



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μηχανισμός βέλτιστης εκχώρησης ισχύος σε συνεργατικά γνωστικά ραδιοδίκτυα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΗ ΘΕΜΙΣΤΟΚΛΗ

Επιβλέπων : Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μηχανισμός βέλτιστης εκχώρησης ισχύος σε συνεργατικά γνωστικά ραδιοδίκτυα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΗ ΘΕΜΙΣΤΟΚΛΗ

Επιβλέπων : Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30^η Οκτωβρίου 2015.

(Υπογραφή)

.....
Αθανάσιος Παναγόπουλος
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Χρήστος Καμάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Γεώργιος Φικιώρης
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

(Υπογραφή)

.....

ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΗΣ ΘΕΜΙΣΤΟΚΛΗΣ

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

Copyright © Καραγιάννης Θεμιστοκλής, 2015

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Ο στατικός τρόπος διαμοιρασμού του φάσματος σε συνδυασμό με τις αυξανόμενες ανάγκες για τηλεπικοινωνιακούς πόρους έχουν οδηγήσει στην αναζήτηση τεχνολογιών που θα προσφέρουν μια πιο αποδοτική χρήση του φάσματος συχνοτήτων. Τα γνωστικά συστήματα προτείνονται ως μια λύση σε αυτό το πρόβλημα και αναφέρονται σε ένα δυναμικό σχήμα ανάθεσης φάσματος, όπου μη αδειοδοτημένοι χρήστες (δευτερεύοντες) μπορούν να μοιράζονται το φάσμα με αδειοδοτημένους χρήστες (πρωτεύοντες), οι οποίοι θα πρέπει να τηρούν συγκεκριμένους περιορισμούς. Για αυτό το λόγο, κρίνεται απαραίτητη η ανάλυση των στοιχείων, των λειτουργιών και των τεχνικών που χρησιμοποιεί ένα γνωστικό ραδιοδίκτυο ώστε να εξυπηρετεί τους δευτερεύοντες χρήστες χωρίς να επιδρά αρνητικά στην ποιότητα υπηρεσίας (QoS) των πρωτεύοντων χρηστών.

Η επίδοση των γνωστικών ραδιοδικτύων μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση μεθόδων που χρησιμοποιούνται στις συνεργατικές επικοινωνίες και παρέχουν σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως μειωμένες απαιτήσεις ισχύος και αυξημένη κάλυψη. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η χρήση αναμεταδοτών ανάμεσα σε δευτερεύοντες χρήστες, οι οποίοι επανεκπέμπουν το σήμα που καταφθάνει από τον πομπό στο δέκτη. Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός μηχανισμού βέλτιστης εκχώρησης ισχύος σε όλους τους δευτερεύοντες κόμβους και επιλογής αναμεταδότη για την περίπτωση αναμετάδοσης διπλής κατεύθυνσης. Η ανάλυση γίνεται για πρωτόκολλα αναμετάδοσης AF και DF, υπό την παρουσία πρωτεύοντος χρήστη και με κριτήρια την μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης των δευτερευόντων χρηστών και τη διασφάλιση ότι η παρεμβολή στον πρωτεύοντα χρήστη από το δευτερεύον γνωστικό ραδιοδίκτυο παραμένει κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο.

Λέξεις Κλειδιά: <<γνωστικά συστήματα, πρωτεύοντας χρήστης, δευτερεύοντας χρήστης, συνεργατικές επικοινωνίες, αναμετάδοση διπλής κατεύθυνσης, πρωτόκολλα αναμετάδοσης AF/DF>>

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Abstract

The fixed spectrum assignment combined with the increasing demand for radio resources have led to technologies which will offer more efficient use of the radio spectrum. Cognitive radio technology has emerged as solution to this problem and it refers to a dynamic spectrum allocation scheme, where the unlicensed users (secondary) can share the spectrum resources with the licensed users (primary), satisfying specific interference constraints. For this reason, it is necessary to analyze the components, functions and techniques used by cognitive radio networks (CRN), in order to serve the secondary users without affecting the quality of service (QoS) of primary users.

The performance of CRNs can be further improved with methods used by cooperative communication systems that provide significant advantages, such as reduced power requirements and increased coverage. Specifically, the use of relays that retransmit the signal arrived from the source to the destination, between secondary users is considered. The scope of this thesis is the development of an optimal power allocation and relay selection scheme for the two-way relaying approach. The analysis is performed both for AF and DF relay protocols, under the presence of a primary user. The objective of the optimization problem refers to the maximization of the secondary users' transmission rate, while ensuring that the interference at the primary user from the secondary network remains under a certain threshold.

Keywords: <<cognitive radio, primary user, secondary user, cooperative communications, two-way relaying, AF/DF relay protocols>>

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή.....	1
1.1	Ασύρματες επικοινωνίες	1
1.2	Ζώνες ραδιοσυχνότητων	2
1.2.1	Διαχείριση φάσματος.....	3
1.3	Πρωτόκολλα ασύρματων δικτύων	4
1.4	Διάδοση.....	6
1.4.1	Μοντέλα καναλιού	7
1.5	Σκοπός Διπλωματικής.....	8
2	Γνωστικά Συστήματα.....	9
2.1	Εισαγωγή.....	9
2.2	Software Defined Radio (SDR).....	11
2.3	Λειτουργίες των Γνωστικών Συστημάτων	12
2.4	Στοιχεία ενός Γνωστικού Συστήματος	13
2.5	Δυναμική πρόσβαση φάσματος.....	14
2.5.1	Τεχνικές πρόσβασης φάσματος βάσει παρουσίας πρωτευνόντων χρηστών.....	15
2.5.2	Αρχιτεκτονική γνωστικού δικτύου	17
2.6	Ανίχνευση φάσματος και ανάλυση	18
2.6.1	Θερμοκρασία παρεμβολής.....	18
2.6.2	Ανίχνευση φάσματος	20
2.6.3	Συνεργατική ανίχνευση	27
2.7	Πλατφόρμες γνωστικών συστημάτων	28
2.8	Προτυποποίηση γνωστικών συστημάτων	29
2.8.1	IEEE SCC 41.....	29
2.8.2	IEEE 802.22	30
3	Συνεργατικές επικοινωνίες.....	32
3.1	Εισαγωγή.....	32
3.2	Κατανομή πόρων σε συνεργατικά CRN	34
3.3	Ταξινόμηση συνεργατικών πρωτοκόλλων	38

3.3.1	<i>AF και DF αναμετάδοση</i>	40
3.4	Ταξινόμηση σχηματισμών δικτύων.....	45
3.5	Ταξινόμηση των στόχων, προβλημάτων και λύσεις σε συνεργατικά CRN.....	46
3.5.1	<i>Ελαχιστοποίηση</i>	47
3.5.2	<i>Μεγιστοποίηση</i>	48
3.5.3	<i>Αμεροληψία</i>	49
3.5.4	<i>Ανάλυση</i>	49
3.5.5	<i>Τύποι προβλημάτων και λύσεις</i>	50
4	Μηχανισμός επιλογής βέλτιστου αναμεταδότη και κατανομής ισχύος	53
4.1	Εισαγωγή.....	53
4.2	Μοντέλο συστήματος.....	54
4.3	Πρόβλημα επιλογής αναμεταδότη και κατανομής ισχύος.....	57
4.3.1	<i>Χρήση πρωτοκόλλου AF</i>	58
4.3.2	<i>Χρήση πρωτοκόλλου DF</i>	60
4.4	Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	63
4.5	Συμπεράσματα.....	73
	Βιβλιογραφία	75

Ευρετήριο σχημάτων

Σχήμα 1. Γνωστικός κύκλος.....	12
Σχήμα 2. Interweave / Underlay.....	17
Σχήμα 3. Βασικά στοιχεία κατανομής πόρων.....	36
Σχήμα 4. Απλοποιημένο μοντέλο συνεργασίας	41
Σχήμα 5. Στόχοι των συνεργατικών CRN	47
Σχήμα 6. Τοπολογία συστήματος.....	55
Σχήμα 7. Ρυθμός μετάδοσης με επιλογή βέλτιστου και τυχαίου αναμεταδότη	64
Σχήμα 8. Ρυθμός μετάδοσης για δύο διαφορετικές κατωφλιού παρεμβολής	65
Σχήμα 9. Ρυθμός μετάδοσης για διαφορετικές τιμές απωλειών διαδρομής	66
Σχήμα 10. Ρυθμός μετάδοσης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου m	67
Σχήμα 11. Σχέση ρυθμού μετάδοσης με κατώβλι παρεμβολής	68
Σχήμα 12. Ρυθμός μετάδοσης ως προς τον αριθμό των αναμεταδοτών	69
Σχήμα 13. Τοπολογία συστήματος.....	70
Σχήμα 14. Ρυθμός μετάδοσης για διαφορετικές θέσεις του PU.....	71
Σχήμα 15. Υπολογισμός ισχύος δευτερευόντων χρηστών	72

Ευρετήριο πινάκων

<i>Πίνακας 1. Αδειοδοτημένες συχνότητες εύρους ζώνης στις ΗΠΑ</i>	<i>3</i>
<i>Πίνακας 2. Σύνοψη των κυριότερων τεχνικών ανίχνευσης φάσματος.....</i>	<i>26</i>
<i>Πίνακας 3. Γενικό πρόβλημα κατανομής πόρων.....</i>	<i>38</i>
<i>Πίνακας 4. Τύποι αποφάσεων και δυνατότητα ελέγχου ισχύος</i>	<i>50</i>
<i>Πίνακας 5. Τύποι προβλημάτων και προσεγγίσεις λύσεων.....</i>	<i>51</i>
<i>Πίνακας 6. Αλγόριθμος βέλτιστης επιλογής αναμεταδότη και κατανομής ισχύος</i>	<i>62</i>
<i>Πίνακας 7. Παράμετροι μοντέλου συστήματος.....</i>	<i>63</i>

1

Εισαγωγή

1.1 Ασύρματες επικοινωνίες

Η τεχνολογία ασύρματων επικοινωνιών έχει γίνει βασικό στοιχείο της σύγχρονης κοινωνίας. Στη καθημερινή μας ζωή, συσκευές όπως το τηλεχειριστήριο της τηλεόρασης, τα κινητά τηλέφωνα, προσωπικοί ψηφιακοί οδηγοί (Personal Digital Assistant, PDA) και δέκτες δορυφορικής τηλεόρασης βασίζονται στη τεχνολογία ασύρματων επικοινωνιών [1]. Σήμερα, ο συνολικός αριθμός των χρηστών που είναι συνδρομητές κυψελωτών ασύρματων υπηρεσιών έχει ξεπεράσει σημαντικά τον αριθμό χρηστών που είναι συνδρομητές στις ενσύρματες τηλεφωνικές υπηρεσίες. Εκτός από την τεχνολογία ασύρματων κυψελωτών δικτύων, ασύρματα τηλέφωνα, ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless Local Area Network, WLAN) και δορυφόροι χρησιμοποιούνται ευρέως για υπηρεσίες φωνής και δεδομένων.

Τα ποικίλα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών που είναι διαθέσιμα σήμερα διαφέρουν ως προς το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, τη γεωγραφική περιοχή κάλυψης, την ισχύ εκπομπής, και την υποστήριξη κινητικότητας για τους χρήστες. Τα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών μπορούν γενικά να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- συστήματα ευρύτερης περιοχής υψηλής ισχύος (ή κυψελωτά συστήματα), τα οποία υποστηρίζουν κινητούς χρήστες σε μια ευρεία γεωγραφική περιοχή
- τοπικά συστήματα χαμηλής ισχύος, για παράδειγμα ασύρματα τηλεφωνικά συστήματα

- συστήματα ευρύτερης περιοχής χαμηλής ταχύτητας, τα οποία σχεδιάζονται για κινητές υπηρεσίες δεδομένων με σχετικά χαμηλούς ρυθμούς δεδομένων (π.χ. συστήματα τηλεειδοποίησης)
- τοπικά συστήματα υψηλών ταχυτήτων, τα οποία σχεδιάζονται για τοπικές επικοινωνίες υψηλών ταχυτήτων (π.χ. ασύρματα LAN)

Οι πρώτες δύο κατηγορίες είναι συστήματα προσανατολισμένα σε φωνή (voice-oriented) ενώ τα δύο τελευταία συστήματα προσανατολισμένα σε δεδομένα (data-oriented). Παρά το γεγονός ότι οι διαφορετικοί τύποι ασύρματων συστημάτων έχουν διαφορετικό ρυθμό μετάδοσης, ισχύ, κάλυψη και απαιτήσεις κινητικότητας, αντιμετωπίζουν παρόμοιες προκλήσεις στον σχεδιασμό και την υλοποίησή τους. Αυτές οι προκλήσεις περιλαμβάνουν την κατανομή και διαχείριση ραδιοπόρων, τον έλεγχο πρόσβασης μέσου (Medium Access Control, MAC), τον έλεγχο ρυθμού μετάδοσης, τη διαχείριση μεταπομπής (handoff) και κινητικότητας (mobility), την πρόβλεψη ποιότητας υπηρεσίας (QoS) και την ασφάλεια.

1.2 Ζώνες ραδιοσυχνοτήτων

Τα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών βασίζονται στη μετάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με συχνότητες στο εύρος 3 Hz – 300 GHz. Αυτά τα ραδιοκύματα εκπέμπονται και λαμβάνονται μέσω κεραιών οι οποίες μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια ραδιοσυχνοτήτων σε ηλεκτρομαγνητική ενέργεια και αντίστροφα. Τα ραδιοκύματα ανάλογα με τη συχνότητά τους έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά διάδοσης, καθένα από τα οποία είναι κατάλληλο για συγκεκριμένη εφαρμογή. Για παράδειγμα, τα ραδιοκύματα χαμηλών συχνοτήτων είναι κατάλληλα για επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων ενώ τα ραδιοκύματα υψηλών συχνοτήτων είναι κατάλληλα για επικοινωνίες κοντινών αποστάσεων αλλά υψηλών ταχυτήτων. Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει κάποιες χαρακτηριστικές ασύρματες εφαρμογές και υπηρεσίες καθώς και τις διαφορετικές ραδιοσυχνότητες που χρησιμοποιούν.

Υπηρεσία / Σύστημα	Συχνότητα
Ραδιοφωνία AM	535-1605 KHz
Ραδιοφωνία FM	88-108 MHz
Broadcast TV (channels 2-6)	54-88 MHz
Broadcast TV (channels 7-13)	174-216 MHz
Broadcast TV (UHF)	470-806 MHz
Broadband wireless	746-764 MHz, 776-794 MHz
3G και 4G δίκτυα	1.7-1.85 GHz, 2.5-2.69 GHz
1G και 2G κυψελωτά	806-902 MHz
Προσωπικά συστήματα επικοινωνιών	1.85-1.99 GHz
Υπηρεσία ασύρματων επικοινωνιών	2.305-2.32 GHz, 2.345-2.36 GHz
Δορυφορικό ψηφιακό ραδιόφωνο	2.32-2.325 GHz
MMDS	2.15-2.68 GHz
Δορυφορική TV	12.2-12.7 GHz
LMDS	27.5-29.5 GHz, 31-31.3 GHz
Σταθερές ασύρματες υπηρεσίες	38.6-40 GHz

Πίνακας 1. Αδειοδοτημένες συχνότητες εύρους ζώνης στις ΗΠΑ

1.2.1 Διαχείριση φάσματος

Όταν ραδιοκύματα μεταδίδονται ταυτόχρονα από πολλαπλές πηγές στην ίδια συχνότητα μπορεί να προκληθεί παρεμβολή. Η διαχείριση συχνοτήτων / φάσματος απαιτείται για τον έλεγχο της μετάδοσης ραδιοκυμάτων ώστε να αποφευχθεί η παρεμβολή ανάμεσα στους ασύρματους χρήστες. Οι παραδοσιακές τεχνικές διαχείρισης φάσματος, όπως ορίζονται από την Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (Federal Communications Commission, FCC) βασίζονται στο μοντέλο command-and-control. Σε αυτό το μοντέλο, οι ζώνες συχνοτήτων αδειοδοτούνται στους χρήστες από την κυβέρνηση. Η συνηθισμένη μέθοδος για κατανομή αναφέρεται ως «δημοπρασία φάσματος» (spectrum auction). Σε μια δημοπρασία φάσματος, η κυβέρνηση διαθέτει μια ζώνη ραδιοσυχνοτήτων για υποβολή προσφορών και μπορεί να προσδιορίσει ένα συγκεκριμένο τύπο ασύρματης τεχνολογίας / εφαρμογής για αυτήν τη συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων. Οποιοσδήποτε χρήστης ή εταιρία που ενδιαφέρεται να χρησιμοποιήσει αυτή τη ζώνη συχνοτήτων υποβάλλει την προσφορά του. Η κυβέρνηση αποφασίζει τον νικητή χρήστη / εταιρία, ο οποίος είναι συνήθως ο χρήστης / εταιρία που προσφέρει το μεγαλύτερο ποσό. Ο χρήστης εξουσιοδοτείται να χρησιμοποιήσει τη ζώνη συχνοτήτων με ορισμένους κανόνες και κανονισμούς που καθορίζονται από την κυβέρνηση. Η διάρκεια της άδειας που εκδίδεται στον εξουσιοδοτημένο χρήστη επίσης καθορίζεται από την κυβέρνηση. Ενώ η διαχείριση του μεγαλύτερου μέρους του φάσματος γίνεται με το σχήμα command-and-control, υπάρχουν κάποιες ζώνες φάσματος που είναι κατοχυρωμένες για βιομηχανικούς, επιστημονικούς και ιατρικούς σκοπούς, οι οποίες αναφέρονται συνολικά ως βιομηχανική, επιστημονική και ιατρική ζώνη (Industrial Scientific Medical, ISM).

1.3 Πρωτόκολλα ασύρματων δικτύων

Στις ασύρματες επικοινωνίες ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία είναι το πρωτόκολλο. Σε αυτήν την περίπτωση, το σύστημα επικοινωνιών διαιρείται σε υποσυστήματα, τα στρώματα (layers). Διαφορετικά πρωτόκολλα χρησιμοποιούνται σε διαφορετικά στρώματα για διαφορετικές διεργασίες. Τα δεδομένα μεταφέρονται ανάμεσα στα στρώματα και επεξεργάζονται από τα αντίστοιχα πρωτόκολλα, τα οποία καθορίζουν τους κανόνες και τις συμβάσεις για την μετάδοση. Το πρωτόκολλο σε ένα συγκεκριμένο στρώμα βασίζεται σε πρωτόκολλο στο κατώτερο στρώμα να εκτελέσει πιο θεμελιώδεις ενέργειες. Επίσης, αυτό το πρωτόκολλο παρέχει υπηρεσίες στα πρωτόκολλα σε ανώτερο στρώμα. Σύμφωνα με το μοντέλο OSI (open systems interconnection), τα πέντε σημαντικά στρώματα των ασύρματων επικοινωνιών είναι τα εξής

- φυσικό στρώμα (physical layer) : τα πρωτόκολλα σε αυτό το στρώμα παρέχουν ένα φυσικό μηχανισμό για τη μετάδοση bits σήματος μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Στα ασύρματα συστήματα, τα πρωτόκολλα του φυσικού στρώματος εκτελούν τη διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση των η/μ κυμάτων που χρειάζονται για τη μετάδοση.
- στρώμα ζεύξης δεδομένων (data link layer) : αφού οι ασύρματες ζεύξεις συχνά μπορεί να είναι αναξιόπιστες, μια λειτουργία του στρώματος ζεύξης δεδομένων είναι να εκτελεί ανίχνευση και διόρθωση λαθών. Ένα μέρος του στρώματος ζεύξης δεδομένων, το υπόστρωμα MAC, είναι υπεύθυνο να επιτρέπει πακέτα δεδομένων να αποστέλλονται σε κοινό μέσο χωρίς παρεμβολή με άλλες μεταδόσεις. Αυτή η πτυχή αναφέρεται ως επικοινωνίες πολλαπλής πρόσβασης.
- στρώμα δικτύου (network layer) : τα πρωτόκολλα σε αυτό το στρώμα (δηλ. πρωτόκολλα δρομολόγησης) είναι υπεύθυνα για τον καθορισμό της δρομολόγησης των δεδομένων από τη πηγή στον προορισμό. Το Internet protocol (IP) είναι το προεπιλεγμένο πρωτόκολλο σε αυτό το στρώμα για να παρέχει τη λειτουργία δρομολόγησης ανάμεσα σε πολλαπλά δίκτυα. Αφού τα τεμαχικά συστήματα μπορεί να είναι κινητά, επομένως οι συσχετίσεις ανάμεσα στους κόμβους συνεχώς μεταβαλλόμενες, τα ασύρματα δίκτυα έχουν περισσότερες απαιτήσεις στο στρώμα δικτύου.
- στρώμα μεταφοράς (transport layer) : αυτό το στρώμα είναι υπεύθυνο για την αξιόπιστη και σε σειρά παράδοση των δεδομένων από άκρο σε άκρο και τον έλεγχο ροής στο δίκτυο ώστε να μην υπάρξει συμφόρηση. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο σε αυτό το στρώμα είναι το πρωτόκολλο ελέγχου μετάδοσης (Transmission Control Protocol, TCP). Το TCP αρχικά σχεδιάστηκε για ενσύρματα δίκτυα και από άκρο σε άκρο έλεγχο του ρυθμού μετάδοσης. Αυτό το πρωτόκολλο πρέπει να τροποποιηθεί ώστε να επιτύχει ικανοποιητική απόδοση σε ένα ασύρματο περιβάλλον επικοινωνιών

- στρώμα εφαρμογής (application layer) : τα πρωτόκολλα σε αυτό το στρώμα περιέχουν τη λογική που χρειάζεται για την υποστήριξη των διαφόρων εφαρμογών χρήστη. Για κάθε διαφορετικό τύπο εφαρμογής, όπως μεταφορά αρχείου ή πλοήγηση στο Internet, απαιτείται μια ξεχωριστή μονάδα, η οποία να είναι σχετική με την εφαρμογή

Υπάρχουν τρία βασικά στοιχεία στο φυσικό στρώμα: ο πομπός, το κανάλι και ο δέκτης. Ο πομπός είναι υπεύθυνος για τη λήψη των bits πληροφοριών από την πηγή πληροφοριών και την μετατροπή τους σε μορφή που να είναι κατάλληλη για ασύρματη μετάδοση. Ο πομπός διαμορφώνει το σήμα έτσι ώστε να μεταδοθεί αξιόπιστα μέσω του καναλιού, ενώ παράλληλα χρησιμοποιεί αποτελεσματικά τους περιορισμένους πόρους του μέσου μετάδοσης (δηλαδή τα ραδιοφάσμα). Το κανάλι είναι το μέσο για τη μεταφορά του σήματος που παράγεται από τον πομπό στο δέκτη. Σε ασύρματα συστήματα, τα προβλήματα του καναλιού περιλαμβάνουν παραμόρφωση του καναλιού (channel distortion), η οποία μπορεί να παίρνει τη μορφή των πολλαπλών διαδρομών, δηλαδή ενισχυτική και καταστρεπτική παρεμβολή ανάμεσα σε πολλά λαμβανόμενα αντίγραφα του ίδιου εκπεμπόμενου σήματος. Τα χαρακτηριστικά του καναλιού είναι συνήθως χρονικά μεταβαλλόμενα, λόγω είτε της κινητικότητας των χρηστών ή αλλαγών στο περιβάλλον διάδοσης. Η παρεμβολή και ο θόρυβος επηρεάζουν την ποιότητα της μετάδοσης στο ασύρματο μέσο. Αφού το σήμα έχει μεταδοθεί μέσω του καναλιού, ο δέκτης το λαμβάνει και παράγει μια εκτίμηση του εκπεμπόμενου σήματος (ή bit πληροφορίας).

Στο στρώμα ζεύξης δεδομένων, ένας μηχανισμός ανίχνευσης λαθών χρησιμοποιείται για να ανιχνεύσει τα λάθη στα λαμβανόμενα δεδομένα τα οποία προκαλούνται από θόρυβο και παρεμβολή. Επιπρόσθετα, ένας μηχανισμός ανίχνευσης λαθών θα παρέχει τη δυνατότητα διόρθωσης των εσφαλμένων δεδομένων.

Το πρωτόκολλο MAC περιγράφει τη μέθοδο ώστε πολλαπλοί ασύρματοι χρήστες να διαμοιράζονται το κανάλι. Οι τέσσερις διαφορετικές μέθοδοι για επικοινωνίες πολλαπλής πρόσβασης είναι οι εξής:

- πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Multiple Access, FDMA): το φάσμα διαμοιράζεται με την ανάθεση συγκεκριμένων καναλιών συχνοτήτων σε συγκεκριμένους χρήστες σε μόνιμη ή προσωρινή βάση
- πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου (Time Division Multiple Access, TDMA): η πρόσβαση σε όλο το φάσμα επιτρέπεται σε όλους τους χρήστες με την ανάθεση συγκεκριμένων χρονικών διαστημάτων στα οποία μπορούν να έχουν πρόσβαση σε προσωρινή ή μόνιμη βάση
- πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα (Code Division Multiple Access, CDMA): οι χρήστες επιτρέπεται να χρησιμοποιήσουν το διαθέσιμο φάσμα, αλλά το σήμα τους πρέπει να κρυπτογραφηθεί με έναν συγκεκριμένο κώδικα ώστε να ξεχωρίζει από άλλα σήματα

- πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χώρου (Space-Division Multiple Access, SDMA): το φάσμα διαμοιράζεται ανάμεσα στους χρήστες με την εκμετάλλευση της χωρικής κατανομής των κινητών χρηστών με τη χρήση έξυπνων κατευθυντικών κεραιών που ελαχιστοποιούν την παρεμβολή μεταξύ των κινητών χρηστών.

1.4 Διάδοση

Η ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά διάδοσης του καναλιού. Η διάδοση γενικά αλλάζει ανάλογα με την τοποθεσία και ποικίλει σημαντικά από το σχηματισμό το εδάφους, τη συχνότητα λειτουργίας, την ταχύτητα του κινητού τερματικού, τις πηγές παρεμβολών και άλλους δυναμικούς παράγοντες.

Η διάδοση ραδιοκυμάτων σε ανοιχτούς χώρους είναι πολύ διαφορετική από τη διάδοση σε εσωτερικούς χώρους και αστικές περιοχές. Σε ανοιχτούς χώρους σε μικρές αποστάσεις ή ελεύθερο χώρο, η ισχύς του σήματος μειώνεται ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης. Σε άλλες επιφάνειες, η ισχύς του σήματος συχνά μειώνεται με πολύ μεγαλύτερο ρυθμό ως συνάρτηση της απόστασης και εξαρτάται από το περιβάλλον και τη ραδιοσυχνότητα. Σε αστικές περιοχές, η συντομότερη απευθείας διαδρομή (line of sight, LOS διαδρομή) ανάμεσα σε πομπό και δέκτη μπλοκάρεται συνήθως από κτίρια ή άλλα χαρακτηριστικά του εδάφους. Τέτοιες περιπτώσεις λέγονται περιπτώσεις non-LOS (NLOS) ή εμποδιζόμενη LOS (obstructed LOS, OLOS), όπου το σήμα συνήθως μεταδίδεται μέσω ενός πλήθους έμμεσων διαδρομών με διάφορες εντάσεις σήματος. Η ένταση κάθε σήματος των NLOS και OLOS διαδρομών εξαρτάται από την απόσταση που έχουν διανύσει, τα εμπόδια από όπου έχουν ανακλαστεί ή έχουν διέλθει και την τοποθεσία των διάφορων αντικειμένων γύρω από τον πομπό και τον δέκτη. Επειδή τα σήματα από τον πομπό φθάνουν στο δέκτη μέσα από πολλαπλές διαδρομές παρατηρείται μια διασπορά καθυστέρησης (delay spread) που επηρεάζει τη λήψη δεδομένων. Ο ρυθμός διακυμάνσεων του καναλιού αναφέρεται ως ολίσθηση Doppler.

Οι βασικοί μηχανισμοί διάδοσης σε ένα κανάλι μπορούν να συνοψιστούν ως ακολούθως

- διάδοση ελεύθερου χώρου ή LOS: αυτός ο μηχανισμός αντιστοιχεί σε ένα καθαρό μονοπάτι διάδοσης ανάμεσα σε πομπό και δέκτη
- ανάκλαση: αυτή η περίπτωση ανακύπτει όταν το η/μ κύμα προσπίπτει σε επιφάνεια με διαστάσεις πολύ μεγαλύτερες από το μήκος κύματος
- περίθλαση: όταν το η/μ κύμα διαπερνάει μια μικρή σχισμή διαδίδεται στο άκρο της σχισμής. Λόγω της περίθλασης τα η/μ κύματα μπορούν να διαδοθούν γύρω από κτίρια και λόφους.

- διάχυση: το η/μ κύμα προσπίπτει σε ακανόνιστα αντικείμενα με ανομοιόμορφες επιφάνειες και οι ακτίνες διαχέονται σε όλες τις κατευθύνσεις στη μορφή σφαιρικών κυμάτων

Ως αποτέλεσμα της ανάκλασης, της περίθλασης και της διάχυσης η διάδοση μπορεί να χαρακτηριστεί από τρία σχεδόν ανεξάρτητα φαινόμενα: την απώλεια διαδρομής λόγω απόστασης, την αργή λογαριθμοκανονική σκίαση και τις γρήγορες διαλείψεις λόγω πολλαπλών διαδρομών.

1.4.1 Μοντέλα καναλιού

Το κανάλι μπορεί να χαρακτηριστεί σε μεγάλες και μικρές κλίμακες. Ένα μοντέλο διάδοσης μεγάλης κλίμακας χαρακτηρίζει την ένταση του σήματος σε μεγάλες αλλαγές της απόστασης πομπού και δέκτη και προβλέπει τη μέση ένταση του σήματος. Ένα μοντέλο διάδοσης μικρής κλίμακας χαρακτηρίζει τις γρήγορες μεταβολές στη λαμβανόμενη ένταση του σήματος για πολύ μικρές αποστάσεις διαδρομής (μερικά μήκη κύματος) ή μικρής διάρκειας.

Τα μοντέλα καναλιού διάδοσης μεγάλης κλίμακας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τα φυσικά μοντέλα και τα στατιστικά μοντέλα. Στα φυσικά μοντέλα, αναλύεται η φυσική του περιβάλλοντος διάδοσης και η γεωμετρία του χώρου πρέπει να ληφθεί υπόψιν. Παρόλο που το φυσικό μοντέλο παρέχει πιο αξιόπιστη εκτίμηση της συμπεριφοράς της διάδοσης είναι υπολογιστικά απαιτητικό. Από την άλλη, ένα στατιστικό μοντέλο βασίζεται στη μέτρηση των χαρακτηριστικών διάδοσης σε διάφορα περιβάλλοντα. Αυτά τα στατιστικά μοντέλα μπορούν να περιγραφούν και να χρησιμοποιηθούν πιο εύκολα από τα φυσικά αλλά δεν παρέχουν την ίδια ακρίβεια.

Τα κανάλια διάδοσης μικρής κλίμακας γενικά μοντελοποιούνται με βάση τη διασπορά και τη διάχυση που οφείλονται στις πολλαπλές διαδρομές. Τα τρία βασικά φαινόμενα που παρατηρούνται λόγω της διάχυσης είναι γρήγορες αλλαγές στην ένταση σήματος για μικρές μεταβολές στη θέση ή το χρόνο, τυχαίες διαμορφώσεις συχνότητας λόγω ολίσθησης Doppler και χρονική διασπορά επειδή κάθε διαδρομή διάδοσης έχει διαφορετική καθυστέρηση.

Τα τρία πιο συνηθισμένα στατιστικά μοντέλα για διαλείψεις μικρής κλίμακας περιγράφονται από τις κατανομές Rayleigh, Rice και Nakagami-m. Το μοντέλο καναλιού Rayleigh χρησιμοποιείται όταν δεν υπάρχει διαδρομή LOS ανάμεσα σε πομπό και δέκτη, ενώ στην περίπτωση που υπάρχει χρησιμοποιείται το μοντέλο Rice. Το μοντέλο Nakagami-m μπορεί να προσεγγίσει διαλείψεις κάπως χειρότερες από τις διαλείψεις Rayleigh.

1.5 Σκοπός Διπλωματικής

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός μηχανισμού για την βέλτιστη κατανομή ισχύος και επιλογή αναμεταδότη σε γνωστικό σύστημα με αναμετάδοση διπλής κατεύθυνσης. Τα γνωστικά συστήματα αποτελούν μια προτεινόμενη λύση για αποδοτικότερη αξιοποίηση των τηλεπικοινωνιακών πόρων. Συγκεκριμένα, θα μας απασχολήσει ο συνδυασμός της τεχνολογίας γνωστικών συστημάτων με μεθόδους των συνεργατικών επικοινωνιών, όπως είναι η χρήση αναμεταδοτών για επικοινωνία μεταξύ πομπού και δέκτη. Στο μοντέλο αυτό, κρίνεται αναγκαία η βέλτιστη εκχώρηση ισχύος στον πομπό, το δέκτη και τον αναμεταδότη του γνωστικού ραδιοδικτύου ώστε να τηρούνται συγκεκριμένοι περιορισμοί και προϋποθέσεις.

Στο Κεφάλαιο 1, πραγματοποιείται μια εισαγωγή σε βασικές έννοιες των ασύρματων επικοινωνιών. Αρχικά, παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η ανάθεση ραδιοπόρων σε αδειοδοτημένους (πρωτεύοντες) χρήστες. Στη συνέχεια, δίνεται μια περιγραφή του μοντέλου OSI και των επιμέρους στρωμάτων που το αποτελούν, ενώ τέλος αναφέρονται τα βασικά μοντέλα διάδοσης που χρησιμοποιούνται για τη περιγραφή καναλιών ασύρματων ζεύξεων.

Στο Κεφάλαιο 2, εξετάζεται η περίπτωση των γνωστικών συστημάτων ως μια τεχνολογία που επιτρέπει σε μη αδειοδοτημένους (δευτερεύοντες) χρήστες να αποκτήσουν πρόσβαση σε αδειοδοτημένες ζώνες του φάσματος χωρίς να προκαλούν πρόβλημα στους πρωτεύοντες χρήστες. Συγκεκριμένα, αναλύονται τα δομικά στοιχεία και οι λειτουργίες ενός γνωστικού συστήματος και μελετώνται τεχνικές για δυναμική πρόσβαση στο φάσμα καθώς και διαφορετικές μέθοδοι ανίχνευσης φάσματος. Στο τέλος, γίνεται μια αναφορά σε πλατφόρμες δοκιμών και σε πρότυπα που έχουν προταθεί για τα γνωστικά συστήματα.

Στο Κεφάλαιο 3, αναλύεται η έννοια των συνεργατικών επικοινωνιών και οι τρόποι με τους οποίους μπορούν να βοηθήσουν στην ανάπτυξη γνωστικών ραδιοδικτύων. Επίσης, παρουσιάζονται τα βασικά συνεργατικά πρωτόκολλα και το πρόβλημα κατανομής πόρων σε συνεργατικά γνωστικά ραδιοδίκτυα. Επιπλέον, μελετώνται οι στόχοι ενός τέτοιου συστήματος, οι μετρικές που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των επιδόσεων του και λύσεις που προτείνονται στη βιβλιογραφία σε προβλήματα που ανακύπτουν.

Στο Κεφάλαιο 4, υλοποιείται ένας μηχανισμός βέλτιστης εκχώρησης ισχύος και επιλογής αναμεταδότη σε γνωστικό ραδιοδίκτυο με αναμετάδοση διπλής κατεύθυνσης. Συγκεκριμένα, αναλύεται το μοντέλο του συστήματος, δίνεται η μαθηματική περιγραφή του και επιλύεται για δύο διαφορετικά πρωτόκολλα αναμετάδοσης (AF/DF). Στο τέλος, αναπτύσσεται αλγόριθμος που μοντελοποιεί το σύστημα σε περιβάλλον MatLab και μετά από μια σειρά προσομοιώσεων Monte Carlo γίνεται παρουσίαση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

2

Γνωστικά Συστήματα

2.1 Εισαγωγή

Η ταχεία ανάπτυξη νέων ασύρματων συσκευών και εφαρμογών την τελευταία δεκαετία έχει οδηγήσει στην αυξανόμενη ζήτηση εύρους ζώνης [2]. Ωστόσο, η πολιτική στατικής ανάθεσης φάσματος αποτελεί εμπόδιο σε μια πιο αποδοτική χρήση του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων, με αποτέλεσμα ένα μεγάλο μέρος του αδειοδοτημένου φάσματος να υποχρησιμοποιείται. Η μη αποτελεσματική χρήση των περιορισμένων φασματικών πόρων οδήγησε την επιστημονική κοινότητα στην επανεξέταση της πολιτικής εκχώρησης του εύρους ζώνης και στην αναζήτηση καινοτόμων τεχνολογιών επικοινωνιών που να μπορούν να εκμεταλλευτούν το εύρος ζώνης με έναν πιο έξυπνο και ευέλικτο τρόπο.

Μελέτη της Ομοσπονδιακής Επιτροπής Επικοινωνιών (Federal Communications Commission, FCC) έχει δείξει ότι ορισμένες ζώνες συχνοτήτων χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό από αδειοδοτημένα συστήματα σε συγκεκριμένες τοποθεσίες και ώρες, αλλά υπάρχουν πολλές ζώνες συχνοτήτων που είναι μερικώς κατειλημμένες ή παραμένουν ανεκμετάλλευτες [3]. Ο βασικός παράγοντας που οδηγεί σε αυτό το πρόβλημα είναι το καθεστώς αδειοδότησης φάσματος [1]. Το δικαίωμα για πρόσβαση στο φάσμα (ή άδεια) ορίζεται από τη συχνότητα, το χώρο, την ισχύ εκπομπής, τον ιδιοκτήτη του φάσματος (αδειούχος), τον τύπο χρήσης, και τη διάρκεια της άδειας. Η κλασική τεχνική κατανομής του φάσματος βασίζεται στο μοντέλο *command-and-control*, όπου το φάσμα που παρέχεται στους αδειοδοτημένους χρήστες (*licensed users*), ακόμα και όταν δεν χρησιμοποιείται, δεν μπορεί

να χρησιμοποιηθεί από μη αδειοδοτημένους χρήστες (unlicensed users) [4]. Εξαιτίας αυτής της στατικής κατανομής, τα υπάρχοντα ασύρματα συστήματα μπορούν να λειτουργούν μόνο σε μια αποκλειστική ζώνη συχνοτήτων και δεν είναι σε θέση να προσαρμόσουν την συχνότητα μετάδοσής τους ανάλογα με το μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Ουσιαστικά, αυτό οδηγεί σε χαμηλή χρησιμοποίηση του φάσματος και τη δημιουργία φασματικών κενών (spectrum holes). Τα φασματικά κενά ορίζονται ως ζώνες συχνοτήτων οι οποίες έχουν διατεθεί σε αδειοδοτημένους χρήστες, αλλά σε μερικές τοποθεσίες και ώρες δεν χρησιμοποιούνται και θα μπορούσαν να έχουν πρόσβαση μη αδειοδοτημένοι χρήστες [5]. Προκειμένου να γίνεται χρήση των φασματικών κενών θα πρέπει να τροποποιηθεί το καθεστώς αδειοδότησης φάσματος, ώστε να επιτρέπεται η πρόσβαση στο αχρησιμοποίητο φάσμα από μη αδειοδοτημένους χρήστες υπό συγκεκριμένους περιορισμούς.

Σε αυτήν την κατεύθυνση και προκειμένου να αντιμετωπιστεί το ζήτημα της χρησιμοποίησης του εύρους ζώνης, το 1999 προτάθηκε από τον J. Mitola, η έννοια των γνωστικών συστημάτων (cognitive radio, CR) [6]. Σύμφωνα με αυτήν την τεχνολογία, παρέχεται στους χρήστες ασύρματων δικτύων η δυνατότητα να προσαρμόσουν βέλτιστα τις παραμέτρους λειτουργίας τους ανάλογα με τις αλληλεπιδράσεις με το περιβάλλον ραδιοεπικοινωνιών. Βασικός στόχος των γνωστικών συστημάτων είναι να παρέχουν προσαρμοστικότητα στην ασύρματη μετάδοση μέσω δυναμικής πρόσβασης στο φάσμα (dynamic spectrum access, DSA) έτσι ώστε να μπορεί να βελτιστοποιηθεί η χρησιμοποίηση του φάσματος.

Ένας βασικός ορισμός για τα γνωστικά ραδιοσυστήματα, που δίνεται στο [5], είναι ο ακόλουθος : « Γνωστικό ραδιοσύστημα είναι ένα ευφυές σύστημα ασύρματων επικοινωνιών που έχει επίγνωση του περιβάλλοντός του. Ένας πομπός γνωστικού ραδιοσυστήματος θα μάθει από το περιβάλλον και θα προσαρμόσει τις εσωτερικές του καταστάσεις σε στατιστικές διακυμάνσεις στα υφιστάμενα ερεθίσματα ραδιοσυχνοτήτων ρυθμίζοντας τις παραμέτρους μετάδοσης (π.χ. ζώνη συχνοτήτων, σχήμα διαμόρφωσης και ισχύ εκπομπής) σε πραγματικό χρόνο και με απευθείας τρόπο». Διαφέρει από τα συμβατικά συστήματα στο ότι ένα CR μπορεί να εξοπλίσει τους χρήστες με γνωστική ικανότητα και αναδιάρθρωση (cognitive capability and reconfigurability) [5][7]. Η γνωστική ικανότητα αναφέρεται στη δυνατότητα να ανιχνεύσει και να συλλέξει πληροφορίες από το γειτονικό περιβάλλον, όπως πληροφορίες σχετικά με την συχνότητα μετάδοσης, το εύρος ζώνης, την ισχύ, το σχήμα διαμόρφωσης, κλπ. Η αναδιαμόρφωση αναφέρεται στην δυνατότητα γρήγορης προσαρμογής των παραμέτρων λειτουργίας με βάση της ανιχνευμένες πληροφορίες προκειμένου να επιτευχθεί βέλτιστη επίδοση.

Ένα γνωστικό ραδιοδίκτυο (cognitive radio network, CRN) μας δίνει τη δυνατότητα να εγκαταστήσουμε επικοινωνία ανάμεσα σε CR κόμβους/χρήστες. Οι παράμετροι επικοινωνίας μπορούν να ρυθμιστούν ανάλογα με τις αλλαγές στο περιβάλλον, την τοπολογία, συνθήκες λειτουργίας και τις απαιτήσεις χρήστη [8]. Οι δύο κύριοι στόχοι του γνωστικού ραδιοδικτύου

είναι να πετύχει ασύρματες επικοινωνίες υψηλής απόδοσης και αξιοπιστίας και να αυξήσει τη χρησιμοποίηση του φάσματος.

2.2 *Software Defined Radio (SDR)*

Τα γνωστικά ραδιοσυστήματα υλοποιούνται με βάση τις ραδιοεπικοινωνίες ελεγχόμενες από λογισμικό (Software Defined Radio, SDR). Το SDR είναι ένα επαναπροσδιοριζόμενο σύστημα επικοινωνιών στο οποίο οι παράμετροι μετάδοσης (π.χ. συχνότητα λειτουργίας, σχήμα διαμόρφωσης, και πρωτόκολλο) μπορούν να ελεγχθούν δυναμικά. Αυτή η λειτουργία επιτυγχάνεται από λογισμικό που εκτελεί αλγορίθμους επεξεργασίας σήματος. Οι βασικές λειτουργίες του SDR είναι λειτουργία σε πολλές ζώνες συχνοτήτων, και η υποστήριξη πολλών προτύπων, υπηρεσιών και καναλιών. Η διαφορά ενός SDR πομποδέκτη με έναν συμβατικό είναι ότι κάθε στοιχείο του μπορεί να ελεγχθεί από τα πρωτόκολλα στα ανώτερα στρώματα και μπορεί να επαναπροσδιοριστεί από το γνωστικό ραδιοσύστημα.

Ένα SDR αποτελείται κυρίως από πέντε βαθμίδες [9]:

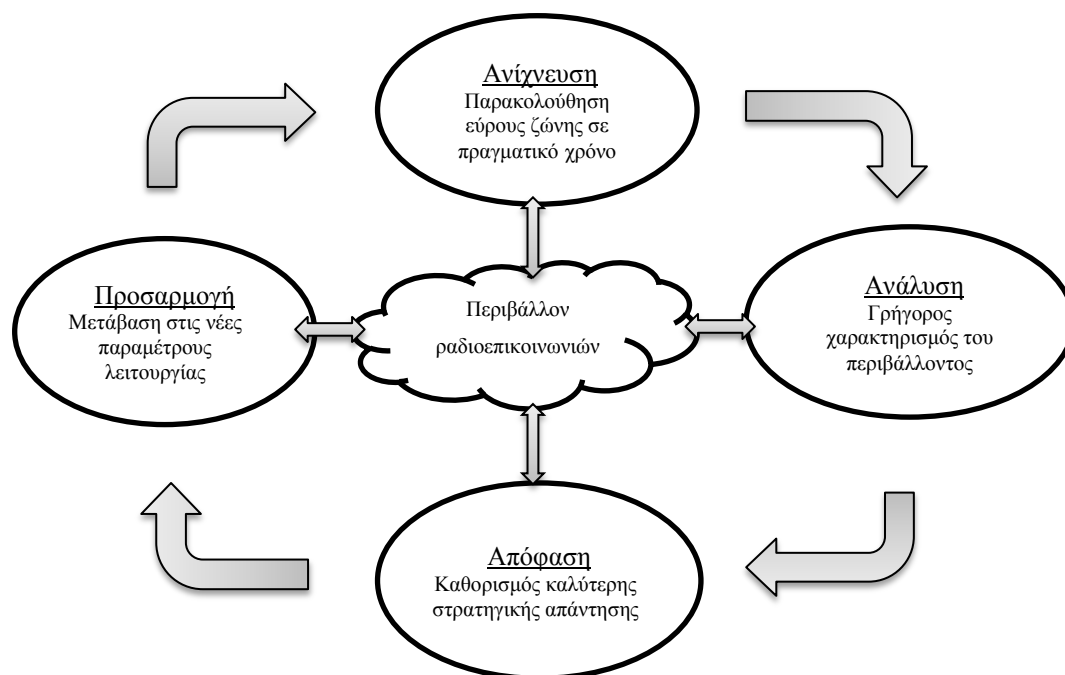
- Το τμήμα της κεραίας, η οποία λαμβάνει (ή εκπέμπει) πληροφορία κωδικοποιημένη σε ραδιοκύματα.
- Το τμήμα RF front-end, το οποίο είναι υπεύθυνο για τη εκπομπή/λήψη σημάτων ραδιοσυχνότητας από τη κεραία και τη μετατροπή τους σε μια ενδιάμεση συχνότητα (intermediate frequency, IF).
- Το ADC/DAC τμήμα, το οποίο εκτελεί analog-to-digital/digital-to-analog μετατροπή
- Τις βαθμίδες digital up-conversion (DUC) και digital down-conversion (DDC), οι οποίες εκτελούν τη διαμόρφωση του σήματος στην εκπομπή και την αποδιαμόρφωση στην λήψη
- Το τμήμα βασικής ζώνης, το οποίο εκτελεί λειτουργίες όπως εγκατάσταση σύνδεσης, εξισορρόπηση, μεταπήδηση συχνότητας, κωδικοποίηση / αποκωδικοποίηση, ενώ υλοποιεί και το πρωτόκολλο του στρώματος ζεύξης δεδομένων.

Οι παράμετροι μετάδοσης σε έναν SDR πομποδέκτη μπορούν να ρυθμιστούν ανάλογα με τις προδιαγραφές και τις απαιτήσεις του συστήματος [10]. Για παράδειγμα, είναι επιθυμητό να επαναρυθμίσουμε το σύστημα όταν αλλάζει η δομή του δικτύου ή όταν προστεθεί ένας νέος σταθμός βάσης. Οι παράμετροι μπορεί επίσης να αλλάξουν ανάλογα με την σύνδεση, δηλαδή ο πομποδέκτης επιλέγει ανάμεσα σε διαφορετικούς τρόπους πρόσβασης στο διαδίκτυο από αυτούς που είναι διαθέσιμοι βασιζόμενος στην απόδοση και την κοστολόγηση. Τέλος, οι παράμετροι μπορεί να αλλάζουν δυναμικά σε επίπεδο χρονοθυρίδας, για παράδειγμα η ισχύς εκπομπής μειώνεται όταν το επίπεδο παρεμβολής σε άλλους χρήστες είναι υψηλό ή η

συχνότητα λειτουργίας ενός μη αδειοδοτημένου χρήστη αλλάζει όταν ο αδειοδοτημένος χρήστης θέλει να χρησιμοποιήσει το φάσμα.

2.3 Λειτουργίες των Γνωστικών Συστημάτων

Ο τυπικός κύκλος ενεργειών του CR περιλαμβάνει εντοπισμό φασματικών κενών, επιλογή της καλύτερης ζώνης συχνοτήτων, συντονισμό με άλλους χρήστες για την πρόσβαση στο φάσμα και εγκατάλειψη της συχνότητας όταν εμφανιστεί ένας αδειοδοτημένος χρήστης. Αυτές οι ενέργειες υποστηρίζονται από τις εξής λειτουργίες του CR : α) ανίχνευση και ανάλυση φάσματος (spectrum sensing and analysis), β) διαχείριση φάσματος και μεταπομπή (spectrum management and handoff), γ) κατανομή και διαμοιρασμός του φάσματος (spectrum allocation and sharing) [2]. Η εναλλαγή αυτών των διαδικασιών ονομάζεται γνωστικός κύκλος (cognitive cycle) και παριστάνεται στο Σχήμα 1



Σχήμα 1. Γνωστικός κύκλος

Μέσω της ανίχνευσης και ανάλυσης φάσματος, το CR μπορεί να εντοπίσει τα φασματικά κενά, δηλ. ένα μέρος της ζώνης συχνοτήτων που δεν χρησιμοποιείται από τους αδειοδοτημένους χρήστες, ώστε να αξιοποιηθούν από μη αδειοδοτημένους χρήστες. Από την άλλη πλευρά, όταν οι αδειοδοτημένοι χρήστες αρχίζουν να χρησιμοποιούν το αδειοδοτημένο φάσμα, το CR μπορεί να εντοπίσει την δραστηριότητά τους μέσω της ανίχνευσης, έτσι ώστε να μην δημιουργηθεί επιβλαβή παρεμβολή εξαιτίας της εκπομπής των μη αδειοδοτημένων χρηστών.

Αφού αναγνωριστούν τα φασματικά κενά μέσω της ανίχνευσης, οι λειτουργίες διαχείρισης φάσματος και μεταπομπής του CR δίνουν τη δυνατότητα στους μη αδειοδοτημένους χρήστες να επιλέγουν την καλύτερη ζώνη συχνοτήτων και να μεταπηδούν ανάμεσα σε πολλαπλές ζώνες ανάλογα με τα χρονικά μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά του καναλιού προκειμένου να ικανοποιούν διάφορες απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας (quality-of-service, QoS) [7]. Για παράδειγμα, όταν ένας αδειοδοτημένος χρήστης ανακτήσει τη ζώνη συχνότητας, ο μη αδειοδοτημένος χρήστης που χρησιμοποιεί τη ζώνη μπορεί να αλλάξει τη συχνότητα εκπομπής σε άλλες διαθέσιμες, ανάλογα με τη χωρητικότητα καναλιού όπως αυτή καθορίζεται από το θόρυβο και τα επίπεδα παρεμβολής, τις απώλειες διαδρομής, το ποσοστό λαθών του καναλιού, κλπ.

Στην δυναμική πρόσβαση φάσματος, ένας μη αδειοδοτημένος χρήστης μπορεί να μοιραστεί τους φασματικούς πόρους με αδειοδοτημένους χρήστες, με άλλους μη αδειοδοτημένους χρήστες, ή και τα δύο. Έτσι, ένας καλός μηχανισμός για κατανομή και διαμοιρασμό φάσματος είναι καθοριστικός προκειμένου να επιτευχθεί υψηλή φασματική απόδοση (spectrum efficiency). Εφόσον, αδειοδοτημένοι χρήστες έχουν τα δικαιώματα χρήσης του φάσματος (spectrum rights), όταν μη αδειοδοτημένοι χρήστες συνυπάρχουν σε μια ζώνη συχνοτήτων με αδειοδοτημένους χρήστες, το επίπεδο παρεμβολής λόγω χρήσης του φάσματος από μη αδειοδοτημένους χρήστες θα πρέπει να περιοριστεί από ένα συγκεκριμένο κατώφλι. Όταν πολλαπλοί μη αδειοδοτημένοι χρήστες μοιράζονται μια ζώνη συχνοτήτων, η πρόσβασή τους θα πρέπει να συντονίζεται ώστε να μειωθούν οι συγκρούσεις και η παρεμβολή.

2.4 Στοιχεία ενός Γνωστικού Συστήματος

Τα διαφορετικά στοιχεία ενός πομποδέκτη γνωστικού ραδιοσυστήματος τα οποία υλοποιούν τις λειτουργίες του γνωστικού κύκλου είναι [1]:

- Πομπός / δέκτης : Ένας ασύρματος πομποδέκτης βασισμένος σε SDR είναι το κύριο στοιχείο με τις λειτουργίες μετάδοσης και λήψης σημάτων δεδομένων. Επιπλέον, ένας ασύρματος δέκτης χρησιμοποιείται για να παρατηρήσει τη δραστηριότητα στο φάσμα συχνοτήτων (δηλ. ανίχνευση φάσματος). Οι παράμετροι του πομποδέκτη στον CR κόμβο μπορούν να αλλάξουν δυναμικά όπως υπαγορεύεται από ανωτέρου στρώματος πρωτόκολλα.
- Αναλυτής φάσματος : Ο αναλυτής φάσματος (spectrum analyzer) χρησιμοποιεί σήματα μέτρησης για την ανάλυση της χρήσης του φάσματος (π.χ. να ανιχνεύσει την υπογραφή ενός σήματος από αδειοδοτημένο χρήστη και να βρει φασματικά κενά για την πρόσβαση μη αδειοδοτημένων χρηστών). Ο αναλυτής φάσματος πρέπει να διασφαλίσει ότι αν ένας μη αδειοδοτημένος χρήστης αποφασίσει να χρησιμοποιήσει το φάσμα δεν θα παρεμβάλει σε έναν αδειοδοτημένο χρήστη. Σε αυτήν την

περίπτωση, ποικίλες τεχνικές επεξεργασίας σήματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να λάβουμε πληροφορίες για τη χρήση του φάσματος.

- **Εξαγωγή γνώσης / εκμάθηση :** Στις διαδικασίες εκμάθησης και εξαγωγής γνώσης (knowledge extraction/learning) χρησιμοποιούνται οι πληροφορίες χρήσης του φάσματος για την κατανόηση του γειτονικού περιβάλλοντος ραδιοεπικοινωνιών (π.χ. η συμπεριφορά των αδειοδοτημένων χρηστών). Σταδιακά χτίζεται μια βάση γνώσης για την πρόσβαση στο φάσμα από άλλους χρήστες, η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση και την προσαρμογή των παραμέτρων μετάδοσης ώστε να επιτευχθεί ο επιθυμητός στόχος κάτω από διάφορους περιορισμούς. Αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης (machine learning) από τον χώρο της τεχνητής νοημοσύνης μπορούν να εφαρμοστούν για εκμάθηση και εξαγωγή γνώσης.
- **Λήψη απόφασης :** Αφότου η γνώση για τη χρήση του φάσματος είναι διαθέσιμη, πρέπει να ληφθεί η απόφαση για την πρόσβαση στο φάσμα. Η βέλτιστη απόφαση εξαρτάται από το γειτονικό περιβάλλον, δηλαδή από τη συνεργατική ή ανταγωνιστική συμπεριφορά των μη αδειοδοτημένων χρηστών. Διάφορες τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ληφθεί μια ιδανική λύση. Για παράδειγμα, θεωρία βελτιστοποίησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν το σύστημα μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μια ενιαία οντότητα με ένα και μοναδικό στόχο. Αντίθετα, όταν το σύστημα αποτελείται από πολλές οντότητες με διαφορετικό στόχο η καθεμία, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μοντέλα θεωρίας παιγνίων για τη λήψη βέλτιστης απόφασης. Επιπλέον, μοντέλα στοχαστικής βελτιστοποίησης μπορούν να εφαρμοστούν όταν οι καταστάσεις του συστήματος είναι τυχαίες.

2.5 Δυναμική πρόσβαση φάσματος

Η υλοποίηση του γνωστικού συστήματος βασίζεται στην δυναμική πρόσβαση φάσματος (Dynamic Spectrum Access, DSA) από τους μη αδειοδοτημένους χρήστες. Η δυναμική πρόσβαση φάσματος μπορεί να οριστεί [8] ως ένας μηχανισμός για την προσαρμογή της χρήσης των φασματικών πόρων σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, ως απάντηση στο μεταβαλλόμενο περιβάλλον και στόχο (π.χ. διαθέσιμο κανάλι και τύπος εφαρμογών), αλλαγές στην κατάσταση των ραδιοεπικοινωνιών (π.χ. τρόπος εκπομπής και τοποθεσία), και αλλαγές στους περιορισμούς.

Υπάρχουν τρία κύρια μοντέλα δυναμικής πρόσβασης φάσματος [11], ονομαστικά, κοινής χρήσης (commons-use), μοιρασμένης χρήσης (shared-use), και αποκλειστικής χρήσης (exclusive-use). Στο μοντέλο κοινής χρήσης, το φάσμα είναι ανοιχτό για πρόσβαση σε όλους τους χρήστες. Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται ήδη στην ISM ζώνη (industrial scientific medical) [12]. Σε αυτή την περίπτωση κανένας χρήστης δεν έχει άδεια χρήσης του φάσματος, έτσι όλοι έχουν τα ίδια δικαιώματα στη χρήση του. Στο μοντέλο μοιρασμένης χρήσης, ζώνες

συχνοτήτων κατανέμονται σε αδειοδοτημένους χρήστες (δηλ. πρωτεύοντες χρήστες – primary users, PU), στις οποίες ευκαιριακά μπορούν να έχουν πρόσβαση μη αδειοδοτημένοι χρήστες (δηλ. δευτερεύοντες χρήστες – secondary users, SU) όταν δεν είναι κατειλημμένες από πρωτεύοντες χρήστες. Στο μοντέλο αποκλειστικής χρήσης, ένας αδειοδοτημένος χρήστης μπορεί να επιτρέψει την πρόσβαση ενός μη αδειοδοτημένου χρήστη σε μια συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων για ορισμένο χρόνο [13]. Αυτό το μοντέλο είναι πιο ευέλικτο από το κλασικό σχήμα αδειοδότησης φάσματος command-and-control, καθώς ο τύπος χρήσης και ο αδειούχος του φάσματος μπορούν να αλλάξουν δυναμικά.

Μια άλλη ταξινόμηση [2][7] σχετίζεται με την αρχιτεκτονική του δικτύου. Όταν υπάρχει μια κεντρική οντότητα που ελέγχει και συντονίζει την κατανομή φάσματος και την πρόσβαση σε αυτό από τους δευτερεύοντες χρήστες, η κατανομή φάσματος είναι συγκεντρωτική (centralized). Εάν δεν υπάρχει κάποιος κεντρικός ελεγκτής, ενδεχομένως εξαιτίας του υψηλού κόστους κατασκευής μιας τέτοιας υποδομής ή λόγω του ad hoc χαρακτήρα του δικτύου όπως για έκτακτες ανάγκες ή στρατιωτική χρήση, το είδος του διαμοιρασμού φάσματος ανήκει στην κατηγορία του κατανεμημένου (distributed) διαμοιρασμού φάσματος. Στον κατανεμημένο διαμοιρασμό φάσματος, κάθε χρήστης παίρνει αποφάσεις για τη στρατηγική πρόσβασής του στο φάσμα, κυρίως βάσει τοπικής παρατήρησης της δυναμικής του φάσματος.

Τέλος, μπορούμε να διακρίνουμε δύο περιπτώσεις ανάλογα με την τακτική πρόσβασης των δευτερευόντων χρηστών [7]. Αν όλοι οι δευτερεύοντες χρήστες εργαστούν προς μια κοινή κατεύθυνση, για παράδειγμα ανήκουν στον ίδιο χειριστή ή πάροχο υπηρεσιών, θα καθοδηγήσουν την κατανομή και πρόσβασή τους με τέτοιο τρόπο ώστε να μεγιστοποιήσουν την κοινωνική πρόνοια. Αυτό ονομάζεται συνεργατικός (cooperative) διαμοιρασμός του φάσματος. Οι περισσότερες μορφές συγκεντρωτικής κατανομής φάσματος μπορούν να θεωρηθούν συνεργατικές. Από την άλλη πλευρά, δεν συμβαίνει πάντα όλοι οι δευτερεύοντες χρήστες να ανήκουν στον ίδιο πάροχο υπηρεσιών, π.χ αυτοί που έχουν πρόσβαση στην ανοιχτή φασματική ζώνη. Διαφορετικοί χρήστες έχουν διαφορετικούς στόχους και έτσι στοχεύουν μόνο στη μεγιστοποίηση του δικού τους οφέλους από τη χρήση των φασματικών πόρων. Εφόσον, οι χρήστες πλέον δεν συνεργάζονται για την επίτευξη κοινού στόχου, αυτού του είδους ο διαμοιρασμός φάσματος είναι μη συνεργατικός (noncooperative) και οι δευτερεύοντες χρήστες είναι εγωιστές με την έννοια ότι επιδιώκουν το δικό τους όφελος.

2.5.1 Τεχνικές πρόσβασης φάσματος βάσει παρουσίας πρωτευόντων χρηστών

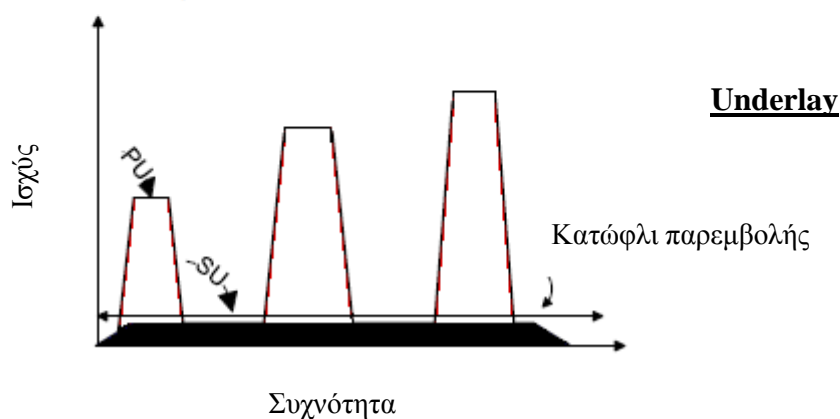
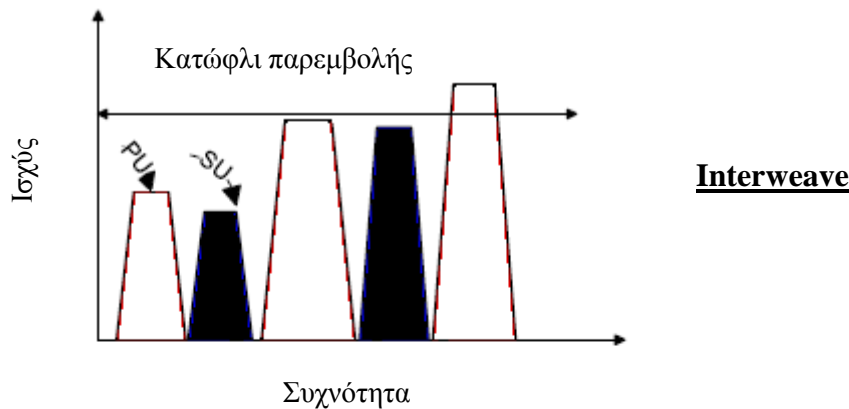
Ανάλογα με τη μέθοδο με την οποία οι δευτερεύοντες χρήστες επιχειρούν να εκμεταλλευτούν τα φασματικά κενά και να αποκτήσουν πρόσβαση στο φάσμα διακρίνονται τρεις βασικές τεχνικές [14].

Η προσέγγιση underlay περιλαμβάνει τεχνικές που επιτρέπουν την επικοινωνία του δευτερεύοντος χρήστη υποθέτοντας ότι έχει γνώση της παρεμβολής που προκαλείται από τον πομπό του στους δέκτες των πρωτεύοντων χρηστών. Συγκεκριμένα, η προσέγγιση underlay επιβάλλει ότι ταυτόχρονη δευτερεύουσα και πρωτεύουσα μετάδοση μπορούν να λάβουν μέρος μόνο αν η παρεμβολή που δημιουργείται από δευτερεύουσες συσκευές στους πρωτεύοντες δέκτες είναι κάτω από ένα αποδεκτό κατώφλι. Ο περιορισμός των παρεμβολών από τους δευτερεύοντες χρήστες μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση πολλαπλών κεραιών που θα κατευθύνουν το δευτερεύον σήμα μακριά από τους πρωτεύοντες δέκτες, ή χρησιμοποιώντας ένα μεγάλο εύρος ζώνης στο οποίο το δευτερεύον σήμα μπορεί να εξαπλωθεί κάτω από το επίπεδο θορύβου, και έπειτα να συμπτυχθεί στον δευτερεύον δέκτη. Η δεύτερη τεχνική είναι η βάση για τις επικοινωνίες εξάπλωσης φάσματος (spread spectrum) και εξαιρετικά ευρείας ζώνης (ultra-wide-band, UWB). Επειδή οι περιορισμοί παρεμβολών στα underlay συστήματα είναι τυπικά αρκετά αυστηροί, οι δευτερεύοντες χρήστες περιορίζονται σε επικοινωνίες μικρής εμβέλειας.

Στα overlay συστήματα ο δευτερεύων πομπός έχει γνώση για το codebook και τα μηνύματα του πρωτεύοντος χρήστη. Αυτή η γνώση μπορεί να αξιοποιηθεί με μια ποικιλία τρόπων ώστε να ακυρωθεί ή να μετριαστεί η παρεμβολή που γίνεται αντιληπτή στους δέκτες. Στη μια περίπτωση, αυτή η πληροφορία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να ακυρωθεί πλήρως η παρεμβολή λόγω πρωτεύοντων σημάτων στο δευτερεύον δέκτη με εξελιγμένες τεχνικές, όπως dirty paper coding (DPC). Στην άλλη περίπτωση, οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτή τη γνώση και να αναθέσουν μέρος της ισχύος τους για τη δική τους επικοινωνία και το υπόλοιπο της ισχύος για να βοηθήσουν (αναμετάδοση) τις μεταδόσεις πρωτεύοντων χρηστών. Με προσεκτική επιλογή της διαίρεσης ισχύος, η αύξηση του SNR πρωτεύοντος χρήστη λόγω βοήθειας από την αναμετάδοση του δευτερεύοντος χρήστη (cognitive relay) μπορεί να αντισταθμιστεί ακριβώς από την μείωση του SNR πρωτεύοντος λόγω της παρεμβολής που προκαλείται από το υπόλοιπο της ισχύος μετάδοσης του δευτερεύοντος χρήστη που χρησιμοποιείται για τις δικές του επικοινωνίες.

Στα interweave συστήματα βασιζόμαστε στο γεγονός ότι μεγάλο μέρος του φάσματος δεν χρησιμοποιείται τον περισσότερο χρόνο και υπάρχουν προσωρινά κενά στο χώρο, το χρόνο και τη συχνότητα γνωστά και ως φασματικά κενά. Αυτά τα κενά αλλάζουν με το χρόνο και την γεωγραφική τοποθεσία και μπορούν να αξιοποιηθούν από δευτερεύοντες χρήστες για τις επικοινωνίες τους. Έτσι, η χρησιμοποίηση του φάσματος βελτιώνεται με την ευκαιριακή επαναχρησιμοποίηση συχνότητας πάνω από τα φασματικά κενά. Η τεχνική interweave απαιτεί γνώση της δραστηριότητας των πρωτεύοντων χρηστών στο φάσμα και για αυτό ο δευτερεύων χρήστης παρακολουθεί περιοδικά το φάσμα και εντοπίζει την πληρότητα σε διαφορετικά τμήματα του φάσματος.

Στο Σχήμα 2 φαίνονται οι τεχνικές interweave και underlay.



Σχήμα 2. Interweave / Underlay

2.5.2 Αρχιτεκτονική γνωστικού δικτύου

Με την ανάπτυξη των CR τεχνολογιών, οι δευτερεύοντες χρήστες που δεν τους έχουν χορηγηθεί δικαιώματα χρήσης του φάσματος μπορούν να αξιοποιήσουν τις προσωρινά αχρησιμοποίητες ζώνες συχνοτήτων που ανήκουν στους πρωτεύοντες χρήστες. Επομένως, σε μια αρχιτεκτονική CR δικτύου (Cognitive Radio Network, CRN), τα μέρη που την αποτελούν περιλαμβάνουν ένα δευτερεύον δίκτυο (secondary network) και ένα πρωτεύον δίκτυο (primary network) [2].

Ένα δευτερεύον δίκτυο αποτελείται από ένα σύνολο δευτερευόντων χρηστών και έναν ή περισσότερους δευτερεύοντες σταθμούς βάσης. Η ευκαιριακή πρόσβαση στο φάσμα από τους δευτερεύοντες χρήστες συνήθως συντονίζεται από το δευτερεύον σταθμό βάσης, ο οποίος είναι ένα σταθερό στοιχείο υποδομής και εξυπηρετεί ως διανομέας (hub) σε ένα δευτερεύον δίκτυο. Οι δευτερεύοντες χρήστες και οι δευτερεύοντες σταθμοί βάσης είναι εξοπλισμένοι με λειτουργίες γνωστικού ραδιοσυστήματος. Εάν αρκετά δευτερεύοντα δίκτυα μοιράζονται μια κοινή ζώνη συχνοτήτων, η χρήση του φάσματος μπορεί να συντονίζεται από μια κεντρική

οντότητα του δικτύου, που ονομάζεται spectrum broker [15]. Ο spectrum broker συλλέγει πληροφορίες λειτουργίας από κάθε δευτερεύον δίκτυο, και κατανέμει τους πόρους του δικτύου με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτύχει αποδοτικό και δίκαιο διαμοιρασμό φάσματος.

Ένα πρωτεύον δίκτυο αποτελείται από ένα σύνολο πρωτευόντων χρηστών και έναν ή περισσότερους πρωτεύοντες σταθμούς βάσης. Οι πρωτεύοντες χρήστες έχουν εξουσιοδότηση να χρησιμοποιούν ορισμένες φασματικές ζώνες σύμφωνα με το συντονισμό των πρωτευόντων σταθμών βάσης. Η μετάδοσή τους δεν θα πρέπει να παρεμβάλεται με τους δευτερεύοντες χρήστες. Οι πρωτεύοντες χρήστες και οι πρωτεύοντες σταθμοί βάσης στη γενική περίπτωση δεν είναι εξοπλισμένοι με λειτουργίες γνωστικού ραδιοσυστήματος. Επομένως, εάν ένα δευτερεύον δίκτυο μοιράζεται μια ζώνη συχνοτήτων με ένα πρωτεύον δίκτυο, εκτός από τον εντοπισμό των φασματικών κενών και την αξιοποίηση της καλύτερης φασματικής ζώνης, το δευτερεύον δίκτυο απαιτείται να εντοπίσει αμέσως την παρουσία πρωτεύοντος χρήστη και να κατευθύνει τη δευτερεύουσα μετάδοση σε άλλη διαθέσιμη ζώνη ώστε να αποφευχθεί η παρεμβολή με την πρωτεύουσα μετάδοση.

2.6 Ανίχνευση φάσματος και ανάλυση

Η ανίχνευση και η ανάλυση φάσματος είναι το πρώτο κρίσιμο βήμα προς τη κατεύθυνση της δυναμικής διαχείρισης φάσματος [2]. Θα μελετήσουμε τρεις διαφορετικές πτυχές της ανίχνευσης φάσματος. Πρώτα είναι το μοντέλο θερμοκρασίας παρεμβολής, το οποίο μετράει το επίπεδο παρεμβολής που παρατηρείται σε έναν δέκτη και χρησιμοποιείται για να προστατεύσει τους πρωτεύοντες χρήστες από επιβλαβή παρεμβολή λόγω της δραστηριότητας μη αδειοδοτημένων δευτερόντων χρηστών. Έπειτα, θα μιλήσουμε για τον εντοπισμό φασματικών κενών ώστε να καθοριστούν πρόσθετοι φασματικοί πόροι και θα συγκρίνουμε διάφορες τεχνικές ανίχνευσης. Τέλος, θα αναφερθούμε σε συνεργατική ανίχνευση με πολλαπλούς χρήστες ή βοήθεια αναμεταδοτών.

2.6.1 Θερμοκρασία παρεμβολής

Οι δευτερεύοντες χρήστες δεν έχουν άδεια να χρησιμοποιήσουν το φάσμα, και μπορούν να χρησιμοποιήσουν το αδειοδοτημένο φάσμα μόνο εάν δεν προκαλούν επιβλαβή παρεμβολή στους πρωτεύοντες χρήστες. Αυτό απαιτεί οι δευτερεύοντες χρήστες να είναι εξοπλισμένοι με CR, τα οποία μπορούν να ανιχνεύσουν την παρουσία πρωτευόντων χρηστών και να αποφασίσουν ποιο τμήμα του φάσματος είναι διαθέσιμο. Μια τέτοια απόφαση μπορεί να ληφθεί σύμφωνα με διάφορους δείκτες μέτρησης. Ένας δείκτης για την εκτίμηση της παρεμβολής που έχει προταθεί από την FCC είναι η θερμοκρασία παρεμβολής (interference

temperature) [16]. Η θερμοκρασία παρεμβολής είναι μια μέτρηση της ηλεκτρομαγνητικής ισχύος που είναι διαθέσιμη σε μια κεραία λήψης και μεταφέρεται σε έναν δέκτη, αντικατοπτρίζοντας την ισχύ που παράγεται από άλλους πομπούς και πηγές θορύβου [17]. Συγκεκριμένα, ορίζεται ως η θερμοκρασία ισοδύναμη σε ηλεκτρομαγνητική ισχύ διαθέσιμη σε μια κεραία λήψης ανά μονάδα εύρους ζώνης [18], δηλαδή

$$T_I(f_c, B) = \frac{P_I(f_c, B)}{kB} \quad (2.1)$$

όπου $P_I(f_c, B)$ είναι η μέση ισχύς παρεμβολής σε Watts γύρω από μια κεντρική συχνότητα f_c , καλύπτοντας εύρος ζώνης B μετρούμενο σε Hertz και $k = 1.38 \times 10^{-23} J K^{-1}$ η σταθερά Boltzmann.

Με την έννοια της θερμοκρασίας παρεμβολής η FCC καθιέρωσε ένα όριο θερμοκρασίας παρεμβολής (interference-temperature limit), το οποίο παρέχει ένα μέγιστο μέγεθος της ανεκτή παρεμβολής για μια δεδομένη ζώνη συχνοτήτων σε συγκεκριμένη τοποθεσία. Όποιος μη αδειοδοτημένος δευτερεύων χρήστης χρησιμοποιεί αυτή τη ζώνη πρέπει να εγγυηθεί ότι η μετάδοσή του μαζί με τον θόρυβο και την παρεμβολή δεν θα παρεμβαίνει το όριο θερμοκρασίας παρεμβολής στον αδειοδοτημένο δέκτη.

Στο [18], έχουν αναλυθεί δύο εκδοχές του μοντέλου θερμοκρασίας παρεμβολής, επειδή υπάρχει ασάφεια πάνω στο ποια σήματα θεωρούνται παρεμβολή και στο ποια συχνότητα f_c και εύρος ζώνης B χρησιμοποιούνται. Το πρώτο είναι το ιδανικό μοντέλο θερμοκρασίας παρεμβολής, στο οποίο η παρεμβολή περιορίζεται αποκλειστικά σε πρωτεύοντα σήματα. Υποθέτουμε έναν δευτερεύων πομπό που λειτουργεί με μέση ισχύ P σε μια ζώνη $[f_c - B/2, f_c + B/2]$, ο οποίος επικαλύπτει n πρωτεύοντα σήματα με συχνότητα f_i και εύρος ζώνης B_i . Τότε το όριο θερμοκρασίας παρεμβολής θα εξασφαλίζει ότι

$$T_I(f_i, B_i) + \frac{MP}{kB_i} \leq T_L(f_i), \quad \forall 1 \leq i \leq n \quad (2.2)$$

όπου M συμβολίζει την απόσβεση λόγω διαλείψεων και απωλειών διαδρομής μεταξύ του δευτερεύοντος πομπού και του πρωτεύοντος δέκτη. Ωστόσο, είναι γενικά πολύ δύσκολο να διαχωρίσεις πρωτεύοντα σήματα από δευτερεύοντα ή να μετρήσεις το T_I στην παρουσία ενός πρωτεύοντος σήματος, εκτός αν είναι γνωστή κάποια a priori πληροφορία για το πρωτεύον σήμα. Ως εκ τούτου, έχει μελετηθεί ένα γενικευμένο μοντέλο, το οποίο δεν απαιτεί κάποια a priori γνώση για το περιβάλλον ραδιοσυχνοτήτων και περιορίζει τις παραμέτρους μετάδοσης του δευτερεύοντος χρήστη, αφού οι πληροφορίες για τους πρωτεύοντες δέκτες είναι άγνωστες. Στο γενικευμένο μοντέλο, το όριο θερμοκρασίας παρεμβολής εφαρμόζεται σε όλο το εύρος συχνοτήτων,

$$T_I(f_c, B) + \frac{MP}{kB} \leq T_L(f_c) \quad (2.3)$$

Το όριο θερμοκρασίας παρεμβολής καθορίζει το άνω όριο για την ισχύ εκπομπής ενός δευτερεύοντος χρήστη σε μια συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων [1]. Δεδομένου αυτού του άνω ορίου ισχύς εκπομπής, η φασματική χωρητικότητα (spectrum capacity) r (δηλ. rate) ενός δευτερεύοντος χρήστη μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση [19]

$$r = W \log \left(1 + \frac{S}{\sigma^2 + P_I} \right) \quad (2.4)$$

όπου W είναι το εύρος ζώνης, S είναι η ισχύς σήματος λήψης του δευτερεύοντος χρήστη, σ^2 είναι η ισχύς θορύβου, και P_I είναι η ισχύς παρεμβολής στο δέκτη του δευτερεύοντος χρήστη λόγω της μετάδοσης του πρωτεύοντος χρήστη.

Μια μέθοδος που έχει προταθεί για να βελτιώσει την φασματική απόδοση σε CR δίκτυα είναι η μορφοποίηση φάσματος (spectrum shaping) [20]. Συγκεκριμένα, ένα CR ανιχνεύει τη μορφή του φάσματος της ισχύος παρεμβολής και δημιουργεί φάσματα με αντίστροφη μορφή ως προς το τρέχον περιβάλλον παρεμβολών προκειμένου να εκμεταλλευτεί τα κενά ανάμεσα στο επίπεδο θορύβου και το άνω όριο της θερμοκρασίας παρεμβολής.

Δυναμική πρόσβαση φάσματος με απαιτήσεις QoS και περιορισμούς στη θερμοκρασία παρεμβολής έχει μελετηθεί στο [21]. Ο στόχος του συστήματος είναι η μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμιάδοσης (throughput) όλων των δευτερευόντων χρηστών σε ένα δίκτυο, περιορισμένο από μια ελάχιστη απαίτηση QoS και μια συνολική ισχύς λήψης σε ένα συγκεκριμένο σημείο μέτρησης.

2.6.2 Ανίχνευση φάσματος

Η ανίχνευση φάσματος δίνει την δυνατότητα σε ένα CR να μετρήσει, να μάθει και να είναι ενήμερο για τις συνθήκες στο περιβάλλον λειτουργίας του, όπως η διαθεσιμότητα φάσματος και η παρεμβολή. Όταν ανιχνευθεί ότι μια ορισμένη ζώνη συχνοτήτων δεν χρησιμοποιείται από τον πρωτεύον χρήστη της σε έναν συγκεκριμένο χρόνο σε μια συγκεκριμένη θέση, οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να αξιοποιήσουν το φάσμα, δηλ. υπάρχει μια ευκαιρία φάσματος (spectrum opportunity). Άρα, ανίχνευση φάσματος μπορεί να πραγματοποιηθεί σε περιοχές του χρόνου, της συχνότητας και του χώρου. Με την πρόσφατη ανάπτυξη την τεχνολογίας μορφοποίησης δέσμης (beamforming), πολλοί χρήστες μπορούν να χρησιμοποιήσουν το ίδιο κανάλι / συχνότητα τον ίδιο χρόνο στην ίδια γεωγραφική τοποθεσία. Έτσι, αν ένας πρωτεύων χρήστης δεν μεταδίδει προς όλες τις κατευθύνσεις, επιπλέον ευκαιρίες φάσματος μπορούν να δημιουργηθούν για τους δευτερεύοντες χρήστες στις κατευθύνσεις όπου ο πρωτεύων χρήστης δεν εκπέμπει, και κατά την ανίχνευση φάσματος πρέπει να ληφθούν υπόψη οι γωνίες άφιξης (angles of arrivals, AoAs) [22]-[24]. Μια πλούσια βιβλιογραφία σχετικά με την ανίχνευση φάσματος επικεντρώνεται στον

εντοπισμό πρωτεύοντος πομπού με βάση τοπικές μετρήσεις των δευτερευόντων χρηστών, αφού ο εντοπισμός ενός πρωτεύοντος χρήστη που λαμβάνει δεδομένα είναι γενικά πολύ δύσκολος. Σύμφωνα με την a priori πληροφορία που απαιτείται και την προκύπτουσα πολυπλοκότητα και ακρίβεια, οι τεχνικές ανίχνευσης φάσματος μπορούν να ταξινομηθούν στους ακόλουθους τύπους.

2.6.2.1 Ανιχνευτής ενέργειας

Η ανίχνευση ενέργειας (energy detection) είναι ο πιο κοινός τύπος ανάλυσης φάσματος επειδή είναι εύκολος στην υλοποίηση και δεν απαιτεί a priori γνώση για το πρωτεύον σήμα. Ας υποθέσουμε ότι το μοντέλο του λαμβανόμενου σήματος στον δευτερεύον πομπό είναι

$$\begin{aligned} H_0 : y(t) &= n(t) \\ H_1 : y(t) &= h x(t) + n(t) \end{aligned} \quad (2.5)$$

όπου $x(t)$ είναι το σήμα του πρωτεύοντος χρήστη, $n(t)$ είναι ο προσθετικός λευκός Gaussian θόρυβος (AWGN), και h είναι το κέρδος καναλιού από τον πομπό του πρωτεύοντος χρήστη στο δέκτη του δευτερευόντος χρήστη. H_0 είναι η μηδενική υπόθεση, που σημαίνει ότι δεν είναι παρών κανένας πρωτεύων χρήστης στη ζώνη, ενώ H_1 σημαίνει ότι έχουμε παρουσία πρωτεύοντος χρήστη. Το στατιστικό μέτρο της ανίχνευσης του ανιχνευτή ενέργειας μπορεί να οριστεί ως η μέση (ή συνολική) ενέργεια N παρατηρούμενων δειγμάτων

$$T = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |y(t)|^2 \quad (2.6)$$

Η απόφαση για το αν το φάσμα είναι κατειλημμένο από τον πρωτεύον χρήστη λαμβάνεται με τη σύγκριση του στατιστικού μέτρου ανίχνευσης T με ένα προκαθορισμένο κατώφλι λ . Η επίδοση του ανιχνευτή χαρακτηρίζεται από δύο πιθανότητες : την πιθανότητα εσφαλμένου συναγερμού (false alarm) P_F και την πιθανότητα ανίχνευσης P_D . Η P_F υποδηλώνει την πιθανότητα ο έλεγχος υπόθεσης να αποφασίσει H_1 ενώ είναι στην πραγματικότητα ισχύει H_0 , δηλ.

$$P_F = \Pr(T > \lambda | H_0) \quad (2.7)$$

Η P_D υποδηλώνει την πιθανότητα ότι ο έλεγχος αποφασίζει σωστά H_1 , δηλ.

$$P_D = \Pr(T > \lambda | H_1) \quad (2.8)$$

Ένας καλός ανιχνευτής θα πρέπει να εξασφαλίσει μια υψηλή πιθανότητα ανίχνευσης P_D και χαμηλή πιθανότητα εσφαλμένου συναγερμού P_F , ή θα πρέπει να βελτιστοποιήσει την αποδοτικότητα της χρήσης του φάσματος και παράλληλα να εγγραφεί ένα συγκεκριμένο επίπεδο προστασίας του πρωτεύοντος χρήστη. Εκτός από τη χαμηλή υπολογιστική

πολυπλοκότητα, την ευκολία υλοποίησης και το σύντομο χρόνο ανίχνευσης υπάρχουν και ορισμένες προκλήσεις στο σχεδιασμό ενός καλού ανιχνευτή ενέργειας. Πρώτον, το κατώφλι ανίχνευσης εξαρτάται από την ισχύ του θορύβου, η οποία μπορεί να αλλάξει με την πάροδο του χρόνου και είναι δύσκολο να μετρηθεί με ακρίβεια σε πραγματικό χρόνο. Σε συστήματα με χαμηλό SNR όπου η ισχύς θορύβου είναι πολύ υψηλή, αξιόπιστη ταυτοποίηση ενός πρωτεύοντος χρήστη δεν είναι καν εφικτή [25]. Επιπλέον, ένας ανιχνευτής ενέργειας μπορεί μόνο να αποφασίσει την παρουσία πρωτεύοντος χρήστη συγκρίνοντας την ενέργεια του σήματος λήψης με ένα κατώφλι έτσι δεν μπορεί να διαφοροποιήσει τον πρωτεύον χρήστη από άλλες άγνωστες πηγές σήματος με αποτέλεσμα να ενεργοποιεί συχνά εσφαλμένους συναγερμούς.

2.6.2.2 Ανιχνευτής χαρακτηριστικών

Υπάρχουν ειδικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τη μετάδοση πληροφοριών ενός πρωτεύοντος χρήστη. Για παράδειγμα, τα στατιστικά στοιχεία των μεταδιδόμενων σημάτων σε πολλά πρότυπα επικοινωνιών είναι περιοδικά λόγω των εγγενών περιοδικοτήτων, όπως ο ρυθμός διαμόρφωσης (modulation rate) και η συχνότητα φέροντος. Αυτά τα χαρακτηριστικά τα αντιμετωπίζουμε ως κυκλοστάσιμα (cyclostationary features) βάσει των οποίων ένας ανιχνευτής μπορεί να διακρίνει κυκλοστάσιμα σήματα από στάσιμο θόρυβο.

Η ανίχνευση κυκλοστάσιμων χαρακτηριστικών (cyclostationary feature detection) παρουσιάστηκε για πρώτη φορά στο [26]. Εφόσον, στα περισσότερα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, τα μεταδιδόμενα σήματα είναι διαμορφωμένα σήματα σε συνδυασμό με ημιτονοειδή φέροντα, παλμοσειρές, ακολουθίες μεταπήδησης ή κυκλικά προθέματα, ενώ ο προσθετικός θόρυβος είναι γενικά στάσιμος με την ευρεία έννοια (wide-sense stationary, WSS) χωρίς συσχέτιση, οι ανιχνευτές κυκλοστάσιμων χαρακτηριστικών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διαχωρίσουν θόρυβο από σήματα πρωτεύοντων χρηστών [27]-[39] και να διακρίνουν ανάμεσα σε διαφορετικούς τύπους από μεταδόσεις και πρωτεύοντα συστήματα [40].

Σε αντίθεση με έναν ανιχνευτή ενέργειας, ο οποίος χρησιμοποιεί ως στατιστικό ελέγχου την ενέργεια του σήματος υπολογισμένη στο πεδίο του χρόνου, ένας ανιχνευτής κυκλοστάσιμων χαρακτηριστικών εκτελεί έναν μετασχηματισμό από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο χαρακτηριστικών της συχνότητας και έπειτα διεξάγει έναν έλεγχο υπόθεσης στο νέο πεδίο. Συγκεκριμένα, ορίζεται η συνάρτηση κυκλικής αυτοσυσχέτισης (cyclic autocorrelation function, CAF) του λαμβανόμενου σήματος $y(t)$ από

$$R_y^a(\tau) = E \left[y(t+\tau) y^*(t-\tau) e^{j2\pi a t} \right] \quad (2.9)$$

όπου $E[\cdot]$ είναι ο τελεστής μέσης τιμής, το $*$ υποδηλώνει συζυγή μιγαδικό και a είναι η κυκλική συχνότητα. Δεδομένου ότι η περιοδικότητα είναι κοινή ιδιότητα των διαμορφωμένων σημάτων, ενώ ο θόρυβος είναι WSS, η CAF του λαμβανόμενου σήματος εμφανίζει περιοδικότητα όταν το πρωτεύον σήμα είναι παρόν. Έτσι, μπορούμε να παραστήσουμε την CAF χρησιμοποιώντας την ανάλυσή της σε σειρές Fourier που ονομάζεται συνάρτηση κυκλικής πυκνότητας φάσματος (cyclic spectrum density, CSD) και εκφράζεται ως [26]

$$S(f, a) = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} R_y^a(\tau) e^{-j2\pi f\tau} \quad (2.10)$$

Η συνάρτηση CSD έχει κορυφές όταν η κυκλική συχνότητα a ισούται με τις θεμελιώδεις συχνότητες του μεταδιδόμενου σήματος $x(t)$, δηλ. $a = k/T_x$ με την T_x να είναι η περίοδος του $x(t)$. Υπό την υπόθεση H_0 , η συνάρτηση CSD δεν έχει καμία κορυφή αφού ο θόρυβος είναι μη κυκλοστάσιμο σήμα. Ένας ανιχνευτής κορυφών (peak detector) [41] ή ένας γενικευμένος έλεγχος λόγου πιθανοφάνειας (generalized likelihood ratio test) [28][40] μπορεί να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω για να διακριθούν οι δύο υποθέσεις. Διαφορετικά πρωτεύοντα συστήματα επικοινωνιών που χρησιμοποιούν διαφορετικές διεπαφές αέρα (air interfaces) (σχήμα διαμόρφωσης, πολύπλεξη, κωδικοποίηση, κλπ.) μπορούν επίσης να διακριθούν από διαφορετικές τους ιδιότητες κυκλοστασιμότητας.

Σε σύγκριση με τον ανιχνευτή ενέργειας που είναι επιρρεπής σε υψηλή πιθανότητα εσφαλμένου συναγερού λόγω της αβεβαιότητας του θορύβου και δεν μπορεί να ανιχνεύσει αδύναμα σήματα σε συνθήκες θορύβου, ο ανιχνευτής κυκλοστασιμότητας είναι καλή εναλλακτική επειδή μπορεί να διαφοροποιήσει θόρυβο από σήματα πρωτεύοντων χρηστών και έχει καλύτερη ευρωστία ανίχνευσης σε συστήματα με χαμηλό SNR. Ωστόσο, η υπολογιστική πολυπλοκότητα και ο σημαντικός χρόνος παρατήρησης που απαιτείται για επαρκή επίδοση ανίχνευσης εμποδίζουν την ευρεία χρήση αυτής της μεθόδου.

Η ανίχνευση γενικευμένων χαρακτηριστικών (generalized feature detection) αναφέρεται στην ανίχνευση και ταξινόμηση που εξάγει περισσότερες πληροφορίες για χαρακτηριστικά εκτός από την κυκλοστασιμότητα, όπως η τεχνολογία μετάδοσης που χρησιμοποιεί ο πρωτεύων χρήστης, το ποσό ενέργειας και την κατανομή της ανάμεσα σε διαφορετικές συχνότητες [42][43], το εύρος ζώνης καναλιού και τη μορφή του [44][45], τη φασματική πυκνότητα ισχύος (power spectrum density, PSD) [46], τη κεντρική συχνότητα [45], κλπ. Ταιριάζοντας τα χαρακτηριστικά που εξάγονται από το λαμβανόμενο σήμα με την a priori πληροφορία για τα χαρακτηριστικά μετάδοσης των πρωτεύοντων χρηστών, μπορούμε να αναγνωρίσουμε τους πρωτεύοντες χρήστες.

2.6.2.3 Προσαρμοσμένο φιλτράρισμα και σύμφωνη ανίχνευση

Αν οι δευτερεύοντες χρήστες έχουν πληροφορίες σχετικά με το σήμα ενός πρωτεύοντος χρήστη τότε η βέλτιστη μέθοδος ανίχνευσης είναι το προσαρμοσμένο φιλτράρισμα (matched filtering) [47], καθώς ένα προσαρμοσμένο φίλτρο μπορεί να συσχετίσει το ήδη γνωστό πρωτεύον σήμα με το λαμβανόμενο σήμα για να ανιχνεύσει την παρουσία του πρωτεύοντος χρήστη και έτσι να μεγιστοποιήσει το SNR στην παρουσία προσθετικού στοχαστικού θόρυβου. Το πλεονέκτημα του προσαρμοσμένου φιλτραρίσματος είναι ο σύντομος χρόνος που απαιτείται για να επιτευχθεί μια ορισμένη επίδοση ανίχνευσης όπως χαμηλή πιθανότητα άστοχης ανίχνευσης και εσφαλμένου συναγερμού [48][49], αφού το προσαρμοσμένο φίλτρο χρειάζεται λιγότερα λαμβανόμενα δείγματα του σήματος. Ωστόσο, ο απαιτούμενος αριθμός δειγμάτων του σήματος αυξάνεται καθώς το λαμβανόμενο SNR μειώνεται, έτσι υπάρχει ένα κατώφλι για το SNR [25] στο προσαρμοσμένο φίλτρο. Επιπλέον, η πολυπλοκότητα υλοποίησης και η κατανάλωση ισχύος είναι πολύ υψηλή [31], επειδή το προσαρμοσμένο φίλτρο χρειάζεται δέκτες για όλα τα είδη σημάτων και αντίστοιχοι αλγόριθμοι πρέπει να εκτελεστούν στους δέκτες. Το προσαρμοσμένο φιλτράρισμα απαιτεί τέλεια γνώση του σήματος του πρωτεύοντος χρήστη, όπως η συχνότητα λειτουργίας, το εύρος ζώνης, τύπος διαμόρφωσης, σχήμα παλμού, μορφή πακέτου, κλπ. Εάν χρησιμοποιηθούν λάθος πληροφορίες για προσαρμοσμένο φιλτράρισμα, η απόδοση της ανίχνευσης θα υποβαθμιστεί κατά πολύ.

Από την άλλη, τα περισσότερα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα εμφανίζουν ορισμένα πρότυπα, όπως πιλοτικοί τόνοι (pilot tones), προοίμιο (preamble), και κώδικες εξάπλωσης (spreading codes), τα οποία χρησιμοποιούνται για να βοηθήσουν στον έλεγχο, τον συγχρονισμό, και τη συνέχεια ή για σκοπούς αναφοράς. Ακόμα και αν τέλεια πληροφορία σχετικά με το σήμα ενός κύριου χρήστη δεν είναι εφικτή, εάν ένα συγκεκριμένο μοτίβο από τα λαμβανόμενα σήματα είναι γνωστό, η σύμφωνη ανίχνευση (coherent detection) (ή ανίχνευση με βάση την κυματομορφή) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αποφασιστεί αν ο πρωτεύον χρήστης μεταδίδει ή όχι [50]-[52]. Ως παράδειγμα, εξηγείται η διαδικασία της σύμφωνης ανίχνευσης χρησιμοποιώντας ένα μοτίβο πιλότο [50].

Υπάρχουν δύο υποθέσεις στην σύμφωνη ανίχνευση:

$$\begin{aligned} H_0 : y(t) &= n(t) \\ H_1 : y(t) &= \sqrt{\varepsilon} x_p(t) + \sqrt{1-\varepsilon} x(t) + n(t) \end{aligned} \quad (2.11)$$

όπου $x_p(t)$ είναι γνωστός πιλοτικός τόνος, ε είναι ένα κλάσμα της ενέργειας κατανομημένη στον πιλοτικό τόνο, $x(t)$ είναι το επιθυμητό σήμα, το οποίο υποθέτουμε ότι είναι ορθογωνικό στον πιλοτικό τόνο, και $n(t)$ είναι λευκός προσθετικός θόρυβος. Το στατιστικό μέτρο ελέγχου της σύμφωνης ανίχνευσης ορίζεται ως η προβολή του λαμβανόμενου σήματος στην κατεύθυνση του πιλότου, δηλ.,

$$T = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N y(t) x_p(t) \quad (2.12)$$

όπου \hat{x}_p είναι ένα κανονικοποιημένο μοναδιαίο διάνυσμα στην κατεύθυνση του πιλοτικού τόνου. Όσο το N αυξάνεται, στο στατιστικό μέτρο ελέγχου T υπό την υπόθεση H_1 είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό υπό της H_0 . Συγκρίνοντας το T με ένα προκαθορισμένο κατώφλι ανίχνευσης μπορεί να ληφθεί απόφαση για την παρουσία ενός πρωτεύοντος χρήστη.

Η σύμφωνη ανίχνευση φαίνεται να είναι εύρωστη ενάντια στην αβεβαιότητα του θορύβου, και δεν περιορίζεται από το κατώφλι SNR [50] όσο το N είναι αρκετά μεγάλο. Ωστόσο, πληροφορίες σχετικά με τα μοτίβα κυματομορφής αποτελούν προϋπόθεση για την υλοποίηση σύμφωνης ανίχνευσης, όσο πιο ακριβή πληροφορία έχει ένας σύμφωνος ανιχνευτής τόσο καλύτερη θα είναι η απόδοση ανίχνευσης.

Ο Πίνακας 2 παραθέτει συνοπτικά τις βασικές μεθόδους ανίχνευσης φάσματος, καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους.

Τύπος	Στατιστικό μέτρο ελέγχου	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Ανίχνευτής ενέργειας	Ενέργεια των λαμβανόμενων σημάτων δειγμάτων	Εύκολα υλοποιήσιμο Δεν προϋποθέτει προηγούμενη γνώση για τα πρωτεύοντα σήματα	Υψηλό ποσοστό εσφαλμένων συναγερωμών λόγω αβεβαιότητας του θορύβου Πολύ αναξιόπιστο σε περιοχές χαμηλού SNR Δεν μπορεί να διακρίνει έναν πρωτεύων χρήστη από άλλες πηγές σήματος
Ανίχνευτής χαρακτηριστικών	Συνάρτηση κυκλικής πυκνότητας φάσματος του λαμβανόμενου σήματος, ή συγκρίνοντας γενικά χαρακτηριστικά του λαμβανόμενου σήματος με ήδη γνωστά του πρωτεύοντος σήματος	Πιο εύρωστα ενάντια στην αβεβαιότητα του θορύβου και καλύτερη ανίχνευση σε περιοχές με χαμηλό SNR από την ανίχνευση ενέργειας Μπορεί να διακρίνει ανάμεσα σε διαφορετικούς τύπους μετάδοσης και πρωτεύοντα συστήματα	Ειδικά χαρακτηριστικά, π.χ., κυκλοστάσιμα χαρακτηριστικά πρέπει να σχετίζονται με τα πρωτεύοντα σήματα
Προσαρμοσμένο φίλτράρισμα και σύμφωνη ανίχνευση	Προβολή λαμβανόμενου σήματος στην κατεύθυνση του ήδη γνωστού πρωτεύοντος σήματος ή ένα συγκεκριμένο μοτίβο κυματομορφής	Πιο εύρωστα ενάντια στην αβεβαιότητα το θορύβου και καλύτερη ανίχνευση σε περιοχές με χαμηλό SNR από την ανίχνευση χαρακτηριστικών Απαιτεί λιγότερα σήματα δείγματα για να επιτύχει καλή ανίχνευση	Απαιτεί ακριβή προηγούμενη πληροφορία για συγκεκριμένα μοτίβα κυματομορφών των πρωτεύοντων σημάτων Υψηλή πολυπλοκότητα

Πίνακας 2. Σύνοψη των κυριότερων τεχνικών ανίχνευσης φάσματος

2.6.3 Συνεργατική ανίχνευση

Η επίδοση της ανίχνευσης φάσματος περιορίζεται από την αβεβαιότητα του θορύβου, την σκίαση και την επίδραση των διαλείψεων λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης. Όταν το λαμβανόμενο πρωτεύον SNR είναι πολύ χαμηλό, υπάρχει ένα κατώφλι SNR, κάτω από το οποίο η αξιόπιστη ανίχνευση φάσματος είναι αδύνατη ακόμα και σε μεγάλο χρόνο ανίχνευσης. Αν οι δευτερεύοντες χρήστες δεν μπορούν να εντοπίσουν τον πρωτεύον πομπό, ενώ παράλληλα ο πρωτεύον δέκτης είναι εντός της εμβέλειας μετάδοσης των δευτερευόντων χρηστών, θα εμφανιστεί ένα πρόβλημα κρυμμένου πρωτεύοντος χρήστη, και θα υπάρξει παρεμβολή στη μετάδοση του πρωτεύοντος χρήστη.

Με την αξιοποίηση των ανεξάρτητων καναλιών διαλείψεων (fading channels) (δηλ. χωρική ποικιλομορφία – spatial diversity) και την ποικιλομορφία των χρηστών, η συνεργατική ανίχνευση φάσματος (cooperative spectrum sensing) προτείνεται για τη βελτίωση της αξιοπιστίας ανίχνευσης φάσματος, την αύξηση της πιθανότητας ανίχνευσης για την καλύτερη προστασία ενός πρωτεύοντος χρήστη, και τη μείωση του ποσοστού εσφαλμένου συναγερμού για να αξιοποιηθεί το αδρανές φάσμα πιο αποδοτικά. Στην συγκεντρωτική (centralized) συνεργατική ανίχνευση φάσματος, ένας κεντρικός ελεγκτής, π.χ. ένας δευτερεύων σταθμός βάσης, συλλέγει τοπικές παρατηρήσεις από πολλαπλούς δευτερεύοντες χρήστες, αποφασίζει για τα διαθέσιμα κανάλια φάσματος χρησιμοποιώντας κάποιον κανόνα decision-fusion, και ενημερώνει τους δευτερεύοντες χρήστες σε ποια κανάλια να πραγματοποιήσουν πρόσβαση. Στην κατανομημένη (distributed) συνεργατική ανίχνευση φάσματος, οι δευτερεύοντες χρήστες ανταλλάσσουν τα αποτελέσματα τοπικής ανίχνευσης μεταξύ τους, χωρίς να απαιτείται κάποια υποδομή κορμού, και έτσι με μειωμένο κόστος. Στην συνεργατική ανίχνευση φάσματος μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν αναμεταδότες (relays), όπως στο συνεργατικό σχήμα ανίχνευσης φάσματος που προτείνεται στο [53], όπου οι CR χρήστες που δραστηριοποιούνται στην ίδια ζώνη βοηθούν ο ένας τον άλλο να αναμεταδώσουν πληροφορία χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο ενίσχυση-και-προώθηση (amplify-and-forward).

Υπάρχουν επίσης αρκετές προκλήσεις στη συνεργατική ανίχνευση φάσματος. Για παράδειγμα, οι δευτερεύοντες χρήστες μπορεί να είναι συσκευές χαμηλού κόστους εφοδιασμένες μόνο με μια περιορισμένη ποσότητα ενέργειας, και έτσι δεν μπορούν να υποστηρίξουν περίπλοκο hardware ανίχνευσης και υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα. Σε συνεργατική ανίχνευση ευρείας ζώνης, πολλαπλοί δευτερεύοντες χρήστες πρέπει να σαρώσουν ένα μεγάλο εύρος καναλιών φάσματος και να μοιράζουν τα αποτελέσματα ανίχνευσης. Αυτό καταλήγει σε ανταλλαγή μεγάλης ποσότητας δεδομένων από τους αισθητήρες, υψηλή κατανάλωση ενέργειας και μη αποδοτική ρυθμαπόδοση δεδομένων. Αν το φασματικό περιβάλλον είναι αρκετά δυναμικό, οι ανιχνευμένες πληροφορίες μπορεί ακόμα να είναι ξεπερασμένες εξαιτίας της κινητικότητας χρήστη, διαλείψεις καναλιού, κλπ.

2.7 Πλατφόρμες γνωστικών συστημάτων

Πολλές από τις προσεγγίσεις που έχουν προταθεί για να βελτιωθεί η επίδοση της ανίχνευσης φάσματος και της δυναμικής πρόσβασης και διαμοιρασμού του φάσματος, επικεντρώνονται μόνο στη θεωρητική μοντελοποίηση και ανάλυση και λίγες από αυτές έχουν επαληθευθεί σε πρακτικό επίπεδο [2]. Ως εκ τούτου, πρέπει να αναπτυχθούν CR πλατφόρμες ως κλίινες δοκιμών πραγματικού περιβάλλοντος που θα μπορούν να ελέγξουν τη θεωρητική ανάλυση. Παρακάτω αναφέρουμε μερικές από τις πιο γνωστές πλατφόρμες.

Berkeley Wireless Research Center

Ερευνητές στο πανεπιστήμιο της California, Berkeley έχουν προτείνει μια πειραματική εγκατάσταση βασισμένη στην πλατφόρμα Berkeley Emulation Engine 2 (BEE2) [54] για να συγκρίνουν διαφορετικές τεχνικές ανίχνευσης και να αναπτύξουν μετρικές και περιπτώσεις δοκιμών ώστε να μετρήσουν την απόδοση ανίχνευσης. Συγκεκριμένα, ένα καλό CR σύστημα οφείλει να παρέχει επαρκή προστασία στον πρωτεύοντα χρήστη, με την έννοια ότι το CR μπορεί να εντοπίσει τον πρωτεύοντα χρήστη σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, με υψηλή πιθανότητα ανίχνευσης και χαμηλή πιθανότητα εσφαλμένου συναγερμού, και να εγκαταλείψει το φάσμα γρήγορα μετά από σωστή ανίχνευση. Αυτές οι μετρικές υπαγορεύουν καθορισμένες απαιτήσεις σε μια κλίιν δοκιμών CR, συμπεριλαμβανομένου της δυνατότητας να υποστηρίξει πολλαπλές επικοινωνιακές ζεύξεις, διαφορετικά είδη front-end, διαφορετικές περιοχές συχνοτήτων και γρήγορη ανταλλαγή πληροφοριών για ανίχνευση και συνεργασία. Το BEE2 μπορεί να ανταποκριθεί σε αυτές τις απαιτήσεις και να υποστηρίξει τα χαρακτηριστικά για μια κλίιν δοκιμών CR. Η πλακέτα του BEE2 μπορεί να συνδέσει έως και 18 front-ends, το οποίο επιτρέπει πειράματα με πολλαπλούς πρωτεύοντες χρήστες. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να εκτελέσει σύνθετη επεξεργασία σήματος με τη βοήθεια των FPGA (field programmable gate array), και η υψηλής ταχύτητας συνδέσεις μεταξύ των FPGA προωθούν την εξομοίωση της συνεργασίας μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών.

The Center for Wireless Telecommunications at Virginia Tech

Μια μηχανή CR βασισμένη σε καταναμημένο γενετικό αλγόριθμο (distributed genetic-algorithm) προτάθηκε στο [55][56]. Η γνωστική μηχανή επικεντρώνεται στο πως θα παρέχει CR δυνατότητα στο φυσικό και το MAC στρώμα ζεύξης δεδομένων. Το σύστημα έχει δομηθεί ώστε η γνωστική μηχανή να μπορεί να παρέχει γνωστική λειτουργικότητα που κλιμακώνεται με τους πρωτεύοντες χρήστες. Πληροφορίες σχετικά με το περιβάλλον ραδιοεπικοινωνιών και την τοποθεσία των χρηστών χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίζουν

καλύτερα το περιβάλλον και να επιλέξουν πιθανές ρυθμίσεις για τη μηχανή. Ο γνωστικός έλεγχος του συστήματος δίνει τη δυνατότητα διαστρωματικής (cross-layer) γνωστικής λειτουργίας και προσαρμογής με την κατηγοριοποίηση του παρατηρούμενου καναλιού, αντιστοίχισης της συμπεριφοράς του καναλιού με τους επιχειρησιακούς στόχους, και διαβίβασης των στόχων σε ένα ασύρματο σύστημα μονάδας προσαρμοστικού ελεγκτή γενετικού αλγορίθμου για τη σταδιακή βελτιστοποίηση της λειτουργίας.

WINLAB at Rutgers University

Ερευνητές στο πανεπιστήμιο Rutgers έχουν κατασκευάσει ένα Open Access Research Testbed for Next-Generation Wireless Networks (ORBIT) [57] για να εκτελέσουν πειράματα στα πλαίσια CR έρευνας. Η κλίνη δοκιμών ORBIT έχει αρχιτεκτονική δύο βαθμίδων, αποτελούμενη από έναν εξομοιωτή ραδιοδικτύου εσωτερικού χώρου για ελεγχόμενο πειραματισμό και ένα δίκτυο δοκιμών εξωτερικού χώρου για αξιολόγηση τελικού χρήστη σε ρυθμίσεις πραγματικού κόσμου.

2.8 Προτυποποίηση γνωστικών συστημάτων

2.8.1 IEEE SCC 41

Η IEEE Standards Coordinating Committee (SCC) 41 on Next Generation Radio and Spectrum Management έχει συσταθεί για να ξεκινήσει μια σειρά σχετικών προτύπων, συγκεκριμένα, τα IEEE 1900 [1][58]. Η IEEE SCC 41 ιδρύθηκε για να αντιμετωπίσει ζητήματα που σχετίζονται με την ανάπτυξη του δικτύου πρόσβασης νέας γενιάς και την αποτελεσματική διαχείριση του ραδιοφάσματος. Αποτελείται από τέσσερις ομάδες εργασίας και μία ομάδα μελέτης και καθεμία από αυτές τις ομάδες είναι υπεύθυνη για την έναρξη διαδικασιών προτυποποίησης σε διαφορετικές πτυχές ενός γνωστικού συστήματος. Τα κύρια μέρη από τα πρότυπα IEEE 1900 είναι τα ακόλουθα:

- IEEE 1900.1: Το μεγαλύτερο μέρος αυτού του προτύπου είναι να προσδιορίσει και να εξηγήσει ένα γλωσσάρι όρων και εννοιών που σχετίζονται με τη διαχείριση φάσματος, το SDR, προσαρμοστικά συστήματα (adaptive radio) και άλλες σχετικές τεχνολογίες. Επίσης, το πρότυπο περιγράφει τη διασύνδεση μεταξύ των βασικών όρων και εννοιών.
- IEEE 1900.2: Αυτό το πρότυπο αφορά την προτεινόμενη πρακτική για την ανάλυση της παρεμβολής και της συνύπαρξης. Το IEEE 1900.2 θα εισάγει ένα πλαίσιο για τη μέτρηση, τη διερεύνηση και την ανάλυση της παρεμβολής μεταξύ ασύρματων συσκευών. Αυτή η ομάδα εργασίας θα αναπτύξει μια κοινή πλατφόρμα για να

επιλύσει όποια σύγκρουση συμβαίνει σε γνωστικά συστήματα (π.χ. μεταξύ συσκευών που λειτουργούν στο ίδιο φάσμα).

- IEEE 1900.3: Το πρότυπο αυτό αφορά τη σύσταση της αξιολόγησης της συμμόρφωσης των μονάδων λογισμικού στο SDR. Ο κύριος στόχος του προτύπου είναι να εγγυηθεί τη συνύπαρξη και τη συμμόρφωση στο κομμάτι του λογισμικού. Αυτή η συμμόρφωση απαιτείται για την επικύρωση και την πιστοποίηση των τελικών CR προϊόντων.
- IEEE 1900.4: Αυτό το πρότυπο σχετίζεται με την υποστήριξη της συνύπαρξης για την επαναπροσδιοριζόμενη ετερογενή διεπαφή αέρα. Η ετερογένεια θα αποτελέσει βασικό χαρακτηριστικό σε ασύρματα συστήματα επόμενης γενιάς στα οποία μια ασύρματη συσκευή θα μπορεί να χρησιμοποιήσει πολλαπλές ασύρματες τεχνολογίες ταυτόχρονα. Επομένως, η δυναμική πρόσβαση φάσματος για να υποστηρίξει επιλογή υπηρεσίας και βελτιστοποίηση θα είναι βασικό στοιχείο. Η ομάδα εργασίας θα ορίσει μια συνολική αρχιτεκτονική συστήματος όπως και κύριες λειτουργίες του συστήματος.
- IEEE 1900.A: Η ευθύνη αυτής της ομάδας μελέτης αφορά την πιστοποίηση συσκευών που βασίζονται σε δυναμική πρόσβαση φάσματος. Μια συσκευή CR θα έχει περισσότερη ευελιξία από μια κλασική συσκευή, άρα η διαδικασία πιστοποίησης γίνεται πιο δύσκολη. Οι μελέτες θα περιλαμβάνουν μια ανάλυση κινδύνων απαριθμώντας τις πιθανές αιτίες παρεμβολής. Ο κατασκευαστής θα πρέπει να τις αποφύγει για να διασφαλίσει ότι η συσκευή θα συμμορφώνεται στους κανονισμούς.

2.8.2 IEEE 802.22

Έχει παρατηρηθεί ότι κάποιες ζώνες συχνοτήτων TV παραμένουν ανεκμετάλλευτες σε πολλές περιοχές. Αυτές οι ζώνες TV των 6 MHz μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επικοινωνία δεδομένων. Εφόσον, οι ζώνες TV είναι ως επί το πλείστον σε χαμηλές συχνότητες του φάσματος (π.χ 54-862 MHz στην Βόρεια Αμερική και 41-910 MHz διεθνώς), τα χαρακτηριστικά διάδοσής τους είναι πιο κατάλληλα για μεταδόσεις σε μεγάλες αποστάσεις. Το πρότυπο IEEE 802.22 έχει προταθεί για τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης περιφερειακών περιοχών (wireless regional area network, WRAN), το οποίο αναμένεται να υποστηρίξει κινητούς χρήστες σε μια κυψέλη με ακτίνα κάλυψης μέχρι 100 km. Αφού τα συστήματα που θα βασίζονται στο πρότυπο IEEE 802.22 θα επαναχρησιμοποιούν τις ζώνες TV, η έννοια των γνωστικών συστημάτων θα εφαρμοστεί για την αποφυγή παρεμβολών σε κατεστημένες αδειοδοτημένες υπηρεσίες (δηλ. τηλεοπτικές υπηρεσίες).

Η αρχιτεκτονική συστήματος ενός WRAN βασισμένο στο πρότυπο IEEE 802.22 είναι παρόμοια με αυτή των υπάρχοντων δικτύων ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης (broadband wireless access, BWA) όπως τα IEEE 802.16 WiMAX. Συγκεκριμένα, ένα WRAN βασίζεται σε συνδέσεις point-to-multipoint στις οποίες ο σταθμός βάσης (base station, BS) σε μια κυψέλη ελέγχει όλες τις συνδέσεις από τον εξοπλισμό του συνδρομητή (consumer premise

equipments, CPE). Για παράδειγμα, η πρόσβαση στο φάσμα από CPEs και το μέγεθος της ριπής μετάδοσης που κατανέμεται στους CPEs στη ζεύξη ανόδου (uplink) και την ζεύξη καθόδου (downlink) καθορίζονται από το σταθμό βάσης. Επίσης, σταθμοί βάσης αναμετάδοσης (relay base stations) μπορούν να εγκατασταθούν για την επέκταση της περιοχής κάλυψης ενός WRAN.

3

Συνεργατικές επικοινωνίες

3.1 Εισαγωγή

Η συνεργασία διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στα CRN επόμενης γενιάς, επιτρέποντας σε ασύρματες συσκευές χαμηλής ισχύος να επιτύχουν υψηλή ρυθμαπόδοση με τεχνικές όπως συνεργασία χρηστών (user cooperation), μορφοποίηση δέσμης (beamforming) και κατανομή ισχύος (power allocation) [63]. Οι βασικές τεχνικές συνεργασίας εκμεταλλεύονται τη χρονική και χωρική ποικιλομορφία για τη βελτίωση της απόδοσης του CRN. Τα πλεονεκτήματα των συνεργατικών επικοινωνιών στα CRN αναφέρονται στη χαμηλή ισχύ εκπομπής, στην υψηλή ενεργειακή απόδοση, στην υψηλή ρυθμαπόδοση, σε χαμηλές παρεμβολές σε πρωτεύοντα δίκτυα και καλύτερη κάλυψη δικτύου [59]-[62]. Παράλληλα όμως οι συνεργατικές τεχνικές στα CRN εισάγουν επίσης ορισμένα μειονεκτήματα, π.χ επιπλέον κίνηση αναμετάδοσης (relay traffic) και αύξηση καθυστέρησης από άκρο σε άκρο (end-to-end latency). Η πρόσφατη έρευνα στην περιοχή των CRN επικεντρώνεται σε δύο τύπους συνεργασίας, την αποκλειστική (dedicated) και τη δυναμική (dynamic) συνεργασία. Στην αποκλειστική συνεργασία, υπάρχουν δευτερεύουσες συσκευές που μπορούν να λειτουργούν μόνο ως αναμεταδότες ενώ στη δυναμική συνεργασία, κάθε δευτερεύων χρήστης μπορεί να συνεργαστεί με πρωτεύον ή δευτερεύον δίκτυο.

Στο [64] γίνεται μια επισκόπηση και εξετάζονται εφαρμογές που σχετίζονται με τη συνεργασία σε γνωστικά συστήματα. Μια ενεργή συνεργασία μεταξύ πρωτεύοντων και δευτερεύοντων χρηστών σε ετερογενή ad-hoc δίκτυα διερευνάται στο [65]. Οι συγγραφείς

προτείνουν ένα πρωτόκολλο συνεργασίας που επιτρέπει σε δευτερεύοντες χρήστες να αναμεταδίδουν σήματα πρωτευόντων χρηστών με αντάλλαγμα μέρος του φάσματος. Αυτή η συνεργασία μεγιστοποιεί την εξοικονόμηση ενέργειας των πρωτευόντων χρηστών και τη ρυθμιστική των δευτερευόντων χρηστών. Στο [66], οι συγγραφείς εισάγουν ένα νέο συνεργατικό σχήμα γνωστικής μετάδοσης όπου και ο πομπός και ο δέκτης του δευτερεύοντος χρήστη βοηθούν στην αναμετάδοση των σημάτων των πρωτευόντων χρηστών. Στο [67] πραγματοποιείται ανάλυση της πιθανότητας απόρριψης πακέτων (packet dropping probability) και του αντίστοιχου μηχανισμού ελέγχου αποδοχής (admission control mechanism) για τη διασφάλιση αποδεκτού QoS. Οι συγγραφείς ισχυρίζονται ότι το προτεινόμενο σχήμα παρέχει καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας από την απευθείας μετάδοση χωρίς συνεργατική αναμετάδοση. Οι συγγραφείς στο [68] αναλύουν ένα προσαρμοστικό πρωτόκολλο συνεργασίας για CR βασισμένο σε μορφοποίηση δέσμης, και παρουσιάζουν επίσης μια έκφραση κλειστής μορφής για την πιθανότητα διακοπής (outage probability) των δευτερευόντων χρηστών. Στο [69] συζητείται ένα παίγνιο επιλογής αναμεταδοτών (relay selection) και κατανομής πόρων χρησιμοποιώντας γράφημα συνασπισμού (coalition graph) για συνεργατικά CRN. Ένα μοντέλο κατανομής πόρων προσανατολισμένο σε συστάδες (cluster) για συνεργατικά CRN παρουσιάζεται στο [70]. Το μοντέλο βασίζεται στη δομή και το μέγεθος της συστάδας, την κυκλοφοριακή ροή, την κατάσταση του καναλιού σύνδεσης και την ύπαρξη λύσης εξαρτώμενης από την κίνηση των αναμεταδοτών.

Τα πιο διαδεδομένα πρωτόκολλα αναμετάδοσης που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία για να βελτιώσουν την επίδοση των ασυρμάτων δικτύων είναι τα ενίσχυση και προώθηση (amplify-and-forward, AF), αποκωδικοποίηση και προώθηση (decode-and-forward, DF), συμπίεση και προώθηση (compress-and-forward, CF) [71][59]. Σε ένα απλό AF σχήμα αναμετάδοσης, ένας αναμεταδότης ενισχύει το λαμβανόμενο σήμα και το προωθεί στον προορισμό. Στο DF σχήμα αναμετάδοσης, ένας αναμεταδότης πρώτα αποκωδικοποιεί το λαμβανόμενο σήμα και μετά εκπέμπει το επανακωδικοποιημένο σήμα στον προορισμό. Το CF σχήμα επιτρέπει στον αναμεταδότη να συμπίεσει το λαμβανόμενο σήμα από τον κόμβο προέλευσης και να το προωθήσει στον προορισμό. Η αναμετάδοση συμπίεσης και προώθησης είναι διαφορετική από τις αναμεταδόσεις DF και AF. Στην CF αναμετάδοση, μια κβαντισμένη και συμπιεσμένη έκδοση του λαμβανόμενου σήματος αναμεταδίδεται από τον αναμεταδότη ενώ στις DF και AF, ο αναμεταδότης αναμεταδίδει ένα αντίγραφο του λαμβανόμενου σήματος. Στην περίπτωση του CF, ο δέκτης θα χρησιμοποιήσει απαραίτητες τεχνικές συνδυασμού (combining techniques) για να συνδυάσει το απευθείας μη κβαντισμένο μη συμπιεσμένο σήμα με το αναμεταδιδόμενο κβαντισμένο και συμπιεσμένο σήμα. Ο δέκτης κάνει μια εκτίμηση του συμπιεσμένου και κβαντισμένου σήματος αποκωδικοποιώντας τη λαμβανόμενη ακολουθία των μεταδιδόμενων δεδομένων και έπειτα συνδυάζει την εκτίμηση με το απευθείας μη κβαντισμένο και μη συμπιεσμένο σήμα. Το πλεονέκτημα του AF

πρωτοκόλλου αναμετάδοσης είναι η απλότητα και το μειωμένο κόστος υλοποίησης. Αλλά η AF αναμετάδοση έχει μεγάλη πιθανότητα διάδοσης σφαλμάτων καθώς ο θόρυβος ενισχύεται μαζί με το σήμα στον αναμεταδότη. Με τη βοήθεια επιλεκτικής DF ή CF αναμετάδοσης, μπορούμε να αποφύγουμε τα ζητήματα της διάδοσης σφάλματος. Η CF αναμετάδοση καταναλώνει περισσότερη ενέργεια εξαιτίας των διαδικασιών αποκωδικοποίησης και συμπίεσης. Ένα σημαντικό ζήτημα του πρωτοκόλλου αναμετάδοσης είναι η πολυπλοκότητα στο δέκτη. Η πολυπλοκότητα στο δέκτη εξαρτάται από την τεχνική συνδυασμού που θα υλοποιήσει. Οι τεχνικές συνδυασμού είναι η συνδυαστική σταθερού κέρδους (equal gain combining, EGC), η συνδυαστική μέγιστου λόγου (maximal ratio combining, MRC), ο διακοπτόμενος συνδυασμός (switched combining) και ο επιλεκτικός συνδυασμός (selection combining, SC). Ο δέκτης με MRC έχει την υψηλότερη πολυπλοκότητα επεξεργασίας και υλοποίησης [72].

Οι αναμεταδότες σε πρωτόκολλα συνεργατικών επικοινωνιών μπορούν να λειτουργήσουν με δύο τρόπους, half-duplex ή full-duplex. Σε half-duplex αναμετάδοση, η μεταφορά κάθε συμβόλου από την πηγή στον προορισμό λαμβάνει χώρα σε δύο φάσεις (δύο χρονοσχισμές). Στην πρώτη φάση, η πηγή μεταδίδει το σύμβολο δεδομένων, και ο προορισμός και ο αναμεταδότης λαμβάνουν το σήμα που μεταφέρει το σύμβολο. Στην δεύτερη φάση, μόνο ο αναμεταδότης προωθεί τα δεδομένα στον προορισμό. Σε full-duplex αναμετάδοση οι αναμεταδότες μπορούν να εκπέμψουν και να λάβουν ταυτόχρονα. Η επίδοση ενός συνεργατικού συστήματος επικοινωνιών μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση πολλαπλών αναμεταδοτών, αντί για έναν αναμεταδότη, που μεταφέρουν την ίδια πληροφορία στον προορισμό. Με τη χρήση πολλαπλών αναμεταδοτών σε ένα δίκτυο που περιλαμβάνει μοναδική πηγή και πολλαπλούς προορισμούς ανακύπτει το ζήτημα του πως θα αναθέσουμε τους αναμεταδότες στους προορισμούς με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Η βελτιστοποίηση της ανάθεσης αναμεταδοτών και του ελέγχου ισχύος έχει συνδυαστικές πτυχές, και η εξαντλητική αναζήτηση για μια ακριβώς βέλτιστη λύση είναι μη πρακτική λόγω της υπολογιστικής πολυπλοκότητας [73].

3.2 Κατανομή πόρων σε συνεργατικά CRN

Σε αυτήν την ενότητα θα περιγράψουμε βασικά στοιχεία της κατανομής πόρων σε CRN με συνεργατική επικοινωνία και δυνατότητα πολλαπλών κεραιών. Τα στοιχεία όπως συνοψίζονται στο Σχήμα 3 περιλαμβάνουν

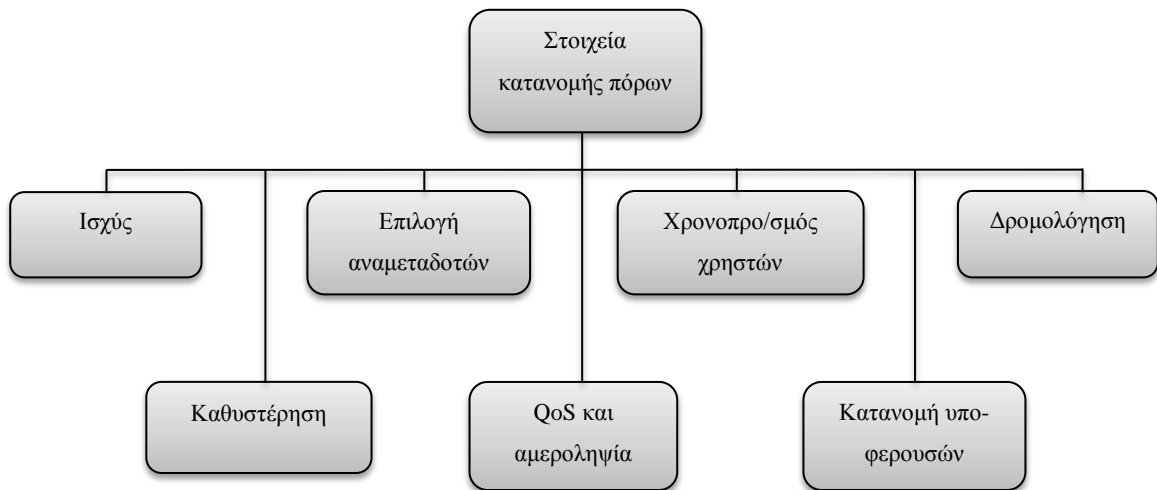
1. Κατανομή ισχύος (power allocation). Η αποδοτική κατανομή της ισχύος της πηγής και του αναμεταδότη είναι το κλειδί για όλα τα ασύρματα δίκτυα. Στην περίπτωση των συνεργατικών CRN, η αποδοτική κατανομή ισχύος είναι πιο δύσκολη από ότι

στα μη γνωστικά ασύρματα δίκτυα. Κλασικά σχήματα κατανομής ισχύος για μη γνωστικά συνεργατικά δίκτυα δεν είναι εφαρμόσιμα σε συνεργατικά CRN καθώς αυτά τα σχήματα μπορεί να προκαλέσουν μη αποδεκτή παρεμβολή στο πρωτεύον δίκτυο. Σε συνεργατικά CRN, η κατανομή ισχύος εκτελείται κάτω από τον περιορισμό της αποδεκτής παρεμβολής στους πρωτεύοντες χρήστες.

2. Ανάθεση/επιλογή αναμεταδοτών (relay assignment/selection). Η χρήση αναμεταδοτών σε ένα CRN μπορεί να ωφελήσει με δύο τρόπους. Πρώτα μπορεί να αυξήσει το ρυθμό μετάδοσης και κατά δεύτερο λόγο η χρήση αναμεταδοτών μπορεί να μειώσει τη συνολική ισχύ εκπομπής του συνολικού συστήματος. Η χρήση πολλών αναμεταδοτών ταυτόχρονα μπορεί να αυξήσει περαιτέρω την επίδοση ενός γνωστικού ραδιοδικτύου. Ένα καλά σχεδιασμένο σχήμα ανάθεσης πολλαπλών αναμεταδοτών και κατανομής ισχύος μπορεί να είναι χρήσιμο με δύο τρόπους. Μειώνει την παρεμβολή που προκαλείται στους πρωτεύοντες χρήστες σε ένα CRN πολλών χρηστών και αυξάνει τη συνδεσιμότητα (connectivity) του ασύρματου δικτύου. Σε ένα σύστημα πολλαπλών αναμεταδοτών, εάν κάποιος αναμεταδότης παρουσιάσει πρόβλημα ο δέκτης μπορεί ακόμα να λάβει δεδομένα από άλλους αναμεταδότες.
3. Χρονοπρογραμματισμός χρηστών (user scheduling). Σε συνεργατικά CRN πολλαπλών χρηστών, εξαιτίας των περιορισμένων πόρων και το όριο παρεμβολών, ο χρονοπρογραμματισμός χρηστών με ευφυή τρόπο μπορεί να επιτύχει υψηλή ρυθμαπόδοση. Τα σχήματα χρονοπρογραμματισμού χρηστών επιλέγουν τη καλύτερη ομάδα χρηστών σε κάθε χρονοθυρίδα για να μεγιστοποιήσουν τη συνολική ρυθμαπόδοση. Η πολυπλοκότητα μιας εξαντλητικής αναζήτησης για χρονοπρογραμματισμό χρηστών αυξάνεται εκθετικά με τον αριθμό των χρηστών. Για παράδειγμα, αν K είναι ο συνολικός αριθμός των χρηστών, τότε ο αριθμός των πιθανών τρόπων χρονοπρογραμματισμού/επιλογής k χρηστών είναι $\binom{K}{k}$. Η απαρίθμηση όλων των πιθανών συνδυασμών για να βρούμε αυτόν που δίνει την καλύτερη απόδοση είναι υπολογιστικά μη αποδοτική. Εξαιτίας της υψηλής υπολογιστικής πολυπλοκότητας της βέλτιστης επιλογής, ο αποδοτικός προγραμματισμός χρηστών σε συνεργατικά CRN είναι μία ενεργή περιοχή έρευνας.
4. Δρομολόγηση (routing). Το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας σε συνεργατικά CRN μέχρι σήμερα έχει επικεντρωθεί σε σενάρια με ένα ή δύο άλματα (one or two-hop). Με την πρόσφατη πρόοδο στα ad hoc δίκτυα, οι ερευνητές έχουν αρχίσει να αντιλαμβάνονται την σημασία και τις δυνατότητες των CRN πολλαπλών αλμάτων (multi-hop). Προκειμένου να αποκομίσουμε τα οφέλη της μετάδοσης πολλαπλών αλμάτων, νέες προκλήσεις πρέπει να αντιμετωπιστούν και να επιλυθούν. Ειδικότερα, αποδοτικές τεχνικές δρομολόγησης και λύσεις πρέπει να ενσωματωθούν σε ad hoc συνεργατικά CRN.
5. Ποιότητα υπηρεσίας (quality of service, QoS). Η QoS είναι ένας γενικός όρος που χρησιμοποιείται για πολλές απαιτήσεις που σχετίζονται με την ικανοποίηση του χρήστη. Περιλαμβάνει χρόνο απόκρισης, απώλειες ρυθμαπόδοσης, απαιτήσεις ρυθμού μετάδοσης, πιθανότητες διακοπής και απόρριψης. Ο κύριος στόχος της QoS

σε συνεργατικά CRN είναι να διασφαλίσει έναν ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης, μείωση στη καθυστέρηση (latency), στο jitter και στα σφάλματα πακέτων.

6. Καθυστέρηση (delay). Η καθυστέρηση είναι μια σημαντική μετρική σε κάθε ασύρματο δίκτυο κυρίως για real-time εφαρμογές όπως φωνή και πολυμέσα. Η καθυστέρηση στα συνεργατικά CRN είναι ακόμα ένα ανεξερεύνητο πεδίο έρευνας.
7. Κατανομή υπο-φερουσών (subcarrier allocation). Η κατανομή και η αντιστοίχιση υπο-φερουσών παίζει ένα σημαντικό ρόλο σε μελλοντικά συνεργατικά CRN που χρησιμοποιούν OFDM στο φυσικό στρώμα. Η ρυθμαπόδοση των συνεργατικών CRN μπορεί να αυξηθεί με την ευφυή αξιοποίηση των υπο-φερουσών.



Σχήμα 3. Βασικά στοιχεία κατανομής πόρων

Μια έρευνα στη διαχείριση ραδιοπόρων σε συνεργατικό δίκτυο βασισμένο σε OFDMA παρουσιάζεται στο [74]. Οι συγγραφείς έδωσαν μια γενική εικόνα στις πρόσφατες εξελίξεις στους αλγορίθμους κατανομής πόρων σε ασύρματα δίκτυα βασισμένα σε OFDMA με στατικούς αναμεταδότες (fixed relays) που χρησιμοποιούν το DF πρωτόκολλο.

Τα συνεργατικά CRN μπορούν να λειτουργήσουν είτε με συγκεντρωτικό (centralized) ή κατανεμημένο (distributed) τρόπο. Στα συγκεντρωτικά συνεργατικά CRN, η διαχείριση φάσματος εκτελείται σε έναν κεντρικό ελεγκτή όπως ένας σταθμός βάσης, χωρίς να υπάρχει κάποιος περιορισμός στην ανίχνευση φάσματος. Σε συγκεντρωτικά συνεργατικά CRN, γενικά, η ανίχνευση φάσματος εκτελείται σε κάθε δευτερεύον χρήστη και η απόφαση λαμβάνεται στον κεντρικό ελεγκτή [73][75]-[81]. Τα κατανεμημένα συνεργατικά CRN μπορούν να λειτουργήσουν με διαφορετικούς τρόπους. Μπορεί να είναι συνεργατικά ad hoc CRN ή μπορεί να είναι συγκεντρωτικού διαμοιρασμού φάσματος (centralized spectrum sharing) συνεργατικά CRN με κατανεμημένες αποφάσεις ανίχνευσης φάσματος [82]-[90]. Στα κατανεμημένα CRN η επιλογή και η ανάθεση των αναμεταδοτών γίνεται επίσης με κατανεμημένο τρόπο. Οι αναμεταδότες μπορούν να πάρουν τις δικές τους αποφάσεις για συνεργασία βασισμένοι σε μια στρατηγική ανταμοιβών (reward strategy). Στα κατανεμημένα

ad hoc συνεργατικά CRN, κάθε δευτερεύων χρήστης είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση φάσματος και την ανίχνευση φάσματος. Σε μερικά ad hoc συνεργατικά CRN, οποιοσδήποτε δευτερεύων χρήστης μπορεί να λειτουργήσει ως αναμεταδότης για πρωτεύον δίκτυο.

Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει το γενικό πρόβλημα κατανομής πόρων σε συνεργατικά CRN. Στο γενικό πρόβλημα κατανομής πόρων, οι παράμετροι/σταθερές εισόδου καθορίζονται από το διαχειριστή του δικτύου ή τις ρυθμιστικές αρχές. Σε συνεργατικά CRN, ο κεντρικός ελεγκτής γενικά γνωρίζει τους δευτερεύοντες χρήστες και τους αναμεταδότες στο δίκτυο. Στην περίπτωση συνεργασίας πρωτεύοντος και δευτερεύοντος δικτύου, είναι πιθανό ο κεντρικός ελεγκτής του συνεργατικού CRN να έχει πληροφορίες για τον αριθμό των πρωτευόντων χρηστών και τις αντίστοιχες γεωγραφικές τους τοποθεσίες. Η επιλογή του συνεργατικού πρωτοκόλλου εξαρτάται από τη φύση και τους περιορισμούς του ασύρματου δικτύου. Η γνώση της πληροφορίας κατάστασης καναλιού (channel state information, CSI) είναι μια σημαντική παράμετρος εισόδου. Οι περισσότεροι αλγόριθμοι κατανομής πόρων υποθέτουν ότι η CSI είναι γνωστή και στον πομπό και στο δέκτη.

<u>Δεδομένα/Είσοδοι</u>	: (οποιοσδήποτε συνδυασμός) Αριθμός δευτερευόντων χρηστών Αριθμός πρωτευόντων χρηστών Αριθμός αναμεταδοτών Κατώφλι παρεμβολής στους πρωτεύοντες χρήστες Τύπος συνεργατικού πρωτοκόλλου Πληροφορία κατάστασης καναλιού Γεωγραφικές τοποθεσίες των πρωτευόντων και δευτερευόντων συσκευών Διάφοροι είσοδοι σχετικοί με το δίκτυο
<u>Ζητούμενα</u>	: (οποιοσδήποτε συνδυασμός) Ισχύς αναμεταδότη Ισχύς πομπού (πηγή) Ανάθεση/επιλογή αναμεταδοτών Επιλογή χρηστών Ανάθεση εύρους ζώνης/υποφερουσών Καλύτερη δρομολόγηση Καλύτερη εγκατάσταση/τοποθέτηση αναμεταδοτών Διάφορες μεταβλητές σχετικές με το δίκτυο
<u>Στόχοι</u>	: (οποιοσδήποτε συνδυασμός) Ελαχιστοποίηση : Συνολική ισχύς συνεργατικού CRN Ελαχιστοποίηση : Ισχύς ανά κόμβο Ελαχιστοποίηση : Bit error rate (BER) Ελαχιστοποίηση : Πιθανότητα διακοπής Ελαχιστοποίηση : Καθυστέρηση Μεγιστοποίηση : Άθροισμα ρυθμών μετάδοσης Μεγιστοποίηση : Σταθμισμένο άθροισμα ρυθμών μετάδοσης Μεγιστοποίηση : Ενεργειακή απόδοση Μεγιστοποίηση : Ωφέλεια Max-Min : Χειρότερη χωρητικότητα χρήστη Max-Min : Χειρότερο SNR χρήστη Max-Min : Διάφοροι στόχοι σχετικοί με το δίκτυο
<u>Περιορισμοί</u>	: (οποιοσδήποτε συνδυασμός) Περιορισμός ισχύς αναμεταδότη Περιορισμός ισχύς πηγής Περιορισμός παρεμβολών Περιορισμός επιλογής/ανάθεσης αναμεταδοτών Περιορισμός QoS Περιορισμός εύρους ζώνης Περιορισμός καθυστέρησης Περιορισμός αμεροληψίας Περιορισμοί πιθανοτικής παρεμβολής και QoS Μακροπρόθεσμοι και βραχυπρόθεσμοι περιορισμοί Περιορισμοί τοπολογίας Περιορισμοί διακοπής Οικονομικοί περιορισμοί Διάφοροι περιορισμοί σχετικοί με το δίκτυο

Πίνακας 3. Γενικό πρόβλημα κατανομής πόρων

3.3 Ταξινόμηση συνεργατικών πρωτοκόλλων

Υπάρχει μια πληθώρα διαφορετικών πρωτοκόλλων στη βιβλιογραφία, αλλά τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται ευρέως στην έρευνα είναι τα AF, DF και CF. Τα συνεργατικά πρωτόκολλα λειτουργούν με δύο τρόπους, ορθογωνική λειτουργία (orthogonal mode) και λειτουργία διαμοιρασμένης ζώνης (shared band mode). Στην ορθογωνική

λειτουργία, πολλαπλοί αναμεταδότες μεταφέρουν τα ίδια δεδομένα στον προορισμό σε ορθογωνικά κανάλια π.χ., διαφορετικές χρονοσχισμές ή συχνότητες ή συνδυασμός και των δύο. Στα [76][78][79][87][90]-[94], οι συγγραφείς εξετάζουν τα σχήματα κατανομής ισχύος για συνεργατικά CRN που χρησιμοποιούν ορθογωνική AF αναμετάδοση. Μια βελτιστοποίηση με μορφοποίηση δέσμης για ορθογωνική AF αναμετάδοση σε συνεργατικά CRN προτείνεται στο [79]. Ανάλυση ευστάθειας και προσαρμοστική κατανομή ισχύος σε συνεργατικό AF προτείνεται στο [92]. Στο [91], οι συγγραφείς μελετούν επικοινωνία multipoint-to-multipoint σε CRN με τη χρήση ορθογωνικού AF σχήματος. Αναπτύσσουν μια τεχνική που βελτιστοποιεί από κοινού την ισχύ εκπομπής και τους συντελεστές μορφοποίησης δέσμης (beamforming weights) των αναμεταδοτών ενώ ικανοποιεί τους περιορισμούς συνολικής ισχύος εκπομπής πηγής και αναμεταδότη καθώς και τους επιμέρους περιορισμούς ισχύος των πηγών. Ο κύριος στόχος των συγγραφέων ήταν η μεγιστοποίηση του χειρότερου λόγου σημά-προς-παρεμβολή-και-θόρυβο (SNIR) στους προορισμούς.

Στο [75], οι συγγραφείς εκτελούν από κοινού επιλογή αναμεταδοτών και φάσματος σε CRN χρησιμοποιώντας παράλληλο DF σχήμα. Στο [60], οι συγγραφείς προτείνουν πρωτόκολλα που εκμεταλλεύονται το φαινόμενο της εκρηκτικότητας πηγής (source burstiness) σε CRN χρησιμοποιώντας DF αναμετάδοση. Σε αυτό το σχήμα, ο γνωστικός αναμεταδότης αξιοποιεί τις περιόδους σιωπής των τερματικών για να επιτρέψει τη συνεργασία. Επίσης, αναλύουν τη μέγιστη ευσταθή ρυθμαπόδοση και την καθυστέρηση στα προτεινόμενα πρωτόκολλα. Στο [95], οι συγγραφείς ερευνούν το πρόβλημα της διαχείρισης πόρων με πολλούς χρήστες σε multi-hop CRN για εφαρμογές ευαίσθητες στην καθυστέρηση. Προτείνουν έναν αλγόριθμο κατανεμημένης διαχείρισης πόρων που επιτρέπει στους κόμβους δικτύου να ανταλλάξουν πληροφορίες και εκτιμά τις καθυστερήσεις και το κόστος ανταλλαγής της πληροφορίας δικτύου στο multi-hop CRN. Μια επιλογή αναμεταδοτών χαμηλής παρεμβολής για DF συνεργατικό δίκτυο σε underlay συνεργατικά CRN μελετάται στο [96]. Στα [97][98][99], διερευνώνται αναμεταδότες διπλής κατεύθυνσης (two-way relays) για συνεργατικά CRN.

Στο [100], οι συγγραφείς πρότειναν ένα σχήμα κωδικοποίησης που χρησιμοποιεί CF αναμετάδοση για CRN βασισμένη σε Wyner-Ziv. Στην CF αναμετάδοση, η συμπιεσμένη κωδική λέξη (compressed codeword) αποτελείται από δύο μηνύματα δηλ., κοινά και ιδιωτικά μηνύματα. Εφαρμόζουν κωδικοποίηση Marton με κοινή πληροφορία για την από κοινού χαρτογράφηση της ιδιωτικής πληροφορίας. Οι συγγραφείς επίσης καθορίζουν την εφικτή περιοχή ρυθμού μετάδοσης για το προτεινόμενο CF σχήμα αναμετάδοσης. Στο [101], οι συγγραφείς συγκρίνουν τη βέλτιστη κατανομή ισχύος εκπομπής για multi-band αναμετάδοση στα πρωτόκολλα AF, CF και DF. Μια σύγκριση της μη ορθογωνικής και ορθογωνικής AF, CF και DF αναμετάδοσης σε CRN παρουσιάζεται στο [102]. Αποδεικνύουν ότι με χαμηλή ισχύ εκπομπής η μη ορθογωνική AF αναμετάδοση έχει καλύτερη επίδοση από τις DF, CF και ορθογωνική AF αναμεταδόσεις. Στο [103], οι συγγραφείς ερευνούν μια

στρατηγική αναμετάδοσης που είναι συνδυασμός DF και CF αναμετάδοσης σε CRN και βρίσκουν την εφικτή περιοχή ρυθμού μετάδοσης.

Στη λειτουργία διαμοιρασμένης ζώνης, πολλαπλοί αναμεταδότες στέλνουν τα ίδια δεδομένα στον προορισμό ταυτόχρονα στην ίδια συχνότητα και στην ίδια χρονοσχισμή. Στο [72], οι συγγραφείς εξετάζουν τους εφικτούς ρυθμούς μετάδοσης με AF και DF συνεργατικές στρατηγικές διαμοιρασμένης ζώνης. Ένας αυστηρός συγχρονισμός μεταξύ των αναμεταδοτών είναι απαραίτητος σε λειτουργία διαμοιρασμένης ζώνης για την αποφυγή παρεμβολής. Η καθυστέρηση σε multi-hop ασύρματα δίκτυα είναι ένα σοβαρό ζήτημα στη σχεδίαση συνεργατικών CRN. Για την αποφυγή της καθυστέρησης στις επικοινωνίες, αντί για πολλαπλούς ορθογωνικούς αναμεταδότες ή multi-hop επικοινωνία, στο [73], [104] και [105] οι συγγραφείς προτείνουν two-hop επικοινωνία AF διαμοιρασμένης ζώνης. Σε two-hop επικοινωνία AF διαμοιρασμένης ζώνης, ο δέκτης θα πάρει τα ίδια δεδομένα ταυτόχρονα από πολλούς αναμεταδότες στην ίδια συχνότητα και στην ίδια χρονοθυρίδα. Η επίδοση των αναμεταδοτών σε διαμοιρασμένη ζώνη είναι καλύτερη από την επίδοση των ορθογωνικών αναμεταδοτών, αλλά η δομή του δέκτη των σχημάτων διαμοιρασμένης ζώνης είναι πιο πολύπλοκη.

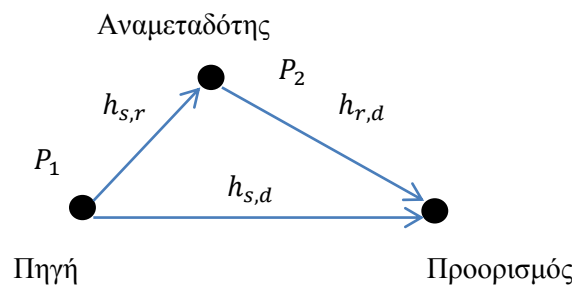
Μια ερώτηση που τίθεται συχνά στην επιστημονική κοινότητα είναι ποιο πρωτόκολλο αναμετάδοσης είναι πιο κατάλληλο σε συνεργατικά CRN. Στο [106], οι συγγραφείς παρουσιάζουν τη σύγκριση μεταξύ της AF και DF αναμετάδοσης σε συνεργατικά CRN. Θεώρησαν βέλτιστη ανίχνευση φάσματος και πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης ανίχνευσης φέροντος (carrier sensed multiple access, CSMA) για πρόσβαση στο φάσμα και πήραν εκφράσεις κλειστής μορφής για τη ρυθμαπόδοση δικτύου χρησιμοποιώντας AF και DF αναμετάδοση. Από τα αποτελέσματα, συμπεράναν ότι και οι δύο στρατηγικές αναμετάδοσης έχουν πλεονεκτήματα η μία υπέρ της άλλης κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες και εύρος παραμέτρων. Η διαθέσιμη βιβλιογραφία σε συνεργατικά CRN γενικά ασχολείται με half-duplex πρωτόκολλα αναμετάδοσης. Η επίδοση της full-duplex αναμετάδοσης σε συνεργατικά CRN είναι ακόμα ένα ανοιχτό πεδίο έρευνας. Επίσης, η σύγκριση CF με DF και AF είναι ακόμα ένα ανοιχτό πεδίο έρευνας.

3.3.1 AF και DF αναμετάδοση

Μια άλλη κατηγοριοποίηση που μπορεί να γίνει στις συνεργατικές επικοινωνίες είναι τα σχήματα στατικής αναμετάδοσης (fixed relaying schemes) και τα σχήματα προσαρμοστικής αναμετάδοσης (adaptive relaying schemes) [130]. Στην στατική αναμετάδοση, οι πόροι του καναλιού διαμοιράζονται ανάμεσα στην πηγή και τον αναμεταδότη με έναν στατικό (ντετερμινιστικό) τρόπο. Η στατική αναμετάδοση έχει το πλεονέκτημα της εύκολης υλοποίησης αλλά το μειονέκτημα της χαμηλής αποδοτικότητας

εύρους ζώνης. Αυτό συμβαίνει επειδή οι μισοί από τους πόρους του καναλιού κατανέμονται στον αναμεταδότη για εκπομπή, γεγονός που μειώνει το συνολικό ρυθμό μετάδοσης. Αυτό φαίνεται ακόμα περισσότερο όταν το κανάλι μεταξύ πηγής-προορισμού δεν είναι πολύ κακό, επειδή σε ένα τέτοιο σενάριο ένα υψηλό ποσοστό των μεταδιδόμενων πακέτων θα μπορούσε να ληφθεί σωστά από τον προορισμό οπότε η μετάδοση του αναμεταδότη θα ήταν άσκοπη. Η προσαρμοστική αναμετάδοση προσπαθεί να αντιμετωπίσει τέτοιου είδους προβλήματα, για παράδειγμα αν το SNR του σήματος που λαμβάνει ο αναμεταδότης υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο κατώφλι, ο αναμεταδότης εκτελεί DF λειτουργία στο μήνυμα ενώ αν το κανάλι μεταξύ της πηγής και του αναμεταδότη παρουσιάζει σημαντικές διαλείψεις τέτοιες ώστε το SNR να είναι κάτω από το κατώφλι τότε ο αναμεταδότης αδρανεύει.

Θα μελετήσουμε το γενικό πρόβλημα συνεργασίας μεταξύ πηγής και αναμεταδότη υποθέτοντας μοναδικό αναμεταδότη ο οποίος βοηθάει έναν χρήστη (πηγή) στο δίκτυο προωθώντας πληροφορία. Μια τυπική στρατηγική συνεργασίας μπορεί να μοντελοποιηθεί με δύο ορθογώνιες φάσεις, είτε με TDMA ή με FDMA, για να αποφευχθεί η παρεμβολή ανάμεσα στις δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση, μια πηγή στέλνει πληροφορία στον προορισμό της και η πληροφορία επίσης λαμβάνεται από τον αναμεταδότη την ίδια στιγμή. Στην δεύτερη φάση, ο αναμεταδότης μπορεί να βοηθήσει την πηγή με προώθηση ή επανεκπομπή της πληροφορίας στον προορισμό. Το Σχήμα 4 απεικονίζει τη γενική περίπτωση καναλιού με αναμεταδότη, όπου η πηγή εκπέμπει με ισχύ P_1 και ο αναμεταδότης εκπέμπει με ισχύ P_2 .



Σχήμα 4. Απλοποιημένο μοντέλο συνεργασίας

Εμείς θα υποθέσουμε ότι η πηγή και ο αναμεταδότης εκπέμπουν με την ίδια ισχύ P . Τα ληφθέντα σήματα $y_{s,d}$ και $y_{s,r}$ στον προορισμό και τον αναμεταδότη, αντίστοιχα μπορούν να γραφούν ως

$$y_{s,d} = \sqrt{P}h_{s,d}x + n_{s,d} \quad (3.1)$$

$$y_{s,r} = \sqrt{P}h_{s,r}x + n_{s,r} \quad (3.2)$$

όπου x είναι η εκπεμπόμενη συμβολοσειρά, $n_{s,d}$ και $n_{s,r}$ είναι προσθετικός θόρυβος και $h_{s,d}$ και $h_{s,r}$ είναι οι συντελεστές καναλιού. Ο προσθετικός θόρυβος μοντελοποιείται ως μιγαδική Gaussian τυχαία μεταβλητή με μηδενική μέση τιμή και διακύμανση N_0 . Στη δεύτερη φάση, ο

αναμεταδότης προωθεί μια επεξεργασμένη έκδοση του σήματος της πηγής στον προορισμό και αυτό μπορεί να γραφεί ως

$$y_{r,d} = h_{r,d}q(y_{s,r}) + n_{r,d} \quad (3.3)$$

όπου η συνάρτηση $q(\cdot)$ εξαρτάται από ποια επεξεργασία έχει υλοποιηθεί στον κόμβο αναμεταδότη.

Συγκεκριμένα σε AF πρωτόκολλο στατικής αναμετάδοσης, το οποίο συχνά καλείται απλά AF πρωτόκολλο, ο αναμεταδότης ενισχύει το ληφθέν σήμα και μεταδίδει μια ενισχυμένη έκδοσή του στον προορισμό. Τα κανάλια $h_{s,d}$ και $h_{s,r}$ μοντελοποιούνται ως κανάλια επίπεδων διαλείψεων Rayleigh. Ο σκοπός του αναμεταδότη είναι να αντισταθμίσει την επίδραση που έχουν οι διαλείψεις του καναλιού ανάμεσα σε πηγή και αναμεταδότη. Για αυτό το σκοπό πολλαπλασιάζει το σήμα με έναν παράγοντα αντιστρόφως ανάλογα με την ισχύ του ληφθέντος σήματος, ο οποίος ορίζεται ως

$$\beta_r = \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{P|h_{s,r}|^2 + N_0}} \quad (3.4)$$

Το σήμα που εκπέμπεται από τον αναμεταδότη επομένως δίνεται από τη σχέση $\beta_r y_{s,r}$ και έχει ισχύ P ίση με την ισχύ του σήματος που μεταδόθηκε από την πηγή. Για τον υπολογισμό της αμοιβαίας πληροφορίας (mutual information) ανάμεσα σε πηγή και προορισμό, χρειάζεται να υπολογίσουμε το συνολικό στιγμιαίο SNR στον προορισμό. Το SNR λήψης στον προορισμό είναι το άθροισμα των SNR από τις ζεύξεις με την πηγή και τον αναμεταδότη. Το SNR από τη ζεύξη με τη πηγή δίνεται από

$$\text{SNR}_{s,d} = \Gamma |h_{s,d}|^2 \quad (3.5)$$

όπου $\Gamma = P/N_0$. Έπειτα θα υπολογίσουμε το SNR από τη ζεύξη με τον αναμεταδότη. Στη δεύτερη φάση ο αναμεταδότης ενισχύει το ληφθέν σήμα και το προωθεί στον προορισμό με εκπεμπόμενη ισχύ P . Το ληφθέν σήμα στον προορισμό στη δεύτερη φάση δίνεται από

$$y_{r,d} = \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{P|h_{s,r}|^2 + N_0}} h_{r,d} y_{s,r} + n_{r,d} \quad (3.6)$$

όπου $h_{r,d}$ είναι ο συντελεστής καναλιού από τον αναμεταδότη στον προορισμό και $n_{r,d}$ ο προσθετικός θόρυβος. Πιο αναλυτικά, το ληφθέν σήμα $y_{r,d}$ σε αυτή την περίπτωση είναι

$$y_{r,d} = \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{P|h_{s,r}|^2 + N_0}} \sqrt{P} h_{r,d} h_{s,r} x + n'_{r,d} \quad (3.7)$$

όπου

$$n'_{r,d} = \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{P|h_{s,r}|^2 + N_0}} h_{r,d} n_{s,r} + n_{r,d} \quad (3.8)$$

Υποθέτοντας ότι οι όροι $n_{s,r}$ και $n_{r,d}$ είναι ανεξάρτητοι, τότε ο ισοδύναμος θόρυβος $n'_{r,d}$ έχει μηδενική μέση τιμή και είναι μιγαδική Gaussian τυχαία μεταβλητή με διακύμανση

$$N'_0 = \left(\frac{P|h_{r,d}|^2}{P|h_{s,r}|^2 + N_0} + 1 \right) N_0 \quad (3.9)$$

Ο προορισμός λαμβάνει δύο αντίγραφα του σήματος x μέσω της ζεύξης με την πηγή και της ζεύξης με τον αναμεταδότη. Η βέλτιστη τεχνική για να συνδυάσουμε τα δύο σήματα μεγιστοποιώντας το συνολικό SNR είναι η συνδυαστική μέγιστου λόγου (MRC). Το SNR στην έξοδο του MRC είναι ίσο με το άθροισμα του λαμβανόμενου SNR από τους δύο κλάδους.

Με γνώση των συντελεστών καναλιού $h_{s,d}$, $h_{s,r}$ και $h_{r,d}$ η έξοδος του ανιχνευτή MRC στον προορισμό μπορεί να γραφεί ως

$$y = a_1 y_{s,d} + a_2 y_{r,d} \quad (3.10)$$

Οι συνδυαστικοί παράγοντες a_1 και a_2 υπολογίζονται ώστε να μεγιστοποιούν το συνολικό SNR. Για να τους υπολογίσουμε θα βασιστούμε στο σηματικό χώρο και τις αρχές της θεωρίας ανίχνευσης. Αφού, οι AWGN όροι θορύβου καλύπτουν όλο το χώρο, για να ελαχιστοποιήσουμε τις επιδράσεις θορύβου ο ανιχνευτής θα πρέπει να προβάλλει τα ληφθέντα σήματα $y_{s,d}$ και $y_{s,r}$ στους επιθυμητούς σηματικούς χώρους. Έτσι τα $y_{s,d}$ και $y_{r,d}$ θα πρέπει να προβληθούν κατά μήκος των κατευθύνσεων $h_{s,d}$ και $h_{r,d}h_{s,r}$, αντίστοιχα, μετά την κανονικοποίηση των όρων διακύμανσης θορύβου και στα δύο ληφθέντα σήματα. Επομένως, τα a_1 και a_2 δίνονται από τις σχέσεις:

$$a_1 = \frac{\sqrt{P}h_{s,d}^*}{N_0} \quad (3.11)$$

$$a_2 = \frac{\sqrt{\frac{P}{P|h_{s,r}|^2 + N_0}} \sqrt{P}h_{s,r}^*h_{r,d}^*}{\left(\frac{P|h_{r,d}|^2}{P|h_{s,r}|^2 + N_0} + 1 \right) N_0} \quad (3.12)$$

Υποθέτοντας ότι το μεταδιδόμενο σύμβολο x έχει μέση ενέργεια 1, το στιγμιαίο SNR στην έξοδο του MRC είναι

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 \quad (3.13)$$

όπου

$$\gamma_1 = \frac{|a_1 \sqrt{P} h_{s,d}|^2}{|a_1|^2 N_0} = \frac{P |h_{s,d}|^2}{N_0} \quad (3.14)$$

και

$$\gamma_2 = \frac{\left| a_2 \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{P|h_{s,r}|^2 + N_0}} \sqrt{P} h_{r,d} h_{s,r} \right|^2}{N_0' |a_2|^2} = \frac{\frac{P^2}{P|h_{s,r}|^2 + N_0} |h_{s,r}|^2 |h_{r,d}|^2}{\left(\frac{P|h_{r,d}|^2}{P|h_{s,r}|^2 + N_0} + 1 \right) N_0} = \frac{1}{N_0} \frac{P^2 |h_{s,r}|^2 |h_{r,d}|^2}{P|h_{s,r}|^2 + P|h_{r,d}|^2 + N_0} \quad (3.15)$$

Από το παραπάνω, η στιγμιαία αμοιβαία πληροφορία ως συνάρτηση των συντελεστών διαλείψεων για AF δίνεται από

$$I_{AF} = \frac{1}{2} \log(1 + \gamma_1 + \gamma_2) \quad (3.16)$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές για το SNR από τις δύο ζεύξεις, μπορούμε να γράψουμε την κοινή πληροφορία ως

$$I_{AF} = \frac{1}{2} \log \left(1 + \Gamma |h_{s,d}|^2 + f \left(\Gamma |h_{s,r}|^2, \Gamma |h_{r,d}|^2 \right) \right) \quad (3.17)$$

όπου

$$f(x, y) \triangleq \frac{xy}{x + y + 1} \quad (3.18)$$

Μια άλλη δυνατότητα επεξεργασίας στο κόμβο του αναμεταδότη είναι να αποκωδικοποιεί ο αναμεταδότης το λαμβανόμενο σήμα, να το επανακωδικοποιεί και μετά να το εκανεκπέμψει στο δέκτη. Αυτό το είδος αναμετάδοσης ονομάζεται στατικό DF σχήμα, το οποίο συνήθως απλά λέγεται DF σχήμα. Αν το αποκωδικοποιημένο σήμα στον αναμεταδότη συμβολίζεται με \hat{x} , το εκπεμπόμενο σήμα από τον αναμεταδότη είναι $\sqrt{P}\hat{x}$. Σημειώνεται ότι το αποκωδικοποιημένο σήμα στον αναμεταδότη μπορεί να είναι λανθασμένο. Αν ένα λανθασμένο σήμα προωθηθεί στον προορισμό, η αποκωδικοποίηση στον προορισμό είναι ανούσια. Η επίδοση ενός τέτοιου συστήματος περιορίζεται από τη χειρότερη ζεύξη ανάμεσα στις πηγή-αναμεταδότης και πηγή-προορισμός.

Παρά το γεγονός ότι η DF αναμετάδοση έχει το πλεονέκτημα απέναντι στην AF αναμετάδοση λόγω της μείωσης των επιδράσεων του αθροιστικού θορύβου στον αναμεταδότη, συνεπάγεται η πιθανότητα προώθησης λανθασμένα ανιχνευμένων σημάτων στον προορισμό, προκαλώντας διάδοση σφάλματος που μπορεί να ελαττώσει την επίδοση του συστήματος. Η αμοιβαία πληροφορία ανάμεσα σε πηγή και προορισμό περιορίζεται από

την αμοιβαία πληροφορία της χειρότερης ζεύξης ανάμεσα στις πηγή-αναμεταδότη και το συνδυασμένο κανάλι των πηγή-προορισμών και αναμεταδότη-προορισμό. Πιο συγκεκριμένα, η αμοιβαία πληροφορία για DF μεταδόσεις ως προς τους συντελεστές καναλιών μπορεί να γραφεί ως

$$I_{\text{DF}} = \frac{1}{2} \min \left\{ \log \left(1 + \Gamma |h_{s,r}|^2 \right), \log \left(1 + \Gamma |h_{s,d}|^2 + \Gamma |h_{r,d}|^2 \right) \right\} \quad (3.19)$$

όπου ο τελεστής \min στην παραπάνω εξίσωση λαμβάνει υπ'όψιν το γεγονός ότι ο αναμεταδότης εκπέμπει μόνο αν αποκωδικοποιήσει σωστά και έτσι η απόδοση περιορίζεται από την χειρότερη ζεύξη ανάμεσα σε πηγή-προορισμό και πηγή-αναμεταδότη.

3.4 Ταξινόμηση σχηματισμών δικτύων

Ένας αριθμός διαφορετικών σχηματισμών δικτύου (network configurations) υπάρχει στη βιβλιογραφία. Οι πληροφορίες του σχηματισμού δικτύου περιγράφουν τον αριθμό των πομπών, αναμεταδοτών και δεκτών σε οποιοδήποτε συνεργατικό CRN. Γενικά, μονοί πομποί χρησιμοποιούνται σε συγκεντρωτικά συνεργατικά CRN [73][75]-[80][91][93][95][105][107][108]. Πολλαπλοί πομποί χρησιμοποιούνται συνήθως σε ad hoc CRN και επικοινωνίες άνω ζεύξης (uplink) σε κυψελωτά συνεργατικά CRN [60][84][85][87][88][94]. Σε συγκεντρωτικά συνεργατικά CRN, ο πομπός είναι ο κεντρικός ελεγκτής του δικτύου ,π.χ. κυψελωτά δίκτυα. Ο αριθμός των δεκτών/προορισμών παίζει σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό ενός συνεργατικού CRN. Οι συγγραφείς στα [73][77][78][92][94][108], παρουσιάζουν συνεργατικά CRN με μονούς δέκτες. Τα ad hoc και τα point to point συνεργατικά CRN είναι παραδείγματα μονού δέκτη. Ένα συνεργατικό CRN με πολλαπλούς δέκτες αναλύεται στα [60][75][76][79][82][85][95][105][109][110]. Ένα συνεργατικό CRN με πολλαπλούς δέκτες απαιτεί υπολογιστικά πολύπλοκο σχεδιασμό. Τα δίκτυα ευρυεκπομπής (broadcast), πολυεκπομπής (multicast) και πολλαπλής πρόσβασης (multiple access) είναι παραδείγματα συνεργατικών CRN πολλαπλών δεκτών.

Ο αριθμός των αναμεταδοτών παίζει σημαντικό ρόλο στα συνεργατικά CRN. Η επίδοση ενός συνεργατικού συστήματος επικοινωνιών μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση πολλαπλών αναμεταδοτών, αντί για έναν αναμεταδότη, οι οποίοι μεταβιβάζουν την ίδια πληροφορία στον προορισμό. Η επιλογή/ανάθεση πολλαπλών αναμεταδοτών δίνει περισσότερη ελευθερία στην επιλογή ευνοϊκών διαδρομών ανάμεσα σε πηγή προς αναμεταδότη και αναμεταδότη προς προορισμό. Οι περισσότεροι αναμεταδότες προσφέρουν περισσότερους βαθμούς ελευθερίας στο ασύρματο δίκτυο αλλά αυξημένη πολυπλοκότητα. Ένας μεγάλος αριθμός από αναμεταδότες γενικά αυξάνει την τάξη διαφορισμού (diversity order) και την χωρητικότητα του καναλιού. Παρόλο αυτά, σε ένα συνεργατικό CRN, ένας μεγάλος αριθμός αναμεταδοτών

μπορεί συλλογικά να προκαλέσει ένα σημαντικό επίπεδο παρεμβολής στους πρωτεύοντες χρήστες. Σε ένα συνεργατικό CRN πολλαπλών χρηστών στο οποίο τα σήματα των χρηστών διαχωρίζονται με διαίρεση συχνότητας, μπορεί κανείς να μειώσει το επίπεδο παρεμβολής σε κάθε ζώνη συχνότητας με έξυπνη ομαδοποίηση αναμεταδοτών και ανάθεση κάθε ομάδας σε διαφορετικές ζώνες συχνότητας. Ένα καλά σχεδιασμένο σχήμα ανάθεσης πολλαπλών αναμεταδοτών και κατανομής ισχύος μπορεί να είναι χρήσιμο στη μείωση της παρεμβολής που προκαλείται στους πρωτεύοντες χρήστες σε ένα CRN πολλαπλών χρηστών. Στη βιβλιογραφία υπάρχει ένας αριθμός σχημάτων επιλογής / ανάθεσης αναμεταδοτών χαμηλής πολυπλοκότητας [72]. Ωστόσο, αυτά τα σχήματα ανάθεσης αναμεταδοτών δεν είναι εφαρμόσιμα σε CRN επειδή η βέλτιστη ανάθεση αναμεταδοτών και η κατανομή ισχύος που λαμβάνεται από αυτά τα σχήματα μπορεί να δημιουργήσει περισσότερη παρεμβολή στους πρωτεύοντες χρήστες από την επιτρεπτή.

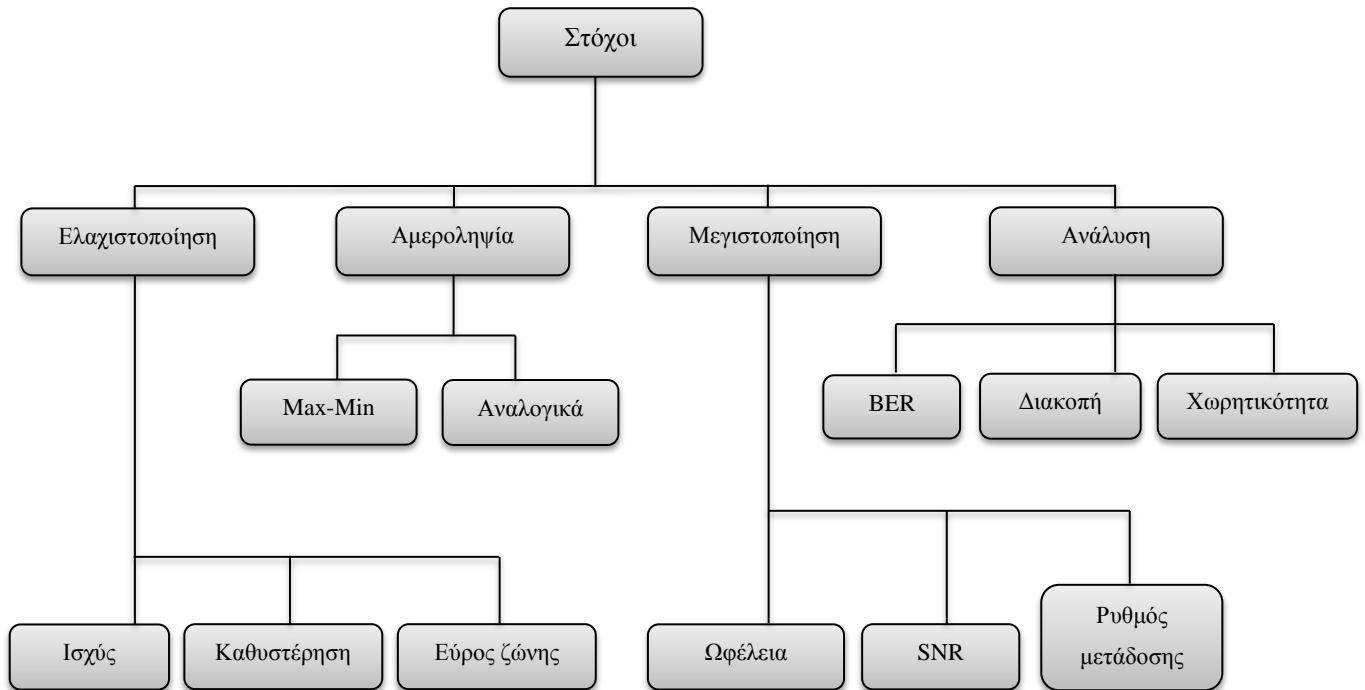
Στα [75][96][111]-[114], οι συγγραφείς εκτελούν επιλογή ενός αναμεταδότη (single relay selection) και κατανομή ισχύος σε συνεργατικά CRN. Σε αυτά τα σχήματα, ένας αναμεταδότης επιλέγεται για αναμετάδοση ανάμεσα σε μια ομάδα αναμεταδοτών που έχουν καλό κανάλι με τον προορισμό ή κακό κανάλι με τους πρωτεύοντες χρήστες. Κακό κανάλι με τους πρωτεύοντες χρήστες σημαίνει μικρότερη παρεμβολή στους πρωτεύοντες χρήστες από τον αναμεταδότη. Κατανεμημένη επιλογή αναμεταδότη (distributed relay selection) προτείνεται στα [83] και [89]. Οι συγγραφείς χρησιμοποιούν προσέγγιση με θεωρία παιγνίων για την κατανεμημένη επιλογή αναμεταδότη. Επιλογή και ανάθεση πολλαπλών αναμεταδοτών (multiple relay selection and assignment) εκτελούνται στα [73][80][104][105][115][116]. Στα [73][105][117][118] οι συγγραφείς προτείνουν επιλογή πολλαπλών αναμεταδοτών σε AF αναμετάδοση διαμοιρασμένης ζώνης. Παρά το γεγονός ότι και η ορθογωνική και η διαμοιρασμένης ζώνης αναμετάδοση είναι διαθέσιμες στη βιβλιογραφία, μια ολοκληρωμένη ανάλυση του tradeoff μεταξύ επίδοσης και πολυπλοκότητας για αυτούς τους δύο τύπους αναμετάδοσης ακόμα χρειάζεται την προσοχή της επιστημονικής κοινότητας.

3.5 Ταξινόμηση των στόχων, προβλημάτων και λύσεις σε

συνεργατικά CRN

Μια ταξινόμηση των στόχων σε ένα συνεργατικό CRN περιγράφεται στο Σχήμα 5. Υπάρχουν τέσσερις κύριες κατηγορίες και ένας αριθμός υποκατηγοριών αντικειμενικών συναρτήσεων (objective functions) που χρησιμοποιούνται σε συνεργατικά CRN. Οι κύριες

κατηγορίες περιλαμβάνουν την μεγιστοποίηση, ελαχιστοποίηση, αμεροληψία και ανάλυση επιδόσεων.



Σχήμα 5. Στόχοι των συνεργατικών CRN

3.5.1 Ελαχιστοποίηση

Ένας αριθμός καταστάσεων σε συνεργατικά CRN απαιτεί την ελαχιστοποίηση συγκεκριμένων παραμέτρων δικτύου. Η ισχύς και το εύρος ζώνης είναι οι πιο πολύτιμοι πόροι στα συνεργατικά CRN. Υπάρχει πάντα η ανάγκη για κατανομή πόρων με έναν τρόπο ώστε η χρήση ισχύος και εύρους ζώνης να είναι ελάχιστη. Οι εφαρμογές πραγματικού χρόνου πρέπει επιπλέον να ελαχιστοποιήσουν την καθυστέρηση στη μετάδοση. Μια συγκεντρωτική και μια κατανεμημένη ελαχιστοποίηση ισχύος στους αναμεταδότες με περιορισμό στο SNR εξόδου σε multihop CRN ερευνάται στο [84]. Ένας κατανεμημένος και συγκεντρωτικός αλγόριθμος ελέγχου ισχύος βασισμένος σε μονωνυμική προσέγγιση (monomial approximation) για την ελαχιστοποίηση της ισχύος δικτύου προτείνεται στα [86] και [93]. Οι συγγραφείς προτείνουν συγκεντρωτικό και κατανεμημένο γεωμετρικό προγραμματισμό (geometric programming) για την επίλυση του προβλήματος ελαχιστοποίησης ισχύος. Στο [95] προτείνεται ένας multi-agent αλγόριθμος εκμάθησης για να μάθει τις συμπεριφορές αλληλεπίδρασης των CR κόμβων σε συνεργατικά CRN ευαίσθητα στην καθυστέρηση. Οι συγγραφείς επικεντρώνονται σε εφαρμογές ευαίσθητες στην καθυστέρηση όπως real-time μετάδοση πολυμέσων, π.χ. οι χρήστες που λαμβάνουν πρέπει να πάρουν τη μεταδιδόμενη πληροφορία μέσα σε μια ορισμένη καθυστέρηση. Εξαιτίας της αποκεντρωμένης φύσης των

multihop ασυρμάτων δικτύων, οι συγγραφείς προτείνουν μια αποκεντρωμένη προσέγγιση για να λύσουν το πρόβλημα. Ελαχιστοποιούν τους απαιτούμενους πόρους σε όλο το δίκτυο για να υποστηρίξουν ένα σύνολο από multicast sessions, με μια δεδομένη απαίτηση ρυθμού bit για κάθε multicast session.

3.5.2 Μεγιστοποίηση

Ο κύριος στόχος της μεγιστοποίησης στην κατανομή πόρων σε συνεργατικά CRN είναι να μεγιστοποιηθεί η συνολική ρυθμαπόδοση (ρυθμός μετάδοσης, sum-rate, χωρητικότητα, capacity), ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) στο δέκτη και η ωφέλεια του δικτύου (network utility). Η μεγιστοποίηση του SNR είναι παρόμοια με τη μεγιστοποίηση της ρυθμαπόδοσης. Ένα μειονέκτημα της μεγιστοποίησης SNR είναι ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθορίσει τη συνολική ρυθμαπόδοση του δικτύου. Η βελτιστοποίηση της ωφέλειας του δικτύου είναι ένα ισχυρό εργαλείο βελτιστοποίησης για την κατανομή τηλεπικοινωνιακών πόρων σε ασύρματα δίκτυα. Συναρτήσεις ωφέλειας δικτύου (network utility functions) για όλο το σύστημα σχεδιάζονται προκειμένου να αντιμετωπίσουν πολλαπλούς στόχους ταυτόχρονα.

Στο [75], οι συγγραφείς κυρίως επικεντρώνονται στο πρόβλημα του πώς να κατανεύουν πόρους κατάλληλα για τη μεγιστοποίηση της ουσιαστικής ρυθμαπόδοσης του συστήματος κάτω από απαιτήσεις QoS σε συνεργατικά CRN. Ο κύριος στόχος είναι η μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης με τον από κοινού καθορισμό της επιλογής αναμεταδοτών, κατανομής φάσματος και κατανομής ισχύος. Οι συγγραφείς προτείνουν έναν ευρετικό αλγόριθμο (heuristic algorithm) τριών σταδίων για να λύσουν το πρόβλημα μεγιστοποίησης του ρυθμού μετάδοσης. Στα [73] και [119], οι συγγραφείς προτείνουν αποδοτικά σχήματα επιλογής αναμεταδοτών για τη μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης σε συνεργατικά CRN. Μια διαστρωματική προσέγγιση για κατανομή της ισχύος εκπομπής σε διαφορετικά πακέτα ευνοώντας εκείνα που έχουν διανύσει περισσότερα άλματα πριν φτάσουν σε ένα συγκεκριμένο κόμβο σε multihop CRN προτείνεται στο [88]. Οι συγγραφείς παρουσιάζουν μια κατανεμημένη υλοποίηση χρησιμοποιώντας δυαδικό πρόβλημα Lagrange (Lagrangian duality). Η από κοινού κατανομή ισχύος και επιλογή πολλαπλών αναμεταδοτών σε συστήματα AF διαμοιρασμένης ζώνης για μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης περιγράφεται στα [80] και [120]. Στο [121] μελετάται η κατανομή καναλιών και ισχύος για συνεργατική αναμετάδοση σε CRN με τρεις κόμβους. Ο κύριος στόχος της κατανομής ισχύος και καναλιών είναι η μεγιστοποίηση της συνολικής από άκρο σε άκρο ρυθμαπόδοσης.

Ένα μη συνεργατικό παίγνιο βασισμένο σε αποκεντρωμένη κατανομή ισχύος για πρωτεύοντες και δευτερεύοντες χρήστες εξετάζεται στο [122]. Τα δύο είδη συνδέσεων, μία που περιλαμβάνει τους πρωτεύοντες χρήστες και τους αναμεταδότες τους, και η άλλη που περιλαμβάνει τους δευτερεύοντες χρήστες και τους αναμεταδότες τους αντιμετωπίζονται ως

παίκτες σε ένα μη συνεργατικό παίγνιο. Κάθε παίκτης ανταγωνίζεται με τους υπόλοιπους διαλέγοντας τη στρατηγική κατανομής ισχύος που μεγιστοποιεί το δικό του ρυθμό μετάδοσης ενώ υπόκειται στο κατώφλι QoS του πρωτεύοντος συστήματος. Ένας επαναληπτικός αλγόριθμος με βοήθεια από αναμεταδότες προτείνεται για την αποδοτική επίτευξη της ισοροπίας Nash (Nash equilibrium).

3.5.3 Αμεροληψία

Η αμεροληψία στα συνεργατικά CRN χρησιμοποιείται για την αποφυγή της άνισης χρησιμοποίησης των ραδιοπόρων. Στη max-min αμεροληψία, ο διαχειριστής του δικτύου θέλει να μεγιστοποιήσει τη ρυθμαπόδοση του χειρότερου χρήστη. Στην αμεροληψία αναλογικά με το ρυθμό μετάδοσης (rate proportional fairness), οι πόροι κατανέμονται αναλογικά με το ρυθμό μετάδοσης που απαιτούν οι χρήστες.

Στο [91] εξετάζεται ένα multipoint-to-multipoint συνεργατικό CRN που στοχεύει στη μεγιστοποίηση του χειρότερου SNIR από τους προορισμούς. Οι συγγραφείς αναπτύσσουν μια τεχνική που βελτιστοποιεί από κοινού την ισχύ μετάδοσης των πηγών και τους συντελεστές μορφοποίησης δέσμης των αναμεταδοτών ενώ ικανοποιεί τους περιορισμούς συνολικής ισχύος εκπομπής των πηγών και των αναμεταδοτών όπως επίσης τους επιμέρους περιορισμούς ισχύος των πηγών διασφαλίζοντας περαιτέρω ότι η παρεμβολή που προκαλείται από τους CR στους πρωτεύοντες χρήστες είναι κάτω από το επιθυμητό κατώφλι. Μια ημι-ορισμένη τεχνική χαλάρωσης (relaxation technique) προτείνεται για να καθορίσει τους συντελεστές μορφοποίησης δέσμης στο CRN. Ένα σχήμα επιλογής αναμεταδοτών βασισμένο σε max-min για την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας διακοπής προτείνεται στο [110].

3.5.4 Ανάλυση

Τα τελευταία χρόνια, οι ερευνητές αναλύουν την ελαχιστοποίηση του ρυθμού σφαλμάτων (bit error rate, BER) και της διακοπής (outage) ως αντικειμενική συνάρτηση (objective function) στην κατανομή πόρων σε συνεργατικά CRN. Το BER εκφράζει την επίδοση του δέκτη στο συνεργατικό CRN και η πιθανότητα διακοπής χρησιμοποιείται ως μετρική για το ασύρματο κανάλι [108][110][123][124]. Η διακοπή συγκεκριμένα χρησιμοποιείται σε κανάλια αργών διαλείψεων (slow fading) [78][90][123][125]. Μια σύγκριση και ανάλυση μεταξύ σχημάτων κατανομής πόρων για βέλτιστη διακοπή, βέλτιστο BER και βέλτιστο ρυθμό μετάδοσης ακόμα είναι αναγκαία για καλύτερα μελλοντικά συνεργατικά CRN.

Ο Πίνακας 4 συνοψίζει τους τύπους αποφάσεων, τη δυνατότητα ελέγχου ισχύος, τους αλγόριθμους και τα σχήματα δυναμικής πρόσβασης φάσματος που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία για κατανομή πόρων σε συνεργατικά CRN.

Αναφορά	Απόφαση	Έλεγχος ισχύος	CSI	Παρατηρήσεις
He κ.α. [75]	Συγκεντρωτική	Όχι	Γνωστή	Ευρετικός αλγόριθμος για πάρουμε μη βέλτιστη λύση σε σχήμα spectrum overlay
Naeem κ.α. [73]	Συγκεντρωτική	Ναι	Γνωστή	Άπληστη ευρετική προσέγγιση για την επίλυση μη κυρτής AF shared band κατανομής ισχύος
Xiaoou κ.α. [122]	Συγκεντρωτική	Ναι	Γνωστή	Κατανομή ισχύος με θεωρία παιγνίων
Manna κ.α. [78]	Συγκεντρωτική	Ναι	Γνωστή	BER, εργοδική χωρητικότητα και ανάλυση κέρδους διαφορισμού
Mietzner κ.α. [84]	Και τα δύο	Ναι	Γνωστή	Κατανομή ισχύος σε multihop CRN βασισμένο σε CDMA
Zarifi κ.α. [91]	Συγκεντρωτική	Ναι	Γνωστή	Ευρετικός αλγόριθμος που χρησιμοποιεί ημι-ορισμένη χαλάρωση για κατανομή ισχύος
Kim κ.α. [108]	Συγκεντρωτική		Γνωστή	Ανάλυση πιθανότητας διακοπής AF σχήματος σε συνεργατικά CRN
Liu κ.α. [93]	Συγκεντρωτική	Ναι	Γνωστή	Αλγόριθμος κατανομής ισχύος βασισμένος σε μονωνυμική προσέγγιση για AF αναμετάδοση
Jha κ.α. [88]	Κατανεμημένη	Ναι	Γνωστή	Διαστρωματικό σχήμα και ευρετικός αλγόριθμος για multihop CRN
Choi κ.α. [80]	Συγκεντρωτική	Ναι	Γνωστή	Μη βέλτιστη κατανομή ισχύος για shared band AF σχήμα
Zhao κ.α. [121]	Συγκεντρωτική	Ναι	Γνωστή	Σχήμα κατανομής ισχύος σε κανάλια CR αναμεταδοτών για μέγιστη συνολική end-to-end ρυθμαπόδοση
Jun κ.α. [90]	Κατανεμημένη	Ναι	Γνωστή	Ανάλυση ευστάθειας για συνεργατικά CRN

Πίνακας 4. Τύποι αποφάσεων και δυνατότητα ελέγχου ισχύος

3.5.5 Τύποι προβλημάτων και λύσεις

Μια σημαντική πτυχή της κατανομής πόρων σε συνεργατικά CRN είναι η επίδοση και το υπολογιστικό φορτίο των σχημάτων κατανομής πόρων. Μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τα προβλήματα κατανομής πόρων ως: γραμμικά (linear) [84], μη γραμμικά (nonlinear) [76]-[80][86][91][126], ακέραια μη γραμμικά (integer nonlinear) [73][75][85], στοχαστικά μη γραμμικά [83] και μικτά ακέραια μη γραμμικά [82][88][104][105][107][122][127] προβλήματα βελτιστοποίησης. Ο Πίνακας 5 συνοψίζει διαφορετικούς τύπους προβλημάτων και προσεγγίσεις λύσεων που χρησιμοποιούνται στα συνεργατικά CRN.

Αναφορά	Τύπος προβλήματος	Προσέγγιση λύσης
Liu κ.α. [76]	Μη γραμμική βελτιστοποίηση	Επαναληπτικός αλγόριθμος βασισμένος σε ανάπτυγμα Maclaurin για μη ορθογωνικό AF πρωτόκολλο
He κ.α. [75]	Μη γραμμικός ακέραιος προγραμματισμός	Ευρετικός αλγόριθμος τριών σταδίων
Ashrafinia κ.α. [104]	Μικτός ακέραιος μη μικτός προγραμματισμός	Εξελικτικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης για ανάθεση αναμεταδοτών και άπληστη κατανομή ισχύος για μεγιστοποίηση της ρυθμαπόδοσης συστήματος σε shared band AF
Mietzner κ.α. [84]	Γραμμική βελτιστοποίηση	Απλή μέθοδος για γραμμικό προγραμματισμό
Manna κ.α. [78]	Μη γραμμική βελτιστοποίηση	Αλγόριθμος βασισμένος σε θεωρία προβολής πινάκων για να βρει τα κέρδη συστοιχίας κεραιών
Yi κ.α. [82]	Μη γραμμικός μικτός ακέραιος προγραμματισμός	Ουγγρική μέθοδος για την επίλυση του ακέραiou μέρους μετατρέποντας το πρόβλημα σε ένα ελαχίστου κόστους διμερής αντιστοίχισης πρόβλημα
Zarifi κ.α. [91]	Μη κυρτή max-min βελτιστοποίηση	Ημι-ορισμένη τεχνική χαλάρωσης
Guan κ.α. [107]	Μικτό ακέραιο μη γραμμικό πρόβλημα	Branch and bound πλαίσιο και κυρτές τεχνικές χαλάρωσης για την βελτίωση video streaming
Liu κ.α. [86]	Μη γραμμική μεγιστοποίηση ωφέλειας	Αλγόριθμος κατανεμημένου γεωμετρικού προγραμματισμού βασισμένος σε μονωνυμική προσέγγιση
Jha κ.α. [88]	Μικτό ακέραιο μη γραμμικό πρόβλημα	Επαναληπτικός ευρετικός αλγόριθμος
Yan κ.α. [128]	Μη γραμμική μη κυρτή βελτιστοποίηση	Εναλλασσόμενη κυρτή βελτιστοποίηση
Bharadia κ.α. [129]	Μικτό ακέραιο μη γραμμικό πρόβλημα	Επαναληπτικός αλγόριθμος για ανάθεση αναμεταδοτών και προσέγγιση με Water filling για κατανομή ισχύος
Wang κ.α. [89]	Μη γραμμική μεγιστοποίηση ωφέλειας	Βέλτιστη λύση χρησιμοποιώντας ΚΚΤ

Πίνακας 5. Τύποι προβλημάτων και προσεγγίσεις λύσεων

Η υπολογιστική πολυπλοκότητα των αλγορίθμων εξαρτάται από τη δομή των προβλημάτων βελτιστοποίησης. Τα προβλήματα βελτιστοποίησης που σχετίζονται με την κατανομή πόρων σε συνεργατικά CRN μπορεί να είναι κυρτά (convex), ημι-κυρτά (quasi-convex) ή μη κυρτά (non-convex). Κυρτά προβλήματα κατανομής πόρων λύνονται χρησιμοποιώντας τυπικές τεχνικές κυρτής βελτιστοποίησης (convex optimization). Στο [77], οι συγγραφείς παρουσίασαν αλγόριθμους κυρτής βελτιστοποίησης για μεγιστοποίηση της χωρητικότητας σε κατανεμημένες εικονικές συστοιχίες κεραιών (virtual antenna arrays) για συνεργατικά CRN. Μια απλή μέθοδος για συγκεντρωτική και κατανεμημένη ελαχιστοποίηση ισχύος στους αναμεταδότες για multihop CR συστήματα παρουσιάζεται στο [84]. Στο [128], οι συγγραφείς παρουσίασαν εναλλασσόμενη κυρτή βελτιστοποίηση για κατανομή ισχύος σε OFDM μετάδοση αναμεταδοτών ενός CRN.

Ένας αριθμός από διαφορετικές προσεγγίσεις έχουν προταθεί για μη γραμμική κατανομή πόρων σε συνεργατικά CRN. Ένας επαναληπτικός αλγόριθμος βασισμένος σε ανάπτυγμα Maclaurin για μη ορθογωνικό AF πρωτόκολλο παρουσιάζεται στο [76]. Οι συγγραφείς στο [79] προτείνουν γενετικό αλγόριθμο για μη κυρτή βελτιστοποίηση της μορφοποίησης δέσμης σε AF συνεργατικά CRN. Στα [86][87][89] οι συγγραφείς παρουσίασαν έναν γεωμετρικό αλγόριθμο προγραμματισμού (geometric programming algorithm), έναν επαναληπτικό ευρετικό αλγόριθμο (iterative heuristic algorithm) και έναν αλγόριθμο κατανομής ισχύος βασισμένο σε KKT αντίστοιχα για μη γραμμική μεγιστοποίηση της ωφέλειας σε συνεργατικά CRN.

Στα συνεργατικά CRN η ακέραια και η μικτή ακέραια μη γραμμική κατανομή πόρων θεωρούνται υπολογιστικά απαιτητικές. Γενικά, αυτοί οι τύποι προβλημάτων είναι NP-hard, το οποίο σημαίνει ότι δεν μπορεί κανείς να βρει τις βέλτιστες λύσεις σε πολυωνυμικό χρόνο. Για αυτού του είδους τα προβλήματα, οι ερευνητές συνήθως εφαρμόζουν άπληστους (greedy), ευρετικούς ή εξελικτικούς (evolutionary) αλγόριθμους. Στο [82] περιγράφεται ένα σχήμα συνεργατικής μίσθωσης φάσματος (spectrum leasing) που χρησιμοποιεί θεωρία παιγνίων σε συνεργατικά CRN που είναι ενήμερα για το επικοινωνιακό τους περιβάλλον. Οι συγγραφείς προτείνουν Ουγγρική μέθοδο (Hungarian method) για να λύσουν το ακέραιο μέρος μετατρέποντας το πρόβλημα σε ένα ελαχίστου κόστους διμερούς αντιστοίχισης πρόβλημα (min-cost bipartite matching problem). Ένας εξελικτικός αλγόριθμος βασισμένος σε βιογεωγραφική βελτιστοποίηση (biogeography based optimization) για ανάθεση αναμεταδοτών και άπληστης κατανομής ισχύος για τη μεγιστοποίηση της ρυθμαπόδοσης του συστήματος σε AF διαμοιρασμένης ζώνης παρουσιάζεται στο [104]. Στο [107] ερευνάται ένα branch and bound πλαίσιο και κυρτές τεχνικές χαλάρωσης για την ενίσχυση του video streaming σε συνεργατικά CRN. Στο [129] μελετάται ένας επαναληπτικός αλγόριθμος για ανάθεση αναμεταδοτών και η προσέγγιση με water filling για κατανομή ισχύος σε συνεργατικά CRN.

4

Μηχανισμός επιλογής βέλτιστου αναμεταδότη και κατανομής ισχύος

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτήν την ενότητα, εμβαθύνουμε σε ένα από τα βασικά προβλήματα διαχείρισης ραδιοπόρων στα γνωστικά δίκτυα, το πρόβλημα ελέγχου ισχύος. Συγκεκριμένα, παρουσιάζουμε ένα σχήμα για βέλτιστη κατανομή ισχύος και επιλογή αναμεταδότη σε ένα γνωστικό σύστημα, όπου ένα ζεύγος από γνωστικούς (ή δευτερεύοντες) πομποδέκτες επικοινωνούν μεταξύ τους με τη βοήθεια ενός συνόλου γνωστικών αναμεταδοτών διπλής κατεύθυνσης (cognitive two-way relays) [131]. Οι δευτερεύοντες κόμβοι μοιράζονται το φάσμα με έναν αδειοδοτημένο PU και κάθε κόμβος θεωρείται ότι είναι εξοπλισμένος με μια ενιαία κεραία μετάδοσης/λήψης. Στόχος είναι η κατανομή ισχύος στον δευτερεύοντα χρήστη έτσι ώστε η παρεμβολή στον PU λόγω της μετάδοσης από τους SUs να διατηρείται κάτω από ένα καθορισμένο όριο. Το πρόβλημα διαχείρισης ραδιοπόρων υπό μελέτη αναφέρεται στην εύρεση του βέλτιστου αναμεταδότη καθώς και τη βέλτιστη κατανομή ισχύος ανάμεσα στους SUs κόμβους ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη ρυθμαπόδοση με περιορισμούς για την ισχύ εκπομπής και την παρεμβολή στον PU.

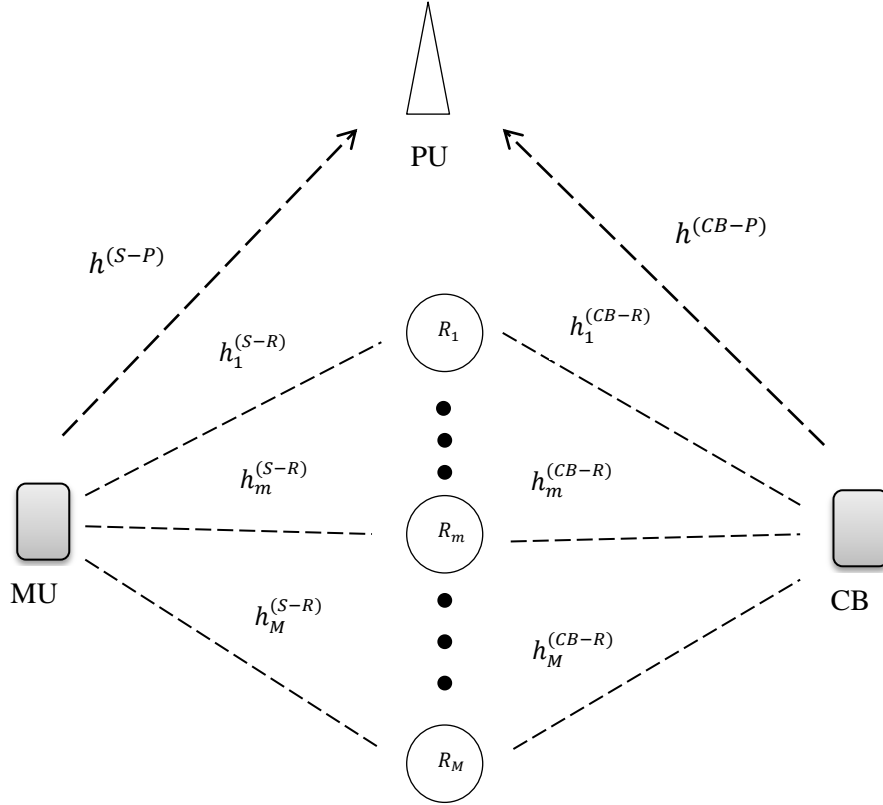
Όπως αναφέρεται και σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι τεχνικές συνεργατικής μετάδοσης παρέχουν σημαντικά πλεονεκτήματα στις ασύρματες επικοινωνίες, όπως είναι για παράδειγμα η βελτίωση της ποιότητας σύνδεσης, η αύξηση της κάλυψης κ.τ.λ.

[71][132][133]. Μέχρι τώρα έχουν προταθεί διάφορα σχήματα αναμετάδοσης που στοχεύουν σε αυτές τις βελτιώσεις. Μεταξύ αυτών, έχουν μελετηθεί εκτενώς αναγεννητικά (regenerative) και μη αναγεννητικά (non-regenerative) σχήματα [71]. Παράλληλα, τα τελευταία χρόνια, τα σχήματα αναμετάδοσης διπλής κατεύθυνσης έχουν αρχίσει να προσελκύουν το ενδιαφέρον των ερευνητών καθώς παρέχουν καλύτερη φασματική απόδοση από τα σχήματα μονής κατεύθυνσης (one-way relaying) [134]. Βασικός λόγος είναι ότι ενώ στην αναμετάδοση μονής κατεύθυνσης η ανταλλαγή διαφορετικών σημάτων μεταξύ δύο τερματικών απαιτεί τέσσερις χρονοσχισμές (time slots) για να ολοκληρωθεί η μετάδοση [135], στην αναμετάδοση διπλής κατεύθυνσης η διαδικασία μετάδοσης γίνεται σε δύο χρονοσχισμές (time slots). Στην πρώτη χρονοσχισμή, τα τερματικά εκπέμπουν τα σήματά τους ταυτόχρονα στον αναμεταδότη. Ακολούθως, στη δεύτερη χρονοσχισμή ο αναμεταδότης εκπέμπει το σήμα του στα τερματικά [136]. Τα δύο πρωτόκολλα αναμετάδοσης που χρησιμοποιούνται ευρέως στην πράξη είναι το AF πρωτόκολλο, στο οποίο το λαμβανόμενο σήμα πρώτα ενισχύεται και μετά εκπέμπεται στον προορισμό, και το DF πρωτόκολλο, στο οποίο το λαμβανόμενο σήμα αποκωδικοποιείται ώστε να αφαιρεθεί ο θόρυβος πριν μεταδοθεί ένα καθαρό αντίγραφο του αρχικού σήματος στον προορισμό.

Στη συμβατική αναμετάδοση διπλής κατεύθυνσης, η επιλογή του καλύτερου αναμεταδότη, ανάμεσα σε ένα σύνολο από διαθέσιμους κόμβους αναμετάδοσης, εξαρτάται από τα κέρδη των καναλιών πομποδέκτη σε αναμεταδότη και αντίστροφα. Σε ένα γνωστικό σύστημα, όμως, η παρουσία των PUs, σε συνδυασμό με τα κέρδη καναλιών, επηρεάζει την επιλογή ενός συγκεκριμένου αναμεταδότη. Συγκεκριμένα, η παρουσία του PU περιορίζει την ισχύ του αναμεταδιδόμενου σήματος έτσι ώστε η παρεμβολή στον PU δέκτη να μην παραβιάζει τα καθορισμένα όρια. Επιπλέον, η διάδοση παρεμβολής ως αποτέλεσμα της εκπομπής από τον αναμεταδότη μιας ενισχυμένης έκδοσης της παρεμβολής από τον PU επηρεάζει την δυνατότητα του αναμεταδότη να αυξήσει τον ρυθμό μετάδοσης.

4.2 Μοντέλο συστήματος

Το σύστημα που θα μελετήσουμε αποτελείται από ένα δευτερεύον δίκτυο (SN) και έναν πρωτεύοντα χρήστη (PU). Το SN περιλαμβάνει έναν γνωστικό κινητό χρήστη (Mobile User, MU) και έναν γνωστικό σταθμό βάσης (Cognitive Base station, CB) που επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω M γνωστικών αναμεταδοτών (Relay Stations, RSs), όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.



Σχήμα 6. Τοπολογία συστήματος

Υποθέτουμε ότι δεν υπάρχει απευθείας ζεύξη ανάμεσα στο γνωστικά τερματικά και επιλέγεται μόνο ένας αναμεταδότης με βάση το μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης. Οι κόμβοι του δικτύου διαμοιράζονται το φάσμα με τον PU. Στην αναμετάδοση διπλής κατεύθυνσης, η επικοινωνία ανάμεσα σε δύο κόμβους πομποδεκτών πραγματοποιείται σε δύο χρονοσχισμές. Στην πρώτη χρονοσχισμή (ή φάση), κάθε ένας από τους δευτερεύοντες χρήστες εκπέμπει το σήμα που προορίζεται για τον άλλο και ο αναμεταδότης λαμβάνει τα σήματα. Έστω $s_1 \in \mathbb{C}$ και $s_2 \in \mathbb{C}$ τα σύμβολα που εκπέμπονται από τους MU και CB αντίστοιχα. Υποθέτουμε ότι $\mathbb{E}\{|s_1|^2\} = \mathbb{E}\{|s_2|^2\} = 1$. Το σήμα που λαμβάνει ο m -οστός αναμεταδότης, συμβολίζεται με r_m , μπορεί να γραφεί ως

$$r_m = \sqrt{P_S} h_m^{(S-R)} s_1 + \sqrt{P_{CB}} h_m^{(CB-R)} s_2 + z_m, \quad 1 \leq m \leq M \quad (4.1)$$

όπου P_S και P_{CB} η ισχύ εκπομπής των MU και CB αντίστοιχα, το $h_m^{(S-R)}$ συμβολίζει το κέρδος καναλιού από τον MU στον m -οστό αναμεταδότη, το $h_m^{(CB-R)}$ συμβολίζει το κέρδος καναλιού από τον CB στον m -οστό αναμεταδότη και z_m είναι μια ανεξάρτητη και ομοιόμορφα κατανομημένη μιγαδική Gaussian τυχαία μεταβλητή που αναπαριστά τον αθροιστικό θόρυβο στον m -οστό αναμεταδότη με μηδενική μέση τιμή και διακύμανση σ_n^2 .

Στην δεύτερη φάση, ο επιλεγμένος αναμεταδότης εκπέμπει το σήμα που έλαβε στην πρώτη φάση αφού το πολλαπλασιάσει με ένα συντελεστή και οι πομποδέκτες λαμβάνουν το σήμα

από τον αναμεταδότη. Υποθέτοντας ότι τα κέρδη των καναλιών πομποδέκτης σε αναμεταδότη και αντίστροφα είναι αμοιβαία, τα σήματα που λαμβάνουν οι MU και CB μπορούν να εκφραστούν ως

$$\begin{aligned} r_{m,S} &= w_m h_m^{(S-R)} r_m + z_S \Rightarrow \\ r_{m,S} &= w_m \sqrt{P_S} h_m^{(S-R)} h_m^{(S-R)} s_1 + w_m \sqrt{P_{CB}} h_m^{(S-R)} h_m^{(CB-R)} s_2 + w_m h_m^{(S-R)} z_m + z_S \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} r_{m,CB} &= w_m h_m^{(CB-R)} r_m + z_{CB} \Rightarrow \\ r_{m,CB} &= w_m \sqrt{P_S} h_m^{(S-R)} h_m^{(CB-R)} s_1 + w_m \sqrt{P_{CB}} h_m^{(CB-R)} h_m^{(CB-R)} s_2 + w_m h_m^{(CB-R)} z_m + z_{CB} \end{aligned} \quad (4.3)$$

όπου $w_m \in \mathbb{C}$ είναι ο συντελεστής ενίσχυσης στον m -οστό αναμεταδότη και z_{CB} και z_S αναπαριστούν τον αθροιστικό λευκό Gaussian θόρυβο (additive white Gaussian noise, AWGN) στα τερματικά.

Παρατηρούμε ότι ο πρώτος όρος στην (4.2) και ο δεύτερος όρος στην (4.3) αναπαριστούν την αυτό-παρεμβολή (self-interference) η οποία είναι το αποτέλεσμα των συμβόλων που στέλνει κάθε κόμβος στον αναμεταδότη και τα οποία ο αναμεταδότης τα εκπέμπει εκ νέου ενισχυμένα. Οι SU πομποδέκτες μπορούν να αφαιρέσουν την αυτό-παρεμβολή από τα λαμβανόμενα σήματα χρησιμοποιώντας της γνώση για το CSI, τους συντελεστές ενίσχυσης και τα δικά τους σήματα μετάδοσης [97]. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6, τα κέρδη καναλιού στο πεδίο της ισχύος ορίζονται ως εξής:

- $f_1 = |h_m^{(CB-R)}|^2$, το κανάλι μεταξύ CB και αναμεταδότη
- $f_2 = |h_m^{(S-R)}|^2$, το κανάλι μεταξύ MU και αναμεταδότη
- $f_3 = |h^{(S-P)}|^2$, το κανάλι μεταξύ MU και PU
- $f_4 = |h^{(CB-P)}|^2$, το κανάλι μεταξύ CB και PU
- $f_5 = |h_m^{(R-P)}|^2$, το κανάλι μεταξύ αναμεταδότη και PU

Επομένως, το SNR στα τερματικά μετά και την ακύρωση της παρεμβολής και την παραδοχή ότι ο θόρυβος σε όλους τους κόμβους έχει την ίδια διακύμανση δίνεται από

$$\text{SNR}_{m,S} = \frac{P_{CB} |w_m|^2 f_1 f_2}{\sigma_n^2 (|w_m|^2 f_1 + 1)} \quad (4.4)$$

$$\text{SNR}_{m,CB} = \frac{P_S |w_m|^2 f_1 f_2}{\sigma_n^2 (|w_m|^2 f_2 + 1)} \quad (4.5)$$

Η ισχύς εκπομπής του m -οστού αναμεταδότη μπορεί να γραφεί ως

$$P_{R,m} = \mathbb{E}\left\{|w_m r_m|^2\right\} = (P_S f_1 + P_{CB} f_2 + \sigma_n^2) |w_m|^2 \quad (4.6)$$

Από την προηγούμενη εξίσωση ο συντελεστής ενίσχυσης μπορεί να εκφραστεί ως

$$|w_m| = \frac{\sqrt{P_{R,m}}}{\sqrt{P_S f_1 + P_{CB} f_2 + \sigma_n^2}} \quad (4.7)$$

Με αντικατάσταση του $|w_m|$ στις σχέσεις (4.4) και (4.5) στους δευτερεύοντες πομποδέκτες προκύπτει

$$\text{SNR}_{m,S} = \frac{P_{CB} P_{R,m} f_1 f_2}{\sigma_n^2 (P_{R,m} f_2 + P_S f_1 + P_{CB} f_2 + \sigma_n^2)} \quad (4.8)$$

$$\text{SNR}_{m,CB} = \frac{P_S P_{R,m} f_1 f_2}{\sigma_n^2 (P_{R,m} f_1 + P_S f_1 + P_{CB} f_2 + \sigma_n^2)} \quad (4.9)$$

Κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης, η εκπομπή από τους δευτερεύοντες πομποδέκτες έχει ως αποτέλεσμα παρεμβολές στον PU. Οι παρεμβολές λόγω των MU και CB, συμβολίζονται με I_1 και I_2 αντίστοιχα και δίνονται από τις σχέσεις

$$I_S = P_S f_3 \quad (4.10)$$

$$I_{CB} = P_{CB} f_4 \quad (4.11)$$

Στη δεύτερη φάση, το σήμα που εκπέμπει ο m -οστός αναμεταδότης προκαλεί παρεμβολή στον PU που μπορεί να εκφραστεί ως

$$I_{R,m} = P_{R,m} f_5 \quad (4.12)$$

4.3 Πρόβλημα επιλογής αναμεταδότη και κατανομής ισχύος

Στην συγκεκριμένη υπο-ενότητα, παρουσιάζεται αναλυτικά το πρόβλημα της επιλογής του βέλτιστου αναμεταδότη και σχήμα κατανομής ισχύος για το γνωστικό σύστημα αναμετάδοσης διπλής κατεύθυνσης που περιγράφηκε παραπάνω. Μαθηματικά, το πρόβλημα της επιλογής αναμεταδότη που οδηγεί στον καλύτερο εφικτό ρυθμό μετάδοσης μπορεί να οριστεί ως

$$m^* = \arg \max_{m \in \{1,2,\dots,M\}} \max_{\{P_S, P_{CB}, P_{R,m}\} \in \Omega} R_m \quad (4.13)$$

όπου R_m είναι ο εφικτός ρυθμός μετάδοσης όταν ο m -οστός αναμεταδότης είναι ενεργός και το σύνολο Ω καθορίζεται από τους περιορισμούς ισχύος και παρεμβολής στον PU. Η επίλυση

του προβλήματος βελτιστοποίησης πραγματοποιείται σε δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα θα υπολογίσουμε την ισχύ εκπομπής κάθε κόμβου έτσι ώστε να μεγιστοποιείται ο ρυθμός μετάδοσης που μπορεί να επιτύχει κάθε αναμεταδότης, τηρώντας παράλληλα τους περιορισμούς ισχύος εκπομπής και την παρεμβολή στον PU. Στο δεύτερο βήμα επιλέγεται ο αναμεταδότης ο οποίος επιτυγχάνει το μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης.

4.3.1 Χρήση πρωτοκόλλου AF

Ο στιγμιαίος ρυθμός μετάδοσης του αναμεταδότη διπλής κατεύθυνσης για AF πρωτόκολλο δίνεται από τη σχέση

$$R_{AF} = \frac{1}{2} \log_2(1 + \text{SNR}_{m,S}) + \frac{1}{2} \log_2(1 + \text{SNR}_{m,CB}) \quad (4.14)$$

Ο παράγοντας $\frac{1}{2}$ πριν το λογάριθμο δηλώνει ότι η διαδικασία απαιτεί δύο χρονοσχισμές. Προκειμένου να είναι εφικτή η επίλυση του προβλήματος, η συγκεκριμένη σχέση απλοποιείται χρησιμοποιώντας την προσέγγιση για υψηλά SNR στον ρυθμό μετάδοσης, δηλαδή για τιμές $\text{SNR} \gg 1$ επομένως προκύπτει $\log_2(1 + \text{SNR}) \approx \log_2(\text{SNR})$

$$R_{AF} \approx \frac{1}{2} \log_2(\text{SNR}_{m,S} \cdot \text{SNR}_{m,CB}) \quad (4.15)$$

Επομένως, θεωρώντας \bar{P}_R , \bar{P}_S και \bar{P}_{CB} τα όρια των ισχύων εκπομπής για τον m -οστό αναμεταδότη, τον MU και τον CB αντίστοιχα, και I_{th} το όριο παρεμβολής στον PU, το πρόβλημα βελτιστοποίησης της κατανομής ισχύος στους SU εκφράζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} & \max_{P_S, P_{CB}, P_{R,m}} \quad \frac{1}{2} \log_2(\text{SNR}_{m,S} \cdot \text{SNR}_{m,CB}) \\ & \text{subject to: } 0 \leq P_{R,m} \leq \bar{P}_R, \quad \forall m = 1, \dots, M \\ & \quad 0 \leq P_S \leq \bar{P}_S \\ & \quad 0 \leq P_{CB} \leq \bar{P}_{CB} \\ & \quad (I_S + I_{CB}) \leq I_{th} \\ & \quad I_{R,m} \leq I_{th}, \quad \forall m = 1, \dots, M \end{aligned} \quad (4.16)$$

Προκειμένου να απλοποιήσουμε το πρόβλημα θα το λύσουμε ξεχωριστά σε κάθε χρονοσχισμή. Κατά τη διάρκεια της δεύτερης φάσης, η κατανομή ισχύος στον m -οστό αναμεταδότη εξαρτάται ουσιαστικά από δύο περιορισμούς, την μέγιστη ισχύ λειτουργίας του αναμεταδότη και την παρεμβολή που προκαλείται στον PU. Για αυτό το λόγο, η βέλτιστη ισχύ αναμετάδοσης μπορεί να εκφραστεί ως

$$P_{R,m}^* = \min \left(\bar{P}_R, \frac{I_{th}}{f_5} \right), \quad \forall m = 1, \dots, M \quad (4.17)$$

Δεδομένου, επίσης, ότι η λογαριθμική συνάρτηση είναι μια γνησίως αύξουσα συνάρτηση του ορίσματος της το πρόβλημα βέλτιστης κατανομής ισχύος απλοποιείται στο εξής πρόβλημα:

$$\begin{aligned} \max_{P_S, P_{CB}} \quad & \text{SNR}_{m,S} \cdot \text{SNR}_{m,CB} \\ \text{subject to:} \quad & 0 \leq P_S \leq \bar{P}_S \\ & 0 \leq P_{CB} \leq \bar{P}_{CB} \\ & (I_S + I_{CB}) \leq I_{th} \end{aligned} \quad (4.18)$$

όπου

$$\text{SNR}_{m,S} \cdot \text{SNR}_{m,CB} = \frac{P_{CB} (P_{R,m}^*)^2 f_1^2 f_2^2}{\sigma_n^4 (P_{R,m}^* f_2 + P_S f_1 + P_{CB} f_2 + \sigma_n^2) (P_{R,m}^* f_1 + P_S f_1 + P_{CB} f_2 + \sigma_n^2)}$$

Για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης, χρησιμοποιείται η μέθοδος των πολλαπλασιαστών Lagrange και εφαρμόζονται οι συνθήκες Karush-Kuhn-Tucker. Συγκεκριμένα, η Lagrangian του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι

$$\mathcal{L}_{AF} = \text{SNR}_{m,S} \cdot \text{SNR}_{m,CB} - \lambda_S (P_S - \bar{P}_S) - \lambda_{CB} (P_{CB} - \bar{P}_{CB}) - \lambda_1 (f_3 P_S + f_4 P_{CB} - I_{th}) \quad (4.19)$$

όπου λ_S , λ_{CB} και λ_1 αναπαριστούν τους πολλαπλασιαστές Lagrange που σχετίζονται με τη μέγιστη ισχύ του MU, τη μέγιστη ισχύ του CB και την παρεμβολή στον PU την πρώτη χρονοσχιμή αντίστοιχα. Εφαρμόζοντας τις συνθήκες Karush-Kuhn-Tucker (KKT), έχουμε:

$$\frac{\partial \mathcal{L}_{AF}}{\partial P_S} = 0 \quad \text{και} \quad \frac{\partial \mathcal{L}_{AF}}{\partial P_{CB}} = 0 \quad (4.20)$$

Επομένως λύνοντας το σύστημα εξισώσεων ως προς P_S και ως προς P_{CB} παίρνουμε αντίστοιχα τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$P_S^* = \sqrt{\left(\frac{\sigma_n^4 A}{\sigma_n^4 f_2^2 + (\lambda_S + \lambda_1 f_3) P_{CB} (P_{R,m}^*)^2 f_1^2 f_2^2} \right)^+} \quad (4.21)$$

$$P_{CB}^* = \sqrt{\left(\frac{\sigma_n^4 B}{\sigma_n^4 f_1^2 + (\lambda_{CB} + \lambda_1 f_4) P_S (P_{R,m}^*)^2 f_1^2 f_2^2} \right)^+} \quad (4.22)$$

όπου

$$A = (P_{R,m}^*)^2 f_2 f_1 + P_{R,m}^* (f_2 \sigma_n^2 + f_1 \sigma_n^2) + P_{CB}^2 f_1^2 + 2 P_{CB} f_1 \sigma_n^2 + P_{R,m}^* P_{CB} (f_2 f_1 + f_1^2) + \sigma_n^4$$

$$B = \left(P_{R,m}^*\right)^2 f_2 f_1 + P_{R,m}^* \left(f_2 \sigma_n^2 + f_1 \sigma_n^2\right) + P_S^2 f_1^2 + 2P_S f_2 \sigma_n^2 + P_{R,m}^* P_S \left(f_2 f_1 + f_2^2\right) + \sigma_n^4$$

και ο συμβολισμός $(x)^+$ δηλώνει το μέγιστο μεταξύ x και μηδέν.

4.3.2 Χρήση πρωτοκόλλου DF

Στην περίπτωση DF πρωτοκόλλου ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης που μπορεί να επιτευχθεί εκφράζεται από τη σχέση

$$R_{DF} = \frac{1}{2} \min \left[\min \{R_1, R_3\} + \min \{R_2, R_4\}, R_5 \right] \quad (4.23)$$

όπου $R_1 = \log_2 \left(1 + \frac{P_S f_2}{\sigma_n^2} \right)$, $R_2 = \log_2 \left(1 + \frac{P_{CB} f_1}{\sigma_n^2} \right)$ δηλώνουν τον ρυθμό μετάδοσης από την

πηγή και τον προορισμό προς στον αναμεταδότη στην πρώτη χρονοθυρίδα, αντίστοιχα,

$R_3 = \log_2 \left(1 + \frac{P_R f_1}{\sigma_n^2} \right)$, $R_4 = \log_2 \left(1 + \frac{P_R f_2}{\sigma_n^2} \right)$ δηλώνουν τον ρυθμό μετάδοσης από τον

αναμεταδότη στην πηγή και τον προορισμό στη δεύτερη χρονοθυρίδα, αντίστοιχα, και

$R_5 = \log_2 \left(1 + \frac{P_{CB} f_1 + P_S f_2}{\sigma_n^2} \right)$ δηλώνει το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης που μπορεί να

επιτευχθεί και στις δύο χρονοθυρίδες.

Υποθέτουμε ότι ο κόμβος αναμετάδοσης αποκωδικοποιεί το σήμα υψηλού SNR (Down-Link, DL σήμα) πρώτα, και στη συνέχεια αποκωδικοποιεί το άλλο σήμα (Up-Link, UL σήμα) μετά την αφαίρεση του αποκωδικοποιημένου σήματος. Για αυτό το λόγο λαμβάνουμε υπ'οψιν επιπλέον πολλαπλασιαστές Lagrange για UL και DL. Η Lagrangian για το πρόβλημα DF αναμετάδοσης γράφεται

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{DF} = & (1 - \lambda_u - 1 + \lambda_d) \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P_S f_2}{\sigma_n^2} \right) (1 - \lambda_d) \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P_{CB} f_1 + P_S f_2}{\sigma_n^2} \right) - \\ & \lambda_s \left(P_S - \overline{P_S} \right) - \lambda_{CB} \left(P_{CB} - \overline{P_{CB}} \right) - \lambda_1 \left(f_3 P_S + f_4 P_{CB} - I_{th} \right) \end{aligned} \quad (4.24)$$

όπου λ_u και λ_d είναι οι μεταβλητές που σχετίζονται με τους περιορισμούς στο ρυθμό μετάδοσης στο UL και DL, αντίστοιχα. Εφαρμόζοντας συνθήκες KKT έχουμε

$$\frac{\partial \mathcal{L}_{DF}}{\partial P_S} = 0 \quad \text{και} \quad \frac{\partial \mathcal{L}_{DF}}{\partial P_{CB}} = 0 \quad (4.25)$$

Θέτουμε $a = 2 \ln 2$ και λύνουμε ως προς P_{CB} και ως προς P_S προκειμένου να βρούμε τη βέλτιστη κατανομή ισχύος και παίρνουμε

$$P_{CB}^* = \left(\frac{(1-\lambda_d)}{a(\lambda_1 f_4 + \lambda_{CB})} - \frac{P_S f_2 + \sigma_n^2}{f_1} \right)^+ \quad (4.26)$$

$$P_S^* = \left(\frac{\frac{(\lambda_d - \lambda_u) f_2 f_1 (1-\lambda_d)}{a(\lambda_1 f_4 + \lambda_{CB})} - \frac{\sigma_n^2 (1-\lambda_d)(\lambda_1 f_3 + \lambda_S) f_1}{\lambda_1 f_4 + \lambda_{CB}} - f_2}{\frac{(\lambda_1 f_3 + \lambda_S) f_2 f_1 (1-\lambda_d)}{(\lambda_1 f_4 + \lambda_{CB})} + (\lambda_d - \lambda_u) f_2^2 - (1-\lambda_u) f_2} \right)^+ \quad (4.27)$$

Από τις σχέσεις (4.21), (4.22) και (4.26), (4.27) παρατηρείται ότι οι βέλτιστες τιμές για την ισχύ κάθε κόμβου δεν μπορούν να υπολογιστούν αναλυτικά με χρήση κλειστού τύπου. Για το λόγο αυτό, για την επίλυση τους θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος υποβαθμισμένης βελτιστοποίησης (subgradient method) προκειμένου να βρούμε με επαναληπτικό τρόπο τους πολλαπλασιαστές Lagrange καθώς και την βέλτιστη ισχύ κάθε κόμβου. Συγκεκριμένα για τα λ θα δοθούν τυχαίες αρχικές τιμές και οι τιμές τους θα ανανεώνονται επαναληπτικά με βάση τους τύπους

$$\lambda_S^{t+1} = \lambda_S^t - \delta(t) \left[\overline{P_S} - P_S^* \right] \quad (4.28)$$

$$\lambda_{CB}^{t+1} = \lambda_{CB}^t - \delta(t) \left[\overline{P_{CB}} - P_{CB}^* \right] \quad (4.29)$$

$$\lambda_1^{t+1} = \lambda_1^t - \delta(t) \left[I_{th} - (f_3 P_S^* + f_4 P_{CB}^*) \right] \quad (4.30)$$

$$\lambda_u^{t+1} = \lambda_u^t - \delta(t) \left[\frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P_{R,m}^* f_1}{\sigma_n^2} \right) - \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P_S^* f_2}{\sigma_n^2} \right) \right] \quad (4.31)$$

$$\lambda_d^{t+1} = \lambda_d^t - \delta(t) \left[\frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P_{R,m}^* f_2}{\sigma_n^2} \right) + \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P_S^* f_2}{\sigma_n^2} \right) - \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P_S^* f_2 + P_{CB}^* f_1}{\sigma_n^2} \right) \right] \quad (4.32)$$

όπου $\delta(t)$ είναι βηματική συνάρτηση και καθορίζει το βήμα με το οποίο θα γίνεται κάθε επανάληψη. Η επανάληψη γίνεται μέχρι να υπάρξει σύγκλιση της βέλτιστης ισχύος για τους κόμβους.

Στην συνέχεια, ο Πίνακας 6, παρουσιάζει τα βήματα του αλγόριθμου βέλτιστης κατανομής ισχύος και επιλογής αναμεταδότη για τα συνεργατικά πρωτόκολλα AF και DF.

```

- Είσοδος :  $I_{th}, \bar{P}_S, \bar{P}_{CB}, \bar{P}_R, M, f_1, f_2, f_3, f_4, f_5$ 
% Υπολογισμός ρυθμού μετάδοσης σε κάθε αναμεταδότη για AF και DF
for  $m = 1 : M$  do

-  $P_{R,m}^* = \min \left( \bar{P}_R, \frac{I_{th}}{f_5} \right)$ 

% Βέλτιστη κατανομής ισχύος σε AF πρωτόκολλο
- Αρχικοποίηση των πολλαπλασιαστών Lagrange  $\lambda$  και της ισχύος  $P_{CB}$ 
while (απαιτούμενη ακρίβεια δεν έχει επιτευχθεί) do
    - Λύση προβλήματος (4.21) και εύρεση  $P_S^*, P_S = P_S^*$ 
    - Λύση προβλήματος (4.22) και εύρεση  $P_{CB}^*, P_{CB} = P_{CB}^*$ 
    - Ανανέωση των  $\lambda$  με βάση τις σχέσεις (4.28)-(4.30)
end while

- Εύρεση ρυθμού μετάδοσης  $R_{AF}$  για τον  $m$  αναμεταδότη
% Βέλτιστη κατανομής ισχύος σε DF πρωτόκολλο
- Αρχικοποίηση των πολλαπλασιαστών Lagrange  $\lambda$ 
while (απαιτούμενη ακρίβεια δεν έχει επιτευχθεί) do
    - Λύση προβλήματος (4.27) και εύρεση  $P_S^*, P_S = P_S^*$ 
    - Λύση προβλήματος (4.26) και εύρεση  $P_{CB}^*$ 
    - Ανανέωση των  $\lambda$  με βάση τις σχέσεις (4.28)-(4.32)
end while

- Εύρεση ρυθμού μετάδοσης  $R_{DF}$  για τον  $m$  αναμεταδότη
end for

- Επιλογή αναμεταδότη με το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης για AF πρωτόκολλο
- Επιλογή αναμεταδότη με το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης για DF πρωτόκολλο

```

Πίνακας 6. Αλγόριθμος βέλτιστης επιλογής αναμεταδότη και κατανομής ισχύος

4.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του μοντέλου του συστήματος που αναλύσαμε πριν. Συγκεκριμένα, ελέγχεται η απόδοση του συστήματος για τα δύο πρωτόκολλα αναμετάδοσης (AF, DF) για διάφορες τιμές παραμέτρων. Η βασική μετρική που εξετάζεται είναι ο ρυθμός μετάδοσης ανά μονάδα φάσματος (bps/Hz) που μπορεί να επιτύχει το δευτερεύον γνωστικό ραδιοδίκτυο. Η υλοποίηση και τα διαγράμματα πραγματοποιήθηκαν με προσομοιώσεις Monte Carlo για 1000 διαφορετικά στιγμιότυπα εξασθένησης των καναλιών στο πρόγραμμα MatLab.

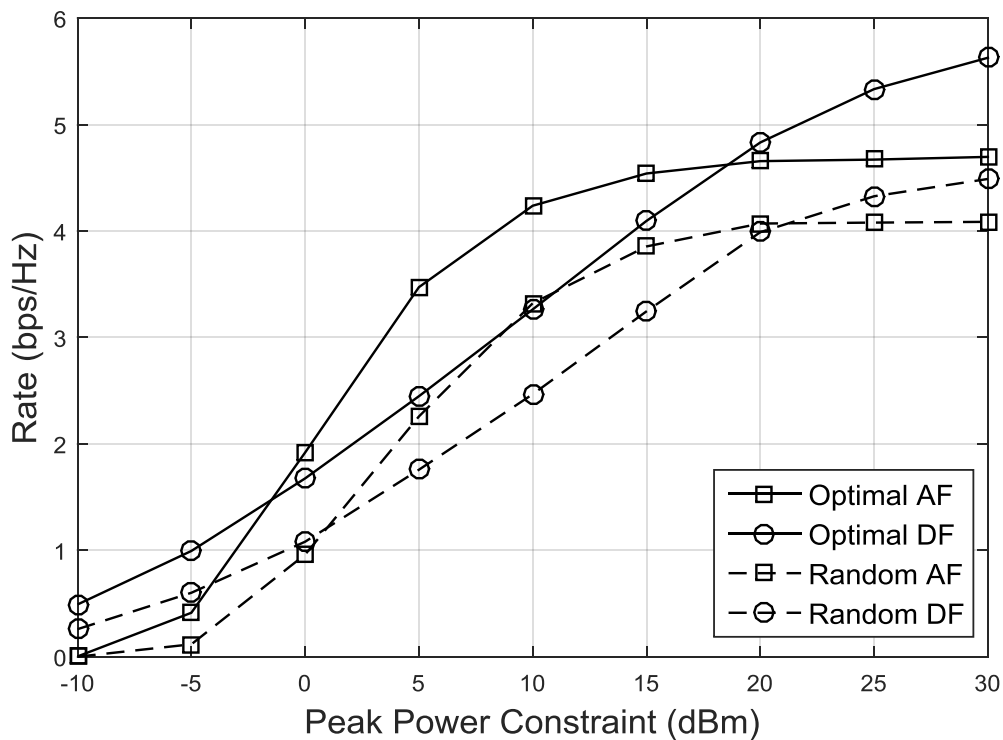
Συγκεκριμένα, το σύστημα που εξετάστηκε αποτελείται από έναν δευτερεύων σταθμό βάσης (CB), έναν δευτερεύων χρήστη (S), τέσσερις αναμεταδότες (R) και έναν πρωτεύων χρήστη (PU). Υποθέσαμε, επίσης, ότι όλα τα κανάλια υπόκεινται σε διαλείψεις Nakagami- m , όπου $m=1$, με λευκό προσθετικό Gaussian θόρυβο διακύμανσης, $\sigma_n^2 = 10^{-4}$, και μέσες απώλειες διαδρομής (path loss), $PL = 1$. Το κατώφλι παρεμβολής στον πρωτεύοντα χρήστη είναι $I_{th} = 20dBm$ και μεταβάλλουμε το όριο ισχύος εκπομπής για τους δευτερεύοντες κόμβους CB, S και R στην περιοχή $-10dBm \leq P_{bar} \leq 30dBm$.

Ο Πίνακας 7 περιέχει εν συντομία τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν για την αναπαράσταση του συστήματος καθώς και τις αντίστοιχες τιμές τους.

Παράμετροι	Τιμές παραμέτρων
N_{CB}	1
N_S	1
N_R	4
N_{PU}	1
I_{th}	20dBm
σ_n^2	10^{-4}
m (Nakagami parameter)	1
PL	1

Πίνακας 7. Παράμετροι μοντέλου συστήματος

Στην πρώτη περίπτωση, στο Σχήμα 7, γίνεται σύγκριση ανάμεσα στο ρυθμό μετάδοσης που επιτυγχάνουν τα πρωτόκολλα AF και DF με βέλτιστη επιλογή αναμεταδότη καθώς και με τυχαία επιλογή αναμεταδότη. Ο οριζόντιος άξονας αναφέρεται στο στιγμιαίο περιορισμό ισχύος εκπομπής που θέτεται στους χρήστες.

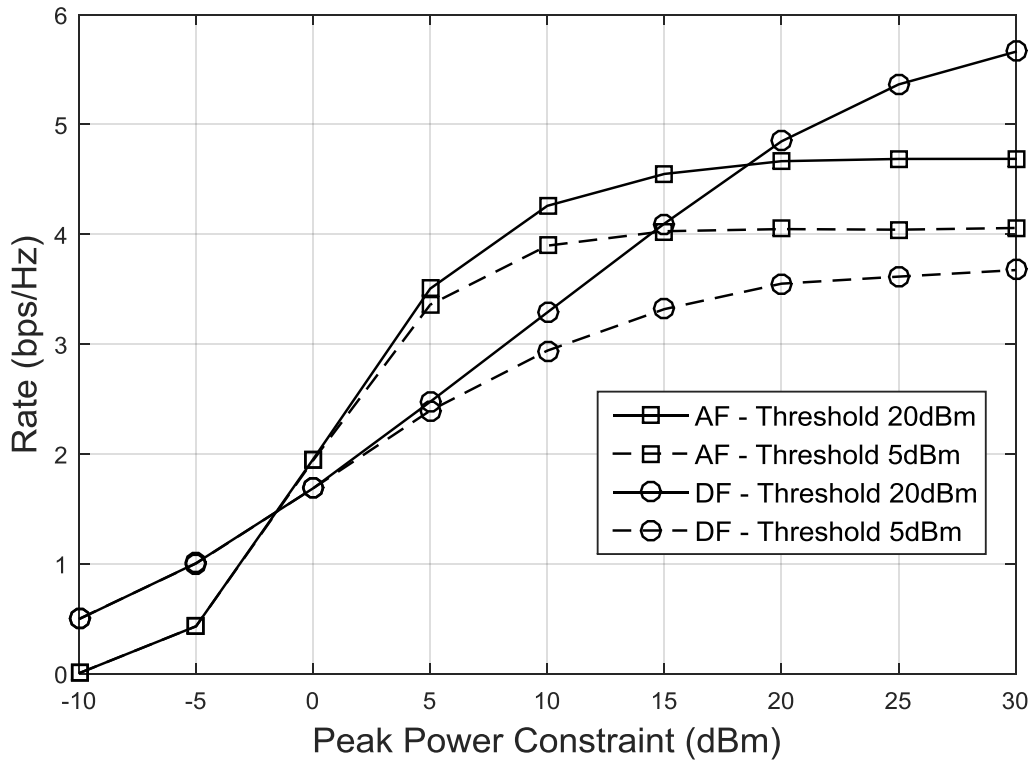


Σχήμα 7. Ρυθμός μετάδοσης με επιλογή βέλτιστου και τυχαίου αναμεταδότη

Από το σχήμα αυτό, παρατηρούμε ότι για χαμηλές τιμές του ορίου ισχύος εκπομπής, στην περιοχή δηλαδή χαμηλού SNR, υπερέχει το πρωτόκολλο DF καθώς έχει τη δυνατότητα απομάκρυνσης του θορύβου και επανεκπομπής από τον αναμεταδότη καθαρού σήματος. Στη συνέχεια, υπάρχει μια περιοχή SNR όπου το AF πρωτόκολλο παρουσιάζει μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης από το DF πρωτόκολλο. Αυτό συμβαίνει γιατί η επίδραση του θορύβου είναι σημαντικά μειωμένη και έτσι η χρήση του πρωτοκόλλου DF δεν βελτιώνει την απόδοση του συστήματος, αλλά αντιθέτως ο ρυθμός μετάδοσης του DF περιορίζεται από το SNR της χειρότερης ζεύξης, όπως αναφέραμε στην προηγούμενη ενότητα. Στο τέλος, για υψηλές τιμές της ισχύος εκπομπής, άρα για υψηλό SNR, το πρωτόκολλο DF παρουσιάζει εκ' νέου υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης από το πρωτόκολλο AF, το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι ο αναμεταδότης AF στη δεύτερη χρονοθυρίδα ενισχύει τον θόρυβο που προέρχεται από την εκπομπή των δευτερευόντων χρηστών στην πρώτη χρονοθυρίδα περιορίζοντας έτσι το συνολικό ρυθμό μετάδοσης του συστήματος. Βέβαια λόγω του περιορισμού παρεμβολής στον πρωτεύοντα χρήστη, τα δύο πρωτόκολλα εμφανίζουν ένα σημείο κορεσμού του ρυθμού μετάδοσης που μπορούν να επιτύχουν, όσο και να αυξήσουμε το όριο ισχύος εκπομπής. Ταυτόχρονα, στο ίδιο σχήμα παρατηρούμε και τον ρυθμό μετάδοσης που μπορεί να επιτύχει το σύστημα αν αντί για επιλογή του βέλτιστου αναμεταδότη έχουμε επιλογή τυχαίου αναμεταδότη. Όπως παρατηρείται από το σχήμα, η επιλογή τυχαίου αναμεταδότη έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης ανεξαρτήτως πρωτοκόλλου (AF/DF) και ορίου

ισχύος. Η συγκεκριμένη παρατήρηση είναι αναμενόμενη αφού η διαδικασία βέλτιστης επιλογής αναμεταδότη έγινε με κριτήριο τη μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης.

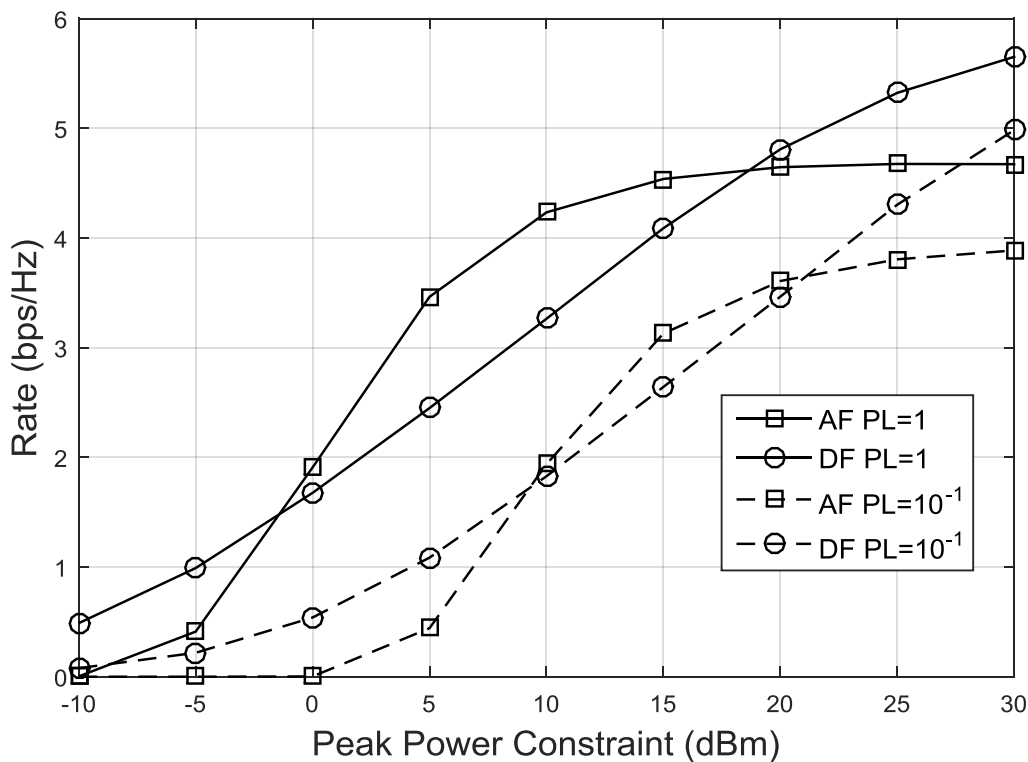
Στο Σχήμα 8, απεικονίζεται ο ρυθμός μετάδοσης των πρωτοκόλλων AF και DF με βέλτιστη επιλογή αναμεταδότη για δύο διαφορετικές τιμές του κατωφλίου παρεμβολής στον πρωτεύοντα χρήστη, συγκεκριμένα για $I_{th} = 20dBm$ και $I_{th} = 5dBm$.



Σχήμα 8. Ρυθμός μετάδοσης για δύο διαφορετικές κατωφλίου παρεμβολής

Όπως παρατηρείται από το σχήμα αυτό, στις χαμηλές τιμές του ορίου ισχύος εκμπομπής ο ρυθμός μετάδοσης είναι ίδιος στις δύο περιπτώσεις, αφού ακόμα και με χρήση της μέγιστης διαθέσιμης ισχύος η παρεμβολή στον πρωτεύοντα παραμένει κάτω από το κατώφλι. Ωστόσο, από μια τιμή ισχύος και μετά, η χρήση μικρότερου κατωφλίου οδηγεί σε μικρότερο ρυθμό μετάδοσης. Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί δεδομένου ότι λόγω του αυστηρότερου περιορισμού παρεμβολής, οι δευτερεύοντες κόμβοι και ο αναμεταδότης θα πρέπει να εκτέμνουν με χαμηλότερη ισχύ προκειμένου να μην δημιουργούν πρόβλημα στον πρωτεύοντα χρήστη.

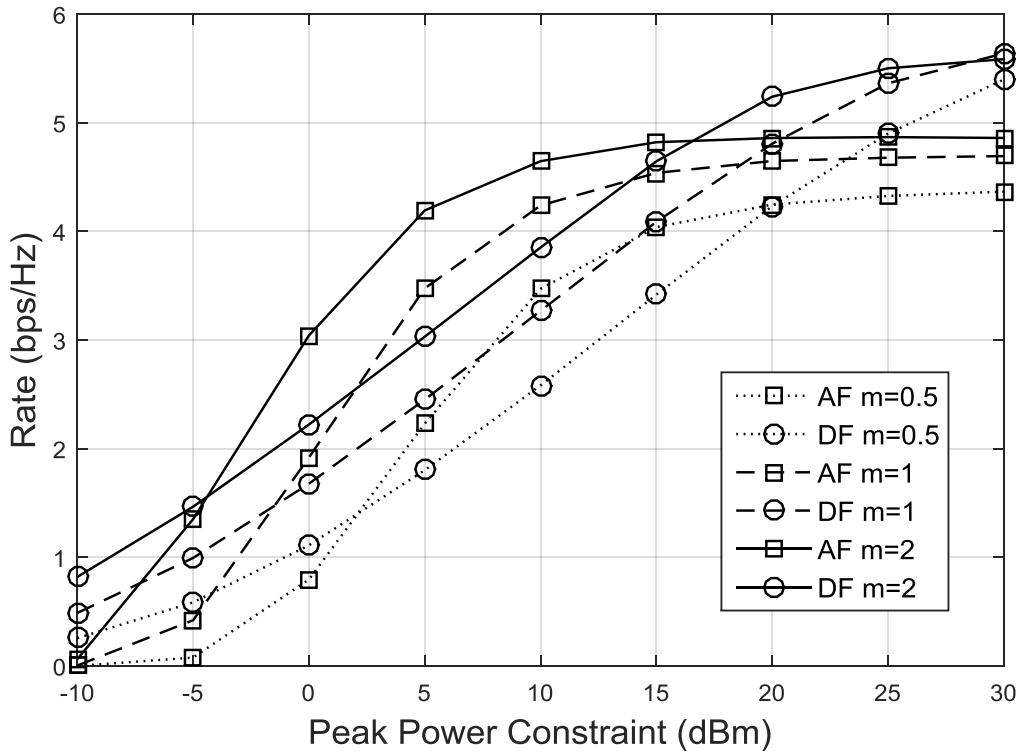
Στο Σχήμα 9, φαίνεται ο ρυθμός μετάδοσης των πρωτοκόλλων AF και DF με βέλτιστη επιλογή αναμεταδότη για διαφορετικές περιπτώσεις απωλειών διαδρομής, με τιμές μέσης απώλειας διαδρομής $PL = 1$ και $PL = 0.1$.



Σχήμα 9. Ρυθμός μετάδοσης για διαφορετικές τιμές απωλειών διαδρομής

Οι δύο διαφορετικές τιμές για τη μέση απώλεια διαδρομής οδηγούν ουσιαστικά σε δύο διαφορετικές τιμές του SNR. Στην περίπτωση με τις αυξημένες απώλειες διαδρομής, δηλαδή χαμηλό SNR, ο ρυθμός μετάδοσης παίρνει μικρότερες τιμές από την περίπτωση μειωμένων απωλειών διάδοσης, δηλαδή υψηλό SNR, γεγονός που έρχεται σε συμφωνία με το θεώρημα του Shannon. Επίσης, παρατηρούμε ότι το σημείο στο οποίο η απόδοση του AF πρωτοκόλλου υπερβαίνει αυτή του DF πρωτοκόλλου είναι σε μεγαλύτερη στάθμη ισχύος για τη περίπτωση των υψηλότερων απωλειών διαδρομής.

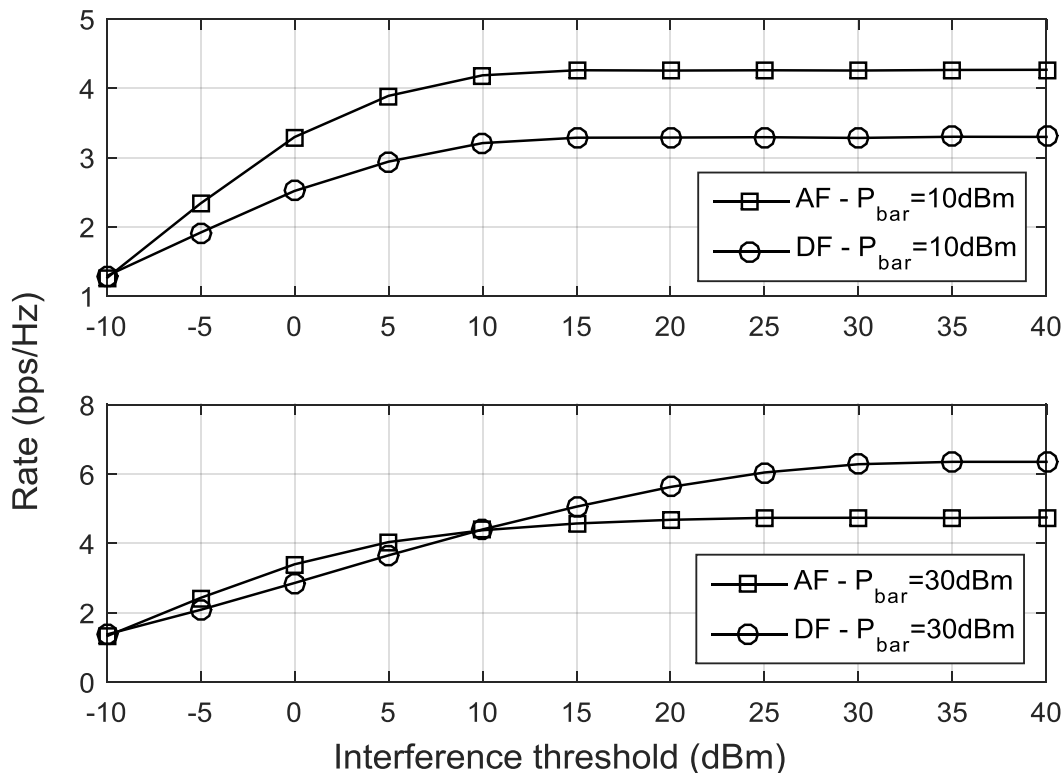
Στο Σχήμα 10, παρουσιάζεται η συμπεριφορά του ρυθμού μετάδοσης ως προς το όριο ισχύος εκπομπής στα πρωτόκολλα AF και DF για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Nakagami m .



Σχήμα 10. Ρυθμός μετάδοσης για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου m

Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι η παράμετρος m μοντελοποιεί ουσιαστικά τη σοβαρότητα των διαλείψεων, με $m = 1$ να προσομοιώνει διαλείψεις Rayleigh, $m = 0.5$ να αναπαριστά πιο δυσμενείς συνθήκες διαλείψεων, όπως διαλείψεις μονόπλευρης Gaussian (one-sided Gaussian fading) και $m > 1$ να είναι εκτίμηση καναλιών Rician ή lognormal. Από το συγκεκριμένο σχήμα, παρατηρούμε ότι για υψηλότερες τιμές του m οδηγούμαστε σε υψηλότερες τιμές του ρυθμού μετάδοσης για το ίδιο όριο ισχύος εκπομπής, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο δεδομένου ότι υψηλότερες τιμές του m αντιστοιχούν σε καλύτερες συνθήκες καναλιού και επομένως υψηλότερο σηματοθορυβικό λόγο.

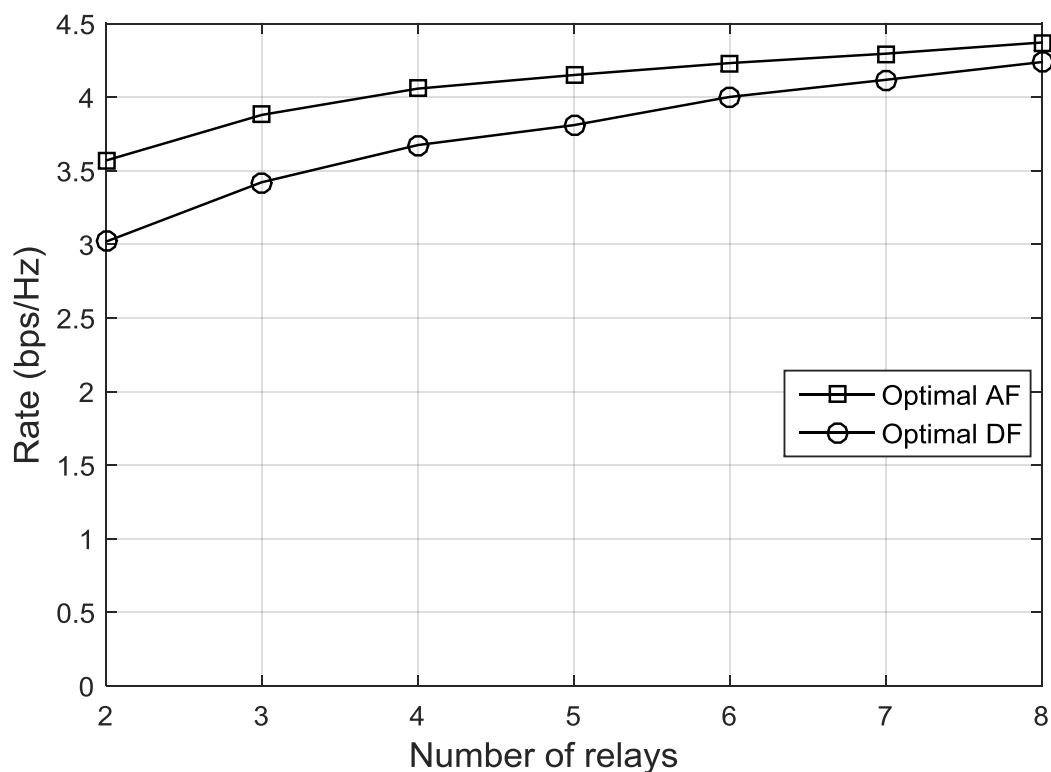
Στο Σχήμα 11, συγκρίνουμε την εξέλιξη του ρυθμού μετάδοσης στα δύο πρωτόκολλα AF και DF με τη μεταβολή του κατωφλίου παρεμβολής στις περιπτώσεις $P_{bar} = 10dBm$ και $P_{bar} = 30dBm$.



Σχήμα 11. Σχέση ρυθμού μετάδοσης με κατώφλι παρεμβολής

Όπως είναι αναμενόμενο, από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι ο ρυθμός μετάδοσης ακολουθεί αύξουσα πορεία με την αύξηση του κατωφλίου μέχρι το σημείο όπου σταθεροποιείται καθώς το όριο ισχύος εκπομπής, το οποίο παραμένει σταθερό σε όλη τη διαδικασία, δεν επιτρέπει περαιτέρω αύξηση του ρυθμού μετάδοσης. Συγκεκριμένα, στο πρώτο διάγραμμα παρατηρούμε ότι ο ρυθμός μετάδοσης του AF πρωτοκόλλου είναι μεγαλύτερος από αυτόν του DF μετά το κορεσμό, γιατί με βάση το Σχήμα 7 βρισκόμαστε στη μεσαία περιοχή SNR, όπου το AF παρουσιάζει καλύτερη απόδοση από το DF. Στο δεύτερο διάγραμμα, μετά το κορεσμό το DF πρωτόκολλο επιτυγχάνει υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης από το AF, όπως είδαμε στο Σχήμα 7, ενώ για κάποιο διάστημα πριν το κορεσμό και για χαμηλό κατώφλι παρεμβολής το AF πρωτόκολλο έχει υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης, γιατί βρίσκεται στη μεσαία περιοχή SNR.

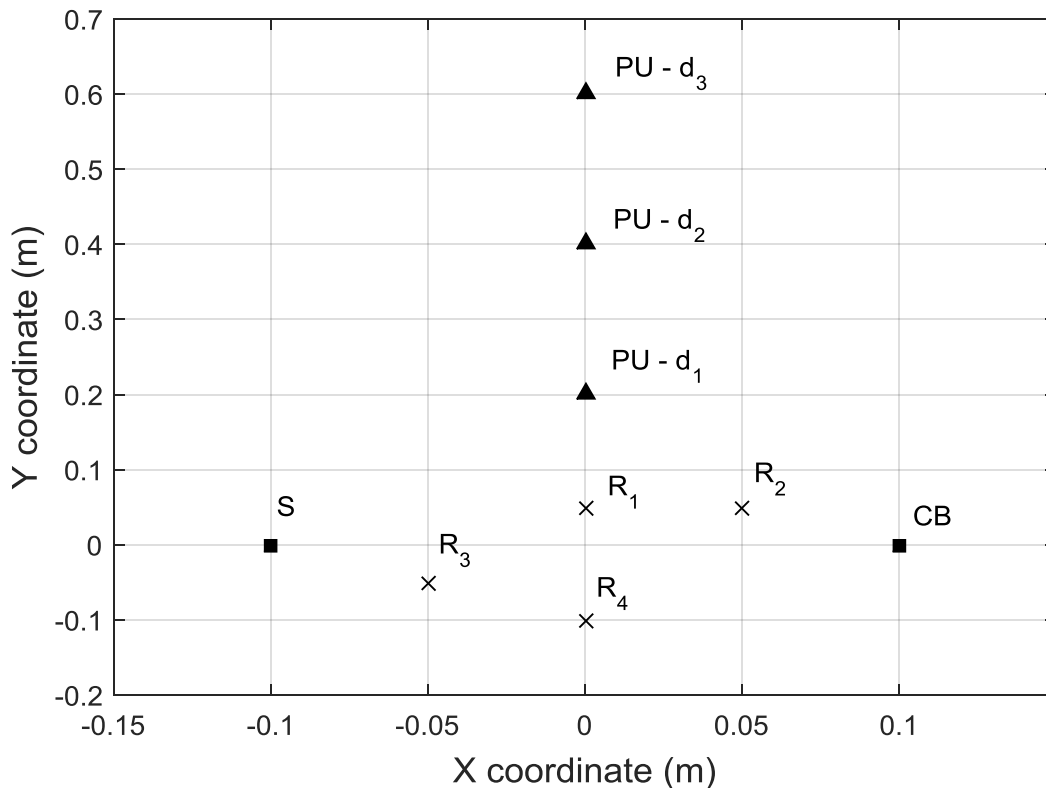
Στο Σχήμα 12, φαίνεται η σχέση του ρυθμού μετάδοσης με τον αριθμό των διαθέσιμων αναμεταδοτών που έχει το δευτερεύον δίκτυο, με όριο ισχύος εκπομπής $P_{bar} = 30dBm$ και κατώφλι παρεμβολής στον πρωτεύοντα $I_{th} = 5dBm$.



Σχήμα 12. Ρυθμός μετάδοσης ως προς τον αριθμό των αναμεταδοτών

Στο διάγραμμα φαίνεται ότι ο ρυθμός μετάδοσης αυξάνεται με την αντίστοιχη αύξηση του αριθμού των αναμεταδοτών στο δίκτυο. Αυτό συμβαίνει διότι περισσότεροι αναμεταδότες αποτελούν ουσιαστικά περισσότερες επιλογές καναλιών και κατά συνέπεια ρυθμού μετάδοσης του γνωστικού συστήματος, άρα μεγαλύτερη πιθανότητα για πιο ευνοϊκές συνθήκες διάδοσης και μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης.

Στη συνέχεια, θα εξετάσουμε την επίδραση που έχει η μεταβολή της απόστασης του PU από το δευτερεύον δίκτυο. Συγκεκριμένα, θα θεωρήσουμε την παρακάτω τοπολογία:

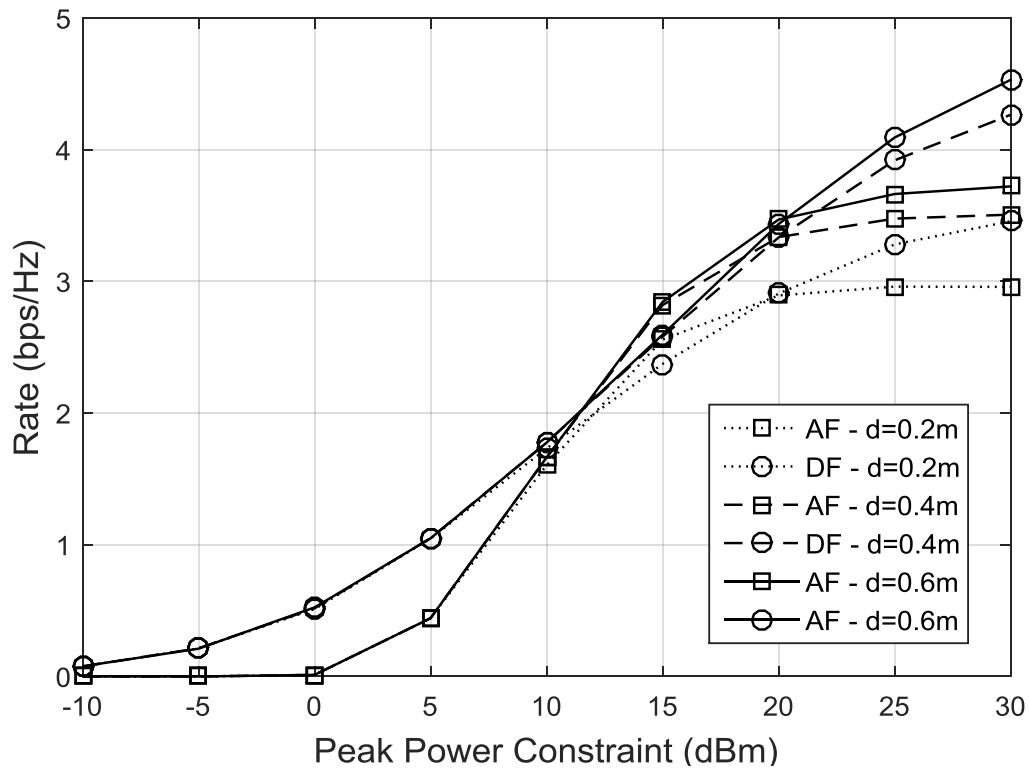


Σχήμα 13. Τοπολογία συστήματος

Υποθέτουμε ότι οι δευτερεύοντες κόμβοι (CB, S, R₁, R₂, R₃, R₄) βρίσκονται σε σταθερές θέσεις ενώ ο πρωτεύοντας σταθμός αλλάζει τη θέση του και απομακρύνεται από το σύστημα κινούμενος πάνω στον άξονα y. Θα υπολογίσουμε τη μέση απώλεια διαδρομής σε κάθε κανάλι με βάση τον προσεγγιστικό τύπο

$$PL = \frac{k}{d^2} \quad (4.33)$$

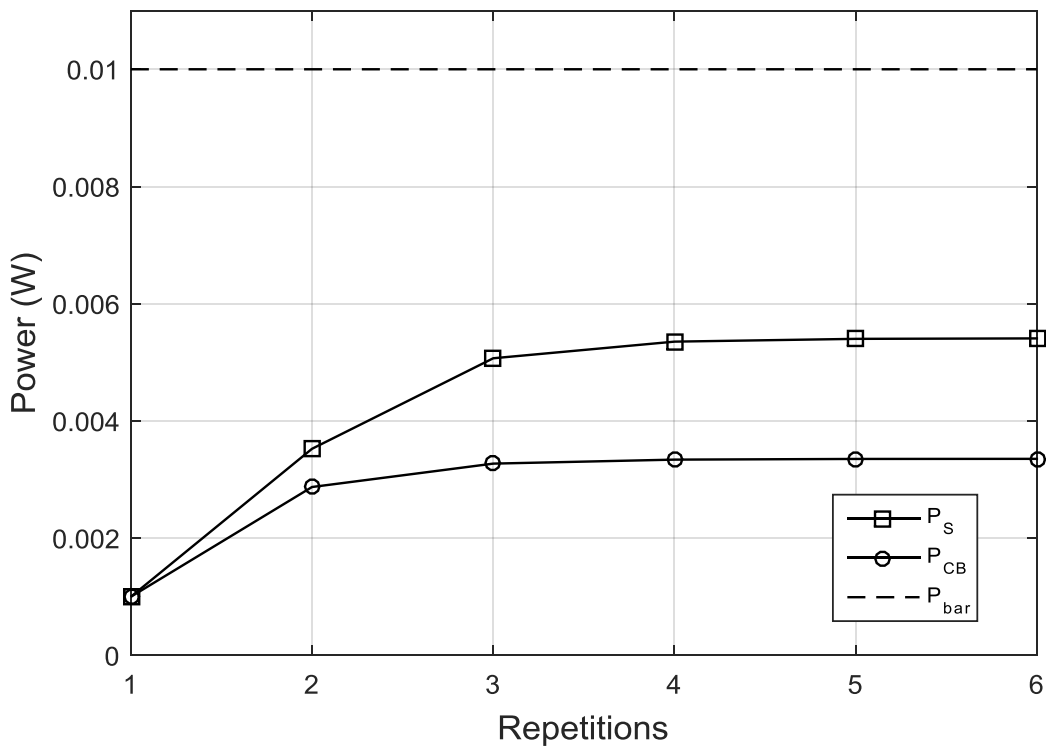
όπου $k = 0.0019$ μια βοηθητική σταθερά για την προσομοίωση και d η απόσταση ανάμεσα σε δύο κόμβους του δικτύου. Στο Σχήμα 14, φαίνεται ο ρυθμός μετάδοσης για τρεις θέσεις του PU (d – η απόσταση του PU από την αρχή των αξόνων) και κατώφλι παρεμβολής $I_{th} = 0dBm$.



Σχήμα 14. Ρυθμός μετάδοσης για διαφορετικές θέσεις του PU

Παρατηρούμε ότι μέχρι ένα όριο ισχύος εκπομπής ο ρυθμός μετάδοσης είναι ίδιος και για τις τρεις αποστάσεις του PU, ενώ από μια τιμή και έπειτα εξαρτάται άμεσα από την απόσταση του PU. Σε μεγαλύτερες αποστάσεις η εκπομπή από τους δευτερεύοντες κόμβους προκαλεί μικρότερη παρεμβολή στον PU εξαιτίας των αυξημένων απωλειών διαδρομής, επομένως μπορούν να εκμεταλλευτούν μεγαλύτερο μέρος της διαθέσιμης ισχύος οδηγώντας έτσι σε αυξημένο ρυθμό μετάδοσης. Επομένως, η αύξηση της απόστασης του πρωτεύοντα χρήστη έχει την ίδια επίδραση με την αύξηση του κατωφλίου παρεμβολής στον πρωτεύοντα χρήστη.

Τέλος, στο Σχήμα 15 θα δούμε τις τιμές των τιμών ισχύος των CB και S κατά τον υπολογισμό τους και έως τη σύγκλιση για τυχαίο αναμεταδότη, κατώφλι παρεμβολής στον πρωτεύοντα χρήστη $I_{th} = 5dBm$ και όριο ισχύος εκπομπής των δευτερευόντων χρηστών $P_{bar} = 10dBm$.



Σχήμα 15. Υπολογισμός ισχύος δευτερευόντων χρηστών

Ο κάθετος άξονας στο παραπάνω διάγραμμα αντιστοιχεί στην ισχύ των S και CB μετρημένη σε Watt, ενώ ο οριζόντιος άξονας δείχνει τις επαναλήψεις που χρειάστηκαν μέχρι τη σύγκλιση των τιμών των ισχύων. Παρατηρούμε ότι οι τελικές τιμές για την ισχύ είναι κάτω από το όριο P_{bar} , όπως είναι επιθυμητό και ο αριθμός των επαναλήψεων που χρειάστηκε ώστε να συγκλίνει η μέθοδος υποβαθμισμένης βελτιστοποίησης είναι σχετικά μικρός. Αυτό εξαρτάται από την ακρίβεια που επιθυμούμε καθώς μεγαλύτερη ακρίβεια σημαίνει περισσότερες επαναλήψεις, αλλά και από την τιμή της βηματικής συνάρτησης $\delta(t)$ η οποία καθορίζει το βήμα ανάμεσα σε διαδοχικές επαναλήψεις με μεγάλες τιμές να οδηγούν σε λιγότερες επαναλήψεις αλλά απόκλιση από την σωστή τιμή, ενώ μικρότερα βήματα έχουν ως αποτέλεσμα πιο αργή αλλά ακριβέστερη σύγκλιση.

4.5 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύσαμε ένα σχήμα αναμετάδοσης διπλής κατεύθυνσης σε ένα δευτερεύον CRN. Συγκεκριμένα, έχοντας ως βασικό στόχο τη μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης στο δευτερεύον δίκτυο υπό την παρουσία πρωτεύοντος χρήστη, αναπτύξαμε έναν μηχανισμό βέλτιστης εκχώρησης ισχύος και επιλογής αναμεταδότη για δύο διαφορετικά πρωτόκολλα αναμετάδοσης AF και DF, ενώ παράλληλα το επίπεδο παρεμβολής στον πρωτεύοντα χρήστη παραμένει κάτω από ένα κατώφλι. Η επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης που προέκυψε έγινε με τη μέθοδο υποβαθμωτής βελτιστοποίησης.

Μετά από μια σειρά προσομοιώσεων εξετάσαμε την επίδοση του συστήματος για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων του. Τα δύο πρωτόκολλα αναμετάδοσης AF και DF έχουν διαφορετική απόδοση ανάλογα με το σηματοθορυβικό λόγο στους δευτερεύοντες κόμβους, με το πρωτόκολλο DF να επιτυγχάνει μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης στις περιοχές χαμηλού SNR και αρκετά υψηλού SNR, ενώ το πρωτόκολλο AF να έχει καλύτερη επίδοση στη μεσαία περιοχή SNR. Σε κάθε περίπτωση η επιλογή του αναμεταδότη που επιτυγχάνει τον μέγιστο ρυθμό αναμετάδοσης σε κάθε στιγμιότυπο αντί για έναν τυχαίο αναμεταδότη αυξάνει σημαντικά την επίδοση και των δύο πρωτοκόλλων, όπως ήταν αναμενόμενο. Η μεταβολή των μέσων απωλειών διαδρομής συνολικά στο σύστημα προκαλεί αντίστοιχη μείωση στο ρυθμό μετάδοσης, επειδή μειώνεται το επίπεδο του SNR σε όλους τους κόμβους. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται όταν η παράμετρος Nakagami m αλλάζει τιμές, έχοντας ως αποτέλεσμα να αλλάζει η περιγραφή του ασύρματου διαύλου με χαμηλό m να υποδηλώνει δυσμενείς συνθήκες μετάδοσης και υψηλό m πιο ευνοϊκές.

Αν παρατηρήσουμε το Σχήμα 8 και το Σχήμα 11, τα οποία σχετίζονται με τη μεταβολή του ρυθμού μετάδοσης ανάλογα με το κατώφλι παρεμβολής, θα διαπιστώσουμε μια αναλογία ανάμεσα στο όριο ισχύος εκπομπής των δευτερευόντων χρηστών και το κατώφλι παρεμβολής των πρωτεύοντων χρηστών. Αν διατηρήσουμε σταθερό το κατώφλι παρεμβολής και αυξάνουμε το όριο ισχύος εκπομπής ο ρυθμός μετάδοσης αυξάνεται μέχρι κάποιο σημείο κορεσμού, διαφορετικό για τα δύο πρωτόκολλα. Αντίστοιχα, αν διατηρήσουμε σταθερό το όριο ισχύος εκπομπής και αυξάνουμε το κατώφλι παρεμβολής παρατηρούμε ότι ο ρυθμός μετάδοσης ακολουθεί την ίδια συμπεριφορά όπως και πριν. Αυτή η σχέση προσθέτει μια ευελιξία στο σύστημα καθώς μπορούμε να πετύχουμε ένα δεδομένο QoS εκμεταλλευόμενοι αυτό το trade-off. Επιπρόσθετα, με βάση το Σχήμα 14 εισάγουμε και μια τρίτη παράμετρο στο trade-off που είναι η απόσταση του PU από το δευτερεύον δίκτυο, η οποία έμμεσα μεταβάλλει το κατώφλι παρεμβολής.

Στο Σχήμα 12 φαίνεται η εξάρτηση του ρυθμού μετάδοσης από τον αριθμό αναμεταδοτών. Στη μετάβαση από δύο σε τρεις αναμεταδότες παρατηρείται η μεγαλύτερη αύξηση, ενώ για κάθε επιπλέον αναμεταδότη η αύξηση που παρατηρείται είναι μικρότερη από την

προηγούμενη μέχρι να υπάρξει κορεσμός. Οι περισσότεροι αναμεταδότες παρέχουν στο σύστημα περισσότερες επιλογές ώστε να μεγιστοποιήσει το ρυθμό μετάδοσης, αλλά αυξάνουν το συνολικό κόστος της υποδομής. Επιπλέον, αυξάνουν το χρόνο βέλτιστης επιλογής αναμεταδότη καθώς αυξάνονται όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί καναλιών του συστήματος πρέπει να ελεγχθούν.

Στο μοντέλο συστήματος που αναλύσαμε σε αυτό το κεφάλαιο, υποθέσαμε ότι δεν υπάρχει απευθείας κανάλι επικοινωνίας μεταξύ πομπού και δέκτη. Στην περίπτωση που ο δέκτης λαμβάνει δύο διαφορετικές εκδοχές του σήματος, δηλαδή μια από τον αναμεταδότη και μια από τον πομπό, η χρήση τεχνικών συνδυασμού (SC, MRC, EGC) μπορεί να αυξήσει αισθητά το SNR στο δέκτη άρα και το ρυθμό μετάδοσης χωρίς επιπλέον αύξηση της ισχύος εκπομπής. Ενδιαφέρον, παρουσιάζει και η περίπτωση όπου αντί για επιλογή ενός αναμεταδότη θα είχαμε επιλογή δύο ή περισσότερων αναμεταδοτών, οι οποίοι θα έστελναν ο καθένας από μια εκδοχή του σήματος στο δέκτη ώστε ο δέκτης να αυξήσει περαιτέρω το SNR του με τις τεχνικές που αναφέραμε. Βέβαια, αυτή η μέθοδος θα προκαλούσε αυξημένη παρεμβολή στον πρωτεύοντα χρήστη καθώς και ανάμεσα στους διαφορετικούς αναμεταδότες.

Το επιστημονικό πεδίο της αναμετάδοσης διπλής κατεύθυνσης σε δευτερεύοντα γνωστικά ραδιοδίκτυα έχει πολλά περιθώρια για έρευνα και ανάπτυξη επιπλέον τεχνικών. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να αναλυθεί η επίδοση του πρωτοκόλλου αναμετάδοσης CF και να γίνει η σύγκριση του με τα άλλα δύο πρωτόκολλα (AF/DF). Επιπλέον, σημαντικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση της αναμετάδοσης με δύο ή περισσότερα άλματα, δηλαδή όταν η επικοινωνία ανάμεσα σε πομπό και δέκτη γίνεται με χρήση δύο ή περισσότερων αναμεταδοτών. Ένα σύστημα με πολλαπλά άλματα μπορεί να αυξήσει σημαντικά την περιοχή κάλυψης και να μειώσει ακόμα περισσότερο την απαιτούμενη ισχύ στα τερματικά αυξάνοντας αντίστοιχα το κόστος και την πολυπλοκότητα.

Βιβλιογραφία

- [1] Hossain, Ekram, Dusit Niyato, and Zhu Han. Dynamic spectrum access and management in cognitive radio networks. Cambridge University Press, 2009.
- [2] Liu, KJ Ray, and Beibei Wang. *Cognitive radio networking and security: A game-theoretic view*. Cambridge University Press, 2010.
- [3] “Report of the spectrum efficiency group,” FCC Spectrum Policy Task Force, Report, November 2002.
- [4] M. M. Buddhikot, “Understanding dynamic spectrum access: models, taxonomy and challenges,” in *Proceedings of IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, April 2007, pp. 649–663.
- [5] S. Haykin, “Cognitive radio: brain-empowered wireless communications,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 2, pp. 201–220, 2005.
- [6] Mitola, J., & Maguire Jr, G. Q. (1999). Cognitive radio: making software radios more personal. *Personal Communications, IEEE*, 6(4), 13-18.
- [7] I. F. Akyildiz, W.-Y. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty. NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey. *Computer Networks*, **50**:2127–2159, 2006.
- [8] R.V. Prasad, P. Pawlczak, J. A. Hoffmeyer, and H. S. Berger, “Cognitive functionality in next generation wireless networks: standardization efforts,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, no. 4, pp. 72–78, 2008.
- [9] Wyglinski, Alexander M., Maziar Nekovee, and Thomas Hou, eds. *Cognitive radio communications and networks: principles and practice*. Academic Press, 2009.
- [10] F. K. Jondral, “Software-defined radio: basics and evolution to cognitive radio,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 5, no. 3, pp. 275–283, 2005.
- [11] Q. Zhao and B. M. Sadler, “A survey of dynamic spectrum access,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 24, no. 3, pp. 79–89, 2007.
- [12] W. Lehr and J. Crowcroft, “Managing shared access to a spectrum commons,” in *Proceedings of IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, November 2005, pp. 420–444.
- [13] D. Hatfield and P. Weiser, “Property rights in spectrum: taking the next step,” in *Proceedings of IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, November 2005, pp. 43–55.
- [14] Goldsmith, Andrea, et al. "Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: An information theoretic perspective." *Proceedings of the IEEE* 97.5 (2009): 894-914
- [15] C. Raman, R. D. Yates, and N. B. Mandayam. Scheduling variable rate links via a spectrum server, in *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN '05)*, pages 110–118, 2005.
- [16] FCC. Establishment of interference temperature metric to quantify and manage interference and to expand available unlicensed operation in certain fixed mobile and satellite frequency bands. FCC Document ET Docket 03-289, 2003.
- [17] P. J. Kolodzy. Interference temperature: a metric for dynamic spectrum utilization. *International Journal of Network Management*, 16(2):103–113, 2006.

- [18] T. Clancy. Formalizing the interference temperature model. *Wiley Journal on Wireless Communications and Mobile Computing*, 7(9):1077–1086, 2007.
- [19] B. Wild and K. Ramchandran, “Detecting primary receivers for cognitive radio applications,” in *Proceedings of IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, November 2005, pp. 124–130.
- [20] T. C. Clancy and D. Walker. Spectrum shaping for interference management in cognitive radio networks, in *SDR Forum Technical Conference*, 2006.
- [21] Y. Xing, C. N. Mathur, M. A. Haleem, R. Chandramouli, and K. P. Subbalakshmi. Dynamic spectrum access with QoS and interference temperature constraints. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 6(4):423–433, 2007.
- [22] R. Matheson. The electrospace model as a frequency management tool, in *International Symposium on Advanced Radio Technologies*, pages 126U–132, 2003.
- [23] R. Day and P. Milgrom. Core-selecting package auctions. *International Journal of Game Theory*, 36(3):393–407, 2008.
- [24] T. Yücek and H. Arslan. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 11(1):116–130, 2009.
- [25] R. Tandra and A. Sahai. SNR walls for signal detection. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2(1):4–17, 2008.
- [26] W. A. Gardner. Signal interception: a unifying theoretical framework for feature detection. *IEEE Transactions on Communications*, 36(8):897–906, 1988.
- [27] D. Cabric and R. W. Brodersen. Physical layer design issues unique to cognitive radio systems, in *IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, volume 2, 2005.
- [28] M. Öner and F. Jondral. Air interface recognition for a software radio system exploiting cyclostationarity, in *15th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC '04)*, volume 3, 2004.
- [29] H. S. Chen, W. Gao, and D. G. Daut. Spectrum sensing using cyclostationary properties and application to IEEE 802.22 WRAN, in *IEEE GLOBECOM*, pages 3133–3138, 2007.
- [30] N. S. Shankar, C. Cordeiro, and K. Challapali. Spectrum agile radios: utilization and sensing architectures, in *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN '05)*, pages 160–169, 2005.
- [31] D. Cabric, S.M. Mishra, and R.W. Brodersen. Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios, in *Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, volume 1, 2004.
- [32] Q. Peng, K. Zeng, J. Wang, and S. Li. A distributed spectrum sensing scheme based on credibility and evidence theory in cognitive radio context, in *IEEE 17th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pages 1–5, 2006.
- [33] M. Öner and F. Jondral. Cyclostationarity based air interface recognition for software radio systems, in *IEEE Radio and Wireless Conference*, pages 263–266, 2004.
- [34] M. Ghozzi, F. Marx, M. Dohler, and J. Palicot. Cyclostationarity-based test for detection of vacant frequency bands, in *First International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*, pages 1–5, 2006.
- [35] N. Han, S. H. Shon, J. H. Chung, and J.M. Kim. Spectral correlation based signal detection method for spectrum sensing in IEEE 802.22 WRAN systems, in *The 8th International Conference in Advanced Communication Technology (ICACT '06)*, volume 3, 2006.
- [36] K. Kim, I. A. Akbar, K. K. Bae et al. Cyclostationary approaches to signal detection and classification in cognitive radio, in *2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN '07)*, pages 212–215, 2007.
- [37] P. D. Sutton, J. Lotze, K. E. Nolan, and L. E. Doyle. Cyclostationary signature detection in multipath Rayleigh fading environments, in *2nd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom '07)*, pages 408–413, 2007.
- [38] P. D. Sutton, K. E. Nolan, and L. E. Doyle. Cyclostationary signatures in practical cognitive radio applications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 26(1):13–24, 2008.

- [39] A. Tkachenko, A. D. Cabric, and R.W. Brodersen. Cyclostationary feature detector experiments using reconfigurable BEE2, in 2nd IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN '07), pages 216–219, 2007.
- [40] J. Lunden, V. Koivunen, A. Huttunen, and H.V. Poor. Spectrum sensing in cognitive radios based on multiple cyclic frequencies, in 2nd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom '07), pages 37–43, 2007.
- [41] L. P. Goh, Z. Lei, and F. Chin. Feature detector for DVB-T signal in multipath fading channel, in 2nd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom '07), 2007.
- [42] G. Vardoulis, J. Faroughi-Esfahani, G. Clemo, and R. Haines. Blind radio access technology discovery and monitoring for software-defined radio communication systems: problems and techniques, in Second International Conference on 3G Mobile Communication Technologies, pages 306–310, 2001.
- [43] M. Mehta, N. Drew, G. Vardoulis, N. Greco, and C. Niedermeier. Reconfigurable terminals: an overview of architectural solutions. *IEEE Communications Magazine*, 39(8):82–89, 2001.
- [44] J. Palicot and C. Roland. A new concept for wireless reconfigurable receivers. *IEEE Communications Magazine*, 41(7):124–132, 2003.
- [45] T. Yücek and H. Arslan. Spectrum characterization for opportunistic cognitive radio systems, in *IEEE Military Communication Conference, MILCOM*, 2006.
- [46] Z. Quan, S. J. Shellhammer, W. Zhang, and A. H. Sayed. Spectrum sensing by cognitive radios at very low SNR, in *IEEE Global Communications Conference*, 2009.
- [47] J. G. Proakis. *Digital Communications*. New York: McGraw–Hill, 2001.
- [48] A. Sahai and D. Cabric. A tutorial on spectrum sensing: fundamental limits and practical challenges, in *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN '05)*, 2005.
- [49] B. Wild and K. Ramchandran. Detecting primary receivers for cognitive radio applications, in *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN '05)*, pages 124–130, 2005.
- [50] A. Sahai, R. Tandra, S. M. Mishra, and N. Hoven. Fundamental design tradeoffs in cognitive radio systems, in *The First International Workshop on Technology and Policy for Accessing Spectrum*, 2006.
- [51] D. Cabric, A. Tkachenko, and R.W. Brodersen. Spectrum sensing measurements of pilot, energy, and collaborative detection, in *Military Communications Conference (MILCOM)*, pages 1–7, 2006.
- [52] S. M. Mishra, S. Brink, R. Mahadevappa, and R. W. Brodersen. Cognitive technology for ultra-wideband/WiMax coexistence, in 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN '07), pages 179–186, 2007.
- [53] G. Ganesan and L. Ye. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio, part I: two user networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 6(6):2204–2213, 2007.
- [54] S. M. Mishra, D. Cabric, C. Chang et al. A real time cognitive radio testbed for physical and link layer experiments, in *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN '05)*, pages 562–567, 2005.
- [55] C. J. Rieser, T. W. Rondeau, C. W. Bostian, and T. M. Gallagher. Cognitive radio testbed: further details and testing of a distributed genetic algorithm based cognitive engine for programmable radios, in *IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*, volume 3.
- [56] T.W. Rondeau, C. J. Rieser, B. Le, and C.W. Bostian. Cognitive radios with genetic algorithms: intelligent control of software defined radios, in *Software Defined Radio Forum Technical Conference*, 2004.
- [57] D. Raychaudhuri, I. Seskar, M. Ott et al. Overview of the ORBIT radio grid testbed for evaluation of next-generation wireless network protocols, in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, volume 3, 2005.
- [58] “IEEE 1900 standards committee, IEEE SCC 41.”

- [59] K.J.R. Liu, A.K. Sadek, W. Su, and A. Kwasinski, *Cooperative communications and networking*, Cambridge University Press, 2008.
- [60] A.K. Sadek, K.J.R. Liu and A. Ephremides, "Cognitive multiple access via cooperation: Protocol design and performance analysis," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol.53, no.10, pp.3677-3696, October 2007.
- [61] K.B. Letaief and W. Zhang, "Cooperative communications for cognitive radio networks," *Proc. IEEE*, vol.97, no.5, pp.878-893, May 2009
- [62] D. X. He and F. Y. Li, "Throughput and Energy Efficiency Comparison of One-hop, Two-hop, Virtual Relay and Cooperative Retransmission Schemes," *Proc. European Wireless*, 2010.
- [63] Naeem, M., Anpalagan, A., Jaseemuddin, M., & Lee, D. C. (2014). Resource allocation techniques in cooperative cognitive radio networks. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, 16(2), 729-744.
- [64] O. Simeone, J. Gambini, Y. Bar-Ness and U. Spagnolini, "Cooperation and Cognitive Radio," *Proc. IEEE ICC*, June 2007.
- [65] W. Su, J.D. Matyjas and N.B. Stella, "Active Cooperation Between Primary Users and Cognitive Radio Users in Heterogeneous Ad-Hoc Networks," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 60, no. 4, pp. 1796 -1805, April 2012.
- [66] H. P.-H. Lin, S. Chun, H.-J. Su and Y. Hong, "Cognitive radio with unidirectional transmitter and receiver cooperations," *Proc. IEEE CISS*, October 2010.
- [67] S.-Y. Lien, N.R. Prasad, C. Rashmi, K. Chen and C.-W. Su, "Providing statistical quality-of-service guarantees in cognitive radio networks with cooperation," *Proc. IEEE CogART*, May 2009.
- [68] Z. Dai, J. Liu, C. Wang and K. Long, "An Adaptive Cooperation Communication Strategy for Enhanced Opportunistic Spectrum Access in Cognitive Radios," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 16, no. 1, pp. 79-89, Jan. 2012.
- [69] L. Zhai, H. Ji, X. Li and Yiwen Tang, "Coalition Graph Game for Joint Relay Selection and Resource Allocation in Cooperative Cognitive Radio Networks," *Proc. of IEEE Globecom*, 2012.
- [70] F. W.-Jiang, J. W.-Heng; W. R. Ru, "Joint Resource Allocation in Cluster-Based Cognitive Radio Networks," *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. and Mobile Computing*, 2010.
- [71] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behavior," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, Dec. 2004.
- [72] I. Maric and R. D. Yates, "Bandwidth and power allocation for cooperative strategies in gaussian relay networks," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 56, no. 4, pp. 1880-1889, Apr. 2010.
- [73] M. Naeem, D.C. Lee and U. Pareek, "An efficient multiple relay selection scheme for cognitive radio systems," *Proc. IEEE ICC*, May 2010.
- [74] M. Salem, A. Adinoyi, M. Rahman, H. Yanikomeroğlu, D. Falconer, Y.-D. Kim, E. Kim and Y.-C. Cheong, "An Overview of Radio Resource Management in Relay-Enhanced OFDMA-Based Networks," *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, vol.12, no.3, pp.422-438, 2010.
- [75] C. He, Z. Feng, Q. Zhang, Z. Zhang and H. Xiao, "A joint relay selection, spectrum allocation and rate control scheme in relay-assisted cognitive radio system," *Proc. IEEE VTC-Fall*, September 2010.
- [76] Z. Liu, Y. Xu, D. Zhang and S. Guan, "An efficient power allocation algorithm for relay assisted cognitive radio network," *Proc. Int. Conf. on Wireless Commun. and Signal Processing*, October 2010.
- [77] X. Hong, C. Wang, M. Uysal, X. Ge and S. Ouyang; , "Capacity of hybrid cognitive radio networks with distributed VAAs," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.59, no.7, pp.3510-3523, September 2010.
- [78] R. Manna, R.H.Y. Louie, Y. Li and B. Vucetic, "Cooperative amplify-and-forward relaying in cognitive radio networks," *Proc. IEEE CROWNCOM*, June 2010.
- [79] M.A. Beigi and S.M. Razavizadeh, "Cooperative beamforming in Cognitive Radio networks," *Proc. 2nd IFIP Wireless Days*, December 2009.

- [80] M. Choi, J. Park and S. Choi, "Low complexity multiple relay selection scheme for cognitive relay networks," *Proc. IEEE VTC-Fall*, September 2011.
- [81] J. Zhu, J. Huang and W. Zhang, "Optimal one-dimensional relay placement in cognitive radio networks," *Proc. Int. Conf. on Wireless Communications and Signal Processing*, October 2010.
- [82] Y. Yi, J. Zhang, Q. Zhang, T. Jiang and J. Zhang, "Cooperative communication-aware spectrum leasing in cognitive radio networks," *Proc. IEEE Symp. on New Frontiers in Dynamic Spectrum*, April 2010.
- [83] C. Luo, F.R. Yu, H. Ji and V.C.M. Leung, "Distributed relay selection and power control in cognitive radio networks with cooperative transmission," *Proc. IEEE ICC*, May 2010.
- [84] J. Mietzner, L. Lampe and R. Schober, "Distributed transmit power allocation for multihop cognitive-radio systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.8, no.10, pp.5187-5201, October 2009.
- [85] Y. Xiao, G. Bi and D. Niyato, "Game theoretic analysis for spectrum sharing with multi-hop relaying," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.10, no.5, pp.1527-1537, May 2011
- [86] W. Liu; Y. Hu; S. Ci and H. Tang, "Power control for relay-assisted cognitive radio networks-part II: distributed scenario," *Proc. IEEE VTC-Spring*, May 2011.
- [87] H. Wang, L. Gao, X. Gan, X. Wang and E. Hossain, "Cooperative Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks: A Game-Theoretic Approach," *Proc. IEEE ICC*, May 2010.
- [88] S.C. Jha, U. Phuyal and V.K. Bhargava, "Cross-layer resource allocation approach for multi-hop distributed cognitive radio network," *Proc. 12th Canadian Workshop on Information Theory*, May 2011.
- [89] B. Wang, Z. Han and K.J.R. Liu, "Distributed relay selection and power control for multiuser cooperative communication networks using stackelberg game," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol.8, no.7, pp.975-990, July 2009.
- [90] L. Jun, H. Bo, L. Fei, C. Hong and H. Meng, "Stability analysis and adaptive power allocation in cooperative diversity Cognitive Radio networks," *IEEE ICIEA*, June 2011.
- [91] K. Zarifi, S. Affes and A. Ghayeb, "Joint source power control and relay beamforming in amplify-and-forward cognitive networks with multiple source-destination pairs," *Proc. IEEE ICC*, June 2011.
- [92] L. Jun, H. Bo, W. Xiaofang, L. Fei and L. Qinghua, "Performance evaluation for cognitive radio networks with cooperative diversity," *Proc. IEEE WiCom*, September 2010.
- [93] W. Liu, H. Hu, Y. Hu, H. Tang and S. Ci, "Power control for relay assisted cognitive radio networks-part I: centralized scenario," *Proc. IEEE CCNC*, January 2011.
- [94] A. Alizadeh and S.M.-S. Sadough, "Power minimization in unidirectional relay networks with cognitive radio capabilities," *Proc. 5th Int. Symp. on Telecommunications*, December 2010.
- [95] H.-P. Shiang and M. Schaar, "Distributed resource management in multihop cognitive radio networks for delay-sensitive transmission," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.58, no.2, pp.941-953, Feb. 2009.
- [96] C. Chang, P. Lin and S. Su, "A low-interference relay selection for decode-and-forward cooperative network in underlay cognitive radio," *Proc. IEEE CROWNCOM*, June 2011.
- [97] D. Jiang, H. Zhang, D. Yuan and Z. Bai, "Two-way relaying with linear processing and power control for cognitive radio systems," *Proc. IEEE ICCS*, November 2010.
- [98] S.H. Safavi, R.A.S. Zadeh, V. Jamali and S.Salari, "Interference minimization approach for distributed beamforming in cognitive two way relay networks," *Proc. IEEE PacRim*, August 2011.
- [99] Q. Li, S. H. Ting, A. Pandharipande and Y. Han, "Cognitive spectrum sharing with two-way relaying systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.60, no.3, pp.1233-1240, March 2011.
- [100] M. Mirmohseni, B. Akhbari, and M. R. Aref, "Compress-and-Forward Strategy for Cognitive Interference Channel with Unlimited Look-Ahead," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 15, no. 10, pp. 1068-1071, Oct. 2011.
- [101] K. Lee and A. Yener, "Iterative Power Allocation Algorithms for Amplify/Estimate/Compress-and-Forward Multi-Band Relay Channels," *Proc. IEEE Annu. Conf. on Information Sciences and Systems*, 2006.

- [102] S.A. Astaneh and S. Gazor, "Relay assisted spectrum sensing in cognitive radio," *Proc. of IEEE WOSSPA*, 2011.
- [103] Q. Li, K. H. Li and K. C. Teh, "An Achievable Rate Region for the Cognitive Interference Channel With Causal Bidirectional Cooperation," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 4, pp. 1721-1728, May 2010.
- [104] S. Ashrafinia, U. Pareek, M. Naeem and D.C. Lee, "Biogeography based optimization for joint relay assignment and power allocation in cognitive radio systems," *Proc. IEEE Symp. on Swarm Intelligence*, April 2011.
- [105] M. Naeem, U. Pareek and D.C. Lee, "Interference aware relay assignment schemes for multiuser cognitive radio systems," *Proc. IEEE VTC-Fall*, September 2010.
- [106] D. Hu and S. Mao; , "Cooperative relay in cognitive radio networks: decode-and-forward or amplify-and-forward?," *Proc. IEEE GLOBECOM*, December 2010.
- [107] Z. Guan, L. Ding, T. Melodia and D. Yuan, "On the effect of cooperative relaying on the performance of video streaming applications in cognitive radio networks," *Proc. IEEE ICC*, June 2011.
- [108] H. Kim, H. Wang, J. Lee, S. Park and D. Hong, "Outage probability of cognitive amplify-and-forward relay networks under interference constraints," *Proc. IEEE APCC*, November 2010.
- [109] J. Jia, J. Zhang, and Q. Zhang, "Cooperative relay for cognitive radio networks," *Proc. IEEE INFOCOM*, April 2009.
- [110] J. Lee, H. Wang, J.G. Andrews and D. Hong, "Outage probability of cognitive relay networks with interference constraints," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.10, no.2, pp.390-395, February 2011
- [111] K. Fredj and S. Aissa, "Performance of amplify-and-forward systems with partial relay selection under spectrum-sharing constraints," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, no. 2, pp. 500-504, Feb. 2012
- [112] L. Li, X. Zhou, H. Xu, G.Y. Li, D. Wang and A. Soong, "Simplified relay selection and power allocation in cooperative cognitive radio systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.10, no.1, pp.33-36, January 2011.
- [113] F. Li, B. Bai, J. Zhang, and K. B. Letaief, "Location-based joint relay selection and channel allocation for cognitive radio networks," *Proc. IEEE Globecom*, Dec. 2011.
- [114] A. Alizadeh, N. Forouzan, S.A Ghorashi and S.M. Sadough, "A graphbased approach for relay selection and resource allocation in cognitive two-way relay networks," *Proc. Wireless Advanced*, June 2011.
- [115] J. S. Oberoi, U. Pareek, M. Naeem, D. C. Lee, "EDA-based joint power, subcarrier allocation and relay assignment scheme for multiuser relaying in OFDMA-based cognitive radio systems," *Proc. IEEE ICSPCS*, Dec. 2012.
- [116] M. Naeem, S. Ashrafinia, and D. C. Lee, "Estimation-of-Distribution algorithm for green resource allocation in cognitive radio systems," *Proc. IEEE ICSPCS*, Dec. 2012.
- [117] S. Ashrafinia, U. Pareek, M. Naeem, and D. C. Lee, "Source and relay power selection using biogeography-based optimization for cognitive radio systems," *Proc. IEEE VTC*, Sep. 2011.
- [118] S. Ashrafinia, U. Pareek, M. Naeem, and D. C. Lee, "Binary artificial bee colony for cooperative relay communication in cognitive radio systems," *Proc. IEEE ICC*, June, 2012.
- [119] U. Pareek, M. Naeem and D.C. Lee, "An efficient relay assignment scheme for multiuser cognitive radio networks with discrete power control," *Proc. 6th IEEE WiMob*, October 2010.
- [120] M. Choi, J. Park, and S. Choi, "Simplified power allocation scheme for cognitive multi-node relay networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, no. 6, pp. 2008-2012, June 2012
- [121] G. Zhao, C. Yang, G.Y. Li, D. Li and A.C.K. Soong, "Power and channel allocation for cooperative relay in cognitive radio networks," *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol.5, no.1, pp.151-159, Feb. 2011
- [122] Q. Xiaoyu, T. Zhenhui, X. Shaoyi and J. Li, "Combined Power Allocation in Cognitive Radio-Based Relay-Assisted Networks," *Proc. IEEE ICC*, 2010.

- [123] R. Manna, R.H.Y. Louie, L. Yonghui and B. Vucetic, "Cooperative spectrum sharing in cognitive radio networks with multiple antennas," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol.59, no.11, pp.5509-5522, November 2011.
- [124] W. Wang, W. Gao, X. Bai, T. Peng, G. Chuai and W. Wang, "A framework of wireless emergency communications based on relaying and cognitive radio," *Proc. IEEE PIMRC*, September 2007.
- [125] L. P. Tuyen and V.N. Bao, "Outage performance analysis of dualhop AF relaying system with underlay spectrum sharing," *Proc. IEEE ICACT* Feb. 2012.
- [126] M. Naeem, K. Illanko, A. Karmokar, A. Anpalagan and M. Jaseemuddin, "Power Allocation in Decode and Forward Relaying for Green Cooperative Cognitive Radio Systems," *Proc. IEEE WCNC* 2013.
- [127] C. Gao, Y. Shi, Y.T. Hou, H.D. Sherali and H. Zhou, "Multicast Communications in Multi-Hop Cognitive Radio Networks," *IEEE J.Sel. Areas Commun.*, vol.29, no.4, pp.784-793, April 2011.
- [128] S. Yan and X. Wang, "Power allocation for cognitive radio systems based on nonregenerative ofdm relay transmission," *Proc. IEEE WiCom*, September 2009.
- [129] D. Bharadia, G. Bansal, G., P. Kaligineedi and V.K. Bhargava, "Relay and power allocation schemes for ofdm-based cognitive radio systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.10, no.9, pp.2812-2817, September 2011.
- [130] Liu, KJ Ray. *Cooperative communications and networking*. Cambridge university press, 2009.
- [131] Ubaidulla, Pandarakotttilil, and Sonia Aissa. "Optimal relay selection and power allocation for cognitive two-way relaying networks." *Wireless Communications Letters, IEEE* 1.3 (2012): 225-228.
- [132] Hong, Yao-Win, et al. "Cooperative communications in resource-constrained wireless networks." *Signal Processing Magazine, IEEE* 24.3 (2007): 47-57.
- [133] Costa, Daniel Benevides da, and Sonia Aïssa. "Cooperative dual-hop relaying systems with beamforming over Nakagami-m fading channels." *Wireless Communications, IEEE Transactions on* 8.8 (2009): 3950-3954.
- [134] Chen, Min, and Aylin Yener. "Multiuser two-way relaying: detection and interference management strategies." *Wireless Communications, IEEE Transactions on* 8.8 (2009): 4296-4305.
- [135] Alsharoa, Ahmad, Faouzi Bader, and Mohamed-Slim Alouini. "Relay selection and resource allocation for two-way DF-AF cognitive radio networks." *Wireless Communications Letters, IEEE* 2.4 (2013): 427-430.
- [136] Rankov, Boris, and Armin Wittneben. "Spectral efficient protocols for half-duplex fading relay channels." *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on* 25.2 (2007): 379-389.