- 4:   **if** *Power* < *NoiseLevelCoarse[i]* **then**
- 5:     *CoarseBin[i]* is *Idle*
- 6:   **end if**
- 7: **end for**

**Fine Sensing:**

- 8: **for each** *CoarseBin[i]* found *Idle* **do**
  - 9:   Divide *CoarseBin[i]* to *FineBin[j]* acc. to *FineBinSize*
  - 10: **for each** *FineBin[j]* **do**
  - 11:   measure *Power*
  - 12:   **if** *Power* < *NoiseLevelFine[j]* **then**
  - 13:     *FineBin[j]* is *Idle*
  - 14:   **end if**
  - 15: **end for**
  - 16: **end for**
- 

των φασματικών υποζωνών για τις οποίες υπάρχουν σοβαρές ενδείξεις ότι περιέχουν φασματικές οπές. Παράλληλα, η προτεινόμενη μεθοδολογία καθιστά εφικτό τον εντοπισμό συνεκτικών φασματικών υποζωνών, δηλαδή υποζωνών καθεμίας εκ των οποίων το εσωτερικό παρουσιάζει συνεπή συμπεριφορά κατάληψης. Σε περίπτωση, λοιπόν, όπου κατά

το βήμα της αδρομερούς επαίσθησης εμφανιστούν ενδείξεις ότι μια φασματική υποζώνη είναι μη-κατειλημμένη, ενώ ταυτόχρονα αυτή εμπίπτει στα φασματικά όρια κάποιας συνεκτικής υποζώνης, τότε είναι προφανές ότι ολόκληρη η τελευταία αναμένεται με μεγάλη πιθανότητα να βρίσκεται μη-κατειλημμένη. Ως εκ τούτου, το βήμα της λεπτομερούς επαίσθησης θα είχε νόημα να εφαρμοστεί επί του συνολικού εύρους της συνεκτικής αυτής υποζώνης, αυξάνοντας δυνητικά τόσο την ποσότητα, όσο και το εύρος ζώνης των εντοπιζόμενων φασματικών οπών. Η συγκεκριμένη τροποποίηση, μάλιστα, θα καθιστούσε δυνατή όχι μόνο την ελαχιστοποίηση των σπαταλούμενων ευκαιριών μετάδοσης, αλλά και τον εντοπισμό φασματικών οπών οι οποίες θεωρούνται μακράν ελκυστικότερες προς ευκαιριακή εκμετάλλευση από τους Δευτερεύοντες Χρήστες.

Η προαναφερθείσα βελτιωμένη εκδοχή του μοντέλου της αδρομερούς-λεπτομερούς επαίσθησης παρουσιάζεται αναλυτικά στον Αλγόριθμο 5. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος απαιτεί ως είσοδο, εκτός των όσων αναφέρθηκαν στην περίπτωση του Αλγορίθμου 4, και τα φασματικά όρια των υφιστάμενων σε κάθε εξεταζόμενη ζώνη (*Spectrum*) συνεκτικών υποζωνών (*TechChans*) οι οποίες εντοπίζονται με τη βοήθεια της προτεινόμενης στα πλαίσια της παρούσας μελέτης σχετικής μεθοδολογίας. Όσον αφορά το εφαρμοζόμενο βήμα της αδρομερούς επαίσθησης, αυτό ουσιαστικά ταυτίζεται με το αντίστοιχο βήμα του Αλγορίθμου 4, ενώ σημαντικές διαφορές παρουσιάζονται μόνο στο σχετικό βήμα της λεπτομερούς επαίσθησης (γραμμές 8-20). Αναλυτικότερα, κάθε φασματικό στοιχείο το οποίο εντοπίζεται ως μη-κατειλημμένο στο βήμα της αδρομερούς επαίσθησης (γραμμή 8), ελέγχεται στην προκειμένη περίπτωση σχετικά με το κατά πόσο εμπίπτει στα φασματικά όρια μιας υφιστάμενης συνεκτικής φασματικής υποζώνης (*TechChans*) (γραμμή 9). Αν η συγκεκριμένη συνθήκη ικανοποιείται, τότε ολόκληρη η αντίστοιχη συνεκτική υποζώνη τεμαχίζεται σε φασματικά στοιχεία μικρού μεγέθους (*FineBinSize*) (γραμμή 10), ενώ σε αντίθετη περίπτωση τεμαχίζεται μόνο η υποζώνη η οποία αντιστοιχεί στο εξεταζόμενο μη-κατειλημμένο φασματικό στοιχείο του πρώτου βήματος (γραμμή 12). Εν συνεχεία, μετράται η στιγμιαία ενέργεια (*Power*) κάθε σχηματιζόμενου φασματικού στοιχείου (*FineBin[j]*) (γραμμή 15) και συγκρίνεται με ένα αντίστοιχο κατώφλιο απόφασης (*NoiseLevelFine[j]*), ενώ αν η πρώτη τιμή δεν υπερβαίνει τη δεύτερη (γραμμή 16), τότε το εξεταζόμενο στοιχείο χαρακτηρίζεται ως μη-κατειλημμένο (*Idle*) (γραμμή 17). Μετά την ολοκλήρωση και του δεύτερου αυτού βήματος, παρέχεται τελικά ως έξοδος ένα σύ-

---

**Αλγόριθμος 5** Βελτιωμένο μοντέλο αδρομερούς-λεπτομερούς επαίσθησης.

---

**Input:** *Spectrum*: frequency band to examine

*CoarseBinSize*: size of coarse bins

*FineBinSize*: size of fine bins

*NoiseLevelCoarse[i]*: equipment's thermal noise level for coarse bins

*NoiseLevelFine[j]*: equipment's thermal noise level for fine bins

*TechChans*: inferred technology channels

**Output:** *FineBins* found *Idle*

**Coarse Sensing:**

as in *Algorithm 1*.

**Enhanced Fine Sensing:**

```
8: for each CoarseBin[i] found Idle do
9:   if CoarseBin[i] spans inside a TechChan then
10:    Divide this TechChan to FineBin[j] acc. to FineBinSize
11:   else
12:    Divide CoarseBin[i] to FineBin[j] acc. to FineBinSize
13:   end if
14:   for each FineBin[j] do
15:    measure Power
16:    if Power < NoiseLevelFine[j] then
17:     FineBin[j] is Idle
18:    end if
19:   end for
20: end for
```

---

νολο μη-κατειλημμένων φασματικών στοιχείων στενού εύρους, τα οποία αποτελούν ουσιαστικά τις υφιστάμενες φασματικές οπές της εκάστοτε εξεταζόμενης ζώνης.

### 5.4.2 Βελτίωση διαδικασίας επιλογής φασματικών οπών

Μια από τις βασικότερες διαδικασίες τις οποίες προδιαγράφει η τεχνολογία της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας θεωρείται αυτή της επιλογής καναλιού. Η εν λόγω διαδικασία καθίστα τους Δευτερεύοντες Χρήστες ικανούς να αξιολογούν τις φασματικές οπές τις οποίες τους προσφέρει το περιβάλλον ραδιοσυχνότητων τους και, εν συνεχεία, να καταλαμβάνουν όσες εξ αυτών καλύπτουν βέλτιστα τις ανάγκες τους. Προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση, ωστόσο, δεν αρκεί απλά η εξέταση του εύρους ή των χαρακτηριστικών διάδοσης κάθε διαθέσιμης οπής, αλλά απαιτείται ο συνυπολογισμός πολύ πιο εξειδικευμένων ποιοτικών γνωρισμάτων τους.

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των φασματικών οπών θεωρείται η ευαισθησία τους στη χρονικά μεταβαλλόμενη δραστηριότητα των Πρωτευόντων Χρηστών. Κάθε φορά, άλλωστε, που ένας Πρωτεύων Χρήστης επιστρέφει και ανακαταλαμβάνει μια οπή, οι αντίστοιχοι Δευτερεύοντες Χρήστες υποχρεούνται να την αποδεσμεύουν και να μεταφέρουν τις επηρεαζόμενες μεταδόσεις τους πάνω από νέες ελεύθερες οπές. Τέτοιου είδους αναδιρθρώσεις, ωστόσο, επιβαρύνουν σημαντικά την ομαλή λειτουργία τόσο των ιδίων των Δευτερευόντων Χρηστών, όσο και των δικτύων τα οποία αυτοί σχηματίζουν. Πιο συγκεκριμένα, και σύμφωνα με την εργασία [164], κατά τη διάρκεια αναδιάρθρωσης μιας ισχύουσας ανάθεσης πόρων οι εμπλεκόμενοι σε αυτήν Δευτερεύοντες Χρήστες καθίστανται αναπόφευκτα αποδέκτες σημαντικών διακοπών υπηρεσίας. Κατ' επέκταση, μειώνεται σημαντικά τόσο η Ποιότητα Υπηρεσίας, όσο και Εμπειρίας την οποία αυτοί απολαμβάνουν, ενώ παράλληλα προκαλείται έντονη σπατάλη ευκαιριών μετάδοσης και, τελικά, υποχρησιμοποίηση του διαθέσιμου ραδιοφάσματος. Ταυτόχρονα, εντείνεται το πρόβλημα της εμφάνισης απωλειών πακέτων, δεδομένου ότι όσα πακέτα βρίσκονται ακόμα υπό μετάδοση κατά την αναδιάρθρωση των υποκειμένων ζεύξεων δεν δύνανται να προσεγγίσουν επιτυχώς τον προορισμό τους. Τέλος, δεν θεωρείται αμελητέα τόσο η ενέργεια η οποία καταναλώνεται από πλευράς ασύρματων συσκευών, όσο και η κίνηση η οποία προκαλείται από τα μεταδιδόμενα πακέτα διαχείρισης στο εσωτερικό των αναδιρθρούμενων δικτύων.

Οι Δευτερεύοντες Χρήστες, ωστόσο, δύνανται να μετριάσουν τις ανωτέρω επιπτώσεις επιλέγοντας προς εκμετάλλευση φασματικές οπές οι οποίες θεωρούνται λιγότερο ευαίσθητες στη χρονικά μεταβαλλόμενη δραστηριότητα των αντίστοιχων Πρωτευόντων Χρηστών. Προς τη συγκεκριμένη επιλογή, μάλιστα, δύνανται να συμβάλει καθοριστικά η



γνώση την οποία προφέρει η προτεινόμενη στην παρούσα μελέτη μεθοδολογία. Αναλυτικότερα, είναι γεγονός ότι μια φασματική οπή η οποία εμπίπτει στα φασματικά όρια ενός μόνο καναλιού συγκεκριμένης τεχνολογίας επηρεάζεται αποκλειστικά από τις μεταδόσεις ενός μόνο αντίστοιχου Πρωτεύοντος Χρήστη. Αντίθετα, όταν μια οπή επικαλύπτει πολλά διαφορετικά κανάλια, τότε η διαθεσιμότητά της επηρεάζεται συνδυαστικά από τη δραστηριότητα ενός συνόλου αντίστοιχων Πρωτευόντων Χρηστών. Για να χαρακτηριστεί, λοιπόν, η τελευταία οπή ως μη-κατειλημμένη απαιτείται από το σύνολο των αντίστοιχων Πρωτευόντων Χρηστών να είναι ταυτόχρονα απόντες, ενώ ακόμα και αν ένας εξ αυτών επιστρέψει, τότε ολόκληρη η οπή θα πρέπει να αποδεσμευτεί άμεσα. Ως εκ τούτου, η φασματική οπή της πρώτης περίπτωσης θεωρείται ότι έχει περισσότερες πιθανότητες να χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη αναμενόμενη διάρκεια διαθεσιμότητας εν συγκρίσει με την οπή της δεύτερης περίπτωσης, παρά το γεγονός ότι η πραγματική διάρκεια διαθεσιμότητας κάθε οπής εξαρτάται αποκλειστικά από τη δραστηριότητα των αντίστοιχων Πρωτευόντων Χρηστών της. Ο ίδιος ισχυρισμός, μάλιστα, επαληθεύεται και θεωρητικά στην εργασία [138], η οποία αποδεικνύει μαθηματικά ότι οι φασματικές οπές των οποίων τα επιμέρους φασματικά στοιχεία παρουσιάζουν συνεπή (συσχετισμένη) συμπεριφορά κατάληψης χαρακτηρίζονται από αυξημένη αναμενόμενη διάρκεια διαθεσιμότητας. Εκμεταλλευόμενοι, λοιπόν, οι Δευτερεύοντες Χρήστες την παρεχόμενη από την προτεινόμενη μεθοδολογία γνώση δύνανται να δεσμεύουν φασματικές οπές οι οποίες ανήκουν εξ ολοκλήρου εντός φασματικών υποζωνών των οποίων το εσωτερικό παρουσιάζει συνεπή συμπεριφορά, επιτυγχάνοντας έτσι την ελαχιστοποίηση της συχνότητας αναδιάρθρωσης των αναθέσεων πόρων τους.

### 5.4.3 Αντίκτυπος σε προσεγγίσεις σχετιζόμενες με τη Γνωσιακή Ραδιοεπικοινωνία

Πολυάριθμες προσεγγίσεις της σύγχρονης βιβλιογραφίας θεωρούν ως δεδομένο τον πρότερο σχηματισμό δευτερευόντων καναλιών στο ραδιοφάσμα. Κάθε τέτοιο κανάλι – για την ακρίβεια – αναμένεται να παρουσιάζει συνεπή συμπεριφορά, ήτοι να βρίσκεται κάθε στιγμή είτε ολόκληρο ελεύθερο, είτε ολόκληρο κατειλημμένο, ενώ τα φασματικά του όρια απαιτείται να ορίζονται αυστηρά από κάποια εξωτερική οντότητα ή πρωτόκολλο. Η τελευταία απαίτηση, ωστόσο, αντιτίθεται στις αρχές της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ρα-

διοεπικοινωνίας, ενώ παράλληλα καθιστά αδύνατη την εκμετάλλευση 'αχαρτογράφων' φασματικών οπών. Παρά τις σημαντικές τους δυνατότητες, λοιπόν, οι προαναφερθείσες προσεγγίσεις θεωρούνται ακατάλληλες για εφαρμογή στο πραγματικό περιβάλλον ραδιοσυχνοτήτων.

Είναι γεγονός, ωστόσο, ότι η προτεινόμενη στα πλαίσια της παρούσας μελέτης μεθοδολογία δύναται να αποκαταστήσει σε μεγάλο βαθμό την πρακτικότητα των ανωτέρω προσεγγίσεων, προστατεύοντας παράλληλα την ευελιξία της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Πιο συγκεκριμένα, έχει ήδη αναφερθεί ότι η εν λόγω μεθοδολογία επιτρέπει στους Δευτερεύοντες Χρήστες να εντοπίζουν με απολύτως ίδια μέσα τα φασματικά όρια των καναλιών συγκεκριμένης τεχνολογίας τα οποία σχηματίζονται στο περιβάλλον ραδιοσυχνοτήτων τους. Κάθε τέτοια φασματική υποζώνη, βέβαια, επηρεάζεται από τις μεταδόσεις ενός μόνο Πρωτεύοντος Χρήστη και, κατ' επέκταση, αναμένεται να βρίσκεται κάθε στιγμή είτε ολόκληρη ελεύθερη, είτε ολόκληρη κατειλημμένη, αποτελώντας ουσιαστικά μια ιδανική υποψήφια για να αποτελέσει ένα δευτερεύον κανάλι. Εκμεταλλευόμενοι, λοιπόν, την ανωτέρω γνώση οι Δευτερεύοντες Χρήστες καθίστανται ικανοί να καθορίζουν μόνοι τους τα φασματικά όρια όσων σχετικών καναλιών δύναται να σχηματιστούν στο ραδιοφάσμα, και μάλιστα χωρίς καμία απολύτως εξάρτηση από τρίτες οντότητες.

Παράλληλα, η προτεινόμενη μεθοδολογία δύναται να δράσει υποστηρικτικά τόσο σε μελλοντικές, όσο και σε υπάρχουσες μελέτες της σύγχρονης βιβλιογραφίας. Πιο συγκεκριμένα, η ανωτέρω μεθοδολογία θέτει, κατ' αρχήν, τις βάσεις για την πρόταση καινοτόμων τεχνικών επαίσθησης βελτιωμένης ταχύτητας και ακρίβειας. Ενδεικτικά, η παρεχόμενη γνώση επί των φασματικών ορίων των καναλιών συγκεκριμένης τεχνολογίας τα οποία σχηματίζονται εντός κάθε εξεταζόμενης φασματικής ζώνης επιτρέπει την εκτίμηση του μεγέθους των φασματικών οπών οι οποίες αναμένεται να εμφανιστούν στο εσωτερικό της. Είναι, άλλωστε, αυτά ακριβώς τα κανάλια τα οποία τελικά θα μετατραπούν σε φασματικές οπές κατά την απουσία των αντίστοιχων Πρωτευόντων Χρηστών. Ως εκ τούτου, οι Δευτερεύοντες Χρήστες καθίστανται ικανοί να αξιολογούν εκ των πρότερων το κατά πόσο μια φασματική ζώνη αναμένεται να περιέχει φασματικές οπές οι οποίες κρίνονται κατάλληλες για να καλύψουν τις ανάγκες τους, και μόνο αν η συγκεκριμένη συνθήκη ικανοποιείται να προχωρούν τελικά στην περαιτέρω επαίσθησή της. Η ανωτέρω γνώση καθιστά, επίσης, δυνατή την αναγωγή της απόφασης σχετικά με την κατάσταση κατάληψης

κάθε εξεταζόμενου φασματικού στοιχείου σε ολόκληρη τη συνεκτική υποζώνη στην οποία αυτό ενδεχομένως εμπίπτει, δεδομένης της συνεπούς συμπεριφοράς την οποία αναμένεται να παρουσιάζει το εσωτερικό της τελευταίας. Ως εκ τούτου, οι Δευτερεύοντες Χρήστες δύνανται να προβαίνουν σε δειγματοληπτικό έλεγχο φασματικών στοιχείων και, εν συνεχεία, να παραλείπουν την επαίσθηση όσων συνεκτικών φασματικών υποζωνών υπάρχουν ισχυρές ενδείξεις ότι βρίσκονται κατειλημμένες. Και οι δυο ανωτέρω τεχνικές, λοιπόν, δίνουν τη δυνατότητα στους Δευτερεύοντες Χρήστες να αυξάνουν σημαντικά την ταχύτητα επαίσθησης των κατά περίπτωση επιθυμητών φασματικών ζωνών και, κατ' επέκταση, να μειώνουν τον συνολικό χρόνο εντοπισμού φασματικών οπών στο εσωτερικό τους. Κατά δεύτερον, η ανωτέρω γνώση δίνει τη δυνατότητα σε μελλοντικές προτεινόμενες τεχνικές επαίσθησης να αποφεύγουν εσφαλμένες υποθέσεις και να αντιμετωπίζουν έγκαιρα τις προκλήσεις τις οποίες θέτει το πραγματικό περιβάλλον. Χαρακτηριστική, άλλωστε, είναι η περίπτωση της εργασίας [165], η οποία θεωρεί εσφαλμένα τη συμπεριφορά των γειτονικών φασματικών στοιχείων πλήρως ασυσχέτιστη, με ότι αυτό συνεπάγεται για την εγκυρότητα των παρεχόμενων αποτελεσμάτων της. Αξίζει, τέλος, να σημειωθεί ότι ακόμα και μελέτες οι οποίες να μην λαμβάνουν υπόψιν τους τις ιδιότητες συσχέτισης μεταξύ φασματικών στοιχείων (π.χ. [136, 137, 138]), αλλά δεν ορίζουν μαθηματικά τεκμηριωμένες μεθοδολογίες ποσοτικοποίησης των αντιστοίχων συντελεστών, δύνανται να υιοθετήσουν την ανωτέρω μεθοδολογία ώστε να καταστούν πιο ολοκληρωμένες και άμεσα εφαρμόσιμες στο πραγματικό περιβάλλον.

## **5.5 Επίδειξη πρακτικής εφαρμογής της προτεινόμενης μεθοδολογίας και αποτίμηση των οφελών της**

Η παρούσα ενότητα παρουσιάζει λεπτομερώς ένα σενάριο εφαρμογής της προτεινόμενης μεθοδολογίας στο πραγματικό περιβάλλον ραδιοσυχνοτήτων της μητροπολιτικής περιοχής των Αθηνών. Σκοπό της συγκεκριμένης προσπάθειας αποτελεί η επαλήθευση τόσο της ορθότητας των υποθέσεων πάνω στις οποίες στηρίζεται η εν λόγω μεθοδολογία, όσο και της εγκυρότητας της παρεχόμενης από αυτήν γνώσης. Επιπρόσθετα, επιδεικνύονται και κάποια πλεονεκτήματα τα οποία πηγάζουν άμεσα από την εκμετάλλευση της εν λόγω γνώσης στα πλαίσια διαφόρων διαδικασιών της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιο-

επικοινωνίας.

### 5.5.1 Περιβάλλον εκτέλεσης πειραμάτων

Στα πλαίσια της παρούσας πειραματικής μελέτης τα απαιτούμενα δεδομένα μετρήσεων συλλέγονται με τη βοήθεια της αρχιτεκτονικής επαίσθησης η οποία παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 4.4.1. Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική ακολουθεί όμοια παραμετροποίηση με αυτή της Παραγράφου 4.4.2, ενώ σε όποιο σημείο απαιτείται η εκτίμηση της τιμής ενός καταφλιού απόφασης, αυτό επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας την υβριδική τεχνική η οποία περιγράφηκε αναλυτικά στην Παράγραφο 4.4.3. Σημειώνεται, ακόμα, ότι η συλλογή των επιθυμητών δεδομένων μετρήσεων αυτοματοποιείται χρησιμοποιώντας το λογισμικό National Instruments LabVIEW [127] στην έκδοση 8.5, ενώ η απαιτούμενη στατιστική επεξεργασία τους πραγματοποιείται με τη βοήθεια του εργαλείου MATLAB [83].

Είναι αξιοσημείωτο, επίσης, ότι ο διαθέσιμος αναλύτης φάσματος National Instruments PXI-5661 RF Vector Signal Analyzer [125] θεωρείται στην προκειμένη περίπτωση ιδανικός για την υλοποίηση της ανωτέρω μεθοδολογίας στην πράξη. Ο συγκεκριμένος αναλύτης, άλλωστε, δύναται να σαρώνει ταχύτατα ευρείες ζώνες συχνοτήτων και, παράλληλα, να εκτιμά με μεγάλη ακρίβεια την ενέργεια κάθε φασματικού στοιχείου το οποίο σχηματίζεται στο εσωτερικό τους. Όμοιες προδιαγραφές, ωστόσο, φέρουν και άλλα στοιχεία εξοπλισμού, όπως για παράδειγμα οι δημοφιλείς συσκευές Λογισμικόριστης Ραδιοεπικοινωνίας USRP [41] ή κάποιες εξειδικευμένες υλοποιήσεις υποκατάστατων αναλυτών φάσματος [166, 167]. Αναφορικά με τις συσκευές USRP [41], αυτές αποτελούν ένα εμπορικό προϊόν το οποίο χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά μεγάλη ευελιξία και προηγμένες δυνατότητες. Ο όγκος τους είναι σημαντικά μικρότερος από αυτόν ενός αναλύτη φάσματος, ενώ η τιμή τους ξεκινά από τα \$500, ποσό σημαντικά μικρότερο από το συνολικό κόστος της διαθέσιμης αρχιτεκτονικής. Από την άλλη πλευρά, οι υλοποιήσεις υποκατάστατων αναλυτών φάσματος [166, 167] χαρακτηρίζονται από ακόμα χαμηλότερο όγκο και κόστος (περίπου \$200), αλλά βρίσκονται προς το παρόν σε πειραματικό στάδιο και δεν διατίθενται ευρέως στην αγορά. Σε κάθε περίπτωση, θεωρείται άξιο αναφοράς ότι η ανωτέρω μεθοδολογία δεν εξαρτάται από το είδος ή τις προδιαγραφές του κατά περίπτωση χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού, αλλά δύναται να υλοποιηθεί ακόμα και σε φθηνές συσκευές οι οποίες φέρουν στοιχεία κινητικότητας, γεγονός το οποίο διασφαλίζει τη δυνατότητα

άμεσης μεταφοράς της στο πραγματικό περιβάλλον ραδιοσυχνοτήτων.

Πολύ σημαντική για την παρούσα μελέτη θεωρείται, τέλος, και η επιλογή της φασματικής ζώνης επί της οποίας αναπτύσσονται τα ακόλουθα πειραματικά σενάρια. Πιο συγκεκριμένα, η εκτελεσθείσα Επισκόπηση Κατάληψης Φάσματος στη μητροπολιτική περιοχή των Αθηνών (βλ. Κεφάλαιο 4) κατέστησε ξεκάθαρο ότι η φασματική ζώνη η οποία παρουσιάζει σήμερα μεγαλύτερο ενδιαφέρον στα πλαίσια της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας είναι η ανατεθειμένη στην κατερχόμενη ζώνη του πρωτοκόλλου GSM-900 (930 – 960 MHz). Η δυναμική συμπεριφορά των Πρωτευόντων Χρηστών της, άλλωστε, καθιστά ευμετάβλητη τη διαθεσιμότητα φασματικών οπών στο εσωτερικό της και, κατ' επέκταση, θέτει σημαντικές προκλήσεις στον τρόπο αποδοτικής και ασφαλούς εκμετάλλευσής τους από τους αντίστοιχους Δευτερεύοντες Χρήστες. Η εν λόγω φασματική ζώνη, λοιπόν, κρίνεται επί του παρόντος ως καταλληλότερη τόσο για την επίδειξη του τρόπου λειτουργίας της προτεινόμενης μεθοδολογίας στην πράξη, όσο και για την αξιολόγηση της παρεχόμενης από αυτή γνώσης.

### 5.5.2 Επίδειξη εφαρμογής της προτεινόμενης μεθοδολογίας στην πράξη

Ένας Δευτερεύων Χρήστης, λοιπόν, θεωρείται ότι προχωρά στη συμβατική επαίσθηση της κατερχόμενης ζώνης του πρωτοκόλλου GSM-900 (930–960 MHz) στη μητροπολιτική περιοχή των Αθηνών, εφαρμόζοντας προφανώς την τεχνική επαίσθησης φάσματος βασισμένη στον εντοπισμό ενέργειας. Για λόγους απλότητας, δε, η ακόλουθη περιγραφή θα εστιάσει σε μια υποζώνη εύρους 5 MHz της προαναφερθείσας φασματικής ζώνης. Ακριβέστερα, ο ανωτέρω χρήστης θεωρείται ότι σαρώνει περιοδικά το προαναφερθέν εύρος συχνοτήτων για περίπου 42 ώρες (εκτελώντας 5760 σαρώσεις) συλλέγοντας δεδομένα μετρήσεων ενέργειας για τα περίπου 1300 φασματικά στοιχεία τα οποία σχηματίζονται στο εσωτερικό του (υπενθυμίζεται ότι το μέγεθος φασματικού στοιχείου επιλέγεται εν προκειμένω ίσο με περίπου 4 kHz).

Πριν, ωστόσο, εφαρμοστεί η προτεινόμενη μεθοδολογία επί του διαθέσιμου αυτού δείγματος δεδομένων μετρήσεων, απαιτείται πρώτα η επαλήθευση του κατά πόσο αυτό θεωρείται επαρκές για τη διασφάλιση της ακρίβειας των παρεχόμενων αποτελεσμάτων της. Όπως, μάλιστα, έχει ήδη αναφερθεί, προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση αρκεί η εκτίμηση του διαστήματος εμπιστοσύνης κάθε υπολογιζόμενου συντελεστή συσχέτισης

Pearson δείγματος  $r$  ως προς τον αριθμό των επεξεργαζόμενων δεδομένων μετρήσεων ενέργειας και τον αντίστοιχο συντελεστή συσχέτισης Pearson product-moment  $\rho$  (βλ. Ενότητα 5.3). Βάσει, λοιπόν, των εξισώσεων (5.4), (5.5), (5.6) και των διαθέσιμων δεδομένων μετρήσεων, υπολογίζονται στην προκειμένη περίπτωση τα διαστήματα εμπιστοσύνης των απαιτούμενων συντελεστών συσχέτισης δείγματος  $r$  για ένα  $\gamma$  επίπεδο εμπιστοσύνης ( $\gamma$  confidence level) της τάξεως του 95%. Τα εν λόγω διαστήματα, μάλιστα, υπολογίζονται εφαρμόζοντας τόσο τον μετασχηματισμό Fisher, όσο και την λιγότερο αυστηρή μέθοδο Bootstrap (βλ. Ενότητα 5.3), ενώ ο Πίνακας 5.1 παρουσιάζει τους συντελεστές συσχέτισης Pearson δείγματος  $r$  και τα αντίστοιχα διαστήματα εμπιστοσύνης τους για κάποια αντιπροσωπευτικά ζεύγη φασματικών στοιχείων (εξετάζονται, άλλωστε, τόσο φασματικά στοιχεία τα οποία λόγω της απόστασής τους στη διάσταση της συχνότητας είναι αδύνατο να εμπίπτουν εντός του ιδίου καναλιού συγκεκριμένης τεχνολογίας και έτσι η ενέργειά τους αναμένεται να παρουσιάζει χαμηλή συσχέτιση (γραμμή 1), όσο και γειτονικά φασματικά στοιχεία τα οποία είναι σχεδόν βέβαιο ότι εμπίπτουν εντός του ιδίου καναλιού συγκεκριμένης τεχνολογίας και η ενέργειά τους αναμένεται να παρουσιάζει τέλεια θετική συσχέτιση (γραμμή 4)). Σε κάθε περίπτωση, η επιφανιόμενη εγγύτητα μεταξύ των συντελεστών συσχέτισης Pearson δείγματος  $r$  και των αντίστοιχων διαστημάτων εμπιστοσύνης επαληθεύει πλήρως την επάρκεια των διαθέσιμων δεδομένων μετρήσεων ενέργειας για την ακριβή εκτίμηση κάθε επιθυμητού συντελεστή συσχέτισης Pearson product-moment  $\rho$  από τον αντίστοιχο συντελεστή  $r$ . Παράλληλα, η εμφανής εγγύτητα των διαστημάτων εμπιστοσύνης, τα οποία υπολογίζονται από τις δύο εναλλακτικές σχετικές μεθόδους, επαληθεύει και τον αμελητέο επηρεασμό του μετασχηματισμού Fisher από την εξ ορισμού ασύμβατη κατανομή του ανωτέρω δείγματος με τις τιθέμενες προδιαγραφές του (βλ. Ενότητα 5.3).

Αφού, λοιπόν, διασφαλίστηκε ότι το διαθέσιμο σύνολο δεδομένων μετρήσεων επαρκεί για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων, σειρά έχει η εξέταση των γραμμικών εξαρτήσεων οι οποίες χαρακτηρίζουν τις τιμές ενέργειας των ανωτέρω εξεταζόμενων φασματικών στοιχείων. Προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση δημιουργείται αρχικά ένας πίνακας συσχετίσεων, ο οποίος περιέχει ως κελιά του τους συντελεστές συσχέτισης Pearson  $r$  των τιμών ενέργειας κάθε αντίστοιχου ζεύγους σχετικών στοιχείων. Το εξαιρετικά μεγάλο μέγεθος του συγκεκριμένου πίνακα ( $1300 \times 1300$ ), ωστόσο, καθιστά απαγορευτική

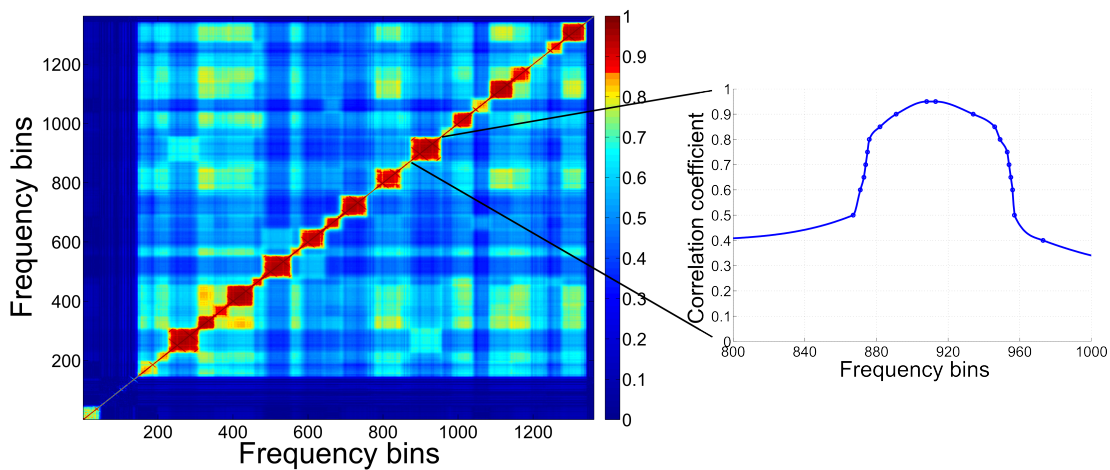
**Πίνακας 5.1:** Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα διαστημάτων εμπιστοσύνης με επίπεδο εμπιστοσύνης της τάξεως του 95%.

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

την παράθεση των πρωτογενών τιμών του, οπότε και στην προκειμένη περίπτωση θεωρείται προτιμητέα η αναπαράστασή του ως ένα πλέγμα εικονοστοιχείων (βλ. Εικόνα 5.2 (αριστερό μέρος)), με κάθε  $\{i, j\}$ -εικονοστοιχείο να αναπαριστά χρωματικά την τιμή του συντελεστή συσχέτισης ο οποίος χαρακτηρίζει τις τιμές ενέργειας του αντίστοιχου ζεύγους φασματικών στοιχείων.

Η προκύπτουσα Εικόνα 5.2 (αριστερό μέρος), λοιπόν, παρουσιάζει κατ' αρχήν ότι στο διαθέσιμο σύνολο δεδομένων μετρήσεων υφίστανται ομάδες φασματικών στοιχείων, καθεμίας εκ των οποίων οι τιμές ενέργειας των αντίστοιχων επιμέρους σχετικών ζευγών χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά υψηλούς συντελεστές συσχέτισης (βλ. συμπαγείς περιοχές κόκκινου χρώματος). Η συγκεκριμένη παρατήρηση, βέβαια, έγκειται στο γεγονός ότι κάθε τέτοια ομάδα επηρεάζεται αποκλειστικά από τις μεταδόσεις ενός αντίστοιχου Πρωτεύοντος Χρήστη, ή αλλιώς εμπίπτει στα φασματικά όρια ενός αντίστοιχου καναλιού συγκεκριμένης τεχνολογίας. Σύμφωνα, δε, με την Εικόνα 5.2 (δεξί μέρος), η οποία απεικονίζει με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τους συντελεστές συσχέτισης των τιμών ενέργειας μιας ενδεικτικής τέτοιας ομάδας, οι τιμές ενέργειας όσων φασματικών στοιχείων βρίσκονται πλησιέστερα προς το κέντρο του αντίστοιχου καναλιού συγκεκριμένης τεχνολογίας παρουσιάζουν πολύ υψηλό συντελεστή συσχέτισης ( $> 0.9$ ). Η συγκεκριμένη παρατήρηση θεωρείται προφανώς απόλυτα αναμενόμενη, δεδομένου ότι η ενέργεια των εν λόγω φασματικών στοιχείων επηρεάζεται αποκλειστικά από τις μεταδόσεις του ιδίου Πρωτεύοντος Χρήστη. Όσο, όμως, ο έλεγχος κινείται προς τα φασματικά στοιχεία τα οποία εμπίπτουν στην περιφέρεια του ανωτέρω καναλιού, οι αντίστοιχοι συντελεστές συσχέτισης μειώνονται αισθητά (0.8 – 0.9), συμπεριφορά η οποία οφείλεται στο φαινόμενο της παρεμβολής παρακείμενου καναλιού ή αλλιώς στη διαρροή ενέργειας επί των προα-

ναφερθέντων φασματικών στοιχείων από τις μεταδόσεις κάποιων γειτονικών καναλιών. Τέλος, ο βαθμός συσχέτισης των τιμών ενέργειας όσων φασματικών στοιχείων εμπίπτουν σε διαφορετικά κανάλια συγκεκριμένης τεχνολογίας παρουσιάζεται εξαιρετικά χαμηλός ( $< 0.5$ ), γεγονός επίσης δικαιολογημένο δεδομένου ότι αυτά επηρεάζονται από τις μεταδόσεις πλήρως ανεξάρτητων μεταξύ τους Πρωτευόντων Χρηστών. Ειδικότερα για το παρόν σενάριο, λοιπόν, επιλέγεται στα πλαίσια της εφαρμοζόμενης μεθοδολογίας η συσταδοποίηση των ανωτέρω εξεταζόμενων φασματικών στοιχείων σε ομάδες καθεμίας εκ των οποίων οι συντελεστές συσχέτισης των τιμών ενέργειας κάθε επιμέρους σχετικού ζεύγους υπερβαίνει την προκαθορισμένη τιμή-κατώφλιο  $r_{thr} = 0.75$  (βλ. Ενότητα 5.3).



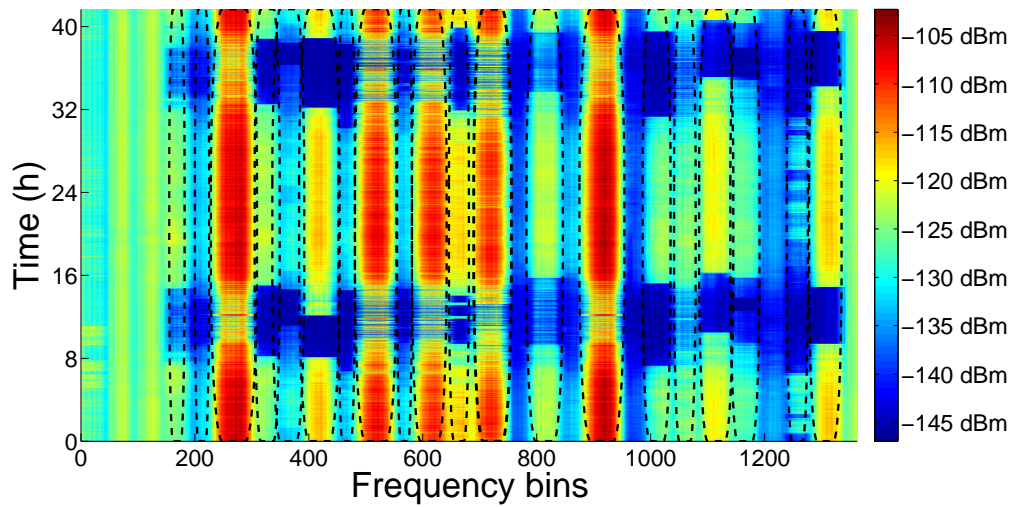
**Εικόνα 5.2:** Πίνακας συσχετίσεων τιμών ενέργειας εξεταζόμενων φασματικών στοιχείων.

Η Εικόνα 5.2 (αριστερό μέρος), ωστόσο, παρουσιάζει ξεκάθαρα και ότι οι τιμές ενέργειας μόνο όσων φασματικών στοιχείων δεν απέχουν μεταξύ τους μεγάλες αποστάσεις (στη διάσταση της συχνότητας) χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό συσχέτισης (βλ. συμπαγείς κόκκινες περιοχές επί της νοητής διαγωνίου του εικονιζόμενου πλέγματος). Το φαινόμενο αυτό, βέβαια, δικαιολογείται απόλυτα από το γεγονός ότι κάθε κανάλι συγκεκριμένης τεχνολογίας εκτείνεται σήμερα πάνω από μια αποκλειστικά συνεχή φασματική υποζώνη. Η τεχνολογία, άλλωστε, η οποία θα επέτρεπε τη συνένωση πολλαπλών ασυνεχών φασματικών υποζωνών σε ένα κανάλι δεν θεωρείται ακόμα ώριμη στην πράξη. Η συγκεκριμένη παρατήρηση, λοιπόν, δύναται να συμβάλει καθοριστικά προς τη δραστική μείωση τόσο του χρόνου, όσο και των υπολογιστικών πόρων οι οποίοι απαιτούνται για τη δημιουργία του προαναφερθέντος πίνακα συσχετίσεων. Είναι προφανές, άλλωστε, ότι ο



υπολογισμός των συντελεστών συσχέτισης όσων φασματικών στοιχείων απέχουν μεταξύ τους πάνω από μια συγκεκριμένη απόσταση (στη διάσταση της συχνότητας) θα μπορούσε να παραληφθεί ως βέβαιο ότι θα προκύψουν εξαιρετικά χαμηλοί (βλ. μπλε περιοχές εκατέρωθεν της νοητής διαγωνίου του εικονιζόμενου πλέγματος). Ως εκ τούτου, μια τέτοια κίνηση θα μείωνε σημαντικά τον αριθμό των εξεταζόμενων ζευγών φασματικών στοιχείων και, κατ' επέκταση, την υπολογιστική πολυπλοκότητα δημιουργίας του ανωτέρω πίνακα, η οποία είναι της τάξεως  $O(n^2)$ . Η προαναφερθείσα απόσταση, ωστόσο, οριοθετεί αναπόφευκτα το μέγιστο εύρος καναλιού συγκεκριμένης τεχνολογίας το οποίο δύναται να εντοπιστεί από την ανωτέρω μεθοδολογία, δεδομένου ότι σε μια τέτοια περίπτωση δεν πρόκειται να καταστεί δυνατός ο σχηματισμός μιας συνεκτικής ομάδας φασματικών στοιχείων η οποία να εκτείνεται στη διάσταση της συχνότητας σε εύρος μεγαλύτερο από την αντίστοιχη τιθέμενη σχετική απόσταση.

Συνδυάζοντας, λοιπόν, όλα τα παραπάνω, δημιουργείται τελικά η Εικόνα 5.3, η οποία παρέχει μια σφαιρική άποψη επί της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης στην παρούσα μελέτη μεθοδολογίας. Πιο συγκεκριμένα, η Εικόνα 5.3 απεικονίζει, κατ' αρχήν, τις τιμές ενέργειας οι οποίες συλλέχθηκαν για τα περίπου 1300 εξεταζόμενα φασματικά στοιχεία σε βάθος χρόνου επαίσθησης περίπου 42 ωρών (ή αλλιώς ύστερα από 5760 διαδοχικές σαρώσεις). Δεδομένου, ωστόσο, του τεράστιου πλήθους των αντίστοιχων πρωτογενών τιμών, η παράθεσή τους ως απόλυτους αριθμούς θα καθιστούσε αδύνατη την εξαγωγή ουσιωδών συμπερασμάτων επ' αυτών, οπότε και οι τιμές ενέργειας ανά φασματικό στοιχείο και ανά σάρωση απεικονίζεται στην προκειμένη περίπτωση ως ένα πλέγμα εικονοστοιχείων (ακολουθώντας την παρατιθέμενη αντιστοίχιση μεταξύ χρωμάτων και ύψους σχετικών τιμών). Οι σχεδιαζόμενες διακεκομμένες γραμμές, από την άλλη πλευρά, οριοθετούν τις εντοπιζόμενες από την ανωτέρω μεθοδολογία συστάδες φασματικών στοιχείων, καθεμίας εκ των οποίων ο συντελεστής συσχέτισης των τιμών ενέργειας κάθε επιμέρους σχετικού ζεύγους υπερβαίνει την τιμή-κατώφλιο  $r_{thr} = 0.75$ . Μέσω της Εικόνας 5.3, λοιπόν, καθίσταται προφανές ότι οι εντοπιζόμενες συνεκτικές φασματικές υποζώνες ευθυγραμμίζονται πλήρως με τα φασματικά όρια των αντίστοιχων καναλιών συγκεκριμένης τεχνολογίας τα οποία σχηματίζονται στο εσωτερικό της εξεταζόμενης ζώνης, επαληθεύοντας έτσι πλήρως τόσο την ορθότητα της προτεινόμενης μεθοδολογίας, όσο και την ακρίβεια της παρεχόμενης από αυτήν γνώσης.



**Εικόνα 5.3:** *Συστάδες φασματικών στοιχείων των οποίων οι τιμές ενέργειας παρουσιάζουν συντελεστή συσχέτισης μεγαλύτερο του  $r_{thr} = 0.75$  εντός του εξεταζόμενου εύρους συχνοτήτων 5 MHz.*

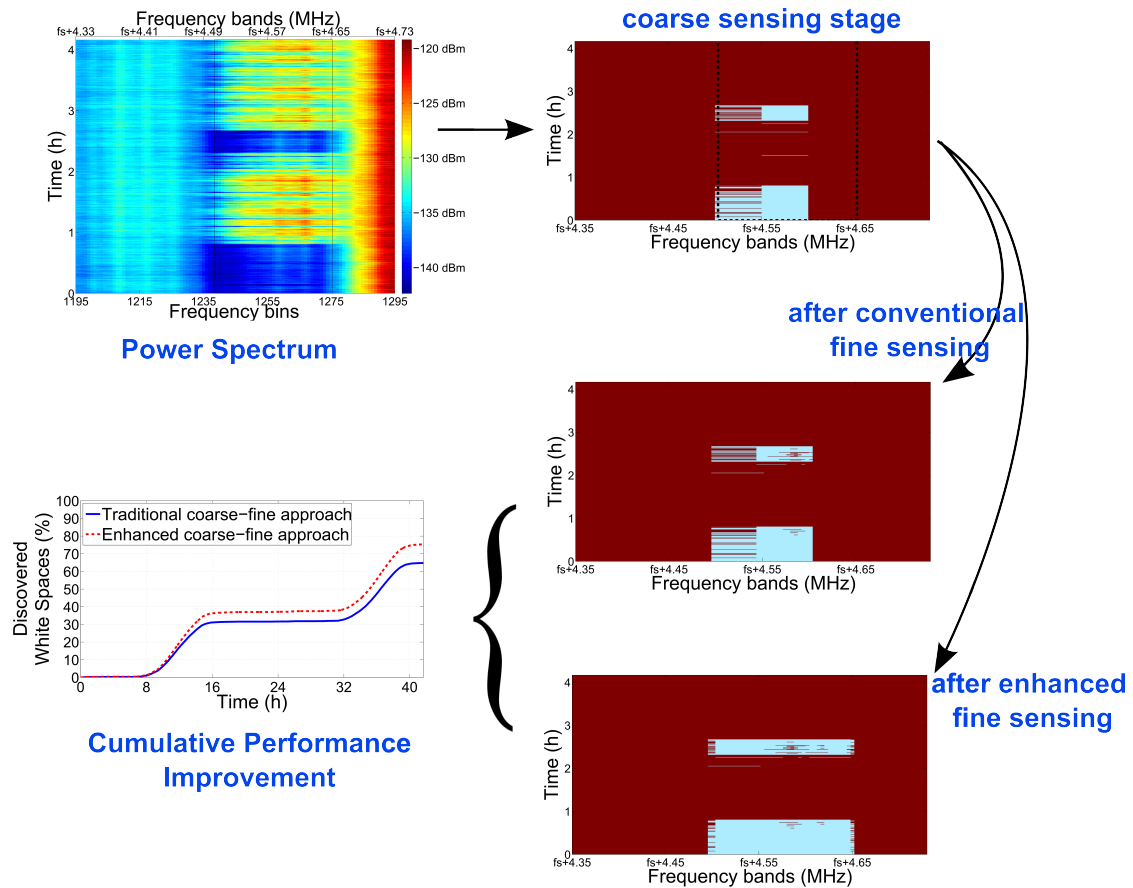
Αξίζει, τέλος, να σημειωθεί ότι στα πλαίσια της παρούσας μελέτης πραγματοποιήθηκε και μια προσπάθεια απόκτησης της ανωτέρω γνώσης συνδυάζοντας δεδομένα τα οποία προήλθαν αποκλειστικά από εξωτερικές πηγές πληροφόρησης. Στην προκειμένη περίπτωση, λοιπόν, απαιτήθηκε η σύντηξη πληροφοριών οι οποίες προήλθαν τόσο από τον Εθνικό Κανονισμό Κατανομής Ζωνών Συχνοτήτων [132] του Υπουργείου Υποδομών, Μεταφορών και Δικτύων της Ελληνικής Δημοκρατίας, όσο και από τις αποφάσεις της 'Ελληνικής Επιτροπής Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων' (ΕΕΤΤ) [131], καθώς επίσης και από τις επίσημες προδιαγραφές του εφαρμοζόμενου στην εξεταζόμενη ζώνη πρωτοκόλλου GSM. Η συγκεκριμένη διαδικασία, ωστόσο, απεδείχθη πολύπλοκη και εξαιρετικά δύσκολο να αυτοματοποιηθεί στην πράξη, ενώ η ακρίβεια των φασματικών ορίων των συμπεριλαμβανόμενων καναλιών συγκεκριμένης τεχνολογίας εμφανίστηκε εξαρτημένη και από αστάθμητους παράγοντες. Όπως, άλλωστε, αποτυπώνεται ξεκάθαρα στην Εικόνα 5.3, σε μια ζώνη όπου το πρωτόκολλο GSM ορίζει αυστηρά κανάλια εύρους 200 kHz, εμφανίζονται συχνά κανάλια αρκετά στενότερου εύρους. Η εν λόγω παρατήρηση, μάλιστα, ενδεχομένως να οφείλεται είτε στην εξασθένηση την οποία υφίστανται τα λαμβανόμενα ραδιοσήματα μέχρι να προσεγγίσουν την αρχιτεκτονική επαίσθησης, είτε στο υπαρκτό φαινόμενο της παρεμβολής παρακείμενου καναλιού. Τέτοιου είδους παράγοντες, ωστόσο, είναι αδύνατο να παραβλεφθούν στην πράξη, αποδεικνύοντας έτσι ότι η προτεινόμενη

μεθοδολογία αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο στα χέρια των Δευτερευόντων Χρηστών, δίδοντάς τους την ευκαιρία να δημιουργούν μόνοι τους ασφαλή γνώση επί του εξ ορισμού άγνωστου περιβάλλοντος ραδιοσυχνοτήτων τους.

### 5.5.3 Πειραματική επαλήθευση βελτίωσης της διαδικασίας εντοπισμού φασματικών οπών

Στόχο της παρούσας παραγράφου αποτελεί η πειραματική επαλήθευση της δυνατότητας εκμετάλλευσης της παρεχόμενης από την προτεινόμενη μεθοδολογία γνώσης προς βελτίωση της αποδοτικότητας του δημοφιλούς μοντέλου της αδρομερούς-λεπτομερούς επαίσθησης (βλ. Παράγραφο 5.4.1). Προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση αναπτύσσεται ένα πρακτικό σενάριο το οποίο ουσιαστικά αποτελεί επέκταση του αμέσως προηγούμενου, εστιάζοντας αρχικά σε μια υποζώνη εύρους 400 kHz της ανωτέρω εξεταζόμενης ζώνης συχνοτήτων ενδιαφέροντος. Αναλυτικότερα, η Εικόνα 5.4 (Power Spectrum) παρουσιάζει τις τιμές ενέργειας τις οποίες συλλέγει ένας Δευτερεύων Χρήστης κατά την επαίσθηση της εν λόγω υποζώνης σε βάθος χρόνου περίπου τεσσάρων (4) ωρών, εφαρμόζοντας προφανώς την τεχνική επαίσθησης φάσματος βασισμένη στον εντοπισμό ενέργειας. Παράλληλα, οι δυο σχεδιαζόμενες κάθετες διακεκομμένες γραμμές οριοθετούν μια συνεκτική υποζώνη εύρους περίπου 160 kHz, η οποία εντοπίστηκε από την προτεινόμενη μεθοδολογία κατά την ανωτέρω εκτέλεσή της. Σημειώνεται, βέβαια, ότι το εύρος της συγκεκριμένης υποζώνης θα έπρεπε κανονικά να ισούται με 200 kHz, όσο δηλαδή και το εύρος του υποκείμενου καναλιού συγκεκριμένης τεχνολογίας το οποίο ορίζει το εφαρμοζόμενο πρωτόκολλο GSM. Η εν λόγω απόκλιση, ωστόσο, οφείλεται στο φαινόμενο της παρεμβολής παρακείμενου καναλιού, δηλαδή στο γεγονός ότι η ενέργεια των φασματικών στοιχείων τα οποία εμπίπτουν στην περιφέρεια του προαναφερθέντος καναλιού επηρεάζεται έντονα από τις μεταδόσεις κάποιων γειτονικών καναλιών. Ως εκ τούτου, ο βαθμός συσχέτισης των τιμών ενέργειας των τελευταίων προκύπτει μειωμένος, οδηγώντας τελικά στη μη-ένταξή τους στην αντίστοιχη συνεκτική συστάδα.

Παράλληλα, ο ανωτέρω Δευτερεύων Χρήστης θεωρείται ότι εφαρμόζει επί της προαναφερθείσας φασματικής ζώνης εύρους 400 kHz τόσο το συμβατικό, όσο και το βελτιωμένο μοντέλο αδρομερούς-λεπτομερούς επαίσθησης, εκτελώντας προφανώς τους Αλγόριθμους 4 και 5, αντίστοιχα (βλ. Παράγραφο 5.4.1). Αναλυτικότερα, και κατά το κοινό



**Εικόνα 5.4:** Σύγκριση αποδοτικότητας εναλλακτικών μοντέλων αδρομερούς-λεπτομερούς επαίσθησης.

βήμα της αδρομερούς επαίσθησης, η εξεταζόμενη φασματική ζώνη τεμαχίζεται σε φασματικά στοιχεία εύρους 50 kHz, ενώ η προκύπτουσα άποψη επί της κατάστασης κατάληψης της παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.4 (coarse sensing stage) (κατ' αντιστοιχία με τις σαρώσεις της Εικόνας 5.4 (Power Spectrum), αναπαριστώντας με κόκκινο χρώμα τα κατειλημμένα και με μπλε τα μη-κατειλημμένα φασματικά στοιχεία). Εν συνεχεία, και βάσει των προκυπτόντων αποτελεσμάτων, εφαρμόζεται το βήμα της λεπτομερούς επαίσθησης το οποίο προδιαγράφει καθεμία εκ των ανωτέρω τεχνικών, τεμαχίζοντας αυτήν τη φορά κάθε εξεταζόμενη ζώνη σε φασματικά στοιχεία εύρους 4 kHz. Ακριβέστερα, στην περίπτωση του συμβατικού μοντέλου (βλ. Αλγόριθμο 4) το βήμα της λεπτομερούς επαίσθησης εφαρμόζεται μόνο επί όσων φασματικών στοιχείων χαρακτηρίστηκαν κατά το αμέσως προηγούμενο βήμα ως μη-κατειλημμένα, ενώ η Εικόνα 5.4 (after conventional fine sensing) παρουσιάζει την τελική προκύπτουσα άποψη επί της κατάστασης κατάληψης της εξεταζόμενης ζώνης σε αντιστοιχία με την αδρομερή άποψη της Εικόνας 5.4 (coarse sensing

stage). Σύμφωνα, αντίθετα, με το βελτιωμένο σχετικό μοντέλο (βλ. Αλγόριθμο 5), το βήμα της λεπτομερούς επαίσθησης εφαρμόζεται επί του συνόλου της συνεκτικής υποζώνης στην οποία ενδεχομένως εμπίπτει κάθε φασματικό στοιχείο το οποίο χαρακτηρίστηκε ως μη-κατειλημμένο κατά το βήμα της αδρομερούς επαίσθησης, ενώ η Εικόνα 5.4 (after enhanced fine sensing) παρουσιάζει την αντίστοιχη προκύπτουσα άποψη επί της κατάστασης κατάληψης της εξεταζόμενης ζώνης. Συγκρίνοντας, λοιπόν, τις ανωτέρω εικόνες, καθίσταται προφανής η δυνατότητα του βελτιωμένου μοντέλου αδρομερούς-λεπτομερούς επαίσθησης να εντοπίζει όχι μόνο περισσότερες, αλλά και μεγαλύτερες σε εύρος ζώνης φασματικές οπές, συγκριτικά πάντοτε με αυτές του αντίστοιχου συμβατικού μοντέλου.

Η Εικόνα 5.4 (Cumulative Performance Improvement), τέλος, παρέχει μια πιο ολοκληρωμένη άποψη επί της αποδοτικότητας καθενός εκ των ανωτέρω εναλλακτικών μοντέλων, παρουσιάζοντας αυτήν τη φορά το αθροιστικό ποσοστό φασματικών οπών το οποίο δύναται να εντοπίσει καθένα εξ αυτών κατά την εφαρμογή του στο εύρος συχνοτήτων 5 MHz της Εικόνας 5.3 (όταν το 100% των υφιστάμενων φασματικών οπών εντοπίζεται εφαρμόζοντας το βήμα της λεπτομερούς επαίσθησης επί του συνόλου της εν λόγω εξεταζόμενης ζώνης). Και στην παρούσα περίπτωση, λοιπόν, καθίσταται προφανής η ανωτερότητα του βελτιωμένου μοντέλου αδρομερούς-λεπτομερούς επαίσθησης, αναφορικά κυρίως με την ποσότητα των εντοπιζόμενων από πλευράς του φασματικών οπών.

#### **5.5.4 Πειραματική επαλήθευση βελτίωσης της διαδικασίας επιλογής φασματικών οπών**

Όπως τεκμηριώθηκε αναλυτικά στην Παράγραφο 5.4.2, οι Δευτερεύοντες Χρήστες δύνανται επίσης να εκμεταλλεύονται την παρεχόμενη από την προτεινόμενη μεθοδολογία γνώση ώστε να επιλέγουν προς κατάληψη φασματικές οπές οι οποίες θεωρούνται λιγότερο ευαίσθητες στη χρονικά μεταβαλλόμενη δραστηριότητα των αντίστοιχων Πρωτεύοντων Χρηστών. Ακριβέστερα, θεωρείται ότι προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση αρκεί η δέσμευση φασματικών οπών οι οποίες ανήκουν εξ ολοκλήρου εντός φασματικών υποζώνων που το εσωτερικό τους παρουσιάζει συνεπή συμπεριφορά.

Στοχεύοντας, λοιπόν, στην επαλήθευση του ανωτέρω ισχυρισμού στην πράξη, αναπτύσσεται στα πλαίσια της παρούσας παραγράφου ένα σχετικό σενάριο επί της αντιπροσωπευτικής φασματικής ζώνης εύρους 400 kHz της Εικόνας 5.4 (Power Spectrum). Πιο

**Πίνακας 5.2:** Πιθανότητα για συγκεκριμένες υποζώνες της εξεταζόμενης φασματικής ζώνης εύρους 400 kHz να βρίσκονται κάθε στιγμή μη-κατειλημμένες.

Bandwidth	Central Frequency				
	$f_c - 80kHz$	$f_c - 40kHz$	$f_c$	$f_c + 40kHz$	$f_c + 80kHz$
$BW - 40kHz$	0.3142	0.5046	0.5578	0.3282	0.2590
$BW$	0.3062	0.3890	0.5394	0.2606	0.2588
$BW + 40kHz$	0.2934	0.3140	0.3282	0.2588	0.2586

συγκεκριμένα, ένας Δευτερεύων Χρήστης θεωρείται ότι έχει ήδη εντοπίσει στο εσωτερικό της εν λόγω ζώνης – εφαρμόζοντας την προτεινόμενη μεθοδολογία – τη συνεκτική υποζώνη εύρους  $BW$  και φέρουσας συχνότητας  $f_c$ , η οποία οριοθετείται στην ανωτέρω εικόνα από τις δυο σχεδιαζόμενες κάθετες διακεκομμένες γραμμές. Έστω, επίσης, ότι κάποια στιγμή ο ίδιος χρήστης απαιτείται να καταλάβει μια φασματική οπή με σκοπό την κάλυψη των απαιτήσεών του σε ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Εκμεταλλευόμενος, λοιπόν, την ανωτέρω γνώση, ο προαναφερθείς χρήστης δύναται να επιλέξει προς κατάληψη μια οπή η οποία εμπίπτει εξ ολοκλήρου εντός της προαναφερθείσας συνεκτικής υποζώνης, αφού βέβαια πρώτα σιγουρευτεί ότι δεν πραγματοποιείται κάποια μετάδοση πάνω από αυτήν. Σύμφωνα, δε, με τον Πίνακα 5.2 – ο οποίος προέκυψε ύστερα από την στατιστική επεξεργασία των δεδομένων μετρήσεων ενέργειας τα οποία συλλέχθηκαν στα πλαίσια του σεναρίου που αναπτύχθηκε στην Παράγραφο 5.5.2 και παρουσιάζει την πιθανότητα για συγκεκριμένες υποζώνες της ανωτέρω φασματικής ζώνης να βρίσκονται κάθε στιγμή μη-κατειλημμένες – μια τέτοια οπή χαρακτηρίζεται στην προκειμένη περίπτωση από αρκετά αυξημένη σχετική πιθανότητα (βλ. κελί  $f_c$ ,  $BW$ ). Στην περίπτωση, αντίθετα, όπου ο ανωτέρω χρήστης δεν διαθέτει προς εκμετάλλευση την προαναφερθείσα γνώση, ενδέχεται να επιλέξει προς κατάληψη μια φασματική οπή η οποία δεν ευθυγραμμίζεται πλήρως με την ανωτέρω συνεκτική υποζώνη. Μια τέτοια οπή, ωστόσο, αναμένεται να χαρακτηρίζεται από σημαντικά μειωμένη αντίστοιχη πιθανότητα (βλ. π.χ. κελί  $f_c + 80kHz$ ,  $BW$ ), δεδομένου ότι η διαθεσιμότητά της θα εξαρτάται συνδυαστικά από τη δραστηριότητα περισσότερων του ενός Πρωτεύοντων Χρηστών. Εκμεταλλευόμενος, λοιπόν, την προσφερόμενη από την προτεινόμενη μεθοδολογία γνώση ο ανωτέρω Δευτερεύων Χρήστης καθίσταται ικανός να καταλαμβάνει φασματικές οπές οι οποίες χαρακτηρίζονται από μεγα-

λύτερη αναμενόμενη διάρκεια διαθεσιμότητας και, κατ' επέκταση, θεωρούνται λιγότερο ευαίσθητες στη χρονικά μεταβαλλόμενη δραστηριότητα των αντίστοιχων Πρωτεύοντων Χρηστών.

## 5.6 Σύνοψη και συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε μια καινοτόμος μεθοδολογία η οποία καθιστά τους Δευτερεύοντες Χρήστες ικανούς να αυξάνουν με ίδια μέσα την ενημερότητά τους επί του εξ ορισμού άγνωστου περιβάλλοντος ραδιοσυχνοτήτων με το οποίο αλληλεπιδρούν. Ανάμεσα, μάλιστα, στα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της εν λόγω μεθοδολογίας θεωρούνται η ευελιξία της και ο σεβασμός της προς τις αρχές λειτουργίας της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Δεν απαιτεί, άλλωστε, την αλληλεπίδραση με εξωτερικές πηγές γνώσης ή την εκμετάλλευση εξειδικευμένων δεδομένων μετρήσεων, αλλά αντίθετα στηρίζεται αποκλειστικά στην επεξεργασία των δεδομένων μετρήσεων ενέργειας τα οποία συλλέγονται από πλευράς των Δευτερεύοντων Χρηστών κατά τη συμβατική διαδικασία επαίσθησης του ραδιοφάσματος, εφαρμόζοντας προφανώς την τεχνική επαίσθησης φάσματος βασισμένη στον εντοπισμό ενέργειας.

Ακρογωνιαίο λίθο της προδιαγραφόμενης μεθοδολογίας αποτελεί η πρακτικά επαληθευμένη παρατήρηση περί της ύπαρξης εξαιρετικά υψηλού βαθμού συσχέτισης στις τιμές ενέργειας όσων φασματικών στοιχείων καταλαμβάνονται από τον ίδιο Πρωτεύοντα Χρήστη (ή αλλιώς εμπίπτουν στα φασματικά όρια του ίδιου καναλιού συγκεκριμένης τεχνολογίας). Ως εκ τούτου, ένας Δευτερεύων Χρήστης δύναται απλά υπολογίζοντας τον βαθμό συσχέτισης ο οποίος χαρακτηρίζει τις τιμές ενέργειας των εξεταζόμενων από πλευράς του φασματικών στοιχείων και, εν συνεχεία, ομαδοποιώντας τα εν λόγω στοιχεία σε συστάδες ανάλογα με το ύψος του προαναφερθέντος βαθμού, να εξάγει ασφαλή γνώση επί των φασματικών ορίων των καναλιών συγκεκριμένης τεχνολογίας τα οποία σχηματίζονται στο περιβάλλον λειτουργίας του. Η συγκεκριμένη γνώση, μάλιστα, θεωρείται εξαιρετικά δύσκολο να αποκτηθεί με κάποιον εναλλακτικό τρόπο, δεδομένων των αστάθμητων παραγόντων από τους οποίους αυτή είναι άμεσα εξαρτημένη.

Θεωρείται, επίσης, αξιοσημείωτο ότι η παρεχόμενη από την ανωτέρω μεθοδολογία γνώση δύναται να δράσει υποστηρικτικά επί του συνόλου των διαδικασιών τις οποίες προδιαγράφει η τεχνολογία της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Ενδεικτικά, η εν λόγω γνώση

δύναται να συμβάλει καθοριστικά τόσο στην αύξηση της ποσότητας, ταχύτητας και ακρίβειας εντοπισμού φασματικών οπών, όσο και στην απομόνωση όσων εξ αυτών θεωρούνται καταλληλότερες προς ευκαιριακή εκμετάλλευση από τους Δευτερεύοντες Χρήστες. Παράλληλα, δύναται να βοηθήσει τόσο τις υπάρχουσες, όσο και τις μελλοντικές προσεγγίσεις να βελτιώσουν την αποδοτικότητά τους, καθώς και να αποκαταστήσει την πρακτικότητα ορισμένων εξ αυτών.

Στα πλαίσια του παρόντος κεφαλαίου, τέλος, εκτελέστηκε και μια σειρά πειραμάτων επί του πραγματικού περιβάλλοντος ραδιοσυχνοτήτων της μητροπολιτικής περιοχής των Αθηνών με σκοπό την επίδειξη της λειτουργίας της προτεινόμενης μεθοδολογίας στην πράξη. Παράλληλα, επαληθεύθηκε η ορθότητα των θεωρήσεων πάνω στις οποίες αυτή βρίσκεται στηριγμένη, ενώ επικυρώθηκε και η εγκυρότητα της γνώσης την οποία αυτή δύναται να παρέχει. Τέλος, επαληθεύθηκαν και μερικά από τα πλεονεκτήματα τα οποία δύναται να προσφέρει η εκμετάλλευση της εν λόγω γνώσης στα πλαίσια διαφόρων διαδικασιών τις οποίες ορίζει η τεχνολογία της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας.



## Κεφάλαιο 6

# Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις

Στο παρόν κεφάλαιο συνοψίζονται οι άξονες έρευνας, τα κυριότερα συμπεράσματα, καθώς και οι μελλοντικές κατευθύνσεις της παρούσας διατριβής.

Κατ' αρχήν, λοιπόν, σημειώνεται ότι στο Κεφάλαιο 2 μοντελοποιήθηκε αρχικά το πρόβλημα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού, λαμβάνοντας υπόψιν τις αρχές λειτουργίας των Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, τις πρόσφατες επιταγές των αρμοδίων ρυθμιστικών αρχών, αλλά κυρίως τις προδιαγραφές των σύγχρονων συσκευών Λογισμικόριστης Ραδιοεπικοινωνίας. Εν συνεχεία, μοντελοποιήθηκε – επίσης ως πρόβλημα βελτιστοποίησης Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού – ένας συμπληρωματικός μηχανισμός Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων, ο οποίος συμμορφώνεται τόσο με τις προδιαγραφές των σύγχρονων συσκευών Λογισμικόριστης Ραδιοεπικοινωνίας, όσο και με τις λεπτομέρειες των κανονιστικών πλαισίων τα οποία διέπουν ήδη την ευκαιριακή εκμετάλλευση συγκεκριμένων ζωνών του ραδιοφάσματος. Στόχο του εν λόγω μηχανισμού αποτελεί ουσιαστικά η ελαχιστοποίηση της επιβάρυνσης η οποία προκαλείται στα Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας κατά την αναδιάρθρωση των αναθέσεων πόρων τους οι οποίες υπολογίζονται βάσει του ανωτέρω μοντέλου μερισμού φάσματος. Τη συγκεκριμένη ανάγκη υπαγορεύει κυρίως το γεγονός ότι η χρονικά μεταβαλλόμενη δραστηριότητα των Πρωτευόντων Χρηστών επηρεάζει έντονα τη διαθεσιμότητα καναλιών των αντίστοιχων Δευτερευόντων Χρηστών καθιστώντας τις

αναθέσεις πόρων των τελευταίων συχνά παρωχημένες, τη στιγμή που η αναδιάρθρωση των εν λόγω αναθέσεων αποτελεί στα πλαίσια των ανωτέρω δικτύων μια ιδιαίτερα απαιτητική διαδικασία.

Στο ίδιο κεφάλαιο, επίσης, επαληθεύθηκε – κατόπιν εκτέλεσης εκτενών προσομοιώσεων – η δυνατότητα του προδιαγραφόμενου μηχανισμού να εντοπίζει αναθέσεις πόρων των οποίων η εφαρμογή στα κατά περίπτωση αναδιαρθρούμενα δίκτυα προκαλεί σημαντικά μικρότερη επιβάρυνση συγκριτικά με τη συμβατική τεχνική αναδιάρθρωσης. Η μειωμένη αυτή επιβάρυνση, μάλιστα, μεταφράζεται άμεσα σε λιγότερες χαμένες ευκαιρίες μετάδοσης και, κατ' επέκταση, σε αύξηση του βαθμού χρησιμοποίησης του ραδιοφάσματος, ενώ παράλληλα συμβάλλει και στην προστασία της Ποιότητας Υπηρεσίας και Εμπειρίας των αντίστοιχων Δευτερευόντων Χρηστών. Ταυτόχρονα, επαληθεύθηκε η δυνατότητα του ανωτέρω μηχανισμού να μειώνει περαιτέρω την εν λόγω επιβάρυνση, με αντάλλαγμα ωστόσο από τη λειτουργία των αναδιαρθρούμενων δικτύων να μην επανέρχεται στο βέλτιστο δυνατό σημείο της. Ο ίδιος μηχανισμός απεδείχθη, επίσης, ικανός να μειώνει αισθητά και τον αριθμό των διεπαφών δικτύου οι οποίες απαιτείται να προβαίνουν σε μεταγωγή καναλιού κατά την αναδιάρθρωση των παρωχημένων αναθέσεων πόρων, μειώνοντας αντίστοιχα τόσο την ενέργεια η οποία σπαταλιέται από πλευράς των εμπλεκόμενων σε αυτές ασύρματων συσκευών, όσο και τον όγκο των πακέτων διαχείρισης τα οποία απαιτείται να μεταδίδονται προς ολοκλήρωση των τροποποιήσεων των παραμέτρων λειτουργίας τους. Ο ανωτέρω μηχανισμός απεδείχθη, τέλος, ικανός να διατηρεί και περισσότερες ζεύξεις ανέπαφες κατά την αναδιάρθρωση παρωχημένων αναθέσεων πόρων, μειώνοντας αντίστοιχα τόσο τον όγκο των πακέτων διαχείρισης τα οποία απαιτείται να μεταδίδονται προς ανανέωση των υφιστάμενων πλάνων δρομολόγησης, όσο και την έκταση του ανακύπτοντος φαινομένου των απωλειών πακέτων.

Τα προβλήματα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο και της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων μοντελοποιήθηκαν, βέβαια, στο Κεφάλαιο 2 ως προβλήματα βελτιστοποίησης Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού. Τα εν λόγω προβλήματα, ωστόσο, είναι γνωστό ότι ανήκουν στη τάξη των δυσεπίλυτων προβλημάτων NP-hard [15], γεγονός το οποίο θέτει σε σημαντικό κίνδυνο τη δυνατότητα εφαρμογής τους σε πραγματικά Δίκτυα Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Με σκοπό, λοιπόν, την αποκατάσταση της πρακτικότητας των ανωτέρω μηχανισμών

παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3 κατάλληλες ευρετικές μέθοδοι, οι οποίες δύνανται να παρέχουν γρήγορα ποιοτικές πλησιοβέλτιστες λύσεις στα αντίστοιχα προβλήματα βελτιστοποίησης ακόμα και όταν αυτά αναπτύσσονται επί Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας μεγάλου μεγέθους. Ακριβέστερα, το πρόβλημα της Συνδυασμένης Εκχώρησης Καναλιών και Δρομολόγησης με δίκαιο τρόπο προσεγγίστηκε πλησιοβέλτιστα με τη βοήθεια τριών ευρετικών γενικού σκοπού, ενώ για το μακράν πιο απαιτητικό πρόβλημα της Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων θεωρήθηκε επιβεβλημένη η πρόταση μιας εξειδικευμένης στο συγκεκριμένο πρόβλημα ευρετικής μεθόδου. Προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση, λοιπόν, προδιαγράφηκε η μέθοδος 'Reduced Search Space Reconfiguration' (RSSR), η οποία εκμεταλλεύεται την ιδιαίτερη δομή του ανωτέρω προβλήματος, προχωρώντας ουσιαστικά στην αποδόμησή του σε μια ακολουθία υπο-προβλημάτων σημαντικά μειωμένων διαστάσεων.

Στο ίδιο κεφάλαιο, επίσης, επαληθεύθηκε – κατόπιν εκτέλεσης εκτενών προσομοιώσεων – η δυνατότητα της προτεινόμενης ευρετικής μεθόδου RSSR να εντοπίζει ποιοτικές πλησιοβέλτιστες λύσεις σε προβλήματα Βέλτιστης Αναδιάρθρωσης Ανάθεσης Πόρων εντός άκρως αποδεκτών χρονικών διαστημάτων εκτέλεσης. Παράλληλα, επεδείχθη η κλιμακωσιμότητα της λειτουργίας της εν λόγω μεθόδου, δηλαδή η δυνατότητά της να προσφέρει γρήγορα πλησιοβέλτιστες λύσεις ακόμα και σε προβλήματα τα οποία αναπτύσσονται επί ρεαλιστικών Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας μεγάλου μεγέθους. Τέλος, απεδείχθη και η ικανότητα της ανωτέρω μεθόδου να εντοπίζει πλησιοβέλτιστες λύσεις ακόμα και κατά τα ενδιάμεσα βήματα της εκτέλεσής της, αντιμετωπίζοντας έτσι αποτελεσματικά το πρόβλημα της παγίδευσης αυτής σε χώρους ανέφικτων λύσεων.

Παρά την αξιολόγηση των δυνατοτήτων τόσο του προτεινόμενου μηχανισμού βέλτιστης αναδιάρθρωσης αναθέσεων πόρων, όσο και της προδιαγραφόμενης ευρετικής μεθόδου RSSR μέσω ρεαλιστικών προσομοιώσεων, θεωρείται άκρως επιβεβλημένη και η μελλοντική τους εφαρμογή σε μια πραγματική πλατφόρμα δοκιμών (testbed). Μια τέτοια πλατφόρμα θα πρέπει, μάλιστα, να αποτελείται από προηγμένες ασύρματες συσκευές Λογισμικόριστης Ραδιοεπικοινωνίας, όπως είναι για παράδειγμα οι οικονομικά προσιτές και ευρέως διαθέσιμες στην αγορά συσκευές USRP [41], καθώς και να συμμορφώνεται πλήρως με τις προδιαγραφές των προσφάτως προτυποποιημένων κανονιστικών πλαισίων τα οποία άπτονται θεμάτων σχετικών με την τεχνολογία της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας.

Η εν λόγω προσπάθεια αναμένεται να καταστήσει εφικτή την περαιτέρω διερεύνηση της πρακτικότητας του ανωτέρω μηχανισμού και, κατ' επέκταση, την αξιολόγηση της δυνατότητας ενσωμάτωσής του τόσο στις πρώτες υλοποιήσεις Δικτύων Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, όσο και στα αντίστοιχα προδιαγραφόμενα πρωτόκολλα.

Στο Κεφάλαιο 4, από την άλλη πλευρά, παρουσιάστηκε αναλυτικά η διαδικασία εκτέλεσης μιας Επισκόπησης Κατάληψης Φάσματος στη μητροπολιτική περιοχή των Αθηνών. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης προσπάθειας καταγράφηκαν και, εν συνεχεία, παρουσιάστηκαν λεπτομερώς πληροφορίες οι οποίες σχετίζονται με τη δραστηριότητα των πραγματικών Πρωτευόντων Χρηστών στο περιβάλλον ραδιοσυχνοτήτων της ανωτέρω γεωγραφικής περιοχής. Η εν λόγω μελέτη, λοιπόν, συνέβαλε κατ' αρχήν στην απόκτηση μιας ρεαλιστικότερης και πληρέστερης άποψης επί του τρόπου πρόσβασης των πραγματικών Πρωτευόντων Χρηστών στο ραδιοφάσμα. Παράλληλα, απέδειξε ότι το ραδιοφάσμα υποχρησιμοποιείται έντονα ακόμα και στην εξαιρετικά πυκνοκατοικημένη μητροπολιτική περιοχή των Αθηνών, ενώ επαλήθευσε και την ύπαρξη ανεκμετάλλευτων ευκαιριών μετάδοσης σχεδόν στο σύνολο της εξεταζόμενης ζώνης συχνοτήτων 300-2700MHz. Ταυτόχρονα, ανέδειξε και όσες φασματικές ζώνες πληρούν ήδη τις προδιαγραφές της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας, οι οποίες στα πλαίσια της εξεταζόμενης γεωγραφικής περιοχής ανατίθενται σε τηλεοπτικές, DECT, ISM και μεταδόσεις κινητής τηλεφωνίας. Εν τέλει, η ανωτέρω μελέτη επαλήθευσε πλήρως την εφικτότητα της άμεσης μεταφοράς της τεχνολογίας της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας και, κατ' επέκταση, της πραγματοποιούμενης στην παρούσα μελέτη έρευνας στο πραγματικό περιβάλλον ραδιοσυχνοτήτων της μητροπολιτικής περιοχής των Αθηνών.

Παρά την υψηλή ακρίβεια της εν λόγω Επισκόπησης Κατάληψης Φάσματος, βέβαια, απαιτείται μελλοντικά η εκτέλεση παρόμοιων μελετών σε ακόμα περισσότερες γεωγραφικές περιοχές, παρατείνοντας μάλιστα σημαντικά τη διάρκεια παρακολούθησης των αντίστοιχων ζωνών συχνοτήτων ενδιαφέροντος. Η συγκεκριμένη προσπάθεια πρόκειται να αυξήσει σημαντικά τον βαθμό εμπιστοσύνης των εξαγόμενων συμπερασμάτων και, κατ' επέκταση, να συμβάλει στη λήψη μιας πιο αντιπροσωπευτικής εικόνας επί της τρέχουσας κατάστασης κατάληψης του ραδιοφάσματος. Χαρακτηριστικά, η εξέταση πληθυσμιακά μικρότερων ή και νησιωτικών περιοχών, αναμένεται να καταστήσει δυνατή την παρατήρηση της επίδρασης διαφόρων γεωμορφολογικών παραγόντων στο πραγματικό περιβάλ-

λον ραδιοσυχνοτήτων των εξεταζόμενων περιοχών. Από την άλλη πλευρά, η παράταση της διάρκειας παρατήρησης του ραδιοφάσματος κατά λίγους μήνες αναμένεται να καταστήσει δυνατό τον εντοπισμό επιπλέον εξωγενών παραγόντων οι οποίοι ασκούν σημαντική επίδραση επ' αυτού, όπως είναι για παράδειγμα η εποχή, οι καιρικές συνθήκες, η δραστηριότητα του ανθρώπου και λοιποί αστάθμητοι παράγοντες.

Στο Κεφάλαιο 5, τέλος, προδιαγράφηκε μια μεθοδολογία η οποία καθιστά ικανούς τους Δευτερεύοντες Χρήστες να αυξάνουν με ίδια μέσα την ενημερότητά τους επί του εξορισμού άγνωστου περιβάλλοντος ραδιοσυχνοτήτων λειτουργίας τους. Ακρογωνιαίο λίθο της εν λόγω μεθοδολογίας αποτελεί η πρακτικά επαληθευμένη – βάσει των δεδομένων μετρήσεων τα οποία συλλέχθηκαν κατά την εκτέλεση της προαναφερθείσας Επισκόπησης Κατάληψης Φάσματος – παρατήρηση σχετικά με την ύπαρξη εξαιρετικά υψηλού βαθμού συσχέτισης στις τιμές ενέργειας όσων φασματικών στοιχείων καταλαμβάνονται από τον ίδιο Πρωτεύοντα Χρήστη. Εκμεταλλεύόμενοι, λοιπόν, την εν λόγω ιδιότητα οι Δευτερεύοντες Χρήστες δύνανται ύστερα από κατάλληλη στατιστική επεξεργασία των δεδομένων μετρήσεων ενέργειας τα οποία συλλέγουν κατά τη συμβατική διαδικασία επαίσθησης του ραδιοφάσματος (χωρίς δηλαδή να απαιτείται η συλλογή πρόσθετων δεδομένων μετρήσεων ή η επικοινωνία με εξωτερικές πηγές γνώσης) να εξάγουν σημαντική γνώση επί των φασματικών ορίων των καναλιών συγκεκριμένης τεχνολογίας τα οποία σχηματίζονται στο περιβάλλον λειτουργίας τους. Η εν λόγω γνώση, μάλιστα, θεωρείται εξαιρετικά δύσκολο να αποκτηθεί με άλλο τρόπο, ενώ δύναται να δράσει υποστηρικτικά επί του συνόλου των διαδικασιών τις οποίες προδιαγράφει η τεχνολογία της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Ενδεικτικά, δύναται να συμβάλει τόσο στην αύξηση της ποσότητας, ταχύτητας και ακρίβειας εντοπισμού φασματικών οπών, όσο και στην απομόνωση όσων εξ αυτών θεωρούνται καταλληλότερες προς ευκαιριακή εκμετάλλευση από τους Δευτερεύοντες Χρήστες. Παράλληλα, αναμένεται να βοηθήσει τόσο τις υπάρχουσες, όσο και τις μελλοντικές προσεγγίσεις να βελτιώσουν την αποδοτικότητά τους, καθώς και να αποκαταστήσει την πρακτικότητα ορισμένων εξ αυτών.

Στο ίδιο κεφάλαιο, επίσης, απεδείχθη – κατόπιν εκτέλεσης μιας σειράς πειραμάτων επί του πραγματικού περιβάλλοντος ραδιοσυχνοτήτων της μητροπολιτικής περιοχής των Αθηνών – τόσο η ορθότητα των θεωρήσεων πάνω στις οποίες στηρίζεται η προτεινόμενη μεθοδολογία, όσο και η εγκυρότητα της γνώσης την οποία αυτή δύναται να παρέχει.

Παράλληλα, επαληθεύθηκαν και κάποια από τα πλεονεκτήματα τα οποία δύναται να προσφέρει η εκμετάλλευση της εν λόγω γνώσης στα πλαίσια διαφόρων διαδικασιών τις οποίες ορίζει η τεχνολογία της Γνωσιακής Ραδιοεπικοινωνίας. Στο μέλλον, ωστόσο, απαιτείται η εφαρμογή της προδιαγραφόμενης μεθοδολογίας σε ακόμα περισσότερες πλατφόρμες δοκιμών, οι οποίες μάλιστα κρίνεται σκόπιμο να αποτελούνται και από αρκετά φθηνότερο εξοπλισμό συγκριτικά με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη (π.χ. συσκευές USRP [41]). Η εν λόγω προσπάθεια πρόκειται να συμβάλει καθοριστικά στην αξιολόγηση της πληρότητας της παρεχόμενης από την ανωτέρω μεθοδολογία γνώσης, ακόμα και σε περιπτώσεις όπου αυτή υλοποιείται σε εξοπλισμό ο οποίος χαρακτηρίζεται αναπόφευκτα από μειωμένη ακρίβεια επαίσθησης.

□

# Βιβλιογραφία

- [1] "Notice of proposed rule making and order", *FCC, ET Docket No. 03-222*, Dec. 2003.
- [2] "Shared Spectrum Company, Spectrum occupancy measurements." [Online]. Available: <http://www.sharedspectrum.com>.
- [3] M. Islam, C. Koh, S. Oh, X. Qing, Y. Lai, C. Wang, Y.-C. Liang, B. Toh, F. Chin, G. Tan, and W. Toh, "Spectrum Survey in Singapore: Occupancy Measurements and Analyses", *Proc. of 3rd Int'l Conf. on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks (CrownCom)*, pp. 1–7, 2008.
- [4] I.F. Akyildiz, W.-Y. Lee, M.C. Vuran, and M. Shantidev, "Next Generation/Dynamic Spectrum Access/Cognitive Radio Wireless Networks: A Survey", *Computer Networks*, Vol. 50, No. 13, pp. 2127–2159, 2006.
- [5] J. Mitola, and G. Maguire, "Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal", *IEEE Personal Communications*, Vol. 6, No. 4, pp. 13–18, 1999.
- [6] I.F. Akyildiz, W.-Y. Lee, and K.R. Chowdhury, "CRAHNS: Cognitive Radio Ad Hoc Networks", *Ad Hoc Networks*, Vol. 7, No. 5, pp. 810–836, 2009.
- [7] S. Haykin, "Cognitive Radio: Brain-empowered Wireless Communications", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Vol. 23, No. 2, pp. 201–220, 2005.
- [8] P. Kolodzy et al., "Next generation communications: Kickoff meeting", *Proc. of DARPA*, 2001.
- [9] T. Ycek, and H. Arslan, "A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications", *IEEE Communications Surveys Tuts.*, Vol. 11, No. 1, pp. 116–130, 1st Quarter 2009.
- [10] S. Pagadarai, R. Rajbanshi, A. M. Wyglinski, and G. J. Minden, "Sidelobe Suppression for OFDM-Based Cognitive Radios Using Constellation Expansion", *Proc. of 1st Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp. 888–893, 2008.
- [11] J. Tang, S. Misra, and G. Xue, "Joint Spectrum Allocation and Scheduling for Fair Spectrum Sharing in Cognitive Radio Wireless Networks", *Computer Networks*, Vol. 52, No. 11, pp. 2148–2158, 2008.
- [12] "Ofcom Consultation: Digital Divident." [Online]. Available: <http://www.ofcom.org.uk/consult/condocs/cognitive/summary/>.

- [13] S. Arkoulis, L. Kazatzopoulos, C. Delakouridis, G. Marias, and G. Polyzos, "Cognitive Spectrum and its Security Issues", *Proc. of 2nd Int'l Conf. on Next Generation Mobile Applications, Services, and Technologies (NGMAST)*, pp. 565–570, 2008.
- [14] "When Switching Speed is Important." [Online]. Available: [http://www.elcom-tech.com/downloads/articles/482/When\\_Switching\\_Speed\\_is\\_important.pdf](http://www.elcom-tech.com/downloads/articles/482/When_Switching_Speed_is_important.pdf).
- [15] M.R. Garey, and D.S. Johnson, "Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness", *W. H. Freeman & Co.*, New York, NY, 1979.
- [16] Y.T. Hou, Y. Shi, and H.D. Sherali, "Spectrum Sharing for Multi-hop Networking with Cognitive Radios", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Vol. 26, No. 1, pp. 146–155, 2008.
- [17] M. Ma, and D.H.K. Tsang, "Joint Design of Spectrum Sharing and Routing with Channel Heterogeneity in Cognitive Radio Networks", *Physical Communications*, Vol. 2, No. 1–2, pp. 127–137, 2009.
- [18] M. Alicherry, R. Bhatia, and L.E. Li, "Joint Channel Assignment and Routing for Throughput Optimization in Multi-Radio Wireless Mesh Networks", *Proc. of 11th Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MOBICOM)*, pp. 58–72, 2005.
- [19] K. Murty, "Linear Programming", *John Wiley & Sons, Inc.*, New York, NY, 1983.
- [20] Y. Pochet, and L.A. Wolsey, "Production Planning by Mixed Integer Programming", *Springer Series in Operations Research and Financial Engineering*, Part I, 2006.
- [21] "IBM-ILOG CPLEX 12.2." [Online]. Available: <http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex/>.
- [22] R. Fourer, D.M. Gay, and B.W. Kernighan, "AMPL, A Modeling Language for Mathematical Programming", 1993.
- [23] "Modeling with OPL." [Online]. Available: <http://www-01.ibm.com/software/commerce/optimization/modeling/index.html>.
- [24] G. Karakostas, "Faster Approximation Schemes for Fractional Multicommodity Flow Problems", *Proc. of 13th ACM-SIAM Symp. on Discrete Algorithms (SODA)*, pp. 166–173, 2002.
- [25] D. Lee, W. Jeon, and D. Jeong, "Joint Channel Assignment and Routing in Cognitive Radio-Based Wireless Mesh Networks", *Proc. of 71st Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 1–5, 2010.
- [26] K. Li, W. Lau, and O. Yue, "Link Restoration in Cognitive Radio Networks", *Proc. of 43th Int'l Conf. on Communications (ICC)*, pp. 371–376, 2008.



- [27] A.A. Kanagasabapathy, A.A. Franklin, and C.S.R. Murthy, "An Adaptive Channel Reconfiguration Algorithm for Multi-Channel Multi-Radio Wireless Mesh Networks", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 9, No. 10, pp. 3064–3071, 2010.
- [28] A.A. Franklin, A. Balachandran, C. Murthy, and M. Marina, "Demand based State Aware Channel Reconfiguration Algorithm for Multi-Channel Multi-Radio Wireless Mesh Networks", *Proc. of 2nd INFOCOM Workshop on Carrier-grade Wireless Mesh Networks (CARMEN)*, pp. 1–6, 2010.
- [29] A. Balachandran, A.A. Franklin, and C. Murthy, "Integrating Traffic Estimation and Dynamic Channel Reconfiguration in Wireless Mesh Networks", *Proc. of 16th Int'l Conf. on High Performance Computing (HiPC)*, pp. 205–214, 2009.
- [30] S. Avallone, F.P. D'Elia, and G. Ventre, "A Traffic-Aware Channel Re-Assignment Algorithm for Wireless Mesh Networks", *Proc. of 16th European Wireless Conference (EW)*, pp. 683–688, 2010.
- [31] R. Hincapie, L. Zhang, J. Tang, G. Xue, R.S. Wolff, and R. Bustamante, "Efficient Recovery Algorithms for Wireless Mesh Networks with Cognitive Radios", *Proc. of 44th Int'l Conf. on Communications (ICC)*, pp. 1–5, 2009.
- [32] I. Filippini, E. Ekici, and M. Cesana, "Minimum Maintenance Cost Routing in Cognitive Radio Networks", *Proc. of 6th Int'l Conf. on Mobile Ad hoc and Sensor Systems (MASS)*, pp. 284–293, 2009.
- [33] J. Shanshan, X. Yuan, and J. Wellons, "Quantitative Measurement of Routing Restoration Strategies for Multi-hop Wireless Networks", *Proc. of 6th Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks Workshop (SECON)*, pp. 1–6, 2009.
- [34] Kyu-Han Kim, and K.G. Shin, "Self-Reconfigurable Wireless Mesh Networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 19, No. 2, pp. 393–404, 2011.
- [35] Kyu-Han Kim, and K. G. Shin, "Extended Abstract: Self-Healing Multi-Radio Wireless Mesh Networks", *Proc. of 13th Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MOBICOM)*, 2007.
- [36] L. Cao, and H. Zheng, "Distributed Spectrum Allocation via Local Bargaining", *Proc. of 2nd Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks Workshop (SECON)*, pp. 475–486, 2005.
- [37] A. Berger, J. Gross, and T. Harks, "The k-Constrained Bipartite Matching Problem: Approximation Algorithms and Applications to Wireless Networks", *Proc. of 29th Int'l Conf. on Computer Communications (INFOCOM)*, pp. 1–9, 2010.
- [38] W. Feng, J. Cao, C. Zhang, and C. Liu, "Joint Optimization of Spectrum Handoff Scheduling and Routing in Multi-hop Multi-radio Cognitive Networks", *Proc. of 29th Int'l Conf. on Distributed Computing Systems (ICDCS)*, pp. 85–92, 2009.

- [39] B. Ramamurthy, and A. Ramakrishnan, "Virtual Topology Reconfiguration of Wavelength-routed Optical WDM Networks", *Proc. of 43th Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1269–1275, 2000.
- [40] D. Banerjee, and B. Mukherjee, "Wavelength-routed Optical Networks: Linear Formulation, Resource Budgeting Tradeoffs, and a Reconfiguration Study", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol.8, No.5, pp. 598–607, 2000.
- [41] "The USRP Platform." [Online]. Available: <http://www.ettus.com>.
- [42] "Spectrum Bridge Partners With Neul for Global M2M Communications Over TV White Spaces." [Online]. Available: [http://spectrumbridge.com/newsandpress/pressreleases/12-05-14/Spectrum\\_Bridge\\_Partners\\_With\\_Neul\\_for\\_Global\\_M2M\\_Communications\\_Over\\_TV\\_White\\_Spaces.aspx](http://spectrumbridge.com/newsandpress/pressreleases/12-05-14/Spectrum_Bridge_Partners_With_Neul_for_Global_M2M_Communications_Over_TV_White_Spaces.aspx).
- [43] "Spectrum Bridge, Inc." [Online]. Available: <http://spectrumbridge.com/Home.aspx>.
- [44] "Neul Ltd." [Online]. Available: <http://www.neul.com/neul/>.
- [45] "Plumas-Sierra Rural Electric Cooperative." [Online]. Available: <http://www.psrec.coop/>.
- [46] "The Future Is Now – Nation's First "Smart Grid" TV White Space Network Trial." [Online]. Available: <http://www.spectrumbridge.com/ProductsServices/WhiteSpacesSolutions/success-stories/plumas.aspx>.
- [47] "TV White Spaces Powering Smart City Services – The First Database Driven TV White Spaces "Smart City"." [Online]. Available: <http://www.spectrumbridge.com/ProductsServices/WhiteSpacesSolutions/success-stories/wilmington.aspx>.
- [48] "Google and Spectrum Bridge Deliver Enhanced Broadband Access and Telemedicine Applications to Healthcare Providers." [Online]. Available: <http://www.spectrumbridge.com/ProductsServices/WhiteSpacesSolutions/success-stories/logan.aspx>.
- [49] "Second Memorandum and Order", *FCC, ET Docket No. 10-174*, Sep. 2010.
- [50] "TV white spaces – A consultation on white space device requirements (Consultation published 22.11.2012)." [Online]. Available: <http://stakeholders.ofcom.org.uk/consultations/whitespaces/>.
- [51] "Proposed Regulatory Framework for TV White Space Operations in the VHF/UHF Bands (Issued date 17.06.2013)." [Online]. Available: [http://www.ida.gov.sg/~media/Files/PCDG/Consultations/20130617\\_whitespace/PublicConsult\\_ws.pdf](http://www.ida.gov.sg/~media/Files/PCDG/Consultations/20130617_whitespace/PublicConsult_ws.pdf).
- [52] S. Shellhammer, "Spectrum Sensing in IEEE 802.22", *Proc. of 1st IAPR Workshop on Cognitive Information Processing*, 2008.

- [53] A. Flores, R. Guerra, E. Knightly, P. Ecclesine, and S. Pandey, "IEEE 802.11af: A Standard for TV white space Spectrum Sharing", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 51, No. 10, pp. 92–100, 2013.
- [54] "The Internet Engineering Task Force (IETF)." [Online]. Available: <http://www.ietf.org/>.
- [55] V. Chen, S. Das, L. Zhu, J. Malyar, and P. McCann, "Protocol to Access Spectrum Database", *Work in Progress*, May 2013.
- [56] "Spectrum Database – Google." [Online]. Available: <https://www.google.com/get/spectrumdatabase/>.
- [57] "The Key Bridge TV-Bands Database." [Online]. Available: [https://keybridgeglobal.com/whitespace/apps/database\\_browser/wsif/index.xhtml](https://keybridgeglobal.com/whitespace/apps/database_browser/wsif/index.xhtml).
- [58] "Telcordia US TV White Space Database." [Online]. Available: <https://prism.telcordia.com/tvws/home/>.
- [59] "Federal Communications Commission, USA." [Online]. Available: <http://www.fcc.org>.
- [60] "BT." [Online]. Available: <http://home.bt.com/>.
- [61] "M. Fitch, TV Whitespace." [Online]. Available: [http://www.leti.fr/fr/content/download/1185/18113/file/01-mfitch\\_bt\\_talkontvwhitespacex.pdf](http://www.leti.fr/fr/content/download/1185/18113/file/01-mfitch_bt_talkontvwhitespacex.pdf).
- [62] "Industry response to Ofcom's Consultation on WSD Requirements." [Online]. Available: [http://stakeholders.ofcom.org.uk/binaries/consultations/whitespaces/responses/Combined\\_Industry\\_Organisat.pdf](http://stakeholders.ofcom.org.uk/binaries/consultations/whitespaces/responses/Combined_Industry_Organisat.pdf).
- [63] "Ofcom, Independent regulator and competition authority for the UK communications industries." [Online]. Available: <http://www.ofcom.org.uk/>.
- [64] "Spectrum Bridge, Authorized Shared Access (ASA)." [Online]. Available: <http://spectrumbridge.com/Technology/AuthorizedSharedAccess.aspx>.
- [65] "COGEU." [Online]. Available: <http://projectos.est.ipcb.pt/cogeu2/>.
- [66] "ETSI Technical Committee (TC) Reconfigurable Radio System (RRS)." [Online]. Available: <http://portal.etsi.org/portal/server.pt/community/RRS/329>.
- [67] A. Goldsmith, "Wireless Communications", *Cambridge University Press*, 2005.
- [68] A. Iyer, C. Rosenberg, and A. Karnik, "What is the Right Model for Wireless Channel Interference?", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 8, No. 5, pp. 2662–2671, 2009.

- [69] P. Gupta, and P.R. Kumar, "The Capacity of Wireless Networks", *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 46, No. 2, pp. 388–404, 2000.
- [70] Y. Shi, Y.T. Hou, J. Liu, and S. Kompella, "How To Correctly Use The Protocol Interference Model For Multi-hop Wireless Networks", *Proc. of 10th Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC)*, pp. 239–248, 2009.
- [71] M. Yun, Y. Zhou, A. Arora, and H.A. Choi, "On Multi-Radio Multi-Channel Scheduling considering Switching Overhead in Wireless Mesh Networks", submitted for publication, 2011.
- [72] "Frequency Hopping Spread Spectrum vs. Direct Sequence Spread Spectrum." [Online]. Available: [http://www.raylink.com/whitepaper/fhss\\_dsss.pdf](http://www.raylink.com/whitepaper/fhss_dsss.pdf).
- [73] R. Matos, T.R. Muck, A.A. Frohlich, and L.B. Becker, "Evaluation of PHY Reconfiguration Latency in SDR Gateway for WSN", *Proc. of 8th Information and Telecommunication Technologies Symp. (I2TS)*, pp. 199–202, 2009.
- [74] "IBS Series Synthesizer Specification." [Online]. Available: [http://www.elcom-tech.com/downloads/ate/364/IBS\\_EST\\_datasheet\\_%28June\\_15,\\_2009%29.pdf](http://www.elcom-tech.com/downloads/ate/364/IBS_EST_datasheet_%28June_15,_2009%29.pdf).
- [75] S. Parkvall, E. Dahlman, A. Furuskar, Y. Jading, M. Olsson, S. Wanstedt, and K. Zangi, "LTE-Advanced – Evolving LTE towards IMT-Advanced", *Proc. of 68th Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 1–5, 2008.
- [76] Z. Yang, G. Cheng, W. Liu, W. Yuan, and W. Cheng, "Local Coordination Based Routing and Spectrum Assignment in Multi-hop Cognitive Radio Networks", *Mobile Networks and Applications*, Vol. 13, No. 1, pp. 67–81, 2008.
- [77] G. Cheng, W. Liu, Y. Li, and W. Cheng, "Spectrum Aware On-demand Routing in Cognitive Radio Networks", *Proc. of 2nd Int'l Symp. on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, pp. 571–574, 2007.
- [78] M. J. Schniederjans, "Goal Programming: Methodology and Applications", *Kluwer Academic Publishers*, Boston, MA, 1995.
- [79] J. P. Ignizio, "Goal Programming and Extensions", *Lexington Books*, Lexington, MA, 1976.
- [80] J. Kallrath, "Polyhedral Modeling and Solution Approaches using Algebraic Modeling Systems", *Optimization Letters*, Vol. 5, No. 3, pp. 453–466, 2011.
- [81] "COGEU Deliverable D3.1." [Online]. Available: <http://www.ict-cogeu.eu/deliverables.html>.
- [82] "COGEU Deliverable D4.1." [Online]. Available: <http://www.ict-cogeu.eu/deliverables.html>.
- [83] "MATLAB – The Language of Technical Computing." [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>.

- [84] M. Chiang, S.H. Low, A.R. Calderbank, and J.C. Doyle, "Layering as Optimization Decomposition: A Mathematical Theory of Network Architectures", *Proc. of the IEEE*, Vol. 95, No. 1, pp. 255–312, 2007.
- [85] G. Desaulniers, J. Desrosiers, and M. Solomon, "Column Generation", *Mathematics of Decision Making*, Springer, New York, NY, 2005.
- [86] M. Fisher, "The Lagrangian Relaxation Method for Solving Integer Programming Problems", *Management Science*, Vol. 50, No. 12, pp. 1861–1871, 2004.
- [87] M. Fischetti, and A. Lodi, "Local Branching", *Mathematical Programming*, Vol. 98, No. 1–3, pp. 23–47, 2003.
- [88] E. Danna, E. Rothberg, and C. Le Pape, "Exploring Relaxation Induced Neighborhoods to Improve MIP Solutions", *Mathematical Programming*, Vol. 102, No. 1, pp. 71–90, 2005.
- [89] M. Gendreau, and J.-Y. Potvin, "Handbook of Metaheuristics", *International Series in Operations Research & Management Science*, Vol. 146, Springer, New York, NY, 2010.
- [90] S. Avallone, I.F. Akyildiz, and G. Ventre, "A Channel and Rate Assignment Algorithm and a Layer-2.5 Forwarding Paradigm for Multi-Radio Wireless Mesh Networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 17, No. 1, pp. 276–280, 2009.
- [91] Y.-Y. Chen, S.-C. Liu, and C. Chen, "WLC30-2: Channel Assignment and Routing for Multi-Channel Wireless Mesh Networks Using Simulated Annealing", *Proc. of 49th Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1–5, 2006.
- [92] H. Li, Y. Cheng, C. Zhou, and P. Wan, "Multi-Dimensional Conflict Graph Based Computing for optimal Capacity in MR-MC Wireless Networks", *Proc. of 30th Int'l Conf. on Distributed Computing Systems (ICDCS)*, pp. 774–783, 2010.
- [93] C. Xin, L. Ma, and C.-C. Shen, "A Path-centric Channel Assignment Framework for Cognitive Radio Wireless Networks", *Mobile Networks and Applications*, Vol. 13, No. 5, pp. 463–476, 2008.
- [94] S. Raman, A. Ganz, and R.R. Mettu, "Fair Bandwidth Allocation Framework for Heterogeneous Multi-Radio Wireless Mesh Networks", *Proc. of 4th Int'l Conf. on Broadband Communications, Networks and Systems (BROADNETS)*, pp. 898–907, 2007.
- [95] M. Ma, and D.H.K. Tsang, "Cross-Layer Throughput Optimization in Cognitive Radio Networks with SINR Constraints", *International Journal of Digital Multimedia Broadcasting*, Vol. 2010.
- [96] W. Zhou, X. Chen, and D. Qiao, "Practical Routing and Channel Assignment Scheme for Mesh Networks with Directional Antennas", *Proc. of 43th Int'l Conf. on Communications (ICC)*, pp. 3181–3187, 2008.

- [97] V. Gardellin, S.K. Das, L. Lenzini, C. Cicconetti, and E. Mingozzi, "G-PaMeLA: A Divide-and-conquer Approach for Joint Channel and Routing in Multi-radio Multi-channel Wireless Mesh Networks", *Journal of Parallel and Distributed Computing*, Vol. 71, No. 3, pp. 381–396, 2011.
- [98] E. Angelelli, R. Mansini, and M. Grazia Speranza, "Kernel Search: A General Heuristic for the Multi-dimensional Knapsack Problem", *Computers & Operations Research*, Vol. 37, No. 11, pp. 2017–2026, 2010.
- [99] V. Kolar, N.B. Abu-Ghazaleh, and P. Mahonen, "Decomposition for Low-complexity Near-Optimal Routing in Multi-hop Wireless Networks", *Proc. of 44th Int'l Conf. on Communications (ICC)*, pp. 1–6, 2009.
- [100] T. Jeighton, C. Stein, F. Makedon, E. Tardos, S. Plotkin, and S. Tragoudas, "Fast Approximation Algorithms for Multicommodity Flow Problems", *Proc. of 23th Symp. on Theory of Computing (STOC)*, pp. 101–111, 1991.
- [101] S.G. Nash, and A. Sofer, "Linear and Nonlinear Programming", *McGraw-Hill*, Boston, Mass, 1996.
- [102] J.Y. Yen, "Finding the  $k$  Shortest Loopless Paths in a Network", *Management Science*, Vol. 17, No. 11, pp. 712–716, 1971.
- [103] J. Edmonds, and R.M. Karp, "Theoretical Improvements in Algorithmic Efficiency for Network Flow Problems", *Journal of the ACM*, Vol. 19, No. 2, pp. 248–264, 1972.
- [104] L.R. Ford, and D.R. Fulkerson, "Maximal Flow through a Network", *Canadian Journal of Mathematics*, Vol. 8, pp. 399–404, 1956.
- [105] H. Su, and X. Zhang, "Cross-Layer Based Opportunistic MAC Protocols for QoS Provisioning over Cognitive Radio Wireless Networks", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Vol. 26, No. 1, pp. 118–129, 2008.
- [106] [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/32513>.
- [107] D.P. Bertsekas, "Network Optimization: Continuous and Discrete Models", *Athena Scientific*, Belmont, MA, 1998.
- [108] QINETIQ/06/00421 (2006) *Cognitive Radio Technology, A Study for Ofcom Volume 2*, QinetiQ Proprietary, Farnborough, Hampshire, United Kingdom.
- [109] P. Pawelczak, K. Nolan, L. Doyle, Ser Wah Oh, and D. Cabric, "Cognitive Radio: Ten Years of Experimentation and Development", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 49, No. 3, pp. 90–100, 2011.
- [110] A. Oppenheim, and R. Schaffer, "Discrete-Time Signal Processing, 3rd edn.", *Prentice Hall*, Englewood Cliffs, NJ, 2009.

- [111] D. Cabric, A. Tkachenko, and R.W. Brodersen, "Experimental Study of Spectrum Sensing based on Energy Detection and Network Cooperation", *Proc. of 1st Workshop on Technology and Policy for Accessing Spectrum (TAPAS)*, a. 12, 2006.
- [112] A. Papoulis, "Probability & Statistics", *Prentice Hall*, Englewood Cliffs, NJ, 1989.
- [113] M. López-Benítez, and F. Casadevall, "Improved Energy Detection Spectrum Sensing for Cognitive Radio", *IET Communications*, Vol. 6, No. 8, pp. 785–796, 2012.
- [114] 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.
- [115] A. Gorcin, K.A. Qaraç, H. Celebi, and H. Arslan, "An Adaptive Threshold Method for Spectrum Sensing in Multi-Channel Cognitive Radio Networks", *Proc. of 17th Int'l Conf. on Telecommunications (ICT)*, pp. 425–429, 2010.
- [116] T. Taher, R. Bacchus, K. Zdunek, and D. Roberson, "Long-term Spectral Occupancy Findings in Chicago", *Proc. of 6th Int'l Symp. on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, pp. 100–107, 2011.
- [117] R. Chiang, G. Rowe, and K. Sowerby, "A Quantitative Analysis of Spectral Occupancy Measurements for Cognitive Radio", *Proc. of 65th Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 3016–3020, 2007.
- [118] S. Yin, D. Chen, Q. Zhang, M. Liu, and S. Li, "Mining Spectrum Usage Data: A Large-Scale Spectrum Measurement Study", *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 11, No. 6, pp. 1033–1046, 2012.
- [119] M. López-Benítez, F. Casadevall, A. Umbert, J. Perez-Romero, R. Hachemani, J. Palicot, and C. Moy, "Spectral Occupation Measurements and Blind Standard Recognition Sensor for Cognitive Radio Networks", *Proc. of 4th Int'l Conf. on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks (CrownCom)*, pp. 1–9, 2009.
- [120] M. López-Benítez, and F. Casadevall Palacio, "Spectrum Occupancy in Realistic Scenarios and Duty Cycle Model for Cognitive Radio", *Advances in Electronics and Telecommunications, Special Issue on Radio Communication Series: Recent Advances and Future Trends in Wireless Communication*, Vol. 1, No. 1, pp. 26–34, 2010.
- [121] M. Wellens, J. Wu, and P. Mahonen, "Evaluation of Spectrum Occupancy in Indoor and Outdoor Scenario in the Context of Cognitive Radio", *Proc. of 2nd Int'l Conf. on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks (CrownCom)*, pp. 420–427, 2007.
- [122] M. Wellens, and P. Mahonen, "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.

- [123] V. Valenta, R. Marsalek, G. Baudoin, M. Villegas, M., Suarez, and F. Robert, "Survey on Spectrum Utilization in Europe: Measurements, analyses and observations", *Proc. of 5th Int'l Conf. on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks (CrownCom)*, pp. 1–5, 2010.
- [124] S. Pagadarai, and A.M. Wyglinski, "Measuring and Modeling Spectrum Occupancy: A Massachusetts Perspective", *Proc. of 11th Int'l Symp. on Advanced Radio Technologies (ISART)*, (INVITED), 2010.
- [125] "National Instruments, 2.7 GHz RF Vector Signal Analyzer with Digital Downconversion." [Online]. Available: [http://www.ni.com/pdf/products/us/cat\\_vectorsignalanalyzer.pdf](http://www.ni.com/pdf/products/us/cat_vectorsignalanalyzer.pdf).
- [126] "General-Purpose 8-Slot Chassis for PXI." [Online]. Available: <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-256/lang/en>.
- [127] "LabVIEW System Design Software." [Online]. Available: <http://www.ni.com/labview/>.
- [128] "Sirio SD 3000 U/N Wide-band Base Station Antenna." [Online]. Available: [www.sirioantenne.it/docs\\_download.php?file=Id-274\\_04-06-1999.pdf](http://www.sirioantenne.it/docs_download.php?file=Id-274_04-06-1999.pdf).
- [129] "RG213 Coaxial Cable." [Online]. Available: <http://www.universal-radio.com/catalog/cable/2929.html>.
- [130] S. Ellingson, "Spectral occupancy at VHF: implications for frequency-agile cognitive radios", *Proc. of 62th Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 1379–1382, 2005.
- [131] "Hellenic Telecommunications and Post Commission." [Online]. Available: <http://www.eett.gr>.
- [132] "Εθνικός Κανονισμός Κατανομής Ζωνών Συχνοτήτων, Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας." [Online]. Available: <http://www.yme.gr/getfile.php?id=4650>.
- [133] K.A. Qaraqe, H. Celebi, A. Gorcin, A. El-Saigh, H. Arslan, and M.-S. Alouini, "Empirical Results for Wideband Multidimensional Spectrum Usage", *Proc. of 20th Int'l Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1262–1266, 2009.
- [134] H. Sun, A. Nallanathan, C.-X. Wang, and Y. Chen, "Wideband Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks: A Survey", *IEEE Wireless Communications*, Vol. 20, No. 2, pp. 74–81, 2013.
- [135] Y. Zhang, J. Zheng, and H.-H. Chen, "Cognitive Radio Networks: Architectures, Protocols and Standards", *CRC Press*, Boca Raton, FL, 2010.
- [136] 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.



- [137] 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.
- [138] D. Xu, E. Jung, and X. Liu, "Optimal Bandwidth Selection in Multi-Channel Cognitive Radio Networks: How Much is Too Much?", *Proc. of 3rd Int'l Symp. on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, pp. 1–11, 2008.
- [139] M. Wellens, J. Riihijärvi, and P. Mähönen, "Empirical Time and Frequency Domain Models of Spectrum Use", *Physical Communication*, Vol. 2, No. 1, pp. 10–32, 2009.
- [140] A. Palaios, J. Riihijärvi, 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", *Proc. of 7th Int'l Symp. on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, pp. 154–165, 2012.
- [141] M. Wellens, A. de Baynast, and P. Mahonen, "Exploiting Historical Spectrum Occupancy Information for Adaptive Spectrum Sensing", *Proc. of 1st Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp. 717–722, 2008.
- [142] M. López-Benítez, F.J. Casadevall Palacio, D. López-Pérez, and A. V. Vasilakos, "Modeling and Simulation of Joint Time-frequency Properties of Spectrum Usage in Cognitive Radio", *Proc. of 4th Int'l Conf. on Cognitive Radio and Advanced Spectrum Management (CogART)*, a. 4, 2011.
- [143] E. Visotsky, S. Kuffner, and R. Peterson, "On Collaborative Detection of TV Transmissions in Support of Dynamic Spectrum Sharing", *Proc. of 1st Int'l Symp. on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, pp. 338–345, 2005.
- [144] 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*, 2010.
- [145] O. Holland, P. Cordier, M. Muck, L. Mazet, C. Klöck, and T. Renk, "Spectrum Power Measurements in 2G and 3G Cellular Phone Bands during the 2006 Football World Cup in Germany", *Proc. of 2nd Int'l Symp. on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, pp. 575–578, 2007.
- [146] M. Wellens, and P. Mahonen, "Lessons Learned from an Extensive Spectrum Occupancy Measurement Campaign and a Stochastic Duty Cycle Model", *Proc. of 5th Int'l Conf. on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities and Workshops (TridentCom)*, pp. 1–9, 2009.
- [147] L. Luo, N.M. Neihart, S. Roy, and D.J. Allstot, "A Two-Stage Sensing Technique for Dynamic Spectrum Access", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 8, No. 6, pp. 3028–3037, 2009.
- [148] N.M. Neihart, S. Roy, and D.J. Allstot, "A Parallel, Multi-Resolution Sensing Technique for Multiple Antenna Cognitive Radios", *Proc. of Int'l Symp. on Circuits and Systems (ISCAS)*, pp. 2530–2533, 2007.

- [149] Y. Hur, J. Park, W. Woo, K. Lim, C.H. Lee, H.S. Kim, and J. Laskar, "A Wideband Analog Multi-Resolution Spectrum Sensing (MRSS) Technique for Cognitive Radio (CR) Systems", *Proc. of Int'l Symp. on Circuits and Systems (ISCAS)*, pp. 4090–4093, 2006.
- [150] Y. Hur, G. Park, C.-H. Lee, H.S. Kim, and J. Laskar, "A Cognitive Radio (CR)-Based Mobile Interactive Digital Broadcasting Application adopting a Multi-Resolution Spectrum-Sensing (MRSS) Technique", *Proc. of 66th Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 1912–1916, 2007.
- [151] Q. Zhang, A.B. Kokkeler, and G.J. Smit, "An Efficient Multi-Resolution Spectrum Sensing Method for Cognitive Radio", *Proc. of 3rd Int'l Conf. on Communications and Networking in China (ChinaCom)*, pp. 1226–1229, 2008.
- [152] M. Abdelmonem, M. Nafie, M. Ismail, and M. El-Soudani, "Optimized Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive LTE Femtocells", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Vol. 1, pp. 1–19, 2012.
- [153] H. Zamat, and B. Natarajan, "Optimization of Sensing Receiver for Cognitive Radio Applications", *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2009.
- [154] W. Yue, and B. Zheng, "A Two-Stage Spectrum Sensing Technique in Cognitive Radio Systems based on Combining Energy Detection and One-order Cyclostationary Feature Detection", *Proc. of 6th Symp. on Web Information Systems and Applications (WISA)*, pp. 327–330, 2009.
- [155] S. Maleki, A. Pandharipande, and G. Leus, "Two-Stage Spectrum Sensing for Cognitive Radios", *Proc. of 35th Int'l Conf. on Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 2946–2949, 2010.
- [156] P.R. Nair, A.P. Vinod, K.G. Smitha, and A.K. Krishna, "Fast Two-Stage Spectrum Detector for Cognitive Radios in Uncertain Noise Channels", *IET Communications*, Vol. 6, No. 11, pp. 1341–1348, 2012.
- [157] S. Fazeli-Dehkordy, K.N. Plataniotis, and S. Pasupathy, "Two-Stage Spectrum Detection in Cognitive Radio Networks", *Proc. of 35th Int'l Conf. on Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 3118–3121, 2010.
- [158] B. Lawton, and C.C. Murphy, "Coarse-fine Spectrum Sensing for Cognitive Radio for Minimum Sensing Time", *Proc. of 4th Int'l Conf. on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS)*, pp. 1–7, 2010.
- [159] G. Snedecor, and W. Cochran, "Statistical Methods", *Iowa State University Press*, 1967.
- [160] A. Tucker, S. Swift, and X. Liu, "Variable Grouping in Multivariate Time Series via Correlation", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, Vol. 31, No. 2, pp. 235–245, 2001.
- [161] D.L. 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.

- [162] N.J. Cox, "Speaking Stata: Correlation with Confidence, or Fisher's  $z$  Revisited", *Stata Journal*, Vol. 8, No. 3, pp. 413–439, 2008.
- [163] T. DiCiccio, and B. Efron, "Bootstrap Confidence Intervals", *Statistical Science*, Vol. 11, No. 3, pp. 189–228, 1996.
- [164] 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.
- [165] M. Wellens, A. de Baynast, and P. Mahonen, "Performance of Dynamic Spectrum Access Based on Spectrum Occupancy Statistics", *IET Communications*, Vol. 2, No. 6, pp. 772–782, 2008.
- [166] H. Kim, M. Suzuki, M. Minami, and Hiroyuki Morikawa, "Spectrum Sensor for Distributed Spectrum Sensing", *Proc. of 9th Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, pp. 44–45, 2012.
- [167] "GigaSt." [Online]. Available: <http://www.wa.commufa.jp/gigast/>.