



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

## Διαχείριση Πόρων Δικτύων Νέας Γενιάς με Χρήση Θεωρίας Παιγνίων και Μεθόδων Βελτιστοποίησης

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

της

**ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΣ Γ. ΒΑΣΣΑΚΗ**

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και  
Μηχανικού Υπολογιστών Ε.Μ.Π. (2006)

ΑΘΗΝΑ

Σεπτέμβριος 2013

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) - Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Ηράκλειτος ΙΙ . Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης







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

**Διαχείριση Πόρων Δικτύων Νέας Γενιάς  
με Χρήση Θεωρίας Παιγνίων και  
Μεθόδων Βελτιστοποίησης**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

της

**ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΣ Γ. ΒΑΣΣΑΚΗ**

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και  
Μηχανικού Υπολογιστών Ε.Μ.Π. (2006)

**Συμβουλευτική Επιτροπή:** Καθ. Δρ. Φίλιππος Κωνσταντίνου  
Καθ. Δρ. Νικόλαος Ουζούνογλου  
Επικ. Καθ. Δρ. Αθανάσιος Παναγόπουλος

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

.....  
Ν. Ουζούνογλου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Αθ. Παναγόπουλος  
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ι. Κανελλόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

.....  
Α. Κανάτας  
Καθηγητής Πανεπιστημίου  
Πειραιώς

.....  
Γ. Ευθύμογλου  
Αναπλ. Καθηγητής  
Πανεπιστημίου Πειραιώς

ΑΘΗΝΑ  
Σεπτέμβριος 2013



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) - Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Ηράκλειτος ΙΙ . Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.

.....  
**ΣΤΑΥΡΟΥΛΑ Γ. ΒΑΣΣΑΚΗ**

Διπλ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός &  
Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π. (2006)

Copyright © Σταυρούλα Γ. Βασσάκη, 2013  
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 στην κερδοσκοπική χρήση της εργασίας 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.

Αφιερώνεται στους γονείς μου, Γιώργο & Ελένη,  
και στην αδερφή μου, Μαρία.

---

# Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η μελέτη και ανάπτυξη μηχανισμών διαχείρισης ραδιοπόρων για ασύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα νέας γενιάς. Δεδομένου ότι τα περιθώρια για περαιτέρω βελτίωση των τεχνολογιών μετάδοσης έχουν μειωθεί σημαντικά στα δίκτυα νέας γενιάς, η αποδοτική διαχείριση των ασύρματων πόρων κρίνεται απαραίτητη προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η συνολική απόδοση του συστήματος. Για το λόγο αυτό, στο πλαίσιο της διατριβής, προτείνονται καινοτόμοι αποδοτικοί μηχανισμοί για διάφορες λειτουργίες διαχείρισης των ραδιοπόρων. Αναλυτικότερα, η ερευνητική προσπάθεια που έγινε μπορεί να χωριστεί σε δύο βασικά μέρη.

Στο πρώτο μέρος, δίνεται έμφαση στην επίλυση βασικών προβλημάτων διαχείρισης ασυρμάτων πόρων χρησιμοποιώντας αρχές από τη θεωρία παιγνίων (game theory) καθώς και από τη θεωρία σχεδίασης μηχανισμών (mechanism design). Συγκεκριμένα, προτείνεται ένα αποδοτικό, κατανεμημένο σχήμα ελέγχου ισχύος για δορυφορικά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, το οποίο βασίζεται στη μη συνεργατική θεωρία παιγνίων ενώ παράλληλα, αναπτύσσονται καινοτόμοι μηχανισμοί εκχώρησης εύρους ζώνης για σύγχρονα επίγεια και δορυφορικά συστήματα καθώς και για την περίπτωση των γνωστικών συστημάτων.

Το δεύτερο μέρος εστιάζει σε προβλήματα διαχείρισης ραδιοπόρων με κεντρικό γνώμονα την παροχή ποιότητας υπηρεσίας στους τελικούς χρήστες. Συγκεκριμένα, προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι απαιτήσεις ποιότητας των χρηστών, χρησιμοποιείται η θεωρία της αποτελεσματικής χωρητικότητας (effective capacity), η οποία λειτουργεί ως εργαλείο διασύνδεσης του ρυθμού μετάδοσης μιας ασύρματης ζεύξης με τη βασική μετρική των απαιτήσεων ποιότητας από πλευράς καθυστέρησης. Στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής μελετάται το πρόβλημα ελέγχου ισχύος για παροχή ποιότητας επικοινωνίας σε γνωστικά δίκτυα καθώς και στην περίπτωση της πρωτοποριακής αρχιτεκτονικής των γνωστικών δορυφορικών επίγειων δικτύων. Το συγκεκριμένο πρόβλημα επιλύεται χρησιμοποιώντας αρχές από την κλασική θεωρία βελτιστοποίησης καταλήγοντας σε καινοτόμους μηχανισμούς εκχώρησης ισχύος.

---



# Abstract

The objective of this thesis is the study and the development of novel radio resource allocation mechanisms for next generation wireless networks. Given the fact that there is not much scope for further improvement of the transmission technology in next-generation telecommunication networks, the role of resource management is expected to become even more crucial. Towards this direction, in this thesis, efficient resource allocation mechanisms are proposed for various network architectures. More particularly, the research effort can be separated into two main parts.

The first part deals with the solution of various radio resource allocation problems, using principles from game theory and mechanism design theory. Specifically, an efficient power allocation scheme for satellite networks is proposed, exploiting the distributed nature of non cooperative games. Furthermore, novel bandwidth allocation mechanisms are developed for modern terrestrial, satellite networks and for the case of cognitive radio networks.

The second part deals with the problem of power control with statistical delay guarantees. In order to take into account the users' quality requirements, the concept of effective capacity is employed as a suitable tool that can integrate the performance rate of a wireless link and the key metric of delay requirements. The problem of power allocation given specific quality constraints is studied for cognitive radio networks as well as for the novel architecture of cognitive satellite-terrestrial networks. The particular problems are solved using principles from classic optimization theory.

---

# Περιεχόμενα

<b>Κατάλογος Σχημάτων</b>	<b>xiii</b>
<b>Κατάλογος Πινάκων</b>	<b>xv</b>
<b>Κατάλογος Συντμήσεων</b>	<b>xviii</b>
<b>1 Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1 Θεματολογία της Διδακτορικής Διατριβής . . . . .	1
1.2 Δομή της Διδακτορικής Διατριβής . . . . .	1
<b>2 Ασύρματα Δίκτυα Νέας Γενιάς και Διαχείριση Ραδιοπόρων</b>	<b>5</b>
2.1 Εξέλιξη ασυρμάτων δικτύων . . . . .	5
2.1.1 Επίγεια ασύρματα συστήματα επικοινωνιών . . . . .	5
2.1.2 Δορυφορικά συστήματα επικοινωνιών . . . . .	8
2.2 Προηγμένες Ασύρματες Τεχνολογίες . . . . .	10
2.2.1 Συνεργατικές Τεχνικές . . . . .	10
2.2.2 Γνωστικά Δίκτυα . . . . .	12
2.3 Διαχείριση Πόρων Ασυρμάτων Δικτύων . . . . .	14
2.3.1 Ορισμός προβλήματος διαχείρισης πόρων ασυρμάτων δικτύων . . . . .	14
2.3.2 Προσεγγίσεις διαχείρισης πόρων ασυρμάτων δικτύων . . . . .	15
2.3.3 Παραδείγματα διεργασιών διαχείρισης πόρων ασύρματων δικτύων . . . . .	16
<b>3 Μαθηματικά Εργαλεία για Διαχείριση Πόρων Ασυρμάτων Δικτύων</b>	<b>19</b>
3.1 Θεωρία Βελτιστοποίησης . . . . .	19
3.1.1 Ορισμός προβλήματος βελτιστοποίησης . . . . .	19
3.1.2 Επίλυση προβλήματος βελτιστοποίησης . . . . .	20
3.2 Θεωρία Παιγνίων . . . . .	23
3.2.1 Ιστορική Αναδρομή . . . . .	23
3.2.2 Γενικά στοιχεία θεωρίας παιγνίων . . . . .	24
3.2.3 Μη συνεργατική θεωρία παιγνίων . . . . .	28
3.2.4 Συνεργατική θεωρία παιγνίων . . . . .	32
3.2.5 Εξελικτική θεωρία παιγνίων . . . . .	34

<b>4 Μηχανισμός ελέγχου ισχύος σε ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς</b>	<b>37</b>
4.1 Σύντομη περιγραφή προβλήματος ελέγχου ισχύος . . . . .	37
4.2 Έλεγχος ισχύος με χρήση της θεωρίας παιγνίων . . . . .	38
4.2.1 Επισκόπηση παιγνιοθεωρητικών μηχανισμών ελέγχου ισχύος . . . . .	39
4.2.2 Προτεινόμενο μοντέλο ελέγχου ισχύος για δορυφορικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα . . . . .	41
<b>5 Μηχανισμοί κατανομής εύρους ζώνης σε ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς</b>	<b>51</b>
5.1 Παιγνιοθεωρητική προσέγγιση για εκχώρηση εύρους ζώνης σε δορυφορικά δίκτυα . . .	52
5.1.1 Περιγραφή προβλήματος εκχώρησης ραδιοπόρων . . . . .	52
5.1.2 Μη συνεργατικό παίγνιο (NG) . . . . .	53
5.1.3 Μη συνεργατικό παίγνιο με τιμολόγηση (NGP) . . . . .	57
5.1.4 Συνεργατικό παίγνιο (NBS) . . . . .	58
5.1.5 Αριθμητική ανάλυση προτεινόμενων μηχανισμών . . . . .	59
5.2 Ανάλυση προβλήματος εκχώρησης εύρους ζώνης σε δίκτυα ασύρματης πρόσβασης . . .	61
5.2.1 Επισκόπηση σχετικών μηχανισμών διαχείρισης εύρους ζώνης . . . . .	62
5.2.2 Περιγραφή μοντέλου συστήματος . . . . .	63
5.2.3 Κεντρικοποιημένη προσέγγιση κατανομής εύρους ζώνης . . . . .	64
5.2.4 Κατανεμημένη προσέγγιση κατανομής εύρους ζώνης . . . . .	67
5.2.5 Αριθμητική ανάλυση προτεινόμενων μηχανισμών . . . . .	72
5.3 Ανάλυση προβλήματος εκχώρησης εύρους ζώνης σε δίκτυα πολλαπλών δορυφόρων . . .	79
5.3.1 Περιγραφή προβλήματος εκχώρησης εύρους ζώνης . . . . .	79
5.3.2 Μοντέλο Συστήματος . . . . .	80
5.3.3 Παίγνιο δεύτερου επιπέδου: πρόβλημα αγοραστών . . . . .	81
5.3.4 Παίγνιο πρώτου επιπέδου: πρόβλημα πωλητών . . . . .	85
5.3.5 Αριθμητική ανάλυση προτεινόμενων μηχανισμών . . . . .	87
5.4 Μηχανισμός μίσθωσης εύρους ζώνης σε γνωστικά δίκτυα . . . . .	89
5.4.1 Εισαγωγή-Μοντέλο Συστήματος . . . . .	90
5.4.2 Μηχανισμός δημοπρασίας για εκχώρηση ραδιοπόρων . . . . .	92
5.4.3 Αριθμητική ανάλυση και σχολιασμός αποτελεσμάτων . . . . .	99
<b>6 Μηχανισμοί διαχείρισης ραδιοπόρων για παροχή ποιότητας υπηρεσίας</b>	<b>103</b>
6.1 Εισαγωγή . . . . .	103
6.2 Θεωρία αποτελεσματικής χωρητικότητας . . . . .	104
6.2.1 Θεωρία στατιστικών εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας . . . . .	104
6.2.2 Ορισμός αποτελεσματικής χωρητικότητας . . . . .	106
6.3 Διαχείριση πόρων σε ασύρματα επίγεια δίκτυα για παροχή QoS . . . . .	108
6.4 Μηχανισμός ελέγχου ισχύος σε δορυφορικά συστήματα για παροχή QoS . . . . .	112
6.4.1 Περιγραφή μοντέλου συστήματος . . . . .	112
6.4.2 Μηχανισμός βέλτιστης εκχώρησης ισχύος . . . . .	114
6.4.3 Αριθμητική ανάλυση προτεινόμενου μηχανισμού . . . . .	116

<b>7 Έλεγχος ισχύος για παροχή QoS σε γνωστικά δίκτυα</b>	<b>123</b>
7.1 Εισαγωγή . . . . .	123
7.2 Επισκόπηση μηχανισμών ελέγχου ισχύος για παροχή QoS σε γνωστικά δίκτυα . . . . .	124
7.2.1 Σχήματα ελέγχου ισχύος για underlay γνωστικά συστήματα . . . . .	125
7.2.2 Σχήματα ελέγχου ισχύος για υβριδικά γνωστικά συστήματα . . . . .	130
7.3 Προτεινόμενος μηχανισμός ελέγχου ισχύος για γνωστικά δίκτυα . . . . .	132
7.3.1 Μοντέλο Συστήματος . . . . .	133
7.3.2 Βασική συνεισφορά του προτεινόμενου μηχανισμού ελέγχου ισχύος . . . . .	135
7.3.3 Περιγραφή προβλήματος ελέγχου ισχύος . . . . .	136
7.3.4 Σχήματα Βέλτιστης Εκχώρησης Ισχύος . . . . .	138
7.3.5 Επίδραση των περιορισμών παρεμβολής στην επικοινωνία του πρωτεύοντος χρήστη	144
7.3.6 Αριθμητική ανάλυση και σχολιασμός αποτελεσμάτων . . . . .	146
7.4 Μηχανισμός ελέγχου ισχύος για παροχή QoS σε γνωστικά δορυφορικά - επίγεια δίκτυα	153
7.4.1 Εισαγωγή-Μοντέλο Συστήματος . . . . .	153
7.4.2 Μηχανισμός εκχώρησης ισχύος . . . . .	156
7.4.3 Αριθμητική ανάλυση και σχολιασμός αποτελεσμάτων . . . . .	161
<b>8 Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα</b>	<b>165</b>
8.1 Συμπεράσματα διδακτορικής διατριβής . . . . .	165
8.2 Βασική συνεισφορά διδακτορικής διατριβής . . . . .	166
8.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα . . . . .	169
<b>A' Ορισμοί βασικών συναρτήσεων</b>	<b>173</b>
<b>B' Παράρτημα - Δημοσιεύσεις συγγραφέα</b>	<b>175</b>
<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>177</b>



# Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Εξέλιξη κυψελωτών δικτύων . . . . .	6
2.2	Κατηγορίες συνεργατικών τεχνικών για ασύρματα δίκτυα . . . . .	11
3.1	Δίλημμα του προωθητή . . . . .	25
3.2	Μορφή πίνακα για το δίλημμα του προωθητή . . . . .	26
3.3	Εκτεταμένη μορφή για το δίλημμα του προωθητή . . . . .	27
3.4	Μεθοδολογία ανάλυσης ισορροπιών Nash ενός παιγνίου . . . . .	30
4.1	Αρχιτεκτονική ενός δορυφορικού DVB-RCS/S2 συστήματος . . . . .	41
4.2	Σύγκλιση προτεινόμενου αλγορίθμου . . . . .	46
4.3	Σύγκριση σχημάτων τιμολόγησης ως προς τα επίπεδα ισχύος ισορροπίας και το λόγο SIR	46
4.4	Επίδραση του συνολικού αριθμού τερματικών στα επίπεδα ισχύος ισορροπίας για το στατικό σχήμα τιμολόγησης. . . . .	47
4.5	Επίδραση του συνολικού αριθμού τερματικών στα επίπεδα ισχύος ισορροπίας για το δυναμικό σχήμα τιμολόγησης. . . . .	47
4.6	Επίδραση του συνολικού αριθμού τερματικών στο λόγο SIR . . . . .	48
5.1	Παράμετρος τιμολόγησης συναρτήσει της εξασθένησης λόγω βροχής . . . . .	57
5.2	Δείκτης ικανοποίησης των χρηστών για τα δύο μη συνεργατικά παίγνια . . . . .	58
5.3	Δείκτης ικανοποίησης χρηστών για κάθε τύπο εφαρμογής . . . . .	60
5.4	Δείκτης Jain συναρτήσει του διαθέσιμου εύρους ζώνης . . . . .	61
5.5	Μορφή συναρτήσεων χρησιμότητας για κάθε είδος εφαρμογής . . . . .	64
5.6	Σύγκριση κεντροποιημένων μηχανισμών για εκχώρηση εύρους ζώνης . . . . .	72
5.7	Σύγκριση κανόνα T και κανόνα RT για εφαρμογές VoIP . . . . .	73
5.8	Σύγκριση κανόνα T και κανόνα RT για εφαρμογές FTP . . . . .	74
5.9	Συνολική χωρητικότητα του συστήματος ως προς το διαθέσιμο εύρος ζώνης . . . . .	74
5.10	Δείκτης Jain ως προς το συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης . . . . .	75
5.11	Συναρτήσεις χρησιμότητας για κάθε εφαρμογή . . . . .	76
5.12	Κατανομή εύρους ζώνης με χρήση του μηχανισμού VCG-Kelly . . . . .	77
5.13	Παράγωγοι συναρτήσεων χρησιμότητας για κάθε εφαρμογή . . . . .	77
5.14	Επίδραση της κατάστασης καναλιού στην κατανομή του αλγορίθμου VCG-Kelly . . . . .	78
5.15	Απόδοση του συστήματος συναρτήσει του συνολικού διαθέσιμου εύρους ζώνης . . . . .	78
5.16	Μοντέλο συστήματος πολλαπλών δορυφόρων . . . . .	80

5.17	Σύγκλιση του επαναληπτικού αλγορίθμου στο σημείο ισορροπίας . . . . .	83
5.18	Σύγκλιση του επαναληπτικού αλγορίθμου στο σημείο εξελικτικής ισορροπίας . . . . .	85
5.19	Σύγκλιση στην τιμή ισορροπίας και συναρτήσεις βέλτιστης απόκρισης των δορυφόρων . . . . .	86
5.20	Χρησιμότητα χρηστών στα σημεία ισορροπίας . . . . .	88
5.21	Ταχύτητα σύγκλισης των προτεινόμενων αλγορίθμων για το παίγνιο του αγοραστή . . . . .	89
5.22	Επίδραση τιμής και διαθέσιμου εύρους ζώνης στο σύνολο των αγοραστών . . . . .	89
5.23	Μοντέλο γνωστικού συστήματος υπό μελέτη . . . . .	91
5.24	Διαδικασία εκχώρησης ραδιοπόρων στη διάρκεια μιας χρονοσχισμής . . . . .	92
5.25	Διαδικασία εκχώρησης ραδιοπόρων στη διάρκεια μιας χρονοσχισμής . . . . .	93
5.26	Απλοποίηση του προτεινόμενου μοντέλου συστήματος . . . . .	97
5.27	Χαρακτηριστικά δημοπρασίας για όλα τα σενάρια . . . . .	99
5.28	Συνολική χρησιμότητα δευτερευόντων χρηστών κατά τη διάρκεια ενός πλαισίου $T_f = 300T_s$ . . . . .	100
6.1	Μοντέλο ασύρματου τηλεπικοινωνιακού συστήματος . . . . .	105
6.2	Συναρτήσεις ισοδύναμου εύρους ζώνης και αποτελεσματικής χωρητικότητας . . . . .	107
6.3	Κατανομή βέλτιστης ισχύος ως προς τον εκθέτη QoS $\theta$ και τον λόγο SNR . . . . .	110
6.4	Κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα ως προς τον εκθέτη QoS . . . . .	117
6.5	Κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα ως προς τον εκθέτη QoS . . . . .	118
6.6	Μηχανισμός βέλτιστης εκχώρησης ισχύος ως προς το σηματοθορυβικό λόγο και τον εκθέτη QoS . . . . .	119
6.7	Κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα ως προς τη γωνία ανύψωσης και τον εκθέτη QoS . . . . .	119
6.8	Μηχανισμός βέλτιστης εκχώρησης ισχύος ως προς το σηματοθορυβικό λόγο . . . . .	120
7.1	Μοντέλο γνωστικού συστήματος υπό μελέτη . . . . .	125
7.2	Αποτελεσματική χωρητικότητα ως προς τον εκθέτη QoS για διαφορετικά όρια παρεμβολής 128	
7.3	Κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα ως προς τον εκθέτη QoS $a_{SU}$ για διαφορετικές τιμές του $m_p$ . . . . .	147
7.4	Κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα ως προς το όριο παρεμβολής για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου $m_{sp}$ . . . . .	148
7.5	Κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα ως προς το όριο παρεμβολής για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου $m_{ps}$ . . . . .	149
7.6	Στιγμιαία ισχύς του δευτερεύοντος χρήστη ως προς την παρεμβολή από τον πρωτεύοντα χρήστη για διαφορετικές τιμές του εκθέτη QoS $a$ . . . . .	150
7.7	Κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα του πρωτεύοντος χρήστη ως προς τον εκθέτη QoS $a_{PU}$ για διαφορετικές τιμές του εκθέτη QoS $a_{SU}$ του δευτερεύοντος χρήστη. 151	
7.8	Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας του πρωτεύοντος χρήστη ως προς διαφορετικά κτώφλια outage SINR. . . . .	152
7.9	Μέση ισχύς του δευτερεύοντος χρήστη ως προς τον κανονικοποιημένο εκθέτη QoS $\alpha_{SU}$ . 153	
7.10	Σενάριο γνωστικού δορυφορικού επίγειου δικτύου υπό μελέτη. . . . .	155
7.11	Στιγμιαία εκχώρηση ισχύος του σταθμού βάσης ως προς $\text{SNR}_{\text{sat}}$ και $\gamma'_{\text{ter}}$ . . . . .	161



---

7.12	Κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα ως προς $\Delta\epsilon$ . . . . .	162
7.13	Μέση ισχύς του σταθμού βάσης ως προς $\Delta\epsilon$ . . . . .	163
7.14	Επιπρόσθετη πιθανότητα outage και κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα ως προς τη διασπορά του σφάλματος εκτίμησης. . . . .	164



# Κατάλογος Πινάκων

2.1 Παραδείγματα βασικών συνιστωσών του προβλήματος διαχείρισης πόρων σε ασύρματα δίκτυα . . . . .	15
4.1 Παράμετροι για σενάριο υλοποίησης . . . . .	45
5.1 Παράμετροι για σενάριο υλοποίησης . . . . .	59
5.2 Απαιτήσεις εύρους ζώνης ανά εφαρμογή . . . . .	72
5.3 Παράμετροι προσομοίωσης προτεινόμενου μοντέλου . . . . .	87
5.4 Μέση απόδοση του προτεινόμενου μηχανισμού. . . . .	101
6.1 Παράμετροι καναλιού για το κινητό δορυφορικό σύστημα. . . . .	116



# Κατάλογος Συντμήσεων

3GPP	3rd Generation Partnership Project
ACM	Adaptive Coding and Modulation
BER	Bit Error Rate
CEA	Constrained Equal Award
CR	Cognitive Radio
CSI	Channel State Information
DVB-RCS	Digital Video Broadcasting - Return Channel via Satellite
DVB-S	Digital Video Broadcasting via Satellite
DVB-SH	Digital Video Broadcast to Satellite Handheld
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FCC	Federal Communications Commission
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communication
HRPD	High Rate Packet Data
HSPA	High Speed Packet Access
IMT-2000	International Mobile Telecommunications 2000
LTE	Long-Term Evolution
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MISO	Multiple Input Single Output
NBS	Nash Bargaining Solution
NCC	Network Control Center
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PARP	Peak to Average Power Ratio
PDC	Personal Digital Cellular
PDF	Probability Density Function
PoA	Price of Anarchy
PSK	Phase Shift Keying
PUs	Primary Users
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
RCSTs	Return Channel Satellite Terminals
RRM	Radio Resource Management
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio

SIR	Signal to Interference Ratio
SISO	Single Input Single Output
SUs	Secondary Users
TDMA	Time Division Multiple Access
UMB	Ultra Mobile Broadband
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UTRA	evolved Universal Terrestrial Radio Access
VCG	Vickrey-Clarke-Groves
VoIP	Voice over Internet Protocol
WiMAX	Worldwide interoperability for Microwave Access

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Θεματολογία της Διδακτορικής Διατριβής

Η ραγδαία ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων καθώς και η ολοένα αυξανόμενη ζήτηση νέων ευρυζωνικών υπηρεσιών από τη μεριά των χρηστών κάνουν εμφανή την ανάγκη για αποδοτική εκχώρηση των ασύρματων πόρων. Επιπρόσθετα, στην περίπτωση των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων νέας γενιάς, ο ρόλος των διεργασιών διαχείρισης ραδιοπόρων γίνεται ακόμα σημαντικότερος δεδομένου ότι τα περιθώρια για περαιτέρω βελτίωση των τεχνολογιών μετάδοσης έχουν μικρύνει σημαντικά. Επομένως, η αποδοτική διαχείριση των βασικών ασύρματων πόρων κρίνεται απαραίτητη προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η συνολική απόδοση του συστήματος.

Σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής (ΔΔ) είναι η ανάπτυξη και σχεδίαση καινοτόμων μηχανισμών για αποδοτικότερη διαχείριση πόρων σε ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς, εστιάζοντας κυρίως σε μηχανισμούς ελέγχου ισχύος καθώς και αλγορίθμους εκχώρησης εύρους ζώνης. Τα προτεινόμενα σχήματα κατανομής πόρων έχουν ως απώτερο σκοπό αφενός τη μεγαλύτερη ικανοποίηση του χρήστη μέσω της παροχής καλύτερης ποιότητας υπηρεσίας και αφετέρου τη βελτίωση της απόδοσης του συνολικού συστήματος. Αναλυτικότερα, η εν λόγω διατριβή εξετάζει τα βασικά προβλήματα κατανομής ραδιοπόρων και προτείνει αποδοτικά σχήματα επίλυσης τους, χρησιμοποιώντας σύγχρονα μαθηματικά εργαλεία που έχουν πρόσφατα ξεκινήσει να βρίσκουν εφαρμογή στον τομέα των τηλεπικοινωνιών. Συγκεκριμένα, στο πλαίσιο της ΔΔ χρησιμοποιούνται αρχές από την κλασική θεωρία βελτιστοποίησης καθώς και αρχές από τη θεωρία παιγνίων και τη θεωρία σχεδίασης μηχανισμών, προκειμένου να λυθούν τα θεωρούμενα προβλήματα διαχείρισης ραδιοπόρων.

### 1.2 Δομή της Διδακτορικής Διατριβής

Σκοπός της ΔΔ είναι η ανάπτυξη αποδοτικών, καινοτόμων μηχανισμών διαχείρισης ραδιοπόρων για ασύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα νέας γενιάς. Η δομή της ΔΔ μπορεί να χωριστεί ουσιαστικά σε τρία βασικά μέρη. Το πρώτο μέρος παρουσιάζει το θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτείται προκειμένου να γίνει κατανοητή η συνεισφορά της ΔΔ και αποτελείται από τα κεφάλαια 2-3. Το δεύτερο μέρος εστιάζει στην επίλυση προβλημάτων διαχείρισης ραδιοπόρων (προβλήματα ελέγχου ισχύος και εκχώρησης εύρους ζώνης) για ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς και αποτελείται από τα κεφάλαια 4 και 5. Τέλος, το τρίτο μέρος ασχολείται με το πρόβλημα εκχώρησης ραδιοπόρων για παροχή ποιότητας υπηρεσίας και αποτελείται από τα κεφάλαια 6 και 7. Στη συνέχεια ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή κάθε κεφαλαίου της ΔΔ.

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφεται συνοπτικά η πορεία της εξέλιξης των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών δικτύων, εστιάζοντας τόσο στα επίγεια ασύρματα συστήματα όσο και στα δορυφορικά συστήματα, που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο της διατριβής. Επιπλέον, παρουσιάζονται ορισμένες προηγμένες τεχνολογίες επικοινωνιών για τα δίκτυα νέας γενιάς που έχουν ως στόχο την βελτίωση της απόδοσης τους. Συγκεκριμένα, περιγράφεται η τεχνική των συνεργατικών επικοινωνιών καθώς και η τεχνολογία των γνωστικών δικτύων. Στη συνέχεια του κεφαλαίου γίνεται μια σύντομη περιγραφή της διαδικασίας διαχείρισης πόρων ενός ασύρματου δικτύου αναφέροντας κάποια βασικά παραδείγματα διεργασιών διαχείρισης, ενώ στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζεται ο τρόπος διατύπωσης ενός προβλήματος διαχείρισης ραδιοπόρων σαν μαθηματικό πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά μαθηματικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο της διατριβής προκειμένου να επιλυθούν τα θεωρούμενα προβλήματα διαχείρισης ραδιοπόρων. Αναλυτικότερα, το πρώτο μέρος του κεφαλαίου εστιάζει στις αρχές της κλασικής θεωρίας βελτιστοποίησης παρουσιάζοντας κάποιες βασικές μεθόδους επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια, στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου περιγράφεται μια διαδεδομένη μαθηματική θεωρία, η οποία τα τελευταία χρόνια, χρησιμοποιείται ευρέως στα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, γνωστή ως θεωρία παιγνίων. Προκειμένου να γίνει κατανοητή η χρήση της συγκεκριμένης μαθηματικής θεωρίας στα προβλήματα διαχείρισης ραδιοπόρων, περιγράφονται ορισμένες βασικές έννοιες και θεωρήματα της θεωρίας παιγνίων, παρουσιάζοντας προηγουμένως μια σύντομη αναδρομή της εξέλιξης της.

Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναλύεται ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα διαχείρισης ραδιοπόρων: το πρόβλημα του ελέγχου ισχύος. Οι αντίστοιχες διεργασίες διαχείρισης περιλαμβάνουν την εύρεση των κατάλληλων τεχνικών και αλγορίθμων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να προσαρμοστεί η ισχύς μετάδοσης των στοιχείων ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, περιγράφεται αρχικά το γενικό πρόβλημα του ελέγχου ισχύος στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα ενώ στη συνέχεια δίνεται έμφαση στην επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος χρησιμοποιώντας αρχές από την θεωρία παιγνίων και προτείνεται ένας καινοτόμος μηχανισμός ελέγχου ισχύος για δορυφορικά δίκτυα νέας γενιάς.

Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο μελετάται εκτενώς το πρόβλημα της διαχείρισης εύρους ζώνης και παρουσιάζεται η συνεισφορά της ΔΔ στο συγκεκριμένο ερευνητικό αντικείμενο σύμφωνα με την οποία προτείνονται αποδοτικοί μηχανισμοί εκχώρησης του συγκεκριμένου ραδιοπόρου. Αναλυτικότερα, στην πρώτη ενότητα, προτείνονται τρεις παιγνιοθεωρητικοί μηχανισμοί κατανομής εύρους ζώνης, οι οποίοι εφαρμόζονται σε δορυφορικά δίκτυα νέας γενιάς προκειμένου να μελετηθεί η απόδοσή τους. Στη συνέχεια, το ίδιο πρόβλημα αναλύεται για τη γενική περίπτωση των τηλεπικοινωνιακών δικτύων ασύρματης πρόσβασης και προτείνονται δύο διαφορετικοί αλγόριθμοι για το διαμοιρασμό του φάσματος στους τελικούς χρήστες. Συγκεκριμένα, ο πρώτος αλγόριθμος (κεντροποιημένος) βασίζεται στην εφαρμογή γνωστών κανόνων κατανομής που χρησιμοποιούνται στο πρόβλημα της χρεωκοπίας (bankruptcy problem) ενώ ο δεύτερος αλγόριθμος (κατανεμημένος) χρησιμοποιεί αρχές από τη θεωρία σχεδίασης μηχανισμών (mechanism design) προκειμένου να υπολογιστεί η βέλτιστη λύση του προβλήματος. Στην επόμενη υποενότητα, παρουσιάζεται ένας μηχανισμός επίλυσης του προβλήματος εκχώρησης εύρους ζώνης σε ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο πολλαπλών δορυφόρων κατά την οποία το αρχικό πρόβλημα κατανομής φάσματος ανάγεται σε ένα πρόβλημα πολλαπλών πωλητών-πολλαπλών αγοραστών. Τέλος, προτείνεται ένας μηχανισμός εκχώρησης εύρους ζώνης για την περίπτωση των γνωστικών δικτύων και αναλύεται το πρόβλημα μίσθωσης του εύρους ζώνης των πρωτευόντων χρηστών στους δευτερεύοντες χρήστες.



Το 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο εστιάζει σε προβλήματα διαχείρισης ραδιοπόρων για παροχή ποιότητας υπηρεσίας. Συγκεκριμένα, αρχικά, περιγράφεται η θεωρία της αποτελεσματικής χωρητικότητας, η οποία λειτουργεί ως το εργαλείο διασύνδεσης του ρυθμού μετάδοσης μιας ασύρματης ζεύξης με τη βασική μετρική των απαιτήσεων ποιότητας από πλευράς καθυστέρησης. Αφού παρουσιαστεί αναλυτικά η έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας, περιγράφονται συνοπτικά ορισμένες βασικές ερευνητικές εργασίες που αφορούν την επίλυση προβλημάτων διαχείρισης ραδιοπόρων σε ασύρματα δίκτυα, λαμβάνοντας υπόψη την παροχή ποιότητας υπηρεσίας στους τελικούς χρήστες. Αναλυτικότερα, παρουσιάζονται διάφορα προτεινόμενα σχήματα ελέγχου ισχύος τα οποία έχουν ως στόχο τη βελτιστοποίηση της ρυθμιστικής του χρήστη για συγκεκριμένες απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας ενώ, παράλληλα, περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε σχήματος. Τέλος, παρουσιάζεται η συνεισφορά της ΔΔ στο συγκεκριμένο αντικείμενο κατά την οποία προτείνεται ένας αποδοτικός μηχανισμός ελέγχου ισχύος, με γνώμονα την παροχή ποιότητας υπηρεσίας των χρηστών, για δορυφορικά δίκτυα νέας γενιάς.

Το 7<sup>ο</sup> κεφάλαιο ασχολείται με το πρόβλημα ελέγχου ισχύος σε γνωστικά δίκτυα, έχοντας ως κεντρικό γνώμονα την παροχή ποιότητας υπηρεσίας στους δευτερεύοντες χρήστες. Αναλυτικότερα, το συγκεκριμένο κεφάλαιο εστιάζει σε μηχανισμούς ελέγχου ισχύος για τους δευτερεύοντες χρήστες γνωστικών συστημάτων, οι οποίοι βασίζονται στην έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας. Αρχικά παρουσιάζεται μια βιβλιογραφική επισκόπηση των υπαρχόντων τεχνικών διαχείρισης ραδιοπόρων για δευτερεύοντες χρήστες με συγκεκριμένες απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας, οι οποίες βασίζονται στη χρήση της θεωρίας στατιστικών εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας. Η συγκεκριμένη ενότητα του κεφαλαίου χωρίζεται σε δύο μέρη: το πρώτο μέρος αναφέρεται στα σχήματα που θεωρούν μια *underlay* προσέγγιση κατανομής εύρους ζώνης ενώ στο δεύτερο μέρος, περιγράφονται οι μηχανισμοί διαχείρισης ραδιοπόρων για μια υβριδική προσέγγιση κατανομής εύρους ζώνης (*underlay/interweave*). Στη συνέχεια, αναλύεται το πρόβλημα ελέγχου ισχύος για δευτερεύοντες χρήστες με κεντρικό γνώμονα την εξασφάλιση της ποιότητας υπηρεσίας τους και προτείνεται ένας αποδοτικός μηχανισμός λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση διάφορων περιορισμών παρεμβολής τόσο από την πλευρά του δευτερεύοντος όσο και από την πλευρά του πρωτεύοντος χρήστη. Τέλος, παρουσιάζεται η καινοτόμος αρχιτεκτονική των γνωστικών δορυφορικών-επίγειων δικτύων και αναπτύσσεται ένας αλγόριθμος ελέγχου ισχύος για το δευτερεύον επίγειο σύστημα, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ποιότητα επικοινωνίας και των δύο δικτύων.

Τέλος, το 8<sup>ο</sup> κεφάλαιο αποτελεί το τελευταίο κεφάλαιο της ΔΔ στο οποίο παρουσιάζεται μια σύνοψη της ΔΔ καθώς και η βασική συνεισφορά της στο ερευνητικό πεδίο που κατατάσσεται. Επιπλέον, περιγράφονται ορισμένα βασικά ανοιχτά θέματα στο ευρύτερο πεδίο της διαχείρισης ραδιοπόρων τηλεπικοινωνιακών δικτύων, τα οποία κρίνεται ενδιαφέρον να αντιμετωπιστούν.



## **Κεφάλαιο 2**

# **Ασύρματα Δίκτυα Νέας Γενιάς και Διαχείριση Ραδιοπόρων**

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο χωρίζεται σε τρία διαφορετικά μέρη. Στο πρώτο μέρος παρουσιάζεται η πορεία της εξέλιξης των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών δικτύων, δίνοντας έμφαση στα επίγεια ασύρματα συστήματα καθώς και στα δορυφορικά συστήματα, που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο της διατριβής. Στη δεύτερη ενότητα, παρουσιάζονται ορισμένες προηγμένες τεχνολογίες επικοινωνιών για τα δίκτυα νέας γενιάς που έχουν ως στόχο τη βελτίωση της απόδοσης τους. Συγκεκριμένα, περιγράφεται η τεχνική των συνεργατικών επικοινωνιών καθώς και η τεχνολογία των γνωστικών δικτύων. Στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται μια σύντομη περιγραφή της διαδικασίας διαχείρισης πόρων των ασύρματων δικτύων και παρουσιάζεται ο τρόπος διατύπωσης ενός προβλήματος διαχείρισης ραδιοπόρων σαν μαθηματικό πρόβλημα βελτιστοποίησης.

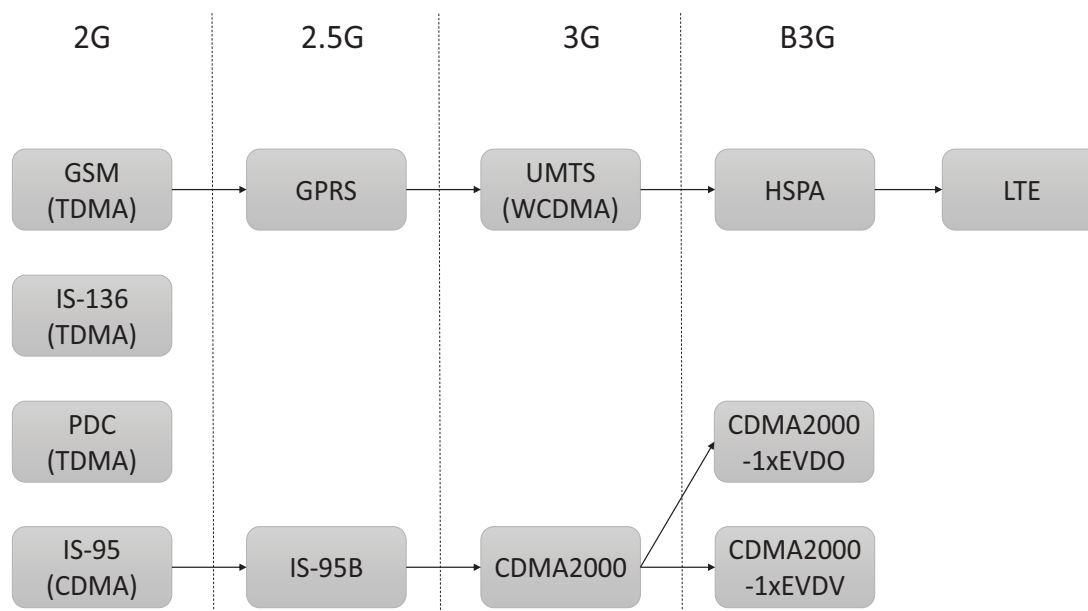
### **2.1 Εξέλιξη ασυρμάτων δικτύων**

Στη συγκεκριμένη ενότητα, παρουσιάζεται συνοπτικά η πορεία της εξέλιξης των ασυρμάτων τηλεπικοινωνιακών δικτύων καθώς και ορισμένες προηγμένες τεχνολογίες για τα δίκτυα νέας γενιάς. Συγκεκριμένα, εστιάζοντας αρχικά στα επίγεια δίκτυα, περιγράφεται η ανάπτυξη των ασυρμάτων δικτύων από τα δίκτυα πρώτης γενιάς προς τα σύγχρονα δίκτυα τέταρτης γενιάς. Στη συνέχεια, γίνεται μια σύντομη παρουσίαση των σύγχρονων δορυφορικών συστημάτων επικοινωνιών που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο της ΔΔ, ενώ στο τέλος της ενότητας περιγράφονται οι προηγμένες τεχνολογίες των συνεργατικών επικοινωνιών και των γνωστικών δικτύων.

#### **2.1.1 Επίγεια ασύρματα συστήματα επικοινωνιών**

Τις τελευταίες δεκαετίες, τα επίγεια ασύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα γνώρισαν ραγδαία ανάπτυξη, η οποία αναμένεται να συνεχιστεί και τα επόμενα χρόνια. Στο συγκεκριμένο κομμάτι της διατριβής, παρουσιάζεται η πορεία της εξέλιξης των κυψελωτών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, η οποία απεικονίζεται και στο σχήμα 2.1.

Σε ένα κυψελωτό σύστημα, η περιοχή εξυπηρέτησης χωρίζεται σε κυψέλες στις οποίες χρησιμοποιείται ένας σταθμός βάσης για να παρέχει τις επιθυμητές υπηρεσίες στους κινητούς χρήστες της κυψέλης. Τα κυψελωτά συστήματα πρώτης γενιάς (1G) βασίζονταν στην αναλογική τεχνολογία χρησιμοποιώντας διαμόρφωση συχνότητας (FM) και παρείχαν υπηρεσίες φωνής μαζί με ορισμένες



Σχήμα 2.1: Εξέλιξη κυψελωτών δικτύων

επιπλέον υπηρεσίες. Η εμφάνιση των ψηφιακών επικοινωνιών, κατά την διάρκεια της δεκαετίας 1980, επέτρεψε την ανάπτυξη μιας νέας γενιάς προτύπων και συστημάτων κινητών τηλεπικοινωνιών, γνωστή ως δεύτερη γενιά κυψελωτών συστημάτων (2G). Παραδείγματα των συστημάτων αυτών αποτελούν το δίκτυο GSM (Global System for Mobile Communication) που αποτελεί το πρώτο Ευρωπαϊκό κυψελωτό ψηφιακό σύστημα, το Αμερικάνικό ψηφιακό σύστημα IS-95 που βασίζεται στην τεχνική πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης κώδικα (CDMA) CDMA Code Division Multiple Access καθώς και το ιαπωνικό σύστημα PDC (Personal Digital Cellular radio). Συγκεκριμένα, το πρότυπο GSM εμφανίστηκε στην Ευρώπη, στα μέσα της δεκαετίας του 1980 και βασίστηκε στο σχήμα πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης χρόνου (TDMA) ενώ την ίδια χρονική περίοδο είχαν εμφανιστεί τα πρότυπα US-TDMA και το ιαπωνικό PDC. Λίγο αργότερα, το 1993, στην Αμερική εμφανίστηκε το πρότυπο IS-95 που βασίζεται στην τεχνική CDMA. Σύμφωνα με το σχήμα αυτό, ένας μεγάλος αριθμός χρηστών μπορούσε να καταλαμβάνει το ίδιο κανάλι ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας διαφορετικούς κώδικες διασποράς.

Συγκριτικά με τα προγενέστερα πρότυπα τα οποία είχαν ως στόχο υπηρεσίες χαμηλού εύρους ζώνης (υπηρεσίες φωνής), με τα συστήματα δεύτερης γενιάς δόθηκε η δυνατότητα για παροχή υπηρεσιών δεδομένων μέσω των κινητών τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Οι αρχικές υπηρεσίες δεδομένων που εισήχθησαν με τα συστήματα 2G ήταν μηνύματα κειμένου (SMS) και υπηρεσίες δεδομένων τύπου μεταγωγής κυκλώματος που επέτρεπαν την αποστολή/λήψη e-mail καθώς και άλλες εφαρμογές δεδομένων με ρυθμό 9.6 kbit/s. Στη συνέχεια, τα μετέπειτα συστήματα 2G προσέφεραν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης μέσω τροποποιημένων σχημάτων κωδικοποίησης και εκχωρώντας πολλαπλές χρονοσχισμές σε κάθε χρήστη. Πάρολο αυτά, η πιο ευρεία χρήση δεδομένων πακέτου μέσω κυψελωτών συστημάτων έγινε πραγματικότητα κατά την διάρκεια του δεύτερου μισού της δεκαετίας 1990, με τις υπηρεσίες GPRS που εισήχθησαν στο πρότυπο GSM καθώς και με τις υπηρεσίες δεδομένων πακέτου που προστέθηκαν στο αμερικάνικο IS-95 πρότυπο, οδηγώντας στις τεχνολογίες 2.5G.

Η πρωτοβουλία της ITU-R για τα συστήματα IMT-2000 (International Mobile Telecommunica-

tions 2000) οδήγησε στην εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών προς τα συστήματα 3G (ITU-R, 1997). Υπό την πρωτοβουλία αυτή, ορίστηκε ένα νέο σύνολο απαιτήσεων όπως για παράδειγμα στιγμιαίος ρυθμός δεδομένων 2 MB/s καθώς και υποστήριξη υψηλής κινητικότητας των χρηστών. Η προσπάθεια ανάπτυξης προτύπων συμβατών με τις απαιτήσεις των IMT-2000 οδήγησε στην δημιουργία δύο οργανισμών προτυποποίησης (3GPP, 3GPP2) οι οποίοι βασίζονταν στα δύο κυρίαρχα συστήματα 2G (GSM, CDMA). Το 3G πρότυπο του 3GPP αναφέρεται ως UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) ή ευρυζωνικό CDMA (WCDMA) καθώς χρησιμοποιεί μεγαλύτερο εύρος ζώνης (5MHz) σε σχέση με το εύρος ζώνης (1.25MHz) που χρησιμοποιείται από το 3G σύστημα CDMA2000 του 3GPP2. Ο 3GPP2 ανέπτυξε επίσης μια εκδοχή γνωστή και ως CDMA2000-1x (ή 3G-1x) με εύρος ζώνης 5MHz που υποστηρίζει τρία υπο-φέροντα εύρους 1,25 MHz.

Η πρώτη έκδοση των προτύπων 3G δεν εκπλήρωσε όμως τις απαιτήσεις για υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων καθώς οι πραγματικοί ρυθμοί μετάδοσης ήταν πολύ χαμηλότεροι από τους αντίστοιχους θεωρητικούς που προδιέγραφαν τα πρότυπα. Για το λόγο αυτό και προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση των συστημάτων 3G, ο 3GPP2 εισήγαγε το σύστημα HRPD (High Rate Packet Data) το οποίο χρησιμοποιεί βέλτιστες προηγμένες τεχνικές για μετάδοση δεδομένων (Interface, 2006). Το συγκεκριμένο σύστημα απαιτεί ένα ξεχωριστό φέρον εύρους 1.25MHz και δεν υποστηρίζει υπηρεσίες φωνής, με αποτέλεσμα να ονομαστεί αρχικά ως CDMA2000-1xEVDO (Evolution Data Only). Αντίστοιχα, ο 3GPP εισήγαγε το σύστημα HSPA (High Speed Packet Access) ως βελτίωση του συστήματος WCDMA (Kolding et al., 2003), (Holma & Toskala, 2007). Το συγκεκριμένο πρότυπο χρησιμοποιεί αρκετές από τις τεχνικές του συστήματος HRPD, με τη βασική διαφορά τους να έγκειται στη δυνατότητα του HSPA για ταυτόχρονη μετάδοση φωνής και δεδομένων, στο ίδιο φέρον. Παράλληλα με το HRPD, ο 3GPP2 ανέπτυξε ένα πρότυπο για κοινή χρήση φωνής και δεδομένων, γνωστό ως CDMA2000-1xEVDV (Evolution Data Voice), το οποίο όμως δεν εμπορευματοποιήθηκε ποτέ. Στη μετέπειτα έκδοση του HRPD, εισήχθησαν δυνατότητες για υπηρεσίες φωνής μέσω διαδικτύου (VoIP-Voice over Internet Protocol). Με αυτόν τον τρόπο, τα δύο πρότυπα 3G αναπτύχθηκαν ευρέως στην αγορά των κυψελωτών συστημάτων για την παροχή ασύρματης πρόσβασης σε δεδομένα. Οι υπηρεσίες που υποστηρίζονται από τα συγκεκριμένα εμπορικά συστήματα ποικίλουν από υπηρεσίες μεταγωγής κυκλώματος, όπως υπηρεσίες φωνής και βίντεο-τηλεφωνίας, μέχρι υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου, όπως μεταφορά δεδομένων και video streaming.

Παράλληλα με την ανάπτυξη των συστημάτων HSPA και HRPD, ο οργανισμός προτύπων IEEE 802 LMSC (LAN/MAN Standard Committee) εισήγαγε το πρότυπο IEEE 802.16e για κινητή ευρυζωνική ασύρματη πρόσβαση (IEEE802.16e, 2005) ως βελτίωση του προγενέστερου προτύπου IEEE 802.16, για σταθερή ευρυζωνική ασύρματη πρόσβαση. Το IEEE 802.16e χρησιμοποιεί μια διαφορετική τεχνολογία πρόσβασης γνωστή ως OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), η οποία προέβλεπε υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης και φασματική απόδοση σε σχέση με τα συστήματα HSPA και HRPD. Παρόλο που η οικογένεια των προτύπων IEEE 802.16 ονομάζεται τυπικά στην IEEE ως WirelessMAN, έχει επικρατήσει η ονομασία WiMAX (Worldwide interoperability for Microwave Access), η οποία προέκυψε από το WiMAX Forum. Επιπλέον, το σύστημα WiMAX που υποστηρίζει κινητικότητα (IEEE 802.16e) αναφέρεται ως κινητό WiMAX. Πέρα από το πλεονέκτημα της ασύρματης τεχνολογίας που χρησιμοποιεί, το κινητό WiMAX χρησιμοποιεί επίσης μια απλούστερη αρχιτεκτονική δικτύου βασισμένη στα πρωτόκολλα IP.

Η εισαγωγή του κινητού WiMAX οδήγησε τους οργανισμούς 3GPP και 3GPP2 να αναπτύξουν τη δική τους έκδοση των συστημάτων πέραν της 3ης γενιάς (B3G-Beyond 3G) βάσει της τεχνολογίας OFDMA και της αρχιτεκτονικής δικτύου του κινητού WiMAX (3GPP, 2006), (3GPP, 2007). Συγκε-

κριμένα, ο 3GPP εισήγαγε το σύστημα UTRA (evolved Universal Terrestrial Radio Access), το οποίο είναι ευρέως γνωστό ως LTE (Long-Term Evolution) ενώ το αντίστοιχο πρότυπο του 3GPP2 ονομάζεται UMB (Ultra Mobile Broadband). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι και τα τρία πρότυπα (κινητό WiMAX, LTE και UMB) ικανοποιούν τις απαιτήσεις των IMT-2000 και για το λόγο αυτό ανήκουν στην οικογένεια προτύπων IMT-2000 (3GPP, 2007b).

Συγκεκριμένα, όσον αφορά τα συστήματα LTE, στόχος τους είναι να αποτελούν μια τεχνολογία υψηλού ρυθμού δεδομένων και χαμηλής καθυστέρησης που να υποστηρίζει επεκτάσεις ευέλικτου εύρους. Για το λόγο αυτό, τα συστήματα LTE βασίστηκαν σε μια νέα αρχιτεκτονική δικτύου με στόχο την υποστήριξη κίνησης μεταγωγής πακέτου παρέχοντας διαφανή κινητικότητα καθώς και ποιότητα υπηρεσίας υψηλού επιπέδου. Το σύστημα υποστηρίζει ευέλικτο εύρος ζώνης χάρη στα σχήματα πρόσβασης OFDMA και SC-FDMA. Συγκεκριμένα, η πρόσβαση στην άνω ζεύξη βασίζεται στο σχήμα SC-FDMA παρέχοντας αυξημένη κάλυψη λόγω του χαμηλού στιγμιαίου προς μέσο λόγο ισχύος (PARP) σε σχέση με το OFDMA σχήμα. Στην κάτω ζεύξη, το σύστημα υποστηρίζει στιγμιαίους ρυθμούς μετάδοσης των 326 MB/s με τη χρήση της τεχνικής 4x4 MIMO (Multiple Input Multiple Output) σε εύρος ζώνης 20MHz. Στην άνω ζεύξη, λόγω του γεγονότος ότι δεν χρησιμοποιείται τεχνική MIMO στην πρώτη έκδοση του προτύπου LTE, ο στιγμιαίος ρυθμός μετάδοσης περιορίζεται στα 86 MB/s σε εύρος ζώνης 20MHz. Εκτός από τη βελτίωση του στιγμιαίου ρυθμού μετάδοσης, το σύστημα LTE παρέχει από δύο μέχρι τέσσερις φορές υψηλότερη φασματική απόδοση ανά κυψέλη σε σύγκριση με την έκτη έκδοση του HSPA συστήματος. Τέλος, όσον αφορά την καθυστέρηση, η ασύρματη διεπαφή του LTE παρέχει την δυνατότητα για καθυστέρηση μικρότερη από 10 ms για τη μετάδοση ενός πακέτου από το δίκτυο στο τερματικό του χρήστη.

Παρόμοια με την πρωτοβουλία για τα IMT-2000, η ITU-R παρουσίασε νέες απαιτήσεις για συστήματα IMT-advanced. Εκτός άλλων, οι απαιτήσεις αυτές περιλαμβάνουν μέσο ρυθμό δεδομένων στην κάτω ζεύξη ίσο με 100 MB/s στα δίκτυα ευρείας περιοχής καθώς και μέχρι 1Gbit/s για τοπική πρόσβαση ή σενάρια χαμηλής κινητικότητας. Οι 3GPP και IEEE 802 LMSC αναπτύσσουν ενεργά τα πρότυπα για τα συστήματα IMT-advanced. Ο βασικός στόχος τόσο των προτύπων LTE-advanced, καθώς και του IEEE 802.16m είναι η περαιτέρω βελτίωση της φασματικής απόδοσης του συστήματος καθώς και του ρυθμού δεδομένων διατηρώντας παράλληλα πλήρη συμβατότητα με τις προηγούμενες εκδόσεις.

### 2.1.2 Δορυφορικά συστήματα επικοινωνιών

Εκτός από τα επίγεια ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών, σημαντική ανάπτυξη τις τελευταίες δεκαετίες γνώρισαν και τα δορυφορικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Στη συγκεκριμένη υποενοότητα, περιγράφονται συνοπτικά κάποια από τα βασικά ευρυζωνικά δορυφορικά δίκτυα επικοινωνιών, τα οποία χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο της ΔΔ.

Αρχικά, από την κατηγορία των σταθερών δορυφορικών επικοινωνιών, δίνεται έμφαση στα πρότυπα της οικογένειας DVB-S (Digital Video Broadcasting via Satellite) που προτάθηκαν από τον οργανισμό ETSI (European Telecommunications Standards Institute) για την παροχή αμφίδρομων ευρυζωνικών υπηρεσιών μέσω δορυφόρου. Ανάλογα με την κατεύθυνση μετάδοσης επικοινωνίας, τα πρότυπα της οικογένειας αυτής χωρίζονται: στα πρότυπα DVB-S, DVB-S2 για την εμπρόσθια ζεύξη μεταξύ του επίγειου σταθμού και των τερματικών και στα πρότυπα DVB-RCS και DVB-RCS2 για την ζεύξη επιστροφής.

Από τον αρχικό ορισμό του συστήματος DVB-RCS (ETSI, 2005), το 1995, προέκυψαν διάφορες

εκδόσεις των προδιαγραφών, οι οποίες περιγράφουν αναλυτικά τις απαιτήσεις για την υλοποίηση ενός προτύπου που παρέχει ένα κανάλι αλληλεπίδρασης στα δορυφορικά συστήματα. Η συγκέντρωση αυτών των προδιαγραφών επέτρεψε την προσαρμογή των συστημάτων DVB-RCS σε διαφορετικούς τομείς της αγοράς ξεκινώντας από δίκτυα μικρής κλίμακας και καταλήγοντας σε δίκτυα ευρείας κλίμακας καθώς και από σταθερά τερματικά σε κινητά τερματικά. Παρόλα αυτά, η συνεχής εξέλιξη των τεχνικών του φυσικού στρώματος και η σταθεροποίηση των προτύπων IP απαιτούσε μεγαλύτερες αλλαγές οι οποίες θα μπορούσαν να υλοποιηθούν μόνο με τον ορισμό ενός συστήματος δεύτερης γενιάς. Με τον τρόπο αυτό προέκυψε το διαδραστικό σύστημα DVB δεύτερης γενιάς γνωστό ως DVB-RCS2 (DVB, 2011).

Το πρότυπο DVB-RCS2 σχεδιάστηκε για να παρέχει μια τυποποιημένη ευρυζωνική και διαδραστική σύνδεση ως προέκταση των δορυφορικών συστημάτων DVB (DVB, 2013). Το συγκεκριμένο πρότυπο καθορίζει τα πρωτόκολλα τόσο του φυσικού όσο και του MAC στρώματος της εναέριας διεπαφής που χρησιμοποιείται μεταξύ του διανομέα του δορυφορικού παρόχου και του τερματικού του χρήστη, καθώς και το στρώμα δικτύου μαζί με τις απαραίτητες λειτουργίες διαχείρισης και ελέγχου του τερματικού. Προκειμένου να εξασφαλίζεται η διαλειτουργικότητα, οι προδιαγραφές του DVB-RCS2 περιγράφουν τις συνιστώσες του υψηλού στρώματος που προσαρμόζονται στα δορυφορικά διαδραστικά συστήματα. Αυτές οι συνιστώσες αποτελούν μέρος των επιπέδων ελέγχου και διαχείρισης και βασίζονται κυρίως στα πρότυπα DVB και IETF .

Παράλληλα, η εισαγωγή νέων υπηρεσιών υψηλής ευκρίνειας HD (High Definition) και η ανάγκη για πιο γρήγορη μετάδοση δεδομένων και υψηλότερη φασματική απόδοση οδήγησε, το 2005, στην εισαγωγή του προτύπου DVB-S2. Το συγκεκριμένο πρότυπο αποτελεί το πρότυπο δεύτερης γενιάς DVB-S (για την εμπρόσθια ζεύξη) το οποίο θα αντικαταστήσει σταδιακά το πρότυπο DVB-S (ETSI, 2009). Το DVB-S2 χρησιμοποιεί πιο προηγμένες τεχνικές μετάδοσης σε σχέση με το προγενέστερο DVB-S, επιτρέποντας την προσαρμογή του ρυθμού σε πραγματικό χρόνο ανάλογα με τις μεταβαλλόμενες συνθήκες διάδοσης ενώ παρέχει κέρδος ρυθμαπόδοσης ίσο με 30%. Λόγω της δυνατότητας προσαρμογής των επιπέδων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης ανάλογα με τις συνθήκες καναλιού, το DVB-S2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για διαδραστικές εφαρμογές σημείου-προς-σημείο (point-to-point) εκτός των ευρυζωνικών υπηρεσιών. Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί ότι παρόλο που το συγκεκριμένο πρότυπο έχει σχεδιαστεί για σταθερούς χρήστες, τα τελευταία χρόνια έχει προταθεί η μελλοντική εξέλιξη του ώστε να υποστηρίξει κινητούς χρήστες, λειτουργώντας στην Ku και στην Ka ζώνη συχνοτήτων.

Η συνεχής ζήτηση για ευρυζωνικές, διαδραστικές υπηρεσίες για κινητά τερματικά οδήγησε επίσης στην επέκταση του προτύπου DVB-RCS στο πρότυπο DVB-RCS Mobile, γνωστό ως DVB-RCS +M (Chini et al., 2010), (Bolea Alamanac et al., 2010). Η ασύρματη διεπαφή του DVB-RCS +M θεωρεί μια εμπρόσθια ζεύξη βάσει του προτύπου DVB-S2 ενισχυμένη με λειτουργίες διόρθωσης λαθών στο στρώμα ζεύξης, ενώ η ζεύξη επιστροφής βασίζεται σε μια εναέρια διεπαφή DVB-RCS βελτιωμένη έτσι ώστε να περιλαμβάνει λειτουργίες συνεχούς φέροντος βάσει της κυματομορφής DVB-S2. Το τελευταίο χαρακτηριστικό επιτρέπει μια πιο αποδοτική χρήση του εύρους ζώνης της ζεύξης επιστροφής όταν εξυπηρετούνται πολλοί χρήστες. Πρωταρχικός στόχος του προτύπου DVB-RCS +M είναι η δυνατότητα παροχής θαλάσσιων, αεροναυτικών και σιδηροδρομικών κινητών δορυφορικών υπηρεσιών. Τα δύο πρώτα είδη υπηρεσιών αναφέρονται συχνά ως σενάρια οπτικής επαφής καθώς το σήμα του δορυφόρου δεν αναμένεται να εμποδίζεται από κάποιο εμπόδιο, σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Όσον αφορά το τρίτο σενάριο, η παρουσία κτιρίων και τούνελ μπορεί να οδηγήσει σε παρεμπόδιση του σήματος και για το λόγο αυτό αναφέρεται ως σενάριο μη οπτικής επαφής.

Μια άλλη πιθανή λύση στις κινητές δορυφορικές επικοινωνίες αποτελεί το πρότυπο DVB-SH (Digital Video Broadcast to Satellite Handheld), το οποίο δημοσιεύτηκε το 2007. Το DVB-SH αποτελεί ένα πρότυπο μετάδοσης σχεδιασμένο για να παρέχει υπηρεσίες ήχου, εικόνας και δεδομένων σε οχήματα και φορητές συσκευές μικρού μεγέθους (ETSI, 2011). Το βασικό στοιχείο του DVB-SH είναι ότι αποτελεί ένα υβριδικό επίγειο σύστημα που επιτρέπει τη χρήση ενός δορυφόρου για να είναι εφικτή η κάλυψη μεγάλων περιοχών. Σε περιοχές στις οποίες δεν είναι εφικτή η απευθείας λήψη του σήματος του δορυφόρου μπορεί να χρησιμοποιηθεί διαφανώς ένας επίγειος σταθμός συμπληρωματικής κάλυψης (gap filler). Το συγκεκριμένο πρότυπο έχει σχεδιαστεί ώστε να χρησιμοποιεί συχνότητες μικρότερες από 3GHz (συνήθως γύρω από τα 2.2GHz) υποστηρίζοντας τις UHF, L και S ζώνες συχνοτήτων. Δεδομένου ότι η S ζώνη συχνοτήτων είναι απαιτητική όσον αφορά την κάλυψη σήματος, χρειάζεται ένα πυκνό δίκτυο από επίγειους επαναλήπτες στις πόλεις. Ωστόσο, η επιβάρυνση του DVB-SH όταν λειτουργεί στην S ζώνη συχνοτήτων αντισταθμίζεται με ένα σύνολο εργαλείων που βελτιώνουν την ισχύ των σημάτων. Επιπλέον, το DVB-SH χρησιμοποιεί ένα ευέλικτο διεμπλοκέα καναλιού που προσφέρει διασπορά χρόνου από εκατό χιλιοστά του δευτερολέπτου σε αρκετά δευτερόλεπτα ανάλογα με το στοχευμένο επίπεδο υπηρεσίας και τις αντίστοιχες ικανότητες της κλάσης του τερματικού.

## 2.2 Προηγμένες Ασύρματες Τεχνολογίες

Τα μελλοντικά συστήματα επικοινωνιών θα αποτελούνται από ετερογενή ασύρματα δίκτυα. Σε ένα τόσο σύνθετο περιβάλλον όπου διαφορετικά ασύρματα δίκτυα και συσκευές πρέπει να συνυπάρχουν, δεν είναι εφικτή η επικοινωνία χωρίς την επίγνωση του ασύρματος περιβάλλοντος. Ταυτόχρονα, η ύπαρξη περιορισμένων ραδιοπόρων θέτει επιπλέον περιορισμούς στη σχεδίαση των μελλοντικών ασύρματων δικτύων. Επομένως, η χρήση προηγμένων τεχνολογιών στα ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς κρίνεται απαραίτητη προκειμένου να είναι εφικτή η εξέλιξη τους. Στη συγκεκριμένη υποενοότητα περιγράφονται συνοπτικά δύο προηγμένες τεχνολογίες επικοινωνιών που έχουν ως στόχο την βελτίωση της απόδοσης των μελλοντικών συστημάτων επικοινωνιών. Αρχικά παρουσιάζεται η τεχνική των συνεργατικών επικοινωνιών ενώ στη συνέχεια περιγράφεται η τεχνολογία των γνωστικών δικτύων.

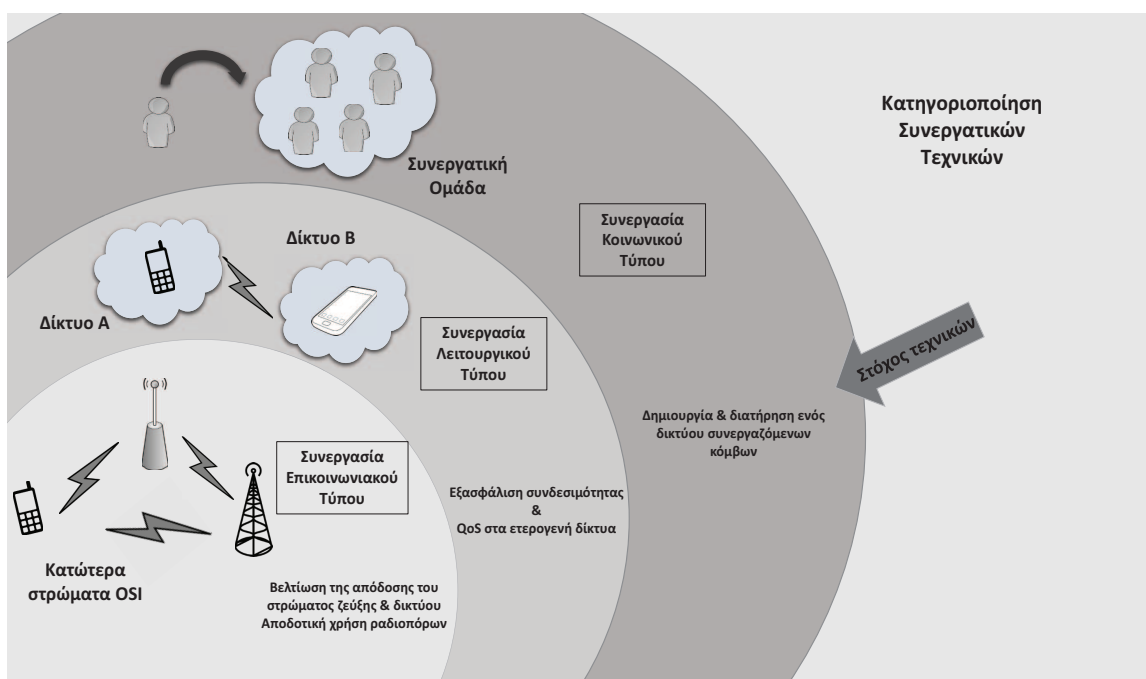
### 2.2.1 Συνεργατικές Τεχνικές

Μια βασική κατηγοριοποίηση των συνεργατικών τεχνικών σύμφωνα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζεται στο (Fitzek & Katz, 2006). Σύμφωνα με την συγκεκριμένη ταξινόμηση, ορίζονται τα ακόλουθα είδη συνεργατικών τεχνικών: οι τεχνικές συνεργασίας επικοινωνιακού τύπου, οι τεχνικές συνεργασίας λειτουργικού τύπου και οι τεχνικές συνεργασίας κοινωνικού τύπου, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.2.

#### Τεχνικές συνεργασίας επικοινωνιακού τύπου

Οι τεχνικές που ανήκουν στην κατηγορία συνεργασίας επικοινωνιακού τύπου είναι αυτές που έχουν μελετηθεί περισσότερο στα ασύρματα δίκτυα. Συνήθως, οι τεχνικές αυτές είναι εγγενώς ενσωματωμένες στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα με αποτέλεσμα να μην είναι ορατές στον τελικό χρήστη. Ο στόχος των τεχνικών αυτών είναι να αυξήσουν την απόδοση στο επίπεδο ζεύξης και στο επίπεδο δικτύου και να βελτιώσουν τη χρήση των βασικών ασύρματων πόρων στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Ο πυρήνας των τεχνικών αυτών πραγματοποιείται συνήθως στα χαμηλότερα στρώματα του OSI,





Σχήμα 2.2: Κατηγορίες συνεργατικών τεχνικών για ασύρματα δίκτυα

κυρίως στο φυσικό και στο MAC στρώμα ενώ μπορεί να εμπλέκονται επίσης και το στρώμα ζεύξης καθώς και το στρώμα δικτύου. Μια βασική έννοια που χρησιμοποιείται στις τεχνικές αυτές είναι η έννοια της συνεργατικής διαφορικότητας (cooperative diversity) (Laneman et al., 2004).

Οι τεχνικές συνεργατικής διαφορικότητας αναφέρονται στο σύνολο των τεχνικών που εκμεταλλεύονται την ύπαρξη ενός ή περισσότερων κόμβων ανάμεσα στον κόμβο-πηγή και στον κόμβο-προορισμό. Η συνεισφορά των ενδιάμεσων κόμβων οδηγεί σε ένα είδος χωρικής διαφορικότητας καθώς δημιουργούνται ανεξάρτητες διαδρομές ανάμεσα στην πηγή και τον προορισμό. Στις συγκεκριμένες τεχνικές, ο δέκτης που αποτελεί τον κόμβο-προορισμό χρησιμοποιεί τόσο το απευθείας σήμα από τον πομπό (κόμβο-πηγή) όσο και το αναμεταδιδόμενο σήμα από τους ενδιάμεσους κόμβους προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση του συστήματος. Τα βασικά είδη των τεχνικών συνεργατικής διαφορικότητας είναι οι τεχνικές amplify-and-forward (AF) (Laneman & Wornell, 2000) και decode-and-forward (DF) (T. Wang et al., 2007). Σύμφωνα με το πρώτο είδος, κάθε ενδιάμεσος κόμβος απλά ενισχύει και προωθεί το λαμβανόμενο σήμα προς τον κόμβο-προορισμό και για το λόγο αυτό ονομάζεται κόμβος-επαναλήπτης (repeater). Αντίθετα, στη δεύτερη τεχνική, ο ενδιάμεσος κόμβος, ο οποίος αναφέρεται ως κόμβος-αναμεταδότης (relay), αποκωδικοποιεί και στη συνέχεια επανακωδικοποιεί το λαμβανόμενο σήμα προτού το προωθήσει στον προορισμό. Παρόλο που οι τεχνικές AF είναι απλούστερες στην υλοποίηση και μπορούν να οδηγήσουν σε μεγαλύτερο κέρδος διαφορισμού, οι τεχνικές DF μπορούν να εμποδίσουν την διάδοση λαθών του σήματος.

### Τεχνικές συνεργασίας λειτουργικού τύπου

Όπως προαναφέρθηκε, ένα από τα εγγενή χαρακτηριστικά των μελλοντικών ασυρμάτων δικτύων θα είναι η ετερογένεια τους λόγω της παρουσίας πολλαπλών διαφορετικών δικτύων πρόσβασης, της ύπαρξης κινητών τερματικών με διαφορετικές δυνατότητες καθώς και διαφορετικών προσφερόμενων υπηρεσιών. Οι λειτουργικές συνεργατικές τεχνικές μπορούν να οριστούν ως οι απαραίτητες διεργα-

οίες που απαιτούνται ανάμεσα στις διαφορετικές οντότητες προκειμένου να είναι εφικτή η επικοινωνία τους μέσα από διαφορετικά δίκτυα. Ο κύριος στόχος τους είναι η εξασφάλιση διαφανούς προς τον χρήστη συνδεσιμότητας καθώς και υψηλής ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service-QoS).

### **Τεχνικές συνεργασίας κοινωνικού τύπου**

Οι τεχνικές που ανήκουν στην κατηγορία της συνεργασίας κοινωνικού τύπου μπορούν να οριστούν ως οι δυναμικές διεργασίες της δημιουργίας και διατήρησης ενός δικτύου συνεργαζόμενων κόμβων ασύρματων συσκευών. Η διαδικασία της δημιουργίας ενός δικτύου κόμβων σε αυτήν την περίπτωση είναι περισσότερο πολύπλοκη καθώς κάθε κόμβος πρέπει να αποφασίσει το αν θα συμμετέχει στο δίκτυο, ενώ η απόφαση του επηρεάζει ταυτόχρονα εκτός από την ατομική του απόδοση και τη συνολική απόδοση του συστήματος. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα είδη συνεργατικών τεχνικών που αναφέρθηκαν, στις τεχνικές συνεργασίας κοινωνικού τύπου, οι μηχανισμοί συνεργασίας δεν είναι ενσωματωμένοι στο σύστημα και είναι ορατοί στον τελικό χρήστη, ο οποίος θα πρέπει να αποφασίσει αν θα συνεργαστεί ή όχι. Επομένως, προκειμένου να προωθηθεί η συνεργασία, θα πρέπει να αναπτυχθούν τα κατάλληλα κίνητρα για τους χρήστες. Μια περιεκτική περιγραφή των μηχανισμών κινήτρων που προωθούν τη συνεργασία στα ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς παρουσιάζεται στο (Y. Zhang & Guizani, 2011), όπου και αποδεικνύεται ότι η χρήση του κατάλληλου μηχανισμού έχει σημαντική επίδραση στην απόδοση του συστήματος.

### **2.2.2 Γνωστικά Δίκτυα**

Μια ιδέα που κίνησε σε μεγάλο βαθμό το ενδιαφέρον των ερευνητών κατά την διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας είναι η εισαγωγή και οι εφαρμογές των γνωστικών ασύρματων συστημάτων (CR - Cognitive Radio). Η τεχνολογία των γνωστικών συστημάτων αποτελεί ένα νέο παράδειγμα σχεδίασης συστημάτων ασύρματων επικοινωνιών που έχει ως στόχο να βελτιώσει τη χρησιμοποίηση του εύρους ζώνης (Mitola III & Maguire Jr, 1999). Το βασικό κίνητρο πίσω από τη συγκεκριμένη τεχνολογία είναι η ανεπάρκεια του διαθέσιμου εύρους ζώνης σε συνδυασμό με την αυξανόμενη ζήτηση φασματικών πόρων από τις νέες εφαρμογές των τηλεπικοινωνιακών χρηστών. Συγκεκριμένα, όπως είναι γνωστό, το μεγαλύτερο μέρος του διαθέσιμου εύρους ζώνης έχει ήδη εκχωρηθεί στα υπάρχοντα ασύρματα συστήματα με αποτέλεσμα μόνο μικρά μέρη του να μπορούν να διατεθούν σε νέες εφαρμογές. Παράλληλα, μελέτη της FCC (Federal Communications Commission) έδειξε ότι ενώ κάποιες ζώνες συχνοτήτων χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό από τα αδειοδοτημένα συστήματα, υπάρχουν ταυτόχρονα αρκετές ζώνες συχνοτήτων που μένουν αχρησιμοποίητες με αποτέλεσμα την υπο-χρησιμοποίηση του φάσματος (FCC, 2002). Ο βασικός λόγος που οδηγεί στην μη αποδοτική χρήση του εύρους ζώνης είναι το στατικό σχήμα αδειοδότησης του. Στο συγκεκριμένο σχήμα, το φάσμα που εκχωρείται στους αδειοδοτημένους χρήστες δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί από άλλους χρήστες ή εφαρμογές ακόμα και αν παραμένει αχρησιμοποίητο. Στην περίπτωση αυτή, οι ζώνες συχνοτήτων που είναι εκχωρημένες σε κάποιο χρήστη αλλά δεν χρησιμοποιούνται αναφέρονται συχνά ως «φασματικές τρύπες» (spectrum holes).

Προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση και η χρησιμοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, προτάθηκε μια καινοτόμος τεχνική πρόσβασης στο φάσμα γνωστή ως τεχνική δυναμικής πρόσβασης (Zhao & Sadler, 2007). Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη τεχνική, η εκχώρηση του εύρους ζώνης γίνεται περισσότερο ευέλικτη επιτρέποντας στους μη αδειοδοτημένους χρήστες να έχουν πρόσβαση στο εύρος ζώνης υπό συγκεκριμένους περιορισμούς. Παρόλα αυτά, δεδομένου ότι τα ήδη υπάρχοντα

ασύρματα συστήματα ήταν σχεδιασμένα να λειτουργούν σε μια συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων, δεν θα ήταν εφικτό να εκμεταλλευτούν την ευελιξία που προσέφερε η νέα τεχνική πρόσβασης. Για το λόγο αυτό, προτάθηκε η έννοια των ασύρματων γνωστικών δικτύων. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη τεχνολογία, προτείνεται η δυναμική πρόσβαση στο φάσμα όχι μόνο των αδειοδοτημένων χρηστών, οι οποίοι είναι γνωστοί ως πρωτεύοντες χρήστες, αλλά και των χρηστών που δεν έχουν άδεια χρησιμοποίησης του εύρους ζώνης (γνωστών και ως δευτερευόντων χρηστών), υπό συγκεκριμένες συνθήκες έτσι ώστε να μην διακόπτεται η επικοινωνία των πρώτων (Hossain et al., 2009). Πιο συγκεκριμένα, ένα γνωστικό ραδιοσύστημα ορίζεται ως ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα το οποίο μπορεί να αλλάζει τις λειτουργικές του παραμέτρους ανάλογα με το περιβάλλον στο οποίο λειτουργεί (Haykin, 2005). Η βασική του διαφορά με τα συμβατικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα έγκειται στην ύπαρξη της γνωστικής ικανότητας καθώς και στον επαναπροσδιορισμό των λειτουργικών του παραμέτρων. Συγκεκριμένα, η γνωστική ικανότητα αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να συλλέγει πληροφορία από το περιβάλλον που λειτουργεί (όπως για παράδειγμα την συχνότητα λειτουργίας, το διαθέσιμο εύρος ζώνης, την ισχύ, την κωδικοποίηση κ.τ.λ.) και να προσαρμόζει αντίστοιχα τις λειτουργικές παραμέτρους του έτσι ώστε να βελτιστοποιεί την απόδοση του.

Προκειμένου να είναι εφικτή η προτεινόμενη δυναμική χρήση του εύρους ζώνης, έχουν προταθεί τρία διαφορετικά σχήματα δυναμικής πρόσβασης στο εύρος ζώνης (A. Goldsmith et al., 2009): το *underlay* σχήμα, το *overlay* σχήμα και το *interweave* σχήμα. Στην πρώτη περίπτωση, θεωρείται ότι οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να συνυπάρχουν ταυτόχρονα με τους πρωτεύοντες χρήστες εφόσον η παρεμβολή που προκαλούν σε αυτούς είναι χαμηλότερη από ένα όριο. Η *overlay* τεχνική θεωρεί ότι οι δευτερεύοντες χρήστες χρησιμοποιούν προηγμένες τεχνικές επεξεργασίας σήματος και κωδικοποίησης προκειμένου να διατηρήσουν ή ακόμα και να βελτιώσουν την επικοινωνία των πρωτευόντων χρηστών. Αυτό πραγματοποιείται βοηθώντας στην αποστολή των δεδομένων τους, ενώ ταυτόχρονα χρησιμοποιούν και ένα μέρος του φάσματος για να στείλουν τη δική τους πληροφορία. Τέλος, στην *interweave* τεχνική, θεωρείται ότι οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να εκπέμπουν τα δεδομένα τους μόνο σε περίπτωση που το φάσμα δεν χρησιμοποιείται από τους πρωτεύοντες χρήστες, εκμεταλλευόμενοι δηλαδή τις φασματικές τρύπες. Όπως αναλύεται στο (A. Goldsmith et al., 2009), κάθε τεχνική δυναμικής πρόσβασης στο εύρος ζώνης έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Επιπλέον, κάθε τεχνική απαιτεί διαφορετικό βαθμό πληροφόρησης. Συγκεκριμένα, στα *underlay* συστήματα απαιτείται γνώση της παρεμβολής που προκαλεί το γνωστικό σύστημα στους δέκτες των πρωτευόντων χρηστών, ενώ στα *interweave* συστήματα απαιτείται πληροφόρηση για την τρέχουσα δραστηριότητα των πρωτευόντων χρηστών, η οποία μπορεί να αποκτηθεί από την ανίχνευση του φάσματος. Στην περίπτωση του *overlay* σχήματος, το οποίο απαιτεί την περισσότερη πληροφόρηση, θεωρείται ότι οι δευτερεύοντες χρήστες διαθέτουν γνώση του βιβλίου κωδικών (*codebook*) καθώς και του μηνύματος των πρωτευόντων χρηστών.

Παράλληλα, πέρα από τις διαφορετικές τεχνικές δυναμικής πρόσβασης στο φάσμα, έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία διαφορετικές προσεγγίσεις όσον αφορά τα δικαιώματα κατοχής του εύρους ζώνης. Πιο συγκεκριμένα, οι βασικές προσεγγίσεις που προτείνονται είναι το μοντέλο κοινών αγαθών (*commons model*) και το μοντέλο κατοχής δικαιωμάτων (*property rights model*) (Peha, 2005), (Faulhaber & Farber, 2003). Σύμφωνα με το πρώτο μοντέλο, οι πρωτεύοντες χρήστες δεν γνωρίζουν την παρουσία των δευτερευόντων χρηστών με αποτέλεσμα να συμπεριφέρονται σαν να μην υπάρχουν. Το μοντέλο αυτό μελετάται χρησιμοποιώντας κυρίως εργαλεία όπως η θεωρία πληροφορίας και η θεωρία αναμονής. Από την άλλη μεριά, στο μοντέλο κατοχής δικαιωμάτων, θεωρείται ότι οι πρωτεύοντες χρήστες κατέχουν τους φασματικούς πόρους και μπορούν να αποφασίσουν κατά πόσο θα μισθώσουν

κάποιο μέρος τους στους δευτερεύοντες χρήστες με αντάλλαγμα κάποια επιθυμητή αμοιβή. Όπως αναλύεται σε μετέπειτα κεφάλαιο, το συγκεκριμένο μοντέλο έχει ξεκινήσει να κινεί το ενδιαφέρον των ερευνητών τα τελευταία χρόνια και μελετάται χρησιμοποιώντας εργαλεία όπως η θεωρία παιγνίων και η θεωρία σχεδίασης μηχανισμών.

### 2.3 Διαχείριση Πόρων Ασύρματων Δικτύων

Στη συγκεκριμένη ενότητα περιγράφεται συνοπτικά η διαδικασία της διαχείρισης πόρων ενός ασύρματου δικτύου (RRM - Radio Resource Management) μαζί με κάποια παραδείγματα διαδικασιών RRM, ενώ παρουσιάζεται επίσης ο τρόπος διατύπωσης ενός προβλήματος διαχείρισης ραδιοπόρων.

#### 2.3.1 Ορισμός προβλήματος διαχείρισης πόρων ασύρματων δικτύων

Η διαχείριση πόρων στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες αναφέρεται σε μια ομάδα διεργασιών που καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο εκχωρούνται οι πόροι ενός ασύρματου δικτύου στους ενεργούς χρήστες του δικτύου. Οι διαδικασίες αυτές είναι απαραίτητες προκειμένου να εκπληρωθούν τα επιθυμητά επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας του κάθε χρήστη, με αποτέλεσμα το πλαίσιο λειτουργιών διαχείρισης ραδιοπόρων να κρίνεται αναγκαίο σε κάθε ασύρματο δίκτυο (Han & Liu, 2008). Παρόλο αυτά, προκειμένου μια τεχνική RRM να είναι αποδοτική, θα πρέπει να οριστούν κατάλληλα συγκεκριμένοι παράγοντες. Αναλυτικότερα, θα πρέπει να καθορισθεί το σύνολο των διαθέσιμων πόρων που θα μοιραστεί στο σύνολο χρηστών καθώς και η κατάλληλη μετρική επίδοσης, η οποία θα περιγράψει την απόδοση του συστήματος συναρτήσει των πόρων που έχουν εκχωρηθεί. Η μετρική επίδοσης που χρησιμοποιείται αναφέρεται συνήθως ως συνάρτηση χρησιμότητας και έχει ως στόχο την ποσοτικοποίηση της ικανοποίησης κάθε χρήστη συναρτήσει των πόρων που έχουν εκχωρηθεί σε αυτόν. Βάσει αυτής της μετρικής, περιγράφονται, έπειτα, οι στόχοι που θα πρέπει να βελτιστοποιηθούν καθώς και οι απαιτήσεις του κάθε χρήστη. Τέλος, θα πρέπει να διευκρινιστεί ο βαθμός πληροφόρησης που είναι διαθέσιμος στον διαχειριστή πόρων καθώς και οι μέθοδοι ανταλλαγής πληροφορίας ανάμεσα στους χρήστες ή στα πρωτόκολλα διαφορετικών στρωμάτων.

Έχοντας καθορίσει τις βασικές συνιστώσες του προβλήματος διαχείρισης πόρων, είναι εφικτή η διατύπωση του συγκεκριμένου προβλήματος ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς. Στόχος είναι η μελέτη ύπαρξης λύσης του συγκεκριμένου προβλήματος καθώς και η εύρεση της λύσης σε περίπτωση που αυτή είναι εφικτή. Θα πρέπει να τονιστεί ωστόσο ότι η διατύπωση και η επίλυση ενός προβλήματος διαχείρισης πόρων μπορεί να έχουν διαφορετικές μορφές, ανάλογα τον αρχικό ορισμό του προβλήματος. Συνήθως, στα ασύρματα δίκτυα, ο βασικός στόχος της διαχείρισης πόρων είναι είτε η μεγιστοποίηση μιας μετρικής επίδοσης που σχετίζεται με τον ρυθμό μετάδοσης των χρηστών (όπως για παράδειγμα η ατομική/συνολική ρυθμαπόδοση, ο ρυθμός μετάδοσης ανά μονάδα ενέργειας κ.α.) είτε η ελαχιστοποίηση μιας μετρικής που σχετίζεται με το ποσό των πόρων που πρέπει να καταναλωθεί για να υποστηριχθεί η συγκεκριμένη ποιότητα υπηρεσιών (π.χ. ελαχιστοποίηση ενέργειας). Στον πίνακα 2.1, παρουσιάζονται κάποια παραδείγματα των βασικών συνιστωσών ενός προβλήματος διαχείρισης ραδιοπόρων σε ασύρματα δίκτυα. Επιπλέον, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της εφαρμογής κάθε χρήστη, η συνάρτηση χρησιμότητας μπορεί να οριστεί με διαφορετικό τρόπο. Για παράδειγμα, εάν αναφερόμαστε σε εφαρμογή δεδομένων, η συνάρτηση χρησιμότητας θα έχει κυρτή μορφή συναρτήσει του ρυθμού μετάδοσης καθώς πρόκειται για ελαστική εφαρμογή. Αντίθετα, στην περίπτωση εφαρμογής φωνής ή υπηρεσιών βίντεο συνεχούς ροής (video streaming),

Στρώμα OSI	Παράμετροι	Στόχοι	Περιορισμοί
Φυσικό στρώμα	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ισχύς εκπομπής</li> <li>• Βαθμός διαμόρφωσης</li> <li>• Ρυθμός κωδικοποίησης καναλιού</li> <li>• Επιλογή κωδικοποίησης</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ελάχιστη συνολική ισχύς</li> <li>• Μέγιστη ρυθμαπόδοση</li> <li>• Μέγιστος ρυθμός/joule</li> <li>• Ελάχιστο BER</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Μέγιστη ισχύς εκπομπής</li> <li>• Διαθέσιμοι αστερισμοί διαμόρφωσης</li> <li>• Επιτρεπόμενος ρυθμός κωδικοποίησης καναλιού</li> <li>• Περιορισμένη ενέργεια</li> </ul>
MAC στρώμα	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Χρόνος/συχνότητα μετάδοσης</li> <li>• Ρυθμός εξυπηρέτησης</li> <li>• Προτεραιότητα μετάδοσης</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Μέγιστη συνολική ρυθμαπόδοση</li> <li>• Ελάχιστη καθυστέρηση</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Περιορισμένος χρόνος χρονοσχιμής</li> <li>• Περιορισμένη πληροφόρηση</li> </ul>
Στρώμα δικτύου	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Επιλογή διαδρομής</li> <li>• Κόστος δρομολόγησης</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ελάχιστο κόστος</li> <li>• Μέγιστο κέρδος</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Περιορισμοί ασφάλειας</li> </ul>
Στρώμα εφαρμογών	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ρυθμός κωδικοποίησης πηγής</li> <li>• Ρυθμός άφιξης πακέτου</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ελάχιστη καθυστέρηση</li> <li>• Ελάχιστη παραμόρφωση</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Περιορισμένος ρυθμός πηγής</li> <li>• Περιορισμοί καθυστέρησης</li> <li>• Περιορισμοί ασφάλειας</li> </ul>

Πίνακας 2.1: Παραδείγματα βασικών συνιστωσών του προβλήματος διαχείρισης πόρων σε ασύρματα δίκτυα

η συνάρτηση χρησιμότητας θα έχει βηματική ή σιγμοειδή μορφή, αντίστοιχα.

Όσον αφορά τους περιορισμούς στη διατύπωση του προβλήματος διαχείρισης ραδιοπόρων είναι πιθανό είτε να προέρχονται από την έλλειψη διαθέσιμων πόρων (όπως ισχύει για παράδειγμα για το εύρος ζώνης ή την ισχύ εκπομπής), είτε να οφείλονται στις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας των χρηστών. Επιπλέον, ανάλογα με τη φύση των περιορισμών αναφερόμαστε σε στιγμιαίους ή μέσους περιορισμούς καθώς και σε ατομικούς ή συλλογικούς περιορισμούς. Στο πλαίσιο της διατριβής, θα μελετηθούν προβλήματα διαχείρισης ραδιοπόρων με διάφορα είδη περιορισμών αποδεικνύοντας ότι η μορφή του κάθε περιορισμού παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στην επιλογή της μεθόδου επίλυσης του προβλήματος.

### 2.3.2 Προσεγγίσεις διαχείρισης πόρων ασυρμάτων δικτύων

Οι λειτουργίες διαχείρισης ραδιοπόρων μπορούν να διακριθούν σε λειτουργίες κεντροποιημένης διαχείρισης και λειτουργίες κατανεμημένης διαχείρισης πόρων. Στην πρώτη περίπτωση, ένας κεντρικός διαχειριστής συλλέγει την καθολική πληροφορία (όπως για παράδειγμα τις παραμέτρους κατάστασης των καναλιών) και κατανέμει τους διαθέσιμους πόρους βάσει της πληροφορίας αυτής. Το βασικό πλεονέκτημα μιας κεντροποιημένης διαχείρισης είναι ότι μπορεί να οδηγήσει στην καθολικά βέλτιστη λύση παρέχοντας ταυτόχρονα σταθερές κατανομές στους χρήστες, καθώς μόνο μια οντότητα διαχειρίζεται τους πόρους, απλοποιώντας με αυτόν τον τρόπο την διατύπωση του προβλήματος. Παρόλα αυτά, η συγκεκριμένη προσέγγιση εμφανίζει αρκετά μειονεκτήματα κυρίως όσον αφορά τη δυνατότητα κλιμάκωσης της καθώς μια αύξηση του αριθμού των χρηστών μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της πολυπλοκότητας του προβλήματος, με αποτέλεσμα να μην είναι εφικτή η επίλυση του σε πραγματικό χρόνο. Επίσης, η επιπλέον σηματοδοσία που απαιτείται για τη συλλογή πληροφορίας από τον κεντρικό διαχειριστή αποτελεί σημαντικό φόρτο για το δίκτυο, ενώ, παράλληλα, η καθυστέρηση λόγω της διαδικασίας ανταλλαγής πληροφορίας μπορεί να οδηγήσει σε υποβάθμιση της απόδοσης του συστήματος.

Προκειμένου να αντισταθμιστούν τα μειονεκτήματα της κεντροποιημένης διαχείρισης ραδιοπόρων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια κατανεμημένη μέθοδος διαχείρισης πόρων. Σε αυτή την

προσέγγιση, κάθε ζεύγος κόμβων (πομπός-δέκτης) καθορίζει τους πόρους που θα χρησιμοποιήσει βάσει της τοπικής πληροφόρησης που διαθέτει. Με αυτόν τον τρόπο, δεν υπάρχει το πρόβλημα της αυξανόμενης πολυπλοκότητας λόγω της κλιμάκωσης του δικτύου που συναντάται στα κεντρικοποιημένα συστήματα ενώ παράλληλα μειώνεται η επιπλέον καθυστέρηση που οφείλεται στην ανταλλαγή μηνυμάτων. Δεδομένου όμως ότι κάθε κόμβος διαχειρίζεται ανεξάρτητα τους πόρους επηρεάζοντας παράλληλα τις αποφάσεις διαχείρισης που λαμβάνουν οι υπόλοιποι κόμβοι, δεν είναι πάντα εφικτό να βρεθεί ένα καθολικό, σταθερό σημείο στο οποίο θα συγκλίνουν οι αποφάσεις όλων των κόμβων. Ακόμα και σε περίπτωση που υπάρχει σημείο σύγκλισης (ή σημείο ισορροπίας) δεν είναι απαραίτητο ότι αυτό το σημείο θα αποτελεί την καθολικά βέλτιστη λύση, με αποτέλεσμα η συνολική απόδοση που επιτυγχάνεται με την κατανεμημένη διαχείριση πόρων να είναι χαμηλότερη σε σύγκριση με την αντίστοιχη κεντρικοποιημένη προσέγγιση.

Τέλος, μια άλλη προσέγγιση που χρησιμοποιείται ώστε να αξιοποιεί τα πλεονεκτήματα τόσο της κεντρικοποιημένης όσο και της κατανεμημένης διαχείρισης ραδιοπόρων, είναι η υβριδική διαχείριση ραδιοπόρων. Σε αυτή την προσέγγιση, ο κεντρικός διαχειριστής δεν καθορίζει επακριβώς την κατανομή κάθε χρήστη σε κάθε χρονική στιγμή αλλά κατανέμει κάποιες πληροφορίες αναφοράς προκειμένου να βοηθήσει στην εύρεση ενός σταθερού σημείου λειτουργίας. Στη συνέχεια, κάθε ζεύγος κόμβων καθορίζει την χρήση των πόρων βάσει της πληροφόρησης που λαμβάνει από τον κεντρικό διαχειριστή και την τοπική πληροφόρηση που έχει συλλέξει. Επομένως, σε αυτή την περίπτωση, το συνολικό πρόβλημα διαχείρισης πόρων χωρίζεται σε δύο υποπροβλήματα. Το πρώτο αφορά τον καθορισμό της πληροφορίας αναφοράς στον κεντρικό διαχειριστή και το δεύτερο αναφέρεται στον καθορισμό της κατανομής των πόρων σε κάθε ζεύγος κόμβων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στο πλαίσιο της ΔΔ προτείνονται κεντρικοποιημένα καθώς και κατανεμημένα σχήματα διαχείρισης ραδιοπόρων προκειμένου να μελετηθεί η επίδοση των δύο προσεγγίσεων.

### **2.3.3 Παραδείγματα διεργασιών διαχείρισης πόρων ασύρματων δικτύων**

Δεδομένων των διαφορετικών πόρων που υπάρχουν στα ασύρματα δίκτυα, η λειτουργία της διαχείρισης πόρων μπορεί να αναφέρεται σε διάφορους μηχανισμούς, όπως για παράδειγμα στον έλεγχο ισχύος, στον έλεγχο αποδοχής κλήσεων, στην εκχώρηση εύρους ζώνης και στον έλεγχο μέσου πρόσβασης. Στην συγκεκριμένη υποενότητα, περιγράφονται συνοπτικά οι βασικές αυτές διεργασίες RRM, ενώ στο πλαίσιο της ΔΔ, δίνεται έμφαση κυρίως στις διεργασίες του ελέγχου ισχύος και στους μηχανισμούς ανάθεσης εύρους ζώνης.

#### **Έλεγχος αποδοχής (Admission Control)**

Ο έλεγχος αποδοχής σε ένα ασύρματο δίκτυο απαιτείται προκειμένου να περιοριστεί ο αριθμός των χρηστών στο σύστημα έτσι ώστε να αρκεί το περιορισμένο εύρος ζώνης. Οι βασικοί στόχοι της συγκεκριμένης λειτουργίας είναι η εξασφάλιση της απαραίτητης ποιότητας υπηρεσίας τόσο για τους υπάρχοντες όσο και για τους νέους χρήστες καθώς και η δημιουργία μίας ιεραρχίας ανάμεσα στους χρήστες διαφορετικών υπηρεσιών. Συνήθως, υπάρχει ένας βέλτιστος αριθμός χρηστών ο οποίος μεγιστοποιεί την συνολική απόδοση του δικτύου. Σε περίπτωση που ο αριθμός των χρηστών είναι μικρότερος από τον βέλτιστο, τότε οι φασματικοί πόροι υπο-χρησιμοποιούνται με αποτέλεσμα την μείωση της συνολικής απόδοσης του δικτύου. Ταυτόχρονα, η αποδοχή μεγάλου αριθμού χρηστών οδηγεί επίσης σε μικρή συνολική απόδοση λόγω της ανεπάρκειας των διαθέσιμων πόρων. Για περαιτέρω ανάλυση της λειτουργίας ελέγχου αποδοχής, ο αναγνώστης παραπέμπεται στα (Ahmed, 2005),

(Ghaderi & Boutaba, 2006).

### **Έλεγχος πρόσβασης στο μέσο (Medium Access Control)**

Η διαδικασία ελέγχου πρόσβασης στο μέσο αναφέρεται στον έλεγχο πρόσβασης των χρηστών στο διαμοιραζόμενο ασύρματο κανάλι. Η συγκεκριμένη λειτουργία θα πρέπει να υποστηρίζει τη διαφοροποίηση των υπηρεσιών και την εξασφάλιση ποιότητας υπηρεσίας για διαφορετικά είδη χρηστών στο δίκτυο. Γενικά, ο έλεγχος πρόσβασης στο κανάλι μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με κεντρικοποιημένο τρόπο είτε με καταναμημένο τρόπο. Στην πρώτη περίπτωση, ένας κεντρικός ελεγκτής (π.χ. σταθμός βάσης) ελέγχει τον τρόπο πρόσβασης των χρηστών στο κανάλι. Προφανώς, στη μέθοδο αυτή θεωρείται ότι όλοι οι χρήστες του δικτύου μπορούν να επικοινωνούν με τον κεντρικό ελεγκτή και να του μεταφέρουν τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας που έχουν. Αντίθετα, στην περίπτωση καταναμημένου ελέγχου πρόσβασης στο μέσο, θεωρείται ότι όλοι οι χρήστες, ανεξάρτητα, μπορούν να έχουν πρόσβαση στο κανάλι, με αποτέλεσμα να υπάρχει το ενδεχόμενο συγκρούσεων σε περίπτωση που περισσότεροι από ένας χρήστες μεταδίδουν δεδομένα, ταυτόχρονα, στο ίδιο κανάλι. Για περαιτέρω ανάλυση σε θέματα ελέγχου πρόσβασης στο μέσο για διάφορα ασύρματα δίκτυα, ο αναγνώστης παραπέμπεται στο (Gummalla & Limb, 2000).

### **Έλεγχος ισχύος (Power Control)**

Στα περισσότερα συστήματα ασύρματων επικοινωνιών, ο έλεγχος ισχύος αποτελεί μια πολύ σημαντική λειτουργία καθώς οδηγεί τόσο στην μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης όσο και στον περιορισμό της παρεμβολής προς τους άλλους χρήστες. Στόχος του ελέγχου ισχύος είναι συνήθως η μεγιστοποίηση είτε της ρυθμαπόδοσης του κάθε χρήστη ξεχωριστά, είτε της συνολικής ρυθμαπόδοσης του δικτύου, η οποία ορίζεται ως το άθροισμα της ρυθμαπόδοσης όλων των χρηστών. Στην πρώτη περίπτωση, κατά την οποία θεωρείται ότι οι χρήστες είναι ανεξάρτητοι και μπορούν να μεγιστοποιήσουν την ατομική τους χρησιμότητα, το πρόβλημα του ελέγχου ισχύος μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο, όπως αναλύεται σε επόμενο κεφάλαιο (Saraydar et al., 2002). Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση θεωρείται ότι υπάρχει κάποιος κεντρικός ελεγκτής ο οποίος μπορεί να ελέγχει την ισχύ μετάδοσης όλων των χρηστών και να θέτει αντίστοιχα τα επιθυμητά επίπεδα ισχύος. Στα επόμενα κεφάλαια, παρουσιάζονται αναλυτικότερα διεργασίες ελέγχου ισχύος, τόσο για κεντρικοποιημένα όσο και για καταναμημένα συστήματα.

### **Εκχώρηση εύρους ζώνης (Bandwidth Allocation)**

Μια επίσης πολύ σημαντική διεργασία διαχείρισης ραδιοπόρων είναι η διεργασία εκχώρησης εύρους ζώνης. Η συγκεκριμένη λειτουργία αναφέρεται στο τρόπο διαμοιρασμού του διαθέσιμου εύρους ζώνης στους τηλεπικοινωνιακούς χρήστες. Λόγω των περιορισμένων φασματικών πόρων και της αυξανόμενης ζήτησης τους, είναι ευνόητο ότι η αποδοτική διαχείριση του εύρους ζώνης μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικό κέρδος της συνολικής απόδοσης του συστήματος. Σε επόμενο κεφάλαιο της διατριβής, η διεργασία εκχώρησης ραδιοπόρων θα αναλυθεί εκτενώς τόσο για την περίπτωση των ευρυζωνικών δορυφορικών συστημάτων όσο και για την περίπτωση των γνωστικών δικτύων.





## Κεφάλαιο 3

# Μαθηματικά Εργαλεία για Διαχείριση Πόρων Ασύρματων Δικτύων

Η διαχείριση πόρων στα ασύρματα δίκτυα αποτελεί μια αναγκαία λειτουργία προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση τους, δεδομένης της περιορισμένης ύπαρξης των ραδιοπόρων. Όπως αναφέρεται στο προηγούμενο κεφάλαιο, ένα πρόβλημα διαχείρισης ραδιοπόρων μπορεί να διατυπωθεί ως ένα μαθηματικό πρόβλημα βελτιστοποίησης καθορίζοντας κατάλληλα τη συνάρτηση χρησιμότητας και τους αντίστοιχους περιορισμούς. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, περιγράφονται τα βασικά μαθηματικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο της ΔΔ για την επίλυση των θεωρούμενων προβλημάτων διαχείρισης πόρων. Αναλυτικότερα, το πρώτο μέρος του κεφαλαίου εστιάζει στις μεθόδους της κλασικής θεωρίας βελτιστοποίησης, ενώ το δεύτερο μέρος περιγράφει μια διαδεδομένη μαθηματική θεωρία, η οποία τα τελευταία χρόνια, χρησιμοποιείται ευρέως στα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, γνωστή ως θεωρία παιγνίων.

### 3.1 Θεωρία Βελτιστοποίησης

Σε αυτήν την ενότητα, περιγράφονται ορισμένες βασικές έννοιες που παρουσιάζονται στη θεωρία βελτιστοποίησης και χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο της διατριβής. Συγκεκριμένα, αρχικά παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο ορίζεται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, ενώ στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά οι βασικές μέθοδοι επίλυσης του.

#### 3.1.1 Ορισμός προβλήματος βελτιστοποίησης

Αρχικός στόχος της επίλυσης ενός προβλήματος διαχείρισης ραδιοπόρων είναι η αναγνώριση των στόχων και των περιορισμών που υπάρχουν, ώστε να βρεθεί η σωστή διατύπωση του ως μαθηματικό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, η γενική μορφή ενός προβλήματος βελτιστοποίησης είναι η ακόλουθη:

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{x} \in \Omega} f(\mathbf{x}) \\ \text{s.t. } & \begin{cases} g_i(\mathbf{x}) \leq 0, \text{ για } i = 1, \dots, m \\ h_j(\mathbf{x}) = 0, \text{ για } j = 1, \dots, n \end{cases} \end{aligned} \quad (3.1)$$

όπου  $\mathbf{x}$  είναι το διάνυσμα μεταβλητών προς τα οποία θα γίνει η βελτιστοποίηση,  $\Omega$  είναι το εφικτό πεδίο τιμών του  $\mathbf{x}$ ,  $f(\mathbf{x})$  είναι η συνάρτηση προς βελτιστοποίηση που ονομάζεται αντικειμενική συνάρ-

τηση (ή συνάρτηση χρησιμότητας) και τα  $g_i(\mathbf{x})$ ,  $h_j(\mathbf{x})$  απεικονίζουν, αντίστοιχα, τους περιορισμούς ανισότητας και ισότητας του διανύσματος μεταβλητών. Στόχος της διαδικασίας βελτιστοποίησης που θα ακολουθηθεί είναι η εύρεση της βέλτιστης λύσης  $\mathbf{x}^*$ , η οποία θα ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς. Θα πρέπει να τονισθεί ότι σε πολλές περιπτώσεις, το πρόβλημα βελτιστοποίησης στο οποίο καταλήγει η αρχική διατύπωση ανήκει σε μια κατηγορία προβλημάτων για την οποία υπάρχουν διαθέσιμοι αριθμητικοί αλγόριθμοι που μπορούν να εφαρμοσθούν απευθείας για την επίλυση του. Ωστόσο, στην ενότητα αυτή δίνεται κυρίως έμφαση στη μαθηματική επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης αναφέροντας κάποιες βασικές μεθόδους επίλυσης που θα χρησιμοποιηθούν στο πλαίσιο της ΔΔ.

Μια συγκεκριμένη μορφή προβλημάτων, η οποία συναντάται στη συγκεκριμένη διατριβή, αντιστοιχεί στα κυρτά προβλήματα βελτιστοποίησης (Boyd & Vandenberghe, 2004). Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα προβλήματα τα οποία έχουν κυρτό πεδίο τιμών  $\Omega$ , κυρτή αντικειμενική συνάρτηση, ενώ οι περιορισμοί ανισότητας/ισότητας αποτελούν κυρτές/ομοπαράλληλικές (affine) συναρτήσεις, αντίστοιχα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όταν το πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί είναι κυρτό, τότε αυτό έχει πολλές επιθυμητές ιδιότητες. Μια από αυτές είναι ότι μια τοπικά βέλτιστη λύση αποτελεί ταυτόχρονα ολική βέλτιστη λύση του προβλήματος, με αποτέλεσμα να μη χρειάζεται να ελεγχθεί η βελτιστότητα της. Επιπλέον, μπορεί να εφαρμοσθεί η θεωρία της δυαδικότητας, η οποία βοηθάει στον καθορισμό λύσης του προβλήματος, ενώ παράλληλα υπάρχουν αποδοτικοί αριθμητικοί αλγόριθμοι για τον προσδιορισμό της βέλτιστης λύσης.

Η απόδειξη της κυρτότητας μιας διαφορίσιμης συνάρτησης  $f(\mathbf{x})$ , βασίζεται στις συνθήκες πρώτου και δευτέρου βαθμού. Συγκεκριμένα, εάν ικανοποιείται μια από τις δύο ακόλουθες συνθήκες:

$$\begin{aligned} \text{Συνθήκη πρώτου βαθμού: } f(\mathbf{x}_2) &\geq f(\mathbf{x}_1) + \nabla f(\mathbf{x}_1)^T(\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1) \\ \text{Συνθήκη δεύτερου βαθμού: } \nabla^2 f(\mathbf{x}) &\geq 0 \end{aligned} \tag{3.2}$$

τότε η συνάρτηση είναι κυρτή. Μια σημαντική ιδιότητα των κυρτών συναρτήσεων η οποία θα χρησιμοποιηθεί και στη συνέχεια της διατριβής αποτελεί η ικανοποίηση της ανισότητας Jensen. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη ανισότητα, αν μια συνάρτηση  $f$  είναι κυρτή και η παράμετρος  $\mathbf{x}$  έχει κάποια τυχαία κατανομή στο  $\Omega$ , τότε ισχύει η ανισότητα  $f(\mathbf{E}[\mathbf{x}]) \leq \mathbf{E}[f(\mathbf{x})]$ , όπου η  $\mathbf{E}[\cdot]$  αποτελεί τη συνάρτηση μέσης τιμής.

#### 3.1.2 Επίλυση προβλήματος βελτιστοποίησης

Έχοντας διατυπώσει το μαθηματικό πρόβλημα βελτιστοποίησης και εντοπίσει αν ανήκει σε κάποια ειδική κατηγορία προβλημάτων, το επόμενο βήμα είναι η εύρεση της βέλτιστης λύσης. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε χρησιμοποιώντας μια μαθηματική μέθοδο καταλήγοντας σε μια λύση κλειστού-τύπου, είτε χρησιμοποιώντας κάποια μέθοδο χαλάρωσης η οποία συγκλίνει στη βέλτιστη λύση. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στη συνέχεια γίνεται αναφορά σε γενικές μεθόδους βελτιστοποίησης και όχι απαραίτητα κυρτής βελτιστοποίησης. Σε περίπτωση που μια μέθοδος/θεώρημα ικανοποιείται μόνο για προβλήματα κυρτής βελτιστοποίησης τότε αυτό θα αναφέρεται ρητά.

#### Μέθοδος πολλαπλασιαστών Lagrange

Μια από τις σημαντικότερες μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την εύρεση μια λύσης κλειστού-τύπου σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς είναι η μέθοδος πολλαπλασιαστών Lagran-

ge (Bertsekas, 1982). Για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου στο πρόβλημα βελτιστοποίησης (3.1), ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα :

1. Αρχικά, εκφράζεται η Lagrangian συνάρτηση του προβλήματος ως :

$$L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = f(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^m \lambda_i g_i(\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^n \mu_j h_j(\mathbf{x}) \quad (3.3)$$

όπου τα διανύσματα  $\boldsymbol{\lambda}$ ,  $\boldsymbol{\mu}$  αναφέρονται ως πολλαπλασιαστές Lagrange .

2. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι παρακάτω παράγωγοι της Lagrangian συνάρτησης, οι οποίες θέτονται ίσες με μηδέν ως εξής :

$$\nabla_{\mathbf{x}} L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = 0 \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})}{\partial \lambda_i} = 0, \forall i \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})}{\partial \mu_j} = 0, \forall j \quad (3.6)$$

3. Τέλος, λύνεται το σύστημα των εξισώσεων (3.4 -3.6) και υπολογίζονται οι τιμές των παραμέτρων  $\boldsymbol{\lambda}$  και  $\boldsymbol{\mu}$  που ικανοποιούν τους περιορισμούς καθώς και τη βέλτιστη λύση  $\mathbf{x}^*$ .

Σε περίπτωση που το πρόβλημα είναι κυρτό τότε η βέλτιστη λύση  $\mathbf{x}^*$  αποτελεί ολικά βέλτιστη λύση. Διαφορετικά, αν η συνάρτηση χρησιμότητας δεν είναι κυρτή τότε η αναλυτική λύση της 3.4 μπορεί να είναι αρκετά πολύπλοκη με αποτέλεσμα να πρέπει να χρησιμοποιηθούν κατάλληλες προσεγγίσεις είτε της αντικειμενικής συνάρτησης, είτε των περιορισμών.

### Μέθοδος δυαδικού προβλήματος

Μια άλλη βασική έννοια στη θεωρία βελτιστοποίησης είναι η έννοια της δυαδικότητας. Συγκεκριμένα, σε περίπτωση που πρόκειται για κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης, τότε το αρχικό και το δυαδικό πρόβλημα είναι ισοδύναμα, με αποτέλεσμα η λύση του αρχικού προβλήματος να μπορεί να υπολογισθεί λύνοντας το δυαδικό πρόβλημα (Bertsekas, 1999). Στη συγκεκριμένη υποενοότητα, ορίζεται αρχικά το δυαδικό πρόβλημα ενός προβλήματος βελτιστοποίησης και στη συνέχεια περιγράφεται το θεώρημα αυστηρής δυαδικότητας.

Θεωρώντας το πρόβλημα (3.1) ως το αρχικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, η αντίστοιχη δυαδική Lagrangian συνάρτηση  $s : \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  ορίζεται ως η ελάχιστη τιμή της Lagrangian συνάρτησης ως προς το διάνυσμα μεταβλητών  $\mathbf{x}$ , δηλαδή

$$s(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = \min_{\mathbf{x}} L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) . \quad (3.7)$$

Δεδομένου ότι η ελάχιστη συνάρτηση ομοπαράλληλικών συναρτήσεων είναι πάντα κοίλη, ισχύει ότι η δυαδική συνάρτηση  $s$  θα είναι πάντα κοίλη, ανεξάρτητα από την κυρτότητα της αρχικής συνάρτησης. Επομένως, το δυαδικό πρόβλημα που ορίζεται ως εξής :

$$\begin{aligned} & \max_{\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}} s(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) \\ & \text{s.t. } \boldsymbol{\lambda} \geq 0 \end{aligned} \quad (3.8)$$

αποτελεί πάντα ένα κυρτό πρόβλημα λόγω της κοίλης αντικειμενικής συνάρτησης και των κυρτών περιορισμών. Παράλληλα, οι βέλτιστες λύσεις του δυαδικού προβλήματος αποτελούν τους πολλαπλασιαστές Lagrange του αρχικού προβλήματος βελτιστοποίησης.

Θεωρώντας ότι η βέλτιστη λύση του δυαδικού προβλήματος ορίζεται ως  $\mathbf{d}^*$ , τότε αυτή αποτελεί το βέλτιστο κάτω όριο της λύσης του αρχικού προβλήματος, δηλαδή ισχύει η σχέση  $\mathbf{x}^* \geq \mathbf{d}^*$ . Η ιδιότητα αυτή ονομάζεται σχέση ασθενούς δυαδικότητας ενώ η διαφορά  $\mathbf{x}^* - \mathbf{d}^*$  ονομάζεται χάσμα δυαδικότητας (duality gap). Από τον ορισμό του, είναι προφανές ότι το χάσμα δυαδικότητας είναι πάντα μη αρνητικό, ενώ υπό συγκεκριμένες συνθήκες (αυστηρή δυαδικότητα) μπορεί να είναι μηδενικό. Συγκεκριμένα, θεωρώντας ένα κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης, ορίζεται το ακόλουθο θεώρημα για την περίπτωση αυστηρής δυαδικότητας.

**Θεώρημα 3.1.** (Συνθήκη Slater για αυστηρή δυαδικότητα): Έστω ότι το σύνολο  $\Omega$  αποτελεί ένα κυρτό σύνολο και οι περιορισμοί  $g_i, h_j$  είναι αντίστοιχα κυρτές και ομοπαράλληλες συναρτήσεις. Θεωρώντας ότι υπάρχει ένα  $\mathbf{x} \in \Omega$  τέτοιο ώστε  $g_i(\mathbf{x}) \leq 0$  και  $h_j(\mathbf{x}) = 0$  (για κάθε  $i, j$ ), τότε ισχύει η συνθήκη της αυστηρής δυαδικότητας για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Στην περίπτωση αυτή, το χάσμα δυαδικότητας είναι μηδενικό, με αποτέλεσμα η βέλτιστη λύση του αρχικού προβλήματος να είναι ίδια με τη βέλτιστη λύση του δυαδικού προβλήματος.

Επομένως, στην περίπτωση που το αρχικό και το δυαδικό πρόβλημα είναι ισοδύναμα, μπορεί να λυθεί έμμεσα το αρχικό πρόβλημα, λύνοντας το δυαδικό του. Ωστόσο, για μη κυρτά προβλήματα βελτιστοποίησης, το χάσμα δυαδικότητας μπορεί να μην είναι μηδενικό. Παρόλα αυτά, το δυαδικό πρόβλημα μπορεί να απαιτεί τη βελτιστοποίηση λιγότερων παραμέτρων, με αποτέλεσμα να είναι ευκολότερο να λυθεί, ακόμα και στην περίπτωση μη κυρτού αρχικού προβλήματος.

### Μελέτη βέλτιστης λύσης

Έχοντας βρει μια λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης, θα πρέπει να καθορισθεί αν η συγκεκριμένη λύση αποτελεί μια τοπικά ή ολικά βέλτιστη λύση. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται συνήθως οι συνθήκες Karush-Kuhn-Tucker, γνωστές ως συνθήκες ΚΚΤ, οι οποίες περιγράφονται στη συνέχεια. Στη συγκεκριμένη υποενότητα περιγράφονται οι αναγκαίες συνθήκες ΚΚΤ πρώτου βαθμού, οι οποίες χρησιμοποιούνται στη συνέχεια της διατριβής. Για τον ορισμό των αναγκαίων και ικανών συνθηκών δευτέρου βαθμού, ο αναγνώστης παραπέμπεται στο (Bertsekas, 1999).

*Συνθήκες ΚΚΤ πρώτου βαθμού:* Έστω  $\mathbf{x}^*$  μια τοπικά βέλτιστη λύση του προβλήματος (3.1), όπου  $f, h, g$  αποτελούν συνεχείς, διαφορίσιμες συναρτήσεις. Τότε, υπάρχουν μοναδικά διανύσματα  $\lambda^*, \mu^*$  τέτοια ώστε:

$$\begin{aligned} \nabla_{\mathbf{x}} L(\mathbf{x}^*, \lambda^*, \mu^*) &= 0, \\ \mu_j^* &\geq 0, j = 1, \dots, k \\ \mu_j^* &= 0, \forall j \notin A(\mathbf{x}^*) \end{aligned} \quad (3.9)$$

όπου  $A(\mathbf{x}^*)$  είναι το σύνολο των ενεργών περιορισμών στο  $\mathbf{x}^*$ .

Θα πρέπει να τονισθεί ότι οι προαναφερόμενες συνθήκες ΚΚΤ αποτελούν αναγκαίες, αλλά μη επαρκείς συνθήκες βελτιστότητας στην περίπτωση μη κυρτών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Αντίθετα, στην περίπτωση που το πρόβλημα είναι κυρτό, τότε οι συνθήκες αυτές είναι επαρκείς συνθήκες και η λύση  $\mathbf{x}^*$  αποτελεί την ολικά βέλτιστη λύση.

## 3.2 Θεωρία Παιγνίων

Εκτός από την κλασική θεωρία βελτιστοποίησης, ένα από τα βασικά εργαλεία που χρησιμοποιείται ευρέως, τα τελευταία χρόνια, στην επίλυση προβλημάτων διαχείρισης ραδιοπόρων και το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο της ΔΔ, είναι η θεωρία παιγνίων. Προκειμένου να γίνει κατανοητή η χρήση της συγκεκριμένης μαθηματικής θεωρίας, σε αυτήν την ενότητα, περιγράφονται ορισμένες βασικές έννοιες και θεωρήματα τόσο της μη συνεργατικής όσο και της συνεργατικής θεωρίας παιγνίων. Συγκεκριμένα, αρχικά παρουσιάζεται μια σύντομη περιγραφή της εξέλιξης της θεωρίας παιγνίων. Στη συνέχεια, δίνεται έμφαση στη μη συνεργατική θεωρία παιγνίων παρουσιάζοντας τις βασικές αρχές και τα θεωρήματα που χρησιμοποιούνται στη διατριβή. Ενώ τέλος, περιγράφονται συνοπτικά οι βασικές έννοιες της συνεργατικής θεωρίας παιγνίων καθώς και της εξελικτικής θεωρίας παιγνίων.

### 3.2.1 Ιστορική Αναδρομή

Η θεωρία παιγνίων αποτελεί ένα μαθηματικό εργαλείο για την ανάλυση στρατηγικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ πολλαπλών οντοτήτων. Η πρώτη αναφορά στη συγκεκριμένη θεωρία εμφανίζεται με τη δημοσίευση του βιβλίου «Θεωρία των Παιγνίων και Οικονομική Συμπεριφορά» του J. Von Neumann και του O. Morgenstern, το 1944, το οποίο θεωρείται ως το θεμέλιο της θεωρίας παιγνίων (Von Neumann & Morgenstern, 2007). Στο βιβλίο αυτό περιγράφεται η μέθοδος για την εύρεση αμοιβαία συμβατών στρατηγικών για την περίπτωση των παιγνίων μηδενικού αθροίσματος δύο ατόμων. Στο τέλος της δεκαετίας 1940-1950, εμφανίζεται η πρώτη αναφορά στη συνεργατική θεωρία παιγνίων, η οποία αναλύει τις βέλτιστες στρατηγικές ενός συνόλου οντοτήτων θεωρώντας ότι αυτές μπορούν να συνεργαστούν μεταξύ τους για να βελτιώσουν την απόδοσή τους στο παίγνιο. Παράλληλα, στις αρχές του 1950, ο γνωστός μαθηματικός John Nash αναπτύσσει ένα νέο κριτήριο γνωστό ως ισορροπία Nash, προκειμένου να χαρακτηρίσει τις αμοιβαία συμβατές στρατηγικές των παικτών. Η έννοια αυτή είναι πιο γενική από το κριτήριο που προτάθηκε από τους Von Neumann και Morgenstern καθώς εφαρμόζεται και σε παίγνια μη μηδενικού αθροίσματος και σηματοδοτεί ένα σημαντικό άλμα στην ανάπτυξη της μη συνεργατικής θεωρίας παιγνίων (J. Nash, 1950). Για το λόγο αυτό, το 1994, ο J. Nash μοιράστηκε για τη συνεισφορά του στη θεωρία παιγνίων, το βραβείο Νόμπελ στις οικονομικές επιστήμες.

Πέρα όμως από την ισορροπία Nash, κατά την διάρκεια της δεκαετίας του 1950, αναπτύχθηκαν πολλές σημαντικές έννοιες της θεωρίας παιγνίων, όπως για παράδειγμα τα παίγνια εκτεταμένης μορφής, τα επαναλαμβανόμενα παίγνια καθώς και η έννοια της τιμής Shapley. Μέσα στην επόμενη δεκαετία προτάθηκαν βελτιώσεις της ισορροπίας Nash και των εννοιών πλήρους πληροφόρησης καθώς και των μπευζιανών παιγνίων. Το 1973, εμφανίζεται για πρώτη φορά η εφαρμογή της θεωρίας παιγνίων στη βιολογία (εξελικτική θεωρία παιγνίων) από τον J. M. Smith. Την ίδια δεκαετία, ο μαθηματικός R. Aumann εισάγει τις έννοιες της συσχετισμένης ισορροπίας και της κοινής πληροφόρησης. Παράλληλα, κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1960, αρχίζει να αναπτύσσεται ένας νέος κλάδος της θεωρίας παιγνίων, ο οποίος εστιάζει στην έννοια της λύσης για μια τάξη παιγνίων ιδιωτικής πληροφόρησης και είναι γνωστός ως θεωρία σχεδίασης μηχανισμών (mechanism design theory).

Στη σημερινή εποχή, η θεωρία παιγνίων αποτελεί ένα ευρέως αναγνωρισμένο μαθηματικό εργαλείο, το οποίο χρησιμοποιείται σε πολλά πεδία όπως στις κοινωνικές επιστήμες, στη βιολογία, στις επιστήμες μηχανικών καθώς και στην επιστήμη των υπολογιστών. Όσον αφορά την εφαρμογή της θεωρίας παιγνίων σε προβλήματα που αφορούν τις τηλεπικοινωνίες, η πρώτη αναφορά γίνεται το 1952 από τον Benoit Mandelbrot. Παρόλα αυτά, η θεωρία παιγνίων ξεκίνησε να χρησιμοποιείται ευρέως

στην περιοχή των ασύρματων τηλεπικοινωνιών, με έμφαση στο πρόβλημα της διαχείριση ραδιοπόρων, κυρίως κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας.

Η μεγάλη σημασία της θεωρίας παιγνίων καθώς και η αποδοτική χρήση της σε διάφορα επιστημονικά πεδία γίνεται μέχρι και σήμερα εμφανής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η απονομή του πρόσφατου βραβείου Νόμπελ 2012 στους L. Shapley και A. Roth για τη θεωρία των σταθερών κατανομών και την εφαρμογή της στη σχεδίαση αγοράς. Το βραβείο αυτό αποδεικνύει ότι η αξία της θεωρίας παιγνίων δεν οφείλεται μόνο στα θεωρητικά αποτελέσματα αλλά στην άμεση πρακτική εφαρμογή τους σε προβλήματα του πραγματικού κόσμου.

### 3.2.2 Γενικά στοιχεία θεωρίας παιγνίων

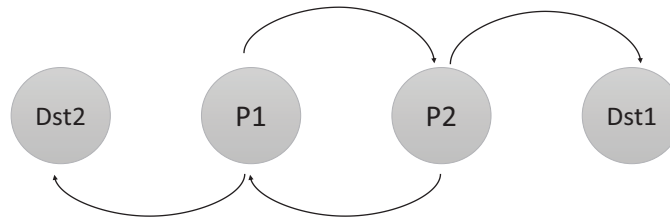
#### Ορισμός θεωρίας παιγνίων & Βασικές μορφές αναπαράστασεων

Όπως προαναφέρθηκε, η θεωρία παιγνίων αποτελεί ένα κλάδο των εφαρμοσμένων μαθηματικών που ασχολείται με την ανάλυση αλληλεπιδραστικών διαδικασιών λήψης απόφασης. Πιο συγκεκριμένα, η ουσία της θεωρίας παιγνίων είναι η μελέτη των αλληλεπιδράσεων ανάμεσα σε διάφορες οντότητες που πρέπει να λάβουν μια απόφαση και έχουν αντικρουόμενα ή κοινά συμφέροντα (Osborne & Rubinstein, 1994), (Fudenberg & Tirole, 1991). Ο όρος «αλληλεπιδράσεις» χρησιμοποιείται ουσιαστικά για να τονιστεί ότι οι αποφάσεις της κάθε οντότητας δεν επηρεάζουν μόνο την ίδια αλλά ολόκληρο το σύνολο των οντοτήτων. Το γεγονός αυτό είναι ουσιαστικά που διαφοροποιεί τη θεωρία παιγνίων από την κλασική θεωρία βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, όπως αναλύεται στην προηγούμενη ενότητα, ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης αναφέρεται σε μια μοναδική οντότητα, η οποία θέλει να βελτιστοποιήσει την απόδοση της υπό κάποιους περιορισμούς. Αντίθετα, ένα παίγνιο αναφέρεται σε ένα σύνολο οντοτήτων στο οποίο η κάθε οντότητα θα πρέπει να λάβει μια απόφαση για τη δική της στρατηγική έτσι ώστε να βελτιστοποιήσει την απόδοση της, επηρεάζοντας όμως ταυτόχρονα και τις αποφάσεις των υπόλοιπων οντοτήτων. Επομένως, η καθολική βέλτιστη στρατηγική σε ένα παίγνιο δεν είναι πάντα σαφής καθώς περιλαμβάνεται ένας μεγάλος αριθμός οντοτήτων που ελέγχει το τελικό αποτέλεσμα και όχι μια μοναδική οντότητα. Για το λόγο αυτό, η θεωρία παιγνίων κατέχει τα δικά της εργαλεία και έννοιες, οι οποίες προέρχονται από διαφορετικές περιοχές όπως οι οικονομικές επιστήμες, η βιολογία και η επιστήμη των υπολογιστών. Επιγραμματικά, οι βασικοί στόχοι της εφαρμογής της θεωρίας παιγνίων είναι οι εξής:

1. Η μοντελοποίηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των παικτών.
2. Ο ορισμός διαφορετικών τύπων αποτελέσματος για την υπο μελέτη περίπτωση.
3. Η πρόβλεψη της λύσης ενός παιγνίου για δεδομένες υποθέσεις πληροφορίας.
4. Ο χαρακτηρισμός όλων των πιθανών αποτελεσμάτων ενός παιγνίου.
5. Ο σχεδιασμός των βέλτιστων στρατηγικών προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Συνεπώς, η θεωρία παιγνίων αποτελεί ουσιαστικά ένα μαθηματικό ορισμό των παιγνίων. Ο ορισμός αυτός, όμως, εξαρτάται άμεσα από τη μορφή αναπαράστασης του παιγνίου που θεωρείται. Για το λόγο αυτό, πριν την παρουσίαση των βασικών εννοιών της θεωρίας παιγνίων, θεωρείται απαραίτητη η περιγραφή των πιθανών μορφών αναπαράστασης ενός παιγνίου.

Σε γενικές γραμμές, χρησιμοποιούνται δύο βασικές μορφές αναπαράστασης ενός παιγνίου: η κανονική (ή στρατηγική) μορφή και η εκτεταμένη μορφή αναπαράστασης του παιγνίου. Στη συνέχεια,



Σχήμα 3.1: Δίλημμα του προωθητή

περιγράφεται αρχικά η κανονική μορφή αναπαράστασης, δίνοντας έμφαση στην αναπαράσταση πίνακα, ενώ έπειτα παρουσιάζεται η εκτεταμένη μορφή αναπαράστασης ενός παιγνίου.

### Κανονική μορφή αναπαράστασης

Ένα παίγνιο κανονικής μορφής περιέχει ουσιαστικά τρεις βασικές συνιστώσες: το σύνολο των παικτών, τις στρατηγικές τους και τις συναρτήσεις χρησιμότητας τους. Πιο αναλυτικά, ένα παίγνιο ορίζεται από την τριάδα  $G = \langle K, \{S_i\}_{i \in K}, \{U_i\}_{i \in K} \rangle$  όπου το  $K = \{1, \dots, K\}$  αποτελεί το σύνολο των παικτών που συμμετέχουν στο παίγνιο,  $S_i$  είναι το σύνολο των στρατηγικών του παίκτη  $i$  και  $U_i$  είναι η συνάρτηση χρησιμότητας του παίκτη  $i$ . Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι μια βασική υπόθεση που γίνεται στη θεωρία παιγνίων είναι ότι οι παίκτες αποτελούν λογικούς πράκτορες, με την έννοια ότι ο κάθε παίκτης επιθυμεί να βελτιστοποιήσει την χρησιμότητα του. Αντίστοιχα με το εκάστοτε παίγνιο, η συνάρτηση χρησιμότητας  $U_i$  μπορεί να αναπαριστά είτε τη συνάρτηση ανταμοιβής, είτε τη συνάρτηση κόστους κάθε παίκτη. Η κανονική μορφή αποτελεί την πιο συνηθισμένη αναπαράσταση παιγνίων στις τηλεπικοινωνίες καθώς είναι περισσότερο εύχρηστη για μαθηματική ανάλυση και μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε σύνολα διακριτών όσο και συνεχών μεταβλητών. Επιπλέον, σε περίπτωση που ο αριθμός των παικτών και των στρατηγικών τους είναι περιορισμένος, μια πρακτική αναπαράσταση ενός παιγνίου κανονικής μορφής είναι η αναπαράσταση σε πίνακα.

Στην κατηγορία παιγνίων κανονικής μορφής ανήκει το ευρέως γνωστό δίλημμα του φυλακισμένου (Rapoport & Chammah, 1965). Ένα αντίστοιχο παίγνιο στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες αποτελεί το δίλημμα του προωθητή (forwarder's dilemma) (Felegyhazi & Hubaux, 2006). Σε αυτό το παίγνιο, δύο κόμβοι-πηγές αποτελούν τους παίκτες. Κάθε κόμβος πηγή προσπαθεί να στείλει ένα πακέτο στον αντίστοιχο κόμβο-προορισμό του χρησιμοποιώντας τον άλλο κόμβο-πηγή σαν προωθητή του πακέτου, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3.1. Υποθέτεται ότι η επικοινωνία ανάμεσα στον κόμβο-πηγή και τον αντίστοιχο κόμβο-προορισμό είναι εφικτή μόνο αν ο άλλος παίκτης προωθήσει το πακέτο του. Κάθε κόμβο-πηγή μπορεί να αποφασίσει αν θα προωθήσει το πακέτο του άλλου παίκτη (Π) ή θα το απορρίψει (Α). Η χρησιμότητα κάθε παίκτη μπορεί να θεωρηθεί ίση με το κέρδος του μείον το κόστος του για την κάθε στρατηγική. Το κέρδος κάθε παίκτη θεωρείται ίσο με 1 ή 0, αν αντίστοιχα το πακέτο προωθηθεί ή όχι στον προορισμό του, ενώ το κόστος μετάδοσης λαμβάνεται ίσο με μια σταθερά  $c > 0$ . Το δίλημμα του κάθε παίκτη είναι το εξής: κάθε κόμβος - πηγή θα προτιμούσε να απορρίψει το πακέτο του άλλου παίκτη ώστε να εξοικονομήσει τους πόρους του, αλλά αν ο άλλος παίκτης ακολουθήσει την ίδια λογική τότε το πακέτο του πρώτου παίκτη δεν θα φτάσει στον προορισμό του. Στο σχήμα 3.2 απεικονίζεται η αναπαράσταση σε πίνακα του συγκεκριμένου παιγνίου. Σε αυτόν τον πίνακα, ο πρώτος παίκτης αντιστοιχεί στη γραμμή του πίνακα ενώ ο δεύτερος παίκτης αντιστοιχεί στη στήλη. Κάθε κελί του πίνακα αντιστοιχεί σε ένα πιθανό συνδυασμό των στρατηγικών

		P2	
		Πρώθηση	Απόρριψη
P1	Πρώθηση	(1-c,1-c)	(-c,1)
	Απόρριψη	(1,-c)	(0,0)

Σχήμα 3.2: Μορφή πίνακα για το δίλημμα του προωθητή

των παικτών και περιέχει ένα ζεύγος τιμών που αντιπροσωπεύει τις χρησιμότητες του παίκτη 1 και του παίκτη 2, αντίστοιχα. Προκειμένου να λυθεί το παραπάνω παίγνιο, συνήθως χρησιμοποιείται η μέθοδος της αυστηρής κυριαρχίας. Θεωρητικά, όπως αναφέρεται και παρακάτω, μια στρατηγική  $s'_i$  κυριαρχείται αυστηρά μιας άλλης στρατηγικής  $s_i$  αν οδηγεί σε μικρότερη χρησιμότητα του παίκτη  $i$  ανεξάρτητα από τις στρατηγικές των υπολοίπων παικτών. Παρατηρώντας το παίγνιο από την σκοπιά του παίκτη 1, είναι εμφανές ότι η στρατηγική Π κυριαρχείται αυστηρά από την στρατηγική Α, επομένως ένας λογικός παίκτης δεν θα επιλέξει ποτέ την στρατηγική Π. Η ίδια παρατήρηση ισχύει και για τον παίκτη 2, με αποτέλεσμα η λύση του παιγνίου να είναι (Α,Α) και οι χρησιμότητες των δύο παικτών να είναι μηδενικές. Το γεγονός αυτό μοιάζει παράδοξο δεδομένου ότι αν οι παίκτες είχαν επιλέξει τον συνδυασμό (Π,Π) θα είχαν και οι δύο υψηλότερες χρησιμότητες. Παρόλα αυτά η έλλειψη εμπιστοσύνης και επικοινωνίας οδηγεί σε μια μη βέλτιστη λύση, όπως γίνεται στα περισσότερα παίγνια.

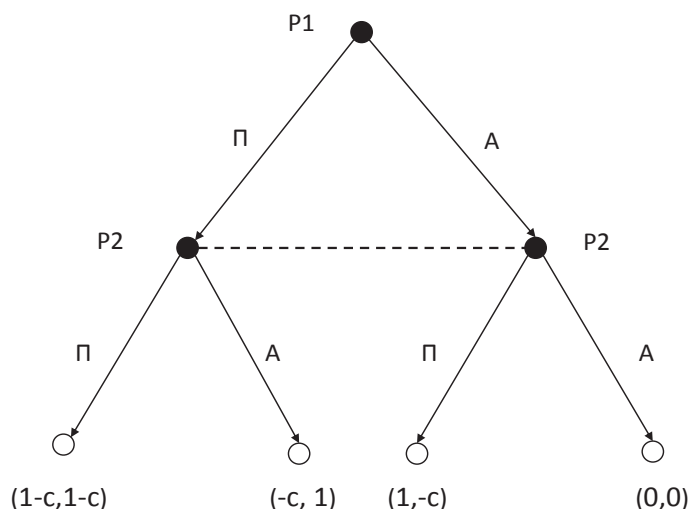
### Εκτεταμένη μορφή αναπαράστασης

Το βασικό στοιχείο της εκτεταμένης μορφής ενός παιγνίου είναι η μορφή δένδρου. Η μορφή αυτή είναι πολύ χρήσιμη κυρίως σε παίγνια που οι παίκτες παίζουν ακολουθιακά. Συγκεκριμένα, ένα παίγνιο σε εκτεταμένη μορφή αναπαρίσταται σαν ένα δένδρο, όπου η ρίζα του δένδρου είναι η αρχή του παιγνίου και απεικονίζεται με ένα κενό κύκλο. Το κάθε επίπεδο του δένδρου αναφέρεται σαν στάδιο του παιγνίου. Οι κόμβοι του δένδρου δείχνουν την πιθανή εξέλιξη του παιγνίου απεικονίζοντας την ακολουθιακή σχέση των κινήσεων των παικτών. Αυτή η ακολουθία των κινήσεων αναφέρεται ως ιστορικό του παιγνίου. Κάθε φύλλο του δένδρου (τερματικός κόμβος) αποτελεί ένα πιθανό αποτέλεσμα του παιγνίου και απεικονίζει τις αντίστοιχες χρησιμότητες. Συγκεκριμένα, ένα παίγνιο αναλυτικής μορφής ορίζεται από την εξάδα:  $G = \langle K, V, v_{root}, \pi, \{V_i\}_{i \in K}, U \rangle$  όπου  $K = \{1, \dots, K\}$  είναι το σύνολο των παικτών, η τριάδα  $\langle V, v_{root}, \pi \rangle$  αποτελεί ένα δένδρο με σύνολο κόμβων  $V$ , ρίζα ίση με  $v_{root}$  και δημιουργό συνάρτηση ίση με  $\pi$ , ενώ  $\{V_i\}_{i \in K}$  είναι ένα μέρος του δένδρου και  $U$  είναι το σύνολο των συναρτήσεων χρησιμότητας.

Η συγκεκριμένη μορφή είναι πιο εύχρηστη για κάποιες κατηγορίες παιγνίων. Παρόλα αυτά κάθε παίγνιο σε εκτεταμένη μορφή μπορεί να μετατραπεί σε ένα παίγνιο σε στρατηγική μορφή και αντίστροφα. Στο σχήμα 3.3, απεικονίζεται το δίλημμα του προωθητή ως παίγνιο εκτεταμένης μορφής. Το βασικό χαρακτηριστικό σε αυτήν την περίπτωση είναι ότι το παίγνιο παίζεται ταυτόχρονα και για τους δύο παίκτες, το οποίο στην εκτεταμένη μορφή, απεικονίζεται από την διακεκομμένη γραμμή που ενώνει τους κόμβους στο πρώτο επίπεδο.

Όπως είναι εμφανές, κάθε μορφή αναπαράστασης έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Συγκεκριμένα, ενώ η κανονική αναπαράσταση ενός παιγνίου είναι πιο εύχρηστη για τη μαθηματική ανάλυση του παιγνίου, η εκτεταμένη αναπαράσταση είναι πιο πλήρης και περισσότερο





Σχήμα 3.3: Εκτεταμένη μορφή για το δίλημμα του προωθητή

διασθητική επιτρέποντας να γίνει πιο κατανοητό το παίγνιο.

### Κατηγοριοποίηση παιγνίων

Εκτός από τις διαφορετικές μορφές αναπαράστασης ενός παιγνίου, σημαντικό ρόλο στην ανάλυση του παίζει και η αναγνώριση της κατηγορίας στην οποία ανήκει. Για το λόγο αυτό, στη συνέχεια περιγράφονται συνοπτικά ορισμένες βασικές κατηγορίες παιγνίων καθώς και τα βασικά χαρακτηριστικά της κάθε κατηγορίας.

*Στατικά/Δυναμικά Παιγνια:* Η βασική διαφορά των δύο αυτών κατηγοριών είναι ότι στα δυναμικά παίγνια, οι παίκτες μπορούν να εξάγουν κάποια πληροφόρηση από προηγούμενες στρατηγικές και να την λάβουν υπόψιν τους προκειμένου να προσαρμόσουν τις παρούσες ή τις μελλοντικές κινήσεις τους. Αντίθετα στα στατικά παίγνια, οι παίκτες έχουν συγκεκριμένη γνώση η οποία δεν μεταβάλλεται.

*Στοχαστικά/μη στοχαστικά παίγνια:* Ένα από τα βασικά συστατικά των στοχαστικών παιγνίων είναι η ύπαρξη μιας κατάστασης στο παίγνιο η οποία εξελίσσεται (συνήθως στο χρόνο και σύμφωνα με ένα συγκεκριμένο στοχαστικό κανόνα). Ειδική κατηγορία των παιγνίων αυτών αποτελούν και τα επαναλαμβανόμενα παίγνια, στα οποία το ίδιο στατικό παίγνιο επαναλαμβάνεται στο χρόνο.

*Συνεργατικά/μη συνεργατικά παίγνια:* Η βασική διαφορά ανάμεσα στις δύο αυτές κατηγορίες είναι ότι στα μη συνεργατικά παίγνια οι στόχοι και οι στρατηγικές κάθε παίκτη μπορούν να διαχωριστούν, κάτι το οποίο δεν είναι πάντα εφικτό στα συνεργατικά παίγνια. Παρόλα αυτά θα πρέπει να τονιστεί ότι συνεργασία μεταξύ των παικτών μπορεί να υπάρξει και στην περίπτωση των μη συνεργατικών παιγνίων καθιστώντας δύσκολο τον διαχωρισμό μεταξύ των δυο αυτών κατηγοριών.

*Παιγνια πλήρους/μη πλήρους πληροφόρησης:* Στα παίγνια πλήρους πληροφόρησης, θεωρείται ότι τα δεδομένα του παιγνίου (όπως για παράδειγμα οι διαθέσιμες στρατηγικές κάθε παίκτη καθώς και οι συναρτήσεις χρησιμότητας τους) είναι γνωστά σε όλους τους παίκτες. Από την άλλη μεριά, στα παίγνια μη πλήρους πληροφόρησης (γνωστά και ως μπευζιανά παίγνια), οι παίκτες διαθέτουν μόνο μερική πληροφόρηση για το παίγνιο (Dekel et al., 2004).

*Παίγνια τέλειας/ατελούς πληροφόρησης:* Η βασική διαφορά ανάμεσα στις δύο συγκεκριμένες κατηγορίες είναι η γνώση του ιστορικού ενός παιγνίου. Πιο συγκεκριμένα, όταν όλοι οι παίκτες γνωρίζουν τέλεια το παρελθόν του παιγνίου, τότε αναφερόμαστε σε παίγνια τέλειας πληροφόρησης ενώ στην αντίθετη περίπτωση αναφερόμαστε σε παίγνια ατελούς πληροφόρησης. Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να τονιστεί ότι η ορολογία που χρησιμοποιείται στη θεωρία παιγνίων διαφέρει με αυτήν που χρησιμοποιείται συνήθως στις τηλεπικοινωνίες. Συγκεκριμένα, ενώ ο όρος «ατελής» στις τηλεπικοινωνίες αναφέρεται στην περίπτωση που μια ποσότητα δεν είναι πλήρως γνωστή (π.χ. στην περίπτωση της ατελούς γνώσης καναλιού), στην θεωρία παιγνίων ο όρος αυτός αναφέρεται αποκλειστικά στην έλλειψη γνώσης του ιστορικού του παιγνίου. Επομένως, τα τηλεπικοινωνιακά προβλήματα στα οποία κάποιες ποσότητες δεν είναι γνωστές και χρησιμοποιούνται εκτιμήσεις τους, ανήκουν στην κατηγορία των παιγνίων μη πλήρους πληροφόρησης και όχι ατελούς πληροφόρησης.

*Παίγνια μηδενικού αθροίσματος/μη μηδενικού αθροίσματος:* Τα παίγνια στα οποία το άθροισμα των χρησιμοτήτων των παικτών είναι μηδενικό (ή μια σταθερά) αναφέρονται σαν παίγνια μηδενικού (ή σταθερού) αθροίσματος. Η βασική ιδέα σε αυτά τα παίγνια είναι ότι όταν ένας παίκτης κερδίζει κάτι κάποιος άλλος παίκτης πρέπει οπωσδήποτε να χάσει κάτι.

### 3.2.3 Μη συνεργατική θεωρία παιγνίων

Στη συγκεκριμένη ενότητα, δίνεται έμφαση στη μη συνεργατική θεωρία παιγνίων και περιγράφονται κάποιες βασικές έννοιες και θεωρήματα που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο της ΔΔ.

#### Βασικές έννοιες θεωρίας παιγνίων

Αρχικά, περιγράφονται κάποιες βασικές έννοιες της θεωρίας παιγνίων οι οποίες είναι απαραίτητες για την κατανόηση της μοντελοποίησης ενός προβλήματος ως παίγνιο καθώς και για την επίλυση του. Όπως αναφέρεται σε προηγούμενη ενότητα, μια από τις πιο βασικές έννοιες της θεωρίας παιγνίων είναι η έννοια της ισορροπίας κατά Nash. Ωστόσο πριν δοθεί ο απαραίτητος ορισμός για την ισορροπία Nash, θα πρέπει αρχικά να οριστούν κάποιες άλλες βασικές έννοιες που χρησιμοποιούνται στη θεωρία παιγνίων.

Από τον ορισμό ενός κανονικού παιγνίου, ισχύει ότι για κάθε παίκτη  $i$ , το στοιχείο  $s_i$  αποτελεί τη στρατηγική του, ενώ ο όρος  $s_{-i} = \{s_1, \dots, s_{-i-1}, s_{-i+1}, \dots, s_K\}$  απεικονίζει το διάνυσμα των στρατηγικών όλων των υπολοίπων παικτών. Επιπλέον, ο όρος  $s = (s_i, s_{-i})$  αναφέρεται ως προφίλ στρατηγικών. Σε περίπτωση που τα σύνολα των στρατηγικών  $S_i$  είναι πεπερασμένα για κάθε  $i \in K$ , τότε το παίγνιο ονομάζεται πεπερασμένο παίγνιο. Σε γενικές γραμμές, ισχύει ότι σε ένα παίγνιο κανονικής μορφής, κάθε παίκτης επιλέγει μια στρατηγική έτσι ώστε να βελτιστοποιήσει τη συνάρτηση χρησιμότητας του. Στην περίπτωση που κάθε παίκτης επιλέγει μια στρατηγική με ντετερμινιστικό τρόπο (πιθανότητα ίση με 1), τότε η στρατηγική αναφέρεται ως αμιγής στρατηγική, ενώ στην αντίθετη περίπτωση αναφέρεται ως μεικτή στρατηγική. Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να τονιστεί ότι στη συνέχεια της ενότητας, θα γίνεται αναφορά κυρίως σε αμιγείς στρατηγικές, εκτός αν αναφέρεται το αντίθετο.

Μια χρήσιμη έννοια για την επίλυση μη συνεργατικών παιγνίων είναι η έννοια της κυρίαρχης στρατηγικής. Όπως φαίνεται στο παράδειγμα του διλήμματος του προωθητή, η χρήση της συγκεκριμένης έννοιας απλοποιεί τη λύση του παιγνίου αποκλείοντας κάποιες στρατηγικές. Ουσιαστικά, μια κυρίαρχη στρατηγική ενός παίκτη είναι η στρατηγική που οδηγεί στην υψηλότερη χρησιμότητα για το συγκεκριμένο παίκτη ανεξάρτητα των στρατηγικών που θα επιλέξουν οι υπόλοιποι παίκτες. Μαθηματικά, μια κυρίαρχη στρατηγική ορίζεται ως εξής:

**Ορισμός 3.1.** Έστω ένα παίγνιο στρατηγικής μορφής  $G = \langle K, \{S_i\}_{i \in K}, \{U_i\}_{i \in K} \rangle$ . Η στρατηγική  $\hat{s}_i$  είναι μια κυρίαρχη στρατηγική για τον παίκτη  $i$  αν :  $\forall s_{-i} \in S_{-i}$  και  $\forall s_i \in S_i$  ισχύει ότι  $U_i(\hat{s}_i, s_{-i}) \geq U_i(s_i, s_{-i})$ .

Ένα βασικό μέτρο της αποδοτικότητας ενός παιγνίου αποτελεί η έννοια της κατά Pareto κυριαρχίας, η οποία ορίζεται στη συνέχεια.

**Ορισμός 3.2.** Ένα προφίλ στρατηγικών  $s \in S$  θεωρείται ότι κυριαρχεί κατά Pareto το προφίλ  $s' \in S$ , αν για κάθε παίκτη  $i \in K$  ισχύει  $U_i(s) \geq U_i(s')$ , με αυστηρή ανισότητα για τουλάχιστον ένα παίκτη.

Αυτό σημαίνει ουσιαστικά ότι αποκλίνοντας από ένα προφίλ στρατηγικών που είναι κατά Pareto βέλτιστο, θα μειωθεί η χρησιμότητα τουλάχιστον ενός παίκτη. Ωστόσο, θα πρέπει να αναφερθεί ότι ένα προφίλ στρατηγικών που είναι βέλτιστο κατά Pareto, δεν είναι απαραίτητα το βέλτιστο προφίλ όσον αφορά τη συνολική χρησιμότητα των παικτών.

Τέλος, μια βασική έννοια η οποία είναι απαραίτητη για τον ορισμό της ισορροπίας Nash είναι η έννοια της βέλτιστης απόκρισης ενός παίκτη, δεδομένων των στρατηγικών των υπολοίπων παικτών. Μαθηματικά, η συνάρτηση της βέλτιστης απόκρισης ορίζεται ως εξής :

**Ορισμός 3.3.** Η συνάρτηση βέλτιστης απόκρισης (best response-BR ) του παίκτη  $i$ , δεδομένου του προφίλ στρατηγικών  $s_{-i}$ , είναι το σύνολο των στρατηγικών αυτού του παίκτη για το οποίο ισχύει :

$$BR_i(s_{-i}) = \{s_i \in S_i | U_i(s_i, s_{-i}) \geq U_i(s'_i, s_{-i}), \forall s'_i \in S_i\} = \arg \max_{s_i \in S_i} U_i(s_i, s_{-i}) \quad (3.10)$$

Έχοντας ορίσει τις απαραίτητες έννοιες, μια ισορροπία κατά Nash θεωρείται μια κατάσταση ενός μη συνεργατικού παιγνίου κατά την οποία κανένας παίκτης δεν μπορεί να βελτιώσει τη χρησιμότητα του αλλάζοντας τη στρατηγική του, δεδομένου ότι οι άλλοι παίκτες διατηρούν αμετάβλητες τις στρατηγικές τους. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση των αμιγών στρατηγικών, ο μαθηματικός ορισμός της ισορροπίας Nash είναι ο εξής (J. Nash, 1950):

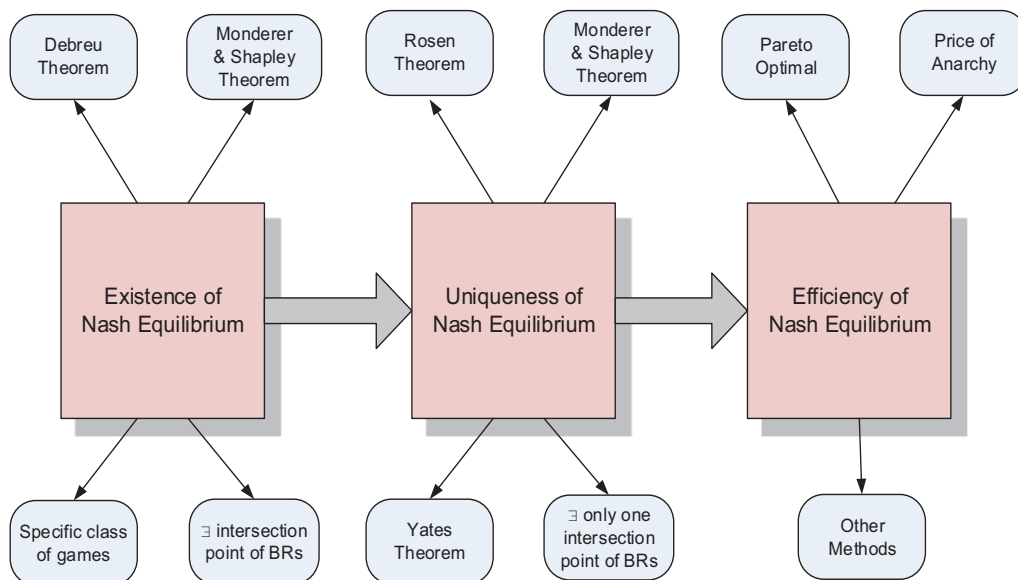
**Ορισμός 3.4.** Έστω  $S = S_1 \times S_2 \times \dots \times S_K$  και  $U_i : S \rightarrow \mathbb{R}, i \in K$ . Το διάνυσμα αποτελεί μια ισορροπία Nash αν για  $\forall i \in K$  και  $\forall s_i \in S_i$  ισχύει ότι  $U_i(s_i^*, s_{-i}^*) \geq U_i(s_i, s_{-i}^*)$ .

Η φυσική ερμηνεία της ισορροπίας Nash είναι ότι αποτελεί ένα προφίλ στρατηγικών από το οποίο κανένας χρήστης δεν έχει όφελος να αποκλίνει. Επιπλέον, ένας διαφορετικός ορισμός της ισορροπίας Nash που βασίζεται στην έννοια της συνάρτησης βέλτιστης απόκρισης είναι ο ακόλουθος :

**Ορισμός 3.5.** Έστω  $G = \langle K, \{S_i\}_{i \in K}, \{U_i\}_{i \in K} \rangle$  ένα παίγνιο κανονικής μορφής. Τότε ένα προφίλ στρατηγικών  $s^*$  αποτελεί ισορροπία κατά Nash, αν  $s^* \in BR(s^*)$ .

### Βασικά θεωρήματα μη συνεργατικής θεωρίας παιγνίων

Έχοντας ορίσει την ισορροπία Nash ενός μη συνεργατικού παιγνίου, κάποια βασικά ερωτήματα που προκύπτουν είναι κατά πόσο το συγκεκριμένο παίγνιο έχει ισορροπία Nash, ο αριθμός των ισορροπιών που μπορεί να έχει καθώς και η βελτιστότητα των ισορροπιών αυτών. Όσον αφορά την περίπτωση των αμιγών στρατηγικών, ένα παίγνιο μπορεί να έχει μηδέν, μία ή πολλαπλές ισορροπίες Nash, οι οποίες όμως δεν είναι απαραίτητα οι βέλτιστες στρατηγικές ως προς τη χρησιμότητα των παικτών. Επομένως, η απόδειξη ύπαρξης και μοναδικότητας της ισορροπίας αποτελούν αρχικά, τα



Σχήμα 3.4: Μεθοδολογία ανάλυσης ισορροπιών Nash ενός παιγνίου

πρώτα βήματα για τη μελέτη ενός παιγνίου. Για το λόγο αυτό, στη συγκεκριμένη υποενότητα παρουσιάζονται κάποια βασικά θεωρήματα που περιγράφουν τις συνθήκες για την εξασφάλιση μοναδικής ισορροπίας σε ένα παίγνιο ενώ επίσης προτείνονται ορισμένοι βασικοί τρόποι μελέτης της απόδοσης της ισορροπίας Nash.

Η απόδειξη της ύπαρξης ισορροπίας Nash σε ένα παίγνιο είναι αντίστοιχη με την απόδειξη ύπαρξης λύσης σε ένα πρόβλημα σταθερού σημείου (fixed point). Για το λόγο αυτό, τα θεωρήματα για την απόδειξη του σημείου ισορροπίας βασίζονται κυρίως στις τοπολογικές ιδιότητες του συνόλου των στρατηγικών των παικτών, καθώς και στις τοπολογικές και γεωμετρικές ιδιότητες των συναρτήσεων χρησιμότητας τους. Ένα πολύ χρήσιμο θεώρημα από την συνεισφορά των Debreu, Fan και Glicksberg είναι το ακόλουθο (Debreu, 1952) :

**Θεώρημα 3.2.** (Debreu): Έστω  $G$  ένα παίγνιο σε κανονική μορφή. Αν  $\forall i \in K, S_i$  είναι ένα συμπαγές και κυρτό σύνολο και  $U_i(s)$  είναι μια συνεχής συνάρτηση ως προς το προφίλ των στρατηγικών  $s$  και ημι-κοίλη ως προς το  $s_i$ , τότε το παίγνιο  $G$  έχει τουλάχιστον μια αμιγή ισορροπία Nash.

Μια ειδική περίπτωση αυτού του θεωρήματος αντιστοιχεί στην περίπτωση που οι συναρτήσεις χρησιμότητας είναι κοίλες, καταλήγοντας στο θεώρημα του Rosen (Rosen, 1965) για κοίλα παίγνια  $K$ -ατόμων.

Εκτός από το συγκεκριμένο θεώρημα, έχουν αποδειχτεί αρκετά θεωρήματα για την ύπαρξη ισορροπίας Nash, όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 3.4, για διάφορα είδη παιγνίων. Συγκεκριμένα, μια χρήσιμη κατηγορία παιγνίων με σημαντικές ιδιότητες αποτελούν τα παίγνια δυναμικού (potential games) (Monderer & Shapley, 1996). Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα παίγνια για τα οποία υπάρχει μια συνάρτηση δυναμικού  $\varphi$  τέτοια ώστε να ισχύει  $U_i(s) - U_i(s'_i, s_{-i}) > 0 \Leftrightarrow \varphi(s) - \varphi(s'_i, s_{-i}) > 0$ , για  $\forall i \in K, \forall s \in S, \forall s'_i \in S_i$ . Αναλυτικότερα, για τα παίγνια δυναμικού, όπως αποδείχτηκε από

τους Monderer-Shapley-Voorneveld ισχύει το ακόλουθο θεώρημα ύπαρξης ισορροπίας Nash.

**Θεώρημα 3.3.** (Monderer & Shapley): *Αν το  $G$  αποτελεί ένα παίγνιο δυναμικού με πεπερασμένο αριθμό παικτών και είτε μη κενά, συμπαγή σύνολα στρατηγικών και συνεχείς συναρτήσεις χρησιμότητας, είτε πεπερασμένα μη κενά σύνολα στρατηγικών, τότε το συγκεκριμένο παίγνιο έχει τουλάχιστον μία ισορροπία Nash.*

Εκτός από τα παίγνια δυναμικού, υπάρχουν και άλλες κατηγορίες παιγνίων για τις οποίες αποδεικνύεται ότι έχουν πάντα ισορροπία Nash. Σε αυτές τις κατηγορίες ανήκουν τα S-μηματικά παίγνια (S-modular games) (Topkis, 1979), τα παίγνια συντονισμού (coordination games) καθώς και τα ομαδικά παίγνια (team games). Για μια πιο λεπτομερή μελέτη των θεωρημάτων αυτών, οι αναγνώστες παραπέμπονται στις αναφορές (Lasaulce, Debbah, & Altman, 2009), (Lasaulce & Tembine, 2011) και (Han et al., 2011). Σε περίπτωση που το παίγνιο υπό μελέτη είτε δεν ικανοποιεί κάποιο από τα παραπάνω θεωρήματα, είτε δεν ανήκει σε κάποια κατηγορία παιγνίων που έχουν ισορροπία, ένας εναλλακτικός τρόπος απόδειξης της ύπαρξης ισορροπίας είναι η μελέτη των σημείων τομής των συναρτήσεων βέλτιστης απόκρισης για το συγκεκριμένο παίγνιο. Αν αποδεικνύεται ότι υπάρχει τουλάχιστον ένα σημείο τομής μεταξύ τους, τότε αποδεικνύεται έμμεσα ότι το παίγνιο έχει τουλάχιστον μία ισορροπία κατά Nash.

Το επόμενο βήμα στη μελέτη ενός παιγνίου είναι η απάντηση στο ερώτημα κατά πόσο έχει μοναδική ισορροπία. Τα θεωρήματα που αφορούν τη μοναδικότητα της ισορροπίας Nash μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το αν είναι εφικτή η αναλυτική έκφραση της συνάρτησης βέλτιστης απόκρισης των παικτών. Στην περίπτωση που η συνάρτηση χρησιμότητας είναι αρκετά πολύπλοκη, με αποτέλεσμα η βέλτιστη απόκριση του κάθε χρήστη να μην μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά ως μια συνάρτηση, το βασικό θεώρημα που χρησιμοποιείται είναι το θεώρημα του Rosen (1965) για παίγνια με κοίλες συναρτήσεις χρησιμότητας (Rosen, 1965).

**Θεώρημα 3.4.** (Rosen): *Έστω  $G$  ένα παίγνιο σε κανονική μορφή. Θεωρείται ότι  $\forall i \in K, S_i$  είναι ένα μη κενό, συμπαγές και κυρτό σύνολο και  $U_i(\mathbf{s})$  είναι μια συνεχής συνάρτηση ως προς το προφίλ των στρατηγικών  $\mathbf{s}$  και κοίλη ως προς την στρατηγική  $s_i$ . Έστω  $\mathbf{r} = (r_1, \dots, r_K)$  ένα αυθαίρετο διάνυσμα σταθερών θετικών παραμέτρων. Ορίζεται η ψευδο-παράγωγος (pseudogradient) της συνάρτησης  $w_{\mathbf{r}} = \mathbf{r} \times \mathbf{U}^T$  ως  $\gamma_{w_{\mathbf{r}}}(\mathbf{s}) = \left[ r_1 \frac{\partial U_1}{\partial s_1}, \dots, r_K \frac{\partial U_K}{\partial s_K} \right]^T$ . Αν για κάποιο  $\mathbf{r} > \mathbf{0}$ , ισχύει η ακόλουθη συνθήκη:  $(\mathbf{s} - \mathbf{s}') (\gamma_{w_{\mathbf{r}}}(\mathbf{s}') - \gamma_{w_{\mathbf{r}}}(\mathbf{s}))^T > 0, \forall (\mathbf{s}, \mathbf{s}') \in S^2, \mathbf{s} \neq \mathbf{s}'$ , τότε το παίγνιο  $G$  έχει μοναδική ισορροπία Nash.*

Επιπλέον, ένα χρήσιμο θεώρημα για την απόδειξη της μοναδικότητας της ισορροπίας Nash είναι και το ακόλουθο που αφορά τα παίγνια δυναμικού (Monderer & Shapley, 1996).

**Θεώρημα 3.5.** (Monderer & Shapley): *Έστω  $G$  ένα παίγνιο δυναμικού. Αν το σύνολο στρατηγικών των παικτών είναι μη κενό, συμπαγές και κυρτό και η συνάρτηση δυναμικού του παιγνίου είναι αυστηρώς κοίλη, τότε το παίγνιο έχει μοναδική ισορροπία Nash.*

Σε περίπτωση που η συνάρτηση βέλτιστης απόκρισης κάθε χρήστη μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά ως μια συνάρτηση, τότε η μοναδικότητα της ισορροπίας μπορεί να αποδειχτεί αναλύοντας τα χαρακτηριστικά της συνάρτησης αυτής και αποδεικνύοντας ότι αποτελεί μια τυπική συνάρτηση. Στη συνέχεια, δίνεται αρχικά ο ορισμός της τυπικής συνάρτησης και ακολουθεί το αντίστοιχο θεώρημα (Yates, 1995).

**Ορισμός 3.6.** Μια διανυσματική συνάρτηση  $g : \mathbb{R}_+^K \rightarrow \mathbb{R}_+^K$  ονομάζεται τυπική συνάρτηση, αν ικανοποιεί τις ακόλουθες δύο ιδιότητες :

- Μονοτονία:  $\forall (\mathbf{x}, \mathbf{x}') \in \mathbb{R}_+^{2K}, \mathbf{x} \leq \mathbf{x}' \Rightarrow g(\mathbf{x}) \leq g(\mathbf{x}')$
- Κλιμάκωση:  $\forall a > 1, \forall \mathbf{x} \in \mathbb{R}_+^K, g(a\mathbf{x}) < ag(\mathbf{x})$

**Θεώρημα 3.6.** (Yates ): *Αν οι συναρτήσεις βέλτιστης απόκρισης σε ένα παίγνιο κανονικής μορφής  $G$  αποτελούν τυπικές συναρτήσεις, τότε το παίγνιο έχει μοναδική ισορροπία Nash .*

Έχοντας επαληθεύσει την ύπαρξη και τον αριθμό των σημείων ισορροπίας, το επόμενο βήμα είναι η επιλογή μιας ισορροπίας που είναι επιθυμητή για το συγκεκριμένο παίγνιο. Συγκεκριμένα, στην προηγούμενη υποενότητα, ορίστηκε ένα σημαντικό μέτρο αποδοτικότητας το οποίο βασίζεται στην έννοια της κυριαρχίας κατά Pareto. Όπως περιγράφεται στο σημείο αυτό, ένα αποτέλεσμα θεωρείται ότι είναι βέλτιστο κατά Pareto αν δεν μπορεί να γίνει καλύτερο χωρίς να επηρεάζεται αρνητικά τουλάχιστον ένας παίκτης. Επομένως, σε περίπτωση που υπάρχει μεγάλος αριθμός ισορροπιών Nash, μια αποδοτική επιλογή είναι να επιλεχθούν οι ισορροπίες που είναι κατά Pareto βέλτιστες (σε περίπτωση που υπάρχουν).

Πέρα από τη χρήση της έννοιας της βελτιστότητας κατά Pareto, μια χρήσιμη έννοια για την αξιολόγηση της απόδοσης μιας ισορροπίας Nash θεωρείται το τίμημα της αναρχίας (price of anarchy-PoA). Ο όρος αυτός ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης συνολικής χρησιμότητας που είναι δυνατόν να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας μια κεντρικοποιημένη λύση προς τη συνολική χρησιμότητα που επιτυγχάνεται στη χειρότερη ισορροπία. Αναλυτικότερα, ορίζοντας τη συνολική χρησιμότητα στη χειρότερη ισορροπία Nash ως  $U_{NE} = \min_{s \in S^{NE}} \left( \sum_{i \in K} U_i(s) \right)$  (όπου  $S^{NE}$  είναι το σύνολο των προφίλ στρατηγικών Nash) και τη συνολική ισορροπία από μια κεντρικοποιημένη λύση ως  $U_{CS} = \max_{s \in S} \left( \sum_{i \in K} U_i(s) \right)$ , το τίμημα της αναρχίας δίνεται από την σχέση  $\eta = U_{CS}/U_{NE}$ . Όπως είναι εμφανές, παρόλο που υπάρχουν χρήσιμες έννοιες για την επιλογή μιας αποδοτικής ισορροπίας Nash, δεν υπάρχουν συγκεκριμένοι κανόνες που μπορούν να εφαρμοστούν. Για συγκεκριμένα παίγνια, όπως κάποια που εμφανίζονται στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες, χρησιμοποιούνται συνήθως διαφορετικές προσεγγίσεις όπως για παράδειγμα η εισαγωγή σχημάτων τιμολόγησης ή η εισαγωγή ιεραρχίας για τη δημιουργία αποδοτικότερων σημείων ισορροπίας (Saraydar et al., 2002), (Lasaulce, Hayel, et al., 2009).

### 3.2.4 Συνεργατική θεωρία παιγνίων

Έχοντας περιγράψει τις βασικές αρχές και θεωρήματα της μη συνεργατικής θεωρίας παιγνίων, στην ενότητα αυτή δίνεται έμφαση στις αρχές της συνεργατικής θεωρίας παιγνίων. Αρχικά θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε αντίθεση με τη μη συνεργατική θεωρία παιγνίων, η οποία μελετάει τις στρατηγικές επιλογές που αφορούν τις αλληλεπιδράσεις ανάμεσα σε ανταγωνιστικούς παίκτες, η συνεργατική θεωρία παιγνίων παρέχει αναλυτικά εργαλεία για τη μελέτη της συμπεριφοράς λογικών παικτών όταν αυτοί συνεργάζονται. Συγκεκριμένα, όσον αφορά την περίπτωση ενός συνεργατικού παιγνίου, οι παίκτες επιτρέπεται να σχηματίσουν συμφωνίες ανάμεσα τους, οι οποίες μπορεί να επηρεάσουν τόσο τις στρατηγικές επιλογές αυτών των παικτών καθώς και τις χρησιμότητές τους. Αναλυτικότερα, η συνεργατική θεωρία παιγνίων συμπεριλαμβάνει δύο βασικούς κλάδους: τη θεωρία διαπραγμάτευσης και τα παίγνια συμμαχίας. Ο πρώτος κλάδος περιγράφει τη διαδικασία διαπραγμάτευσης ανάμεσα σε ένα σύνολο παικτών που πρέπει να συμφωνήσουν στους όρους της συνεργασίας, ενώ ο δεύτερος

κλάδος περιγράφει το σχηματισμό συνεργατικών ομάδων, που αναφέρονται ως συμμαχίες. Δεδομένου ότι στο πλαίσιο της ΔΔ μελετάται κυρίως η θεωρία διαπραγμάτευσης, στο σημείο αυτό δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στην ανάλυση των παιγνίων διαπραγμάτευσης, ενώ για τη μελέτη των παιγνίων συμμαχίας, ο αναγνώστης παραπέμπεται στο (Saad et al., 2009).

Ένα παίγνιο διαπραγμάτευσης είναι ένα παίγνιο στο οποίο οι χρήστες μπορούν να κάνουν συμφωνίες μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα, ένα παίγνιο διαπραγμάτευσης δεν ορίζεται σαν ένα παίγνιο στο οποίο οι παίκτες ουσιαστικά συνεργάζονται, αλλά σαν ένα παίγνιο στο οποίο η συνεργασία επιβάλλεται εξωτερικά από ένα τρίτο μέρος. Στη συνέχεια ορίζεται αναλυτικά το πρόβλημα διαπραγμάτευσης της συνεργατικής θεωρίας παιγνίων (Thomson, 2009).

**Ορισμός 3.7.** Έστω  $N = \{1, 2, \dots, N\}$  το σύνολο των παικτών και  $\mathbf{S}$  ένα κλειστό και κυρτό υποσύνολο του  $\mathbb{R}^N$  το οποίο απεικονίζει το σύνολο των εφικτών κατανομών χρησιμοτήτων, το οποίο μπορούν να έχουν οι παίκτες αν συνεργαστούν όλοι μαζί. Έστω  $u_{\min}^i$  η ελάχιστη χρησιμότητα που μπορεί να περιμένει ο χρήστης  $i$  προκειμένου να συνεργαστεί και έστω  $\{u_i \in \mathbf{S} | u_i \geq u_{\min}^i, \forall i \in N\}$  ένα πεπερασμένο, μη κενό σύνολο. Ορίζοντας ως  $\mathbf{u}_{\min} = (u_{\min}^1, \dots, u_{\min}^N)$ , τότε το ζεύγος  $(\mathbf{S}, \mathbf{u}_{\min})$  αποτελεί ένα πρόβλημα διαπραγμάτευσης  $N$  ατόμων.

Στη συνέχεια ορίζεται η έννοια της βελτιστότητας κατά Pareto, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ένα κριτήριο επιλογής για τις λύσεις διαπραγμάτευσης μέσα στο εφικτό σύνολο  $\mathbf{S}$ .

**Ορισμός 3.8.** Το σημείο  $(u_1, \dots, u_N)$  ονομάζεται βέλτιστο κατά Pareto, αν και μόνο αν δεν υπάρχει άλλη κατανομή  $u'_i$  τέτοια ώστε  $u'_i \geq u_i, \forall i$  και  $u'_i > u_i, \exists i$ , δηλαδή δεν υπάρχει άλλη κατανομή που οδηγεί σε καλύτερη απόδοση για κάποιους χρήστες, χωρίς να υποβαθμίζεται η απόδοση κάποιων άλλων χρηστών.

Ωστόσο, δεδομένου ότι μπορεί να υπάρχει ένας άπειρος αριθμός βέλτιστων σημείων κατά Pareto, ένα άλλο κριτήριο επιλογής είναι να επιλεγεί το αποτέλεσμα μιας διαπραγμάτευσης βάσει του βαθμού δικαιοσύνης του. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται το κριτήριο δικαιοσύνης που αναφέρεται στη λύση της διαπραγμάτευσης Nash (Nash Bargaining Solution - NBS). Η βασική λογική της συγκεκριμένης λύσης είναι ότι αφού έχουν εκχωρηθεί οι ελάχιστες απαιτήσεις σε όλους τους χρήστες, οι υπόλοιποι πόροι εκχωρούνται στους χρήστες ανάλογα με τις συνθήκες τους. Στη βιβλιογραφία έχουν οριστεί πολλές λύσεις διαπραγμάτευσης, ωστόσο μεταξύ τους η NBS παρέχει ένα μοναδικό, δίκαιο και βέλτιστο κατά Pareto σημείο λειτουργίας υπό τις ακόλουθες συνθήκες (Thomson, 2009).

**Ορισμός 3.9.** Το σημείο  $\bar{\mathbf{u}} = \varphi(\mathbf{S}, \mathbf{u}_{\min})$  ονομάζεται λύση της διαπραγμάτευσης Nash στο  $\mathbf{S}$  δεδομένων των ελάχιστων απαιτήσεων  $\mathbf{u}_{\min}$ , αν ικανοποιούνται τα ακόλουθα αξιώματα:

1. Ατομικός ορθολογισμός:  $\bar{u}_i \geq u_{\min}^i, \forall i$ .
2. Εφικτότητα:  $\bar{\mathbf{u}} \in \mathbf{S}$ .
3. Βελτιστότητα κατά Pareto: Αν υπάρχει  $\mathbf{u}' \in \mathbf{S}$  τέτοιο ώστε  $u'_i \geq \bar{u}_i, \forall i$  τότε  $u'_i = \bar{u}_i, \forall i$ .
4. Ανεξαρτησία των μη σχετικών εναλλακτικών: αν  $\bar{\mathbf{u}} \in \mathbf{S}' \subset \mathbf{S}$  και  $\bar{\mathbf{u}} = \varphi(\mathbf{S}, \mathbf{u}_{\min})$  τότε ισχύει  $\bar{\mathbf{u}} = \varphi(\mathbf{S}', \mathbf{u}_{\min})$ .
5. Ανεξαρτησία γραμμικών μετασχηματισμών: Για κάθε γραμμικό μετασχηματισμό  $\psi$  ισχύει  $\psi(\varphi(\mathbf{S}, \mathbf{u}_{\min})) = \varphi(\psi(\mathbf{S}), \psi(\mathbf{u}_{\min}))$ .

6. Συμμετρία: αν το  $\mathbf{S}$  είναι συμμετρικό για όλους τους πράκτορες, τότε ισχύει ότι:

$$\varphi_j(\mathbf{S}, \mathbf{u}_{\min}) = \varphi_{j'}(\mathbf{S}, \mathbf{u}_{\min}), \forall j, j'.$$

Τα τρία πρώτα αξιώματα αφορούν την ανωτερότητα της λύσης σε σχέση με το σημείο διαφωνίας και την απαίτηση για βελτιστότητα κατά Pareto. Τα αξιώματα 4-6 ονομάζονται αξιώματα δικαιοσύνης. Συγκεκριμένα, το αξίωμα ανεξαρτησίας των εναλλακτικών υπονοεί ότι το σημείο λύσης διαπραγμάτευσης δεν επηρεάζεται από τον περιορισμό του συνόλου εφικτών λύσεων. Το πέμπτο αξίωμα εξασφαλίζει ότι η λύση διαπραγμάτευσης είναι αμετάβλητη ως προς την κλίμακα, δηλαδή δεν επηρεάζεται από γραμμικούς μετασχηματισμούς των συναρτήσεων χρησιμότητας. Από την άλλη μεριά, το αξίωμα συμμετρίας δηλώνει ότι η NBS δεν εξαρτάται από την ταυτότητα των χρηστών, δηλαδή, αν δύο παίκτες έχουν την ίδια χρησιμότητα μη διαφωνίας, τότε θα έχουν την ίδια χρησιμότητα NBS.

Το ακόλουθο πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει αποδειχτεί ότι έχει ως λύση την NBS η οποία ικανοποιεί τα παραπάνω αξιώματα.

**Θεώρημα 3.7.** (Υπαρξη NBS): Υπάρχει μια συνάρτηση λύσης  $\varphi(\mathbf{S}, \mathbf{u}_{\min})$  η οποία ικανοποιεί και τα έξι αξιώματα του ορισμού 3.9 και η συνάρτηση αυτή αποτελεί λύση του προβλήματος:  $\varphi(\mathbf{S}, \mathbf{u}_{\min}) \in$

$$\arg \max_{\mathbf{u} \in \mathbf{S}, \bar{u}_i \geq u_{\min}^i, \forall i} \prod_{i=1}^N (\bar{u}_i - u_{\min}^i).$$

Επομένως, προκειμένου να βρεθεί η λύση διαπραγμάτευσης NBS, αρκεί να υπολογιστεί η λύση του προαναφερόμενου προβλήματος βελτιστοποίησης, χρησιμοποιώντας μια από τις βασικές μεθόδους επίλυσης που αναφέρονται στην προηγούμενη ενότητα.

### 3.2.5 Εξελικτική θεωρία παιγνίων

Η εξελικτική θεωρία παιγνίων αναπτύχθηκε ως ένα μαθηματικό πλαίσιο για να μελετήσει τις αλληλεπιδράσεις ανάμεσα σε βιολογικούς, λογικούς πράκτορες. Χρησιμοποιήθηκε επίσης για να μοντελοποιήσει τη συμπεριφορά ανθρώπινων οντοτήτων στην κοινωνία καθώς και οντοτήτων στο περιβάλλον αγοράς. Παράλληλα, τα τελευταία χρόνια αρχές της εξελικτικής θεωρίας παιγνίων χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση πόρων στα ασύρματα δίκτυα (Han et al., 2011), (Niyato & Hossain, 2009).

Ένα εξελικτικό παίγνιο μπορεί να περιγραφεί από ένα σύνολο παικτών, όπως και στην κλασική θεωρία παιγνίων. Ωστόσο, στην εξελικτική διαδικασία κυριαρχούν δύο βασικοί μηχανισμοί, ο μηχανισμός της μετάλλαξης και ο μηχανισμός της επιλογής. Ο πρώτος μηχανισμός αναφέρεται στο μηχανισμό της τροποποίησης των χαρακτηριστικών ενός πράκτορα με αποτέλεσμα την εισαγωγή πρακτόρων με νέα χαρακτηριστικά στον πληθυσμό. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται ο μηχανισμός της επιλογής έτσι ώστε να παραμείνουν οι πράκτορες που μπορούν να προσαρμοστούν στο περιβάλλον και να εξαλειφθούν οι υπόλοιποι. Συγκεκριμένα, ενώ ο μηχανισμός της μετάλλαξης χρησιμοποιείται για να διατηρηθεί η ποικιλομορφία σε έναν πληθυσμό, ο μηχανισμός της επιλογής χρησιμοποιείται για να προωθηθούν οι πράκτορες που έχουν καλύτερα χαρακτηριστικά. Σε ένα εξελικτικό παίγνιο, ο πρώτος μηχανισμός περιγράφεται με τις εξελικτικά σταθερές στρατηγικές (evolutionary stable strategies -ESS), ενώ ο μηχανισμός της επιλογής περιγράφεται με τη δυναμική της αντιγραφής (replicator dynamics). Αναλυτικότερα, οι ESS χρησιμοποιούνται για να μελετηθεί ένα στατικό εξελικτικό παίγνιο, ενώ η έννοια των replicator dynamics χρησιμοποιείται για τη μελέτη ενός δυναμικού εξελικτικού παιγνίου. Δεδομένου ότι στο πλαίσιο της  $\Delta\Delta$  χρησιμοποιείται ο μηχανισμός των replicator dynamics, δίνεται κυρίως έμφαση στον ορισμό του.



### Replicator Dynamics

Όπως αναφέρθηκε, σε ένα δυναμικό εξελικτικό παίγνιο, η στρατηγική που χρησιμοποιείται από ένα άτομο στο πληθυσμό μπορεί να αντιγραφεί από άλλα άτομα μέσω της ικανότητας της μάθησης. Η διαδικασία της αντιγραφής της στρατηγικής στο χρόνο μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων, το οποίο αναφέρεται ως replicator dynamics. Ο μηχανισμός των replicator dynamics μπορεί να παραχθεί για κάθε πληθυσμό ξεχωριστά. Συγκεκριμένα, στην εξελικτική θεωρία παιγνίων, οι παίκτες ενός πληθυσμού ομαδοποιούνται, με αποτέλεσμα ο πληθυσμός να μπορεί να χωριστεί σε πολλαπλές ομάδες όπου κάθε ομάδα μπορεί να υιοθετήσει μια διαφορετική αμιγή στρατηγική. Με την έννοια των replicator dynamics είναι εφικτή η μοντελοποίηση της εξέλιξης του μεγέθους της ομάδας στο χρόνο.

Αναλυτικότερα, έστω ότι ένα μεγάλο αλλά πεπερασμένο σύνολο πρακτόρων υιοθετεί την στρατηγική  $s \in S$ , όπου  $S$  είναι ένα σύνολο στρατηγικών και  $n_s(t)$  είναι ο αριθμός των πρακτόρων που χρησιμοποιούν την στρατηγική  $s$  τη χρονική στιγμή  $t$ . Ο συνολικός αριθμός πρακτόρων σε ένα πληθυσμό μπορεί να εκφραστεί ως  $N(t) = \sum_{s \in S} n_s(t)$ . Με αυτό τον τρόπο, η αναλογία των πρακτόρων που χρησιμοποιούν μια αμιγή στρατηγική ορίζεται ως  $x_s(t) = n_s(t)/N(t)$ . Συνεπώς, η κατάσταση του πληθυσμού μπορεί να οριστεί ως το διάνυσμα  $\mathbf{x}(t) = [\dots x_s(t) \dots]^T$ , διάστασης  $|S|$ . Έστω ότι η χρησιμότητα ενός πράκτορα που χρησιμοποιεί την στρατηγική  $s$ , δεδομένης της κατάστασης του πληθυσμού  $\mathbf{x}$ , δίνεται από το  $u(s, \mathbf{x})$ . Η μέση χρησιμότητα του πληθυσμού δίνεται επομένως από τη σχέση  $\bar{u}(\mathbf{x}) = \sum_{s \in S} x_s \cdot u(s, \mathbf{x})$ . Όπως είναι αναμενόμενο, ο ρυθμός αναπαραγωγής κάθε πράκτορα, δηλαδή ο ρυθμός με τον οποίο κάθε πράκτορας αλλάζει από μια στρατηγική σε μια άλλη, εξαρτάται από την χρησιμότητα του, δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η χρησιμότητα μιας στρατηγικής τόσο γρηγορότερη θα είναι η μετάβαση σε αυτήν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, το μέγεθος της ομάδας πρακτόρων που έχουν καλύτερη χρησιμότητα να μεγαλώνει με την πάροδο του χρόνου, επομένως το δυναμικό της αναλογίας του πληθυσμού μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\dot{x}_s = x_s (u(s, \mathbf{x}) - \bar{u}(\mathbf{x})) \quad (3.11)$$

όπου  $\dot{x}_s$  είναι η χρονική παράγωγος της κατάστασης του πληθυσμού  $x_s$ .

Η εξελικτική ισορροπία μπορεί να καθοριστεί από τη σχέση  $\dot{x}_s = 0$ , η οποία ουσιαστικά σημαίνει ότι η αναλογία του πληθυσμού που επιλέγει διαφορετικές στρατηγικές σταματάει να μεταβάλλεται. Εκτός όμως από την εύρεση της εξελικτικής ισορροπίας, είναι σημαντικό να καθορισθεί η σταθερότητα της. Δυο βασικές προσεγγίσεις οι οποίες αποδεικνύουν τη σταθερότητα της εξελικτικής ισορροπίας βασίζονται στη συνάρτηση Lyapunov και στις ιδιοτιμές ενός αντίστοιχου γραμμικού συστήματος. Για περαιτέρω ανάλυση, ο αναγνώστης παραπέμπεται στο (Slotine et al., 1991).



## Κεφάλαιο 4

# Μηχανισμός ελέγχου ισχύος σε ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς

Στα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, ο έλεγχος ισχύος αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα διαχείρισης ραδιοπύρων. Η επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος περιλαμβάνει την εύρεση των κατάλληλων τεχνικών και αλγορίθμων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να προσαρμοστεί η ισχύς μετάδοσης είτε των τερματικών είτε των σταθμών βάσης. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, περιγράφεται το πρόβλημα του ελέγχου ισχύος στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, ενώ δίνεται κυρίως έμφαση στην επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος χρησιμοποιώντας αρχές από τη θεωρία παιγνίων, προτείνοντας έναν καινοτόμο μηχανισμό ελέγχου ισχύος για δορυφορικά δίκτυα νέας γενιάς.

### 4.1 Σύντομη περιγραφή προβλήματος ελέγχου ισχύος

Η χρονομεταβλητή φύση του καναλιού μετάδοσης καθώς και τα φαινόμενα παρεμβολών αποτελούν δύο από τους βασικούς παράγοντες που μπορεί να οδηγήσουν σε μείωση της απόδοσης ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Συγκεκριμένα, το μέσο κέρδος καναλιού επηρεάζεται άμεσα από διαλείψεις μεγάλης κλίμακας όπως είναι οι απώλειες διάδοσης και τα φαινόμενα σκίασης, ενώ το στιγμιαίο κέρδος καναλιού επηρεάζεται από διαλείψεις μικρής κλίμακας, όπως η εξασθένηση πολλαπλών διαδρομών. Επομένως, η κατάσταση του καναλιού διαφέρει για διαφορετικούς χρήστες και σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, με αποτέλεσμα να μην είναι εφικτή η διατήρηση συγκεκριμένης ποιότητας σήματος χωρίς την κατάλληλη ρύθμιση του επιπέδου ισχύος εκπομπής. Επιπλέον, λόγω του περιορισμένου διαθέσιμου εύρους ζώνης, τα κανάλια μετάδοσης είναι πιθανό να επαναχρησιμοποιούνται, προκειμένου να αυξηθεί η χωρητικότητα του δικτύου. Το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική βελτίωση της απόδοσης του δικτύου, εντείνει όμως παράλληλα τα φαινόμενα παρεμβολών, με αποτέλεσμα ο λόγος σήματος προς παρεμβολή (Signal to Interference Ratio - SIR) ενός δέκτη να έχει υψηλές διακυμάνσεις. Προκειμένου να καταπολεμηθεί το συγκεκριμένο φαινόμενο, θα πρέπει, επίσης, να χρησιμοποιηθούν αποδοτικοί μηχανισμοί ελέγχου ισχύος έτσι ώστε η ισχύς εκπομπής να προσαρμόζεται ανάλογα με το βαθμό παρεμβολής, ώστε να διατηρείται μια συγκεκριμένη ποιότητα λαμβανόμενου σήματος στον επιθυμητό δέκτη. Επομένως, εκτός από τη ρύθμιση του επιπέδου ισχύος εκπομπής για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας, οι βασικοί στόχοι ενός μηχανισμού ελέγχου ισχύος, για ασύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, μπορούν να συνοψιστούν στην εξασφάλιση

συγκεκριμένης ποιότητας σήματος καθώς και στη μείωση του φαινομένου παρεμβολής. Πέρα από τους διαφορετικούς πιθανούς στόχους, το πρόβλημα του ελέγχου ισχύος υπόκειται σε διάφορους περιορισμούς, οι οποίοι μπορεί να προέρχονται από την περιορισμένη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, το κόστος υλοποίησης των ενισχυτών ισχύος καθώς και από το επίπεδο ανεκτής παρεμβολής στους γειτονικούς πομποδέκτες. Λαμβάνοντάς υπόψη όλες τις ιδιαιτερότητες που μπορεί να έχει ένα σχήμα ελέγχου ισχύος, το πρόβλημα της αποδοτικής διαχείρισης του συγκεκριμένου ραδιοπόρου αποτελεί ένα σημαντικό θέμα, το οποίο προσέλκυσε το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη διαφόρων μηχανισμών ελέγχου ισχύος, οι οποίοι βελτιστοποιούν διαφορετικές συναρτήσεις χρησιμότητας (ατομικές ή συλλογικές), λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικούς περιορισμούς (στιγμιαίους ή μέσους).

Συγκεκριμένα, τα υπάρχοντα σχήματα ελέγχου ισχύος μπορούν να ταξινομηθούν σε κεντρικοποιημένα ή καταναμημένα σχήματα, σε σχήματα άνω ή κάτω ζεύξης, σε σχήματα ανοικτού ή κλειστού βρόγχου καθώς και σε διάφορες άλλες κατηγορίες. Όπως προαναφέρθηκε, το πρόβλημα ελέγχου ισχύος δεν αποτελεί ένα απλό πρόβλημα βελτιστοποίησης δεδομένου ότι υπάρχουν πολλοί πρακτικοί περιορισμοί και πολλά trade-offs, τα οποία θα πρέπει να ληφθούν υπόψη. Το σημαντικότερο trade-off αναφέρεται στο γεγονός ότι η αύξηση της ισχύος μετάδοσης οδηγεί σε αύξηση του λόγου σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο (Signal to Interference plus Noise Ratio - SINR) της συγκεκριμένης ζεύξης, αλλά παράλληλα οδηγεί σε αύξηση του επιπέδου παρεμβολής προς τις άλλες ζεύξεις με αποτέλεσμα τη μείωση του SINR τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, οι άλλοι χρήστες να επιθυμούν επίσης να αυξήσουν την ισχύ εκπομπής τους προκειμένου να αυξήσουν τη δική τους χωρητικότητα, αυξάνοντας ταυτόχρονα την παρεμβολή προς τους άλλους χρήστες και ούτω καθεξής. Επομένως, δεδομένου ότι η επιλογή για την ισχύ εκπομπής κάθε χρήστη δεν επηρεάζει μόνο το συγκεκριμένο χρήστη αλλά επηρεάζει το σύνολο των χρηστών, είναι εμφανές ότι η θεωρία παιγνίων αποτελεί ένα κατάλληλο εργαλείο για τη μελέτη και επίλυση των προβλημάτων ελέγχου ισχύος. Παράλληλα, στην περίπτωση της άνω ζεύξης, ο έλεγχος ισχύος θα πρέπει να υλοποιείται με καταναμημένο τρόπο. Συγκεκριμένα, κάθε χρήστης θα πρέπει να χρησιμοποιεί μόνο την τοπική πληροφορία που διαθέτει για να ρυθμίσει την ισχύ του, βελτιστοποιώντας είτε τη δική του απόδοση, είτε τη συνολική απόδοση του δικτύου. Η εγγενής καταναμημένη φύση του συγκεκριμένου προβλήματος οδηγεί άμεσα στη μοντελοποίηση του ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο, στο οποίο οι στρατηγικές των παικτών αναφέρονται στα επιτρεπόμενα επίπεδα ισχύος εκπομπής τους, όπως αναλύεται και στην επόμενη ενότητα. Εκτός από τα προαναφερόμενα βασικά χαρακτηριστικά ενός σχήματος ελέγχου ισχύος, θα πρέπει να τονισθεί ότι είναι επιθυμητό η υλοποίηση του να είναι απλή έτσι ώστε να μην προκαλείται μεγάλο επικοινωνιακό overhead, ενώ στην περίπτωση που πρόκειται για επαναληπτικό αλγόριθμο θα πρέπει να έχει υψηλή ταχύτητα σύγκλισης σε σχέση με την ταχύτητα μεταβολής των καναλιών. Τέλος, απαραίτητη προϋπόθεση του σχήματος ελέγχου ισχύος είναι η ικανοποίηση των διαφορετικών απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας των χρηστών, η οποία λαμβάνεται υπόψη σε μετέπειτα κεφάλαιο.

## 4.2 Έλεγχος ισχύος με χρήση της θεωρίας παιγνίων

Όπως αναφέρεται στο προηγούμενο κεφάλαιο, κάθε πρόβλημα διαχείρισης ραδιοπόρων μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης χρησιμοποιώντας την κατάλληλη αντικειμενική συνάρτηση και τους κατάλληλους περιορισμούς. Αντίστοιχα, το πρόβλημα ελέγχου ισχύος μπορεί να οριστεί σαν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης στο οποίο το επίπεδο ισχύος εκπομπής των χρηστών αντιστοιχεί στη μεταβλητή του προβλήματος. Παρόλα αυτά, η καταναμημένη φύση του

συγκεκριμένου προβλήματος σε συνδυασμό με την έντονη αλληλεξάρτηση των επιπέδων ισχύος των χρηστών μεταξύ τους, οδήγησαν στην ευρεία χρήση της θεωρίας παιγνίων για την επίλυση του προβλήματος ελέγχου ισχύος. Στη συγκεκριμένη υποενοότητα, αρχικά, παρουσιάζονται κάποιες βασικές προσεγγίσεις μηχανισμών ελέγχου ισχύος που χρησιμοποιούν αρχές από τη μη συνεργατική θεωρία παιγνίων, ενώ στη συνέχεια προτείνεται ένας καινοτόμος μηχανισμός ελέγχου ισχύος για δορυφορικά δίκτυα νέας γενιάς.

#### 4.2.1 Επισκόπηση παιγνιοθεωρητικών μηχανισμών ελέγχου ισχύος

Στα (Goodman & Mandayam, 2000), (Saraydar et al., 2002) παρουσιάζεται μια αρχική μοντελοποίηση του προβλήματος ελέγχου ισχύος ως μη συνεργατικό παίγνιο, για συστήματα CDMA. Συγκεκριμένα, θεωρώντας ότι  $N = \{1, \dots, N\}$  είναι το σύνολο των τερματικών του συστήματος,  $P_1, \dots, P_N$  είναι το σύνολο των επιτρεπόμενων επιπέδων ισχύος εκπομπής τους και  $U_1, \dots, U_N$  είναι οι συναρτήσεις χρησιμότητας τους, οι συγγραφείς ορίζουν το στατικό παίγνιο ελέγχου ισχύος που εκφράζεται από την τριάδα  $G = [N, \{P_i\}_{i \in N}, \{U_i\}_{i \in N}]$ . Στη συγκεκριμένη περίπτωση, οι συγγραφείς προτείνουν μια συνάρτηση χρησιμότητας, που προσεγγίζει τον αριθμό των bits πληροφορίας που λαμβάνονται επιτυχώς ανά μονάδα ενέργειας (joule) και η οποία ορίζεται μαθηματικά από την σχέση:

$$U_i(p_i, \mathbf{p}_{-i}) = \frac{LRf(\gamma_i(\mathbf{p}))}{Mp_i} \text{ (bits/joule)} \quad (4.1)$$

όπου  $L$  είναι ο αριθμός των bits πληροφορίας ανά πλαίσιο,  $M$  είναι ο συνολικός αριθμός των bits στο πλαίσιο,  $R$  είναι ο ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας,  $p_i$  είναι η ισχύς εκπομπής του τερματικού  $i$ ,  $\mathbf{p}_{-i}$  είναι το διάνυσμα ισχύων εκπομπής όλων των υπολοίπων τερματικών και η  $f(\cdot)$  αποτελεί μια σιγμοειδή συνάρτηση, η οποία προσεγγίζει την πιθανότητα σωστής λήψης ενός πλαισίου και εξαρτάται από το σχήμα κωδικοποίησης που επιλέγεται κάθε φορά. Έχοντας μοντελοποιήσει το πρόβλημα του ελέγχου ισχύος ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο, τα επόμενα βήματα της ανάλυσης είναι η απόδειξη ύπαρξης και μοναδικότητας της ισορροπίας Nash. Στο συγκεκριμένο μοντέλο, οι συγγραφείς αποδεικνύουν την ύπαρξη και τη μοναδικότητα της ισορροπίας Nash, χρησιμοποιώντας τα θεωρήματα 3.2 και 3.6 (κεφάλαιο 3). Επιπλέον, μελετώντας τις ιδιότητες του σημείου ισορροπίας, αποδεικνύουν ότι το σημείο ισορροπίας δεν είναι βέλτιστο κατά Pareto, καθώς υπάρχουν άλλες στρατηγικές, οι οποίες οδηγούν σε υψηλότερες τιμές χρησιμότητας για τουλάχιστον ένα τερματικό χωρίς να μειώνονται οι χρησιμότητες των υπολοίπων τερματικών. Προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση του μηχανισμού ελέγχου ισχύος, προτείνουν την εισαγωγή ενός γραμμικού σχήματος τιμολόγησης, μετατρέποντας την αρχική συνάρτηση χρησιμότητας σε μια νέα συνάρτηση χρησιμότητας, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$U_i^c(p_i, \mathbf{p}_{-i}) = U_i(p_i, \mathbf{p}_{-i}) - c_i p_i \quad (4.2)$$

Όπως αποδεικνύεται το νέο παίγνιο έχει τουλάχιστον μια ισορροπία Nash καθώς ανήκει στην κατηγορία των supermodular παιγνίων (Topkis, 1979) ενώ η μοναδικότητα της ισορροπίας αναλύεται μέσω προσομοιώσεων. Οι τιμές των ισορροπιών Nash με τα μικρότερα επίπεδα ισχύος υπολογίζονται χρησιμοποιώντας ένα καταναμημένο επαναληπτικό αλγόριθμο. Παρά την αυξημένη πολυπλοκότητα του νέου παιγνίου με τιμολόγηση, το σημείο ισορροπίας στο οποίο καταλήγει ο αλγόριθμος βέλτιστης απόκρισης οδηγεί σε υψηλότερες τιμές χρησιμότητας για όλους τους παίκτες, επαληθεύοντας το γεγονός ότι οι μηχανισμοί τιμολόγησης αποτελούν ένα βασικό εργαλείο για τη βελτίωση της απόδοσης των μη συνεργατικών παιγνίων. Θα πρέπει να σημειωθεί ωστόσο ότι το νέο σημείο ισορροπίας οδηγεί

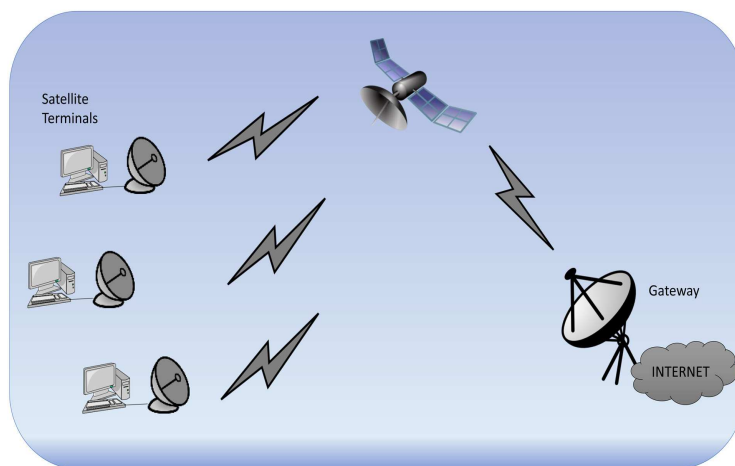
σε διαφορετικούς λόγους SINR για τα τερματικά, σε αντίθεση με το αρχικό παίγνιο, με αποτέλεσμα να μη θεωρείται εξίσου δίκαιο σχήμα.

Μια διαφορετική μοντελοποίηση του ίδιου προβλήματος ως μη συνεργατικό παίγνιο εμφανίζεται στο (Alpcan et al., 2002). Στη συγκεκριμένη προσέγγιση, ο αριθμός των χρηστών περιορίζεται από ένα σχήμα ελέγχου αποδοχής, το οποίο εξασφαλίζει το ελάχιστο απαιτούμενο SINR για κάθε χρήστη. Αυτή τη φορά, ο κάθε χρήστης επιλέγει το επίπεδο ισχύος του ώστε να ελαχιστοποιήσει τη συνάρτηση κόστους που εκφράζεται ως μια γραμμική συνάρτηση τιμολόγησης (με τιμή  $\lambda_i$  ανά μονάδα ισχύος) μείον μια συνάρτηση χρησιμότητας ανάλογη με τη χωρητικότητα κατά Shannon του συγκεκριμένου χρήστη. Αναλυτικότερα, η συνάρτηση κόστους που χρησιμοποιείται στο συγκεκριμένο μοντέλο, ορίζεται μαθηματικά ως:

$$J_i(p_i, \mathbf{p}_{-i}) = \lambda_i p_i - u_i \ln(1 + \gamma_i), p_i \geq 0, \forall i \quad (4.3)$$

όπου  $p_i$  είναι η ισχύς εκπομπής του χρήστη  $i$ ,  $\gamma_i$  είναι η συνάρτηση SINR του χρήστη  $i$  και  $u_i$  είναι μια παράμετρος που απεικονίζει τις απαιτήσεις SINR του συγκεκριμένου χρήστη. Με αυτόν τον τρόπο, ορίζεται το μη συνεργατικό παίγνιο ελέγχου ισχύος, όπου οι παίκτες είναι οι χρήστες του συστήματος CDMA, οι στρατηγικές τους είναι τα επίπεδα ισχύος εκπομπής και η αντικειμενική συνάρτηση δίνεται από την συνάρτηση κόστους (4.3). Σε αυτό το παίγνιο, κάθε χρήστης προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει τη συνάρτηση κόστους του δεδομένου του αθροίσματος των ισχύων των άλλων χρηστών (το οποίο παρέχεται από τον σταθμό βάσης) και του θορύβου. Χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις βέλτιστης απόκρισης που υπολογίζονται από το μηδενισμό της πρώτης παραγώγου της αντικειμενικής συνάρτησης, αποδεικνύεται ότι το συγκεκριμένο μη συνεργατικό παίγνιο ελέγχου ισχύος έχει μοναδική ισορροπία Nash. Επιπλέον, οι συγγραφείς προτείνουν δύο καταναμημένους, επαναληπτικούς αλγόριθμους για την εύρεση της ισορροπίας Nash: έναν αλγόριθμο παράλληλης ανανέωσης και έναν αλγόριθμο τυχαίας ανανέωσης. Στον πρώτο αλγόριθμο, όλοι οι χρήστες ανανεώνουν τα επίπεδα ισχύος τους, σε κάθε επανάληψη, χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση βέλτιστης απόκρισης, ενώ στον αλγόριθμο τυχαίας ανανέωσης, θεωρείται ότι οι χρήστες ανανεώνουν τα επίπεδα ισχύος τους σύμφωνα με μια προκαθορισμένη πιθανότητα. Όπως αποδεικνύεται μέσω προσομοιώσεων, σε συστήματα χωρίς καθυστέρηση στα οποία όλοι οι χρήστες έχουν την ίδια αρχική ισχύ, ο αλγόριθμος τυχαίας ανανέωσης οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τον αλγόριθμο παράλληλης ανανέωσης. Ωστόσο, το αντίθετο ισχύει για τα συστήματα με καθυστέρηση. Επίσης, στη συγκεκριμένη εργασία, οι συγγραφείς μελετούν δύο διαφορετικά σχήματα τιμολόγησης: ένα κεντρικοποιημένο σχήμα καθώς και ένα καταναμημένο σχήμα τιμολόγησης. Στην πρώτη περίπτωση, ο σταθμός βάσης καθορίζει τις τιμές που θα χρεωθεί ο κάθε χρήστης έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας όλων των χρηστών, ενώ στη δεύτερη περίπτωση, ο σταθμός βάσης θέτει μια ενιαία τιμή για όλους τους χρήστες και κάθε χρήστης επιλέγει κατάλληλα την παράμετρο κέρδους του ( $u_i$ ), ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του.

Εκτός από τις προαναφερόμενες θεμελιώδεις εργασίες που εστιάζουν σε μηχανισμούς ελέγχου ισχύος σε συστήματα CDMA, τα τελευταία χρόνια, έχουν προταθεί αρκετά σχήματα διαχείρισης του συγκεκριμένου ραδιοπόρου που βασίζονται στη θεωρία παιγνίων για διάφορες αρχιτεκτονικές δικτύων, όπως για παράδειγμα για γνωστικά δίκτυα (W. Wang et al., 2007), (Bloem et al., 2007), για συνεργατικά δίκτυα (B. Wang et al., 2009) και διάφορα άλλα. Ωστόσο, οι περισσότεροι από τους προτεινόμενους μηχανισμούς εστιάζουν κυρίως σε επίγεια δίκτυα. Προκειμένου να καλυφθεί το συγκεκριμένο ερευνητικό κενό, στην παρούσα διατριβή προτείνεται η χρήση ενός παιγνιοθεωρητικού



Σχήμα 4.1: Αρχιτεκτονική ενός δορυφορικού DVB-RCS/S2 συστήματος

μηχανισμού ελέγχου ισχύος σε δορυφορικά δίκτυα, όπως αναλύεται στην επόμενη υποενότητα.

#### 4.2.2 Προτεινόμενο μοντέλο ελέγχου ισχύος για δορυφορικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα

Στη συγκεκριμένη ενότητα μελετάται η επίδραση του μηχανισμού ελέγχου ισχύος σε δορυφορικά δίκτυα νέας γενιάς και παρουσιάζεται μια παιγνιοθεωρητική προσέγγιση του καταναμημένου ελέγχου ισχύος άνω ζεύξης σε δίκτυα DVB-RCS. Αναλυτικότερα, θεωρείται ότι κάθε δορυφορικό τερματικό αποτελεί ένα λογικό πράκτορα που προσπαθεί να μεγιστοποιήσει μόνο τη δική του συνάρτηση χρησιμότητας σε απόκριση προς τις στρατηγικές ισχύος των υπόλοιπων τερματικών. Δεδομένου ότι το συγκεκριμένο πρόβλημα ελέγχου ισχύος αποτελεί ένα καταναμημένο πρόβλημα διαχείρισης ραδιοπόρων, χρησιμοποιούνται αρχές από τη μη συνεργατική θεωρία παιγνίων προκειμένου να βρεθεί ένα σταθερό σύνολο κατανομών. Συγκεκριμένα, το αρχικό πρόβλημα μοντελοποιείται σαν ένα μη συνεργατικό παίγνιο με τιμολόγηση για το οποίο υπολογίζεται, στη συνέχεια, η ισορροπία Nash. Επιπλέον, συγκρίνονται δύο διαφορετικά σχήματα τιμολόγησης (ένα στατικό σχήμα και ένα δυναμικό σχήμα ανάλογο του επιπέδου εξασθένησης) ως προς τα επίπεδα ισχύος ισορροπίας και το λόγο σήματος προς παρεμβολή (SIR), ενώ μελετάται επίσης η επίδραση του συνολικού αριθμού των χρηστών στο σημείο ισορροπίας. Πριν την ανάλυση του προτεινόμενου μηχανισμού ελέγχου ισχύος, παρουσιάζεται μια συνοπτική περιγραφή διαφόρων μηχανισμών διαχείρισης ραδιοπόρων που έχουν προταθεί για δορυφορικά συστήματα, εστιάζοντας, στη συνέχεια, στη λειτουργία του ελέγχου ισχύος.

Όπως αναφέρεται σε προηγούμενη ενότητα, η ραγδαία ανάπτυξη των δορυφορικών επικοινωνιών και η ανάγκη για υπηρεσίες πολυμέσων οδήγησαν στη νέα γενιά προτύπων DVB για το κανάλι επιστροφής, γνωστών ως DVB-RCS. Στο σχήμα 4.1 απεικονίζεται μια τυπική αρχιτεκτονική ενός δορυφορικού τηλεπικοινωνιακού δικτύου βασισμένη στα πρότυπα DVB-RCS/S2, όπου οι χρήστες (δορυφορικά τερματικά) απαιτούν συγκεκριμένη χωρητικότητα ανάλογα με τις ανάγκες τους και στη συνέχεια ένας κεντροποιημένος αλγόριθμος υπολογίζει το ποσό των πόρων που θα εκχωρηθούν σε κάθε χρήστη. Παρόλο όμως τη βελτιωμένη αρχιτεκτονική των νέων αυτών προτύπων, η αποδοτική διαχείριση ραδιοπόρων δεν παύει να αποτελεί ένα θέμα μείζονος σημασίας για την περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης των δικτύων, παραμένοντας μια ερευνητική πρόκληση ακόμα και σήμερα. Όσον αφορά τους μηχανισμούς εκχώρησης εύρους ζώνης στα δορυφορικά συστήματα DVB-RCS, έχουν

πραγματοποιηθεί σημαντικές ερευνητικές προσπάθειες. Συγκεκριμένα, στο (Morell et al., 2008), προτείνεται ένα διαστρωματικό πλαίσιο βελτιστοποίησης της διεργασίας εκχώρησης εύρους ζώνης ενός συστήματος DVB-S2/DVB-RCS χρησιμοποιώντας προσαρμοστική κωδικοποίηση. Παρόλα αυτά, υπάρχουν ακόμα πολλές διεργασίες της διαχείρισης πόρων των συγκεκριμένων δορυφορικών συστημάτων που απαιτούν περαιτέρω μελέτη, όπως για παράδειγμα ο μηχανισμός ελέγχου ισχύος της άνω ζεύξης. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός είναι σημαντικός για τη μετάδοση των εφαρμογών πολυμέσων, καθώς εγγυάται τη στοιχειώδη ποιότητα υπηρεσίας που απαιτούν τα δορυφορικά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα νέας γενιάς. Παράλληλα, αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι του συστήματος διαχείρισης ραδιοπόρων καθώς επιτρέπει την αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα τη διασυστημική παρεμβολή. Αναλυτικότερα, όσον αφορά τον έλεγχο ισχύος άνω ζεύξης σε ένα δορυφορικό δίκτυο, χρησιμοποιούνται συνήθως τρία είδη τεχνικών (Giambene, 2007), (A. D. Panagopoulos et al., 2004), τα οποία περιγράφονται παρακάτω :

- Ανοιχτού βρόγχου: ένας σταθμός λαμβάνει το δικό του φέρον μετάδοσης και βάσει μετρήσεων της εξασθένισης του αναγνωριστικού σήματος, υλοποιεί τον έλεγχο ισχύος άνω ζεύξης.
- Κλειστού βρόγχου: Δύο επίγειοι σταθμοί βρίσκονται μέσα στην ίδια ακτίνα κάλυψης όπου ο ένας επίγειος σταθμός λαμβάνει το δικό του φέρον μετάδοσης, ενώ ο έλεγχος ισχύος άνω ζεύξης βασίζεται στη λήψη ενός διακριτού φέροντος που μεταδίδεται από τον άλλο σταθμό.
- Βρόγχου ανατροφοδότησης: Ένας σταθμός ελέγχου ελέγχει τα επίπεδα ισχύος όλων των φερόντων που λαμβάνει και δίνει εντολή στους επίγειους σταθμούς να προσαρμόσουν ανάλογα την ισχύ εκπομπής τους.

Στην προτεινόμενη προσέγγιση που ακολουθεί, θεωρείται η τεχνική ανοιχτού βρόγχου, ενώ χρησιμοποιούνται αρχές από τη μη συνεργατική θεωρία παιγνίων, παρόμοια με τα (Alpcan et al., 2002), (Saraydar et al., 2002). Συγκεκριμένα, μελετάται το πρόβλημα ελέγχου ισχύος στα δορυφορικά δίκτυα και εκφράζεται ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο στο οποίο κάθε δορυφορικό τερματικό επιλέγει το επίπεδο ισχύος του προσπαθώντας να μεγιστοποιήσει τη δική του συνάρτηση χρησιμότητας. Επιπλέον, θα πρέπει να σημειωθεί ότι θεωρείται ένα CDMA σχήμα πολλαπλής πρόσβασης, όπως περιγράφεται και στην ακόλουθη υποενότητα.

### Μη συνεργατικό παίγνιο ελέγχου ισχύος

Προκειμένου να επιλυθεί το αρχικό πρόβλημα, ορίζεται το μη συνεργατικό παίγνιο ελέγχου ισχύος  $G = [N, \{P_i\}_{i=1}^N, \{U_i\}_{i=1}^N]$ , όπου  $N$  είναι το σύνολο των παικτών,  $\{P_i\}_{i=1}^N$  είναι το σύνολο των στρατηγικών τους και  $U_i$  είναι η συνάρτηση χρησιμότητας του παίκτη  $i$ . Στο συγκεκριμένο παίγνιο, οι παίκτες είναι τα δορυφορικά τερματικά που βρίσκονται στην ίδια δέσμη εξυπηρέτησης του δορυφόρου, ενώ το σύνολο στρατηγικών αποτελείται από τα επιτρεπόμενα επίπεδα ισχύος του κάθε δορυφορικού τερματικού, δηλαδή  $P_i \in [0, P_{max}]$ , όπου  $P_{max}$  είναι η μέγιστη ισχύς εκπομπής του κάθε τερματικού. Η συνάρτηση χρησιμότητας  $U_i$  ορίζεται επίσης ως  $U_i(p_i, \mathbf{p}_{-i})$  όπου  $\mathbf{p}_{-i}$  είναι τα επίπεδα ισχύος όλων των τερματικών εκτός του τερματικού  $i$  και εκφράζει τη διαφορά ανάμεσα σε μια συνάρτηση ανταμοιβής και μια συνάρτηση τιμολόγησης. Συγκεκριμένα, η συνάρτηση ανταμοιβής είναι ανάλογη με τη χωρητικότητα κατά Shannon κάθε δορυφορικού τερματικού, ενώ η συνάρτηση τιμολόγησης είναι γραμμική ως προς την ισχύ μετάδοσης κάθε τερματικού, καθορίζοντας την ειδική τιμή, την οποία πρέπει να πληρώσει ο δορυφορικός χρήστης προκειμένου να εκπέμψει στο



συγκεκριμένο επίπεδο ισχύος. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η συνάρτηση τιμολόγησης εισάγεται προκειμένου να προτρέψει τους δορυφορικούς χρήστες να χρησιμοποιούν αποδοτικότερα τους πόρους του συστήματος. Επομένως, η συνάρτηση χρησιμότητας ορίζεται μαθηματικά ως εξής:

$$U_i(p_i, \mathbf{p}_{-i}) = a_i B \log_2 \left( 1 + \frac{p_i h_i}{B \left( N_0 + \sum_{j \neq i} p_j h_j \right)} \right) - c_i p_i \quad (4.4)$$

όπου  $a_i$  είναι μια σταθερά που δείχνει την επιθυμία του δορυφορικού χρήστη για υψηλή χωρητικότητα,  $B$  είναι το εύρος ζώνης που χρησιμοποιεί κάθε δορυφορικό τερματικό και θεωρείται ίσο για όλα τα τερματικά,  $N_0$  είναι η φασματική πυκνότητα του θορύβου και  $h_i$  είναι το κέρδος διαδρομής του τερματικού  $i$  προς τον δορυφόρο. Όσον αφορά την παράμετρο  $c_i$ , αυτή αποτελεί την παράμετρο τιμολόγησης, η οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση είτε θεωρείται σταθερή, είτε είναι συνάρτηση του κέρδους καναλιού  $h_i$ . Συγκεκριμένα, στο σενάριο υλοποίησης που ακολουθεί, συγκρίνουμε δυο διαφορετικές προσεγγίσεις του σχήματος τιμολόγησης. Στην πρώτη προσέγγιση κατά την οποία η παράμετρος  $c_i$  είναι σταθερή, το σχήμα ονομάζεται στατικό σχήμα τιμολόγησης, ενώ στη δεύτερη προσέγγιση (δυναμικό σχήμα), η παράμετρος τιμολόγησης είναι μια συνάρτηση του κέρδους διαδρομής του τερματικού ( $c_i = f(h_i)$ ), η οποία συμπεριλαμβάνει τις απώλειες διαδρομής και την εξασθένηση λόγω βροχής. Θα πρέπει να σημειωθεί ωστόσο ότι στη μαθηματική ανάλυση του προβλήματος, χρησιμοποιείται η παράμετρος  $c_i$  εκφράζοντας παράλληλα και τις δύο προσεγγίσεις. Επίσης, για λόγους ευκολίας, ορίζονται οι ακόλουθες παράμετροι:

$$d_i = \frac{a_i B h_i}{\ln(2) c_i} - N_0 B \quad \text{και} \quad I_i = \sum_{j \neq i} h_j p_j$$

όπου η παράμετρος  $I_i$  απεικονίζει ουσιαστικά τη λαμβανομένη ισχύ στο δορυφόρο από όλα τα τερματικά εκτός του τερματικού  $i$ .

Όπως σε κάθε μη συνεργατικό παίγνιο, κάθε τερματικό προσπαθεί να μεγιστοποιήσει τη συνάρτηση χρησιμότητας του ως προς τις στρατηγικές ισχύος των άλλων τερματικών και επιλέγει ένα επίπεδο ισχύος  $p_i$  τέτοιο ώστε  $p_i \in P_i$ . Επομένως, το μη συνεργατικό παίγνιο ελέγχου ισχύος μπορεί να εκφραστεί ως το ακόλουθο πρόβλημα βελτιστοποίησης για κάθε χρήστη:

$$\max_{p_i \in P_i} U_i(p_i, \mathbf{p}_{-i}) \quad \text{για κάθε } i \in N \quad (4.5)$$

Όπως αναλύεται στο προηγούμενο κεφάλαιο, έχοντας εκφράσει το πρόβλημα βελτιστοποίησης που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο μη συνεργατικό παίγνιο, το επόμενο βήμα στην ανάλυση του παιγνίου είναι η μελέτη ύπαρξης και μοναδικότητας της ισορροπίας Nash. Αναλυτικότερα, το σημείο ισορροπίας για το συγκεκριμένο παίγνιο ορίζεται ως εξής:

**Ορισμός 4.1.** Ένα διάνυσμα ισχύος  $\mathbf{p}^* = (p_1^*, \dots, p_N^*)$  αποτελεί μια ισορροπία Nash του παιγνίου ελέγχου ισχύος  $G$ , αν για κάθε  $i \in N$ , ισχύει η σχέση

$$U_i(p_i^*, \mathbf{p}_{-i}^*) \geq U_i(p_i', \mathbf{p}_{-i}^*)$$

για όλα τα  $p_i' \in P_i$ .

Προκειμένου να αποδειχθεί η ύπαρξη της ισορροπίας Nash για το συγκεκριμένο παίγνιο, χρησιμοποιείται το θεώρημα του Debreu (Θεώρημα 3.2), το οποίο ορίζεται στο κεφάλαιο 3. Συγκεκριμένα, ορίζοντας το παίγνιο  $G = [N, \{P_i\}_{i=1}^N, \{U_i\}_{i=1}^N]$  ως το μη συνεργατικό παίγνιο ελέγχου ισχύος  $N$  ατόμων, είναι προφανές ότι το  $P_i$  είναι ένα μη κενό, συμπαγές, κυρτό σύνολο και ότι η συνάρτηση χρησιμότητας είναι συνεχής στο  $P_i$ . Επιπλέον, υπολογίζοντας τη δεύτερη παράγωγο της συνάρτησης χρησιμότητας, είναι εμφανές ότι αυτή είναι αρνητική. Συγκεκριμένα, ισχύει:

$$\frac{\partial^2 U_i(p_i, \mathbf{p}_{-i})}{\partial p_i^2} = -\frac{a_i B h_i^2}{\ln(2)[(B(N_0 + I_i) + p_i h_i)]^2} < 0. \quad (4.6)$$

Επομένως, αποδεικνύεται ότι η συνάρτηση χρησιμότητας είναι κοίλη ως προς το  $p_i$ , άρα το θεώρημα του Debreu ισχύει και το συγκεκριμένο παίγνιο έχει τουλάχιστον μία ισορροπία Nash. Λόγω της μορφής της συνάρτησης χρησιμότητας του μη συνεργατικού παιγνίου ελέγχου ισχύος, για την απόδειξη της μοναδικότητας της ισορροπίας Nash, χρησιμοποιείται το θεώρημα 3.1 από το (Alpcan et al., 2002). Επομένως, προκύπτει αντίστοιχα το ακόλουθο θεώρημα:

**Θεώρημα 4.1.** Στο μη συνεργατικό παίγνιο ελέγχου ισχύος με  $N$  χρήστες, θεωρείται ότι οι χρήστες ταξινομούνται έτσι ώστε αν  $d_i < d_j \Rightarrow i > j$ . Έστω  $N^* \leq N$ , ο μεγαλύτερος ακέραιος  $\tilde{N}$  για τον οποίο ικανοποιείται η ακόλουθη συνθήκη:

$$d_{\tilde{N}} > \frac{B}{(1 - B + \tilde{N} B)} \sum_{i=1}^{\tilde{N}} d_i \quad (4.7)$$

τότε το παίγνιο ελέγχου ισχύος έχει μοναδική ισορροπία Nash, η οποία έχει την ιδιότητα οι χρήστες  $N^* + 1, \dots, N$  να έχουν μηδενικά επίπεδα ισχύος, ενώ τα επίπεδα ισχύος για τους πρώτους  $N^*$  χρήστες μπορούν να βρεθούν από την σχέση:

$$p_i^* = \frac{1}{h_i} \left\{ \frac{1}{(1 - B)} \left( d_i - \frac{B}{(1 - B + N^* B)} \sum_{i=1}^{N^*} d_i \right) \right\} \quad (4.8)$$

Σε περίπτωση που δεν υπάρχει  $\tilde{N}$  για το οποίο να ισχύει η σχέση (4.7), τότε η ισορροπία Nash είναι και πάλι μοναδική, αλλα αντιστοιχεί σε μηδενικά επίπεδα ισχύος για όλους τους χρήστες.

Έχοντας αποδείξει ότι το παίγνιο έχει μοναδική ισορροπία Nash, χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος ανανέωσης βάσει της συνάρτησης βέλτιστης απόκρισης προκειμένου να βρεθεί το σημείο ισορροπίας. Συγκεκριμένα, θέτοντας

$$\frac{\partial U_i(p_i, \mathbf{p}_{-i})}{\partial p_i} = 0 \Rightarrow \frac{a_i B h_i}{\{B(N_0 + I_i) + p_i h_i\} \ln(2)} - c_i = 0 \quad (4.9)$$

προκύπτει η συνάρτηση βέλτιστης απόκρισης του χρήστη  $i$  ως προς ένα δεδομένο διάνυσμα παρεμβολών ως εξής:

$$p_i = \max \left( 0, \frac{a_i B}{c_i \ln(2)} - \frac{B(N_0 + I_i)}{h_i} \right) = \max \left( 0, \frac{d_i}{h_i} - \frac{I_i}{h_i} \right). \quad (4.10)$$

Δεδομένου ότι για να υπολογιστεί η συνάρτηση βέλτιστης απόκρισης, θα πρέπει να είναι γνωστή η λαμβανόμενη ισχύς στο δορυφόρο από τα υπόλοιπα τερματικά, δηλαδή η παράμετρος  $I_i$ , θεωρείται

Παράμετρος	Τιμή παραμέτρου
Συχνότητα	14 GHz
$N_0$	$5 \cdot 10^{-25}$
Απόσταση δορυφόρου-τερματικών	37000 km
Αριθμός δορυφορικών τερματικών	10-100
$\alpha$ (σταθερά)	20

Πίνακας 4.1: Παράμετροι για σενάριο υλοποίησης

ότι ο δορυφόρος ενημερώνει τα δορυφορικά τερματικά για τη συνολική ισχύ που λαμβάνει και στη συνέχεια το κάθε τερματικό αφαιρεί τη δική του συνεισφορά από το συγκεκριμένο όρο, υπολογίζοντας το  $I_i$ . Επιπλέον, παρατηρώντας την (4.10), είναι εμφανές ότι για να είναι ενεργός ένας χρήστης και να έχει θετικό επίπεδο ισχύος, θα πρέπει να ισχύει  $d_i > 0$  και  $d_i > I_i \Rightarrow d_i > \sum_{i \neq j} h_j p_j$ , το οποίο δείχνει ουσιαστικά ότι σε περίπτωση που η τιμή  $c_i$  τεθεί πολύ υψηλά για ένα χρήστη, τότε ο χρήστης προτιμάει να μην εκπέμψει καθόλου.

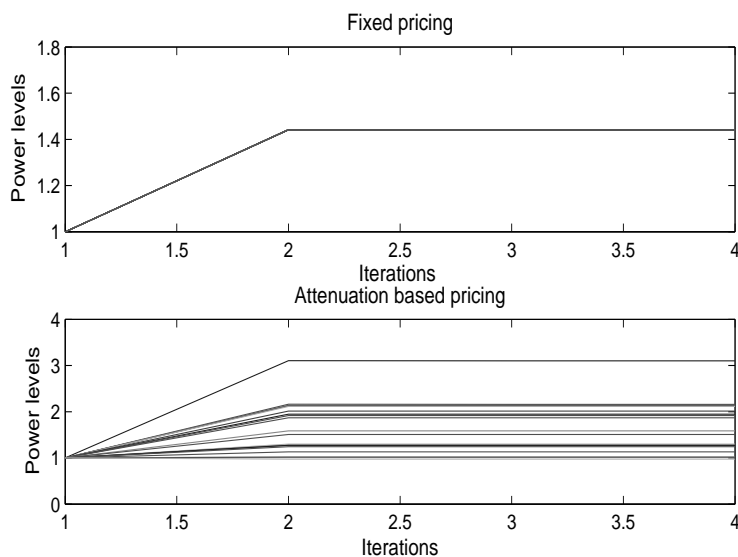
### Αριθμητική ανάλυση προτεινόμενου μηχανισμού ελέγχου ισχύος

Προκειμένου να μελετηθεί η απόδοση του προτεινόμενου μηχανισμού ελέγχου ισχύος, υλοποιήθηκε ένας σημαντικός αριθμός προσομοιώσεων στο Matlab. Οι παράμετροι του δορυφορικού τηλεπικοινωνιακού δικτύου που υλοποιήθηκε παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για τον υπολογισμό των κερδών διαδρομής καθώς και για το μοντέλο καναλιού της εξασθένησης λόγω βροχής χρησιμοποιήθηκε η μαθηματική μοντελοποίηση που παρουσιάζεται στο (A. D. Panagoulou & Kanellou, 2003), όπου ο συνθέτης εξασθένησης βροχής βασίζεται σε μια λογαριθμικοκανονική κατανομή για τη μακροχρόνια πιθανότητα υπέρβασης για κάθε ζεύξη. Στο συγκεκριμένο σενάριο υλοποίησης, θεωρείται ότι όλοι οι χρήστες έχουν παρόμοια κλιματικά χαρακτηριστικά και συνθήκες καθαρού ουρανού. Συγκεκριμένα, για την περίπτωση της Αθήνας, ο αντίστοιχος δορυφόρος είναι ο Hellas Sat II με γωνία ανύψωσης στις  $39^\circ$ Ε. Επομένως, τα κέρδη καναλιού υπολογίζονται από τη σχέση

$$h_i = \left( \frac{\lambda}{4\pi d_i} \right)^2 \cdot 10^{-A_i/10} \quad (4.11)$$

όπου  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος του σήματος,  $d_i$  είναι η απόσταση από το τερματικό στο δορυφορικό σταθμό και  $A_i$  είναι η εξασθένηση λόγω βροχής. Όπως προαναφέρεται, στις προσομοιώσεις συγκρίνονται δύο διαφορετικές προσεγγίσεις τιμολόγησης για το προτεινόμενο σχήμα. Στην πρώτη προσέγγιση, η σταθερή παράμετρος τιμολόγησης τέθηκε ίση με 0.1 ενώ στο δυναμικό σχήμα τιμολόγησης, θεωρείται μια γραμμική συνάρτηση του κέρδους καναλιού ( $c_i = m \cdot h_i$ ).

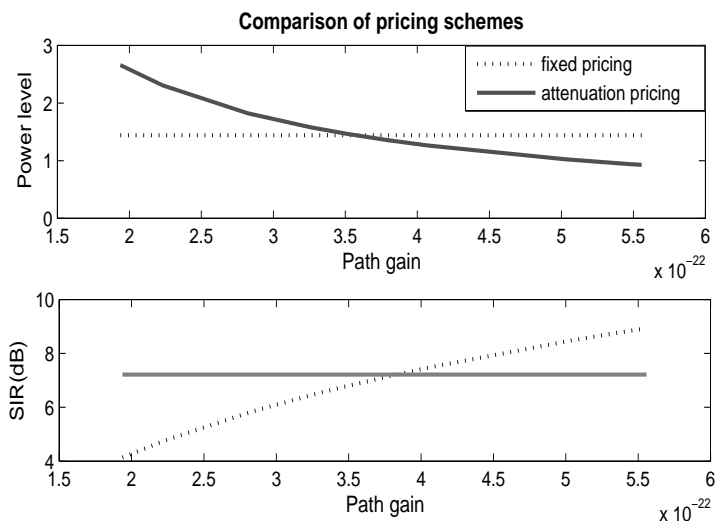
Στο σχήμα 4.2, παρουσιάζεται η σύγκλιση των επιπέδων ισχύος των τερματικών στα επίπεδα ισχύος ισορροπίας, για τα δύο σχήματα τιμολόγησης. Όπως είναι εμφανές, χρησιμοποιώντας το σταθερό σχήμα τιμολόγησης, όλα τα τερματικά συγκλίνουν σε παρόμοια επίπεδα ισχύος δεδομένου ότι τα κέρδη διαδρομής τους παίρνουν πολύ χαμηλές τιμές, με αποτέλεσμα ουσιαστικά να μην διαφοροποιούνται οι χρήστες μεταξύ τους. Αντίθετα, στην περίπτωση της δυναμικής τιμολόγησης, παρατηρείται ότι προκύπτουν διαφορετικά επίπεδα ισχύος ισορροπίας για τον κάθε χρήστη. Και στις



Σχήμα 4.2: Σύγκλιση προτεινόμενου αλγορίθμου

δύο περιπτώσεις, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου είναι εξαιρετικά υψηλή καθώς απαιτούνται μόνο τέσσερις επαναλήψεις για να επιτευχθεί σύγκλιση υψηλής ακρίβειας.

Στη συνέχεια, στο σχήμα 4.3, συγκρίνονται τα δύο διαφορετικά σχήματα τιμολόγησης ως προς

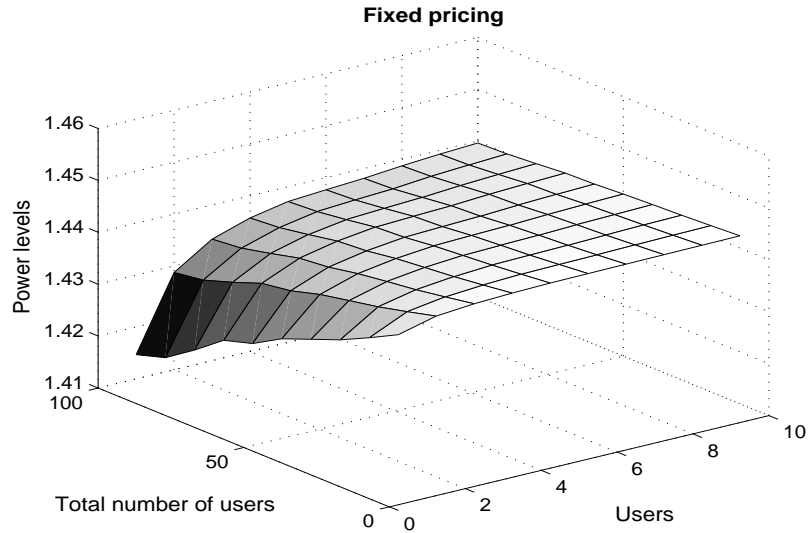


Σχήμα 4.3: Σύγκριση σχημάτων τιμολόγησης ως προς τα επίπεδα ισχύος ισορροπίας και το λόγο SIR

τα επίπεδα ισχύος ισορροπίας και το λόγο σήματος προς παρεμβολή (SIR). Ο άξονας x απεικονίζει τα δορυφορικά τερματικά ταξινομημένα κατά αύξουσες τιμές του κέρδους διαδρομής. Όπως παρατηρείται και από το προηγούμενο σχήμα, τα επίπεδα ισχύος ισορροπίας με το σταθερό σχήμα τιμολόγησης είναι σχεδόν ίδια για όλους τους χρήστες, με αποτέλεσμα οι χρήστες με χαμηλό κέρδος καναλιού να έχουν χαμηλότερες τιμές SIR συγκριτικά με τους χρήστες που διαθέτουν καλύτερο κανάλι προς τον δορυφόρο. Αντίθετα, χρησιμοποιώντας το δυναμικό σχήμα τιμολόγησης, το επίπεδο ισχύος ισορροπίας για τους χρήστες με χαμηλό κέρδος διαδρομής είναι υψηλότερο σε σχέση με το επίπεδο ισχύος ισορροπίας των χρηστών με υψηλό κέρδος διαδρομής, με αποτέλεσμα όλοι οι χρήστες

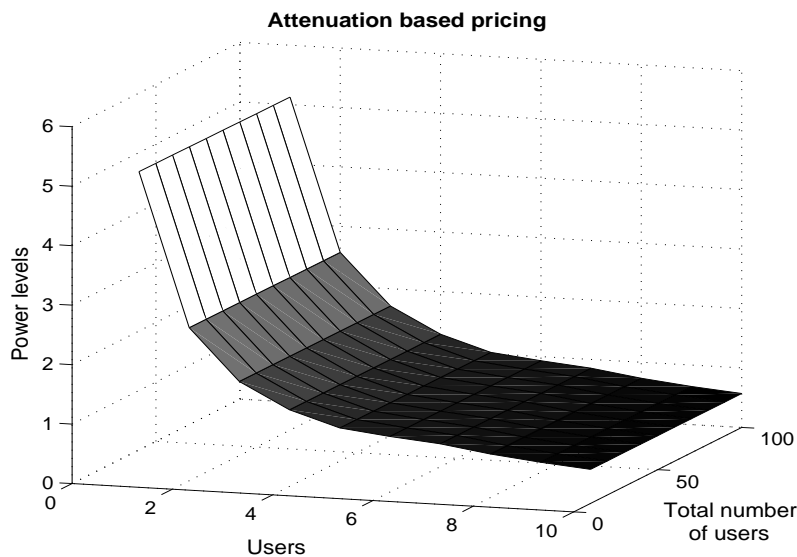
να έχουν παρόμοιες τιμές του SIR, καταλήγοντας σε μια πιο δίκαιη προσέγγιση.

Στη συνέχεια, μελετάται η επίδραση του συνολικού αριθμού τερματικών στα επίπεδα ισχύος



Σχήμα 4.4: Επίδραση του συνολικού αριθμού τερματικών στα επίπεδα ισχύος ισορροπίας για το στατικό σχήμα τιμολόγησης.

ισορροπίας συγκεκριμένων δορυφορικών τερματικών. Συγκεκριμένα, στα σχήματα 4.4 και 4.5, πα-



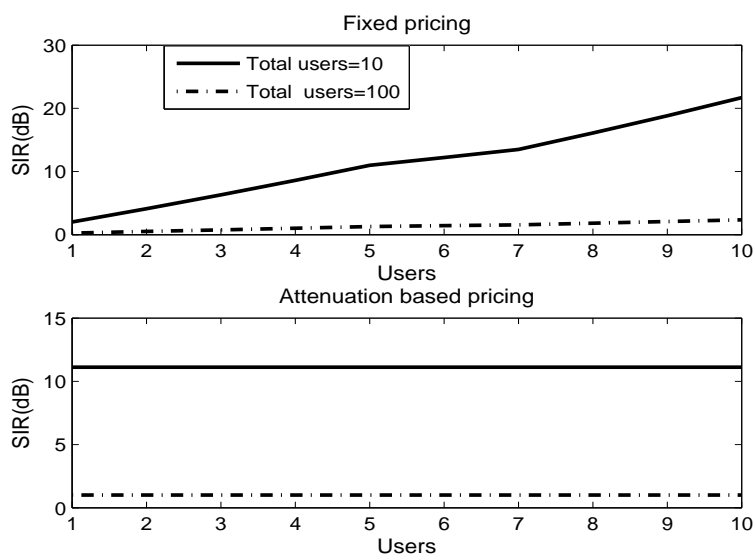
Σχήμα 4.5: Επίδραση του συνολικού αριθμού τερματικών στα επίπεδα ισχύος ισορροπίας για το δυναμικό σχήμα τιμολόγησης.

ρουσιάζονται τα επίπεδα ισχύος ισορροπίας δέκα συγκεκριμένων δορυφορικών χρηστών για διαφορετικές τιμές του αριθμού των συνολικών χρηστών (από δέκα μέχρι εκατό χρήστες) χρησιμοποιώντας το σταθερό και το δυναμικό σχήμα τιμολόγησης, αντίστοιχα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι χρήστες στον άξονα των χρηστών είναι ταξινομημένοι κατά αύξουσες τιμές του κέρδους καναλιού. Μια αρχική παρατήρηση για το σχήμα 4.4, είναι ότι για μικρό αριθμό συνολικών χρηστών, όλα τα δορυφορικά τερματικά έχουν σχεδόν την ίδια ισχύ ισορροπίας, όπως συμπεραίνεται και από τα προηγούμενα σχήματα. Επίσης, παρατηρείται ότι η σταδιακή αύξηση του συνολικού αριθμού των τερματικών ε-

πηρεάζει περισσότερο τα δορυφορικά τερματικά με χαμηλότερα κέρδη καναλιού συγκριτικά με τα τερματικά με υψηλότερες τιμές κέρδους καναλιού για τα οποία η ισχύς ισορροπίας μένει σχεδόν ανεπηρέαστη. Ωστόσο, η αύξηση του συνολικού αριθμού των χρηστών από δέκα σε εκατό χρήστες, ακόμα και στην περίπτωση της μέγιστης επίδρασης, οδηγεί σε μείωση της ισχύος της τάξεως περίπου 2% σε σχέση με την αρχική ισχύ ισορροπίας. Επομένως, προκύπτει το τελικό συμπέρασμα ότι ο συνολικός αριθμός των χρηστών δεν επηρεάζει σημαντικά τα τελικά επίπεδα ισχύος ισορροπίας των χρηστών.

Όσον αφορά την περίπτωση της δυναμικής τιμολόγησης (σχήμα 4.5), παρατηρείται ότι η αύξηση του συνολικού αριθμού των χρηστών οδηγεί σε αμελητέα μείωση του επιπέδου ισχύος ισορροπίας όλων των χρηστών, ανεξάρτητα από το κέρδος διαδρομής του κάθε χρήστη, καταλήγοντας και πάλι στο συμπέρασμα ότι οι τελικές τιμές ισχύος ισορροπίας δεν επηρεάζονται από το συνολικό αριθμό των δορυφορικών τερματικών.

Τέλος, στο σχήμα 4.6, τα δύο σχήματα τιμολόγησης συγκρίνονται ως προς το SIR για τους ίδιους



Σχήμα 4.6: Επίδραση του συνολικού αριθμού τερματικών στο λόγο SIR .

χρήστες που θεωρήθηκαν και προηγουμένως, μεταβάλλοντας πάλι το συνολικό αριθμό των χρηστών. Όπως ήταν αναμενόμενο, χρησιμοποιώντας το σταθερό σχήμα τιμολόγησης, παρατηρείται μια αρκετά σημαντική μείωση του SIR για τους χρήστες με υψηλότερα κέρδη καναλιών, ενώ στο δεύτερο σχήμα, όλοι οι χρήστες έχουν σχεδόν την ίδια μείωση του SIR τους. Επομένως, συμπεραίνεται ότι η αύξηση του συνολικού αριθμού των χρηστών οδηγεί σε υποβάθμιση της ποιότητας υπηρεσίας του κάθε χρήστη, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητο ένα σχήμα ελέγχου αποδοχής προκειμένου να εξασφαλιστεί κάποια επιθυμητή ποιότητα στους υπάρχοντες χρήστες του συστήματος. Επιπλέον, η σύγκριση των δυο σχημάτων τιμολόγησης οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ένα δυναμικό σχήμα τιμολόγησης εκχωρεί περισσότερο δίκαια τους ραδιοπόρους στα δορυφορικά τερματικά παρέχοντας σε όλους τους χρήστες την ίδια ποιότητα επικοινωνίας.

### Συμπεράσματα

Οι μηχανισμοί ελέγχου ισχύος στα δίκτυα δορυφορικών επικοινωνιών αποτελούν ένα σημαντικό θέμα το οποίο δεν έχει μελετηθεί εκτενώς σε αντίθεση με το πρόβλημα εκχώρησης εύρους ζώνης σε

αυτά τα δίκτυα. Στη συγκεκριμένη υποενότητα, αναλύθηκε το πρόβλημα του ελέγχου ισχύος στις δορυφορικές επικοινωνίες, χρησιμοποιώντας αρχές από τη θεωρία παιγνίων. Αναλυτικότερα, το αρχικό πρόβλημα μοντελοποιήθηκε σαν ένα μη συνεργατικό παίγνιο με τιμολόγηση και υπολογίστηκε η μοναδική ισορροπία Nash του παιγνίου. Επιπλέον, συγκρίνοντας δύο διαφορετικά σχήματα τιμολόγησης ως προς τα επίπεδα ισχύος ισορροπίας και το αντίστοιχο SIR, εξήχθη το συμπέρασμα ότι το δυναμικό σχήμα τιμολόγησης που εξαρτάται από το κανάλι του τερματικού προς τον δορυφόρο αποτελεί μια πιο δίκαιη προσέγγιση καθώς οδηγεί στις ίδιες τιμές SIR για όλους τους χρήστες ανεξάρτητα από το κέρδος διαδρομής τους και τον συνολικό αριθμό χρηστών.





## Κεφάλαιο 5

# Μηχανισμοί κατανομής εύρους ζώνης σε ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς

Η διαχείριση των ραδιοπόρων, και συγκεκριμένα του εύρους ζώνης στα δίκτυα ασύρματης πρόσβασης αποτελεί ένα από τα πιο κλασικά προβλήματα, τα οποία έχουν απασχολήσει την ερευνητική κοινότητα (Lee et al., 2009). Συγκεκριμένα, δεδομένου ότι το εύρος ζώνης καθορίζει το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης, που δίνεται από τη γνωστή χωρητικότητα κατά Shannon και θέτει ένα άνω όριο στο ρυθμό πρόσβασης στο κανάλι, η βέλτιστη διαχείριση του αποτελεί μεγάλη πρόκληση για κάθε τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Ακόμα πιο ενδιαφέροντα προβλήματα σχεδίασης εμφανίζονται στα ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς, στα οποία χρησιμοποιούνται ετερογενείς ασύρματες τεχνολογίες προκειμένου να παρέχονται υπηρεσίες υψηλού ρυθμού μετάδοσης καθώς και εγγυήσεις για την ποιότητα της υπηρεσίας (QoS).

Τα τελευταία χρόνια έχουν προταθεί στην ερευνητική βιβλιογραφία, πολυάριθμα μοντέλα διαχείρισης εύρους ζώνης για διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων και διαφορετικές ασύρματες εφαρμογές. Τα προτεινόμενα μοντέλα έχουν αυξήσει την ευελιξία της χρήσης του εύρους ζώνης και έχουν ανοίξει επίσης νέες ευκαιρίες προκειμένου οι διαφορετικές ασύρματες τεχνολογίες να χρησιμοποιούν πιο αποδοτικά το εύρος ζώνης. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, το πρόβλημα της διαχείρισης εύρους ζώνης μελετάται εκτενώς, ενώ παράλληλα προτείνονται αποδοτικοί μηχανισμοί εκχώρησης του συγκεκριμένου ραδιοπόρου. Αναλυτικότερα, στην πρώτη ενότητα, προτείνονται τρεις παιγνιοθεωρητικοί μηχανισμοί κατανομής εύρους ζώνης, οι οποίοι εφαρμόζονται σε δορυφορικά δίκτυα νέας γενιάς προκειμένου να μελετηθεί η απόδοσή τους. Στη συνέχεια, το ίδιο πρόβλημα αναλύεται για τη γενική περίπτωση των τηλεπικοινωνιακών δικτύων ασύρματης πρόσβασης και προτείνονται δύο διαφορετικοί αλγόριθμοι για το διαμοιρασμό του φάσματος στους τελικούς χρήστες. Συγκεκριμένα, ο πρώτος αλγόριθμος (κεντρικοποιημένος) βασίζεται στη χρήση γνωστών κανόνων κατανομής για το πρόβλημα της χρεωκοπίας, ενώ ο δεύτερος αλγόριθμος (κατανεμημένος) χρησιμοποιεί αρχές από τη θεωρία σχεδίασης μηχανισμών (mechanism design (Shoham & Leyton-Brown, 2009)) προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη λύση του προβλήματος. Επιπλέον, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια γενικότερη προσέγγιση του προβλήματος εκχώρησης εύρους ζώνης κατά την οποία μελετάται το πρόβλημα κατανομής φάσματος ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος πολλαπλών δορυφόρων. Το συγκεκριμένο πρόβλημα ανάγεται σε ένα παίγνιο πολλαπλών πωλητών-πολλαπλών αγοραστών. Τέλος, προτείνεται ένας μηχανισμός εκχώρησης εύρους ζώνης για την περίπτωση των γνωστικών δικτύων και αναλύεται το πρόβλημα μίσθωσης εύρους ζώνης από τους πρωτεύοντες στους δευτερεύοντες χρήστες.

Σε κάθε ενότητα, παρουσιάζεται, αρχικά, το μοντέλο συστήματος που έχει θεωρηθεί μαζί με το αντίστοιχο πρόβλημα διαχείρισης εύρους ζώνης που πρέπει να επιλυθεί. Στη συνέχεια αναλύεται ο προτεινόμενος μηχανισμός εκχώρησης φάσματος και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τον κάθε αλγόριθμο. Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να τονισθεί ότι η χρήση των προτεινόμενων, καινοτόμων αλγορίθμων δεν περιορίζεται στα συγκεκριμένα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα που περιγράφονται σε κάθε ενότητα, αλλά μπορεί να επεκταθεί και σε άλλα δίκτυα με ελάχιστες προσαρμογές σε κάθε αλγόριθμο.

### 5.1 Παιγνιοθεωρητική προσέγγιση για εκχώρηση εύρους ζώνης σε δορυφορικά δίκτυα

Στη συγκεκριμένη ενότητα μελετάται το πρόβλημα της διαχείρισης εύρους ζώνης σε δορυφορικά δίκτυα DVB-RCS δεδομένου ότι κάθε χρήστης έχει συγκεκριμένες απαιτήσεις εύρους ζώνης, ενώ παράλληλα υπάρχει περιορισμένο συνολικό διαθέσιμο φάσμα στο δίκτυο. Το συγκεκριμένο πρόβλημα αναλύεται και λύνεται χρησιμοποιώντας αρχές από τη μη συνεργατική καθώς και τη συνεργατική θεωρία παιγνίων. Αναλυτικότερα, αρχικά, το πρόβλημα διαχείρισης ραδιοπόρων μοντελοποιείται ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο με συζευγμένους περιορισμούς, για το οποίο υπολογίζεται η κανονικοποιημένη ισορροπία Nash, χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση Nikaido-Isoda μαζί με έναν αλγόριθμο χαλάρωσης. Στη συνέχεια, προκειμένου να βελτιωθεί ο βαθμός δικαιοσύνης του σημείου ισορροπίας του παιγνίου, εισάγεται στο απλό, μη συνεργατικό παίγνιο ένα δυναμικό σχήμα τιμολόγησης. Τέλος, χρησιμοποιώντας αρχές από τη συνεργατική θεωρία παιγνίων, το αρχικό πρόβλημα μοντελοποιείται ως ένα πρόβλημα διαπραγμάτευσης Nash και βρίσκεται η λύση του. Θα πρέπει να τονισθεί ότι η εφαρμογή των προτεινόμενων μηχανισμών στο συγκεκριμένο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο δεν αποκλείει την εφαρμογή τους σε άλλα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα όπου συναντάται παρόμοιο πρόβλημα εκχώρησης εύρους ζώνης.

#### 5.1.1 Περιγραφή προβλήματος εκχώρησης ραδιοπόρων

Για το μοντέλο συστήματος, θεωρείται ένα DVB-RCS δορυφορικό δίκτυο με  $N$  τερματικά (Return Channel Satellite Terminals - RCSTs), παρόμοιο με αυτό που απεικονίζεται στο σχήμα 4.1. Κάθε τερματικό θεωρείται ότι έχει συγκεκριμένες απαιτήσεις εύρους ζώνης ( $B_{demand}$ ), τις οποίες στέλνει στο κέντρο ελέγχου δικτύου (Network Control Center - NCC). Παράλληλα, υπάρχουν κάποιες ελάχιστες τιμές εύρους ζώνης ( $B_{min}$ ) που είναι εγγυημένες σε κάθε τερματικό, έτσι ώστε να είναι σε θέση να λειτουργεί έχοντας ανεκτή ποιότητα επικοινωνίας. Επιπλέον, θεωρείται ότι το συνολικό απαιτούμενο εύρος ζώνης ξεπερνάει το διαθέσιμο εύρος ζώνης του δορυφόρου ( $B_{total}$ ), με αποτέλεσμα ο NCC να πρέπει να καταναίμει αποδοτικά τους φασματικούς πόρους σε όλους τους χρήστες, εκχωρώντας παράλληλα τις ελάχιστες απαιτήσεις πόρων σε κάθε χρήστη. Επομένως, το πρόβλημα εκχώρησης εύρους ζώνης μπορεί να εκφραστεί σαν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης στο οποίο κάθε χρήστης επιθυμεί να μεγιστοποιήσει το ρυθμό μετάδοσης του που δίνεται από το θεώρημα του Shannon, δεδομένων των απαιτήσεων του καθώς και του περιορισμού συνολικού εύρους ζώνης. Μαθηματικά,

το πρόβλημα βελτιστοποίησης για τον χρήστη  $i$  μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\left. \begin{aligned} & \max_{B_i} \left\{ C_i = B_i \log_2 \left( 1 + \frac{ph_i}{N_0 B_i} \right) \right\} \\ & s.t. B_{\min} \leq B_i \leq B_{demand} \\ & \sum_{i=1}^N B_i \leq B_{total} \end{aligned} \right\} (P1) \quad (5.1)$$

όπου  $B_i$  είναι το εύρος ζώνης που εκχωρείται στο τερματικό  $i$ ,  $p$  είναι η ισχύς μετάδοσης που θεωρείται ίση για όλα τα τερματικά,  $h_i$  είναι το κέρδος διαδρομής από το τερματικό  $i$  στο δορυφόρο και  $N_0$  η φασματική πυκνότητα θορύβου.

### 5.1.2 Μη συνεργατικό παίγνιο (NG)

Προκειμένου να επιλυθεί το πρόβλημα βελτιστοποίησης ( $P1$ ) και δεδομένου ότι η επιλογή κάθε χρήστη επηρεάζει ταυτόχρονα και τις επιλογές των υπόλοιπων χρηστών, λόγω της σύζευξης του περιορισμού διαθέσιμου εύρους ζώνης, χρησιμοποιούνται αρχές από τη μη συνεργατική θεωρία παιγνίων. Συγκεκριμένα, ορίζεται ως  $NG = [N, \{B_i\}_{i \in N}, \{u_i\}_{i \in N}]$  το μη συνεργατικό παίγνιο εκχώρησης εύρους ζώνης (NG) όπου  $N$  είναι το σύνολο των τερματικών του DVB-RCS συστήματος,  $\{B_i\}_{i \in N}$  είναι το σύνολο των στρατηγικών τους και  $u_i$  είναι η συνάρτηση χρησιμότητας του χρήστη  $i$ , η οποία έχει τεθεί ίση με το ρυθμό μετάδοσης του συγκεκριμένου χρήστη. Επομένως, κάθε χρήστης προσπαθεί να λύσει το πρόβλημα βελτιστοποίησης, το οποίο ορίζεται ως εξής:

$$\left. \begin{aligned} & \max_{B_i} \left\{ u_i = B_i \log_2 \left( 1 + \frac{ph_i}{N_0 B_i} \right) \right\} \\ & s.t. B_i \in Q_i(\mathbf{B}_{-i}) \end{aligned} \right\} (5.2)$$

όπου  $Q_i(\mathbf{B}_{-i}) \triangleq \left\{ B_i \in [B_{\min}, B_{demand}] : B_i + \sum_{j \neq i} B_j \leq B_{total} \right\}$ .

Δεδομένου ότι το συγκεκριμένο πρόβλημα εκχώρησης φάσματος αποτελεί ένα παίγνιο πολλών χρηστών με συζευγμένους περιορισμούς, ο υπολογισμός της ισορροπίας Nash είναι αρκετά πολύπλοκος. Προκειμένου να απλοποιηθεί η επίλυση του, χρησιμοποιείται η συνάρτηση Nikaido-Isoda μαζί με έναν επαναληπτικό αλγόριθμο χαλάρωσης. Με τον τρόπο αυτό, το αρχικό πρόβλημα υψηλής πολυπλοκότητας μετατρέπεται σε ένα απλό πρόβλημα ελαχιστοποίησης μιας συνάρτησης πολλών μεταβλητών. Ωστόσο, πριν αποδειχθεί η ύπαρξη κανονικοποιημένης ισορροπίας Nash και η σύγκλιση του επαναληπτικού αλγορίθμου χαλάρωσης σε αυτό το σημείο ισορροπίας, κρίνεται απαραίτητος ο ορισμός κάποιων βασικών στοιχείων που απαιτούνται στη συνέχεια.

Έστω ότι  $\mathbf{B} = (B_1, \dots, B_N)$  και  $\mathbf{B}' = (B'_1, \dots, B'_N)$  αποτελούν στοιχεία του πεδίου συλλογικών δράσεων, τότε το στοιχείο  $(B_1, \dots, B_{i-1}, B'_i, B_{i+1}, \dots, B_N)$  ορίζεται ως  $(B'_i | \mathbf{B})$ . Βάσει των παραπάνω ορισμών, το σημείο ισορροπίας Nash για το συγκεκριμένο παίγνιο μπορεί να οριστεί ως εξής:

**Ορισμός 5.1.** Έστω ότι το  $\mathbf{B} \subset \mathbb{R}^{m_1} \times \dots \times \mathbb{R}^{m_N} = \mathbb{R}^m$  αποτελεί το πεδίο συλλογικών δράσεων των παικτών και η συνάρτηση  $\varphi_i : \mathbf{B} \rightarrow \mathbb{R}$  αποτελεί τη συνάρτηση χρησιμότητας του παίκτη  $i$ , όπου  $i \in N$ . Τότε το σημείο  $\mathbf{B}^*$  ονομάζεται σημείο ισορροπίας αν για κάθε  $i$ , ισχύει  $\varphi_i(\mathbf{B}^*) = \max_{B_i \in \mathbb{R}^{m_i}} \varphi_i(B_i | \mathbf{B}^*)$ .

Στη συνέχεια, δίνεται ο ορισμός της συνάρτησης Nikaido-Isoda (Nikaido & Isoda, 1955).

**Ορισμός 5.2.** : Έστω  $\varphi_i$  η συνάρτηση χρησιμότητας του παίκτη  $i$ . Τότε, η συνάρτηση Nikaido-Isoda  $\Psi : (B_1 \times \dots \times B_n) \times (B_1 \times \dots \times B_n) \rightarrow \mathbb{R}$  ορίζεται ως εξής:

$$\Psi(\mathbf{B}, \mathbf{B}') = \sum_{i=1}^N [\varphi_i(B'_i | \mathbf{B}) - \varphi_i(\mathbf{B})]. \quad (5.3)$$

Κάθε άθροισμα της (5.3) απεικονίζει ουσιαστικά τη βελτίωση της χρησιμότητας που θα έχει ένας παίκτης αλλάζοντας τη στρατηγική του από  $B_i$  σε  $B'_i$ , δεδομένου ότι όλοι οι άλλοι παίκτες συνεχίζουν να παίζουν τη στρατηγική  $\mathbf{B}$ . Στο (Krawczyk & Uryasev, 2000), αποδεικνύεται ότι η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει η συγκεκριμένη συνάρτηση είναι πάντα μη αρνητική, για ένα δεδομένο  $\mathbf{B}$ . Επιπλέον, ένα άμεσο συμπέρασμα από τον ορισμό της συνάρτησης Nikaido-Isoda είναι ότι ισχύει η σχέση  $\Psi(\mathbf{B}, \mathbf{B}) \equiv 0$ , για κάθε  $\mathbf{B} \in B$ . Επίσης, στην περίπτωση που το σημείο  $\mathbf{B}^*$  είναι ένα σημείο ισορροπίας Nash, τότε η συνάρτηση (5.3) είναι παντού μη θετική για όλα τα εφικτά  $\mathbf{B}'$ , καθώς στην κατάσταση ισορροπίας κανένας παίκτης δεν μπορεί να βελτιώσει τη χρησιμότητα του αλλάζοντας τη στρατηγική του και επομένως, κάθε άθροισμα στην (5.3) μπορεί να είναι το πολύ ίσο με μηδέν. Βάσει της συγκεκριμένης παρατήρησης, προκύπτει το συμπέρασμα ότι όταν η συνάρτηση Nikaido-Isoda δεν μπορεί να γίνει θετική για ένα δεδομένο  $\mathbf{B}'$ , τότε πρόκειται για σημείο ισορροπίας Nash. Η παρατήρηση αυτή χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την κατασκευή της συνθήκης τερματισμού του επαναληπτικού αλγορίθμου χαλάρωσης. Το σημείο κανονικοποιημένης ισορροπίας Nash μπορεί επίσης να οριστεί με τη βοήθεια της συνάρτησης Nikaido-Isoda ως εξής:

**Ορισμός 5.3.** Ένα στοιχείο  $\mathbf{B}^* \in B$  αναφέρεται ως κανονικοποιημένη ισορροπία Nash αν ισχύει  $\max_{\mathbf{B}' \in B} \Psi(\mathbf{B}^*, \mathbf{B}') = 0$ .

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το σημείο κανονικοποιημένης ισορροπίας Nash αντιστοιχεί σε σημείο ισορροπίας Nash και το αντίστροφο (Aubin, 2007). Στη συνέχεια, προκειμένου να βρεθεί η κανονικοποιημένη ισορροπία Nash, χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος που βασίζεται στη συνάρτηση Nikaido-Isoda καθώς και στη συνάρτηση βέλτιστης απόκρισης, η οποία ορίζεται στη συνέχεια.

**Ορισμός 5.4.** Η συνάρτηση βέλτιστης απόκρισης στο σημείο  $\mathbf{B}$  ορίζεται ως εξής:

$$Z(\mathbf{B}) = \arg \max_{\mathbf{B}' \in B} \Psi(\mathbf{B}, \mathbf{B}') \quad (5.4)$$

και επιστρέφει το σύνολο των στρατηγικών των παικτών σύμφωνα με το οποίο όλοι οι παίκτες προσαθούν να μεγιστοποιήσουν τη συνάρτηση χρησιμότητας τους.

Αναλυτικότερα, στη συγκεκριμένη περίπτωση, κατά την οποία είναι επιθυμητή η εύρεση της κανονικοποιημένης ισορροπίας Nash για το παίγνιο εκχώρησης εύρους ζώνης και θεωρώντας ότι υπάρχει κάποια αρχική εκτίμηση της εκχώρησης, έστω  $\mathbf{B}_0$ , χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος χαλάρωσης που βασίζεται στη σχέση

$$\mathbf{B}^{s+1} = (1 - a_s)\mathbf{B}^s + a_s Z(\mathbf{B}^s) \quad (5.5)$$

όπου  $0 < a_s \leq 1$ ,  $s = 0, 1, 2, \dots$  είναι μια σταθερή παράμετρος χαλάρωσης.

Χρησιμοποιώντας το συγκεκριμένο αλγόριθμο, ο επιθυμητός στόχος είναι μετά από κάθε επανάληψη να προκύπτει ένα σημείο που οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα της συνάρτησης χρησιμότητας σε σχέση με το προηγούμενο σημείο, έτσι ώστε μετά από αρκετές επαναλήψεις του αλγορίθμου να

είναι εφικτός ο καθορισμός του σημείου ισορροπίας Nash, με συγκεκριμένη ακρίβεια. Ωστόσο, προκειμένου να αποδειχθεί η ύπαρξη καθώς και η μοναδικότητα της κανονικοποιημένης ισορροπίας Nash και να εξασφαλιστεί η σύγκλιση του αλγόριθμου χαλάρωσης στο σημείο αυτό, θα πρέπει να ικανοποιούνται οι συνθήκες που αναφέρονται στο επόμενο θεώρημα (Uryasev & Rubinstein, 1994).

**Θεώρημα 5.1.** Για το παίγνιο εκχώρησης εύρους ζώνης υπάρχει μοναδικό σημείο κανονικοποιημένης ισορροπίας Nash στο οποίο συγκλίνει ο αλγόριθμος χαλάρωσης (5.5) αν:

1. Το  $B$  είναι ένα συμπαγές, κυρτό σύνολο του  $\mathbb{R}^m$ .
2. Η συνάρτηση Nikaido-Isoda  $\Psi : B \times B \rightarrow \mathbb{R}$  είναι μια ασθενώς κυρτή-κοίλη συνάρτηση και  $\Psi(\mathbf{B}, \mathbf{B}) = 0$  για  $\mathbf{B} \in B$ .
3. Η συνάρτηση βέλτιστης απόκρισης  $Z(\mathbf{B})$  είναι μια μονοσήμαντη συνάρτηση, συνεχής στο  $B$ .
4. Η παράμετρος χαλάρωσης  $a_s$  ικανοποιεί τις ακόλουθες συνθήκες
  - $a_s > 0$
  - $\sum_{s=0}^{\infty} a_s = \infty$
  - $a_s \rightarrow 0$  καθώς  $s \rightarrow \infty$ .

*Απόδειξη.* Το μη συνεργατικό παίγνιο της εκχώρησης εύρους ζώνης αποτελεί ένα παίγνιο συζευγμένων περιορισμών καθώς το εκχωρημένο εύρος ζώνης πρέπει να είναι μικρότερο ή ίσο με το συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης. Συνεπώς, οι συνιστώσες της συνάρτησης Nikaido-Isoda είναι οι συναρτήσεις Lagrange της συνάρτησης χρησιμότητας των παικτών και όχι οι συναρτήσεις χρησιμότητας τους, με αποτέλεσμα η συνάρτηση Nikaido-Isoda να ορίζεται μαθηματικά ως

$$\Psi(\mathbf{B}, \mathbf{B}') = \sum_{i=1}^N [\varphi_i(B'_i | \mathbf{B}) - \varphi_i(\mathbf{B})] \quad (5.6)$$

όπου

$$\varphi_i(\mathbf{B}) = B_i \log_2 \left( 1 + \frac{p h_i}{N_o B_i} \right) + \lambda \left( B_{total} - \sum_{i=1}^N B_i \right). \quad (5.7)$$

Επιπλέον, ο αλγόριθμος χαλάρωσης δίνεται από την σχέση (5.5), όπου στη συγκεκριμένη περίπτωση το  $a_s$  έχει θεωρηθεί ως σταθερή παράμετρος. Προκειμένου να αποδειχθεί ότι ισχύει το προαναφερόμενο θεώρημα, αποδεικνύεται η ισχύς της κάθε συνθήκης ξεχωριστά.

1. Είναι εμφανές ότι το  $B$  αποτελεί ένα μη κενό, κυρτό και συμπαγές υποσύνολο του  $\mathbb{R}^m$ .
2. Αρχικά, θα πρέπει να οριστούν οι συνθήκες υπό τις οποίες η συνάρτηση  $\Psi : B \times B \rightarrow \mathbb{R}$  αποτελεί μια ασθενώς κυρτή-κοίλη συνάρτηση. Για το λόγο αυτό ακολουθεί ο ορισμός μιας κυρτής-κοίλης συνάρτησης.

**Ορισμός 5.5.** Έστω μια συνάρτηση  $\Psi : X \times X \rightarrow \mathbb{R}$ , όπου  $X$  είναι ένα κυρτό, κλειστό υποσύνολο του ευκλείδειου χώρου  $\mathbb{R}^m$ , τότε η συνάρτηση  $\Psi(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  ονομάζεται ασθενώς κυρτή-κοίλη συνάρτηση αν είναι ασθενώς κυρτή στο  $X$  ως προς το πρώτο όρισμα και ασθενώς κοίλη στο  $X$  ως προς το δεύτερο όρισμα.

Αναλύοντας τη συνάρτηση Nikaido-Isoda που αντιστοιχεί στο θεωρούμενο πρόβλημα εκχώρησης εύρους ζώνης, προκύπτει η ακόλουθη σχέση :

$$\begin{aligned}\Psi(\mathbf{B}, \mathbf{B}') &= \sum_{i=1}^N [\varphi_i(B'_i | \mathbf{B}) - \varphi_i(\mathbf{B})] \Rightarrow \\ \Psi(\mathbf{B}, \mathbf{B}') &= \sum_{i=1}^N \left[ B'_i \log_2 \left( 1 + \frac{ph_i}{N_0 B'_i} \right) - \lambda B'_i - B_i \log_2 \left( 1 + \frac{ph_i}{N_0 B_i} \right) + \lambda B_i \right]\end{aligned}\quad (5.8)$$

Στη συνέχεια, προκειμένου να βρεθεί αν η συγκεκριμένη συνάρτηση είναι ασθενώς κυρτή, στο  $B$ , ως προς το διάνυσμα  $\mathbf{B}$ , υπολογίζεται ο Εσσιανός (Hessian) πίνακας ως προς το διάνυσμα  $\mathbf{B}$ , ο οποίος προκύπτει ίσος με :

$$\Psi_{\mathbf{B}\mathbf{B}}(\mathbf{B}, \mathbf{B}') = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \Psi(\mathbf{B}, \mathbf{B}')}{\partial^2 B_1} & \cdots & \frac{\partial^2 \Psi(\mathbf{B}, \mathbf{B}')}{\partial B_1 \partial B_N} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial^2 \Psi(\mathbf{B}, \mathbf{B}')}{\partial B_N \partial B_1} & \cdots & \frac{\partial^2 \Psi(\mathbf{B}, \mathbf{B}')}{\partial^2 B_N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \Psi(\mathbf{B}, \mathbf{B}')}{\partial^2 B_1} & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & \frac{\partial^2 \Psi(\mathbf{B}, \mathbf{B}')}{\partial^2 B_N} \end{bmatrix}\quad (5.9)$$

Υπολογίζοντας τη δεύτερη παράγωγο της συνάρτησης Nikaido-Isoda ως προς  $B_i$ , είναι εμφανές ότι προκύπτει θετική καθώς ισχύει :

$$\frac{\partial^2 \Psi(\mathbf{B}, \mathbf{B}')}{\partial^2 B_i} = \frac{ph_i N_0}{\ln(2)} \left( \frac{1}{N_0 B_i (N_0 B_i + ph_i)} - \frac{1}{(N_0 B_i + ph_i)^2} \right) > 0\quad (5.10)$$

Επομένως, δεδομένου ότι όλα τα στοιχεία του Εσσιανού πίνακα εκτός της διαγωνίου είναι μηδενικά και τα στοιχεία της διαγωνίου είναι όλα θετικά, ισχύει ότι ο Εσσιανός πίνακας είναι θετικά ορισμένος, το οποίο οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η συνάρτηση  $\Psi(\mathbf{B}, \mathbf{B}')$  είναι κυρτή ως προς το διάνυσμα  $\mathbf{B}$ . Με αντίστοιχο τρόπο, αποδεικνύεται ότι η  $\Psi(\mathbf{B}, \mathbf{B}')$  είναι κοίλη ως προς το διάνυσμα  $\mathbf{B}'$ . Επομένως, η συνθήκη η οποία απαιτεί ότι η  $\Psi(\mathbf{B}, \mathbf{B}')$  πρέπει να είναι ασθενώς κυρτή-κοίλη ικανοποιείται στην περίπτωση του συγκεκριμένου προβλήματος εκχώρησης εύρους ζώνης.

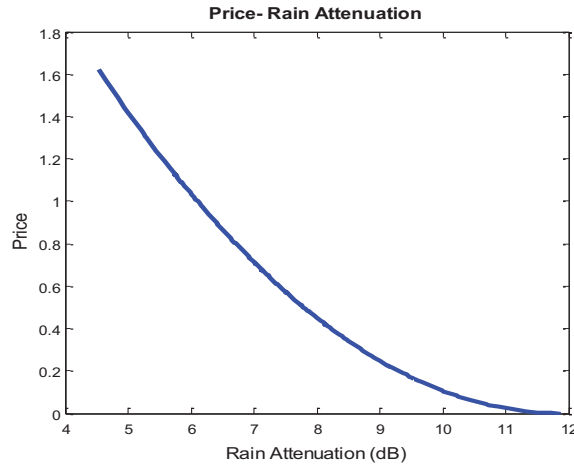
3. Δεδομένου ότι η  $\Psi(\mathbf{B}, \mathbf{B}')$  είναι αυστηρά κοίλη ως προς το  $\mathbf{B}'$ , η συνάρτηση βέλτιστης απόκρισης  $Z(\mathbf{B}) = \arg \max_{\mathbf{B}' \in B} \Psi(\mathbf{B}, \mathbf{B}')$  είναι μονοσήμαντη και συνεχής στο  $B$ .
4. Τέλος, δεδομένου ότι το  $a_s$  έχει θεωρηθεί ως σταθερή παράμετρος, μπορεί επίσης να επιλεγθεί έτσι ώστε οι συνθήκες να ικανοποιούνται.

Επομένως, αποδεικνύεται ότι το μη συνεργατικό παίγνιο της εκχώρησης εύρους ζώνης έχει μοναδική κανονικοποιημένη ισορροπία Nash, στην οποία ο προτεινόμενος αλγόριθμος χαλάρωσης συγκλίνει.  $\square$

Ωστόσο, όπως γίνεται εμφανές και στην ενότητα της αριθμητικής ανάλυσης, το σημείο ισορροπίας δεν αποτελεί μια δίκαιη κατανομή του εύρους ζώνης καθώς εκχωρείται περισσότερο εύρος ζώνης στους χρήστες που έχουν καλό κανάλι συγκριτικά με τους χρήστες που έχουν μεγαλύτερη εξασθένηση καναλιού. Προκειμένου το παίγνιο να συγκλίνει σε ένα πιο δίκαιο σημείο ισορροπίας Nash, στη συνέχεια προσθέεται στο απλό, μη συνεργατικό παίγνιο, ένα δυναμικό σχήμα τιμολόγησης, όπως περιγράφεται στην επόμενη υποενότητα.

### 5.1.3 Μη συνεργατικό παίγνιο με τιμολόγηση (NGP)

Σε αυτή την ενότητα, το πρόβλημα εκχώρησης εύρους ζώνης μοντελοποιείται σαν ένα μη συνεργατικό παίγνιο με τιμολόγηση. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι κάθε χρήστης χρεώνεται για το εκχωρούμενο εύρος ζώνης, ενώ η παράμετρος τιμολόγησης είναι ανάλογη του παράγοντα εξασθένησης λόγω βροχής στην οποία υπόκειται το κέρδος καναλιού του συγκεκριμένου χρήστη. Στο σχήμα 5.1, απεικονίζεται η εικονική τιμή που τίθεται σε κάθε χρήστη ανάλογα με το επίπεδο εξασθένησης του κέρδους καναλιού του. Όπως παρατηρείται από το συγκεκριμένο σχήμα, θεωρείται ότι οι χρήστες που υπόκεινται σε υψηλή εξασθένηση λόγω βροχής έχουν χαμηλότερη τιμή ανά μονάδα εύρους ζώνης σε αντίθεση με τους χρήστες με ευνοϊκότερες συνθήκες καναλιού. Επομένως, το νέο μη συνεργατικό



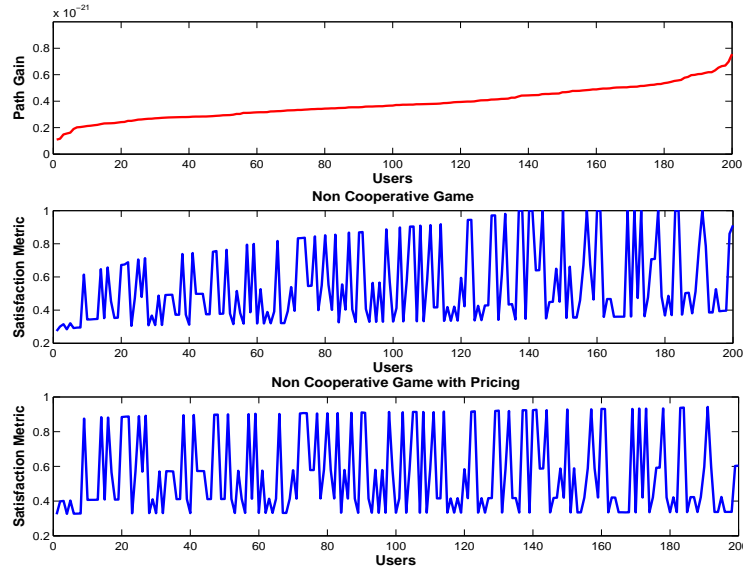
Σχήμα 5.1: Παράμετρος τιμολόγησης συναρτήσει της εξασθένησης λόγω βροχής

παίγνιο ορίζεται ως  $NGP = [N, \{B_i\}_{i \in N}, \{u_i^p\}_{i \in N}]$  όπου  $u_i^p$  είναι η νέα συνάρτηση χρησιμότητας του κάθε τερματικού, η οποία ορίζεται μαθηματικά ως εξής:

$$u_i^p = B_i \log_2 \left( 1 + \frac{p h_i}{N_0 B_i} \right) - f(A_{dB}) \cdot B_i \quad (5.11)$$

όπου  $f(A_{dB})$  είναι η τιμή ανά μονάδα εύρους ζώνης η οποία εξαρτάται από την τρέχουσα τιμή της εξασθένησης λόγω βροχής, όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 5.1.

Χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση Nikaido-Isoda και τον αλγόριθμο χαλάρωσης που αναφέρεται στην προηγούμενη ενότητα αποδεικνύεται με αντίστοιχο τρόπο ότι το προτεινόμενο παίγνιο έχει μια μοναδική κανονικοποιημένη ισορροπία Nash, στην οποία ο αλγόριθμος συγκλίνει. Όπως ήταν αναμενόμενο, στο σημείο ισορροπίας, τα τερματικά που επηρεάζονται περισσότερο από τη βροχή αποκτούν περισσότερο εύρος ζώνης σε σχέση με τα αποτελέσματα του παιγνίου χωρίς τιμολόγηση. Αυτό γίνεται εμφανές και στο σχήμα 5.2, όπου παρουσιάζεται μια μετρική της ικανοποίησης των χρηστών ( $B_i/B_{i,demand}$ ) για τα δύο μη συνεργατικά σχήματα. Στο σχήμα αυτό έχει θεωρηθεί ότι οι χρήστες έχουν διαφορετικές απαιτήσεις εύρους ζώνης καθώς και διαφορετικά κέρδη διαδρομών, μεταξύ τους. Δεδομένου ότι στον άξονα  $x$  απεικονίζονται οι χρήστες του δορυφορικού συστήματος τοποθετημένοι κατά αύξουσα τιμή του κέρδους διαδρομής τους, παρατηρείται ότι στο απλό μη συνεργατικό παίγνιο



Σχήμα 5.2: Δείκτης ικανοποίησης των χρηστών για τα δύο μη συνεργατικά παίγνια

εκχωρείται λιγότερο εύρος ζώνης στους χρήστες οι οποίοι έχουν μεγαλύτερη εξασθένηση καναλιού, ενώ εκχωρείται περισσότερο εύρος ζώνης στους χρήστες που διαθέτουν καλό κανάλι. Εισάγοντας το προτεινόμενο σχήμα τιμολόγησης, είναι εμφανές ότι προκύπτει μια περισσότερο δίκαιη κατανομή, καθώς ο δείκτης ικανοποίησης φαίνεται να εξαρτάται πλέον αποκλειστικά από τις απαιτήσεις εύρους ζώνης των χρηστών και όχι από την κατάσταση του καναλιού τους.

#### 5.1.4 Συνεργατικό παίγνιο (NBS)

Η τελευταία προσέγγιση που αναλύεται σε αυτήν την υποενότητα βασίζεται σε αρχές της συνεργατικής θεωρίας παιγνίων και συγκεκριμένα στη διαπραγμάτευση Nash. Όπως αναφέρεται στην ενότητα για τη συνεργατική θεωρία παιγνίων (3<sup>ο</sup> κεφάλαιο), σε ένα συνεργατικό παίγνιο, θεωρείται ότι οι παίκτες είναι ελεύθεροι να συνεργαστούν και να διαπραγματευτούν προκειμένου να κερδίσουν κάποιο αμοιβαίο πλεονέκτημα σε αντίθεση με το μη συνεργατικό (ανταγωνιστικό) παίγνιο. Αντίστοιχα, σε αυτή την υποενότητα, το πρόβλημα της εκχώρησης εύρους ζώνης μοντελοποιείται σαν ένα πρόβλημα διαπραγμάτευσης  $N$  ατόμων και υπολογίζεται η λύση της διαπραγμάτευσης που καθορίζεται από τον Nash (J. F. Nash, 1950), όπως ορίζεται στο κεφάλαιο 3 (ορισμός 3.9).

Αναλυτικότερα, για το πρόβλημα εκχώρησης εύρους ζώνης που θεωρείται στη συγκεκριμένη ενότητα, χρησιμοποιείται η μη συμμετρική διαπραγμάτευση Nash (Zhou, 1997), προκειμένου να έχουν προτεραιότητα οι χρήστες με εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Επομένως, βάσει του θεωρήματος 3.7, το σημείο NBS του παιγνίου εκχώρησης εύρους ζώνης είναι η λύση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης (P2) που εκφράζεται ως:

$$\left. \begin{aligned} & \max_{\mathbf{B} \in B} \prod_{i=1}^N (u_i(\mathbf{B}) - u_i^0(\mathbf{B}_{\min}))^{priority} \\ & s.t. \sum_{i=1}^N B_i \leq B_{total}, B_{\min} \leq B_i \leq B_{demand} \end{aligned} \right\} \quad (P2) \quad (5.12)$$



Δεδομένου ότι η αντικειμενική συνάρτηση είναι κοίλη στο κυρτό σύνολο  $B$ , ισχύει ότι έχει μοναδικό σημείο βελτιστοποίησης. Επομένως, το πρόβλημα βελτιστοποίησης ( $P2$ ) έχει μοναδική λύση η οποία υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο προβολής κλίσης (gradient projection).

### 5.1.5 Αριθμητική ανάλυση προτεινόμενων μηχανισμών

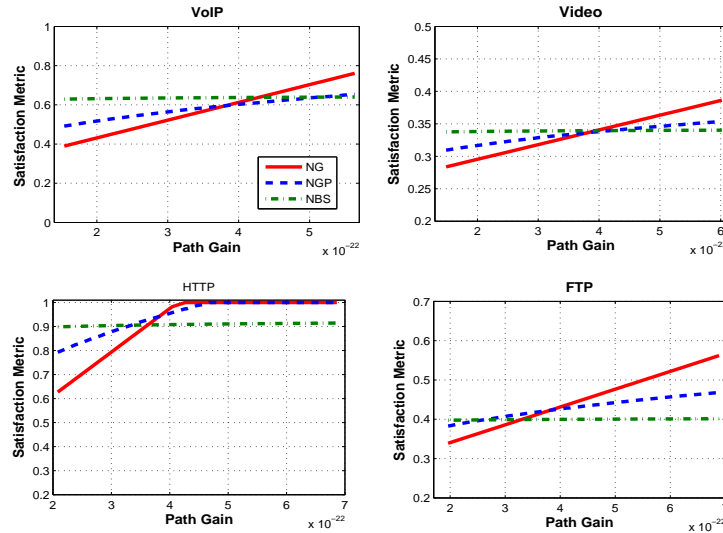
Προκειμένου οι τρεις προτεινόμενοι μηχανισμοί εκχώρησης εύρους ζώνης να αναλυθούν αριθμητικά και να συγκριθεί η απόδοσή τους, υλοποιήθηκε ένας μεγάλος αριθμός προσομοιώσεων στο Matlab. Οι παράμετροι του DVB-RCS συστήματος που υλοποιήθηκε παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1. Για τα κέρδη διαδρομών και το μοντέλο καναλιού δεδομένης της εξασθένησης λόγω βροχής χρησιμοποιήθηκε η μαθηματική μοντελοποίηση που παρουσιάζεται στο (A. D. Panagoroulos & Kaneloroulos, 2003). Στη συγκεκριμένη εργασία, ο συνθέτης εξασθένησης λόγω βροχής χρησιμοποιεί τη λογαριθμοκανονική κατανομή σε κάθε ζεύξη. Επιπλέον, για το υπό μελέτη σενάριο θεωρείται ότι όλοι οι χρήστες έχουν παρόμοιες συνθήκες καθαρού ουρανού και κλιματικά χαρακτηριστικά. Στην περίπτωση του συγκεκριμένου σεναρίου, γίνεται αναφορά στην περιοχή της Αθήνας, στην Ελλάδα, όπου ο αντίστοιχος δορυφόρος είναι ο Hellas Sat II , 39°Ε. Επιπρόσθετα, θεωρείται ένα απλό μοντέλο

Παράμετρος	Τιμή παραμέτρου
Συχνότητα	14 GHz
$N_0$	$5 \cdot 10^{-25}$
Απόσταση δορυφόρου-τερματικών	37000 km
Αριθμός δορυφορικών τερματικών	200
Ισχύς εκπομπής άνω ζεύξης	1W

Πίνακας 5.1: Παράμετροι για σενάριο υλοποίησης

κίνησης με τέσσερις τύπους εφαρμογών (VoIP, Video, HTTP και FTP) παρόμοια με το (Morell et al., 2008). Κάθε εφαρμογή θεωρείται ότι έχει διαφορετική προτεραιότητα, με την υψηλότερη προτεραιότητα να αντιστοιχεί στις εφαρμογές VoIP και τη χαμηλότερη προτεραιότητα, στις εφαρμογές FTP. Επιπλέον, θεωρείται ότι κάθε χρήστης επιλέγει τυχαία μόνο ένα είδος εφαρμογής και βάσει αυτής της επιλογής πραγματοποιείται και η αντίστοιχη απαίτηση εύρους ζώνης.

Στο σχήμα 5.3, παρουσιάζεται μια μετρική ικανοποίησης των χρηστών συναρτήσει του κέρδους καναλιού, για κάθε είδος εφαρμογής. Συγκεκριμένα, η θεωρούμενη μετρική ικανοποίησης ορίζεται ως ο λόγος του εκχωρουμένου εύρους ζώνης του κάθε χρήστη προς το απαιτούμενο εύρος ζώνης του ( $B_i/B_{i,demand}$ ). Επίσης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο άξονας  $x$  απεικονίζει ουσιαστικά τα κέρδη διαδρομών των χρηστών. Όπως είναι αναμενόμενο, παρατηρείται μια σημαντική διαφορά στην κατανομή εύρους ζώνης ανάμεσα στα τρία προτεινόμενα σχήματα εκχώρησης (NG, NGP, NBS). Συγκεκριμένα, στο σημείο ισορροπίας του απλού μη συνεργατικού παιγνίου, οι χρήστες που επηρεάζονται περισσότερο από τη βροχή λαμβάνουν λιγότερο εύρος ζώνης σε σχέση με τους χρήστες που έχουν καλύτερα χαρακτηριστικά διάδοσης. Ο βαθμός δικαιοσύνης στο σημείο ισορροπίας βελτιώνεται στην περίπτωση του μη συνεργατικού παιγνίου με τιμολόγηση, ενώ όπως είναι εμφανές το συνεργατικό παίγνιο οδηγεί στην πιο δίκαιη κατανομή, παρέχοντας περίπου τον ίδιο βαθμό ικανοποίησης σε όλους τους χρήστες, ανεξάρτητα του κέρδους καναλιού τους. Επιπλέον, παρατηρείται ότι λόγω της ασυμμετρι-



Σχήμα 5.3: Δείκτης ικανοποίησης χρηστών για κάθε τύπο εφαρμογής

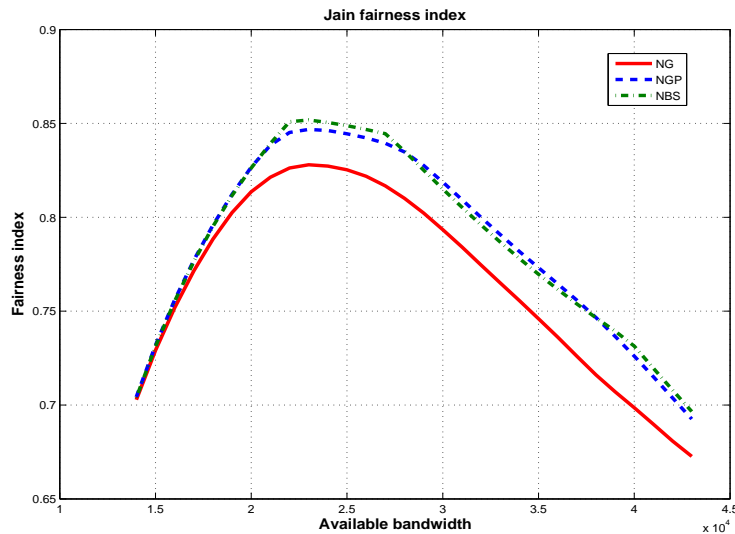
κής διαπραγμάτευσης Nash, οι χρήστες που έχουν εφαρμογές με υψηλή προτεραιότητα και μικρές απαιτήσεις εύρους ζώνης (όπως για παράδειγμα οι εφαρμογές VoIP) έχουν μεγαλύτερο βαθμό ικανοποίησης σε σχέση με τους άλλους χρήστες.

Τέλος, προκειμένου να αναλυθεί περαιτέρω ο βαθμός δικαιοσύνης των τριών προτεινόμενων σχημάτων, χρησιμοποιείται ένας γνωστός δείκτης δικαιοσύνης γενικού σκοπού που αναφέρεται ως δείκτης δικαιοσύνης Jain (Jain et al., 1984). Ο συγκεκριμένος δείκτης χρησιμοποιείται ευρέως στα προβλήματα διαχείρισης πόρων και ορίζεται μαθηματικά ως εξής :

$$I_{Jain} = \frac{\left| \sum_{i=1}^N x_i \right|^2}{N \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (5.13)$$

όπου  $x_i$  είναι το ποσό του εκχωρημένου πόρου στον χρήστη  $i$  και  $N$  είναι ο συνολικός αριθμός των χρηστών. Στο σχήμα 5.4, παρουσιάζονται οι τιμές του δείκτη Jain για κάθε προτεινόμενη μέθοδο εκχώρησης, μεταβάλλοντας το συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης του δορυφορικού συστήματος. Όπως παρατηρείται, το σημείο ισορροπίας του μη συνεργατικού παιγνίου με τιμολόγηση καθώς και η λύση της διαπραγμάτευσης Nash οδηγούν σε υψηλότερο δείκτη δικαιοσύνης για όλες τις τιμές του συνολικού διαθέσιμου εύρους ζώνης. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι το κόστος της χρήσης ενός πιο δίκαιου μοντέλου συγκριτικά με το απλό μη συνεργατικό παίγνιο είναι η μείωση της συνολικής χρησιμότητας των παικτών (η οποία ορίζεται ως το άθροισμα των χρησιμότητων όλων των παικτών) κατά 0.1%.

Συμπερασματικά, το μη συνεργατικό μοντέλο με τιμολόγηση οδηγεί σε μια πιο δίκαιη κατανομή των πόρων σε σχέση με το απλό μη συνεργατικό μοντέλο. Παράλληλα, το συνεργατικό παίγνιο έχει καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά το βαθμό δικαιοσύνης, διατηρώντας όμως το μειονέκτημα της κεντρικοποιημένης προσέγγισης. Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να σημειωθεί ότι μια πιθανή κατεύθυνση για μελλοντική έρευνα μπορεί να αποτελεί η βελτιστοποίηση των παραμέτρων τιμολόγησης προκειμένου να βελτιωθεί τόσο η δικαιοσύνη όσο και η απόδοση του μη συνεργατικού μοντέλου.



Σχήμα 5.4: Δείκτης Jain συναρτήσει του διαθέσιμου εύρους ζώνης

Επιπλέον, ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη άλλων μορφών παιγνίων για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος, όπως είναι για παράδειγμα τα επαναλαμβανόμενα παίγνια.

## 5.2 Ανάλυση προβλήματος εκχώρησης εύρους ζώνης σε δίκτυα ασύρματης πρόσβασης

Στη συγκεκριμένη ενότητα μελετάται το πρόβλημα της εκχώρησης εύρους ζώνης για τη γενική περίπτωση των δικτύων ασύρματης πρόσβασης, αναλύοντας την απόδοση δύο διαφορετικών προσεγγίσεων. Στην πρώτη προσέγγιση, θεωρείται ότι τα τερματικά έχουν διαφορετικές απαιτήσεις εύρους ζώνης λόγω των διαφορετικών εφαρμογών τους καθώς και διαφορετική εξασθένιση λόγω διαφορετικών συνθηκών καναλιού. Σε αυτή την περίπτωση, το πρόβλημα της εκχώρησης εύρους ζώνης λύνεται με ένα κεντρικοποιημένο τρόπο, χρησιμοποιώντας τους βασικούς κανόνες κατανομής που εφαρμόζονται συνήθως στην περίπτωση του προβλήματος χρεωκοπίας (Curiel et al., 1987), ενώ, για λόγους σύγκρισης κυρίως, το ίδιο πρόβλημα αναλύεται χρησιμοποιώντας αρχές από τη συνεργατική θεωρία παιγνίων και συγκεκριμένα εφαρμόζοντας τη γνωστή λύση της διαπραγματεύσεως Nash. Για την επόμενη προσέγγιση, θεωρείται ένα πιο ρεαλιστικό σενάριο, στο οποίο οι χρήστες εκτός από τις διαφορετικές απαιτήσεις εύρους ζώνης έχουν επιπλέον διαφορετικές συναρτήσεις εκτίμησης του εκχωρημένου εύρους ζώνης ανάλογα με το είδος της εφαρμογής τους. Προκειμένου να βρεθεί μια κατανομή η οποία να μεγιστοποιεί το άθροισμα των χρησιμότητων όλων των παικτών, εφαρμόζεται ο μηχανισμός VCG-Kelly (Yang & Hajek, 2007) με μια τροποποίηση, ώστε να ενσωματώνει την επίδραση της κατάστασης του καναλιού.

Στη συνέχεια, πριν την εκτενέστερη ανάλυση των προτεινόμενων αλγορίθμων, παρουσιάζεται μια σύντομη περιγραφή των σχετικών μηχανισμών εκχώρησης εύρους ζώνης που εμφανίζονται στη βιβλιογραφία και χρησιμοποιούν αρχές της θεωρίας παιγνίων καθώς και αρχές της σχεδίασης μηχανισμών (mechanism design).

### 5.2.1 Επισκόπηση σχετικών μηχανισμών διαχείρισης εύρους ζώνης

Όπως αναφέρεται και στην αρχή του κεφαλαίου, το πρόβλημα της εκχώρησης εύρους ζώνης έχει μελετηθεί ευρέως από την ερευνητική κοινότητα τα τελευταία χρόνια, σε μια προσπάθεια να ικανοποιηθούν διάφορα κριτήρια, όπως είναι η βελτίωση της απόδοσης του συστήματος ή του βαθμού δικαιοσύνης.

Αναλυτικότερα, ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι εργασίες (Niyato & Hossain, 2006), (Niyato & Hossain, 2006b), όπου οι συγγραφείς προτείνουν αποδοτικούς αλγόριθμους εκχώρησης εύρους ζώνης για την άνω ζεύξη που βασίζονται στην επίγνωση της κατάστασης της ουράς του συστήματος και τη συνάρτηση χρησιμότητας του χρήστη, αντίστοιχα. Τα σχήματα αυτά μπορούν να εφαρμοσθούν τόσο σε υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, όσο και σε υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου, όπως αυτές που ορίζονται στις προδιαγραφές του IEEE 802.16. Ένα άλλο μοντέλο μη συνεργατικού παιγνίου χρησιμοποιείται στο (Niyato & Hossain, 2007), προκειμένου να λυθεί το πρόβλημα της κατανομής εύρους ζώνης σε 802.16 ασύρματα επίγεια δίκτυα. Επιπρόσθετα, οι ίδιοι συγγραφείς, στο (Niyato & Hossain, 2006c), προτείνουν μια παιγνιοθεωρητική προσέγγιση για τη μελέτη της κατανομής εύρους ζώνης σε ετερογενή ασύρματα δίκτυα. Συγκεκριμένα, μοντελοποιούν το πρόβλημα σαν ένα παίγνιο χρεωκοπίας στο οποίο διαφορετικά δίκτυα σχηματίζουν μια συμμαχία προκειμένου να παρέχουν το απαραίτητο εύρος ζώνης στους τελικούς χρήστες. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι η εργασία στο (Niyato & Hossain, 2006c) είναι τελείως διαφορετική από τον αλγόριθμο εκχώρησης εύρους ζώνης που προτείνεται στη συνέχεια της ΔΔ, καθώς στον προτεινόμενο αλγόριθμο χρησιμοποιούνται οι κανόνες κατανομής που οδηγούν σε άμεση λύση του προβλήματος χρεωκοπίας και δεν απαιτείται να λυθεί το αντίστοιχο παίγνιο συμμαχίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα τελικά σχήματα εκχώρησης που προκύπτουν να έχουν πολύ μικρότερη πολυπλοκότητα.

Εκτός από τις προσεγγίσεις διαχείρισης ραδιοπόρων που βασίζονται σε αρχές της θεωρίας παιγνίων, τα τελευταία χρόνια έχουν εμφανιστεί αρκετές προσεγγίσεις που χρησιμοποιούν αρχές από τη θεωρία σχεδίασης μηχανισμών. Συγκεκριμένα, ένα μαθηματικό εργαλείο που έχει χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό από τους ερευνητές για την επίλυση του προβλήματος εκχώρησης εύρους ζώνης στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα είναι ο μηχανισμός της δημοπρασίας. Στο (Maillé & Tuffin, 2004), οι συγγραφείς παρουσιάζουν ένα σχήμα εκχώρησης εύρους ζώνης που βασίζεται στις δημοπρασίες δεύτερης τιμής. Αναλυτικότερα, στη συγκεκριμένη εργασία, οι συγγραφείς παρουσιάζουν μια στιγμιαία προσέγγιση (one shot) της γνωστής σταδιακής δημοπρασίας δεύτερης τιμής (Lazar & Semret, 1999). Σύμφωνα με τους κανόνες αυτής της δημοπρασίας, κάθε αγοραστής καταθέτει μια προσφορά δύο διαστάσεων, όπου η μια διάσταση αναφέρεται στη μοναδιαία τιμή, ενώ η άλλη διάσταση αναφέρεται στη μέγιστη απαιτούμενη ποσότητα. Ταυτόχρονα, μελετάται το πρόβλημα της εκχώρησης ενός διαιρετού αγαθού σε ένα συγκεκριμένο αριθμό πιθανών αγοραστών χρησιμοποιώντας διαφορετικούς μηχανισμούς σχεδίασης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι δεδομένου ότι κάθε αγοραστής έχει μια συγκεκριμένη συνάρτηση χρησιμότητας την οποία ο πωλητής δεν γνωρίζει, μια αποδοτική κατανομή ορίζεται ως η κατανομή που μεγιστοποιεί το άθροισμα των χρησιμότητων των αγοραστών. Στο (Kelly et al., 1998), οι συγγραφείς αποδεικνύουν ότι είναι εφικτό ο πωλητής του αγαθού να βρει μια αποδοτική κατανομή με κατανομημένο τρόπο, υπό την προϋπόθεση όμως, ότι όλοι οι αγοραστές είναι αποδέκτες τιμών (price takers), δηλαδή η επιλογή του καθενός δεν επηρεάζει άμεσα την τιμή του αγαθού. Σε περίπτωση που οι αγοραστές θεωρούνται ως στρατηγικοί παίκτες, οι συγγραφείς στο (Johari & Tsitsiklis, 2004) αποδεικνύουν ότι παρουσιάζεται μια υποβάθμιση της τάξεως του 25% στη συνολική αξία των χρησιμότητων. Προκειμένου να μειωθεί η συγκεκριμένη υποβάθμιση υπό την θεώρηση

των στρατηγικών αγοραστών, στο (Yang & Hajek, 2007) προτείνεται ένας νέος μηχανισμός, ο οποίος ορίζεται ως μηχανισμός VCG-Kelly (Vickrey-Clarke-Groves -Kelly). Στη κατανομημένη προσέγγιση της εκχώρησης εύρους ζώνης που αναφέρεται στη συνέχεια και κατά την οποία προτείνεται ένας κατανομημένος μηχανισμός, σκοπός είναι η προσαρμογή του μηχανισμού VCG-Kelly έτσι ώστε να παρέχει μια αποδοτική κατανομή για τους στρατηγικούς αγοραστές και ταυτόχρονα να ενσωματώνει την επίδραση των χαρακτηριστικών του καναλιού.

### 5.2.2 Περιγραφή μοντέλου συστήματος

Στη συγκεκριμένη υποενότητα, περιγράφεται το βασικό μοντέλο του τηλεπικοινωνιακού δικτύου ασύρματης πρόσβασης που χρησιμοποιείται στη συνέχεια, καθώς και το πρόβλημα διαχείρισης εύρους ζώνης που τίθεται προς επίλυση.

Συγκεκριμένα, θεωρείται ένα γενικό μοντέλο ενός δικτύου ασύρματης πρόσβασης, εστιάζοντας σε μια κυψέλη του δικτύου η οποία θεωρείται ότι έχει ένα σταθμό βάσης (ΣΒ) και  $N$  τελικούς χρήστες. Επιπλέον, θεωρείται ότι κάθε χρήστης μπορεί να επιλέξει ανάμεσα σε τέσσερις διαφορετικές εφαρμογές (π.χ. HTTP, VoIP, FTP και Video), απαιτώντας διαφορετικό ρυθμό μετάδοσης για κάθε εφαρμογή, προκειμένου να έχει την επιθυμητή ποιότητα υπηρεσίας (QoS). Για το σενάριο υπό μελέτη, υποθέτεται ότι ο ΣΒ γνωρίζει την κατάσταση καναλιού κάθε χρήστη, δηλαδή το κέρδος καναλιού του χρήστη μαζί με το γκαουσιανό θόρυβο στον οποίο υπόκειται. Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις ρυθμού μετάδοσης κάθε τερματικού, ο ΣΒ μπορεί να εκτιμήσει το απαιτούμενο εύρος ζώνης ( $x_{i,required}$ ) που πρέπει να εκχωρηθεί σε κάθε χρήστη έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ο επιθυμητός ρυθμός. Αναλυτικότερα, το απαιτούμενο εύρος ζώνης υπολογίζεται βάσει του θεωρήματος για την χωρητικότητα κατά Shannon, με αποτέλεσμα να προκύπτει η ακόλουθη σχέση :

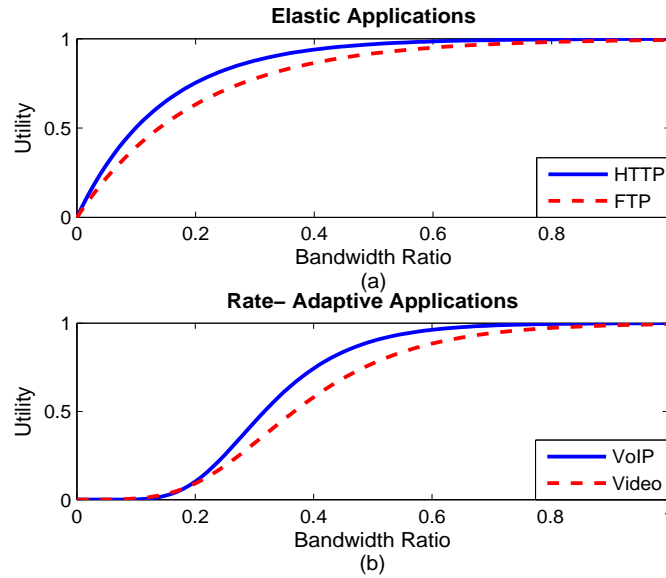
$$R_i = x_{i,required} \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{g_i}{x_{i,required}} \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow x_{i,required} = -\frac{R_i \cdot g_i \cdot \ln(2)}{u_i \cdot g_i + R_i \cdot \ln(2)} = h(R_i, g_i)$$
(5.14)

όπου  $R_i$  είναι ο απαιτούμενος ρυθμός μετάδοσης για κάθε εφαρμογή, η παράμετρος  $g_i$  παριστάνει το κέρδος καναλιού, το οποίο εξαρτάται από το μοντέλο απωλειών διαδρομής και την κατανομή της εξασθένισης και μπορεί να οριστεί ως  $g_i = h_i P_i / N_0$  όπου  $h_i$  είναι το κέρδος διαδρομής για το τερματικό  $i$ , το  $P_i$  αναφέρεται στην ισχύ εκπομπής του συγκεκριμένου τερματικού και  $N_0$  είναι η φασματική πυκνότητα του θορύβου. Επιπλέον, η παράμετρος  $u_i$  που εμφανίζεται στην (5.14) ορίζεται ως :

$$u_i = W \left( -\frac{R_i \cdot \ln(2)}{g_i} e^{-\frac{R_i \cdot \ln(2)}{g_i}} \right)$$
(5.15)

όπου  $W(\cdot)$  είναι η συνάρτηση Lambert (Corless et al., 1993). Επιπρόσθετα, θεωρείται ότι ο σταθμός βάσης έχει διαθέσιμο εύρος ζώνης ίσο με  $B_{tot}$ , το οποίο δεν αρκεί για να ικανοποιήσει το σύνολο των απαιτήσεων εύρους ζώνης όλων των χρηστών. Προκειμένου να βρεθεί μια αποδοτική κατανομή φάσματος στους τελικούς χρήστες, αναλύονται δύο διαφορετικές προσεγγίσεις. Κατά την πρώτη προσέγγιση, λύνεται το πρόβλημα της εκχώρησης εύρους ζώνης με κεντρικοποιημένο τρόπο λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις εύρους ζώνης των χρηστών και εφαρμόζοντας τους κανόνες κατανομής που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση του προβλήματος χρεωκοπίας, καθώς και ένα σχήμα που βασίζεται



Σχήμα 5.5: Μορφή συναρτήσεων χρησιμότητας για κάθε είδος εφαρμογής

στη λύση διαπραγμάτευσης Nash. Στη δεύτερη περίπτωση, θεωρείται ένα πιο ρεαλιστικό σενάριο και λύνεται το πρόβλημα της εκχώρησης εύρους ζώνης με κατανομημένο τρόπο. Αναλυτικότερα, παρόμοια με (Cao & Zegura, 1999), (Shenker, 1995), θεωρείται ότι κάθε εφαρμογή έχει διαφορετική συνάρτηση χρησιμότητας ανάλογα με το βαθμό ανεκτικότητας της σε τυχόν καθυστέρηση. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι τα δύο είδη εφαρμογών που είναι «ανεκτικά» ως προς την καθυστέρηση (HTTP, FTP), έχουν μια ελαστική συνάρτηση χρησιμότητας όπως οι κοίλες συναρτήσεις που παρουσιάζονται στο σχήμα 5.5. Από την άλλη μεριά, οι εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπως οι εφαρμογές VoIP και Video, οι οποίες είναι λιγότερο «ανεκτικές» ως προς την καθυστέρηση, έχουν συναρτήσεις χρησιμότητας σιγμοειδούς μορφής όπως είναι αυτές που παρουσιάζονται στο δεύτερο διάγραμμα του σχήματος 5.5. Όπως είναι εμφανές, σε αυτές τις εφαρμογές, η απόδοση υποβαθμίζεται σημαντικά όταν το εκχωρούμενο εύρος ζώνης είναι αρκετά μικρότερο από το απαιτούμενο εύρος ζώνης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο άξονας  $x$  και στα δύο διαγράμματα αναφέρεται ως λόγος εύρους ζώνης και αντιπροσωπεύει το λόγο του εκχωρημένου εύρους ζώνης προς το απαιτούμενο εύρος ζώνης. Μια άλλη βασική υπόθεση και για τις δύο προσεγγίσεις είναι ότι ο σταθμός βάσης μπορεί να εγγυηθεί ένα ελάχιστο λόγο εύρους ζώνης ανάλογα με τις εφαρμογές των χρηστών. Σε περίπτωση που αυτό δεν είναι εφικτό, θεωρείται ότι ένας συγκεκριμένος αριθμός χρηστών θα απορριφθεί προκειμένου να εξασφαλισθούν οι ελάχιστες απαιτήσεις για τους υπόλοιπους εξυπηρετούμενους χρήστες.

### 5.2.3 Κεντριοποιημένη προσέγγιση κατανομής εύρους ζώνης

Σε αυτή την προσέγγιση, θεωρείται ότι ο ΣΒ υπολογίζει το εύρος ζώνης που πρέπει να εκχωρηθεί σε κάθε χρήστη λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις απαιτήσεις των χρηστών. Αρχικά, το πρόβλημα κατανομής του ραδιοπόρου λύνεται χρησιμοποιώντας τρεις βασικούς κανόνες κατανομής που χρησιμοποιούνται στα προβλήματα χρεωκοπίας, οι οποίοι περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια. Προκειμένου να είναι εφικτή η σύγκριση της απόδοσης των κανόνων κατανομής, στο δεύτερο μέρος της κεντριοποιημένης προσέγγισης, το ίδιο πρόβλημα λύνεται χρησιμοποιώντας αρχές από τη συνεργατική θεωρία παιγνίων.

### Μοντελοποίηση του αρχικού προβλήματος ως πρόβλημα χρεωκοπίας

Σε αυτή την ενότητα, το αρχικό πρόβλημα μοντελοποιείται ως ένα πρόβλημα χρεωκοπίας το οποίο λύνεται βάσει συγκεκριμένων κανόνων κατανομής. Αρχικά, περιγράφεται αναλυτικά το πρόβλημα χρεωκοπίας και δίνεται μια σύντομη περιγραφή των κανόνων κατανομής, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στο πρόβλημα εκχώρησης εύρους ζώνης.

Ένα πρόβλημα χρεωκοπίας (Curiel et al., 1987) περιγράφει μια κατάσταση στην οποία ένα σύνολο πρακτόρων απαιτεί ένα συγκεκριμένο αγαθό, του οποίου η συνολική αξία δεν μπορεί να ικανοποιήσει το σύνολο των απαιτήσεων των πρακτόρων. Συγκεκριμένα, ο μαθηματικός ορισμός ενός προβλήματος χρεωκοπίας είναι η τριάδα  $(N, E, \mathbf{c})$  όπου  $N$  είναι το σύνολο των πρακτόρων,  $E$  είναι η συνολική αξία του αγαθού που πρόκειται να εκχωρηθεί και  $\mathbf{c}$  είναι το διάνυσμα των απαιτήσεων. Θεωρείται πως ισχύει ότι  $0 \leq c_1 \leq c_2 \leq \dots \leq c_n$  για  $n = 1, \dots, N$  και  $0 \leq E \leq c_1 + \dots + c_n = c$ . Επομένως, το πρόβλημα που θέτεται είναι με ποιο τρόπο μπορεί να κατανεμηθεί το αγαθό αξίας  $E$  ανάμεσα στους  $N$  πράκτορες. Το συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να λυθεί χρησιμοποιώντας τους κανόνες κατανομής που ορίζονται στη συνέχεια.

Ένας κανόνας κατανομής είναι μια συνάρτηση  $f$  η οποία εκχωρεί σε κάθε πρόβλημα χρεωκοπίας  $(N, E, \mathbf{c})$ , μια λύση  $f(E; \mathbf{c}) = (f_1(E; \mathbf{c}), \dots, f_N(E; \mathbf{c}))$  έτσι ώστε:

$$1. 0 \leq f_i(E; \mathbf{c}) \leq c_i, \text{ για κάθε } i \in N$$

$$2. \sum_{i=1}^N f_i(E; \mathbf{c}) = E$$

Αυτές οι δύο συνθήκες υπονοούν ότι κανένας πράκτορας δεν θα λάβει μερίδιο μεγαλύτερο από αυτό που απαιτεί καθώς και ότι πρέπει να κατανεμηθεί στους πράκτορες, η συνολική αξία  $E$  του αγαθού. Λαμβάνοντας υπόψη ένα συγκεκριμένο διάνυσμα απαιτήσεων, ο τόπος του διανύσματος ανταμοιβών που επιλέγεται από ένα κανόνα απεικονίζει την πορεία προς τις ανταμοιβές για το συγκεκριμένο διάνυσμα απαιτήσεων (Curiel et al., 1987). Στη συνέχεια, δίνονται οι ορισμοί για τρεις βασικούς κανόνες κατανομής που χρησιμοποιούνται στα προβλήματα χρεωκοπίας: τον κανόνα ίσης περιορισμένης ανταμοιβής, τον κανόνα του Ταλμούδ και τον κανόνα του αντιστρόφου Ταλμούδ.

- Ο κανόνας ίσης περιορισμένης ανταμοιβής (Constrained Equal Award-CEA) αποτελεί έναν από τους πιο γνωστούς κανόνες κατανομής αγαθών. Σύμφωνα με τον κανόνα αυτό εκχωρείται το ίδιο μερίδιο αγαθού σε όλους τους πράκτορες δεδομένου ότι αυτό το μερίδιο δεν είναι μεγαλύτερο από την απαίτηση κάποιου χρήστη (Thomson, 2003). Συγκεκριμένα, για κάθε  $(N, E, \mathbf{c}) \in C^N$  και κάθε  $i \in N$ , ισχύει:

$$CEA_i(\mathbf{c}, E) \equiv \min \{c_i, \lambda\} \tag{5.16}$$

όπου το  $\lambda$  επιλέγεται έτσι ώστε  $\sum_{i=1}^N \min \{c_i, \lambda\} = E$ .

- Ο κανόνας Ταλμούδ (Talmud - T) αναφέρεται για πρώτη φορά στο (Aumann & Maschler, 1985) και αποτελεί έναν άλλο ευρέως γνωστό κανόνα κατανομής με επιθυμητά χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα, στο (Benoit, 1997) αποδεικνύεται ότι ο συγκεκριμένος κανόνας οδηγεί στην ίδια κατανομή που οδηγεί το παίγνιο συμμαχίας (coalition game) που σχετίζεται με το ίδιο πρόβλημα (O'Neill, 1982). Σύμφωνα με αυτόν τον κανόνα, για κάθε  $(N, E, \mathbf{c}) \in C^N$  και κάθε  $i \in N$ , ισχύει:

1. Αν  $\sum_{i=1}^N \left(\frac{c_i}{2}\right) \geq E$ , τότε

$$T_i(\mathbf{c}, E) \equiv \min \left\{ \frac{c_i}{2}, \lambda \right\} \quad (5.17)$$

όπου το  $\lambda$  επιλέγεται έτσι ώστε  $\sum_{i=1}^N \min \left\{ \frac{c_i}{2}, \lambda \right\} = E$ .

2. Αν  $\sum_{i=1}^N \left(\frac{c_i}{2}\right) < E$ , τότε

$$T_i(\mathbf{c}, E) \equiv c_i - \min \left\{ \frac{c_i}{2}, \lambda \right\} \quad (5.18)$$

όπου το  $\lambda$  επιλέγεται έτσι ώστε  $\sum_{i=1}^N [c_i - \min \left\{ \frac{c_i}{2}, \lambda \right\}] = E$

- Τέλος περιγράφεται ο κανόνας του αντιστρόφου Ταλμούδ (Reverse Talmud - RT), ο οποίος συνδυάζει τις αρχές του αναλογικού κανόνα και του κανόνα CEA και μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμος με τον κανόνα Ταλμούδ (Aumann & Maschler, 1985), (Chun et al., 2001). Σύμφωνα με αυτόν τον κανόνα, για κάθε  $(N, E, \mathbf{c}) \in C^N$  και κάθε  $i \in N$ , ισχύει:

1. Αν  $\sum_{i=1}^N \left(\frac{c_i}{2}\right) \geq E$ , τότε

$$RT_i(\mathbf{c}, E) \equiv \max \left\{ 0, \frac{c_i}{2} - \lambda \right\} \quad (5.19)$$

όπου το  $\lambda$  επιλέγεται έτσι ώστε  $\sum_{i=1}^N \max \left\{ 0, \frac{c_i}{2} - \lambda \right\} = E$ .

2. Αν  $\sum_{i=1}^N \left(\frac{c_i}{2}\right) < E$ , τότε

$$RT_i(\mathbf{c}, E) \equiv \frac{c_i}{2} + \min \left\{ \frac{c_i}{2}, \lambda \right\} \quad (5.20)$$

όπου το  $\lambda$  επιλέγεται έτσι ώστε  $\sum_{i=1}^N \left[ \frac{c_i}{2} + \min \left\{ \frac{c_i}{2}, \lambda \right\} \right] = E$ .

Βάσει του ορισμού του προβλήματος χρεωκοπίας, είναι προφανές ότι το πρόβλημα εκχώρησης εύρους ζώνης μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν το πρόβλημα χρεωκοπίας που ορίζεται από την τριάδα  $(N, B'_{tot}, x_{i,required} - x_{i,min})$ , όπου  $x_{i,min}$  είναι το εύρος ζώνης που είναι εγγυημένο σε κάθε χρήστη και  $B'_{tot} = B_{tot} - \sum_{i=1}^N x_{i,min}$ . Δηλαδή, το σύνολο των πρακτόρων αντιστοιχεί στο σύνολο των τελικών χρηστών του τηλεπικοινωνιακού δικτύου, η συνολική αξία του αγαθού είναι ίση με το συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης του σταθμού βάσης έχοντας αφαιρέσει τις ελάχιστες απαιτήσεις κάθε χρήστη και το διάστημα των απαιτήσεων αντιπροσωπεύει τις απαιτήσεις εύρους ζώνης των χρηστών προκειμένου να επιτύχουν την απαιτούμενη ποιότητα επικοινωνίας. Έχοντας ορίσει το πρόβλημα χρεωκοπίας, χρησιμοποιούνται οι προαναφερόμενοι κανόνες κατανομής και υπολογίζονται οι αντίστοιχες κατανομές. Όπως αποδεικνύεται και στην ενότητα της αριθμητικής ανάλυσης, κάθε κανόνας καταλήγει σε διαφορετική κατανομή εύρους ζώνης παρέχοντας διαφορετικούς βαθμούς απόδοσης και δικαιοσύνης.

### Μοντελοποίηση του αρχικού προβλήματος ως συνεργατικό παίγνιο

Προκειμένου να είναι εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων των κανόνων κατανομής που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση χρεωκοπίας με την κατανομή που προκύπτει από κάποια άλλη κεντρικοποιημένη προσέγγιση, το πρόβλημα της εκχώρησης εύρους ζώνης μοντελοποιείται επίσης ως συνεργατικό παίγνιο και υπολογίζεται η λύση της διαπραγματεύσεως Nash του παιγνίου. Συγκεκριμένα, θεωρείται το συνεργατικό παίγνιο  $G = [N, \{x_i\}_{i \in N}, \{u_i\}_{i \in N}]$  όπου  $N$  είναι το σύνολο των



τηλεπικοινωνιακών χρηστών,  $x_i$  είναι το εκχωρημένο εύρος ζώνης στο χρήστη  $i$  και  $u_i$  είναι η συνάρτηση χρησιμότητας του χρήστη. Για το προτεινόμενο σύστημα, η συνάρτηση χρησιμότητας του παίκτη  $i$  ορίζεται ως ο ρυθμός μετάδοσης, ο οποίος δίνεται από τη σχέση :

$$u_i = x_i \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{g_i}{x_i} \right) \quad (5.21)$$

όπου το  $g_i$  αποτελεί το κέρδος καναλιού του χρήστη  $i$ , το οποίο ορίζεται σε προηγούμενη ενότητα.

Στο συνεργατικό παίγνιο, θεωρείται ότι οι παίκτες είναι ελεύθεροι να διαπραγματεύονται προκειμένου να έχουν αμοιβαία πλεονεκτήματα. Αναλύοντας το πρόβλημα εκχώρησης εύρους ζώνης σαν ένα πρόβλημα διαπραγμάτευσης  $N$  ατόμων, χρησιμοποιείται στη συνέχεια η λύση της διαπραγμάτευσης Nash (J. F. Nash, 1950), η οποία ορίζεται στο κεφάλαιο 3 (ορισμός 3.9). Επομένως, η λύση του προβλήματος εκχώρησης εύρους ζώνης υπολογίζεται από τη λύση του ακόλουθου προβλήματος βελτιστοποίησης :

$$\begin{aligned} \max_{x_i} \prod_{i=1}^N (u_i(x_i) - u_i(x_{i,min})) \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^N x_i = B_{tot}, \quad x_{i,min} \leq x_i \leq x_{i,required} \end{aligned} \quad (5.22)$$

#### 5.2.4 Κατανομημένη προσέγγιση κατανομής εύρους ζώνης

Στη συγκεκριμένη υποενοότητα, μελετάται η λύση του προβλήματος εκχώρησης εύρους ζώνης στα δίκτυα ασύρματης πρόσβασης, θεωρώντας ένα πιο ρεαλιστικό σενάριο και προτείνοντας ένα τροποποιημένο μηχανισμό VCG-Kelly, ο οποίος εξαρτάται από τη στιγμιαία κατάσταση καναλιού. Στη συνέχεια, πριν την ανάλυση της προτεινόμενης λύσης, παρουσιάζονται κάποιες βασικές αρχές της θεωρίας σχεδίασης μηχανισμών και συγκεκριμένα της θεωρίας δημοπρασιών, εστιάζοντας στο μηχανισμό VCG.

#### Θεωρία σχεδίασης μηχανισμών: θεωρία δημοπρασιών

Η θεωρία σχεδίασης μηχανισμών αποτελεί, ουσιαστικά, την αντίστροφη θεωρία από τη θεωρία παιγνίων (Nisan et al., 2007). Στη θεωρία παιγνίων, το βασικό ερώτημα που τίθεται αφορά την εξέλιξη μιας κατάστασης κατά την οποία αλληλεπιδρά ένας αριθμός πρακτόρων μεταξύ τους. Αντίθετα, στη σχεδίαση μηχανισμών, αντί να μελετώνται δεδομένες στρατηγικές αλληλεπιδράσεις, δίνεται έμφαση στο ποιο είναι το επιθυμητό αποτέλεσμα και στην εύρεση της κατάλληλης στρατηγικής αλληλεπίδρασης που θα οδηγήσει τους πράκτορες σε αυτό το αποτέλεσμα. Δηλαδή, σε γενικές γραμμές, θεωρώντας ότι οι χρήστες έχουν ατομικές προτιμήσεις, το βασικό ερώτημα της σχεδίασης μηχανισμών είναι αν είναι εφικτή η σχεδίαση ενός παιγνίου του οποίου το σημείο ισορροπίας να έχει συγκεκριμένες ιδιότητες, ανεξάρτητα από τις προτιμήσεις των χρηστών. Μια από τις πιο γνωστές εφαρμογές της σχεδίασης μηχανισμών, η οποία χρησιμοποιείται στο πλαίσιο της ΔΔ, είναι η θεωρία δημοπρασιών.

Η θεωρία δημοπρασιών εστιάζει στο πρόβλημα κατανομής πόρων ανάμεσα σε εγωϊστικούς πράκτορες και παρέχει μια γενική λύση στο πρόβλημα αυτό. Αναλυτικότερα, σε κάθε δημοπρασία, υπάρχουν δύο είδη συμμετεχόντων: οι πλειοδότες και ο δημοπράτης. Οι πλειοδότες είναι τα άτομα που κα-

ταθέτουν τις προσφορές τους προκειμένου να κερδίσουν τη δημοπρασία, ενώ ο δημοπράτης είναι το άτομο που ρυθμίζει τη δημοπρασία. Επιπλέον, κάθε δημοπρασία βασίζεται σε ένα ζεύγος κανόνων: τον κανόνα κατανομής και τον κανόνα πληρωμής (Krishna, 2009). Ο πρώτος κανόνας ορίζει ποια αγαθά (ή τι μέρος τους) θα εκχωρηθούν και σε ποιον πράκτορα, ενώ ο δεύτερος κανόνας καθορίζει την τιμή που πρέπει να πληρώσει ο νικητής της δημοπρασίας ώστε να αποκτήσει το δεδομένο αγαθό. Οι δημοπρασίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με διάφορα κριτήρια. Συγκεκριμένα, ανάλογα με τον αριθμό των αγαθών που τίθενται προς πώληση, ταξινομούνται σε δημοπρασίες μιας ή πολλαπλών μονάδων. Μια άλλη κατηγοριοποίηση που αναφέρεται στο βαθμό γνώσης των προσφορών των πρακτόρων χωρίζει τις δημοπρασίες σε ανοικτές, το οποίο σημαίνει ότι κάθε πλειοδότης γνωρίζει τις άλλες προσφορές ή κλειστές, που σημαίνει ότι οι προσφορές καταθέτονται σε σφραγισμένους φακέλους με αποτέλεσμα οι πλειοδότες να μην γνωρίζουν ο ένας την προσφορά του άλλου.

Μεγάλο ενδιαφέρον στους μηχανισμούς δημοπρασίας παρουσιάζουν οι αποδοτικοί μηχανισμοί, δηλαδή, οι μηχανισμοί κατά τους οποίους επιλέγονται οι δράσεις των πρακτόρων που μεγιστοποιούν το άθροισμα των χρησιμότητων τους. Συγκεκριμένα, η πιο σημαντική οικογένεια αποδοτικών μηχανισμών είναι οι μηχανισμοί Groves, οι οποίοι χρησιμοποιούν το ζεύγος κανόνων κατανομής και πληρωμής  $(x, p)$  για το οποίο ισχύει:

$$\begin{aligned} x(v) &= \arg \max_{a \in A} \sum_{i \in N} v_i(a) \\ p(v) &= h_i(v_{-i}) - \sum_{j \neq i} v_j(a) \end{aligned} \quad (5.23)$$

όπου  $a \in A$  είναι το σύνολο των πιθανών κατανομών,  $N$  είναι το σύνολο των πρακτόρων,  $v_i : A \rightarrow \mathbb{R}_+$  είναι η συνάρτηση εκτίμησης του κάθε πράκτορα,  $V_i$  είναι το σύνολο όλων των πιθανών εκτιμήσεων του πράκτορα  $i$  και  $h_i$  είναι μια συνάρτηση, η οποία εξαρτάται αποκλειστικά από τις εκτιμήσεις των άλλων πρακτόρων εκτός του πράκτορα  $i$ . Το γεγονός ότι ο σχεδιαστής του μηχανισμού έχει την ελευθερία να επιλέξει τις συναρτήσεις  $h(\cdot)$  εξηγεί γιατί οι μηχανισμοί Groves αναφέρονται σαν οικογένεια μηχανισμών και όχι σαν ένας μηχανισμός. Στη βιβλιογραφία, έχει αποδειχθεί ότι οι συγκεκριμένοι μηχανισμοί είναι οι μόνοι μηχανισμοί οι οποίοι οδηγούν σε μια αποδοτική κατανομή με κυρίαρχες στρατηγικές ανάμεσα σε παίκτες με αυθαίρετες χρησιμότητες. Όσον αφορά τη συνάρτηση  $h(\cdot)$ , η πιο γνωστή επιλογή αναφέρεται ως φόρος Clarke και ορίζεται ως:

$$h_i(v_{-i}) = \max_{b \in A} \sum_{j \neq i} v_j(b) \quad (5.24)$$

Ο μηχανισμός Groves στον οποίο αντιστοιχεί η χρήση της συγκεκριμένης συνάρτησης είναι ευρέως γνωστός ως μηχανισμός Vickrey-Clarke-Groves (VCG) (Ausubel & Milgrom, 2006). Σύμφωνα με το συγκεκριμένο μηχανισμό, το ζεύγος κανόνων κατανομής και πληρωμής δίνεται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} x(v) &= \arg \max_{a \in A} \sum_{i \in N} v_i(a) \\ p(v) &= \left[ \max_{b \in A} \sum_{j \neq i} v_j(b) \right] - \sum_{j \neq i} v_j(a) \end{aligned} \quad (5.25)$$

Ο κανόνας πληρωμής του μηχανισμού αναγκάζει κάθε πράκτορα να πληρώσει όσο είναι το κοινωνικό του κόστος, το οποίο ορίζεται ως η μείωση που επιφέρει στη συνολική χρησιμότητα των πρακτόρων

όταν περιλαμβάνεται και αυτός στο μηχανισμό. Το μεγάλο πλεονέκτημα του μηχανισμού VCG είναι ότι η κυρίαρχη στρατηγική για κάθε πλειοδότη είναι να καταθέσει προσφορά ίση με την πραγματική εκτίμηση του αντικειμένου. Για το λόγο αυτό, η δημοπρασία VCG χρησιμοποιείται, τα τελευταία χρόνια, στο πρόβλημα της διαχείρισης ασύρματων πόρων, στοχεύοντας στην εύρεση της βέλτιστης κατανομής ραδιοπόρων με καταναμημένο τρόπο. Ωστόσο, ο μηχανισμός VCG απαιτεί την πλήρη γνώση των συναρτήσεων εκτίμησης των πρακτόρων, κάτι το οποίο δεν είναι πάντα υπολογιστικά εφικτό λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητας στην οποία μπορεί να οδηγήσει.

Προκειμένου να λυθεί το πρόβλημα της υψηλής πολυπλοκότητας, προτάθηκε για την περίπτωση της διαχείρισης ραδιοπόρων, ο μηχανισμός Kelly, στον οποίο οι πράκτορες δεν καταθέτουν ολόκληρη τη συνάρτηση εκτίμησης τους αλλά μονοδιάστατες προσφορές (Kelly et al., 1998). Για παράδειγμα, έστω ότι υπάρχουν  $N$  χρήστες στο δίκτυο, οι οποίοι επιθυμούν ένα μερίδιο από τις  $J$  μονάδες ενός ραδιοπόρου. Ο κάθε χρήστης καταθέτει μια μονοδιάστατη προσφορά  $w_i$  στο δίκτυο, ενώ το δίκτυο θέτει μια τιμή  $p_i$  στο συγκεκριμένο χρήστη. Στη συνέχεια, βάσει της προσφοράς  $w_i$ , το δίκτυο κατασκευάζει μια υποκατάστατη συνάρτηση εκτίμησης, η οποία είναι ίση με  $w_i \log(x_i)$ , όπου  $x_i$  είναι το μερίδιο που εκχωρείται στο χρήστη  $i$ . Το ζεύγος κανόνων καταχώρησης και πληρωμής του συγκεκριμένου μηχανισμού δίνεται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} x_i^K(\mathbf{w}) &= \arg \max_{x \in X} \sum_{i \in N} w_i \log(x_i) \\ m_i^K &= p_i x_i \end{aligned} \quad (5.26)$$

όπου  $p_i = \sum_{j \in N} \mu_j$  και  $\mu_j$  είναι οι πολλαπλασιαστές Lagrange που αντιστοιχούν στο πρόβλημα βελτιστοποίησης, το οποίο σχετίζεται με το κανόνα κατανομής και αναφέρεται γενικά ως πρόβλημα δικτύου. Στη συνέχεια, ανάλογα με το αν οι χρήστες θεωρούνται ως αποδέκτες τιμών ή στρατηγικοί αγοραστές, το πρόβλημα χρήστη που λύνεται από τη μεριά των χρηστών είναι η μεγιστοποίηση της συνάρτησης χρησιμότητας (5.27) ή (5.28), αντίστοιχα:

$$\prod_i (w_i) = U_i \left( \frac{w_i}{p_i} \right) - w_i, \quad (5.27)$$

$$\prod_i (w_i, \mathbf{w}_{-i}) = U_i \left( \frac{w_i}{p_i(\mathbf{w})} \right) - w_i \quad (5.28)$$

Στο προτεινόμενο μοντέλο, χρησιμοποιείται ο μηχανισμός που πρωτοεμφανίζεται στο (Yang & Hajek, 2007) και αναφέρεται ως μηχανισμός VCG-Kelly. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο μηχανισμό, οι χρήστες στέλνουν μονοδιάστατες προσφορές όπως στο μηχανισμό Kelly και στη συνέχεια εφαρμόζεται ο μηχανισμός VCG στις υποκατάστατες συναρτήσεις εκτίμησης. Επιπλέον, στο συγκεκριμένο μηχανισμό θεωρείται μια γενίκευση των υποκατάστατων συναρτήσεων εκτίμησης, οι οποίες δίνονται πλέον από τη σχέση  $V_i(w_i, x_i) = w_i f_i(x_i)$ , όπου οι συναρτήσεις  $f_i(\cdot)$  αναφέρονται σε γνησίως αύξουσες, κοίλες και διαφορίσιμες συναρτήσεις. Αναλυτικά, ο μηχανισμός VCG-Kelly μπορεί να οριστεί από το ζεύγος κανόνων:

$$\begin{aligned} x_i^{VCGK}(\mathbf{w}) &= \arg \max_{x \in X} \sum_{i \in N} V_i(w_i, x_i) \\ m_i^K &= \left[ \max_{x \in X} \sum_{j \in N, j \neq i} V_j(w_j, x_j) \right] - \sum_{j \in N, j \neq i} V_j \left( w_j, x_j^{VCGK} \right) \end{aligned} \quad (5.29)$$

Όπως εξηγείται και στην επόμενη υποενότητα, οι κανόνες κατανομής και πληρωμής μαζί με τις πραγματικές συναρτήσεις εκτίμησης των χρηστών  $U(\cdot)$  καθορίζουν ένα μη συνεργατικό παίγνιο ανάμεσα στους χρήστες με συνάρτηση χρησιμότητας ίση με :

$$\prod_i (w_i, \mathbf{w}_{-i}) = U_i(x_i^{VCGK}(\mathbf{w})) - m_i^{VCGK}(\mathbf{w}) \quad (5.30)$$

### Τροποποιημένος μηχανισμός VCG-Kelly

Σε αυτή την ενότητα, προτείνεται η τροποποίηση του μηχανισμού VCG-Kelly που εμφανίζεται στο (Yang & Hajek, 2007) έτσι ώστε να ενσωματώνει την πληροφόρηση για την κατάσταση καναλιού του κάθε χρήστη. Στο προτεινόμενο πρόβλημα δημοπρασίας, θεωρείται ότι οι χρήστες του δικτύου είναι οι πλειοδότες και ο σταθμός βάσης είναι ο δημοπράτης. Επίσης, θεωρείται ότι κάθε χρήστης έχει διαφορετική συνάρτηση χρησιμότητας ανάλογα με την εφαρμογή την οποία τρέχει και το απαιτούμενο εύρος ζώνης του. Οι συναρτήσεις χρησιμότητας εξαρτώνται έμμεσα από την κατάσταση του καναλιού κάθε χρήστη και επιπρόσθετα από τον απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης της εφαρμογής του. Μαθηματικά, η συνάρτηση χρησιμότητας του χρήστη  $i$  μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$U_i(x_i) = U_i\left(\frac{x_i - x_{i,min}}{x_{i,required} - x_{i,min}}, h(R_i, g_i)\right) \quad (5.31)$$

όπου  $x_i$  είναι το εκχωρημένο εύρος ζώνης στο χρήστη  $i$ . Οι συναρτήσεις χρησιμότητας μεγιστοποιούνται όταν το εκχωρημένο εύρος ζώνης είναι ίσο με το απαιτούμενο εύρος ζώνης (σχήμα 5.5). Στην ανάλυση που ακολουθεί, θεωρείται ότι ο ΣΒ μπορεί να ικανοποιήσει τις ελάχιστες απαιτήσεις εύρους ζώνης όλων των χρηστών και απομένει να εκχωρηθεί το υπολειπόμενο εύρος ζώνης βάσει των απαιτήσεων των χρηστών. Συνεπώς, οι συναρτήσεις χρησιμότητας εφαρμόζονται σε τιμές μεγαλύτερες από τα  $x_{i,min}$ . Επιπλέον, στην περίπτωση των εφαρμογών πραγματικού χρόνου, θεωρείται ότι οι σιγμοειδείς συναρτήσεις χρησιμότητας των χρηστών προσεγγίζονται με κοίλες συναρτήσεις. Συνεπώς, για τις συναρτήσεις χρησιμότητας όλων των εφαρμογών, ικανοποιούνται οι ακόλουθες συνθήκες:

1.  $U_i(1) = 1$
2.  $U_i' \left( \frac{x_i - x_{i,min}}{x_{i,required} - x_{i,min}} \right)$  είναι μη αύξουσα
3.  $U_i'' \left( \frac{x_i - x_{i,min}}{x_{i,required} - x_{i,min}} \right) \leq 0$

Στη συγκεκριμένη προσέγγιση, το πρόβλημα του δικτύου ορίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \max_{x_i} \sum_{i=1}^N U_i \left( \frac{x_i - x_{i,min}}{x_{i,required} - x_{i,min}} \right) \\ \text{s.t.} \sum_{i=1}^N x_i = B_{tot}, x_{i,min} \leq x_i \leq x_{i,required}, \forall i. \end{aligned} \quad (5.32)$$

Η κατανομή που ικανοποιεί την σχέση (5.32) και μεγιστοποιεί τη συνολική χρησιμότητα όλων των παικτών (απόδοση συστήματος) ονομάζεται αποδοτική κατανομή.

Μια άλλη βασική θεώρηση στο συγκεκριμένο πρόβλημα είναι ότι ο ΣΒ δεν γνωρίζει την συνάρτηση χρησιμότητας του κάθε χρήστη καθώς και ότι οι χρήστες δρουν ως στρατηγικοί αγοραστής.

Συγκεκριμένα, θεωρούμε ότι κάθε χρήστης στέλνει μια μονοδιάστατη προσφορά στο ΣΒ, ο οποίος με τη σειρά του αντιστοιχεί κάθε προσφορά σε ένα συγκεκριμένο εύρος ζώνης και σε μια συγκεκριμένη πληρωμή ανά χρήστη, χρησιμοποιώντας ένα αναλογικό σχήμα. Αναλυτικότερα, το ζεύγος των κανόνων κατανομής και πληρωμής δίνεται από τη σχέση :

$$\text{Κανόνας κατανομής: } x_i(\mathbf{b}) = \begin{cases} \frac{b_i(h(g_i, R_i))}{B} B_{tot} & \text{αν } \mathbf{b} \neq \mathbf{0} \\ 0 & \text{αν } \mathbf{b} = \mathbf{0} \end{cases} \quad (5.33)$$

$$\text{Κανόνας πληρωμής: } m_i(\mathbf{b}) = \begin{cases} b_i(h(g_i, R_i)) \cdot B_{-i} & \text{αν } B_{-i} \neq 0 \\ 0 & \text{αν } B_{-i} = 0 \end{cases} \quad (5.34)$$

όπου  $B = \sum_{i=1}^N b_i$  είναι το άθροισμα όλων των προσφορών και  $B_{-i} = \sum_{j=1, j \neq i}^N b_j$  είναι το άθροισμα των προσφορών όλων των χρηστών εκτός του χρήστη  $i$ . Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο κανόνας πληρωμής προέκυψε θεωρώντας τη συνάρτηση οριακής τιμής  $r(u) = \frac{u^2}{C}$  (Yang & Hajek, 2007).

Η κατανομή στο σημείο ισορροπίας Nash μπορεί να βρεθεί από την λύση του ακόλουθου μη συνεργατικού παιγνίου:  $VCGK = [N, \{b_i\}_{i \in N}, \{\Pi_i\}_{i \in N}]$ , όπου  $N$  είναι το σύνολο των χρηστών στο δίκτυο,  $b_i$  είναι η στρατηγική του κάθε χρήστη και  $\Pi_i$  είναι η συνάρτηση κέρδους του χρήστη  $i$ , η οποία ορίζεται ως εξής:

$$\Pi_i(b_i) = U_i \left( \frac{x_i(b_i(h(g_i, R_i))) - x_{i,min}}{x_{i,required} - x_{i,min}} \right) - m_i(b_i) \quad (5.35)$$

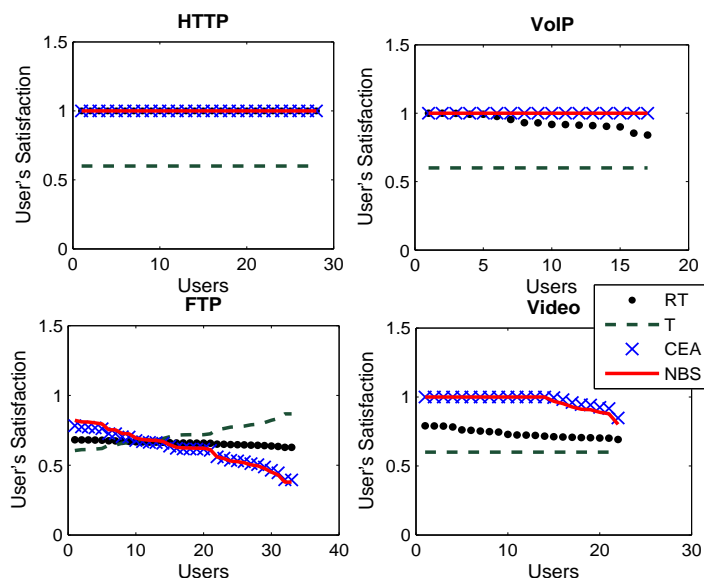
Σε αυτή την περίπτωση, η στρατηγική κάθε χρήστη αναφέρεται στη προσφορά που καταθέτει προκειμένου να αγοράσει το επιθυμητό εύρος ζώνης ανάλογα με την κατάσταση του καναλιού του.

Στο προτεινόμενο παίγνιο, κάθε χρήστης δρα εγωιστικά προσπαθώντας να μεγιστοποιήσει το κέρδος του προσαρμόζοντας τη δική του προσφορά. Το παίγνιο έχει μια ισορροπία Nash αν για κάθε  $i \in N$  ισχύει ότι  $\Pi_i(b_i, b_{-i}) \geq \Pi_i(b'_i, b_{-i})$  για όλα τα  $b'_i \in B_i$ . Παρόμοια με το (Yang & Hajek, 2007), η ισορροπία Nash του παιγνίου καταλήγει σε μια αποδοτική κατανομή. Για να προκύψει το σημείο ισορροπίας χρησιμοποιείται ο ακόλουθος αλγόριθμος:

1. Οι χρήστες στέλνουν ένα μήνυμα στο ΣΒ δηλώνοντας τις απαιτήσεις ρυθμού μετάδοσης τους.
2. Ο ΣΒ υπολογίζει το απαιτούμενο εύρος ζώνης για κάθε χρήστη και το ανακοινώνει στους χρήστες.
3. Όλοι οι χρήστες θέτουν μια προσφορά ίση με το απαιτούμενο εύρος ζώνης  $b_i(0) = x_{i,required}$ .
4. Ο ΣΒ υπολογίζει την κατανομή και την πληρωμή κάθε χρήστη χρησιμοποιώντας το ζεύγος κανόνων (σχέσεις (5.33), (5.34)) και ανακοινώνει την αντίστοιχη κατανομή και χρέωση σε κάθε χρήστη.
5. Δεδομένων των προσφορών των άλλων χρηστών, κάθε χρήστης υπολογίζει την προσφορά που μεγιστοποιεί τη συνάρτηση κέρδους του, χρησιμοποιώντας έναν επαναληπτικό αλγόριθμο χαλάρωσης όπως στο (Niyato & Hossain, 2009).
6. Οι χρήστες καταθέτουν τις νέες προσφορές τους και τα βήματα 4-6 επαναλαμβάνονται μέχρι οι προσφορές των χρηστών να παραμένουν αμετάβλητες.

Είδος εφαρμογής	HTTP	FTP	VoIP	Video
Απαιτούμενος Ρυθμός	128Kbps	512Kbps	256Kbps	1024Kbps

Πίνακας 5.2: Απαιτήσεις εύρους ζώνης ανά εφαρμογή



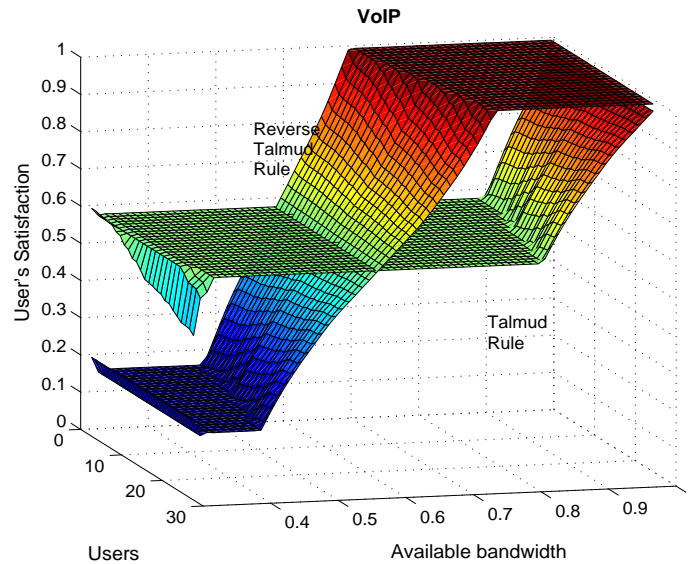
Σχήμα 5.6: Σύγκριση κεντροποιημένων μηχανισμών για εκχώρηση εύρους ζώνης

### 5.2.5 Αριθμητική ανάλυση προτεινόμενων μηχανισμών

Στη συγκεκριμένη ενότητα, μελετάται η απόδοση των προτεινόμενων σχημάτων εκχώρησης εύρους ζώνης μέσω προσομοιώσεων και αναλύονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε προσέγγισης. Οι παράμετροι σχεδίασης του συστήματος που εξετάζεται είναι παρόμοιες με το (Saraydar et al., 2002). Συγκεκριμένα, κάθε χρήστης τοποθετείται σε απόσταση  $d_i$  από το ΣΒ και το κέρδος διαδρομής του υπολογίζεται χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο απωλειών διαδρομής (όπου  $n = 4$ ), το οποίο καθορίζει τη μέση λαμβανόμενη ισχύ. Τα αντίστοιχα πλάτη είναι κατανομημένα κατά Rayleigh, ενώ η κανονικοποιημένη ισχύς ακολουθεί την εκθετική κατανομή (Fontán & Espiñeira, 2008). Επιπλέον, θεωρείται ότι οι χρήστες έχουν διαφορετικές απαιτήσεις χωρητικότητας ανάλογα με τις εφαρμογές τους, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.2.

#### Κεντροποιημένη προσέγγιση

Στο πρώτο μέρος των προσομοιώσεων, αναλύεται η απόδοση των κανόνων κατανομής που χρησιμοποιούνται στο πρόβλημα της χρεωκοπίας και συγκρίνονται τα αποτελέσματα των συγκεκριμένων κανόνων ως προς το βαθμό δικαιοσύνης και απόδοσης. Αρχικά, ορίζεται μια νέα μετρική που εκφράζει την ικανοποίηση του χρήστη και ορίζεται ως ο λόγος του εύρους ζώνης που εκχωρείται σε κάθε χρήστη ως προς το απαιτούμενο εύρος ζώνης του. Στο σχήμα 5.6, απεικονίζεται ο δείκτης ικανοποίησης των χρηστών χρησιμοποιώντας τους προτεινόμενους κανόνες κατανομής καθώς και τη λύση της διαπραγματεύσεως Nash. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στον άξονα  $x$ , οι χρήστες είναι τοποθετημένοι με φθίνουσα σειρά των κερδών διαδρομής τους. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, έχει θεωρηθεί ότι το συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι μεγαλύτερο από το μισό του αθροίσματος των απαιτήσεων εύρους ζώνης όλων των χρηστών. Όπως παρατηρείται από το σχήμα 5.6, ο δείκτης ικανοποίησης

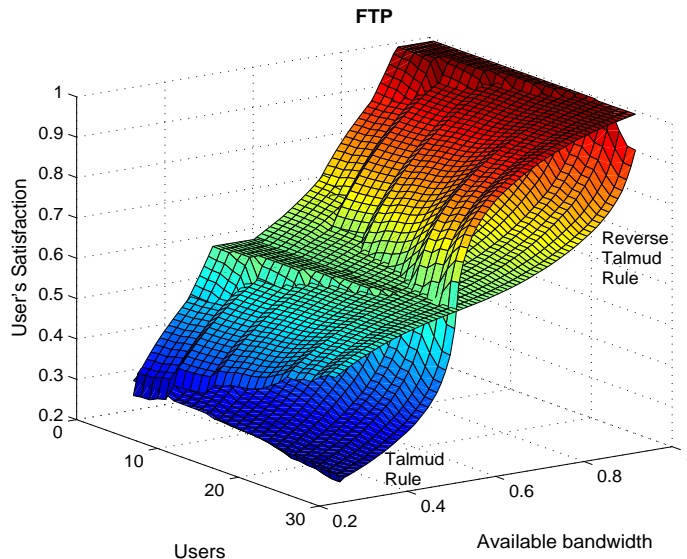


Σχήμα 5.7: Σύγκριση κανόνα T και κανόνα RT για εφαρμογές VoIP

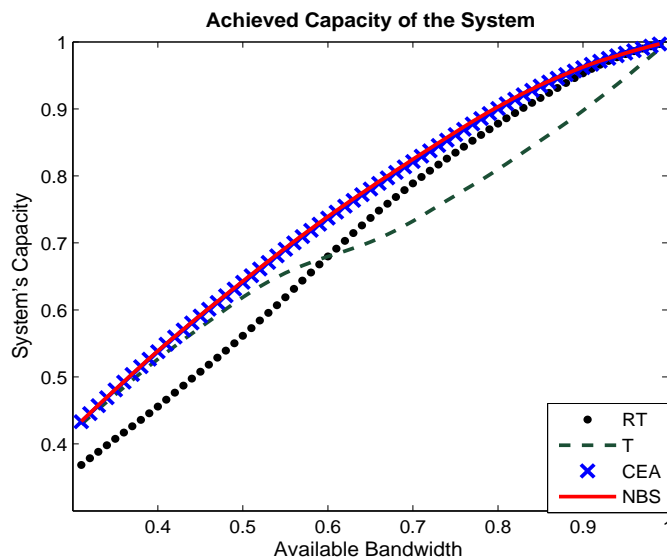
των χρηστών (για όλες τις εφαρμογές) είναι ίδιος στην περίπτωση του κανόνα CEA και της λύσης του συνεργατικού παιγνίου. Παρόλα αυτά, η χρήση του κανόνα κατανομής CEA απαιτεί λιγότερο υπολογιστικό χρόνο και ισχύ συγκρινόμενη με τη λύση NBS, κάτι το οποίο αποτελεί το βασικό πλεονέκτημα του κανόνα CEA έναντι της λύσης NBS. Επιπλέον, παρατηρείται ότι για τις εφαρμογές με μικρότερες απαιτήσεις ρυθμού μετάδοσης (όπως είναι οι HTTP, VoIP), οι μηχανισμοί NBS, CEA και RT ικανοποιούν πλήρως τις απαιτήσεις των χρηστών, ενώ ο κανόνας T καταλήγει σε μικρότερο δείκτη ικανοποίησης για σχεδόν όλες τις περιπτώσεις. Από την άλλη μεριά, για τις εφαρμογές με υψηλότερες απαιτήσεις χωρητικότητας, ο λόγος ικανοποίησης πέφτει για την περίπτωση των κανόνων CEA, RT και NBS, ανάλογα την κατάσταση καναλιού του κάθε χρήστη. Αντίθετα, ο κανόνας T καταλήγει στον ίδιο λόγο ικανοποίησης για όλες τις εφαρμογές, ενώ εξαρτάται ελάχιστα από την κατάσταση καναλιού του χρήστη. Από τις παραπάνω παρατηρήσεις, είναι προφανές ότι οι κανόνες κατανομής ικανοποιούν διάφορες απαιτήσεις. Επομένως, ο πάροχος του δικτύου που ελέγχει τις λειτουργίες του ΣΒ μπορεί να χρησιμοποιήσει διαφορετικούς κανόνες κατανομής ανάλογα με τους στόχους που θέλει να πετύχει. Συγκεκριμένα, αν ο βασικός στόχος του είναι η παροχή υψηλής ποιότητας υπηρεσίας για ένα ποσοστό των χρηστών χωρίς καμία εγγυήση ποιότητας υπηρεσίας για τους υπόλοιπους χρήστες, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο κανόνας CEA ή ο κανόνας RT. Από την άλλη μεριά, αν ο βασικός στόχος είναι η δίκαια κατανομή ανάμεσα στους χρήστες, το οποίο σημαίνει ότι όλοι οι χρήστες πρέπει να έχουν παρόμοια ποιότητα υπηρεσίας, τότε συνίσταται η εφαρμογή του κανόνα T.

Από τις βασικές εκφράσεις των κανόνων κατανομής ((5.17), (5.18), (5.19), (5.20)) παρατηρείται ότι ο κανόνας T και ο κανόνας RT καταλήγουν σε διαφορετικά αποτελέσματα ανάλογα με το αν το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι μεγαλύτερο από το μισό του αθροίσματος των συνολικών απαιτήσεων ή όχι. Για το λόγο αυτό, προκειμένου να είναι εφικτή η σύγκριση των δύο συγκεκριμένων κανόνων, μελετάται ξεχωριστά η επίδοση του καθενός για μια ευρεία κλίμακα τιμών του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Στο σχήμα 5.7, παρουσιάζεται ο δείκτης ικανοποίησης των χρηστών για κάθε κανόνα, για την περίπτωση της εφαρμογής VoIP (μικρές απαιτήσεις εύρους ζώνης). Παρατηρείται ότι στην περίπτωση του κανόνα T, ο λόγος ικανοποίησης του χρήστη παραμένει σχεδόν σταθερός για το μεγαλύτερο μέρος της κλίμακας του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Μια άλλη ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι για αυτές

τις τιμές του διαθέσιμου εύρους ζώνης, το αποτέλεσμα της κατανομής δείχνει να είναι ανεξάρτητο από την κατάσταση του καναλιού του χρήστη. Αντίθετα, ο λόγος ικανοποίησης στην περίπτωση του κανόνα RT αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Επιπλέον, είναι προφανές ότι οι χρήστες με καλύτερη κατάσταση καναλιού είναι περισσότερο ικανοποιημένοι, γεγονός το οποίο δείχνει ότι η κατάσταση καναλιού επηρεάζει σημαντικά το αποτέλεσμα της εκχώρησης. Προκειμένου



Σχήμα 5.8: Σύγκριση κανόνα T και κανόνα RT για εφαρμογές FTP



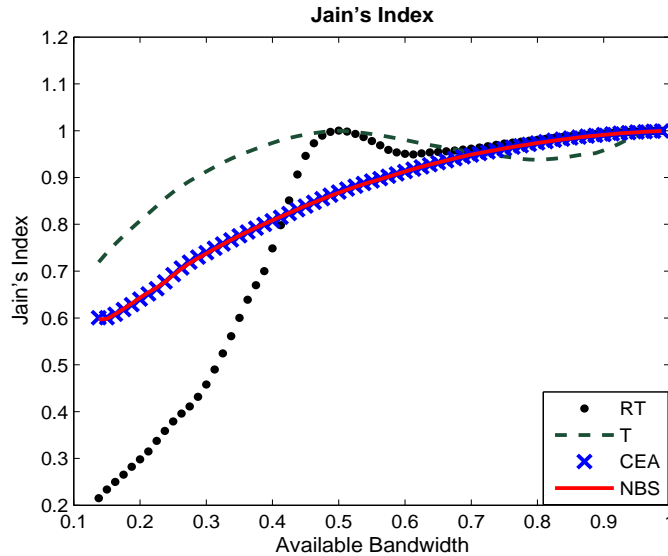
Σχήμα 5.9: Συνολική χωρητικότητα του συστήματος ως προς το διαθέσιμο εύρος ζώνης

να μελετηθεί η συμπεριφορά των δύο αυτών κανόνων κατανομής για τις εφαρμογές με υψηλότερες απαιτήσεις χωρητικότητας, παρουσιάζεται στο σχήμα 5.8, ο δείκτης ικανοποίησης των χρηστών για τις εφαρμογές FTP. Στην περίπτωση αυτή, ο λόγος ικανοποίησης των χρηστών χρησιμοποιώντας τον κανόνα T είναι χειρότερος από ότι στην περίπτωση του κανόνα RT, όταν το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι μικρότερο από το μισό του αθροίσματος των απαιτήσεων των χρηστών ενώ είναι καλύτερο στην



αντίθετη περίπτωση. Το συγκεκριμένο συμπέρασμα έρχεται σε αντίθεση με το συμπέρασμα για την κατανομή εύρους ζώνης όταν γίνεται αναφορά σε εφαρμογές με μικρές απαιτήσεις χωρητικότητας (σχήμα 5.7). Συνεπώς, μια ενδιαφέρουσα διαπίστωση είναι ότι ο πάροχος του δικτύου μπορεί να αποφασίσει ποιον κανόνα κατανομής να χρησιμοποιήσει (T, RT) βάσει του διαθέσιμου εύρους ζώνης και της προτεραιότητας κάθε εφαρμογής.

Τέλος, συγκρίνονται οι κανόνες κατανομής με τη λύση NBS ως προς την συνολική χωρητικότητα



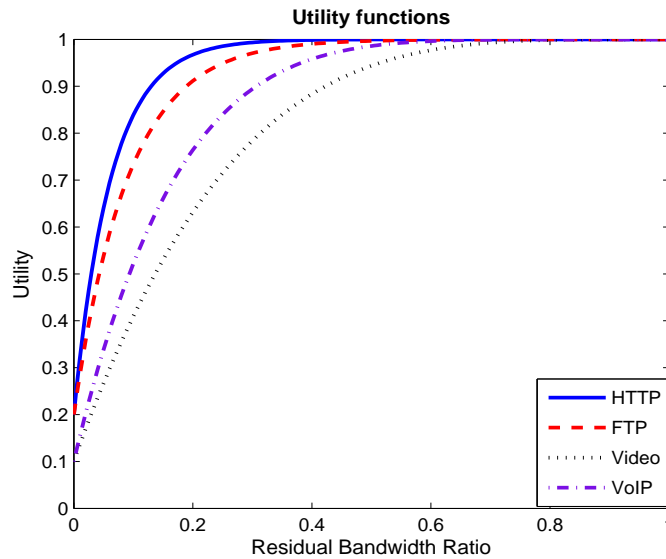
Σχήμα 5.10: Δείκτης Jain ως προς το συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης

και το βαθμό δικαιοσύνης που επιτυγχάνεται σε κάθε σχήμα. Στο σχήμα 5.9, παρουσιάζεται η συνολική χωρητικότητα του συστήματος, η οποία ορίζεται ως ο λόγος του αθροίσματος των χωρητικότητων όλων των χρηστών προς τη μέγιστη δυνατή χωρητικότητα, για διαφορετικές τιμές του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Όπως ήταν αναμενόμενο, οι κανόνες NBS και CEA καταλήγουν σε υψηλότερα επίπεδα χωρητικότητας σε σχέση με τους άλλους δύο κανόνες. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί δεδομένου ότι οι κανόνες T και RT εκχωρούν περισσότερο εύρος ζώνης σε χρήστες με χειρότερο κέρδος διαδρομής καταλήγοντας επομένως σε χαμηλότερες τιμές χωρητικότητας.

Προκειμένου να συγκριθούν τα προτεινόμενα κεντροκοποιημένα σχήματα ως προς το βαθμό δικαιοσύνης της κατανομής, χρησιμοποιείται ο γνωστός δείκτης Jain (Jain et al., 1984), ο οποίος ορίζεται ως

$$I_{Jain} = \frac{\left| \sum_{i=1}^N x_i \right|^2}{N \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (5.36)$$

όπου  $x_i$  είναι ο λόγος του εκχωρημένου εύρους ζώνης προς το απαιτούμενο εύρος ζώνης του χρήστη  $i$  και  $N$  είναι ο συνολικός αριθμός των χρηστών. Στο σχήμα 5.10, παρουσιάζονται οι τιμές του δείκτη Jain για κάθε μέθοδο κατανομής ως προς το συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης. Όπως παρατηρείται, ο κανόνας T έχει υψηλότερο δείκτη δικαιοσύνης όταν το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι λιγότερο από το 68% του απαιτούμενου εύρους ζώνης, ενώ οι RT, CEA, NBS καταλήγουν σε υψηλότερο δείκτη στην αντίθετη περίπτωση. Επομένως, τα βασικά συμπεράσματα είναι ότι ενώ η λύση NBS και ο κανόνας CEA οδηγούν σε υψηλότερη χωρητικότητα συστήματος, ο κανόνας T εκχωρεί πιο δίκαια το εύρος ζώνης, ενώ η συμπεριφορά του κανόνα RT εξαρτάται άμεσα από το διαθέσιμο εύρος ζώνης.



Σχήμα 5.11: Συναρτήσεις χρησιμότητας για κάθε εφαρμογή

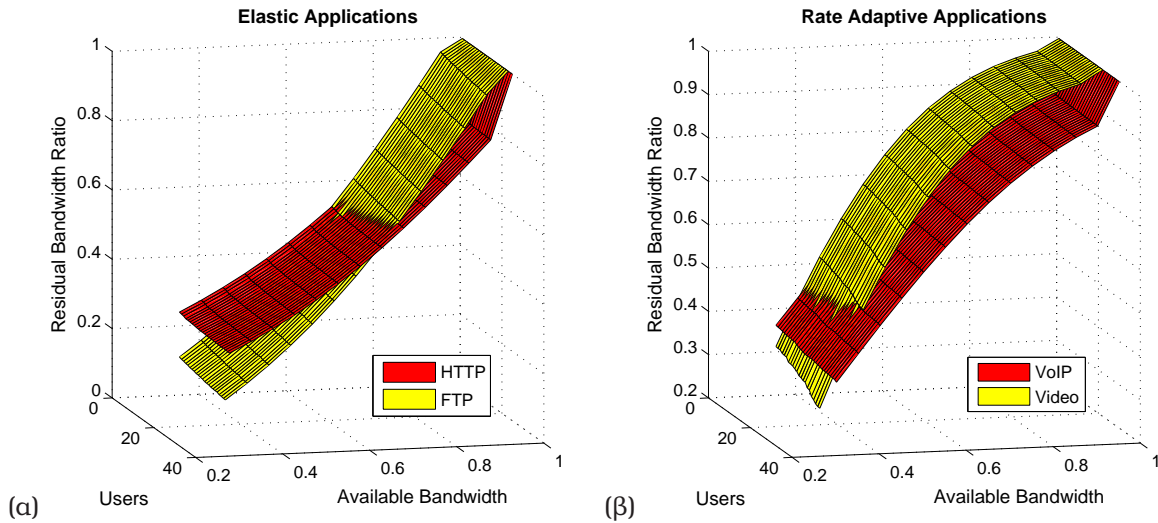
### Κατανεμημένη προσέγγιση

Σε αυτή την ενότητα, αναλύεται αριθμητικά η απόδοση του προτεινόμενου μηχανισμού VCG-Kelly, ο οποίος έχει τροποποιηθεί έτσι ώστε να λαμβάνει υπόψη την επίδραση του καναλιού. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπως αναφέρεται και προηγουμένως, ο προτεινόμενος μηχανισμός εφαρμόζεται μετά την εκχώρηση των ελάχιστων εγγυήσεων σε κάθε χρήστη. Για λόγους ευκολίας, ορίζεται η παράμετρος που ονομάζεται λόγος υπολειπομένου εύρους ζώνης ως εξής:

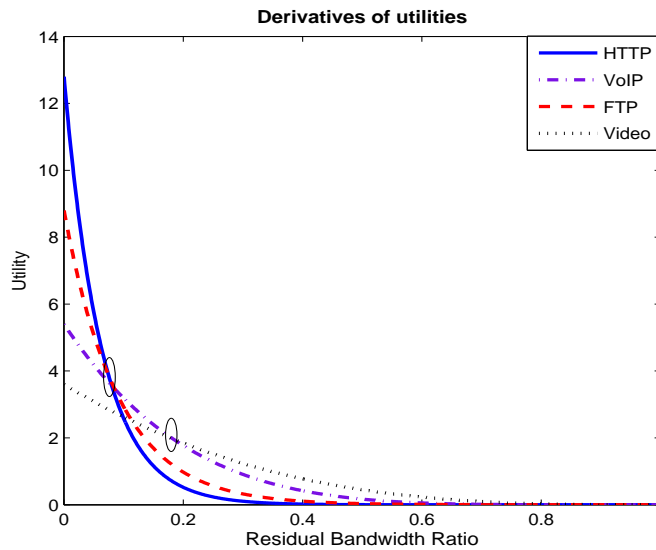
$$x_{i,res} = \frac{x_i - x_{i,min}}{x_{i,required} - x_{i,min}} \quad (5.37)$$

Στο σχήμα 5.11, απεικονίζονται οι συναρτήσεις χρησιμότητας ως προς το λόγο υπολειπόμενου εύρους ζώνης για κάθε εφαρμογή του πίνακα 5.2. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι χρησιμότητες των εφαρμογών πραγματικού χρόνου προσεγγίζονται από κοίλες συναρτήσεις, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη υποενότητα. Όταν, ο λόγος υπολειπόμενου εύρους ζώνης είναι ίσος με μηδέν, το οποίο σημαίνει ότι μόνο το ελάχιστο εύρος ζώνης εκχωρείται στους χρήστες, η χρησιμότητα κάθε εφαρμογής είναι ίση με μια θετική σταθερά που εξαρτάται από την ικανοποίηση του χρήστη. Για το σενάριο της προσομοίωσης, έχει θεωρηθεί ότι το εύρος ζώνης που είναι εγγυημένο σε κάθε χρήστη είναι ίσο με το 20% του απαιτούμενου εύρους ζώνης ( $x_{i,min} = 0.2 \cdot x_{i,required}$ ).

Αρχικά, στο σχήμα 5.12, μελετάται το αποτέλεσμα του μηχανισμού VCG-Kelly για μια ευρεία κλίμακα τιμών του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Οι κατανομές εύρους ζώνης μπορούν να χωριστούν σε δύο ομάδες: την κατανομή στους χρήστες με ελαστικές εφαρμογές (HTTP, FTP) και την κατανομή στους χρήστες με εφαρμογές προσαρμοζόμενου ρυθμού (VoIP, Video). Παρατηρώντας τα σχήματα 5.12α και 5.12β, είναι εμφανές ότι οι κατανομές κάθε ομάδας τέμνονται για μικρές τιμές του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί, θεωρώντας ότι το εύρος ζώνης εκχωρείται στις εφαρμογές με τον υψηλότερο ρυθμό αύξησης της συνάρτησης χρησιμότητας τους, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί το άθροισμα των χρησιμοτήτων. Συνεπώς, στο σχήμα 5.12α, εκχωρείται αρχικά περισσότερο εύρος ζώνης στους χρήστες με εφαρμογές HTTP καθώς η παράγωγος της συνάρτησης χρησιμότητας της συγκεκριμένης εφαρμογής είναι υψηλότερη από την παράγωγο της συνάρτησης χρησιμότητας της



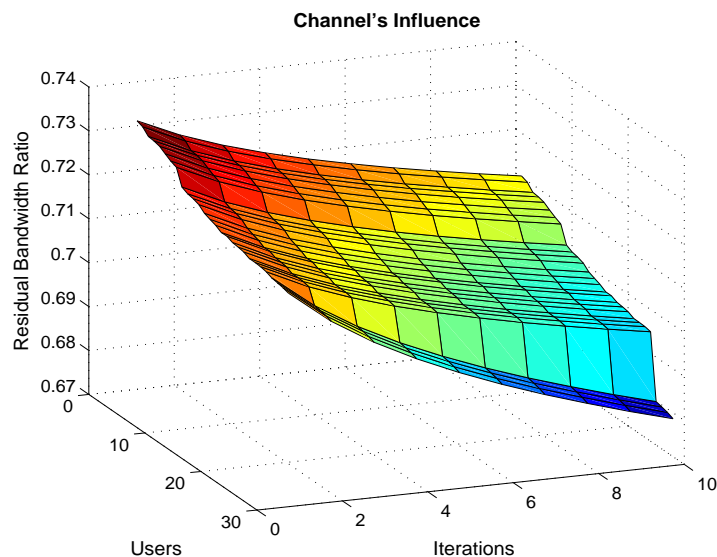
Σχήμα 5.12: Κατανομή εύρους ζώνης με χρήση του μηχανισμού VCG-Kelly



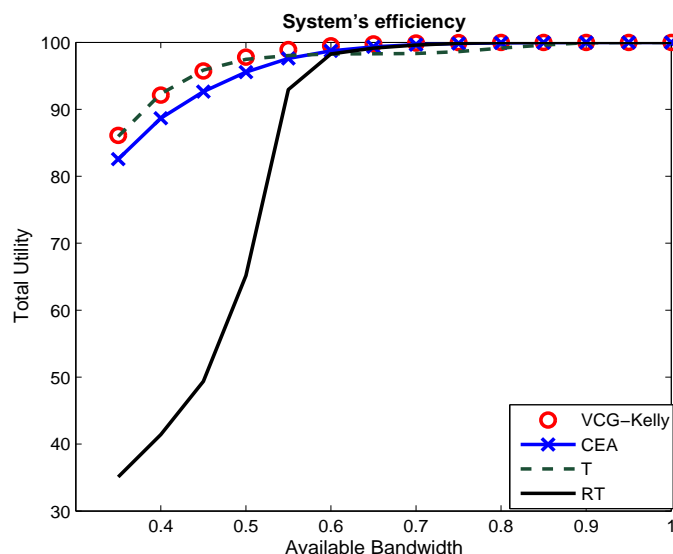
Σχήμα 5.13: Παράγωγοι συναρτήσεων χρησιμότητας για κάθε εφαρμογή

εφαρμογής FTP (σχήμα 5.13). Ωστόσο, μετά από ένα συγκεκριμένο κατώφλι του λόγου υπολειπόμενου εύρους ζώνης, περισσότερο φάσμα εκχωρείται στους χρήστες με εφαρμογές FTP. Με παρόμοια λογική, εξηγείται γιατί οι χρήστες με εφαρμογές VoIP είναι περισσότερο ικανοποιημένοι από ότι οι χρήστες με εφαρμογές Video (σχήμα 5.12β), όταν το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι περιορισμένο.

Τέλος, μελετάται η επίδραση της κατάστασης καναλιού στην κατανομή των ραδιοπόρων. Προκειμένου να είναι εφικτή η ανάλυση της επίδρασης του, θεωρείται ένας συγκεκριμένος αριθμός χρηστών και υπολογίζεται η κατανομή του εύρους ζώνης για διαφορετικές τιμές εξασθένησης των χρηστών αυτών. Συγκεκριμένα, ο άξονας των επαναλήψεων (iterations) του σχήματος 5.14 αναπαριστά τις επαναλήψεις του αλγορίθμου εκχώρησης, κατά τις οποίες θεωρείται αύξουσα εξασθένηση του καναλιού των χρηστών. Όπως παρατηρείται στο συγκεκριμένο διάγραμμα, ο λόγος του κατανεμημένου εύρους ζώνης για τους χρήστες με τα μικρότερα κέρδη διαδρομών μικραίνει όταν η κατάσταση καναλιού γίνεται χειρότερη. Επιπλέον, παρατηρείται ότι ο ρυθμός μείωσης είναι μεγαλύτερος για τους



Σχήμα 5.14: Επίδραση της κατάστασης καναλιού στην κατανομή του αλγορίθμου VCG-Kelly



Σχήμα 5.15: Απόδοση του συστήματος συναρτήσει του συνολικού διαθέσιμου εύρους ζώνης

χρήστες με μικρές τιμές κέρδους καναλιού συγκριτικά με τους χρήστες που έχουν καλύτερες τιμές κέρδους καναλιού.

Η κεντροκοποιημένη και η κατανεμημένη προσέγγιση που παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα, δεν μπορούν να συγκριθούν καθώς αποτελούν λύσεις σε διαφορετικά αρχικά προβλήματα. Ωστόσο, μελετάται ποια θα ήταν η απόδοση του συστήματος για ένα σύστημα ασύρματης πρόσβασης αν εφαρμοσθούν οι κανόνες κατανομής. Στο σχήμα 5.15, παρουσιάζεται η αθροιστική χρησιμότητα των χρηστών για κάθε κανόνα κατανομής και για μια ευρεία κλίμακα του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Παρατηρείται ότι εκτός από τον κανόνα RT ο οποίος οδηγεί σε πολύ χαμηλά επίπεδα απόδοσης του συστήματος, οι άλλοι κανόνες καταλήγουν σε πολύ υψηλότερα επίπεδα. Παρόλα αυτά, το συγκεκριμένο συμπέρασμα δεν μπορεί να γενικευθεί καθώς το τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται από τις συναρτήσεις χρησιμότητας που χρησιμοποιούνται κάθε φορά.

### **5.3 Ανάλυση προβλήματος εκχώρησης εύρους ζώνης σε δίκτυα πολλαπλών δορυφόρων**

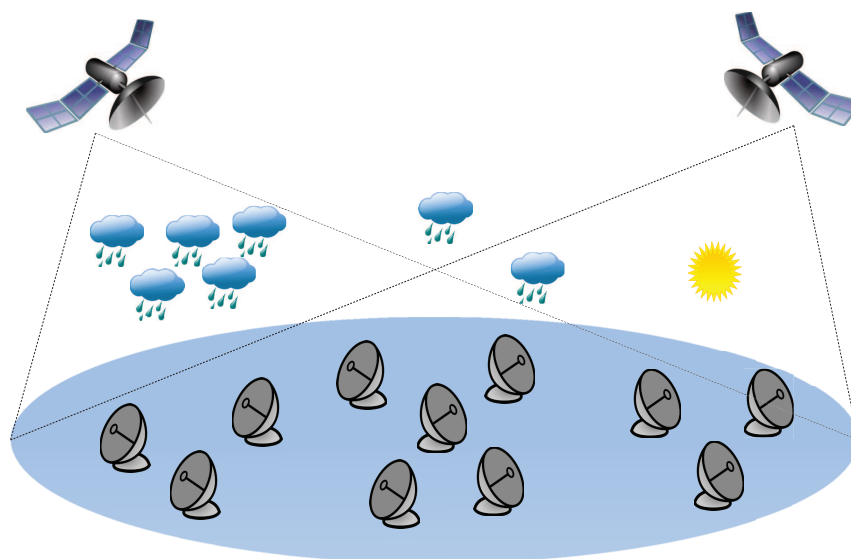
Σε αυτή την ενότητα αναλύεται το πρόβλημα της εκχώρησης εύρους ζώνης σε ένα ευρυζωνικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα πολλαπλών δορυφόρων, χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο παιγνίου δύο επιπέδων. Συγκεκριμένα, το υπό μελέτη πρόβλημα μπορεί να χωριστεί σε δύο διαφορετικά υποπροβλήματα. Το πρώτο υποπρόβλημα αναφέρεται στην επιλογή δορυφόρου από τους τελικούς χρήστες, ενώ το δεύτερο υποπρόβλημα αφορά την κατανομή του εύρους ζώνης κάθε δορυφόρου στους χρήστες. Δεδομένης της αλληλεξάρτησης των δύο υποπροβλημάτων και προκειμένου να βρεθεί μια λύση σε καθένα από αυτά, το αρχικό πρόβλημα της εκχώρησης εύρους ζώνης μοντελοποιείται σαν ένα παίγνιο πολλαπλών-αγοραστών, πολλαπλών-πωλητών. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι υπάρχει ένα σύνολο δορυφόρων, οι οποίοι αποτελούν τους πωλητές του παιγνίου και οι οποίοι “πουλάνε” φάσμα σε ένα συγκεκριμένο αριθμό χρηστών έτσι ώστε να μεγιστοποιούν το κέρδος τους. Παράλληλα, κάθε χρήστης (αγοραστής) επιλέγει από ποιο δορυφόρο θα “αγοράσει” το απαιτούμενο εύρος ζώνης έτσι ώστε να βελτιστοποιήσει την απόδοσή του. Για λόγους ευκολότερης κατανόησης, στη συνέχεια, θεωρείται ότι κάθε δορυφόρος αντιπροσωπεύεται από ένα πάροχο δορυφορικών υπηρεσιών, ο οποίος θα έχει το ρόλο του πωλητή στο παίγνιο.

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η προτεινόμενη μοντελοποίηση του συγκεκριμένου προβλήματος δεν αφορά αποκλειστικά δορυφορικά δίκτυα, αλλά μπορεί να εφαρμοσθεί και σε άλλα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, στα οποία παρουσιάζεται το ίδιο πρόβλημα.

#### **5.3.1 Περιγραφή προβλήματος εκχώρησης εύρους ζώνης**

Στη συγκεκριμένη υποενότητα, περιγράφεται συνοπτικά το υπό μελέτη πρόβλημα καθώς και ο τρόπος επίλυσης του. Όπως προαναφέρθηκε, θεωρείται ένα ευρυζωνικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα με πολλαπλούς δορυφόρους για το οποίο λύνεται το πρόβλημα της αποδοτικής εκχώρησης εύρους ζώνης χρησιμοποιώντας αρχές από την οικονομική θεωρία και συγκεκριμένα από τη θεωρία παιγνίων. Αναλυτικότερα, προκειμένου να μελετηθεί το συγκεκριμένο πρόβλημα τόσο από τη μεριά των δορυφορικών παρόχων όσο και από τη μεριά των τελικών χρηστών, το αρχικό πρόβλημα μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση που βασίζεται στους κανόνες αγοράς και ονομάζεται προσέγγιση πολλαπλών-πωλητών, πολλαπλών-αγοραστών. Στο προτεινόμενο μοντέλο, το αγαθό προς πώληση είναι το διαθέσιμο εύρος ζώνης, ενώ οι πάροχοι δορυφορικών υπηρεσιών αποτελούν τους πωλητές και οι τελικοί χρήστες του συστήματος αποτελούν τους αγοραστές του αγαθού. Σύμφωνα με τους κανόνες της αγοράς, οι πωλητές προσπαθούν να μεγιστοποιήσουν το κέρδος τους επιλέγοντας την τιμή του αγαθού, ενώ οι αγοραστές προσπαθούν να ελαχιστοποιήσουν το κόστος τους επιλέγοντας από ποιον πωλητή θα αγοράσουν το προϊόν. Αντίστοιχα, στο θεωρούμενο πρόβλημα, κάθε πάροχος χρεώνει το διαθέσιμο εύρος ζώνης του δορυφόρου του με μια συγκεκριμένη τιμή προσπαθώντας να μεγιστοποιήσει το κέρδος του. Στη συνέχεια, δεδομένης της τιμής που θέτει κάθε πάροχος, οι δορυφορικοί χρήστες επιλέγουν από ποιον πάροχο θα αγοράσουν το απαιτούμενο εύρος ζώνης έτσι ώστε να μεγιστοποιήσουν την απόδοσή τους. Επομένως το αρχικό πρόβλημα μπορεί να χωριστεί σε δύο διαφορετικά υποπροβλήματα: το πρόβλημα του αγοραστή και το πρόβλημα του πωλητή. Το πρώτο αναφέρεται στην επιλογή του παρόχου από τους χρήστες, ενώ το δεύτερο αναφέρεται στην επιλογή της τιμής χρέωσης από τους παρόχους δορυφορικών υπηρεσιών.

Από την πλευρά των αγοραστών, το πρόβλημα της επιλογής του παρόχου δορυφορικών υπηρεσιών



Σχήμα 5.16: Μοντέλο συστήματος πολλαπλών δορυφόρων

επιλύεται χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές προσεγγίσεις. Στην πρώτη προσέγγιση, το συγκεκριμένο πρόβλημα μοντελοποιείται σαν ένα δυναμικό, μη συνεργατικό παίγνιο στο οποίο στόχος είναι να βρεθεί η ισορροπία Nash. Στη δεύτερη προσέγγιση, θεωρείται ότι οι χρήστες χωρίζονται σε εικονικά γκρουπ χρηστών ανάλογα με τη φασματική τους απόδοση (Castro & Granados, 2007) και το πρόβλημα της επιλογής μοντελοποιείται ως ένα εξελικτικό παίγνιο στο οποίο υπολογίζεται η εξελικτική ισορροπία. Από την άλλη πλευρά, το πρόβλημα των πωλητών επιλύεται μοντελοποιώντας το σαν ένα δυναμικό, μη συνεργατικό παίγνιο στο οποίο οι πάροχοι είναι οι παίκτες του παιχνιδιού και η στρατηγική κάθε παίκτη είναι η τιμή εύρους ζώνης. Στη συνέχεια, πριν την αναλυτικότερη περιγραφή της επίλυσης των δύο προβλημάτων, παρουσιάζεται εν συντομία, το μοντέλο του συστήματος που χρησιμοποιείται.

### 5.3.2 Μοντέλο Συστήματος

Στο σενάριο υπο μελέτη, θεωρείται ένα ευρυζωνικό, δορυφορικό τηλεπικοινωνιακό δίκτυο με  $M = 2$  δορυφόρους που λειτουργούν στην Κυ ζώνη συχνοτήτων και  $N_{total}$  δορυφορικά τερματικά που αντιστοιχούν στους τελικούς χρήστες, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 5.16. Στις συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων που λειτουργεί το δορυφορικό σύστημα, ο κυρίαρχος μηχανισμός εξασθένησης οφείλεται σε κλιματικά φαινόμενα και κυρίως σε φαινόμενα βροχόπτωσης, τα οποία, όπως είναι γνωστό, εμφανίζουν σημαντικές χωροχρονικές μεταβολές. Για το λόγο αυτό, τα δορυφορικά τερματικά, τα οποία θεωρούνται ομοιόμορφα κατανομημένα, θεωρείται ότι έχουν διαφορετικές μακροπρόθεσμες κλιματικές συνθήκες σε όρους ρυθμού βροχοπτώσεως. Συγκεκριμένα, η εξασθένιση λόγω βροχής θεωρείται ότι έχει διαφορετική κατανομή σε κάθε περιοχή, με αποτέλεσμα οι χρήστες να χαρακτηρίζονται από διαφορετικές συνθήκες καναλιού.

Στην ανάλυση που ακολουθεί, εστιάζουμε στην κάτω ζεύξη του συγκεκριμένου δορυφορικού τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι κάθε δορυφόρος έχει δεδομένο διαθέσιμο εύρος ζώνης, το οποίο πρέπει να εκχωρήσει στους τελικούς χρήστες. Προκειμένου να μελετηθεί το πρόβλημα της εκχώρησης ραδιοπόρων από τη μεριά του παρόχου δορυφορικών επικοινωνιών αλλά και από την πλευρά του δορυφορικού χρήστη, χρησιμοποιείται ένα παίγνιο αγοράς δύο επιπέδων.

Όπως προαναφέρεται, θεωρείται ένα παίγνιο πολλαπλών αγοραστών-πολλαπλών πωλητών, στο οποίο οι πάροχοι δορυφορικών υπηρεσιών αναπαριστούν τους πωλητές του αγαθού, ενώ οι χρήστες αναπαριστούν τους αγοραστές. Σκοπός του προτεινόμενου παιγνίου δύο επιπέδων είναι η μεγιστοποίηση του κέρδους των δορυφορικών παρόχων καθώς και η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της απόδοσης των χρηστών. Το παίγνιο του πρώτου επιπέδου αναφέρεται στον ανταγωνισμό τιμής ανάμεσα στους παρόχους δορυφορικών υπηρεσιών, όπου κάθε δορυφορικός πάροχος πρέπει να επιλέξει την τιμή του εύρους ζώνης έτσι ώστε να μεγιστοποιήσει τη χρησιμότητα του. Προφανώς, για τον κάθε δορυφορικό πάροχο, υπάρχει ένα αναμενόμενο tradeoff ανάμεσα στην επιλογή υψηλής και χαμηλής τιμής. Συγκεκριμένα, σε περίπτωση που ο ένας πάροχος επιλέξει υψηλότερη τιμή από ότι ο άλλος πάροχος, το κέρδος του ανά χρήστη θα αυξηθεί αλλά θα μειωθεί ο συνολικός αριθμός των χρηστών του, καθώς οι περισσότεροι χρήστες θα επιλέξουν τον πάροχο με τη χαμηλότερη τιμή. Αντίθετα, αν επιλέξει χαμηλή τιμή συγκριτικά με τον άλλο πάροχο, τότε ο αριθμός των χρηστών του θα αυξηθεί αλλά θα μειωθεί το κέρδος του ανά χρήστη. Αυτό σημαίνει ότι η στρατηγική του ενός παρόχου επηρεάζει ταυτόχρονα και τη στρατηγική που θα επιλέξει ο άλλος πάροχος. Προκειμένου να βρούμε ένα σημείο ισορροπίας, από το οποίο κανένας χρήστης δεν θα έχει κίνητρο να αποκλίνει, το παραπάνω πρόβλημα μοντελοποιείται ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο, στο οποίο οι δορυφορικοί πάροχοι είναι οι παίκτες του παιγνίου και η στρατηγική τους είναι η τιμή του εκχωρημένου εύρους ζώνης, και υπολογίζεται η ισορροπία Nash του παιγνίου. Το παίγνιο του δεύτερου επιπέδου αναφέρεται στην επιλογή του δορυφορικού παρόχου από τους χρήστες. Συγκεκριμένα, δεδομένης της τιμής που θέτει κάθε πάροχος, οι χρήστες πρέπει να επιλέξουν από ποιον πάροχο θα αγοράσουν το απαιτούμενο εύρος ζώνης έτσι ώστε να ελαχιστοποιήσουν το κόστος τους και να μεγιστοποιήσουν την απόδοσή τους. Στη συνέχεια, περιγράφεται αρχικά το παίγνιο των αγοραστών και έπειτα το παίγνιο των πωλητών.

### 5.3.3 Παίγνιο δεύτερου επιπέδου: πρόβλημα αγοραστών

Στη συγκεκριμένη υποενότητα, αναλύεται η επίλυση του προβλήματος επιλογής παρόχου δορυφορικών υπηρεσιών παρουσιάζοντας δύο διαφορετικές προσεγγίσεις για το αντίστοιχο παίγνιο. Αρχικά περιγράφεται η γενική μοντελοποίηση του προβλήματος ενώ στη συνέχεια, παρουσιάζεται η επίλυση του ως δυναμικό παίγνιο καθώς και ως εξελικτικό παίγνιο.

#### Περιγραφή του προβλήματος αγοραστών

Όπως προαναφέρεται, στο παίγνιο των αγοραστών, θεωρείται ότι παίκτες είναι οι χρήστες του τηλεπικοινωνιακού δικτύου, ενώ η στρατηγική κάθε χρήστη αναφέρεται στην επιλογή του για τον πάροχο δορυφορικών υπηρεσιών. Επομένως, το σύνολο στρατηγικών μπορεί να οριστεί σαν  $x_i \in [0, 1]$ , όπου  $x_i = 0$  ισχύει όταν ο χρήστης  $i$  επιλέγει το δορυφόρο Α, ενώ  $x_i = 1$  ισχύει όταν ο χρήστης  $i$  επιλέγει το δορυφορικό πάροχο Β. Επιπλέον, η συνάρτηση χρησιμότητας του παίκτη  $i$  ορίζεται ως εξής:

$$U_i^j = a \log\left(b \frac{W_j n_{i,j}}{N_j}\right) - p_j \log\left(\frac{W_j n_{i,j}}{N_j}\right) \quad (5.38)$$

όπου  $a$ ,  $b$  είναι σταθερές,  $W_j$  είναι το διαθέσιμο εύρος ζώνης του δορυφόρου  $j$ ,  $n_{i,j}$  είναι η φασματική απόδοση του χρήστη  $i$  προς τον δορυφόρο  $j$ ,  $N_j$  είναι ο αριθμός των χρηστών που αγοράζουν εύρος ζώνης από το δορυφόρο  $j$  και  $p_j$  είναι η τιμή που χρεώνεται ανά μονάδα ρυθμού μετάδοσης από τον συγκεκριμένο δορυφορικό πάροχο. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι παράμετροι  $a$  και  $b$  παρέχουν ευελιξία έτσι ώστε η προτεινόμενη συνάρτηση χρησιμότητας να μπορεί να προσαρμοστεί σε πραγ-

ματικά δεδομένα ή δεδομένα προσομοίωσης. Προφανώς, ο αριθμός των χρηστών που επιλέγουν το δορυφορικό πάροχο A δίνεται από την σχέση

$$N_A = N_{total} - \sum_{i=1}^{N_{total}} x_i, \quad (5.39)$$

ενώ ο αριθμός των χρηστών που επιλέγουν το δορυφορικό πάροχο B είναι ίσος με

$$N_B = \sum_{i=1}^{N_{total}} x_i. \quad (5.40)$$

Επομένως, είναι εμφανές ότι η στρατηγική κάθε χρήστη έχει επίδραση στην απόφαση των υπόλοιπων χρηστών καθώς μεταβάλλει τη συνάρτηση χρησιμότητας τους. Προκειμένου να βρεθεί ένα σημείο ισορροπίας από το οποίο κανένας χρήστης δεν θα έχει κίνητρο να αποκλίνει, το παίγνιο των αγοραστών λύνεται χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές προσεγγίσεις. Στην πρώτη προσέγγιση, το πρόβλημα της επιλογής του παρόχου μοντελοποιείται σαν ένα δυναμικό, μη συνεργατικό παίγνιο στο οποίο κάθε παίκτης προσπαθεί να μεγιστοποιήσει τη χρησιμότητα του και υπολογίζεται η ισορροπία Nash του παιγνίου. Στη δεύτερη προσέγγιση, οι χρήστες διαιρούνται σε ομάδες ανάλογα με τη φασματική τους απόδοση και το πρόβλημα μοντελοποιείται σαν ένα εξελικτικό παίγνιο στο οποίο υπολογίζεται το σημείο εξελικτικής ισορροπίας (evolutionary equilibrium).

### Μοντελοποίηση του προβλήματος αγοραστών ως δυναμικό παίγνιο

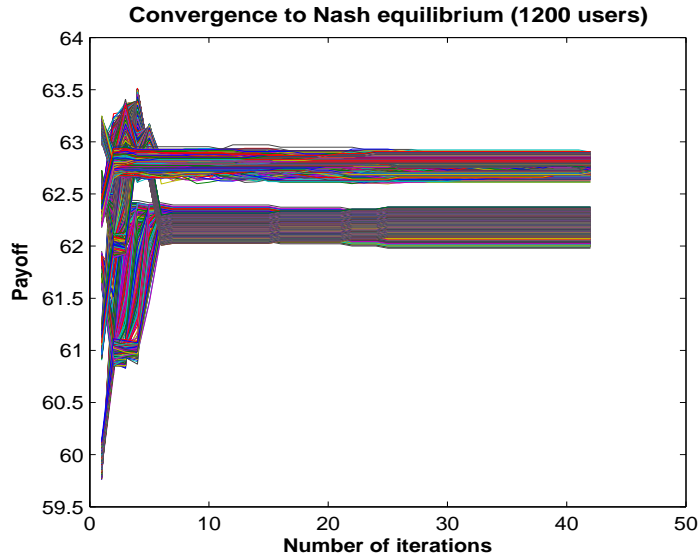
Στη συγκεκριμένη ενότητα, το πρόβλημα επιλογής παρόχου επιλύεται μοντελοποιώντας το σαν ένα δυναμικό παίγνιο. Συγκεκριμένα, θεωρείται το παίγνιο  $G = [N_{total}, \{x_i\}_{i \in N}, \{U_i\}_{i \in N}]$ , όπου  $N_{total}$  είναι το πεπερασμένο σύνολο των χρηστών,  $x_i$  είναι το σύνολο των στρατηγικών του χρήστη  $i$  και  $U_i$  είναι η συνάρτηση χρησιμότητας του. Σε αυτό το παίγνιο, κάθε χρήστης επιλέγει να αγοράσει εύρος ζώνης από ένα δορυφορικό πάροχο έτσι ώστε να μεγιστοποιήσει την απόδοσή του. Αναλυτικά, η συνάρτηση χρησιμότητας για το συγκεκριμένο παίγνιο μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$U_i = \begin{cases} U_i^A, & \text{για } U_i^A \geq U_i^B \\ U_i^B, & \text{για } U_i^A < U_i^B \end{cases} \Rightarrow$$

$$U_i = \begin{cases} a \log \left( b \frac{W_A n_{i,A}}{\left( N_{total} - \sum_{l=0}^{N_{total}} x_l \right)} \right) - p_A \log \left( \frac{W_A n_{i,A}}{N_{total} - \sum_{l=0}^{N_{total}} x_l} \right), & \text{για } U_i^A \geq U_i^B \\ a \log \left( b \frac{W_B n_{i,B}}{\sum_{l=0}^{N_{total}} x_l} \right) - p_B \log \left( \frac{W_B n_{i,B}}{\sum_{l=0}^{N_{total}} x_l} \right), & \text{για } U_i^A < U_i^B \end{cases} \quad (5.41)$$

Στόχος είναι η εύρεση ενός σημείου ισορροπίας στο οποίο κανείς από τους χρήστες δεν θα μπορεί να βελτιώσει την χρησιμότητα του αλλάζοντας τη στρατηγική του, δηλαδή η εύρεση ενός σημείου ισορροπίας Nash. Δεδομένου του ορισμού του σημείου ισορροπίας Nash, είναι προφανές ότι στο σημείο ισορροπίας θα πρέπει να ικανοποιείται η ακόλουθη σχέση:  $U_i^A = U_i^B, \forall i \in N$ . Θεωρώντας ότι  $a > p_A$  και  $a > p_B$ , αποδεικνύεται εύκολα ότι οι συναρτήσεις  $U_i^A$  και  $U_i^B$  είναι κυρτές συναρτήσεις ως προς  $x_i$  (Boyd & Vandenberghe, 2004). Επιπλέον, η συνάρτηση  $U_i^A$  αποτελεί μια αύξουσα συνάρτηση ως προς  $x_i$  ενώ η  $U_i^B$  αποτελεί μια φθίνουσα συνάρτηση ως προς  $x_i$ . Επομένως, υπάρχει μόνο ένα σημείο στο οποίο οι δύο συναρτήσεις τέμνονται. Προκειμένου να καταλήξει ο αλγόριθμος στο





Σχήμα 5.17: Σύγκλιση του επαναληπτικού αλγορίθμου στο σημείο ισορροπίας

σημείο ισορροπίας και να βρεθεί ο αριθμός των χρηστών που επιλέγουν κάθε πάροχο δορυφορικών υπηρεσιών, χρησιμοποιείται ο ακόλουθος επαναληπτικός αλγόριθμος.

1. Όλοι οι χρήστες επιλέγουν τυχαία τη στρατηγική τους ( $x_i = 0, 1$ ).
2. Κάθε χρήστης υπολογίζει τις τιμές των συναρτήσεων  $U_i^A$  και  $U_i^B$  και επιλέγει τον δορυφορικό πάροχο που οδηγεί στη μεγαλύτερη τιμή χρησιμότητας.
3. Το βήμα 2 επαναλαμβάνεται μέχρι κανένας χρήστης να μην έχει κίνητρο να αλλάξει τη στρατηγική του.

Στο σχήμα 5.17, απεικονίζεται η σύγκλιση του αλγορίθμου προς το σημείο ισορροπίας. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι δεδομένου του μεγάλου αριθμού των χρηστών που έχουν θεωρηθεί, ο αλγόριθμος συγκλίνει αρκετά γρήγορα σε ένα σημείο ισορροπίας, καθώς απαιτούνται λιγότερες από 50 επαναλήψεις για να επιτευχθεί σύγκλιση υψηλής ακρίβειας.

### Μοντελοποίηση του προβλήματος αγοραστών ως εξελικτικό παίγνιο

Στη συγκεκριμένη προσέγγιση, το πρόβλημα επιλογής δορυφορικού παρόχου μοντελοποιείται σαν ένα εξελικτικό παίγνιο όπως στο (Niyato & Hossain, 2009). Αρχικά, για το συγκεκριμένο παίγνιο, θεωρείται ότι οι χρήστες χωρίζονται σε ομάδες ανάλογα με τη φασματική τους απόδοση. Η χρησιμότητα κάθε παίκτη στην ομάδα  $k$  που επιλέγει το δορυφορικό πάροχο  $j$  ορίζεται ως:

$$u_{k,j} = a \log \left( b \frac{W_j n_{k,j}}{N_j} \right) - p_j \log \left( \frac{W_j n_{k,j}}{N_j} \right) \quad (5.42)$$

όπου  $n_{k,j}$  είναι η φασματική απόδοση των χρηστών στην ομάδα  $k$  για τον δορυφόρο  $j$ ,  $N_j = \sum_k N_{k,j}$  είναι ο αριθμός των χρηστών από όλες τις ομάδες που επιλέγουν το δορυφορικό πάροχο  $j$ , ενώ  $N_{k,j}$  είναι ο αριθμός των χρηστών στην ομάδα  $k$  που επιλέγουν τον πάροχο  $j$ . Επιπλέον, ορίζεται ως  $x_{k,j} = N_{k,j}/N_k$  η αναλογία των χρηστών που ανήκουν στην ομάδα  $k$  και επιλέγουν το δορυφορικό πάροχο  $j$ , ενώ  $N_k = \sum_{j=1}^M N_{k,j}$  είναι ο συνολικός αριθμός των χρηστών που ανήκουν στην ομάδα

$k$ . Επίσης, παρόμοια με το (Weibull, 1995), ορίζεται η κατάσταση του πληθυσμού ως το διάνυσμα  $x_k = [x_{k,1}, \dots, x_{k,M}]$ , όπου  $M$  είναι ο αριθμός των δορυφορικών παρόχων.

Προκειμένου να βρεθεί η εξελικτική ισορροπία του παιγνίου, πρέπει να βρεθεί ένα σημείο στο οποίο κανένας παίκτης δεν θα έχει κίνητρο να αλλάξει την στρατηγική του. Στο σημείο αυτό, η χρησιμότητα κάθε παίκτη σε μια συγκεκριμένη ομάδα θα είναι ίση με τη μέση χρησιμότητα της ομάδας, η οποία ορίζεται ως εξής:

$$\bar{u}_k = \sum_{j=1}^M x_{k,j}(t) \left( a \log \left( b \frac{W_j n_{k,j}}{\sum_k x_{k,j} N_k} \right) - p_j \log \left( \frac{W_j n_{k,j}}{\sum_k x_{k,j} N_k} \right) \right) \quad (5.43)$$

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, υπολογίζεται η εξελικτική ισορροπία του παιγνίου χρησιμοποιώντας την έννοια των replicator dynamics παρόμοια με το (Niyato & Hossain, 2009). Αυτό σημαίνει ότι το σημείο της ισορροπίας υπολογίζεται ουσιαστικά από τη λύση της ακόλουθης εξίσωσης:

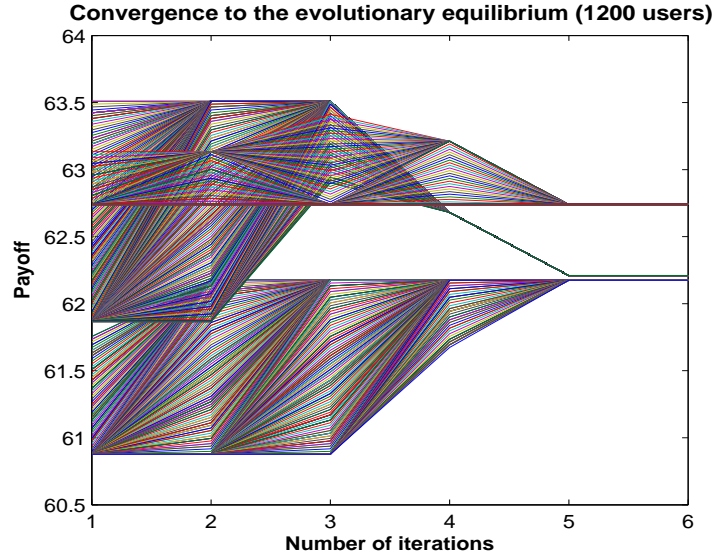
$$\begin{aligned} \frac{\partial x_{k,j}(t)}{\partial t} = 0 &\Rightarrow s \cdot x_{k,j}(t) (u_{k,j} - \bar{u}_k) = 0 \Rightarrow \\ &\Rightarrow s \cdot x_{k,j}(t) \left( a \log \left( b \frac{W_j n_{k,j}}{\sum_k x_{k,j} N_k} \right) - p_j \log \left( \frac{W_j n_{k,j}}{\sum_k x_{k,j} N_k} \right) \right) \\ &- \sum_{j=1}^M x_{k,j}(t) \left( a \log \left( b \frac{W_j n_{k,j}}{\sum_k x_{k,j} N_k} \right) - p_j \log \left( \frac{W_j n_{k,j}}{\sum_k x_{k,j} N_k} \right) \right) = 0, \end{aligned} \quad (5.44)$$

όπου το  $s$  δηλώνει την ταχύτητα της αλλαγής στην επιλογή του δορυφορικού παρόχου. Υποθέτοντας ότι οι χρήστες της ίδιας ομάδας γνωρίζουν τη μέση χρησιμότητα της ομάδας τους και τις τιμές που έχουν θέσει οι δορυφορικοί πάροχοι, χρησιμοποιείται ο ακόλουθος αλγόριθμος προκειμένου να βρεθεί η εξελικτική ισορροπία του προτεινόμενου παιγνίου.

Συγκεκριμένα, για κάθε ομάδα χρηστών:

1. Κάθε χρήστης επιλέγει τυχαία το δορυφορικό πάροχο από τον οποίο αγοράζει εύρος ζώνης και υπολογίζει την χρησιμότητα του  $(u_{k,j})$ .
2. Δεδομένης της μέσης χρησιμότητας της ομάδας του  $(\bar{u}_k)$ , κάθε χρήστης συγκρίνει τη χρησιμότητα του με τη μέση χρησιμότητα και
  - Αν  $u_{k,j} \geq \bar{u}_k$ , τότε ο χρήστης δεν μεταβάλλει τη στρατηγική του
  - Αν  $u_{k,j} < \bar{u}_k$ , τότε ο χρήστης αλλάζει την στρατηγική του και επιλέγει έναν άλλο δορυφορικό πάροχο  $l$  για τον οποίο ισχύει  $u_{k,l} > u_{k,j}$ .
3. Τα βήματα (1) και (2) επαναλαμβάνονται μέχρι κανείς από τους χρήστες να μην επιθυμεί να μεταβάλλει τη στρατηγική του.

Στο σχήμα 5.18, απεικονίζεται η σύγκλιση του αλγορίθμου στο σημείο εξελικτικής ισορροπίας. Όπως παρατηρείται, συγκρίνοντας το σχήμα 5.17 με το σχήμα 5.18, στα σημεία ισορροπίας επιτυγχάνονται παρόμοιες τιμές χρησιμότητας για τους τελικούς χρήστες. Ωστόσο, όπως είναι εμφανές, το εξελικτικό παίγνιο χρειάζεται σημαντικά μικρότερο αριθμό επαναλήψεων σε σχέση με το δυναμικό παίγνιο, καθώς απαιτούνται μόνο πέντε επαναλήψεις για να συγκλίνει ο αλγόριθμος σε αντίθεση με τις 45 επαναλήψεις που χρειάζεται το δυναμικό παίγνιο. Επιπλέον, παρατηρείται ότι η χρησιμότητα των



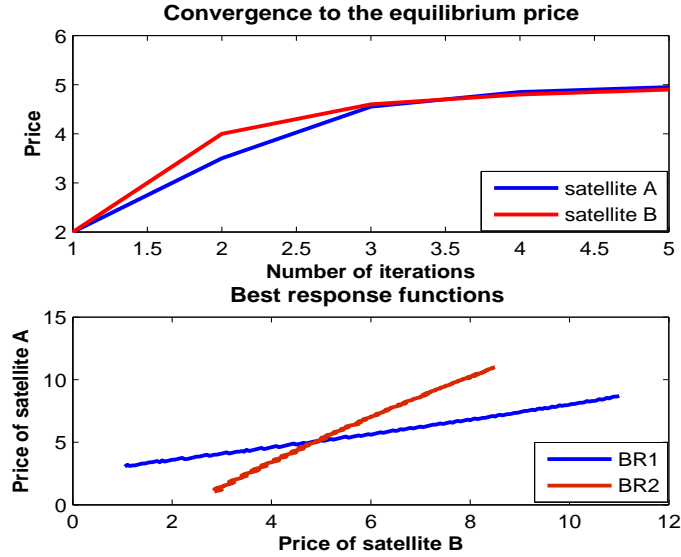
Σχήμα 5.18: Σύγκλιση του επαναληπτικού αλγορίθμου στο σημείο εξελικτικής ισορροπίας

χρηστών στο σημείο εξελικτικής ισορροπίας είναι ίση με τη μέση χρησιμότητα της ομάδας τους, με αποτέλεσμα να υπάρχουν μόνο τρεις διαφορετικές τιμές τελικής χρησιμότητας. Αντίθετα, στο σημείο ισορροπίας του δυναμικού παιγνίου, κάθε χρήστης έχει διαφορετική τιμή χρησιμότητας.

### 5.3.4 Παίγνιο πρώτου επιπέδου: πρόβλημα πωλητών

Στη συγκεκριμένη ενότητα μελετάται το πρόβλημα επιλογής της τιμής που πρέπει να θέσει κάθε δορυφορικός πάροχος προκειμένου να μεγιστοποιήσει το κέρδος του. Αναλυτικότερα, στο υπό μελέτη σενάριο θεωρείται ότι κάθε πάροχος δορυφορικών υπηρεσιών ανακοινώνει μια τιμή ανά ρυθμό μετάδοσης στην οποία πουλάει το διαθέσιμο εύρος ζώνης του αντίστοιχου δορυφόρου. Όπως είναι αναμενόμενο, η τιμή που θέτει κάθε πάροχος επηρεάζει την τιμή που θέτουν και οι υπόλοιποι πάροχοι. Επομένως, ο ανταγωνισμός τιμής ανάμεσα στους δορυφορικούς παρόχους μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν ένα μη συνεργατικό παίγνιο στο οποίο κάθε πάροχος προσπαθεί ιδιοτελώς να μεγιστοποιήσει τη συνάρτηση χρησιμότητας του, επιλέγοντας την κατάλληλη τιμή χρέωσης. Το μη συνεργατικό παίγνιο ορίζεται ως  $S = [M, \{p_j\}_{j \in M}, \{U_j^s\}_{j \in M}]$ , όπου  $M$  είναι ο αριθμός των δορυφορικών παρόχων (στη συγκεκριμένη περίπτωση θεωρείται ότι  $M = 2$ ),  $p_j$  είναι το σύνολο στρατηγικών του κάθε παρόχου και  $U_j^s$  είναι η συνάρτηση χρησιμότητας του παρόχου  $j$ . Στο προτεινόμενο παίγνιο, η συνάρτηση χρησιμότητας του δορυφορικού παρόχου  $j$  απεικονίζει το κέρδος του δορυφορικού παρόχου για την πώληση του εύρους ζώνης του. Τα έσοδα του δορυφορικού παρόχου δίνονται από το άθροισμα των πληρωμών από τους χρήστες που επιλέγουν το συγκεκριμένο δορυφορικό πάροχο, ενώ το κόστος του δορυφορικού παρόχου απεικονίζει την κατανάλωση ενέργειας για τη μετάδοση των bits πληροφορίας στους χρήστες. Αντίστοιχα με το (Cui et al., 2005), θεωρείται ότι το κόστος είναι ανάλογο της ισχύος εκπομπής του δορυφόρου και αντιστρόφως ανάλογο του ρυθμού μετάδοσης του κάθε χρήστη. Επομένως, η συνάρτηση χρησιμότητας του παρόχου  $j$  ορίζεται μαθηματικά ως εξής:

$$U_j^s = \sum_{i \in N_j} \left[ p_j \log \left( \frac{W_j n_{i,j}}{N_j} \right) - cP_{tr} \log \left( \frac{N_j}{W_j n_{i,j}} \right) \right] \quad (5.45)$$



Σχήμα 5.19: Σύγκλιση στην τιμή ισορροπίας και συναρτήσεις βέλτιστης απόκρισης των δορυφόρων

όπου  $N_j$  είναι το σύνολο των χρηστών που αγοράζουν εύρος ζώνης από τον δορυφορικό πάροχο  $j$ ,  $c$  είναι μια σταθερά ( $c > 0$ ) και  $P_{tr}$  είναι η ισχύς εκπομπής του δορυφόρου. Υπό συγκεκριμένους περιορισμούς για την παράμετρο  $c$ , αποδεικνύεται ότι η συνάρτηση χρησιμότητας του κάθε δορυφορικού παρόχου αποτελεί κοίλη συνάρτηση. Επομένως, σύμφωνα με το θεώρημα 3.2 του κεφαλαίου 3, το συγκεκριμένο μη συνεργατικό παίγνιο έχει τουλάχιστον μια ισορροπία Nash. Προκειμένου να βρεθεί το σημείο ισορροπίας, χρησιμοποιείται ο ακόλουθος επαναληπτικός αλγόριθμος:

1. Κάθε δορυφορικός πάροχος θέτει την τιμή εύρους ζώνης ίση με  $p_{init}$ . Επομένως, το αρχικό διάνυσμα τιμών είναι  $p = [p_{init,1}, \dots, p_{init,M}]$ .
2. Δεδομένων των τιμών των άλλων δορυφορικών παρόχων, κάθε δορυφόρος βρίσκει την τιμή που μεγιστοποιεί την χρησιμότητα του.
3. Το βήμα 2 επαναλαμβάνεται μέχρι κανείς από τους δορυφόρους να μην έχει κίνητρο να αλλάξει την στρατηγική του.

Στο βήμα 2, χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος επανάληψης έτσι ώστε να βρεθεί η τιμή την οποία πρέπει να χρεώσει ο δορυφορικός πάροχος προκειμένου να μεγιστοποιήσει τη χρησιμότητα του. Δεδομένων των τιμών των άλλων παρόχων, ο δορυφορικός πάροχος μπορεί να βρει την αναμενόμενη χρησιμότητα του για διαφορετικές τιμές του  $p_j$ . Επομένως, από την επαναληπτική σχέση

$$p_j(k+1) = p_j(k) + \left( \frac{\partial U_j^s(p_j(t))}{\partial p_j} \right) \quad (5.46)$$

όπου  $k$  είναι ο αριθμός των επαναλήψεων, ο δορυφορικός πάροχος βρίσκει την τιμή που μεγιστοποιεί την χρησιμότητα του όταν  $p_j(k+1) = p_j(k)$ . Το πρώτο διάγραμμα στο σχήμα 5.19 απεικονίζει την εξέλιξη του επαναληπτικού αλγορίθμου και τη σύγκλιση του στο σημείο ισορροπίας ενώ το δεύτερο διάγραμμα απεικονίζει τη συνάρτηση βέλτιστης απόκρισης του κάθε δορυφορικού παρόχου. Οι συναρτήσεις βέλτιστης απόκρισης ορίζονται ως  $BR_j(\mathbf{p}_{-j}) = \arg \max_{p_j} U_j^s$ , όπου  $\mathbf{p}_{-j}$  είναι οι στρατηγικές όλων των δορυφορικών παρόχων εκτός του παρόχου  $j$ . Η ισορροπία Nash του παιγνίου μπορεί να

Παράμετρος	Τιμή παραμέτρου
Ισχύς εκπομπής δορυφόρου $P_t$	500 KW
Αριθμός χρηστών $N_{tot}$	1200-9000
Διαθέσιμο εύρος ζώνης (W)	15 MHz
Παράμετρος $\alpha$	30
Παράμετρος $b$	3

Πίνακας 5.3: Παράμετροι προσομοίωσης προτεινόμενου μοντέλου

βρεθεί από το σημείο τομής των συναρτήσεων βέλτιστης απόκρισης. Παρατηρώντας τα δύο διαγράμματα, μπορούμε να δούμε ότι το σημείο σύγκλισης του επαναληπτικού αλγορίθμου είναι το ίδιο με το σημείο στο οποίο τέμνονται οι συναρτήσεις βέλτιστης απόκρισης, κάτι το οποίο αποδεικνύει ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος συγκλίνει στο σημείο ισορροπίας Nash. Επιπλέον, για το σενάριο που έχει θεωρηθεί, παρατηρείται ότι στο σημείο ισορροπίας, οι πάροχοι θέτουν την ίδια τιμή χρέωσης στους χρήστες. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί δεδομένου ότι έχουν θεωρηθεί παρόμοια χαρακτηριστικά λειτουργίας για κάθε πάροχο με αποτέλεσμα να μην γίνεται αντιληπτή σημαντική διαφοροποίηση από τη μεριά των χρηστών.

### 5.3.5 Αριθμητική ανάλυση προτεινόμενων μηχανισμών

Στη συγκεκριμένη υποενοότητα παρουσιάζεται η αριθμητική ανάλυση του προτεινόμενου αλγορίθμου επίλυσης. Το σύστημα που εξετάζεται είναι παρόμοιο με το μοντέλο που αναφέρεται στην προηγούμενη ενότητα, ενώ οι ακριβείς παράμετροι σχεδίασης του συστήματος απεικονίζονται στον Πίνακα 5.3. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι οι δορυφόροι του δικτύου είναι ο Hellas Sat2 στις 38.9°E και ο Telecom 2C στις 3° E, ενώ οι χρήστες του δορυφορικού συστήματος θεωρούνται ομοιόμορφα κατανεμημένοι σε περιοχές με διαφορετικά μακροπρόθεσμα χαρακτηριστικά εξασθένησης λόγω βροχής. Αναλυτικότερα, το κέρδος καναλιού κάθε χρήστη προς ένα συγκεκριμένο δορυφόρο υπολογίζεται από την σχέση

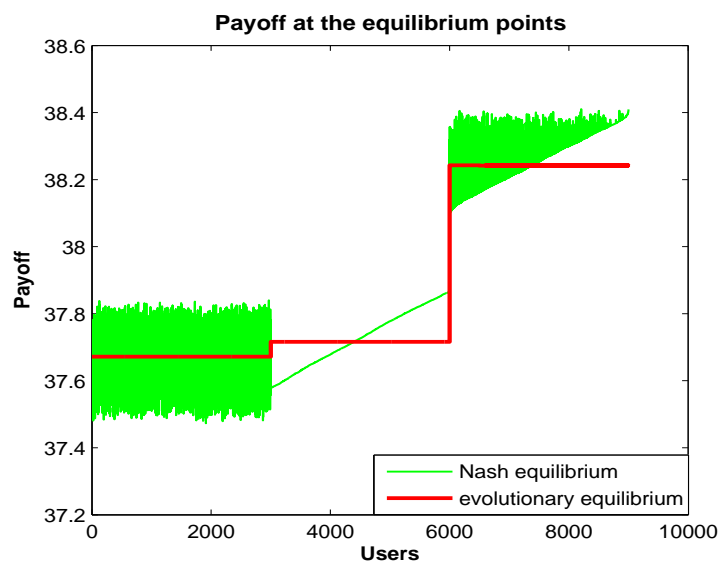
$$h_{ij} = \left( \frac{\lambda}{4\pi d_{ij}} \right)^2 \cdot 10^{-A_{ij}/10} \quad (5.47)$$

όπου  $d_{ij}$  είναι η απόσταση του χρήστη  $i$  από το δορυφόρο  $j$  και  $A_{ij}(dB)$  είναι μια τυχαία μεταβλητή με λογαριθμοκανονική κατανομή, που απεικονίζει την εξασθένηση λόγω βροχής (A. Panagoroulos & Kanelloroulos, 2002). Επίσης, η φασματική απόδοση κάθε χρήστη μπορεί να βρεθεί από τη σχέση

$$n_{ij} = \log_2 \left( \frac{G_r \cdot G_t \cdot P_t \cdot h_{ij}}{\sigma^2} \right) \quad (5.48)$$

όπου  $G_r$  είναι το κέρδος κεραίας του χρήστη,  $G_t P_t$  είναι το  $EIRP$  του δορυφόρου και  $\sigma^2$  είναι η ισχύς του λευκού, γκαουσιανού θορύβου στο τερματικό του χρήστη.

Αρχικά μελετάται η σύγκλιση του κάθε ενός από τους προτεινόμενους αλγορίθμους για το παίγνιο του αγοραστή, θεωρώντας ένα δορυφορικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα με 9000 χρήστες. Στο σχήμα 5.20, παρουσιάζεται η χρησιμότητα του κάθε χρήστη στο σημείο ισορροπίας του κάθε δυναμικού παιγνίου καθώς και του εξελικτικού παιγνίου. Όπως παρατηρείται, το εξελικτικό παίγνιο

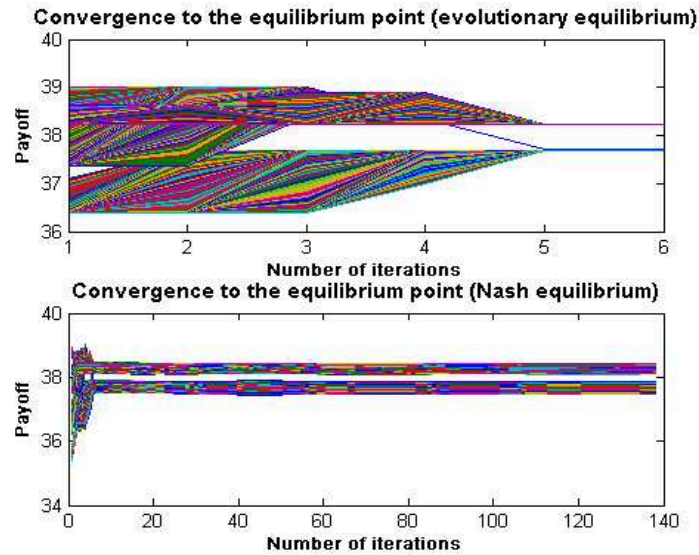


Σχήμα 5.20: Χρησιμότητα χρηστών στα σημεία ισορροπίας

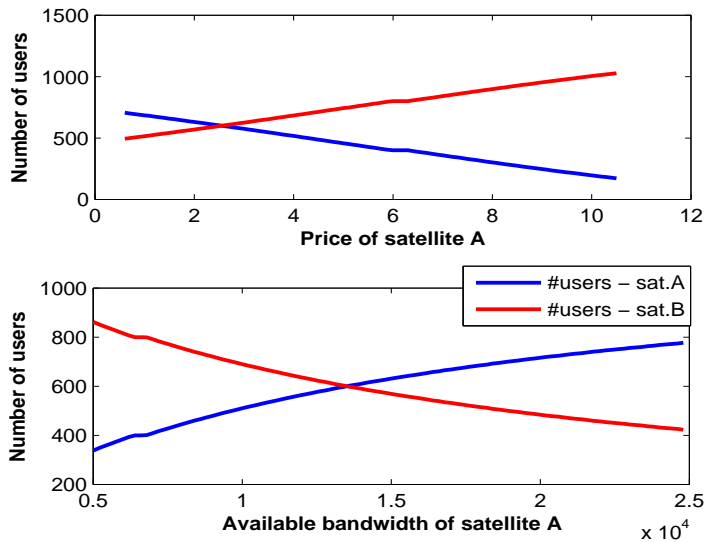
συγκλίνει σε ένα σημείο ισορροπίας στο οποίο όλοι οι χρήστες της ίδιας ομάδας έχουν την ίδια χρησιμότητα, ενώ στο σημείο ισορροπίας του δυναμικού παιγνίου κάθε χρήστης έχει διαφορετική χρησιμότητα ανάλογα με τη φασματική του απόδοση. Η παρατήρηση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το εξελικτικό παίγνιο καταλήγει σε μια πιο δίκαιη κατανομή καθώς όλοι οι χρήστες της ίδιας ομάδας έχουν ουσιαστικά τον ίδιο βαθμό ικανοποίησης σε αντίθεση με το δυναμικό παίγνιο, όπου οι χρήστες που έχουν καλύτερες συνθήκες καναλιού είναι περισσότερο ευνοημένοι.

Στη συνέχεια, το σχήμα 5.21 απεικονίζει την ταχύτητα σύγκλισης των δύο προτεινόμενων αλγορίθμων για το παίγνιο του αγοραστή. Όπως ήταν αναμενόμενο, το εξελικτικό παίγνιο συγκλίνει στο σημείο ισορροπίας σε αρκετά λιγότερες επαναλήψεις από ότι το δυναμικό παίγνιο. Συνεπώς, προκύπτει το συμπέρασμα ότι το προτεινόμενο εξελικτικό παίγνιο υπερέρχει σε σχέση με το δυναμικό παίγνιο καταλήγοντας σε μια πιο δίκαιη κατανομή των πόρων, με μικρότερη υπολογιστική πολυπλοκότητα.

Προκειμένου να παρουσιαστεί μια πληρέστερη ανάλυση του παιγνίου δύο επιπέδων, μελετάται επίσης η επίδραση των παραμέτρων του δορυφορικού παρόχου (συγκεκριμένα της τιμής και του διαθέσιμου εύρους ζώνης) στον αριθμό των τελικών χρηστών που τον επιλέγουν (σχήμα 5.22). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι εκτός από τις παραμέτρους που μεταβάλλονται στα διαγράμματα, θεωρείται ότι οι δορυφόροι έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά λειτουργίας με αποτέλεσμα να μην υπάρχει κάποια διαφοροποίηση από τη μεριά των χρηστών. Το πρώτο διάγραμμα του σχήματος 5.22 απεικονίζει την επίδραση της τιμής του παρόχου  $A$  στον αριθμό των χρηστών που τον επιλέγουν. Όπως παρατηρείται, καθώς η τιμή του δορυφορικού παρόχου  $A$  αυξάνεται, οι περισσότεροι χρήστες επιλέγουν τον άλλο δορυφορικό πάροχο προκειμένου να ελαχιστοποιήσουν το κόστος τους. Με τον ίδιο τρόπο, το δεύτερο διάγραμμα απεικονίζει την αλλαγή στον αριθμό των χρηστών που αγοράζουν εύρος ζώνης από κάθε δορυφορικό πάροχο λόγω της αύξησης του διαθέσιμου εύρους ζώνης του δορυφορικού παρόχου  $A$ . Δεδομένου ότι οι δύο πάροχοι χρεώνουν την ίδια τιμή, οι χρήστες επιλέγουν να αγοράσουν εύρος ζώνης από τον πάροχο με την υψηλότερη χωρητικότητα έτσι ώστε να αυξήσουν την χρησιμότητα τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η αύξηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης του δορυφορικού παρόχου  $A$  να οδηγεί σε γραμμική αύξηση του αριθμού των χρηστών που επιλέγουν το συγκεκριμένο πάροχο, όπως



Σχήμα 5.21: Ταχύτητα σύγκλισης των προτεινόμενων αλγορίθμων για το παίγνιο του αγοραστή



Σχήμα 5.22: Επίδραση τιμής και διαθέσιμου εύρους ζώνης στο σύνολο των αγοραστών

απεικονίζεται στο σχήμα 5.22.

### 5.4 Μηχανισμός μίσθωσης εύρους ζώνης σε γνωστικά δίκτυα

Τα τελευταία χρόνια, έχει ξεκινήσει να κινεί το ενδιαφέρον των ερευνητών στον τομέα των γνωστικών δικτύων, ένα είδος μηχανισμού εκχώρησης εύρους ζώνης που αναφέρεται ως μηχανισμός μίσθωσης του αδειοδοτημένου φάσματος. Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση, θεωρείται ότι οι αδειοδοτούμενοι (πρωτεύοντες) χρήστες κατέχουν δεδομένους φασματικούς πόρους τους οποίους μπορούν να ενοικιάσουν στους δευτερεύοντες χρήστες, έτσι ώστε να βελτιστοποιήσουν την απόδοσή τους. Λαμβάνοντας υπόψη τη συγκεκριμένη προσέγγιση, σε αυτή την ενότητα, θεωρείται ένα overlay γνωστικό σύστημα, στο οποίο οι πρωτεύοντες χρήστες μισθώνουν το εύρος ζώνης τους στους δευτερεύοντες

χρήστες οι οποίοι παρέχουν ως αντάλλαγμα ένα μέρος της ισχύος τους για να αναμεταδώσουν το πρωτεύον σήμα. Παράλληλα, λαμβάνοντας υπόψη την κατανομημένη φύση των γνωστικών δικτύων, προτείνεται ένας μηχανισμός δημοπρασίας για τη διαδικασία μίσθωσης. Οι δευτερεύοντες χρήστες, οι οποίοι αναπαριστούν τους πλειοδότες, αποφασίζουν την ισχύ που είναι πρόθυμοι να διαθέσουν για την αναμετάδοση των δεδομένων του πρωτεύοντος χρήστη, ενώ οι πρωτεύοντες χρήστες κατέχουν το ρόλο του δημοπράτη αποφασίζοντας τη διάρκεια της διαδικασίας μίσθωσης καθώς και το χρόνο μίσθωσης που εκχωρείται σε κάθε δευτερεύοντα χρήστη. Επιπλέον, μελετώνται τρία διαφορετικά σενάρια, ανάλογα με την πληροφορία της κατάστασης καναλιού που είναι διαθέσιμη στους δευτερεύοντες χρήστες.

Στη συγκεκριμένη ενότητα, αρχικά, παρουσιάζεται μια σύντομη εισαγωγή και περιγράφεται το μοντέλο συστήματος που χρησιμοποιείται. Στη συνέχεια, αναλύεται ο προτεινόμενος μηχανισμός εκχώρησης των ραδιοπόρων τόσο από την πλευρά του πρωτεύοντος χρήστη όσο και από την πλευρά του δευτερεύοντος χρήστη. Τέλος, παρουσιάζεται η αριθμητική ανάλυση του προτεινόμενου μηχανισμού και σχολιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα.

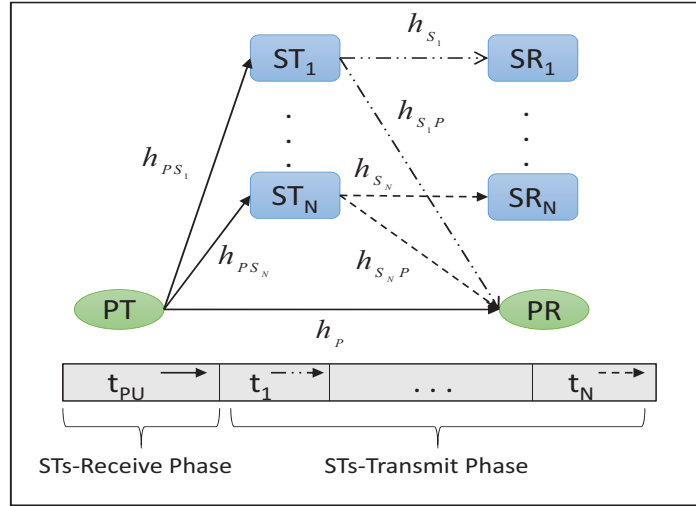
### 5.4.1 Εισαγωγή-Μοντέλο Συστήματος

Η αυξανόμενη ζήτηση των περιορισμένων φασματικών πόρων και το πρόβλημα της υπό - χρησιμοποίησης του εύρους ζώνης οδήγησε στην έννοια των γνωστικών δικτύων. Όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 2, με βάση τη συγκεκριμένη τεχνολογία, θεωρείται η ταυτόχρονη ύπαρξη δύο διαφορετικών τύπων χρηστών: των αδειοδοτημένων πρωτευόντων χρηστών (primary users - PUs) και των δευτερευόντων χρηστών (secondary users - SUs). Ανάλογα με την προσέγγιση κατανομής εύρους ζώνης που χρησιμοποιείται, οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να εκπέμπουν ταυτόχρονα με τους πρωτεύοντες χρήστες ή όχι. Στη θεωρητική ανάλυση που ακολουθεί θεωρείται η overlay προσέγγιση για το μοντέλο του γνωστικού συστήματος. Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση, οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να συνυπάρχουν με τους πρωτεύοντες χρήστες, έχοντας ωστόσο την υποχρέωση να αφιερώνουν ένα μέρος της ισχύος εκπομπής τους για την αναμετάδοση των μηνυμάτων των πρωτευόντων χρηστών, έτσι ώστε να διευκολύνουν την επικοινωνία τους.

Παράλληλα, εκτός από την ταξινόμηση των γνωστικών συστημάτων βάσει της προσέγγισης κατανομής εύρους ζώνης που χρησιμοποιείται, μια άλλη πιθανή κατηγοριοποίηση βασίζεται στο βαθμό επίγνωσης του πρωτεύοντος χρήστη για την ύπαρξη του δευτερεύοντος χρήστη. Για τη συγκεκριμένη ταξινόμηση, έχουν προταθεί δύο διαφορετικά μοντέλα γνωστικών δικτύων: το μοντέλο των κοινών αγαθών και το μοντέλο κατοχής δικαιωμάτων (Peña, 2005), τα οποία περιγράφονται αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 2. Στον προτεινόμενο μηχανισμό, χρησιμοποιείται το μοντέλο κατοχής δικαιωμάτων σύμφωνα με το οποίο θεωρείται ότι οι πρωτεύοντες χρήστες κατέχουν ένα αδειοδοτημένο μέρος εύρους ζώνης και αποφασίζουν αν θα μισθώσουν ή όχι τους φασματικούς τους πόρους στους δευτερεύοντες χρήστες (Simeone et al., 2008), (X. Wang et al., 2012).

Αναλυτικότερα, στο θεωρούμενο overlay γνωστικό σύστημα, προτείνεται ένας καινοτόμος μηχανισμός εκχώρησης ραδιοπόρων για τη διαδικασία της μίσθωσης εύρους ζώνης, ο οποίος βασίζεται στη θεωρία δημοπρασιών. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι κάθε δευτερεύων χρήστης καταθέτει στον πρωτεύοντα χρήστη μια προσφορά ίση με το κλάσμα ισχύος που είναι διατεθειμένος να αφιερώσει για την αναμετάδοση του πρωτεύοντος σήματος. Βάσει αυτών των προσφορών, ο πρωτεύων χρήστης υπολογίζει το χρόνο μίσθωσης που εκχωρείται σε κάθε δευτερεύοντα χρήστη καθώς και τη συνολική διάρκεια της διαδικασίας μίσθωσης, έτσι ώστε να βελτιστοποιήσει την απόδοσή του. Επιπλέον, βάσει





Σχήμα 5.23: Μοντέλο γνωστικού συστήματος υπό μελέτη

το βαθμού γνώσης των δευτερευόντων χρηστών για την κατάσταση των καναλιών του συστήματος, αναλύονται τρία διαφορετικά σενάρια. Συγκεκριμένα, στο πρώτο σενάριο αναλύεται η περίπτωση κατά την οποία είναι γνωστή μόνο η κατάσταση της ζεύξης των δευτερευόντων χρηστών, στο δεύτερο σενάριο θεωρείται μερική γνώση καναλιών, ενώ στο τρίτο σενάριο θεωρείται πλήρης γνώση της κατάστασης των καναλιών.

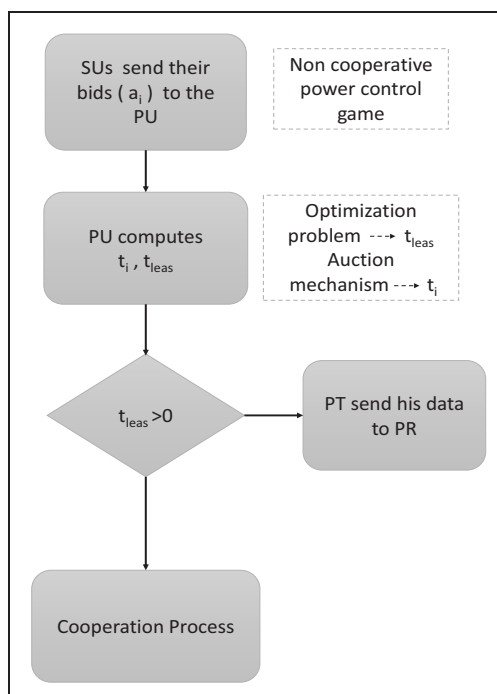
Στο σχήμα 5.23 απεικονίζεται το μοντέλο συστήματος υπό μελέτη, στο οποίο ένα ζεύγος πρωτεύοντων χρηστών συνυπάρχει με  $N$  ζεύγη δευτερευόντων χρηστών. Συγκεκριμένα, ένας πρωτεύων πομπός (PT) θεωρείται ότι επικοινωνεί με ένα πρωτεύοντα δέκτη (PR) στην ίδια ζώνη συχνοτήτων με πολλαπλά ζεύγη δευτερευόντων πομπών (ST) και δεκτών (SR). Για τις ασύρματες ζεύξεις θεωρήθηκαν ασυσχέτιστα κανάλια Nakagami- $m$  διακριτού χρόνου, τα οποία παραμένουν αμετάβλητα κατά τη διάρκεια μιας χρονοσχιμής αλλά μεταβάλλονται μεταξύ διαδοχικών χρονοσχιμών. Αναλυτικά, τα κέρδη ισχύος καναλιού για την πρωτεύουσα ζεύξη, την  $i^{th}$  δευτερεύουσα ζεύξη και τις ζεύξεις ανάμεσα στον πρωτεύοντα/δευτερεύοντα πομπό και το δευτερεύοντα/πρωτεύοντα δέκτη αναφέρονται ως  $h_P, h_{S_i}, h_{PS_i}$  και  $h_{S_iP}$ , αντίστοιχα (σχήμα 5.23). Επομένως, θεωρώντας ότι τα κέρδη των καναλιών εξασθένισης μοντελοποιούνται σύμφωνα με την κατανομή Nakagami μοναδιαίας μέσης τιμής (Simon & Alouini, 2005), η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των κερδών ισχύος του καναλιού  $h_j$  δίνεται από τη σχέση:

$$g(h_j) = \frac{m_j^{m_j} h_j^{m_j-1}}{\Gamma(m_j)} e^{-m_j h_j} \quad (5.49)$$

όπου  $\Gamma(\cdot)$  είναι η συνάρτηση Γάμμα.

Στην ανάλυση που ακολουθεί, θεωρείται η overlay προσέγγιση κατανομής εύρους ζώνης, με την έννοια ότι οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να αποκωδικοποιήσουν επιτυχώς το σήμα του πρωτεύοντος χρήστη και να το μεταδώσουν ταυτόχρονα με το δικό τους σήμα (Tarokh, 2009), (Wyglinski et al., 2009). Πιο συγκεκριμένα, κάθε δευτερεύων πομπός θεωρείται ότι μπορεί να χωρίσει την ισχύ εκπομπής του ( $P_s$ ) σε δύο μέρη: το ένα μέρος ( $a_i P_s$ ) χρησιμοποιείται για την αναμετάδοση του μηνύματος του πρωτεύοντος χρήστη, ενώ το υπόλοιπο ( $(1 - a_i) P_s$ ) χρησιμοποιείται για τη δική του μετάδοση προς το δευτερεύοντα δέκτη ( $0 \leq a_i \leq 1$ ).

Λαμβάνοντας υπόψη την κατανομημένη φύση των γνωστικών δικτύων, προτείνεται ένας καινο-

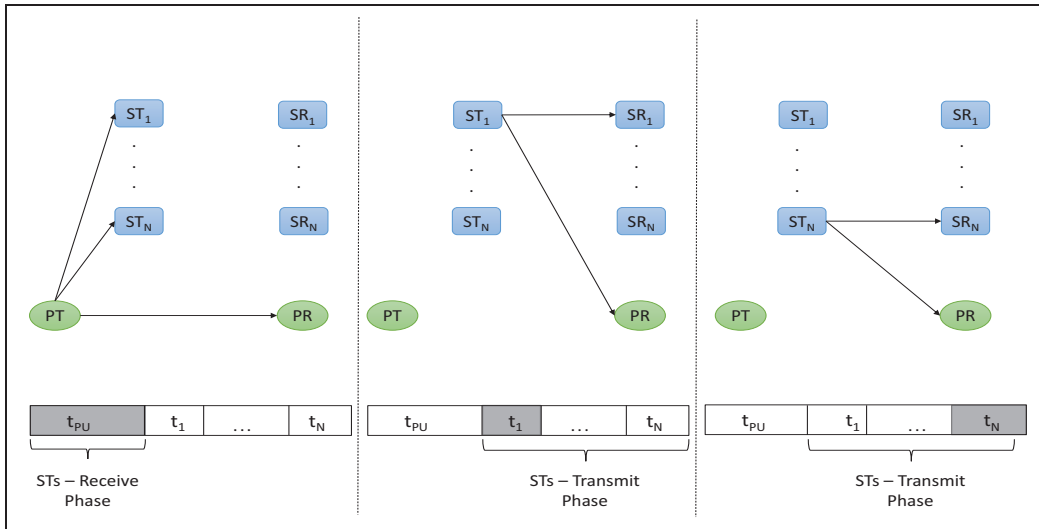


Σχήμα 5.24: Διαδικασία εκχώρησης ραδιοπόρων στη διάρκεια μιας χρονοσχιμής

τόμος μηχανισμός δημοπρασίας για την εκχώρηση της ισχύος των δευτερευόντων χρηστών καθώς και του χρόνου μίσθωσης του εύρους ζώνης του πρωτεύοντος χρήστη. Η διαδικασία εκχώρησης ραδιοπόρων απεικονίζεται στο σχήμα 5.24 για τη διάρκεια μιας χρονοσχιμής. Συγκεκριμένα, στην αρχή κάθε χρονοσχιμής, οι δευτερεύοντες χρήστες αποφασίζουν το μέρος της ισχύος τους που είναι διατεθειμένοι να αφιερώσουν για την αναμετάδοση του πρωτεύοντος σήματος και στέλνουν τις προσφορές ισχύος τους στον πρωτεύοντα χρήστη. Βάσει αυτών των προσφορών, ο πρωτεύων χρήστης αποφασίζει αν θα συνεργαστεί με τους δευτερεύοντες χρήστες, ποια θα είναι η διάρκεια της διαδικασίας μίσθωσης του εύρους ζώνης του ( $t_{leas}$ ) καθώς και το χρονικό διάστημα μίσθωσης που αντιστοιχεί σε κάθε δευτερεύοντα χρήστη ( $t_i$ ). Αναλυτικότερα, σε περίπτωση που ο πρωτεύων χρήστης επιθυμεί να συνεργαστεί ( $t_{leas} > 0$ ), κάθε χρονοσχιμή χωρίζεται σε δύο διαφορετικές φάσεις, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 5.25. Κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης, ο πρωτεύων πομπός μεταδίδει τα δεδομένα του στον πρωτεύοντα δέκτη και σε επιλεγμένους δευτερεύοντες πομπούς. Αυτή η φάση αναφέρεται ως “Φάση Λήψης των STs” και έχει διάρκεια ίση με  $t_{PU}$ . Στη δεύτερη φάση, η οποία αναφέρεται ως “Φάση Εκπομπής των STs”, κάθε δευτερεύων πομπός μεταδίδει τα δεδομένα του, μαζί με τα δεδομένα του πρωτεύοντος χρήστη, στον πρωτεύοντα δέκτη και τον αντίστοιχο δευτερεύοντα δέκτη, χρησιμοποιώντας το αδειοδοτημένο εύρος για χρονική διάρκεια  $t_i$ , βάσει ενός TDMA σχήματος. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην προτεινόμενη ανάλυση, έχει θεωρηθεί ότι στην πρώτη φάση επιλέγονται μόνο οι δευτερεύοντες χρήστες για τους οποίους οι συνθήκες καναλιού της ζεύξης PT – ST<sub>i</sub> είναι καλύτερες συγκριτικά με τις συνθήκες καναλιού της πρωτεύουσας ζεύξης ( $h_{PS_i} > h_P$ ).

#### 5.4.2 Μηχανισμός δημοπρασίας για εκχώρηση ραδιοπόρων

Σε αυτήν την υποενότητα, αναλύεται ο προτεινόμενος μηχανισμός δημοπρασίας για την εκχώρηση ραδιοπόρων από την πλευρά του πρωτεύοντος καθώς και του δευτερεύοντος χρήστη. Αρχικά, περιγράφεται αναλυτικά ο μηχανισμός δημοπρασίας που χρησιμοποιείται και στη συνέχεια παρου-



Σχήμα 5.25: Διαδικασία εκχώρησης ραδιοπόρων στη διάρκεια μιας χρονοσχιsmής

σιάζονται τρία διαφορετικά σενάρια για το μη συνεργατικό παίγνιο του ελέγχου ισχύος ανάμεσα στους δευτερεύοντες χρήστες. Τέλος, περιγράφεται το πρόβλημα εκχώρησης ραδιοπόρων από την πλευρά του πρωτεύοντος χρήστη.

### Περιγραφή Μηχανισμού Δημοπρασίας

Προκειμένου να εκχωρηθεί το χρονικό διάστημα μίσθωσης ανάμεσα στους δευτερεύοντες χρήστες με ένα κατανομημένο τρόπο, το πρόβλημα εκχώρησης ραδιοπόρων μοντελοποιείται ως μια δημοπρασία με συγκεκριμένους κανόνες. Στη συγκεκριμένη δημοπρασία, κάθε δευτερεύων χρήστης έχει το ρόλο του πλειοδότη και καταθέτει μια προσφορά  $a_i \in [0, 1]$  ίση με το κλάσμα της ισχύος εκπομπής που επιθυμεί να αφιερώσει για την αναμετάδοση του πρωτεύοντος μηνύματος. Προκειμένου να υπολογίσουν τις προσφορές τους, οι δευτερεύοντες χρήστες συμμετέχουν σε ένα μη συνεργατικό παίγνιο ελέγχου ισχύος, όπου κάθε δευτερεύων χρήστης επιλέγει το κλάσμα  $a_i$  της ισχύος εκπομπής του, έτσι ώστε να μεγιστοποιήσει τη χρησιμότητά του. Στην ανάλυση που ακολουθεί, περιγράφονται τρία διαφορετικά σενάρια για το παίγνιο του ελέγχου ισχύος ανάλογα με το βαθμό γνώσης της πληροφορίας κατάστασης καναλιού (Channel State Information - CSI) που διαθέτουν οι δευτερεύοντες χρήστες. Από την άλλη μεριά, ο πρωτεύων χρήστης έχει το ρόλο του δημοπράτη αποφασίζοντας τη συνολική χρονική διάρκεια της διαδικασίας μίσθωσης ( $t_{leas}$ ) καθώς και την εκχωρούμενη διάρκεια  $t_i$  σε κάθε δευτερεύοντα χρήστη, βάσει των προσφορών που λαμβάνει. Συγκεκριμένα, θεωρώντας ότι η συνολική διάρκεια της χρονοσχιsmής είναι ίση με  $T_s = t_{PU} + t_{leas}$  και ότι  $t_{leas} = \sum_{i \in N} t_i$ , θεωρείται ότι ο πρωτεύων πομπός μισθώνει το εύρος ζώνης του στον δευτερεύοντα χρήστη  $i$  για χρονικό διάστημα ίσο με  $t_i = \lceil a_i / (\sum_{i \in N} a_i) \rceil t_{leas}$ . Αυτό σημαίνει ότι η διάρκεια μίσθωσης για κάθε δευτερεύοντα χρήστη είναι ανάλογη της συνεισφοράς του στη συνεργατική διαδικασία της αναμετάδοσης του πρωτεύοντος μηνύματος. Στη συνέχεια, για λόγους ευκολίας, παρουσιάζεται αρχικά ο μηχανισμός εκχώρησης από τη μεριά των δευτερευόντων χρηστών.

### Παίγνιο ελέγχου ισχύος δευτερευόντων χρηστών

Σε αυτήν την υπόθεση, περιγράφονται τα διαφορετικά σενάρια για το μη συνεργατικό παίγνιο ελέγχου ισχύος ανάμεσα στους δευτερεύοντες χρήστες. Σε όλα τα σενάρια, κάθε δευτερεύων χρήστης επιλέγει το κλάσμα ισχύος  $a_i$  που είναι διατεθειμένος να αφιερώσει για την αναμετάδοση του πρωτεύοντος μηνύματος έτσι ώστε να μεγιστοποιήσει τη συνάρτηση χρησιμότητας του. Επομένως, το παίγνιο ελέγχου ισχύος μπορεί να οριστεί ως PG :  $\langle N, a, \{U_{S_i}\}_{i=1}^N \rangle$ , όπου  $N$  είναι το σύνολο των επιλεγμένων δευτερευόντων χρηστών,  $a = \{\alpha_i\}_{i=1}^N$  είναι το σύνολο των επιτρεπτών στρατηγικών ισχύος (διαφορετικό για κάθε σενάριο) και  $U_{S_i}$  είναι η συνάρτηση χρησιμότητας του δευτερεύοντα χρήστη  $i$ , η οποία ορίζεται ως ο κανονικοποιημένος ρυθμός μετάδοσης (εκφρασμένος σε “bits/sec”) που μπορεί να πετύχει ο χρήστης  $i$  κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης χρονοσχισμής :

$$U_{S_i}(a_i, \alpha_{-i}) = (t_i/T_s)R_{S_i} = \frac{a_i}{\sum_{i \in N} a_i} \frac{t_{leas}}{T_s} B \log_2 \left( 1 + \frac{(1 - a_i)P_s h_{S_i}}{N_0 B} \right) \quad (5.50)$$

όπου το  $a_i$  αναπαριστά την στρατηγική του δευτερεύοντα χρήστη  $i$ , ενώ το  $\alpha_{-i}$  αναπαριστά το διάνυσμα στρατηγικών όλων των χρηστών εκτός του χρήστη  $i$ . Επιπλέον, οι παράμετροι  $B$  και  $N_0$  αναπαριστούν το αδειοδοτημένο εύρος ζώνης και τη φασματική πυκνότητα θορύβου, αντίστοιχα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στη συγκεκριμένη ανάλυση, θεωρείται ότι οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να αφαιρέσουν το σήμα του πρωτεύοντος χρήστη από το λαμβανόμενο σήμα στο δευτερεύοντα δέκτη χρησιμοποιώντας κατάλληλες τεχνικές ακύρωσης παρεμβολών (Wyglinski et al., 2009).

*Θεώρημα:* Το παίγνιο PG έχει μια μοναδική ισορροπία Nash για τις προσφορές  $a_i$  των δευτερευόντων χρηστών.

*Απόδειξη.* Αρχικά αποδεικνύεται η ύπαρξη ισορροπίας Nash για τις προσφορές των δευτερευόντων χρηστών. Παρατηρώντας, τη συνάρτηση χρησιμότητας  $U_{S_i}$  του δευτερεύοντα χρήστη  $i$ , είναι εμφανές ότι αποτελεί μια συνεχή συνάρτηση ως προς τις στρατηγικές των παικτών. Επιπλέον, εύκολα αποδεικνύεται ότι η συνάρτηση χρησιμότητας είναι κοίλη ως προς την προσφορά του χρήστη  $i$  καθώς ισχύει :

$$\frac{\partial^2 U_{S_i}(a_i, \alpha_{-i})}{\partial a_i^2} < 0. \quad (5.51)$$

Επομένως, βάσει του θεωρήματος του Debreu (θεώρημα 3.2, κεφάλαιο 3), αποδεικνύεται ότι το μη συνεργατικό παίγνιο έχει τουλάχιστον μια ισορροπία Nash.

Προκειμένου να αποδειχθεί η μοναδικότητα της ισορροπίας Nash, χρησιμοποιείται το θεώρημα του Rosen (θεώρημα 3.4, κεφάλαιο 3). Αρχικά, χρησιμοποιώντας τον ορισμό της συνάρτησης χρησιμότητας, αποδεικνύεται ότι είναι κυρτή ως προς τις προσφορές των υπολοίπων χρηστών καθώς ισχύει :

$$\frac{\partial^2 U_{S_i}(a_i, \alpha_{-i})}{\partial a_j^2} \geq 0. \quad (5.52)$$

Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται ένα σταθμισμένο άθροισμα των συναρτήσεων χρησιμότητας, το οποίο

ορίζεται ως  $S(\alpha, \mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N x_i \cdot U_{S_i}(a_i, \alpha_{-i})$ . Η ψευδο-ορίζουσα του  $S(\mathbf{a}, \mathbf{x})$  δίνεται από τη σχέση:

$$F(\alpha, \mathbf{x}) = \begin{bmatrix} x_1 \nabla_1 U_{S_1}(a_1, \alpha_{-1}) \\ \vdots \\ x_N \nabla_N U_{S_N}(a_N, \alpha_{-N}) \end{bmatrix} \quad (5.53)$$

Υπολογίζοντας τη δεύτερη παράγωγο της  $S(\alpha, \mathbf{x})$ , αποδεικνύεται εύκολα ότι η συγκεκριμένη συνάρτηση είναι κοίλη ως προς την προσφορά του δευτερεύοντα χρήστη  $i$  καθώς ισχύει η σχέση:

$$\frac{\partial^2 S(\alpha, \mathbf{x})}{\partial a_i^2} < 0. \quad (5.54)$$

Στη συνέχεια, ορίζεται η Jacobian  $\mathbf{J}$  ως προς  $a_i$  της ψευδο-ορίζουσας  $F(\alpha, \mathbf{x})$ . Από τις σχέσεις (5.52), (5.54), αποδεικνύεται ότι ο  $(\mathbf{J} + \mathbf{J}^T)$  είναι αρνητικά ορισμένος, επομένως από το θεώρημα 3.4, προκύπτει ότι το παίγνιο PG έχει μοναδική ισορροπία Nash. Προκειμένου να επιτευχθεί το σημείο ισορροπίας, κάθε δευτερεύων χρήστης υπολογίζει τη λύση της εξίσωσης  $\partial U_{S_i} / \partial a_i = 0$ , η οποία είναι ανεξάρτητη από την παράμετρο  $t_{leas}$ .  $\square$

Στη συνέχεια, περιγράφονται τα προβλήματα βελτιστοποίησης που θεωρείται ότι επιλύουν οι δευτερεύοντες χρήστες για τα υπό μελέτη σενάρια.

#### Σενάριο A - Γνώση τοπικού CSI

Στο συγκεκριμένο σενάριο, θεωρείται ότι κάθε δευτερεύων χρήστης γνωρίζει μόνο την κατάσταση καναλιού (CSI) της δικής του ζεύξης ( $h_S$ ) και ο στόχος του είναι να λύσει το ακόλουθο πρόβλημα βελτιστοποίησης:

$$\begin{aligned} \max_{a_i} & U_{S_i}(a_i, \alpha_{-i}) \\ \text{s.t.} & 0 \leq a_i \leq 1 \end{aligned} \quad (5.55)$$

#### Σενάριο B - Γνώση μερικού CSI

Στο σενάριο αυτό θεωρείται ότι κάθε δευτερεύων χρήστης γνωρίζει το CSI της δικής του ζεύξης καθώς και της ζεύξης παρεμβολής από τον πομπό του προς τον πρωτεύοντα δέκτη ( $h_{S_iP}$ ). Επιπλέον, θεωρείται ότι εκμεταλλεύεται αυτή τη γνώση ώστε να μην υποβαθμίσει την επικοινωνία της πρωτεύουσας ζεύξης. Συγκεκριμένα, οι δευτερεύοντες χρήστες προσπαθούν να βελτιστοποιήσουν τη συνάρτηση χρησιμότητας τους δεδομένου ενός συγκεκριμένου περιορισμού παρεμβολής ισχύος, με αποτέλεσμα κάθε χρήστης να επιλύει ουσιαστικά το ακόλουθο πρόβλημα βελτιστοποίησης:

$$\begin{aligned} \max_{a_i} & U_{S_i}(a_i, \alpha_{-i}) \\ \text{s.t.} & (1 - a_i)P_s h_{S_iP} \leq Q \end{aligned} \quad (5.56)$$

Από τον περιορισμό παρεμβολής ισχύος, είναι εμφανές ότι το σύνολο των επιτρεπόμενων στρατηγικών μπορεί να απλοποιηθεί στο ακόλουθο σύνολο:

$$a = \{[\alpha_i]_{i \in N} : [1 - Q/P_s h_{S_iP}]^+ \leq a_i \leq 1\}. \quad (5.57)$$

## Σενάριο C - Γνώση πλήρους CSI

Το συγκεκριμένο σενάριο υποθέτει ότι οι δευτερεύοντες χρήστες γνωρίζουν την κατάσταση καναλιού όλων των ζεύξεων του συστήματος, κάτι το οποίο εκμεταλλεύονται προκειμένου να μην υποβαθμίσουν την επικοινωνία της πρωτεύουσας ζεύξης. Συγκεκριμένα, η γνώση του  $h_{S_iP}$  και του  $h_P$  επιτρέπει στους δευτερεύοντες χρήστες να μεγιστοποιήσουν τη χρησιμότητα τους χωρίς να υποβαθμίζουν το σηματοθορυβικό λόγο της πρωτεύουσας ζεύξης. Επομένως, το αντίστοιχο πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$\begin{aligned} \max_{a_i} & U_{S_i}(a_i, \alpha_{-i}) \\ \text{s.t.} & \frac{a_i h_{S_iP} P_s}{(1-a_i) h_{S_iP} P_s + N_0 B} \geq \frac{h_P P_P}{N_0 B} \end{aligned} \quad (5.58)$$

οδηγώντας στο σύνολο επιτρεπόμενων στρατηγικών που δίνεται από τη σχέση:

$$a = \left\{ [\alpha_i]_{i \in N} : \frac{h_P P_P (h_{S_iP} P_s + N_0 B)}{h_{S_iP} P_s (h_P P_P + N_0 B)} \leq a_i \leq 1 \right\}. \quad (5.59)$$

Σε αυτήν την περίπτωση, οι δευτερεύοντες χρήστες για τους οποίους προκύπτει  $a_i = 1$ , θεωρείται ότι εγκαταλείπουν το παίγνιο καθώς η χρησιμότητα τους έχει μηδενική τιμή.

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα κέρδη καναλιών της πρωτεύουσας ζεύξης και της ζεύξης παρεμβολής ST<sub>i</sub>-PR ( $h_P$  και  $h_{S_iP}$ ) μπορούν να αποκτηθούν άμεσα μέσω μιας ανατροφοδότησης από τον πρωτεύοντα χρήστη, όπως προτείνεται στα (Jovicic & Viswanath, 2009), (L. Zhang et al., 2008). Όπως είναι εμφανές, από το Σενάριο A προς το Σενάριο C, οι δευτερεύοντες χρήστες έχουν πληρέστερη γνώση του περιβάλλοντος CSI, ταυτόχρονα όμως θεωρούνται και πιο αυστηροί περιορισμοί για την εκπομπή του δευτερεύοντος χρήστη προκειμένου να μην υποβαθμίζεται η επικοινωνία του πρωτεύοντος χρήστη. Συνεπώς, κάθε σενάριο έχει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα για τους πρωτεύοντες αλλά και τους δευτερεύοντες χρήστες, κάτι το οποίο επαληθεύεται και από την αριθμητική ανάλυση που ακολουθεί σε επόμενη υποενότητα.

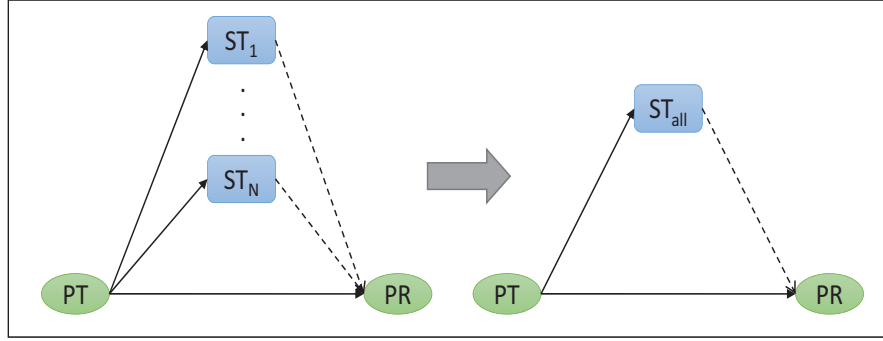
**Εκχώρηση ραδιοπόρων πρωτευόντων χρηστών**

Έχοντας περιγράψει αναλυτικά στην προηγούμενη υποενότητα, το σχήμα εκχώρησης ραδιοπόρων από την πλευρά των δευτερευόντων χρηστών, σε αυτήν την ενότητα, δίνεται έμφαση στο σχήμα διαχείρισης ραδιοπόρων από τη μεριά του πρωτεύοντος χρήστη. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι ο πρωτεύων χρήστης υπολογίζει το χρόνο μίσθωσης του εύρους ζώνης έτσι ώστε να βελτιστοποιήσει την απόδοση του από πλευράς ρυθμαπόδοσης. Αναλυτικότερα, στην ακόλουθη ανάλυση θεωρείται ότι η συνάρτηση χρησιμότητας του πρωτεύοντος χρήστη ορίζεται ως ο εφικτός ρυθμός μετάδοσης του και μπορεί να εκφραστεί ως:

$$U_P(t_{PU}) = R_P(t_{PU}) \quad (5.60)$$

όπου  $R_P(t_{PU})$  είναι ο ρυθμός μετάδοσης της πρωτεύουσας ζεύξης.

Προκειμένου να είναι εφικτός ο υπολογισμός του ρυθμού μετάδοσης της πρωτεύουσας ζεύξης, δίνεται έμφαση στις συνεργατικές ζεύξεις PT-STs-PR, θεωρώντας ότι κάθε δευτερεύων πομπός έχει το ρόλο ενός αναμεταδότη (σχήμα 5.26). Σύμφωνα με το μοντέλο συστήματος που περιγράφεται στην



Σχήμα 5.26: Απλοποίηση του προτεινόμενου μοντέλου συστήματος

προηγούμενη υποενοότητα, οι εφικτοί ρυθμοί μετάδοσης για τη ζεύξης PT-ST<sub>i</sub> καθώς και για τη ζεύξη ST<sub>i</sub>-PR, δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$R_{PS_i} = B \log_2 \left( 1 + \frac{h_{PS_i} P_P}{N_0 B} \right) \quad (5.61)$$

και

$$R_{S_i P} = B \log_2 \left( 1 + \frac{a_i h_{S_i P} P_s}{(1 - a_i) h_{S_i P} P_s + N_0 B} \right) \quad (5.62)$$

όπου  $P_P$  είναι η ισχύς εκπομπής του πρωτεύοντος χρήστη. Προκειμένου να απλοποιηθεί το προτεινόμενο μοντέλο, οι ζεύξεις PT-ST<sub>s</sub>-PR μπορούν να θεωρηθούν ως μια μοναδική ζεύξη PT – ST<sub>all</sub> – PR, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 5.26. Όσον αφορά τη ζεύξη PT – ST<sub>all</sub>, είναι εμφανές ότι ο εφικτός ρυθμός της κυριαρχείται από το χειρότερο κέρδος καναλιού  $h_{PS_i}$ , με αποτέλεσμα να δίνεται από τη σχέση:

$$R_{PS_{all}} = \min_{i \in N} \{R_{PS_i}\} = B \log_2 \left( 1 + \frac{\min\{h_{PS_i}\} P_P}{N_0 B} \right). \quad (5.63)$$

Επιπλέον, θεωρείται ότι ο ρυθμός της ζεύξης ανάμεσα στα ST<sub>all</sub> – PR μπορεί να προσεγγιστεί από το σταθμισμένο μέσο των ρυθμών των ζεύξεων ST<sub>s</sub> – PR, με αποτέλεσμα να δίνεται από τη σχέση:

$$R_{S_{all} P} = \frac{t_1}{t_{leas}} R_{S_1 P} + \dots + \frac{t_N}{t_{leas}} R_{S_N P} = \sum_{i \in N} \frac{t_i}{t_{leas}} R_{S_i P} \quad (5.64)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι δεδομένου ότι έχουν επιλεχθεί μόνο οι δευτερεύοντες χρήστες που έχουν καλύτερες συνθήκες καναλιού της ζεύξης PT-ST<sub>i</sub> σε σχέση με τις συνθήκες της πρωτεύουσας ζεύξης ( $h_{PS_i} > h_P$ ), ισχύει ότι  $R_{PS_{all}} \geq R_{P_d}$ , όπου  $R_{P_d} = B \log_2 (1 + h_P P_p / (N_0 B))$  είναι ο ρυθμός της απευθείας ζεύξης PT-PR.

Επομένως, το αρχικό μοντέλο συστήματος μπορεί να απλοποιηθεί σε ένα μοντέλο half-duplex καναλιού αναμεταδότη, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 5.26. Δεδομένου ότι η “Φάση Λήψης των STs” και η “Φάση Εκπομπής των STs” δεν έχουν την ίδια διάρκεια, ο συνολικός εφικτός ρυθμός

δίνεται από τη σχέση (Liang & Veeravalli, 2005):

$$\begin{aligned} R_P(t_{PU}) &= \frac{1}{T_s} \min\{t_{PU}R_{PS_{all}}, t_{PU}R_{P_d} + (T_s - t_{PU})R_{S_{all}P}\} = \\ &= \frac{1}{T_s} \min\left\{t_{PU}R_{PS_{all}}, t_{PU}R_{P_d} + (T_s - t_{PU}) \sum_{i \in N} \frac{t_i}{t_{leas}} R_{SP_i}\right\}. \end{aligned} \quad (5.65)$$

Επομένως, το πρόβλημα εκχώρησης ραδιοπόρων του πρωτεύοντα χρήστη καταλήγει στο ακόλουθο πρόβλημα βελτιστοποίησης (P1):

$$\begin{aligned} \max_{t_{PU}} R_P(t_{PU}) \\ \text{s.t. } 0 \leq t_{PU} \leq T_s \end{aligned} \quad (5.66)$$

*Θεώρημα:* Η βέλτιστη λύση  $t_{PU}^*$  του (P1) δίνεται από την ακόλουθη έκφραση:

$$t_{PU}^* = \begin{cases} T_s & , \text{ αν } R_{P_d} > R_{S_{all}P} \\ \frac{R_{S_{all}P}T_s}{R_{PS_{all}} - R_{P_d} + R_{S_{all}P}} & , \text{ αν } R_{P_d} \leq R_{S_{all}P} \end{cases} \quad (5.67)$$

*Απόδειξη.* Προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη λύση του (P1), ορίζονται οι εξής δύο συναρτήσεις:

$$f_1(t_{PU}) = t_{PU}R_{PS_{all}} \quad (5.68)$$

και

$$f_2(t_{PU}) = t_{PU}R_{P_d} + (T_s - t_{PU})R_{S_{all}P}. \quad (5.69)$$

Επομένως, το πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να απλοποιηθεί ως εξής:

$$\begin{aligned} \max_{t_{PU}} \{\min(f_1(t_{PU}), f_2(t_{PU}))\} \\ \text{s.t. } 0 \leq t_{PU} \leq T_s \end{aligned} \quad (5.70)$$

Όπως είναι εμφανές, οι  $f_1$  και  $f_2$  είναι γραμμικές συναρτήσεις της μεταβλητής  $t_{PU}$ . Επιπλέον, η  $f_1$  αποτελεί μια γνησίως αύξουσα συνάρτηση του  $t_{PU}$ , ενώ η  $f_2$  μπορεί να είναι είτε γνησίως αύξουσα συνάρτηση του  $t_{PU}$  (στην περίπτωση που  $R_{P_d} > R_{S_{all}P}$ ), είτε φθίνουσα συνάρτηση του  $t_{PU}$  (σε περίπτωση που  $R_{P_d} \leq R_{S_{all}P}$ ). Στην πρώτη περίπτωση, το βέλτιστο  $t_{PU}^*$  είναι ίσο με  $T_s$ , το οποίο σημαίνει ουσιαστικά ότι στην περίπτωση αυτή η απευθείας επικοινωνία είναι πιο ευνοϊκή για τον πρωτεύοντα χρήστη. Διαφορετικά, η βέλτιστη τιμή του  $t_{PU}$  μπορεί να βρεθεί από την τομή της  $f_1$  με την  $f_2$ . Συγκεκριμένα, δεδομένου ότι  $R_{PS_{all}} \geq R_{P_d}$ , ισχύουν οι ακόλουθες συνθήκες:

$$f_1(0) = 0 < T_s R_{S_{all}P} = f_2(0) \quad (5.71)$$

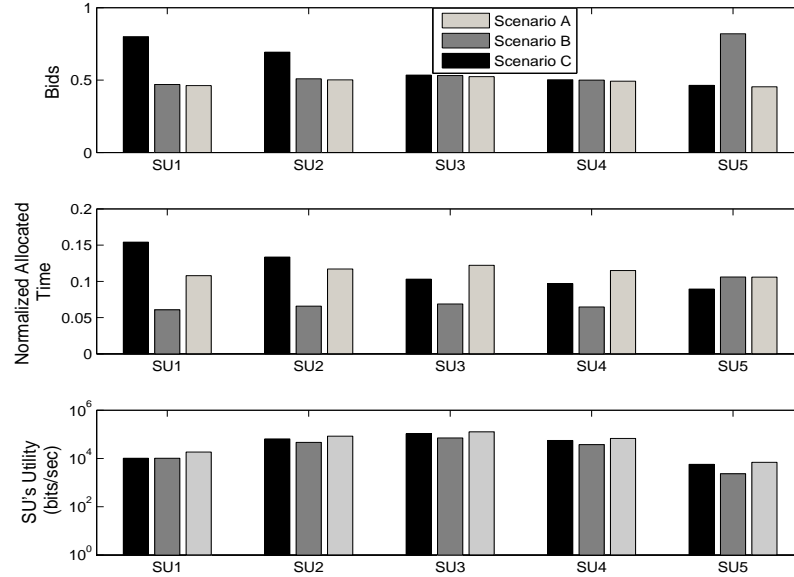
$$f_1(T_s) = T_s R_{PS_{all}} \geq T_s R_{P_d} = f_2(T_s) \quad (5.72)$$

Επομένως, υπάρχει ένα μοναδικό βέλτιστο  $t_{PU}^*$ , τέτοιο ώστε  $f_1(t_{PU}^*) = f_2(t_{PU}^*)$  και το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$t_{PU}^* = R_{S_{all}P}T_s / (R_{PS_{all}} - R_{P_d} + R_{S_{all}P}). \quad (5.73)$$

Συνεπώς, συνδυάζοντας τις δύο πιθανές περιπτώσεις, αποδεικνύεται το θεώρημα.  $\square$



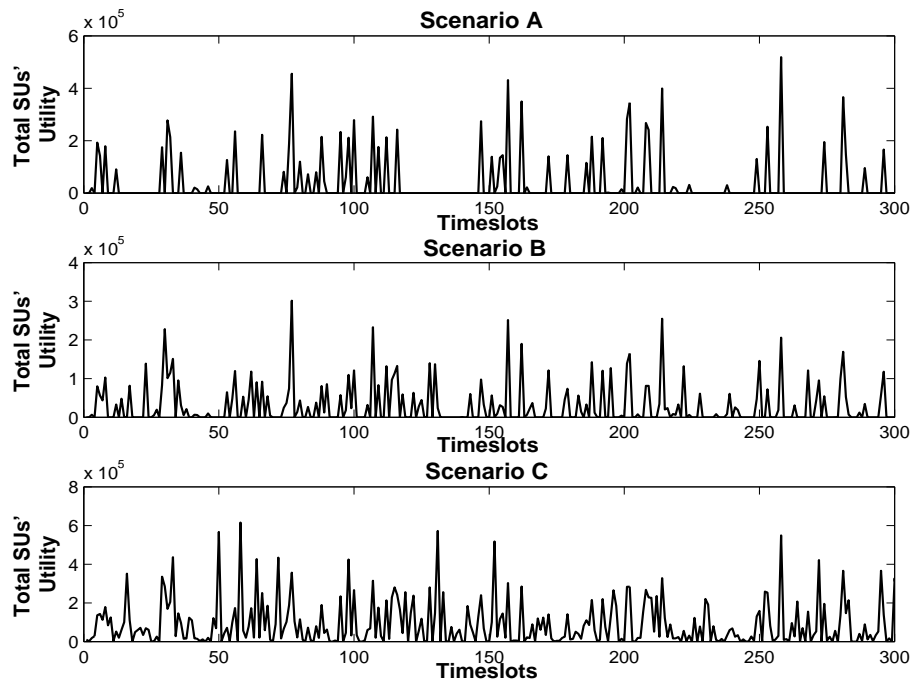


Σχήμα 5.27: Χαρακτηριστικά δημοπρασίας για όλα τα σενάρια

### 5.4.3 Αριθμητική ανάλυση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στη συγκεκριμένη υποενότητα, μελετάται η απόδοση του προτεινόμενου μηχανισμού εκχώρησης ραδιοπόρων μέσω πολυάριθμων προσομοιώσεων. Για το σενάριο της προσομοίωσης, έχει θεωρηθεί ένα δίκτυο γνωστικών συστημάτων το οποίο αποτελείται από ένα πρωτεύοντα χρήστη και 5 ζεύγη δευτερευόντων χρηστών. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για τις τιμές των παραμέτρων του συστήματος έχουν θεωρηθεί τυπικές τιμές, όπως  $T_s = 10^{-3}s$ ,  $B = 10^6 Hz$  και  $N_0B = 1$ . Επιπλέον, χωρίς απώλεια της γενικότητας, έχει υποθεθεί ότι οι παράμετροι Nakagami όλων των ζεύξεων έχουν τις ίδιες τιμές  $m_s = m_{sp} = m_{ps} = m_p = 1$  (Rayleigh εξασθένιση), ενώ η ισχύς μετάδοσης του πρωτεύοντος και των δευτερευόντων χρηστών έχει θεωρηθεί ίση με  $P_s = P_p = 1W$ . Τέλος, ο περιορισμός παρεμβολής ισχύος για το σενάριο B έχει θεωρηθεί ίσος με  $Q = 0dB$ , εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά.

Στο σχήμα 5.27, απεικονίζονται οι τιμές για τα βασικά χαρακτηριστικά της προτεινόμενης δημοπρασίας (προσφορές/bids- εκχωρήσεις/allocations- χρησιμότητες/utilities) για μια δεδομένη χρονοσχισμή και για όλα τα σενάρια. Ο άξονας  $x$  αντιστοιχεί στους πέντε δευτερεύοντες χρήστες, οι οποίοι θεωρούνται ταξινομημένοι ως προς την κατάσταση της ζεύξης παρεμβολής  $ST_i-PR$  (αύξουσες τιμές του κέρδους καναλιού  $h_{S_iP}$ ). Το πρώτο διάγραμμα απεικονίζει τις προσφορές κάθε δευτερεύοντα χρήστη, δηλαδή το κλάσμα ισχύος που επιλέγει να αφιερώσει για την αναμετάδοση του πρωτεύοντος σήματος. Όπως παρατηρείται, για το σενάριο A, σύμφωνα με το οποίο οι δευτερεύοντες χρήστες γνωρίζουν μόνο το δικό τους CSI, οι προσφορές είναι περίπου ίδιες για όλους τους δευτερεύοντες χρήστες. Στην περίπτωση του σεναρίου B, παρατηρείται ότι ο επιβεβλημένος περιορισμός παρεμβολής οδηγεί τους δευτερεύοντες χρήστες με καλύτερες συνθήκες καναλιού της ζεύξης παρεμβολής  $ST_i-PR$ , να αφιερώνουν μεγαλύτερο μέρος της ισχύος τους για συνεργασία προκειμένου να μην παρεμβάλουν στην πρωτεύουσα ζεύξη. Από την άλλη μεριά, στο τρίτο σενάριο, οι δευτερεύοντες χρήστες με τις χειρότερες τιμές του κέρδους καναλιού  $h_{SP}$  είναι αυτοί που θέτουν τις μεγαλύτερες προσφορές έτσι ώστε να διατηρηθεί η ποιότητα επικοινωνίας της πρωτεύουσας ζεύξης. Το δεύτερο



Σχήμα 5.28: Συνολική χρησιμότητα δευτερευόντων χρηστών κατά τη διάρκεια ενός πλαισίου  $T_f = 300T_s$

διάγραμμα στο σχήμα 5.27 αναπαριστά τον κανονικοποιημένο χρόνο που εκχωρείται για μίσθωση σε κάθε δευτερεύοντα χρήστη ( $t_i/T_s$ ). Όπως είναι αναμενόμενο, η κατανομή του χρόνου που εκχωρείται στους δευτερεύοντες χρήστες εξαρτάται τόσο από την προσφορά που έχει ο κάθε χρήστης, όσο και από τη συνολική διάρκεια της διαδικασίας μίσθωσης για κάθε σενάριο. Τέλος, το τρίτο διάγραμμα του σχήματος 5.27 απεικονίζει τη χρησιμότητα των δευτερευόντων χρηστών. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι παρατηρώντας τη σχέση (5.50), είναι εμφανές ότι η τιμή της χρησιμότητας εξαρτάται εκτός από την προσφορά του κάθε χρήστη και τη συνολική διάρκεια της μίσθωσης και από την ποιότητα καναλιού της δευτερεύουσας ζεύξης. Για το λόγο αυτό, η κατανομή των τιμών χρησιμότητας δεν είναι παρόμοια με την κατανομή των προηγούμενων διαγραμμάτων. Ωστόσο, μια γενική παρατήρηση είναι ότι το σενάριο A οδηγεί σε υψηλότερες τιμές της στιγμιαίας χρησιμότητας για όλους τους δευτερεύοντες χρήστες, ενώ το σενάριο B καταλήγει στις χειρότερες τιμές. Η συγκεκριμένη παρατήρηση μπορεί να δικαιολογηθεί δεδομένου ότι στο σενάριο A, οι δευτερεύοντες χρήστες μπορεί να μην γνωρίζουν το CSI των υπολοίπων ζευξεων, αλλά ταυτόχρονα δεν έχουν κάποιο περιορισμό παρεμβολής, με αποτέλεσμα να επιτρέπεται να χρησιμοποιούν υψηλότερα επίπεδα ισχύος για τη δική τους μετάδοση αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο τη χρησιμότητα τους. Αντίθετα, τα άλλα δύο σενάρια είναι αυστηρότερα για τους δευτερεύοντες χρήστες καθώς τους υποχρεώνουν να χρησιμοποιούν υψηλότερα επίπεδα ισχύος για συνεργασία, έτσι ώστε να μην υποβαθμίζουν την επικοινωνία της πρωτεύουσας ζεύξης.

Το σχήμα 5.28 και ο πίνακας 5.4 δείχνουν τη μέση απόδοση του προτεινόμενου μηχανισμού κατά τη διάρκεια ενός πλαισίου  $T_f = 300 \cdot T_s$  και θεωρώντας ότι  $Q = -5\text{dB}$ . Η παράμετρος “κέρδος PU”, που αναγράφεται στον πίνακα, αντιστοιχεί στο λόγο της χρησιμότητας του πρωτεύοντος χρήστη εφαρμόζοντας τον προτεινόμενο μηχανισμό ως προς την χρησιμότητα του πρωτεύοντος χρήστη, η οποία επιτυγχάνεται χωρίς τη συνεργασία των δευτερευόντων χρηστών (κέρδος PU =  $R_P(t_{PU})/R_{P_d}$ ). Επιπλέον, η “Συνολική χρησιμότητα SUs” αναφέρεται στο άθροισμα των χρησιμοτήτων των δευτε-

	Κέρδος PU	Συνολική Χρησιμότητα SUs	Δείκτης Συνεργασίας
Σενάριο A	1.87	$4.03 \cdot 10^4$	22 %
Σενάριο B	2.18	$3.15 \cdot 10^4$	43 %
Σενάριο C	1.90	$8.43 \cdot 10^4$	83 %

Πίνακας 5.4: Μέση απόδοση του προτεινόμενου μηχανισμού.

ρευόντων χρηστών, ενώ ο “δείκτης συνεργασίας” ορίζεται ως το ποσοστό του χρόνου για το οποίο ο πρωτεύων χρήστης επιλέγει να συνεργαστεί με τους δευτερεύοντες χρήστες. Η πρώτη βασική παρατήρηση από τον Πίνακα 5.4, όσον αφορά το κέρδος του πρωτεύοντος χρήστη, είναι ότι ο προτεινόμενος μηχανισμός οδηγεί σε καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με την απευθείας επικοινωνία, για όλα τα σενάρια. Επιπλέον, από το σχήμα 5.28, παρατηρείται ότι το σενάριο A μπορεί να οδηγεί σε υψηλότερη στιγμιαία συνολική χρησιμότητα για τους δευτερεύοντες χρήστες ταυτόχρονα όμως υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα ο πρωτεύων χρήστης να επιλέξει να μη συνεργαστεί, με αποτέλεσμα, οι δευτερεύοντες χρήστες να έχουν μηδενική χρησιμότητα κατά τη διάρκεια αρκετών χρονοσχημάτων. Αυτή η παρατήρηση επαληθεύεται από τη χαμηλή τιμή του “δείκτη συνεργασίας” στον πίνακα 5.4. Από την άλλη μεριά, το σενάριο B, οδηγεί σε χαμηλότερες τιμές της συνολικής χρησιμότητας των δευτερευόντων χρηστών, αλλά ταυτόχρονα υπάρχει υψηλότερη πιθανότητα συνεργασίας με αποτέλεσμα να οδηγεί σε υψηλότερο κέρδος για τον πρωτεύοντα χρήστη. Τέλος, το τρίτο σενάριο έχει την καλύτερη απόδοση από πλευράς χρησιμότητας του δευτερεύοντος χρήστη, κάτι το οποίο επαληθεύεται και από τις υψηλές τιμές του “δείκτη συνεργασίας” και τη συνολική χρησιμότητα των δευτερευόντων χρηστών στον πίνακα 5.4. Το συγκεκριμένο σενάριο καταλήγει σε χαμηλότερες τιμές κέρδους για τον πρωτεύοντα χρήστη, λόγω του πιο ευέλικτου περιορισμού που τίθεται για τη μετάδοση των δευτερευόντων χρηστών. Συμπερασματικά, παρατηρώντας τη μέση απόδοση του προτεινόμενου μηχανισμού κατά τη διάρκεια ενός πλαισίου, παρατηρείται ότι η επιπρόσθετη γνώση του CSI εμφανίζει πλεονεκτήματα τόσο για τον πρωτεύοντα χρήστη, όσο και για τους δευτερεύοντες χρήστες.



## Κεφάλαιο 6

# Μηχανισμοί διαχείρισης ραδιοπόρων για παροχή ποιότητας υπηρεσίας

### 6.1 Εισαγωγή

Οι νέες υπηρεσίες των σύγχρονων ασύρματων δικτύων παράλληλα με τον αυξανόμενο αριθμό των τηλεπικοινωνιακών χρηστών οδηγούν σε μια ανοδική ζήτηση των ασύρματων πόρων. Ταυτόχρονα όμως, πέρα από τον αυξανόμενο αριθμό των τηλεπικοινωνιακών χρηστών και τους καταναλισκόμενους πόρους, αυξάνονται δραματικά και οι απαιτήσεις για ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service - QoS). Επιπρόσθετα, διαφορετικές υπηρεσίες πολυμέσων (video, VoIP) απαιτούν διαφορετικό βαθμό QoS, με αποτέλεσμα οι τελικοί χρήστες να παρουσιάζουν διαφορετικό βαθμό ανοχής σε καθυστερήσεις για την κάθε εφαρμογή. Για το λόγο αυτό, η μελέτη της επίδρασης του απαιτούμενου βαθμού QoS στην ανάλυση της επίδοσης ενός συστήματος κρίνεται απαραίτητη, ειδικά στην περίπτωση εφαρμογών πραγματικού χρόνου. Επομένως, είναι εμφανές ότι υπάρχει μια άμεση ανάγκη για νέα σχήματα διαχείρισης ραδιοπόρων, τα οποία να λαμβάνουν υπόψη τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας των χρηστών.

Έχοντας ως απώτερο σκοπό την κάλυψη της συγκεκριμένης ανάγκης, τα τελευταία χρόνια, έχουν προταθεί αποδοτικοί μηχανισμοί διαχείρισης πόρων, με βασικό γνώμονα την εξασφάλιση συγκεκριμένου βαθμού ποιότητας υπηρεσίας στους τηλεπικοινωνιακούς χρήστες. Στόχος του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι η παρουσίαση ορισμένων βασικών μηχανισμών που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία καθώς και η ανάπτυξη ενός αποδοτικού, καινοτόμου μηχανισμού διαχείρισης πόρων για δορυφορικά δίκτυα. Συγκεκριμένα, αρχικά, παρουσιάζεται ένα κατάλληλο εργαλείο, γνωστό ως ισοδύναμη ή αποτελεσματική χωρητικότητα (effective capacity), το οποίο διασυνδέει το ρυθμό μετάδοσης μέσω μιας ασύρματης ζεύξης, με τη βασική μετρική των απαιτήσεων ποιότητας από πλευράς καθυστέρησης. Όπως αναλύεται στη συνέχεια, η συνάρτηση της αποτελεσματικής χωρητικότητας αναφέρεται στο μέγιστο σταθερό ρυθμό άφιξης που είναι εφικτό να υποστηρίξει το ασύρματο κανάλι, έτσι ώστε να εγγυάται συγκεκριμένη ποιότητα υπηρεσίας. Αφού παρουσιαστεί αναλυτικά η θεωρία της αποτελεσματικής χωρητικότητας, περιγράφονται συνοπτικά ορισμένες βασικές ερευνητικές εργασίες που αφορούν την επίλυση προβλημάτων διαχείρισης ραδιοπόρων σε ασύρματα δίκτυα, λαμβάνοντας υπόψη την παροχή ποιότητας υπηρεσίας στους τελικούς χρήστες. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα βασικά σχήματα ελέγχου ισχύος που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία και τα οποία έχουν ως στόχο τη βελτιστοποίηση της ρυθμαπόδοσης του χρήστη για συγκεκριμένες απαιτήσεις QoS, ενώ παράλλη-

λα περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε αλγόριθμου. Τέλος, προτείνεται ένας αποδοτικός μηχανισμός ελέγχου ισχύος για δορυφορικά δίκτυα νέας γενιάς, με γνώμονα την παροχή QoS σε τελικούς χρήστες.

### 6.2 Θεωρία αποτελεσματικής χωρητικότητας

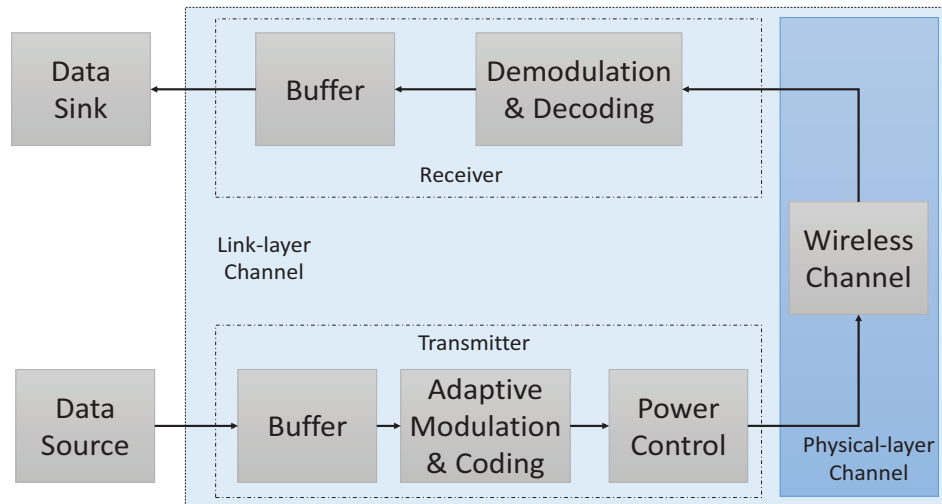
Η ποιότητα υπηρεσίας αποτελεί μια βασική απαίτηση, κυρίως, για εφαρμογές πολυμέσων πραγματικού χρόνου, όπως είναι για παράδειγμα η φωνή μέσω IP (VoIP), το streaming video και άλλες υπηρεσίες πολυμέσων. Ο στόχος των διεργασιών παροχής ποιότητας υπηρεσίας είναι ουσιαστικά η παροχή συγκεκριμένων εγγυήσεων που προσφέρει το δίκτυο για μια δεδομένη υπηρεσία, παρέχοντας είτε συγκεκριμένο εύρος ζώνης και ελεγχόμενη καθυστέρηση, είτε βελτιωμένο ποσοστό σφαλμάτων. Σε γενικές γραμμές, η παροχή ποιότητας υπηρεσίας μπορεί να περιλαμβάνει μηχανισμούς ελέγχου διαχείρισης των ραδιοπόρων προκειμένου να διασφαλιστεί ένα συγκεκριμένο επίπεδο QoS.

Η παροχή QoS στα ασύρματα δίκτυα δεν αποτελεί μια εύκολη διεργασία καθώς η χρονικά μεταβαλλόμενη φύση των ασύρματων καναλιών παρεμποδίζει την πρόβλεψη της απόδοσης, προκαλώντας σημαντική υποβάθμιση της ποιότητας υπηρεσίας. Επομένως, η εξασφάλιση ενός νετερμινιστικού ορίου καθυστέρησης, για τη μέγιστη καθυστέρηση των πακέτων, μπορεί να μην είναι εφικτή. Σε αυτήν την περίπτωση, είναι εμφανές ότι ένα στοχαστικό όριο καθυστέρησης είναι περισσότερο πρακτικό. Ένα άλλο βασικό πρόβλημα στη σχεδίαση μηχανισμών παροχής ποιότητας υπηρεσίας οφείλεται στην υψηλή πολυπλοκότητα που υπάρχει στο χαρακτηρισμό της σχέσης ανάμεσα στις παραμέτρους ελέγχου των μηχανισμών παροχής QoS και τις μετρικές ποιότητας που βασίζονται σε ήδη υπάρχοντα μοντέλα καναλιού (σχήμα 6.1). Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι τα μοντέλα καναλιού φυσικού στρώματος δεν χαρακτηρίζουν ρητά ένα ασύρματο κανάλι σε όρους μετρικών ποιότητας του επιπέδου ζεύξεως που καθορίζονται από τους χρήστες, όπως για παράδειγμα ο ρυθμός δεδομένων, η καθυστέρηση ή η πιθανότητα υπέρβασης συγκεκριμένου ορίου καθυστέρησης. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι προαναφερόμενες δυσκολίες και να είναι εφικτό να χαρακτηριστεί με ευνόητο τρόπο η παροχή στατιστικών εγγυήσεων QoS για τη μετάδοση δεδομένων σε χρονικά μεταβαλλόμενα ασύρματα κανάλια, η ερευνητική κοινότητα εισήγαγε στο (Wu & Negi, 2003) την έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας. Η συγκεκριμένη έννοια καθιερώθηκε ως μια λύση, προσφέροντας εγγυήσεις για ένα συγκεκριμένο όριο καθυστέρησης με μικρή πιθανότητα υπέρβασης, παρέχοντας με αυτό τον τρόπο στατιστικές εγγυήσεις QoS.

Στη συγκεκριμένη ενότητα, παρουσιάζεται αρχικά μια σύντομη εισαγωγή στη θεωρία των στατιστικών εγγυήσεων QoS και έπειτα αναλύεται λεπτομερώς η έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας.

#### 6.2.1 Θεωρία στατιστικών εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας

Η θεωρία των στατιστικών εγγυήσεων QoS μελετήθηκε εκτενώς στις αρχές της δεκαετίας του 1990, υπό την έννοια της θεωρίας ισοδύναμου εύρους ζώνης που εστιάζει σε ενσύρματα δίκτυα ATM (Asynchronous Transfer Mode). Συγκεκριμένα, στο (Chang, 1994) αποδεικνύεται ότι βάσει της θεωρίας μεγάλων αποκλίσεων (large deviation theory), θεωρώντας ένα σύστημα δυναμικής ουράς με στάσιμες (stationary), εργοδικές διαδικασίες άφιξης και εξυπηρέτησης και υπό τη συνθήκη ότι ο μέσος ρυθμός άφιξης είναι μικρότερος από το μέσο ρυθμό εξυπηρέτησης, το μήκος ουράς της διαδικασίας  $Q(t)$  θα συγκλίνει σε μια κατανομή τυχαίας μεταβλητής για την οποία ισχύει η ακόλουθη



Σχήμα 6.1: Μοντέλο ασύρματου τηλεπικοινωνιακού συστήματος

ισότητα :

$$-\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\log(\Pr\{Q(\infty) > x\})}{x} = \theta \quad (6.1)$$

Αυτό σημαίνει ότι η πιθανότητα το μέγεθος της ουράς  $Q$  να υπερβαίνει ένα δεδομένο κατώφλι  $x$ , δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

$$\Pr\{Q > x\} \approx \begin{cases} \varepsilon e^{-\theta x}, & \text{για μικρές τιμές του } x \\ e^{-\theta x}, & \text{για μεγάλες τιμές του } x \end{cases} \quad (6.2)$$

όπου το  $\varepsilon$  ορίζεται ως η πιθανότητα να μην είναι άδειος ο buffer. Επομένως, παρατηρείται ότι η πιθανότητα το μέγεθος της ουράς να υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο κατώφλι  $x$  φθίνει εκθετικά καθώς το κατώφλι αυτό αυξάνεται. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η παράμετρος  $\theta$  ορίζεται ως ο εκθέτης QoS και απεικονίζει την ταχύτητα με την οποία φθίνει η πιθανότητα υπέρβασης για συγκεκριμένη ποιότητα υπηρεσίας. Όπως είναι εμφανές από τη σχέση (6.2), η παράμετρος  $\theta$  παίζει ένα πολύ σημαντικό ρόλο στην παροχή απαιτήσεων QoS. Συγκεκριμένα, μικρότερες τιμές του  $\theta$  δηλώνουν μικρότερο ρυθμό μείωσης της πιθανότητας υπέρβασης, κάτι το οποίο σημαίνει ότι το σύστημα παρέχει χαμηλότερα επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας. Αντίθετα, μεγάλες τιμές της παραμέτρου  $\theta$  αντιστοιχούν σε γρήγορο ρυθμό μείωσης της πιθανότητας υπέρβασης το οποίο σημαίνει ότι το σύστημα έχει πιο αυστηρές απαιτήσεις QoS.

Με αντίστοιχο τρόπο, αποδεικνύεται στο (Chang, 2000) ότι σε περίπτωση που η μετρική ενδιαφέροντος αναφέρεται στο όριο καθυστέρησης, η αντίστοιχη πιθανότητα υπέρβασης δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

$$\Pr\{Delay > D_{\max}\} \approx \varepsilon e^{-\theta \delta D_{\max}} \quad (6.3)$$

όπου  $D_{\max}$  είναι το κατώφλι καθυστέρησης και η παράμετρος  $\delta$  καθορίζεται βάσει των διαδικασιών άφιξης και εξυπηρέτησης.

### 6.2.2 Ορισμός αποτελεσματικής χωρητικότητας

Η αποτελεσματική χωρητικότητα εισάγεται ως η δυαδική έννοια του ισοδύναμου εύρους ζώνης (Elwalid & Mitra, 1993), (Chang, 1994). Συγκεκριμένα, το ισοδύναμο εύρος ζώνης απεικονίζει τον ελάχιστο ρυθμό εξυπηρέτησης που απαιτείται, δεδομένης μιας συγκεκριμένης διαδικασίας άφιξης, προκειμένου να παρέχονται συγκεκριμένες εγγυήσεις για QoS που καθορίζονται από την παράμετρο  $\theta$ . Αντίστοιχα, η αποτελεσματική χωρητικότητα ορίζεται στο (Wu & Negi, 2003) ως ο μέγιστος ρυθμός άφιξης που μπορεί να υποστηριχθεί, δεδομένης μιας συγκεκριμένης διαδικασίας εξυπηρέτησης, έτσι ώστε να παρέχονται εγγυήσεις για μια συγκεκριμένη πιθανότητα υπέρβασης του ορίου καθυστέρησης, ανάλογα με τον εκθέτη QoS  $\theta$ .

Αναλυτικότερα, έστω ότι θεωρείται μια στάσιμη, εργοδική, στοχαστική διαδικασία άφιξης  $a(i)$ , η οποία αντιστοιχεί στο στιγμιαίο ρυθμό εισερχόμενης κίνησης και η χρόνο-συσσωρευμένη διαδικασία άφιξης που δίνεται από τη σχέση  $A(t) = \sum_{i=1}^t a[i]$ . Δεδομένου ότι η ασυμπτωτική γεννήτρια συνάρτηση λογαριθμικών ροπών (log-moment generating function) υπάρχει και ορίζεται ως:

$$\Lambda_A(\theta) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \log \left( \mathbf{E} \left[ e^{\theta A(t)} \right] \right) \quad (6.4)$$

τότε η συνάρτηση του ισοδύναμου εύρους ζώνης δίνεται από τη σχέση:

$$E_B(\theta) = \frac{\Lambda_A(\theta)}{\theta} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{\theta t} \log \left( \mathbf{E} \left[ e^{\theta A(t)} \right] \right) \quad (6.5)$$

όπου  $\mathbf{E}[\cdot]$  αντιστοιχεί στη συνάρτηση μέσης τιμής.

Με αντίστοιχο τρόπο, θεωρείται μια στάσιμη, εργοδική, στοχαστική διαδικασία εξυπηρέτησης διακριτού χρόνου  $\{R[i], i = 1, 2, \dots\}$ , η οποία αντιστοιχεί στο στιγμιαίο ρυθμό με τον οποίο μπορεί να μεταδίδει το ασύρματο κανάλι καθώς και η χρόνο-συσσωρευμένη διαδικασία εξυπηρέτησης που δίνεται από τη σχέση  $S(t) = \sum_{i=1}^t R[i]$ . Δεδομένου ότι η ασυμπτωτική γεννήτρια συνάρτηση λογαριθμικών ροπών υπάρχει και ορίζεται ως η ακόλουθη συνάρτηση:

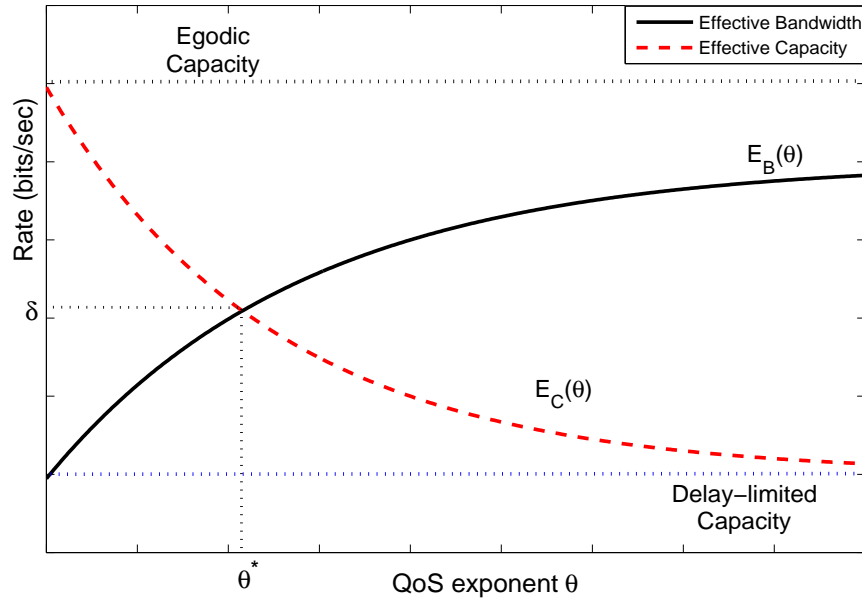
$$\Lambda_c(\theta) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \log \left( \mathbf{E} \left[ e^{\theta S(t)} \right] \right) \quad (6.6)$$

η οποία είναι μια κυρτή συνάρτηση, διαφορίσιμη για όλες τις πραγματικές τιμές του  $\theta$ , τότε η συνάρτηση της αποτελεσματικής χωρητικότητας δίνεται από τη σχέση:

$$E_c(\theta) = -\frac{\Lambda_c(-\theta)}{\theta} = -\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{\theta t} \log \left( \mathbf{E} \left[ e^{-\theta S(t)} \right] \right). \quad (6.7)$$

Προκειμένου να κατανοηθούν καλύτερα οι προαναφερόμενες έννοιες και να αναλυθεί περαιτέρω η σχέση ανάμεσα στις συναρτήσεις ισοδύναμου εύρους ζώνης και αποτελεσματικής χωρητικότητας, οι δύο συναρτήσεις απεικονίζονται γραφικά ως προς την παράμετρο  $\theta$  στο σχήμα 6.2. Όπως φαίνεται στο συγκεκριμένο σχήμα, η συνάρτηση της αποτελεσματικής χωρητικότητας είναι μια φθίνουσα συνάρτηση ως προς τον εκθέτη QoS, ενώ το αντίθετο ισχύει για τη συνάρτηση ισοδύναμου εύρους ζώνης. Η συγκεκριμένη μονοτονία μπορεί να αιτιολογηθεί λαμβάνοντας υπόψη ότι όταν υπάρχουν αυστηρότεροι περιορισμοί QoS (αύξηση του  $\theta$ ), το κανάλι μπορεί να παρέχει εγγυήσεις ποιότητας μόνο όταν υποστηρίζονται χαμηλότεροι ρυθμοί άφιξης. Επομένως, όταν το  $\theta$  τείνει στο άπειρο, η συνάρτηση





Σχήμα 6.2: Συναρτήσεις ισοδύναμου εύρους ζώνης και αποτελεσματικής χωρητικότητας

αποτελεσματικής χωρητικότητας συγκλίνει στον ελάχιστο ρυθμό εξυπηρέτησης. Από την άλλη μεριά, όταν το σύστημα έχει χαλαρές απαιτήσεις για ποιότητα επικοινωνίας, μπορεί δηλαδή να ανέχεται μεγάλες καθυστερήσεις (μικρές τιμές του  $\theta$ ), ο μέγιστος ρυθμός άφιξης που μπορεί να υποστηρίξει το κανάλι είναι ίσος με το μέσο ρυθμό εξυπηρέτησης. Η συγκεκριμένη συμπεριφορά μπορεί να περιγραφεί, χρησιμοποιώντας όρους χωρητικότητας, παρατηρώντας ότι για  $\theta \rightarrow 0$ , η αποτελεσματική χωρητικότητα συγκλίνει στην εργοδική χωρητικότητα ενώ για  $\theta \rightarrow \infty$ , η αποτελεσματική χωρητικότητα συγκλίνει στη χωρητικότητα περιορισμένης καθυστέρησης (delay-limited capacity). Αντίστοιχα, όσον αφορά τη συμπεριφορά της συνάρτησης ισοδύναμου εύρους ζώνης, μπορεί να δικαιολογηθεί λαμβάνοντας υπόψη ότι όσο οι απαιτήσεις QoS γίνονται πιο αυστηρές, το κανάλι πρέπει να υποστηρίξει υψηλότερους ρυθμούς εξυπηρέτησης προκειμένου να διασφαλίσει συγκεκριμένες εγγυήσεις ποιότητας. Από την άλλη μεριά, στην περίπτωση που υπάρχουν χαμηλότερες απαιτήσεις ποιότητας (μικρές τιμές του  $\theta$ ), απαιτείται χαμηλότερος ρυθμός εξυπηρέτησης, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.2.

Εκτός από την απεικόνιση των βασικών ιδιοτήτων των δύο προαναφερόμενων συναρτήσεων, το σχήμα 6.2 βοηθάει στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο μπορεί να υπολογιστεί η πιθανότητα υπέρβασης του ορίου καθυστέρησης, για συγκεκριμένες διαδικασίες άφιξης και εξυπηρέτησης. Αναλυτικότερα, προκειμένου να υπολογιστεί αυτή η πιθανότητα, πρέπει αρχικά να βρεθεί το σημείο τομής της συνάρτησης αποτελεσματικής χωρητικότητας με τη συνάρτηση ισοδύναμου εύρους ζώνης. Όπως φαίνεται από το σχήμα 6.2, στο σημείο αυτό η παράμετρος QoS είναι ίση με  $\theta^*$  και ο αντίστοιχος ρυθμός είναι ίσος με  $\delta$ . Επομένως, χρησιμοποιώντας την (6.3), η πιθανότητα υπέρβασης για κάθε κατώφλι προκαθορισμένης πιθανότητας δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση :

$$\Pr \{Delay > D_{\max}\} \approx e^{-\delta\theta^* D_{\max}} \quad (6.8)$$

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονισθεί ότι η σχέση (6.7) μπορεί να απλοποιηθεί σημαντικά στην περίπτωση ασυσχέτιστων καναλιών. Συγκεκριμένα, δεδομένου ότι για χρονικά ασυσχέτιστα κανάλια, η διαδικασία εξυπηρέτησης  $R[i]$  είναι επίσης χρονικά ασυσχέτιστη, η αποτελεσματική χωρητικότητα μπορεί να απλοποιηθεί, καταλήγοντας στην ακόλουθη έκφραση:

$$E_c(\theta) = -\frac{1}{\theta} \log \left( \mathbf{E} \left[ e^{-\theta R[i]} \right] \right) \quad (6.9)$$

Στη βιβλιογραφία, η συνάρτηση  $R[i]$  αναπαριστά συνήθως τη χωρητικότητα κατά Shannon με αποτέλεσμα να δίνεται από την ακόλουθη έκφραση:

$$R[i] = T_f B \log_2 (1 + SINR[i]) \quad (6.10)$$

όπου  $T_f$  είναι η διάρκεια των πλαισίων δεδομένων στο επίπεδο ζεύξης,  $B$  είναι το συνολικό εύρος ζώνης του συστήματος και το  $SINR$  αναφέρεται στο λόγο σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο. Σε όλες τις περιπτώσεις που αναφέρονται στη συνέχεια, το κανάλι θεωρείται αμετάβλητο κατά την διάρκεια  $T_f$  ενός πλαισίου ενώ θεωρείται ότι μεταβάλλεται από το ένα πλαίσιο στο άλλο. Επομένως, η μονάδα της αποτελεσματικής χωρητικότητας είναι “bits/frame”. Επίσης, στη βιβλιογραφία συναντάται συχνά η έννοια της κανονικοποιημένης αποτελεσματικής χωρητικότητας, η οποία ορίζεται ως η αποτελεσματική χωρητικότητα διαιρεμένη με τον παράγοντα  $T_f B$  και έχει μονάδες “bits/sec/Hz”.

Κλείνοντας αυτή την υποενότητα, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για τη σχεδίαση αποδοτικών μηχανισμών που παρέχουν εγγυήσεις QoS, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μια “γέφυρα” για τη διαστρωματική (cross-layer) σχεδίαση ανάμεσα στο φυσικό στρώμα και το στρώμα ζεύξης δεδομένων, συσχετίζοντας το ρυθμό εξυπηρέτησης του ασύρματου καναλιού με την απόδοση QoS του δικτύου μέσω μιας απλής παραμέτρου, του εκθέτη  $\theta$ . Αυτή η διαπίστωση εξηγεί το βασικό λόγο, για τον οποίο οι ερευνητές χρησιμοποιούν ευρέως τα τελευταία χρόνια, την προσέγγιση της αποτελεσματικής χωρητικότητας για να μελετήσουν διάφορα θεμελιώδη προβλήματα διαχείρισης ραδιοπόρων.

### 6.3 Διαχείριση πόρων σε ασύρματα επίγεια δίκτυα για παροχή QoS

Όπως συμπεραίνεται στην προηγούμενη ενότητα, η έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας αποτελεί ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο το οποίο επιτρέπει στους ερευνητές όχι μόνο να μελετήσουν την επίδραση διάφορων χαρακτηριστικών του φυσικού στρώματος στην απόδοση ανωτέρων στρωμάτων, αλλά παράλληλα να αναπτύξουν αποδοτικά σχήματα εκχώρησης πόρων. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, έχουν προταθεί πολυάριθμοι μηχανισμοί διαχείρισης ραδιοπόρων, οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη τις απαιτήσεις QoS των ασύρματων χρηστών, μέσω της θεωρίας της αποτελεσματικής χωρητικότητας. Η συγκεκριμένη ενότητα εστιάζει στα υπάρχοντα σχήματα ελέγχου ισχύος διάφορων τεχνολογιών και αρχιτεκτονικών δικτύων, τα οποία λαμβάνουν υπόψη τις απαιτήσεις QoS των χρηστών.

Ένας από τους πρώτους μηχανισμούς που προτάθηκε στη συγκεκριμένη ερευνητική περιοχή εμφανίζεται στο (Tang & Zhang, 2007a), όπου οι συγγραφείς προτείνουν ένα σχήμα εκχώρησης ισχύος για ασύρματα δίκτυα, το οποίο έχει ως στόχο τη μεγιστοποίηση της ρυθμαπόδοσης του συστήματος για συγκεκριμένες απαιτήσεις καθυστέρησης QoS. Στην προσέγγιση τους, χρησιμοποιείται

η έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας έτσι ώστε να συσχετισθούν οι απαιτήσεις ποιότητας του συστήματος με τη θεωρητική προσέγγιση της χωρητικότητας κατά Shannon. Συγκεκριμένα, θεωρώντας, αρχικά, ασυσχέτιστα κανάλια εξασθένησης, υπολογίζεται η βέλτιστη εκχώρηση ισχύος, η οποία μεγιστοποιεί την αποτελεσματική χωρητικότητα, δεδομένου ενός περιορισμού μέσης ισχύος. Αναλυτικότερα, το πρόβλημα βελτιστοποίησης που μελετάται μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

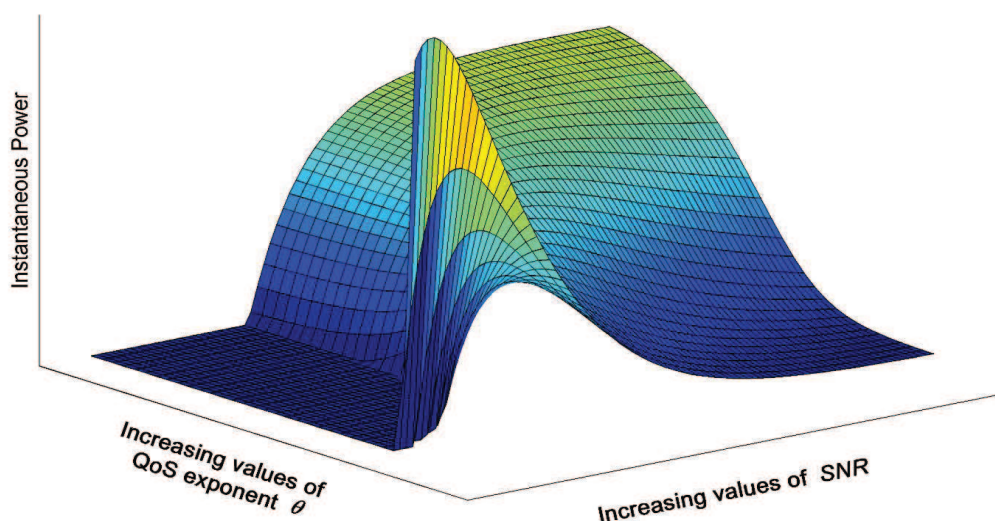
$$\begin{aligned} \max_{P(\theta, \gamma)} \{ & -\frac{1}{\theta} \log (\mathbf{E} [e^{-\theta R(P(\theta, \gamma))}]) \} \\ \text{s.t. } & \mathbf{E} [P(\theta, \gamma)] = \text{constant} \end{aligned} \quad (6.11)$$

όπου  $R(P(\theta, \gamma))$  είναι η χωρητικότητα κατά Shannon και  $P(\theta, \gamma)$  είναι η κατανομή ισχύος, η οποία εξαρτάται τόσο από το σηματοθορυβικό λόγο της ζεύξης  $\gamma$  καθώς και από τον εκθέτη QoS.

Στο σχήμα 6.3 απεικονίζεται η βέλτιστη κατανομή ισχύος στην οποία καταλήγει η λύση του προαναφερόμενου προβλήματος βελτιστοποίησης. Από το συγκεκριμένο σχήμα παρατηρείται ότι όταν το σύστημα έχει χαμηλές απαιτήσεις QoS, το οποίο σημαίνει ότι μπορεί να ανεχτεί μεγάλη καθυστέρηση (μικρές τιμές του  $\theta$ ), η βέλτιστη κατανομή ισχύος συγκλίνει στο γνωστό σχήμα water-filling (Li & Goldsmith, 2001). Όπως αποδεικνύεται στο (A. Goldsmith, 2005), το σχήμα water-filling βελτιστοποιεί τη συνάρτηση εργοδικής χωρητικότητας εκχωρώντας περισσότερη ισχύ όταν υπάρχουν καλές συνθήκες καναλιού και λιγότερη ισχύ όταν το κανάλι χειροτερεύει (μικρές τιμές του λόγου SNR). Από την άλλη μεριά, όταν το σύστημα πρέπει να ικανοποιήσει αυστηρούς περιορισμούς ποιότητας (μεγάλες τιμές  $\theta$ ), η βέλτιστη εκχώρηση ισχύος είναι παρόμοια με το μηχανισμό total channel inversion (A. J. Goldsmith & Varaiya, 1997). Στο συγκεκριμένο μηχανισμό, εκχωρείται περισσότερη ισχύς όταν υπάρχουν κακές συνθήκες καναλιού και λιγότερη ισχύς όταν οι συνθήκες καναλιού είναι ευνοϊκότερες, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται σταθερό SNR και επομένως σταθερή χωρητικότητα. Όσον αφορά τις ενδιάμεσες τιμές του εκθέτη QoS  $\theta$ , η τεχνική εκχώρησης ισχύος ποικίλει ανάμεσα στα σχήματα water-filling και total channel inversion, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.3.

Στην ίδια εργασία (Tang & Zhang, 2007a), οι συγγραφείς μελετάνε το σχήμα βέλτιστης εκχώρησης ισχύος θεωρώντας ένα πιο ρεαλιστικό σενάριο στο οποίο εισάγονται προσαρμοστικές τεχνικές διαμόρφωσης, θεωρώντας τόσο ασυσχέτιστα όσο και συσχετισμένα κανάλια εξασθένησης. Όπως αποδεικνύεται, η γενική συμπεριφορά του μηχανισμού εκχώρησης ισχύος για διαφορετικές τιμές του εκθέτη QoS παραμένει παρόμοια σε αυτά τα σχήματα. Μια βασική παρατήρηση που προκύπτει είναι ότι η θεώρηση συσχετισμένων καναλιών επηρεάζει σημαντικά τον μηχανισμό εκχώρησης ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, θεωρώντας ένα μαρκοβιανό μοντέλο εξασθένησης καναλιού, οι συγγραφείς αποδεικνύουν ότι όταν αυξάνεται η συσχέτιση καναλιού, ο μηχανισμός ελέγχου ισχύος συγκλίνει γρηγορότερα στην τεχνική total channel inversion για μεγάλες τιμές του  $\theta$ .

Οι ίδιοι συγγραφείς, στο (Tang & Zhang, 2007b), λαμβάνοντας υπόψη την εξέλιξη της αρχιτεκτονικής του φυσικού στρώματος, προτείνουν ένα μηχανισμό εκχώρησης ισχύος για την πολυκαναλική επικοινωνία (multichannel communication) των ασυρμάτων δικτύων. Παρόμοια με το (Tang & Zhang, 2007a), ο στόχος τους είναι η εύρεση της κατανομής ισχύος που μεγιστοποιεί τη ρυθμαπόδοση του συστήματος για συγκεκριμένους περιορισμούς QoS. Ωστόσο, η ανάλυση τους για πολυκαναλικές επικοινωνίες δείχνει ότι υπάρχουν σημαντικές διαφορές συγκρίνοντας το προτεινόμενο σχήμα με τη μονοκαναλική περίπτωση που αναφέρεται στο (Tang & Zhang, 2007a). Συγκεκριμένα, ενώ για πιο ευέλικτους περιορισμούς QoS, ο βέλτιστος μηχανισμός εκχώρησης ισχύος συγκλίνει επίσης στον αλγόριθμο water-filling, στην περίπτωση που ο εκθέτης QoS παίρνει μεγάλες τιμές (αυστηροί περιορισμοί ποιότητας), η βέλτιστη τεχνική ελέγχου ισχύος οδηγεί σε ένα σχήμα σταθερού ρυθμού, το



Σχήμα 6.3: Κατανομή βέλτιστης ισχύος ως προς τον εκθέτη QoS  $\theta$  και τον λόγο SNR

οποίο, όμως, προσεγγίζει την εργοδική χωρητικότητα καθώς αυξάνεται ο αριθμός των subchannels. Επομένως, είναι εμφανές ότι το πολυκαναλικό σχήμα προσφέρει ένα σημαντικό πλεονέκτημα για μεγάλες τιμές του εκθέτη QoS  $\theta$ , καθώς συνδυάζει υψηλές τιμές χωρητικότητας μαζί με αυστηρές εγγυήσεις για ποιότητα υπηρεσίας, αντίθετα με τη μονοκαναλική περίπτωση επικοινωνίας.

Ένας άλλος μηχανισμός ελέγχου ισχύος που έχει ως βασικό γνώμονα την παροχή QoS για πολυκαναλικές επικοινωνίες παρουσιάζεται στο (X. Zhang et al., 2006). Στη συγκεκριμένη εργασία, οι συγγραφείς χρησιμοποιούν την έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας και παρουσιάζουν ένα διαστρωματικό μοντέλο συστήματος, έτσι ώστε να είναι εφικτή η μελέτη της επίδρασης των χαρακτηριστικών φυσικού στρώματος σε μετρικές απόδοσης του στρώματος ζεύξεως δεδομένων. Στην προσέγγισή τους, χρησιμοποιούν τεχνικές διαφορισμού, πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (Multiple Input Multiple Output techniques - MIMO) μαζί με τεχνικές προσαρμοστικής κωδικοποίησης και διαμόρφωσης (Adaptive Coding and Modulation - ACM) και αναλύουν τον τρόπο με τον οποίο η δομή του φυσικού στρώματος επηρεάζει την αποτελεσματική χωρητικότητα του ασύρματου δικτύου. Αναλυτικότερα, χρησιμοποιώντας τη συγκεκριμένη προσέγγιση, μελετώνται στατιστικές μετρικές QoS, οι οποίες είναι χρήσιμες για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, όπως είναι για παράδειγμα η πιθανότητα υπέρβασης συγκεκριμένου ορίου καθυστέρησης ή η πιθανότητα υπερχείλισης του buffer. Μια βασική παρατήρηση από την αριθμητική ανάλυση είναι ότι η χρήση τεχνικών MIMO αυξάνει σημαντικά την αποτελεσματική χωρητικότητα του συστήματος σε σχέση με τη χρήση της τεχνικής SISO (Single Input Single Output). Όσον αφορά τη σύγκριση των τεχνικών MIMO με τεχνικές MISO (Multiple Input Single Output), μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι, για πιο ευέλικτους περιορισμούς QoS, η αποτελεσματική χωρητικότητα των συστημάτων MISO μπορεί να είναι υψηλότερη από αυτή των MIMO συστημάτων, ανάλογα την πληροφορία καναλιού (CSI) που είναι διαθέσιμη. Ωστόσο, για αυστηρότερες απαιτήσεις QoS, τα συστήματα MIMO οδηγούν πάντα σε καλύτερες τιμές αποτελεσματικής χωρητικότητας.

Σε μια άλλη μελέτη, (Tang & Zhang, 2008), οι ίδιοι συγγραφείς, αναλύουν την περίπτωση κάτω

ζεύξης ενός κινητού ασύρματου δικτύου και προτείνουν ένα μηχανισμό εκχώρησης ραδιοπόρων, έτσι ώστε να παρέχονται συγκεκριμένες εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας στους κινητούς χρήστες. Αντίστοιχα με τις προηγούμενες μελέτες, χρησιμοποιούν την έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητα ως εργαλείο διασύνδεσης των δύο στρωμάτων, έτσι ώστε να είναι εφικτή η μελέτη της επίδρασης τεχνικών του φυσικού στρώματος (όπως είναι για παράδειγμα ο προσαρμοστικός έλεγχος ισχύος και η καθυστέρηση ανατροφοδότησης του CSI), στην επίδοση των πρωτοκόλλων των ανώτερων στρωμάτων. Συγκεκριμένα, παρουσιάζουν ένα σχήμα δυναμικής διαχείρισης ραδιοπόρων το οποίο εκχωρεί σε κινητούς χρήστες ετερογενών δικτύων την κατάλληλη ισχύ καθώς και τον κατάλληλο αριθμό χρονοσχισμών, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους (π.χ. εξασθένηση καναλιού, απαιτήσεις QoS κ.α.), έτσι ώστε να παρέχονται εγγυήσεις συγκεκριμένου ορίου καθυστέρησης για κάθε χρήστη. Αναλυτικότερα, στη συγκεκριμένη ερευνητική εργασία, μελετάται ο τρόπος με τον οποίο το σχήμα προσαρμοστικού ελέγχου ισχύος επηρεάζει την παροχή εγγυήσεων QoS. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται τρία διαφορετικά σχήματα εκχώρησης ισχύος: το σχήμα water-filling, ένας αλγόριθμος εκχώρησης σταθερής ισχύος καθώς και το βέλτιστο σχήμα που προτείνεται στο (Tang & Zhang, 2007a). Όπως παρατηρείται από την αριθμητική ανάλυση, το τρίτο σχήμα υπερέχει σημαντικά σε σχέση με τους άλλους δύο μηχανισμούς από πλευράς παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσίας. Επιπρόσθετα, διαπιστώνεται ότι το προτεινόμενο σχήμα κοινής εκχώρησης ισχύος και χρονοσχισμών παρέχει εγγυήσεις για τις απαιτήσεις ποιότητας κάθε χρήστη και ταυτόχρονα ελαχιστοποιεί τη συνολική ενέργεια του συστήματος, οδηγώντας με αυτόν τον τρόπο, είτε στη μείωση της ισχύος μετάδοσης, είτε στην αύξηση του βαθμού αποδοχής χρηστών.

Μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση για ένα παρόμοιο πρόβλημα εκχώρησης ραδιοπόρων σε συνεργατικά δίκτυα επαναληπτών παρουσιάζεται στο (Ren & Letaief, 2009). Αναλυτικότερα, σε αυτή την εργασία, οι συγγραφείς μελετάνε την περίπτωση ενός ασύρματου δικτύου επαναληπτών και προτείνουν ένα μηχανισμό εκχώρησης χρονοσχισμών, έτσι ώστε να βελτιστοποιείται η ρυθμιζόμενη του συστήματος για συγκεκριμένους περιορισμούς QoS. Αρχικά, υποθέτοντας block κανάλια διαλείψεων (block fading channels), υπολογίζεται η βέλτιστη διάρκεια της χρονοσχιμής που πρέπει να εκχωρηθεί σε κάθε επαναλήπτη για να προωθηθεί επιτυχώς το σήμα της πηγής, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η αποτελεσματική χωρητικότητα του συστήματος. Όπως αποδεικνύεται στη συγκεκριμένη εργασία, όταν υπάρχουν ευέλικτοι περιορισμοί QoS, η βέλτιστη κατανομή καταλήγει στην επιλογή μόνο του επαναλήπτη με την καλύτερη μέση κατάσταση καναλιού, ενώ για αυστηρές απαιτήσεις QoS απαιτείται η συνεργασία περισσότερων επαναληπτών προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η αποτελεσματική χωρητικότητα. Επιπλέον, ο προτεινόμενος μηχανισμός βέλτιστης εκχώρησης χρονοσχισμών συγκρίνεται με άλλους δύο μηχανισμούς εκχώρησης χρονοσχισμών: έναν ομοιογενικό μηχανισμό κατά τον οποίο επιλέγεται κάθε φορά μόνο ο επαναλήπτης με την καλύτερη μέση κατάσταση καναλιού και ένα σχήμα ίσης εκχώρησης, σύμφωνα με το οποίο εκχωρούνται χρονοσχισμές με την ίδια διάρκεια σε όλους τους επαναλήπτες. Όπως αποδεικνύεται, το προτεινόμενο σχήμα υπερέχει από τα άλλα δύο σχήματα από πλευράς αποτελεσματικής χωρητικότητας, για κάθε δεδομένη τιμή του εκθέτη QoS  $\theta$ . Παράλληλα, μια άλλη ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι δεδομένου ενός συγκεκριμένου στόχου αποτελεσματικής χωρητικότητας, εμφανίζεται ένα σημαντικό tradeoff ανάμεσα στην ισχύ μετάδοσης και τον αριθμό των επαναληπτών. Επίσης, μελετάται ένα πιο ρεαλιστικό σενάριο μοντέλου συστήματος με συσχετισμένα κανάλια εξασθένησης και αποδεικνύεται ότι η συσχέτιση επηρεάζει αρνητικά την αποτελεσματική χωρητικότητα.

Τέλος, δεδομένου ότι η θεωρία παιγνίων παρέχει ένα σημαντικό εργαλείο για την ανάλυση διαφορών προβλημάτων εκχώρησης ραδιοπόρων σε ασύρματα δίκτυα, οι ερευνητές έχουν αρχίσει να

χρησιμοποιούν την έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας σε παιγνιοθεωρητικές προσεγγίσεις προκειμένου να αναπτυχθούν κατανομημένοι μηχανισμοί εκχώρησης ραδιοπόρων. Συγκεκριμένα, κάποια πρόσφατα αποτελέσματα προς αυτή την κατεύθυνση μπορούν να βρεθούν στα (Du & Zhang, 2009) και (Qiao et al., 2010), όπου οι συγγραφείς μελετάνε ένα μη συνεργατικό παίγνιο ελέγχου ισχύος ανάμεσα σε κινητούς χρήστες, οι οποίοι επιθυμούν να μεγιστοποιήσουν την αποτελεσματική χωρητικότητα τους. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι κάθε κινητός χρήστης αποτελεί ένα λογικό παίκτη με συγκεκριμένους περιορισμούς ποιότητας υπηρεσίας και πλήρη γνώση του CSI, ο οποίος προσπαθεί να βελτιστοποιήσει την αποτελεσματική χωρητικότητα του, δεδομένων των περιορισμών μέσης ισχύος του. Στις συγκεκριμένες εργασίες, δίνεται έμφαση στην περίπτωση του παιγνίου δύο ατόμων και αποδεικνύεται ότι το συγκεκριμένο παίγνιο ελέγχου ισχύος έχει μια μοναδική ισορροπία Nash. Επιπλέον, η απόδοση του συγκεκριμένου παιγνίου συγκρίνεται με την απόδοση του water-filling παιγνίου που προτείνεται στο (Lai & El Gamal, 2008). Όπως αποδεικνύεται, για αυστηρούς περιορισμούς QoS, το παίγνιο οδηγεί σε υψηλότερες τιμές αποτελεσματικής χωρητικότητας από ότι το water-filling παίγνιο, ενώ για χαμηλές τιμές του εκθέτη QoS, τα δύο παίγνια έχουν σχεδόν την ίδια συμπεριφορά. Ωστόσο, μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι η εισαγωγή των περιορισμών QoS οδηγεί σε μια ισορροπία στην οποία οι χρήστες μπορούν να μεταδώσουν ταυτόχρονα αντίθετα με το απλό παίγνιο water-filling κατά το οποίο μπορεί να μεταδίδει το πολύ ένας χρήστης σε κάθε κατάσταση. Τέλος, μια παρόμοια προσέγγιση παρουσιάζεται στο (Mao et al., 2012), όπου οι συγγραφείς μελετάνε το πρόβλημα εκχώρησης ισχύος με περιορισμούς QoS σε ένα κινητό περιβάλλον υψηλής ταχύτητας, χρησιμοποιώντας αρχές από τη μη συνεργατική θεωρία παιγνίων.

## 6.4 Μηχανισμός ελέγχου ισχύος σε δορυφορικά συστήματα για παροχή QoS

Από τη βιβλιογραφική επισκόπηση των υπάρχοντων αλγορίθμων για διαχείριση ραδιοπόρων με διασφάλιση της ποιότητας υπηρεσίας, που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, είναι εμφανές ότι η ανάπτυξη αντίστοιχων μηχανισμών για δορυφορικά δίκτυα είναι σχεδόν ανύπαρκτη. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτό, στη συγκεκριμένη ενότητα, προτείνεται και αναπτύσσεται ένας αποδοτικός μηχανισμός ελέγχου ισχύος για δορυφορικά δίκτυα νέας γενιάς με κεντρικό γνώμονα την παροχή ποιότητας υπηρεσίας. Συγκεκριμένα, στο προτεινόμενο σχήμα, θεωρείται ένα κατάλληλο μοντέλο σκίασης για κινητά δορυφορικά συστήματα και χρησιμοποιείται η έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας, έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη οι απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας των χρηστών. Με αυτόν τον τρόπο, υπολογίζεται η βέλτιστη εκχώρηση ισχύος και μελετάται η επίδραση της στην απόδοση του συστήματος. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται αρχικά μια σύντομη περιγραφή του μοντέλου συστήματος, ενώ έπειτα αναλύεται και λύνεται το θεωρούμενο πρόβλημα ελέγχου ισχύος στα δορυφορικά δίκτυα. Τέλος, παρουσιάζεται και σχολιάζεται η αριθμητική ανάλυση του συγκεκριμένου προβλήματος.

### 6.4.1 Περιγραφή μοντέλου συστήματος

Τα κινητά δορυφορικά συστήματα κατέχουν ένα σημαντικό ρόλο στην παγκόσμια υποδομή των τηλεπικοινωνιακών δικτύων λόγω της μοναδικής τους ικανότητας να καθιερώνουν ένα αξιόπιστο δίκτυο σε δύσκολα σενάρια, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση απομακρυσμένων περιοχών ή σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης (Chini et al., 2010). Πιο συγκεκριμένα, σε περιοχές που δεν υπάρχει

υποδομή επίγειων ασύρματων δικτύων είτε λόγω οικονομικών, είτε λόγω τεχνολογικών παραγόντων, τα κινητά δορυφορικά συστήματα μπορούν να παρέχουν σχεδόν ολόκληρο το σύνολο των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, συμπεριλαμβανομένων και των πολυμεσικών υπηρεσιών πραγματικού χρόνου. Μια σημαντική δυσκολία, όσον αφορά τις συγκεκριμένες υπηρεσίες, είναι ότι απαιτούν αυστηρές εγγυήσεις για τα όρια καθυστέρησης, κάτι το οποίο δεν είναι πάντα εφικτό λόγω της επίδρασης του χρονικά μεταβαλλόμενου δορυφορικού καναλιού εξασθένησης. Ένας τρόπος για τη μελέτη της παροχής στατιστικών εγγυήσεων QoS της μετάδοσης δεδομένων σε χρονικά μεταβαλλόμενα ασύρματα κανάλια, είναι η χρήση της έννοιας της αποτελεσματικής χωρητικότητας. Συγκεκριμένα, όπως προαναφέρθηκε, η συνάρτηση της αποτελεσματικής χωρητικότητας ορίζεται ως ο μέγιστος ρυθμός εισερχόμενης κίνησης που μπορεί να υποστηρίξει το κανάλι προκειμένου να παρέχονται εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας, οι οποίες εκφράζονται από τον εκθέτη QoS  $\theta$ . Αναλυτικά, η αποτελεσματική χωρητικότητα εκφράζεται ως:

$$E_c(\theta) = -\frac{1}{\theta} \ln \left( \mathbf{E} \left[ e^{-\theta R[n]} \right] \right) \quad (6.12)$$

όπου  $n$  είναι ο χρονικός δείκτης και το  $R[n]$  αναφέρεται στη στοχαστική διαδικασία εξυπηρέτησης διακριτού χρόνου, η οποία θεωρείται στάσιμη και εργοδική (ρυθμός μετάδοσης). Όπως είναι εμφανές από την προηγούμενη ενότητα, η συγκεκριμένη έννοια έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για τη βελτιστοποίηση τεχνικών διαχείρισης ραδιοπόρων για διάφορα επίγεια ασύρματα δίκτυα.

Σε αυτήν την ενότητα, θεωρείται η κάτω ζεύξη ενός κινητού δορυφορικού συστήματος, που χρησιμοποιεί προσαρμοστική διαμόρφωση και αναλύεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης της εκχώρησης ισχύος για διαφορετικούς περιορισμούς ποιότητας υπηρεσίας και διαφορετικές συνθήκες καναλιού. Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται η βέλτιστη ισχύς μετάδοσης ενώ παράλληλα υπολογίζεται ο κλειστός τύπος της αποτελεσματικής χωρητικότητας που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη ισχύ. Αναλυτικότερα, στο κινητό δορυφορικό σύστημα υπό μελέτη, το συνολικό εύρος ζώνης θεωρείται ίσο με  $B$ , ενώ θεωρείται επίσης, ότι τα πακέτα του ανώτερου στρώματος οργανώνονται, στο στρώμα ζεύξης δεδομένων, σε πλαίσια με διάρκεια  $T_f$ . Η στιγμιαία ισχύς μετάδοσης μπορεί να εκφραστεί ως  $P[n] = P(\theta, \gamma_s[n]) P_{max}$ , όπου  $P_{max}$  είναι το άνω όριο ισχύος και το  $P(\theta, \gamma_s[n])$  αναφέρεται στην τεχνική εκχώρησης ισχύος συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου  $\gamma_s[n]$  και της παραμέτρου ποιότητας υπηρεσίας  $\theta$ . Στη συγκεκριμένη περίπτωση θεωρείται ότι ο στιγμιαίος λόγος SNR του επίγειου - δορυφορικού καναλιού ορίζεται ως  $\gamma_s[n] = P_{max} h_s[n] / (N_0 B)$  όπου τα  $h_s$  και  $N_0$  αναφέρονται, αντίστοιχα, στο κέρδος ισχύος καναλιού της δορυφορικής ζεύξης και στη φασματική πυκνότητα ισχύος του λευκού, γκαουσιανού θορύβου. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι στη συνέχεια, για λόγους ευκολίας, παραλείπεται ο χρονικός δείκτης  $n$ .

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, χρησιμοποιείται ένα μοντέλο κινητού δορυφορικού καναλιού που παρουσιάζει καλή συμπεριφορά και το οποίο αποτελεί ουσιαστικά ένα Rician μοντέλο στο οποίο το πλάτος Line of Sight (LoS) ακολουθεί Nakagami -  $m$  κατανομή (Abdi et al., 2003). Αναλυτικότερα, θεωρείται ότι ο σηματοθορυβικός λόγος της δορυφορικής ζεύξης ( $\gamma_s$ ) ακολουθεί τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (probability density function - pdf) που δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$p_{\gamma_s}(\gamma_s) = K \exp \left( -\frac{\gamma_s}{2b_0} \right) {}_1F_1(m, 1, c\gamma_s) \quad (6.13)$$

όπου

$$K = \frac{1}{2b_0} \left( \frac{2b_0 m}{2b_0 m + \Omega} \right)^m, c = \frac{\Omega}{2b_0(2b_0 m + \Omega)} \quad (6.14)$$

και  $2b_0$  είναι η μέση ισχύς του παράγοντα σκέδασης,  $m$  είναι η παράμετρος Nakagami,  $\Omega$  είναι η μέση ισχύς της συνιστώσας LoS και  ${}_1F_1(\cdot, \cdot, \cdot)$  είναι η συμβάλλουσα υπεργεωμετρική συνάρτηση (confluent hypergeometric function) (Erdelyi et al., 1953). Επιπλέον, υποθέεται ότι το κανάλι εκτιμάται τέλεια με τη βοήθεια πιλοτικών σημάτων στο δορυφορικό τερματικό (Maral & Bousquet, 2011) και οι παράμετροι του καναλιού γνωστοποιούνται στο δορυφορικό αναμεταδότη, μέσω ενός καναλιού ανατροφοδότησης χωρίς θόρυβο. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η προτεινόμενη ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βέλτιστη διαστρωματική σχεδίαση των κινητών δορυφορικών συστημάτων ως μια προδραστική τεχνική εξάλειψης της εξασθένησης για δορυφορικά τερματικά σε μέσα μεταφοράς.

### 6.4.2 Μηχανισμός βέλτιστης εκχώρησης ισχύος

Σε αυτή την υποενότητα, υπολογίζονται αναλυτικά οι τελικές εκφράσεις του σχήματος βέλτιστης εκχώρησης ισχύος καθώς και της αντίστοιχης αποτελεσματικής χωρητικότητας του θεωρούμενου κινητού δορυφορικού καναλιού. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, θεωρείται ότι το δορυφορικό κινητό δίκτυο είναι ικανό να παρέχει προσαρμοστική διαμόρφωση (είτε MPSK, είτε MQAM), χωρίς περιορισμό στο μέγεθος του αστερισμού (Chini et al., 2010), (Maral & Bousquet, 2011). Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται μια γενική μορφή προσέγγισης του BER (bit error rate) για τις διαμορφώσεις MPSK και MQAM (Chung & Goldsmith, 2001), η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$BER \approx a_1 \exp \left[ \frac{-a_2 \gamma_s P(\theta, \gamma_s)}{2^{a_3 R_s} - a_4} \right]. \quad (6.15)$$

όπου  $R_s$  είναι ο ρυθμός μετάδοσης και  $a_1, a_2, a_3, a_4$  είναι σταθερές παράμετροι που παίρνουν τιμές ανάλογα με το είδος διαμόρφωσης και τη μέθοδο προσέγγισης (Chung & Goldsmith, 2001) που χρησιμοποιείται. Επομένως, ο ρυθμός μετάδοσης για ένα κινητό δορυφορικό κανάλι υποθέτοντας συνεχή σχήματα MPSK και MQAM είναι μια θετική συνάρτηση και δίνεται από τη σχέση:

$$R_s(\gamma_s, BER, P(\theta, \gamma_s)) = \frac{T_f B}{a_3} \log_2 \left[ a_4 - \frac{a_2 \gamma_s}{\ln(BER/a_1)} P(\theta, \gamma_s) \right] \quad (6.16)$$

Δεδομένου ότι στόχος είναι να βρεθεί η βέλτιστη εκχώρηση ισχύος έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η ρυθμαπόδοση του συστήματος για συγκεκριμένες απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας και λαμβάνοντας υπόψη ότι η μέση ισχύς μετάδοσης είναι άνω φραγμένη από το  $P_{max}$ , το πρόβλημα βελτιστοποίησης ορίζεται ως εξής :

$$\begin{aligned} \max_{P(\theta, \gamma_s)} & \left\{ E_c = -\frac{1}{\theta} \ln \left( \int_0^{\infty} e^{-\theta R_s(\gamma_s, BER, P(\theta, \gamma_s))} p_{\gamma_s}(\gamma_s) d\gamma_s \right) \right\} \\ \text{s.t.} & \begin{cases} \int_0^{\infty} P(\theta, \gamma_s) p_{\gamma_s}(\gamma_s) d\gamma_s \leq 1 \\ R_s(\gamma_s, BER, P(\theta, \gamma_s)) \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (6.17)$$

**Θεώρημα:** Το πρόβλημα βελτιστοποίησης (6.17) έχει μια μοναδική λύση.



Απόδειξη. Από τη σχέση (6.16), δεδομένου ότι ισχύει  $BER < a_1$ , προκύπτει εύκολα ότι ο ρυθμός μετάδοσης είναι μια κοίλη συνάρτηση ως προς  $P(\theta, \gamma_s)$ , επομένως ισχύει ότι η  $-R_s(\gamma_s, BER, P(\theta, \gamma_s))$  αποτελεί μια κυρτή συνάρτηση ως προς  $P(\theta, \gamma_s)$ . Συνεπώς, η συνάρτηση  $e^{-\theta R_s(\gamma_s, BER, P(\theta, \gamma_s))}$  είναι μια λογαριθμικά κυρτή συνάρτηση (log-convex) του  $P(\theta, \gamma_s)$ . Από (Boyd & Vandenberghe, 2004, p.105), προκύπτει ότι η  $\mathbf{E}\{[e^{-\theta R_s(\gamma_s, BER, P(\theta, \gamma_s))}]\}$  είναι επίσης μια λογαριθμικά κυρτή συνάρτηση, επομένως η  $\ln(\mathbf{E}[e^{-\theta R_s(\gamma_s, BER, P(\theta, \gamma_s))}])$  είναι μια κυρτή συνάρτηση ως προς  $P(\theta, \gamma_s)$  και αντίστοιχα η  $E_c$  αποτελεί μια κοίλη συνάρτηση ως προς  $P(\theta, \gamma_s)$ . Επομένως, το θεωρούμενο πρόβλημα βελτιστοποίησης αποτελεί ένα πρόβλημα κυρτής βελτιστοποίησης και συνεπώς έχει μια μοναδική λύση (Boyd & Vandenberghe, 2004).  $\square$

Λόγω της μονοτονίας της συνάρτησης του φυσικού λογαρίθμου, το προαναφερόμενο πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι ισοδύναμο με το πρόβλημα ελαχιστοποίησης της ακόλουθης αντικειμενικής συνάρτησης:

$$g(\theta, P(\theta, \gamma_s)) = \int_0^{\infty} e^{-\theta R_s(\gamma_s, BER, P(\theta, \gamma_s))} p_{\gamma_s}(\gamma_s) d\gamma_s. \quad (6.18)$$

Επομένως, προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη εκχώρηση ισχύος, αρκεί να λυθεί το ισοδύναμο πρόβλημα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιείται η μέθοδος πολλαπλασιαστών Lagrange, η οποία περιγράφεται στο τρίτο κεφάλαιο. Αρχικά, υπολογίζεται η αντίστοιχη Lagrangian συνάρτηση και απαιτείται η ισχύς και ο ρυθμός μετάδοσης να είναι θετικές συναρτήσεις.

$$L(\theta, P(\theta, \gamma_s)) = g(\theta, P(\theta, \gamma_s)) + \lambda \left( \int_0^{\infty} P(\theta, \gamma_s) p_{\gamma_s}(\gamma_s) d\gamma_s - 1 \right) \quad (6.19)$$

$$\frac{\partial L(\theta, P(\theta, \gamma_s))}{\partial P(\theta, \gamma_s)} = p_{\gamma_s}(\gamma_s) \left\{ \lambda + \frac{a_2 \beta \theta \gamma_s}{a_3 \ln(BER/a_1)} \cdot \left( a_4 - \frac{a_2 \gamma_s P(\theta, \gamma_s)}{\ln(BER/a_1)} \right)^{-\frac{(\beta \theta + a_3)}{a_3}} \right\} = 0 \quad (6.20)$$

Επομένως, λύνοντας την (6.20), προκύπτει ότι η βέλτιστη εκχώρηση ισχύος δίνεται από την ακόλουθη έκφραση κλειστού τύπου:

$$P(\theta, \gamma_s) = \begin{cases} A \cdot \left( \frac{a_4}{\gamma_s} - \frac{1}{\frac{a_3}{\gamma_{min}^{a_3 + \beta \theta}} \frac{\beta \theta}{\gamma_s^{a_3 + \beta \theta}}} \right), & \text{για } \gamma_s \geq \gamma_{min} \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (6.21)$$

όπου  $A = \ln(BER/a_1)/a_2$ ,  $\beta = T_f B / \ln(2)$  και  $\gamma_{min}$  είναι ο ελάχιστος σηματοθορυβικός λόγος, ο οποίος σχετίζεται με την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας (outage probability) βάσει της σχέσεως

$$P_{out} = P[\gamma_s < \gamma_{min}] \quad (6.22)$$

και μπορεί να βρεθεί από την ικανοποίηση του περιορισμού μέσης ισχύος

$$\int_{\gamma_{min}}^{\infty} P(\theta, \gamma_s) p_{\gamma_s}(\gamma_s) d\gamma_s = 1. \quad (6.23)$$

Shadowing Scenario	Parameters		
	$b_0$	$m$	$\Omega$
Light Shadowing	0.158	19.4	1.29
Average Shadowing	0.126	10.1	0.835
Heavy Shadowing	0.063	0.739	$8.97 \times 10^{-4}$

Πίνακας 6.1: Παράμετροι καναλιού για το κινητό δορυφορικό σύστημα.

Από τις σχέσεις (6.12), (6.16), (6.21) και χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες της υπεργεωμετρικής συνάρτησης (Erdelyi et al., 1953), προκύπτει ένα ορισμένο ολοκλήρωμα για την αποτελεσματική χωρητικότητα, το οποίο δίνεται από την έκφραση:

$$\begin{aligned}
 E_c(\theta) = & -\frac{1}{\theta} \ln \left[ K \left( \int_0^{\gamma_{\min}} e^{-\frac{\gamma_s}{2b_0}} {}_1F_1(m, 1, c\gamma_s) d\gamma_s - \gamma_{\min}^{\frac{\beta\theta}{\beta\theta+a_3}} \int_0^{\gamma_{\min}} \gamma_s^{-\frac{\beta\theta}{\beta\theta+a_3}} e^{-\frac{\gamma_s}{2b_0}} {}_1F_1(m, 1, c\gamma_s) d\gamma_s + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \gamma_{\min}^{\frac{\beta\theta}{\beta\theta+a_3}} \Gamma\left(\frac{a_3}{\beta\theta+a_3}\right) (2b_0)^{\frac{a_3}{\beta\theta+a_3}} F\left(m, \frac{a_3}{\beta\theta+a_3}, 1, 2b_0c\right) \right) \right] \quad (6.24)
 \end{aligned}$$

όπου  $\Gamma(\cdot)$  είναι η συνάρτηση Γάμμα και  $F(\cdot, \cdot, \cdot, \cdot)$  είναι η γκαουσιανή υπεργεωμετρική συνάρτηση (Gauss hypergeometric function) (Jeffrey & Zwillinger, 2007). Επιπλέον, χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες της συμβάλλουσας υπεργεωμετρικής συνάρτησης (Esposito, 1966), προκύπτει μια σχέση κλειστού τύπου για την αποτελεσματική χωρητικότητα ενός κινητού δορυφορικού καναλιού, η οποία δίνεται από

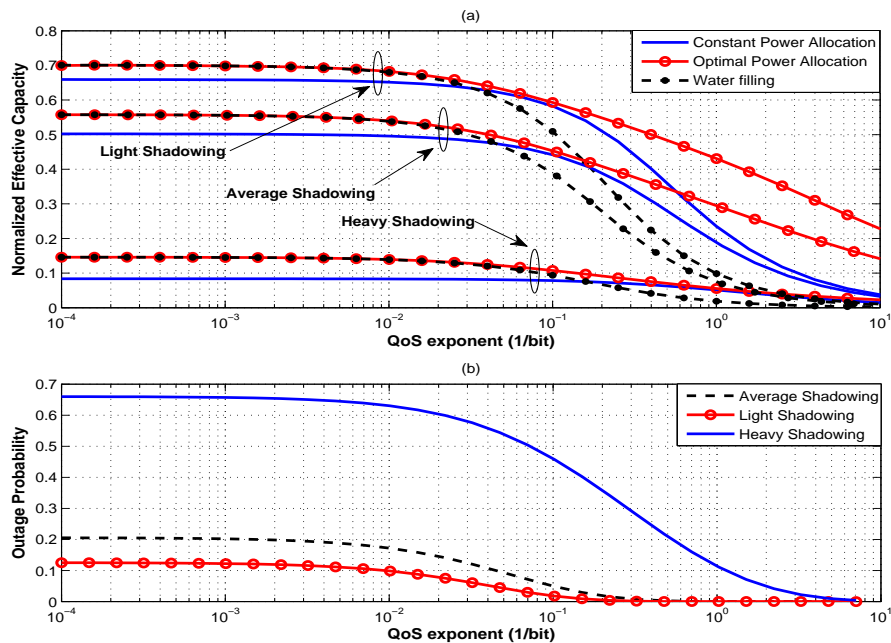
$$\begin{aligned}
 E_c(\theta) = & -\frac{1}{\theta} \ln \left[ K \left( \gamma_{\min} (2b_0c)^{-m} e^{-\frac{\gamma_{\min}}{2b_0}} \Psi_1\left(m+1, m, m+1, 2, 1 - (2b_0c)^{-1}, \frac{\gamma_{\min}}{2b_0}\right) \right. \right. \\
 & \left. \left. + \gamma_{\min}^{\frac{\beta\theta}{\beta\theta+a_3}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(m)_n c^n}{n! n!} (2b_0)^{n+\frac{a_3}{\beta\theta+a_3}} \Gamma\left(n + \frac{a_3}{\beta\theta+a_3}, \frac{\gamma_{\min}}{2b_0}\right) \right) \right] \quad (6.25)
 \end{aligned}$$

όπου η συνάρτηση  $\Psi_1$  ορίζεται στο (Erdelyi et al., 1953),  $(m)_n$  αναπαριστά το σύμβολο Pochhammer και  $\Gamma(\cdot, \cdot)$  είναι η ατελής συνάρτηση Γάμμα (Jeffrey & Zwillinger, 2007). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι εκφράσεις (6.24) και (6.25) αναφέρονται στην αποτελεσματική χωρητικότητα που προκύπτει χρησιμοποιώντας τη βέλτιστη εκχώρηση ισχύος, για διάφορες τιμές των αστερισμών διαμόρφωσης MPSK και MQAM.

### 6.4.3 Αριθμητική ανάλυση προτεινόμενου μηχανισμού

Σε αυτήν την ενότητα, μελετάται η απόδοση του προτεινόμενου μηχανισμού εκχώρησης ισχύος μέσω πολυάριθμων προσομοιώσεων. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα της βέλτιστης εκχώρησης ισχύος και της αντίστοιχης αποτελεσματικής χωρητικότητας του κινητού δορυφορικού συστήματος. Για το σενάριο προσομοίωσης έχουν θεωρηθεί τυπικές τιμές παραμέτρων (Chini et al., 2010) όπως  $T_f = 2 \cdot 10^{-3} s$ ,  $BER = 10^{-4}$  και  $B = 10^4 Hz$ . Επιπλέον, θεωρείται το προσεγγιστικό μοντέλο για διαμόρφωση MPSK που παρουσιάζεται στο (Chung & Goldsmith, 2001) με  $a_1 = 0.05$ ,  $a_2 = 6$ ,  $a_3 = 1.9$  και  $a_4 = 1$ . Τέλος, στον πίνακα 6.1 απεικονίζονται οι παράμετροι καναλιού για τα διαφορετικά σενάρια σκίασης, οι οποίες αναφέρονται στο (Abdi et al., 2003).

Το πρώτο διάγραμμα του σχήματος 6.4 απεικονίζει την κανονικοποιημένη αποτελεσματική

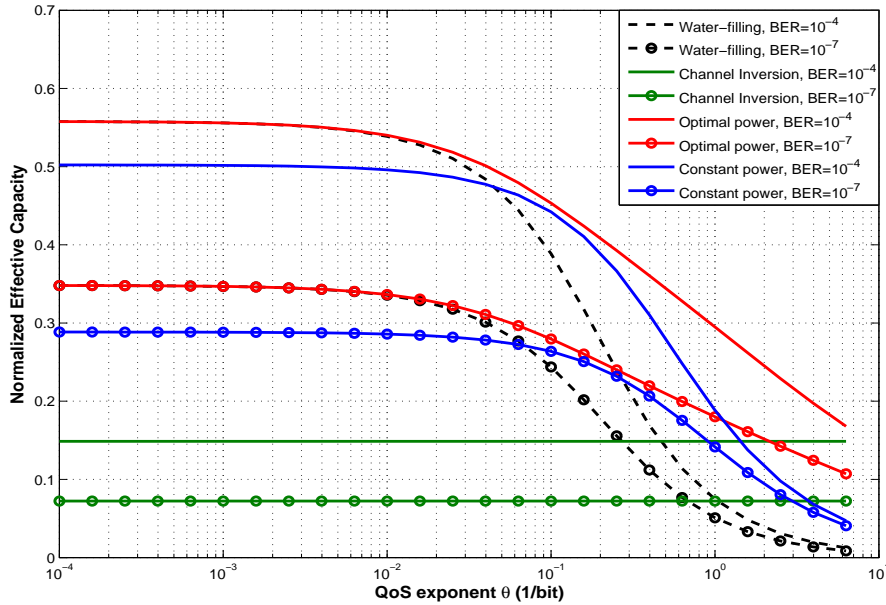


Σχήμα 6.4: Κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα ως προς τον εκθέτη QoS

χωρητικότητα, η οποία δίνεται από τη σχέση  $E_{C,n} = E_C/(T_f B)$ , συναρτήσει του εκθέτη QoS  $\theta$  για τρία διαφορετικά σχήματα εκχώρησης ισχύος και για διαφορετικές συνθήκες διάδοσης. Συγκεκριμένα, μελετάται η περίπτωση ενός σχήματος εκχώρησης σταθερής ισχύος, η περίπτωση του μηχανισμού ελέγχου ισχύος water-filling που μεγιστοποιεί την εργοδική χωρητικότητα καθώς και ο προτεινόμενος μηχανισμός ελέγχου ισχύος. Στο σημείο αυτό, πρέπει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με το γνωστό αλγόριθμο water-filling, ο πομπός χρησιμοποιεί περισσότερη ισχύ όταν το κανάλι είναι καλό και λιγότερη όταν το κανάλι χειροτερεύει (Tse & Viswanath, 2005). Στο δεύτερο διάγραμμα του σχήματος 6.4, απεικονίζεται η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας (outage probability) που προκύπτει χρησιμοποιώντας τον προτεινόμενο μηχανισμό ελέγχου ισχύος συναρτήσει του εκθέτη QoS  $\theta$ , για τις ίδιες συνθήκες καναλιού. Όπως παρατηρείται από το σχήμα 6.4α, όταν υπάρχουν χαλαρές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας (μικρές τιμές του  $\theta$ ), η αποτελεσματική χωρητικότητα που προκύπτει χρησιμοποιώντας τον προτεινόμενο μηχανισμό συγκλίνει στην αποτελεσματική χωρητικότητα που προκύπτει από τη χρήση του αλγορίθμου water-filling. Αντίθετα, όταν το  $\theta$  παίρνει μεγαλύτερες τιμές (πιο αυστηρές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας), τότε το βέλτιστο σχήμα εκχώρησης υπερέχει σημαντικά σε σχέση με τα άλλα δύο σχήματα από πλευράς αποτελεσματικής χωρητικότητας. Είναι εμφανές, επομένως, ότι ο προτεινόμενος μηχανισμός εκχώρησης ισχύος οδηγεί σε μεγαλύτερο κέρδος αποτελεσματικής χωρητικότητας για υπηρεσίες μη ανεκτικές στην καθυστέρηση (delay-non tolerant services). Επιπλέον, παρατηρείται ότι αυτό το κέρδος μικραίνει καθώς χειροτερεύουν οι συνθήκες διάδοσης (μεγαλύτερη σκίαση). Η αρνητική επίδραση του φαινομένου σκίασης επαληθεύεται, επίσης, από το σχήμα 6.4β όπου γίνεται εμφανές ότι όταν υπάρχει μεγαλύτερη σκίαση, οι τιμές της πιθανότητας διακοπής λειτουργίας αυξάνονται σημαντικά. Επιπλέον, στο σχήμα 6.4β, παρατηρείται ότι όταν πρόκειται για delay tolerant υπηρεσίες ( $\theta \rightarrow 0$ ), η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας ( $P_r\{\gamma < \gamma_{min}\}$ ) παίρνει μεγάλες τιμές, ειδικά για το σενάριο υψηλής σκίασης. Αντίθετα, στην περίπτωση που πρόκειται για υπηρεσίες μη ανεκτικές στην καθυστέρηση, δηλαδή delay non-tolerant υπηρεσίες (μεγάλες

τιμές του  $\theta$ ), ο προτεινόμενος μηχανισμός βέλτιστης εκχώρησης ισχύος προσαρμόζεται έτσι ώστε να εγγυάται πολύ μικρές τιμές της πιθανότητας διακοπής λειτουργίας (υψηλή διαθεσιμότητα).

Στο σχήμα 6.5, απεικονίζεται η κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα για τα τρία προαναφερόμενα σχήματα ελέγχου ισχύος καθώς και για το σχήμα total channel inversion ως προς τον εκθέτη ποιότητας  $\theta$ , για διαφορετικές τιμές του BER. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το σχήμα total

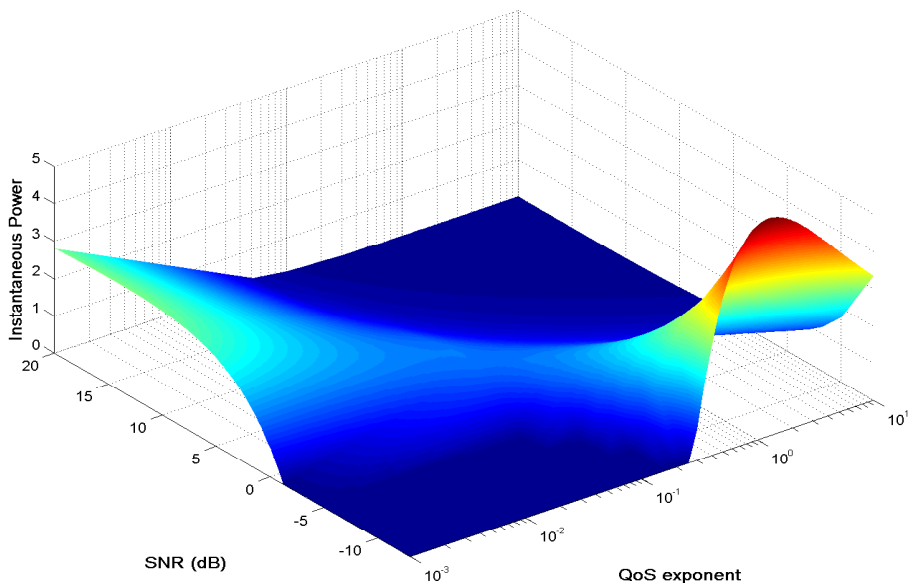


Σχήμα 6.5: Κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα ως προς τον εκθέτη QoS

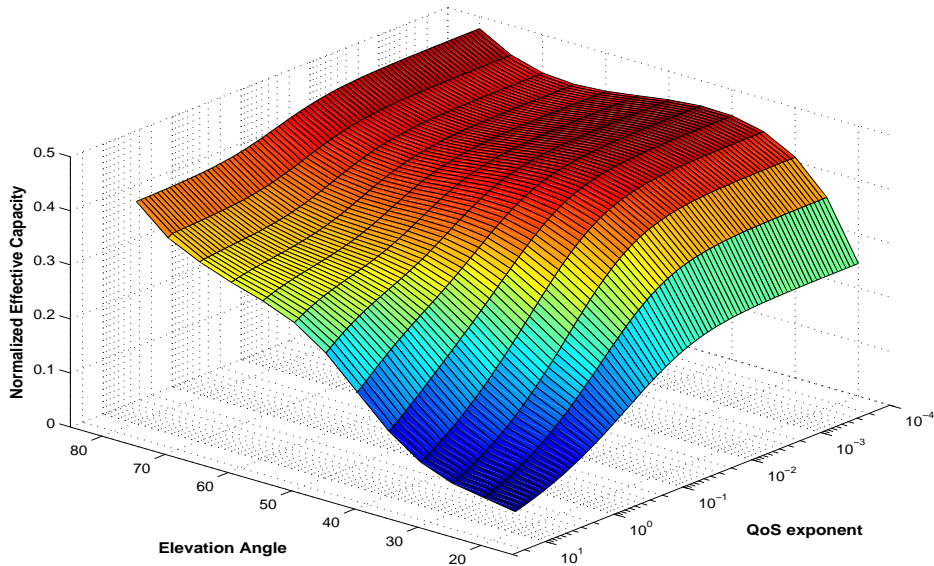
channel inversion οδηγεί σε χαμηλή ισχύ εκπομπής όταν το κανάλι είναι ευνοϊκό και σε υψηλή ισχύ εκπομπής όταν υπάρχουν δυσμενείς συνθήκες καναλιού, έτσι ώστε ο σηματοθορυβικός λόγος της ζεύξης να διατηρείται σταθερός (A. J. Goldsmith & Varaiya, 1997). Όπως παρατηρείται από το συγκεκριμένο διάγραμμα, όταν υπάρχουν αυστηρές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας, το βέλτιστο σχήμα συγκλίνει στον μηχανισμό total channel inversion σύμφωνα με το οποίο επιτυγχάνεται σταθερός ρυθμός μετάδοσης και επομένως σταθερή αποτελεσματική χωρητικότητα. Επιπλέον, όπως είναι αναμενόμενο, παρατηρείται ότι για μικρότερες τιμές BER, όλα τα σχήματα ελέγχου ισχύος οδηγούν σε μικρότερες τιμές αποτελεσματικής χωρητικότητας.

Στο σχήμα 6.6 απεικονίζεται η στιγμιαία ισχύς που εκχωρείται από τον προτεινόμενο μηχανισμό ως προς το σηματοθορυβικό λόγο SNR και τον εκθέτη ποιότητας  $\theta$ . Όπως παρατηρείται όταν το  $\theta \rightarrow 0$  (χαμηλές απαιτήσεις QoS), εκχωρείται περισσότερη ισχύς όταν υπάρχουν ευνοϊκές συνθήκες καναλιού, δηλαδή υψηλές τιμές SNR, έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η αποτελεσματική χωρητικότητα του συστήματος. Αντίθετα, όταν υπάρχουν αυστηρές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας ( $\theta \rightarrow \infty$ ), εκχωρείται περισσότερη ισχύς όταν υπάρχουν μη ευνοϊκές συνθήκες καναλιού (χαμηλό SNR) προκειμένου να εξασφαλίζονται οι απαιτήσεις ποιότητας που υπάρχουν.

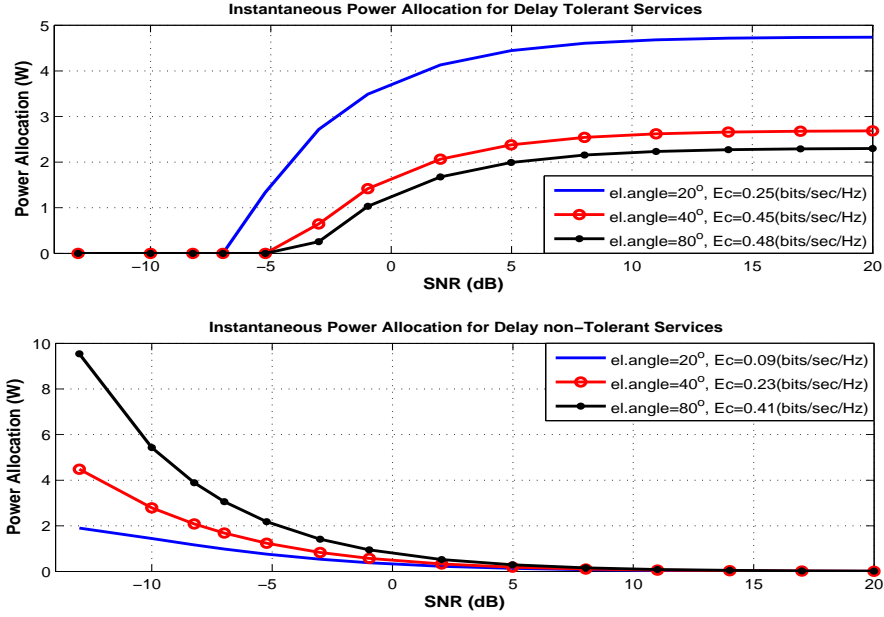
Στο σχήμα 6.7, μελετάται η ευαισθησία της κανονικοποιημένης χωρητικότητας ως προς τη γωνία ανύψωσης του δορυφόρου και τον εκθέτη QoS. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι εμπειρικές εκφράσεις για τις παραμέτρους του μοντέλου του δορυφορικού καναλιού συναρτήσεως της γωνίας ανύψωσης  $\phi$



Σχήμα 6.6: Μηχανισμός βέλτιστης εκχώρησης ισχύος ως προς το σηματοθορυβικό λόγο και τον εκθέτη QoS



Σχήμα 6.7: Κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα ως προς τη γωνία ανύψωσης και τον εκθέτη QoS



Σχήμα 6.8: Μηχανισμός βέλτιστης εκχώρησης ισχύος ως προς το σηματοθορυβικό λόγο

δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις (Abdi et al., 2003):

$$\begin{aligned}
 b_0(\varphi) &= -4.7943 \times 10^{-8} \varphi^3 + 5.5784 \times 10^{-6} \varphi^2 - 2.1344 \times 10^{-4} \varphi + 3.2710 \times 10^{-2} \\
 m(\varphi) &= 6.3739 \times 10^{-5} \varphi^3 + 5.8533 \times 10^{-4} \varphi^2 - 1.5973 \times 10^{-1} \varphi + 3.5156 \\
 \Omega(\varphi) &= 1.4428 \times 10^{-5} \varphi^3 - 2.3798 \times 10^{-3} \varphi^2 + 1.2702 \times 10^{-1} \varphi - 1.4864
 \end{aligned} \tag{6.26}$$

Παρατηρώντας το σχήμα 6.7, είναι εμφανές ότι για αυξανόμενες τιμές της γωνίας ανύψωσης, η αποτελεσματική χωρητικότητα αυξάνεται. Το συγκεκριμένο φαινόμενο μπορεί να αιτιολογηθεί δεδομένου ότι όσο αυξάνεται η γωνία ανύψωσης του δορυφόρου, βελτιώνονται ουσιαστικά οι συνθήκες του καναλιού, με αποτέλεσμα να βελτιώνεται ο εφικτός ρυθμός μετάδοσης και κατά συνέπεια και η αποτελεσματική χωρητικότητα. Ωστόσο, για χαμηλότερες τιμές του  $\theta$  ( $\theta < 10^{-3}(\text{bit}^{-1})$ ), υπάρχει μια περιοχή της γωνίας ανύψωσης ανάμεσα στις  $40^\circ$ - $65^\circ$  κατά την οποία η αποτελεσματική χωρητικότητα παραμένει σταθερή. Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι ενώ για χαμηλές τιμές της γωνίας ανύψωσης, η επίδραση του εκθέτη ποιότητας  $\theta$  είναι πολύ σημαντική, όσο αυξάνεται η γωνία ανύψωσης, η συγκεκριμένη επίδραση ελαττώνεται. Επομένως, ένα άμεσο συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η ευαισθησία του προτεινόμενου σχήματος όσον αφορά τον δείκτη ποιότητας υπηρεσίας εξαρτάται σημαντικά από τη γωνία ανύψωσης του δορυφόρου.

Τέλος, το σχήμα 6.8 απεικονίζει την βέλτιστη ισχύ ως προς το σηματοθορυβικό λόγο SNR για δύο διαφορετικές τιμές του εκθέτη QoS και για διαφορετικές τιμές της γωνίας ανύψωσης. Συγκεκριμένα, μελετάται η περίπτωση των υπηρεσιών που είναι ανεκτικές σε καθυστέρηση ( $\theta = 10^{-4}(\text{bit}^{-1})$ ) και η περίπτωση των υπηρεσιών που δεν είναι ανεκτικές σε καθυστέρηση ( $\theta = 1(\text{bit}^{-1})$ ). Επιπρόσθετα, στο σχήμα αναγράφονται οι τιμές της αποτελεσματικής χωρητικότητας που αντιστοιχούν σε κάθε καμπύλη. Όπως παρατηρείται από το συγκεκριμένο διάγραμμα, στην περίπτωση που υπάρχουν χαλαρές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας, το σχήμα βέλτιστης ισχύος εκχωρεί περισσότερη ισχύ σε υψηλότερες τιμές του σηματοθορυβικού λόγου προκειμένου να βελτιώσει το ρυθμό μετάδοσης και να

αυξήσει, με αυτόν τον τρόπο, την αποτελεσματική χωρητικότητα. Επιπλέον, για υπηρεσίες ανεκτικές σε καθυστέρηση, όταν η γωνία ανύψωσης του δορυφόρου αυξάνεται, ο αλγόριθμος εκχωρεί λιγότερη ισχύ, καθώς η αποτελεσματική χωρητικότητα βελτιώνεται ούτως ή άλλως λόγω της βελτίωσης του ρυθμού μετάδοσης. Από την άλλη μεριά, για υπηρεσίες μη ανεκτικές σε καθυστέρηση, ο προτεινόμενος αλγόριθμος εκχωρεί περισσότερη ισχύ σε υψηλότερες γωνίες ανύψωσης. Επίσης, παρατηρείται ότι στην περίπτωση των συγκεκριμένων υπηρεσιών, εκχωρείται περισσότερη ισχύς για μικρότερες τιμές του SNR έτσι ώστε να παρέχονται εγγυήσεις για τις αυστηρές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας.

Επομένως, το γενικό συμπέρασμα από την αριθμητική ανάλυση του προτεινόμενου μηχανισμού ελέγχου ισχύος είναι ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος υπερέχει σε σχέση με άλλα σχήματα εκχώρησης ισχύος, από πλευράς αποτελεσματικής χωρητικότητας. Παράλληλα, είναι εμφανές ότι τόσο ο μηχανισμός εκχώρησης, όσο και η αντίστοιχη αποτελεσματική χωρητικότητα εξαρτώνται σημαντικά από τη γωνία ανύψωσης του δορυφόρου καθώς και τις συνθήκες διάδοσης.





## Κεφάλαιο 7

# Έλεγχος ισχύος για παροχή QoS σε γνωστικά δίκτυα

### 7.1 Εισαγωγή

Οι νέες υπηρεσίες των μοντέρνων ασύρματων δικτύων οδηγούν αναπόφευκτα σε αυξανόμενη ζήτηση του εύρους ζώνης, καταλήγοντας στη συμφόρηση του συγκεκριμένου ραδιοπόρου. Ταυτόχρονα, τις περισσότερες φορές, το περιορισμένο εύρος ζώνης χρησιμοποιείται μη αποδοτικά, με αποτέλεσμα να καταλήγει σε χαμηλό βαθμό αξιοποίησης. Προκειμένου να ξεπεραστούν τα συγκεκριμένα προβλήματα, η ερευνητική κοινότητα εισήγαγε την έννοια της τεχνολογίας των γνωστικών συστημάτων. Όπως περιγράφεται αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 2, ένα γνωστικό σύστημα ορίζεται ως μια ασύρματη πλατφόρμα, η οποία μπορεί να επαναπροσδιορίσει τις λειτουργικές παραμέτρους της, μέσω μιας γνωστικής λειτουργίας, βάσει των μεταβαλλόμενων απαιτήσεων και συνθηκών του περιβάλλοντος. Κατά κανόνα, θεωρείται ότι με τη βοήθεια των γνωστικών συστημάτων, το αδειοδοτημένο εύρος ζώνης μπορεί να χρησιμοποιηθεί με έναν οπορτουριστικό τρόπο από τους μη αδειοδοτημένους χρήστες (γνωστούς και ως δευτερεύοντες χρήστες - secondary users), χωρίς να προκαλείται επιβλαβής παρεμβολή στους αδειοδοτημένους χρήστες (ή πρωτεύοντες χρήστες - primary users).

Πέρα όμως από τον αριθμό των τηλεπικοινωνιακών χρηστών και τους καταναλισκόμενους πόρους, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια ραγδαία αύξηση των απαιτήσεων ποιότητας των διαφόρων υπηρεσιών. Συγκεκριμένα, για εφαρμογές πραγματικού χρόνου, είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη η παροχή ποιότητας υπηρεσίας στην ανάλυση της επίδοσης του συστήματος. Επομένως, όπως περιγράφεται και στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι εμφανές ότι υπάρχει μια άμεση ανάγκη για νέα σχήματα διαχείρισης ραδιοπόρων, τα οποία να λαμβάνουν υπόψη τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας των χρηστών. Ο συνδυασμός αυτών των σχημάτων με την έννοια των γνωστικών συστημάτων θα οδηγήσει στην αποδοτικότερη χρησιμοποίηση του εύρους ζώνης, παρέχοντας ταυτόχρονα εγγυήσεις για την ικανοποίηση των απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας του κάθε χρήστη.

Όπως αναλύεται στο κεφάλαιο 2, ανάλογα με την προσέγγιση πρόσβασης στο εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται, οι δευτερεύοντες χρήστες είτε δεν επιτρέπεται να εκπέμπουν καθόλου όταν μεταδίδει δεδομένα ένας πρωτεύων χρήστης, είτε είναι υποχρεωμένοι να περιορίσουν την ισχύ μετάδοσης τους ώστε να μην υποβαθμίζουν την επικοινωνία του πρωτεύοντος συστήματος. Το γεγονός αυτό αποτελεί ένα επιπλέον εμπόδιο για την εξασφάλιση των απαιτήσεων QoS των δευτερευόντων χρηστών, συγκριτικά με τους πρωτεύοντες χρήστες, των οποίων η μετάδοση περιορίζεται κυρίως από φαινόμενα

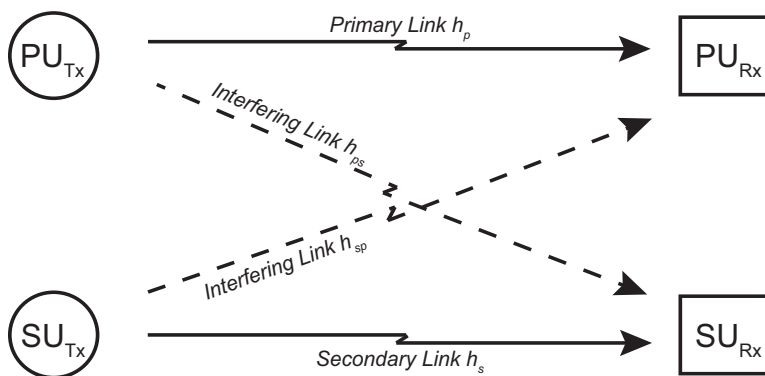
διάδοσης και περιορισμούς ενδοσυστημικής παρεμβολής. Συνεπώς, η παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε γνωστικά συστήματα και κυρίως στα δευτερεύοντα συστήματα αποτελεί μια δύσκολη διεργασία καθώς πρέπει να ληφθεί υπόψη η δραστηριότητα των πρωτεύοντων συστημάτων. Η ανάπτυξη καινοτόμων μηχανισμών διαχείρισης ραδιοπόρων για τους γνωστικούς χρήστες με γνώμονα την παροχή QoS αποτελεί ένα σημαντικό ερευνητικό θέμα, το οποίο πρόσφατα ξεκίνησε να προσελκύει το ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας.

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο εστιάζει σε μηχανισμούς ελέγχου ισχύος για παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε γνωστικά συστήματα, που βασίζονται στην έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας. Συγκεκριμένα, αρχικά παρουσιάζεται μια βιβλιογραφική επισκόπηση των υπάρχοντων τεχνικών διαχείρισης ραδιοπόρων για δευτερεύοντες χρήστες με συγκεκριμένες απαιτήσεις QoS, οι οποίες βασίζονται στη χρήση της θεωρίας στατιστικών εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας. Η συγκεκριμένη ενότητα του κεφαλαίου χωρίζεται σε δύο υποενότητες: το πρώτο μέρος αναφέρεται στα σχήματα που θεωρούν μια *underlay* προσέγγιση κατανομής εύρους ζώνης, ενώ στο δεύτερο μέρος, περιγράφονται οι μηχανισμοί διαχείρισης ραδιοπόρων για μια υβριδική προσέγγιση κατανομής εύρους ζώνης (*underlay/interweave*). Στη συνέχεια, αναλύεται το πρόβλημα ελέγχου ισχύος για δευτερεύοντες χρήστες με κεντρικό γνώμονα την παροχή ποιότητας υπηρεσίας τους και προτείνεται ένας αποδοτικός μηχανισμός λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση διάφορων περιορισμών παρεμβολής τόσο από την πλευρά του δευτερεύοντος, όσο και από την πλευρά του πρωτεύοντος χρήστη. Τέλος, παρουσιάζεται η καινοτόμος αρχιτεκτονική των γνωστικών δορυφορικών-επίγειων δικτύων και αναπτύσσεται ένας αλγόριθμος ελέγχου ισχύος για το δευτερεύον επίγειο σύστημα, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ποιότητα επικοινωνίας και των δύο δικτύων.

## 7.2 Επισκόπηση μηχανισμών ελέγχου ισχύος για παροχή QoS σε γνωστικά δίκτυα

Μια από τις βασικές προτεραιότητες των γνωστικών συστημάτων είναι η διασφάλιση της ανεπηρέαστης επικοινωνίας των πρωτεύοντων χρηστών, η οποία επιτυγχάνεται με την επιβολή συγκεκριμένων περιορισμών παρεμβολής στους δευτερεύοντες χρήστες. Παράλληλα όμως, είναι επιθυμητό οι δευτερεύοντες χρήστες να έχουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις τους για συγκεκριμένη ποιότητα υπηρεσίας. Οι προαναφερόμενες απαιτήσεις πρέπει να ικανοποιούνται λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη τις τυχαία χρονικά μεταβαλλόμενες συνθήκες του ασύρματου καναλιού, που οφείλονται είτε στην κινητικότητα των χρηστών, είτε στο μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Συνεπώς, είναι εμφανές ότι απαιτούνται καινοτόμοι μηχανισμοί διαχείρισης ραδιοπόρων που θα ικανοποιούν τις απαιτήσεις QoS των αδειοδοτημένων και μη αδειοδοτημένων χρηστών, δεδομένων των χρονικά μεταβαλλόμενων συνθηκών του καναλιού.

Στη συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζεται μια εκτενής επισκόπηση των σχημάτων διαχείρισης ραδιοπόρων για δευτερεύοντες χρήστες με περιορισμούς QoS, που προτείνονται στη βιβλιογραφία και τα οποία βασίζονται στη θεωρία της αποτελεσματικής χωρητικότητας που αναλύεται στο προηγούμενο κεφάλαιο. Συγκεκριμένα, το πρώτο μέρος περιγράφει τα προτεινόμενα σχήματα ελέγχου ισχύος για την *underlay* προσέγγιση ενός γνωστικού συστήματος, ενώ το δεύτερο μέρος εστιάζει σε μηχανισμούς εκχώρησης ισχύος, οι οποίοι θεωρούν μια υβριδική προσέγγιση κατανομής εύρους ζώνης (*interweave/ underlay*).



Σχήμα 7.1: Μοντέλο γνωστικού συστήματος υπό μελέτη

### 7.2.1 Σχήματα ελέγχου ισχύος για underlay γνωστικά συστήματα

Στη συγκεκριμένη υποενότητα, αρχικά περιγράφεται το βασικό μοντέλο ενός γνωστικού συστήματος που χρησιμοποιείται στα προβλήματα διαχείρισης ραδιοπόρων καθώς και το γενικό πρόβλημα ελέγχου ισχύος υπό συγκεκριμένους περιορισμούς QoS. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται μια εκτενής μελέτη των διαφόρων σχημάτων ελέγχου ισχύος στα οποία υποθέτονται διαφορετικοί περιορισμοί ισχύος και παρεμβολών και μελετάται η επίδραση της χρήσης προσαρμοστικής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (Adaptive Modulation and Coding - AMC), καθώς και διαφορετικού βαθμού γνώσης CSI.

#### Μοντέλο συστήματος - Ορισμός προβλήματος

Στο σχήμα 7.1 απεικονίζεται το μοντέλο συστήματος που χρησιμοποιείται συνήθως για τη μελέτη ενός γνωστικού συστήματος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, θεωρείται ότι ένα ζεύγος δευτερεύοντος πομπού ( $SU_{Tx}$ ) και δέκτη ( $SU_{Rx}$ ) συνυπάρχει με ένα ζεύγος πρωτεύοντος πομπού ( $PU_{Tx}$ ) και δέκτη ( $PU_{Rx}$ ). Στην underlay προσέγγιση, θεωρείται ότι ο δευτερεύων χρήστης μπορεί να εκπέμπει ταυτόχρονα με τον πρωτεύοντα χρήστη, εφόσον η ισχύς εκπομπής του περιορίζεται από ένα όριο παρεμβολής, έτσι ώστε να μην υποβαθμίζεται η επικοινωνία του πρωτεύοντος χρήστη. Ωστόσο, οι συγκεκριμένοι περιορισμοί, που επιβάλλονται προκειμένου να εξασφαλίσουν την αξιόπιστη επικοινωνία του πρωτεύοντος χρήστη, την ίδια στιγμή υποβαθμίζουν την ποιότητα υπηρεσίας των δευτερεύοντων χρηστών, καθώς δεν είναι πάντα επιτρεπτό να εκπέμπουν στο βέλτιστο επίπεδο ισχύος. Το γεγονός αυτό αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα στην παροχή εγγυήσεων QoS για την επικοινωνία των δευτερεύοντων χρηστών, το οποίο πρόσφατα έχει αρχίσει να απασχολεί την ερευνητική κοινότητα. Όπως προαναφέρεται, στα σχήματα διαχείρισης ραδιοπόρων που περιγράφονται στη συνέχεια, χρησιμοποιείται η έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επίδραση των απαιτήσεων QoS.

Συγκεκριμένα, στα σχήματα ελέγχου ισχύος που αναλύονται στη συνέχεια, θεωρείται ότι οι δευτερεύοντες χρήστες έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας. Επομένως, το πρόβλημα εκχώρησης ισχύος του δευτερεύοντος χρήστη για την underlay προσέγγιση μπορεί να εκφραστεί ως το ακόλουθο πρόβλημα μεγιστοποίησης της αποτελεσματικής χωρητικότητας του δευτερεύοντος χρήστη:

$$\max_{P_s} \left\{ -\frac{1}{\theta} \ln \left( \mathbf{E} \left[ e^{-\theta R(P_s)} \right] \right) \right\} \quad (7.1)$$

s.t Power and Interference Constraints

όπου  $P_s$  είναι η ισχύς εκπομπής του  $SU_{Tx}$ ,  $R(P_s)$  είναι η χωρητικότητα καναλιού της δευτερεύουσας ζεύξης και  $\theta$  είναι ο εκθέτης QoS του δευτερεύοντος χρήστη. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι περιορισμοί ισχύος αναφέρονται σε περιορισμούς ισχύος εκπομπής, οι οποίοι εξαρτώνται από τις ικανότητες της συσκευής και μπορούν να εκφραστούν είτε ως όριο μέγιστης στιγμιαίας ισχύος, είτε ως όριο μέγιστης μέσης ισχύος του δευτερεύοντος χρήστη. Από την άλλη μεριά, οι περιορισμοί παρεμβολής αναφέρονται στη μέγιστη επιτρεπόμενη παρεμβολή από το δευτερεύοντα χρήστη προκειμένου να εξασφαλισθεί η ανεπηρέαστη επικοινωνία του πρωτεύοντος χρήστη και μπορούν να εκφραστούν είτε ως όριο της μέγιστης στιγμιαίας λαμβανόμενης ισχύος, είτε ως όριο της μέγιστης μέσης λαμβανόμενης ισχύος στον πρωτεύοντα δέκτη. Στη βιβλιογραφία, έχουν προταθεί επιπλέον και άλλοι περιορισμοί για την εκπομπή του δευτερεύοντος χρήστη (όπως για παράδειγμα οι περιορισμοί για την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας του πρωτεύοντος χρήστη), αλλά οι περισσότεροι από αυτούς μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει των βασικών περιορισμών ισχύος παρεμβολής. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια βιβλιογραφική επισκόπηση των προτεινόμενων μηχανισμών εκχώρησης ισχύος, περιγράφοντας αρχικά τα σχήματα που θεωρούν πλήρη γνώση της κατάστασης των καναλιών (full CSI) και στη συνέχεια, τους μηχανισμούς που λαμβάνουν υπόψη την επίδραση της ατελούς γνώσης CSI.

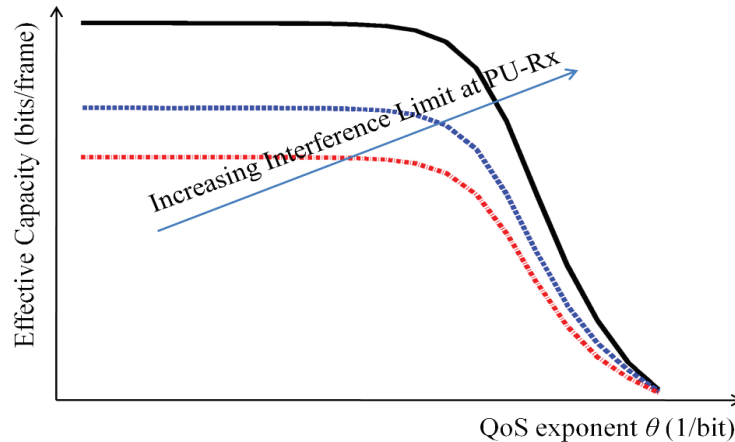
### Σχήματα εκχώρησης ισχύος με τέλεια γνώση CSI

Στη συγκεκριμένη υποενοότητα, παρουσιάζονται οι ερευνητικές εργασίες που έχουν ως βασική υπόθεση ότι οι δευτερεύοντες χρήστες έχουν πλήρη γνώση της κατάστασης καναλιού για όλες τις ζεύξεις. Επομένως, δεδομένου ότι οι δευτερεύοντες χρήστες γνωρίζουν το στιγμιαίο κέρδος για κάθε κανάλι, θεωρείται ότι είναι σε θέση να προσαρμόσουν την ισχύ τους βάσει αυτών των τιμών.

Στο (Ma et al., 2009), οι συγγραφείς αναλύουν το πρόβλημα του ελέγχου ισχύος και προτείνουν ένα διαστρωματικό σχήμα, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι δευτερεύοντες χρήστες έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις ποιότητας επικοινωνίας. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιούν το μοντέλο γνωστικού συστήματος που περιγράφεται στην προηγούμενη υποενοότητα και θεωρούν ότι η ισχύς μετάδοσης του δευτερεύοντος χρήστη περιορίζεται από ένα όριο μέσης ισχύος παρεμβολής. Επιπλέον, θεωρείται ότι τα κανάλια των χρηστών υπόκεινται σε Nakagami-m εξασθένιση. Βάσει αυτού του μοντέλου, οι συγγραφείς αναλύουν το πρόβλημα μεγιστοποίησης της αποτελεσματικής χωρητικότητας του δευτερεύοντος χρήστη, δεδομένων συγκεκριμένων μέσων και στιγμιαίων περιορισμών ισχύος μετάδοσης καθώς και του περιορισμού μέσης ισχύος παρεμβολής. Προκειμένου να μειωθεί η συνολική υπολογιστική πολυπλοκότητα που απαιτείται για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος, το πρόβλημα βελτιστοποίησης διαχωρίζεται σε δύο υποπροβλήματα και αναπτύσσεται ένας επαναληπτικός αλγόριθμος δεδομένων των περιορισμών ισχύος έτσι ώστε να βρεθεί η βέλτιστη λύση. Παράλληλα, στη συγκεκριμένη εργασία, οι συγγραφείς μελετάνε τη λύση του δυαδικού προβλήματος. Αναλυτικότερα, παρουσιάζουν την τεχνική ελέγχου ισχύος του δευτερεύοντος χρήστη που ελαχιστοποιεί τη μέση ισχύ παρεμβολής στον πρωτεύοντα δέκτη, παρέχοντας ταυτόχρονα εγγυήσεις QoS για τον δευτερεύοντα χρήστη, οι οποίες εκφράζονται ως ένας περιορισμός της αποτελεσματικής χωρητικότητας του. Με τον τρόπο αυτό, υπολογίζονται τα όρια της μέσης ισχύος παρεμβολής για συγκεκριμένες

απαιτήσεις QoS των δευτερευόντων χρηστών. Κάποιες βασικές παρατηρήσεις από την αριθμητική ανάλυση είναι ότι η αποτελεσματική χωρητικότητα αποτελεί μια φθίνουσα συνάρτηση του εκθέτη QoS  $\theta$  και ότι η τεχνική ελέγχου ισχύος για λιγότερο αυστηρούς περιορισμούς παρεμβολής οδηγεί σε καλύτερες τιμές από πλευράς αποτελεσματικής χωρητικότητας. Επιπλέον, αποδεικνύεται ότι η μέση ισχύς παρεμβολής αυξάνεται με την αύξηση του κατωφλίου αποτελεσματικής χωρητικότητας. Η παρατήρηση αυτή μπορεί να δικαιολογηθεί δεδομένου ότι για να βελτιώσει ο δευτερεύων χρήστης την αποτελεσματική του χωρητικότητα, θα πρέπει να εκπέμψει με μεγαλύτερη ισχύ, καταλήγοντας, με αυτόν τον τρόπο, να προκαλεί μεγαλύτερη παρεμβολή στον πρωτεύοντα χρήστη. Με παρόμοιο τρόπο, αποδεικνύεται ότι η μέση ισχύς παρεμβολής αυξάνεται καθώς οι απαιτήσεις QoS γίνονται πιο αυστηρές.

Ένα διαφορετικό σχήμα εκχώρησης ισχύος για δευτερεύοντες χρήστες με συγκεκριμένες απαιτήσεις ποιότητας επικοινωνίας σε underlay γνωστικά συστήματα παρουσιάζεται επίσης στο (Musa-vian & Aïssa, 2010). Σε αυτή την ερευνητική εργασία, υποθέεται ότι ένας δευτερεύων χρήστης έχει πρόσβαση στο εύρος ζώνης που καταλαμβάνεται από έναν πρωτεύοντα χρήστη, εφόσον τηρείται ένας περιορισμός μέσης ισχύος παρεμβολής στον πρωτεύοντα δέκτη. Με αυτόν τον τρόπο, υπολογίζεται η τεχνική βέλτιστης εκχώρησης ισχύος που μεγιστοποιεί την αποτελεσματική χωρητικότητα του δευτερεύοντος χρήστη και παρέχονται εκφράσεις κλειστού τύπου για τη βέλτιστη ισχύ καθώς και την αντίστοιχη αποτελεσματική χωρητικότητα. Επιπλέον, οι συγγραφείς παρουσιάζουν εκφράσεις κλειστού τύπου για την ισχύ που καταναλώνει ο δευτερεύων πομπός προκειμένου να πετύχει τη βέλτιστη αποτελεσματική χωρητικότητα. Για λόγους σύγκρισης με το προτεινόμενο σχήμα, θεωρούνται επιπλέον δύο ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές ελέγχου ισχύος: μια τεχνική που μεγιστοποιεί τη χωρητικότητα του καναλιού και η γνωστή τεχνική channel inversion που οδηγεί σε σταθερό ρυθμό μετάδοσης, ενώ υπολογίζονται οι αντίστοιχες εκφράσεις για την αποτελεσματική χωρητικότητα της κάθε τεχνικής. Όπως είναι εμφανές από την αριθμητική ανάλυση, ο προτεινόμενος μηχανισμός ελέγχου ισχύος υπερέρχει σε σχέση με τους δύο άλλους μηχανισμούς από πλευράς αποτελεσματικής χωρητικότητας. Επιπρόσθετα, μια άλλη ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι η κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα του δευτερεύοντος χρήστη αυξάνεται καθώς αυξάνεται η παράμετρος Nakagami ( $m$ ) του καναλιού  $SU_{Tx}-SU_{Rx}$ . Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη παράμετρος αντιστοιχεί στο λόγο της ισχύος του σήματος Line of Sight (LoS) προς την ισχύ της πολυδιαδρομικής συνιστώσας και ουσιαστικά εκφράζει τη δριμύτητα της εξασθένησης για το συγκεκριμένο κανάλι. Τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης δείχνουν επίσης ότι η κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα φθίνει σημαντικά όταν η παράμετρος εξασθένισης  $m$  της ζεύξης  $SU_{Tx}-PU_{Rx}$  αυξάνεται, δηλαδή, όταν βελτιώνεται το κανάλι της ζεύξης παρεμβολής. Αυτή η παρατήρηση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ζεύξη παρεμβολής έχει πολύ μεγαλύτερη επίδραση στην εκχώρηση βέλτιστης ισχύος και στην αντίστοιχη αποτελεσματική χωρητικότητα σε σχέση με τη ζεύξη του δευτερεύοντος χρήστη ( $h_s$ ). Μια άλλη βασική παρατήρηση, η οποία εμφανίζεται επίσης στο (Tang & Zhang, 2007a), είναι ότι η αποτελεσματική χωρητικότητα μειώνεται για αύξουσες τιμές του εκθέτη QoS, το οποίο σημαίνει ότι το κανάλι μπορεί να υποστηρίξει μόνο χαμηλότερες τιμές ρυθμαπόδοσης όταν οι περιορισμοί ποιότητας γίνονται πιο αυστηροί. Στο σχήμα 7.2, απεικονίζεται η συμπεριφορά της αποτελεσματικής χωρητικότητας ως προς τον εκθέτη QoS για διάφορες τιμές του ορίου παρεμβολής στο δέκτη του πρωτεύοντος χρήστη. Όπως είναι εμφανές, η αύξηση του ορίου παρεμβολής οδηγεί σε υψηλότερες τιμές της αποτελεσματικής χωρητικότητας. Αυτή η παρατήρηση μπορεί να δικαιολογηθεί δεδομένου ότι για χαλαρούς περιορισμούς παρεμβολής, ο δευτερεύων χρήστης μπορεί να εκπέμψει σε υψηλότερα επίπεδα ισχύος και με αυτόν τον τρόπο να αυξήσει την αποτελεσματική



Σχήμα 7.2: Αποτελεσματική χωρητικότητα ως προς τον εκθέτη QoS για διαφορετικά όρια παρεμβολής

χωρητικότητας του.

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση των σχημάτων διαχείρισης ραδιοπύρων είναι η χρήση τεχνικών ACM. Προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση του συγκεκριμένου παράγοντα, οι συγγραφείς στο (Musavian et al., 2011) προτείνουν ένα σχήμα μεταβλητού ρυθμού, μεταβλητής ισχύος M-QAM, το οποίο χρησιμοποιείται δεδομένων συγκεκριμένων περιορισμών καθυστέρησης σε underlay γνωστικά συστήματα. Σε αυτήν την προσέγγιση, θεωρείται ότι πρέπει να ικανοποιούνται συγκεκριμένοι περιορισμοί για την πιθανότητα διακοπής υπηρεσίας (outage probability) του πρωτεύοντος χρήστη ανεξάρτητα από την ύπαρξη των δευτερευόντων χρηστών στο δίκτυο. Συνεπώς, η ισχύς του δευτερεύοντος πομπού πρέπει να περιοριστεί έτσι ώστε ο πρωτεύων χρήστης να μεταδίδει δεδομένα με έναν ελάχιστο ρυθμό, για ένα δεδομένο ποσοστό του χρόνου. Επιπλέον, θεωρείται ότι ο πρωτεύων χρήστης μπορεί να επιλέξει την ισχύ μετάδοσης του χωρίς να λαμβάνει υπόψη την ύπαρξη του δευτερεύοντος χρήστη στο δίκτυο, είτε σύμφωνα με ένα σχήμα σταθερής ισχύος εκπομπής, είτε σύμφωνα με ένα βέλτιστο σχήμα ισχύος που μεγιστοποιεί τη χωρητικότητα του καναλιού. Οι συγγραφείς μετατρέπουν τους περιορισμούς πιθανότητας διακοπής λειτουργίας σε περιορισμούς είτε μέσης, είτε στιγμιαίας ισχύος παρεμβολής για κανάλια εξασθένησης Rayleigh ή Nakagami-m, αντίστοιχα, και αναλύουν τη στρατηγική ισχύος εκπομπής του δευτερεύοντος χρήστη. Δεδομένων των περιορισμών ισχύος παρεμβολής, υπολογίζεται η μέγιστη ρυθμαπόδοση του καναλιού του δευτερεύοντος χρήστη, υπό συγκεκριμένους περιορισμούς ποιότητας υπηρεσίας, σε όρους αποτελεσματικής χωρητικότητας. Συγκεκριμένα, οι συγγραφείς λύνουν το πρόβλημα βελτιστοποίησης θεωρώντας ότι ο δευτερεύων χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει διαμόρφωση M-QAM με συνεχείς ή διακριτούς αστερισμούς και καθορίζουν τις στρατηγικές βέλτιστης ισχύος που μεγιστοποιούν την αποτελεσματική χωρητικότητα για τα δεδομένα σχήματα διαμόρφωσης, τόσο για μέσους, όσο και για στιγμιαίους περιορισμούς παρεμβολής. Επιπρόσθετα, παρέχονται εκφράσεις κλειστού τύπου για τη βέλτιστη αποτελεσματική χωρητικότητα και την αντίστοιχη ισχύ. Μια πρώτη παρατήρηση από την αριθμητική ανάλυση είναι ότι ο περιορισμός ισχύος παρεμβολής, που υπάρχει όταν ο πρωτεύων χρήστης χρησιμοποιεί τεχνικές εκχώρησης σταθερής ισχύος, είναι πολύ αυστηρότερος από τον αντίστοιχο περιορισμό όταν ο πρωτεύων χρήστης χρησιμοποιεί τη βέλτιστη κατανομή ισχύος. Επιπρόσθετα, είναι εμφανές ότι η αποτελεσματική χωρητικότητα για περιορισμούς μέσης ισχύος είναι σημαντικά υψηλότερη σε σχέση

με την περίπτωση των περιορισμών στιγμιαίας ισχύος καθώς στην πρώτη περίπτωση, ο δευτερεύων χρήστης είναι πιο ευέλικτος να εκχωρήσει την ισχύ του όπως επιθυμεί συγκριτικά με την περίπτωση των αυστηρών στιγμιαίων περιορισμών. Μια άλλη ενδιαφέρουσα παρατήρηση από την αριθμητική ανάλυση είναι ότι η αποτελεσματική χωρητικότητα που επιτυγχάνεται με τη χρήση διακριτού M-QAM είναι μικρότερη από αυτή που επιτυγχάνεται με τη χρήση συνεχούς M-QAM. Ωστόσο, η απώλεια σε όρους αποτελεσματικής χωρητικότητας είναι μικρή συγκρινόμενη με την απώλεια που υπάρχει συγκρίνοντας την βέλτιστη περίπτωση (χωρίς περιορισμό διαμόρφωσης) και την περίπτωση της συνεχούς διαμόρφωσης. Τέλος, όπως αποδεικνύεται στην αριθμητική ανάλυση, η αποτελεσματική χωρητικότητα φθίνει σημαντικά, όταν ο ελάχιστος ρυθμός που απαιτείται από τον πρωτεύοντα χρήστη αυξάνεται, ή μειώνεται η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας, κάτι το οποίο μπορεί να δικαιολογηθεί θεωρώντας ότι και οι δύο αλλαγές οδηγούν ουσιαστικά σε πιο αυστηρούς περιορισμούς παρεμβολής.

### Σχήματα εκχώρησης ισχύος με ατελή γνώση CSI

Στην περίπτωση των γνωστικών συστημάτων όπου οι λειτουργικές παράμετροι πρέπει να επαυπροσδιορίζονται με τις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις και συνθήκες του περιβάλλοντος, η εκτίμηση και η γνώση των συνθηκών καναλιού αποτελούν ένα σημαντικό κομμάτι της αποδοτικής λειτουργίας τους. Οι ερευνητικές εργασίες που παρουσιάζονται στην προηγούμενη υποενότητα, έχουν σαν βασική υπόθεση την πλήρη γνώση του CSI κατά τη σχεδίαση του προβλήματος εκχώρησης ραδιοπόρων. Ωστόσο, στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες, η κατάσταση καναλιού μεταβάλλεται συνεχώς χρονικά με αποτέλεσμα η εκτίμηση των συνιστωσών του καναλιού να αποτελεί μια δύσκολη διεργασία. Σε γενικές γραμμές, όταν οι συνθήκες καναλιού δεν είναι γνωστές από πριν, τα ασύρματα συστήματα χρησιμοποιούν πιλοτικά σήματα για να εκτιμήσουν το κανάλι. Παρόλα αυτά, πρακτικά, η πλήρης γνώση CSI δεν είναι εφικτή λόγω των σφαλμάτων εκτίμησης και των πιθανών καθυστερήσεων που μπορεί να υπάρχουν. Σε περίπτωση ατελούς γνώσης CSI, η ακριβής τιμή της αντίστοιχης συνιστώσας καναλιού  $h$  μπορεί να εκφραστεί σαν άθροισμα της εκτίμησης του καναλιού  $\hat{h}$  και του σφάλματος εκτίμησης  $\tilde{h}$ , ως εξής:

$$h = \hat{h} + \tilde{h} \quad (7.2)$$

Η εκτίμηση καναλιού μπορεί να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας έναν εκτιμητή ελαχίστου μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Minimum Mean Square Error-MMSE). Το σφάλμα θεωρείται ότι ακολουθεί μια γνωστή κατανομή (γκαουσιανή μηδενικού μέσου) με γνωστή διακύμανση στον πομπό και το δέκτη, η οποία απεικονίζει την ποιότητα της εκτίμησης καναλιού και αντιμετωπίζεται σαν μια άλλη πηγή γκαουσιανού θορύβου.

Η ανάλυση της ατελούς γνώσης CSI και οι επιδράσεις της στα σχήματα εκχώρησης ραδιοπόρων αποτελεί ένα ενδιαφέρον πρόβλημα. Στα (Musavian & Aïssa, 2009), (Rezki & Alouini, 2012), οι συγγραφείς θεωρούν ένα γνωστικό σύστημα, όπου ο δευτερεύων χρήστης έχει ατελή γνώση για τη ζεύξη ανάμεσα στον δευτερεύοντα πομπό και τον πρωτεύοντα δέκτη και αναλύουν το πρόβλημα της εκχώρησης ραδιοπόρων για διαφορετικούς περιορισμούς ισχύος παρεμβολής. Επιπλέον, περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζονται η βέλτιστη εκχώρηση ισχύος και η αντίστοιχη εργοδική χωρητικότητα από τα σφάλματα εκτίμησης καναλιού, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι και οι δύο μετρικές μειώνονται καθώς αυξάνεται το σφάλμα εκτίμησης καναλιού. Ωστόσο, και στις δύο ερευνητικές εργασίες, θεωρείται ότι οι δευτερεύοντες χρήστες δεν έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις QoS.

Η επίδραση της αβεβαιότητας καναλιού σε σχήματα διαχείρισης ραδιοπόρων που λαμβάνουν υπόψη την ποιότητα επικοινωνίας αποτελεί ένα θέμα το οποίο άρχισε πρόσφατα να μελετάται. Μια από

τις πρώτες μελέτες στις οποίες λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της ατελούς γνώσης CSI στο πρόβλημα του ελέγχου ισχύος με περιορισμούς QoS εμφανίζεται στο (Xie & Guo, 2011). Στόχος της συγκεκριμένης εργασίας είναι η εύρεση της βέλτιστης στρατηγικής εκχώρησης ισχύος του δευτερεύοντος χρήστη που μεγιστοποιεί την αποτελεσματική του χωρητικότητα υπό τον περιορισμό της μέσης ισχύος παρεμβολής και υπό την υπόθεση της ατελούς πληροφόρησης καναλιού. Συγκεκριμένα, οι συγγραφείς αναλύουν το κέρδος αποτελεσματικής χωρητικότητας ενός underlay γνωστικού συστήματος στο οποίο θεωρείται ότι ο δευτερεύων χρήστης έχει μερική γνώση του CSI για τη ζεύξη ανάμεσα στον  $SU_{Tx}$  και στον  $PU_{Rx}$ , ενώ θεωρείται πλήρης γνώση του CSI για τις υπόλοιπες ζεύξεις. Επομένως, το κέρδος ισχύος καναλιού της ζεύξης παρεμβολής μπορεί να εκτιμηθεί ατελώς παρέχοντας ένα σφάλμα εκτίμησης καναλιού με γνωστή διακύμανση. Οι συγγραφείς παρουσιάζουν, επιπλέον, εκφράσεις για την αποτελεσματική χωρητικότητα και τη μέση καταναλισκόμενη ισχύ που αντιστοιχούν στην περίπτωση της βέλτιστης εκχώρησης ισχύος ως προς τη διακύμανση του σφάλματος εκτίμησης. Ένα σημαντικό συμπέρασμα από τα αποτελέσματα αυτά είναι ότι η βέλτιστη αποτελεσματική χωρητικότητα, καθώς και η απαιτούμενη ισχύς αυξάνονται, καθώς μειώνεται η διακύμανση του σφάλματος εκτίμησης του καναλιού.

### 7.2.2 Σχήματα ελέγχου ισχύος για υβριδικά γνωστικά συστήματα

Στην προηγούμενη υποενότητα μελετάται η underlay προσέγγιση γνωστικών συστημάτων σύμφωνα με την οποία οι δευτερεύοντες χρήστες εκπέμπουν ταυτόχρονα με τους πρωτεύοντες, οι οποίοι θεωρούνται συνεχώς ενεργοί. Αντίθετα, σε αυτή την υποενότητα, μελετάται μια υβριδική underlay/interweave προσέγγιση σύμφωνα με την οποία οι δευτερεύοντες χρήστες εκπέμπουν με διαφορετική ισχύ ανάλογα αν είναι ενεργοί οι πρωτεύοντες χρήστες ή όχι. Επομένως, σε αυτή την περίπτωση, οι δευτερεύοντες χρήστες, προκειμένου να προσαρμόσουν την ισχύ τους, πρέπει πρώτα να ανιχνεύσουν τις περιόδους δραστηριότητας των πρωτευόντων χρηστών, χρησιμοποιώντας κατάλληλες μεθόδους ανίχνευσης που βασίζονται στον υπολογισμό της λαμβανόμενης ενέργειας. Αυτή η προσέγγιση θεωρείται ως μια υβριδική προσέγγιση γιατί ο δευτερεύων χρήστης μπορεί να επικοινωνεί με ή χωρίς την παρουσία του πρωτεύοντος χρήστη. Το μοντέλο συστήματος είναι το ίδιο με το μοντέλο της προηγούμενης ενότητας στο οποίο ένας δευτερεύων πομπός προσπαθεί να στείλει πληροφορία σε ένα δευτερεύοντα δέκτη συνυπάρχοντας ταυτόχρονα με έναν πρωτεύοντα χρήστη. Ωστόσο, σε αυτήν την περίπτωση θεωρείται ότι ο δευτερεύων χρήστης αρχικά υλοποιεί μια διεργασία ανίχνευσης του καναλιού (channel sensing) πριν μεταδώσει δεδομένα και στη συνέχεια, βάσει της δραστηριότητας του πρωτεύοντος χρήστη, ο δευτερεύων πομπός επιλέγει την ισχύ και το ρυθμό μετάδοσης του. Στην υπόλοιπη υποενότητα, περιγράφονται συνοπτικά τα σχήματα εκχώρησης ισχύος που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία.

Στο (Akin & Gursoy, 2010), μελετάται η απόδοση των γνωστικών συστημάτων για την υβριδική προσέγγιση κατανομής εύρους ζώνης θεωρώντας ότι οι δευτερεύοντες χρήστες έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις QoS. Συγκεκριμένα, αναλύεται η αποτελεσματική χωρητικότητα των καναλιών προκειμένου να αναγνωριστούν τα επίπεδα απόδοσης και να καθοριστεί η επίδραση των παραμέτρων ανίχνευσης καναλιού στη ρυθμαπόδοση που επιτυγχάνεται παρουσία των υπαρχόντων περιορισμών QoS. Όπως αναφέρθηκε ήδη, στο συγκεκριμένο γνωστικό μοντέλο, οι δευτερεύοντες χρήστες ανιχνεύουν αρχικά το κανάλι και στη συνέχεια, ο δευτερεύων πομπός επιλέγει το επίπεδο ισχύος μετάδοσης ανάλογα με τα αποτελέσματα της ανίχνευσης. Δεδομένου ότι οι στρατηγικές μετάδοσης των πρωτευόντων χρηστών δεν είναι γνωστές, χρησιμοποιούνται μέθοδοι ανίχνευσης που βασίζονται στη λαμβανόμενη ενέργεια.



Επομένως, η διαδικασία παρακολούθησης καναλιού μπορεί να σχεδιαστεί σαν ένα πρόβλημα υποθέσεων (hypothesis testing problem) ανάμεσα στο θόρυβο και το σήμα του πρωτεύοντος μαζί με το θόρυβο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, χρησιμοποιείται ο ανιχνευτής Neyman-Pearson για ένα δεδομένο κατώφλι ανίχνευσης και υπολογίζονται οι πιθανότητες λανθασμένης ανίχνευσης. Επιπλέον, οι συγγραφείς προτείνουν ένα μοντέλο μετάβασης κατάστασης ορίζοντας τις πιθανότητες μετάβασης για τις δύο ακόλουθες περιπτώσεις: την περίπτωση τέλει CSI μόνο στο δευτερεύοντα δέκτη και την περίπτωση τέλει CSI τόσο στον δευτερεύοντα δέκτη, όσο και στον δευτερεύοντα πομπό. Στην πρώτη περίπτωση, ο δευτερεύων χρήστης μεταδίδει τα δεδομένα του χρησιμοποιώντας δύο σταθερούς ρυθμούς μετάδοσης χωρίς να γνωρίζει τις συνθήκες καναλιού, ανάλογα με την εκτιμώμενη δραστηριότητα του πρωτεύοντος χρήστη, και υπολογίζεται η κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα. Όσον αφορά τη δεύτερη περίπτωση, ο δευτερεύων πομπός προσαρμόζει την ισχύ του βάσει των συνθηκών του καναλιού και ανάλογα με την εκτιμώμενη δραστηριότητα των πρωτεύοντων χρηστών. Η κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα και οι τεχνικές βέλτιστης ισχύος υπολογίζονται υπό συγκεκριμένους περιορισμούς μέσης ισχύος για τις περιπτώσεις κατειλημμένου και αδρανούς καναλιού. Επιπλέον, παρέχονται αποτελέσματα προσομοίωσης για τρία διαφορετικά σχήματα μετάδοσης: ένα σχήμα σταθερής ισχύος/σταθερού ρυθμού, ένα σχήμα σταθερής ισχύος/μεταβλητού ρυθμού και ένα σχήμα μεταβλητής ισχύος/μεταβλητού ρυθμού. Όπως είναι εμφανές από την αριθμητική ανάλυση, η αποτελεσματική χωρητικότητα αυξάνεται, καθώς μειώνεται η πιθανότητα λανθασμένης εκτίμησης. Ταυτόχρονα, καθώς αυξάνεται το κατώφλι ανίχνευσης ή η διάρκεια της λειτουργίας ανίχνευσης του καναλιού, οι πιθανότητες για λανθασμένη ανίχνευση μειώνονται. Επομένως, η αύξηση του κατωφλίου ανίχνευσης οδηγεί επίσης σε υψηλότερες τιμές αποτελεσματικής χωρητικότητας καθώς ο δευτερεύων χρήστης υποθέτει εσφαλμένα ότι το κανάλι είναι αδρανές και εκπέμπει σε υψηλότερα επίπεδα ισχύος. Αντίθετα, η αύξηση της διάρκειας της ανίχνευσης καναλιού καταλήγει σε μείωση της αποτελεσματικής χωρητικότητας, λόγω του γεγονότος ότι υπάρχει λιγότερος διαθέσιμος χρόνος για τη μετάδοση των δεδομένων του δευτερεύοντος χρήστη. Επιπλέον, παρατηρείται ότι η μείωση των πιθανοτήτων ανίχνευσης έχει διαφορετικό αποτέλεσμα στα σχήματα σταθερού ρυθμού και μεταβλητού ρυθμού. Συγκεκριμένα, τα σχήματα μεταβλητού ρυθμού υπερέχουν σε σχέση με τις μεθόδους μετάδοσης σταθερού ρυθμού, αν οι πιθανότητες ανίχνευσης είναι αρκετά υψηλές, ενώ σε διαφορετική περίπτωση προτιμάται η μετάδοση σταθερής ισχύος/σταθερού ρυθμού. Επιπλέον, συγκρίνοντας το σχήμα μεταβλητού ρυθμού/μεταβλητής ισχύος με το σχήμα μεταβλητού ρυθμού/σταθερής ισχύος, είναι εμφανές ότι το πρώτο σχήμα υπερέχει πάντα σε σχέση με το δεύτερο. Τέλος, μια σημαντική παρατήρηση είναι ότι τόσο η αποτελεσματική χωρητικότητα, όσο και ο ρυθμός μετάδοσης μειώνονται με την αύξηση του εκθέτη QoS και τα κέρδη από την προσαρμογή του ρυθμού και της ισχύος μειώνονται επίσης με την αύξηση του  $\theta$ .

Οι ίδιοι συγγραφείς στο (Akin & Gursoy, 2011) αναλύουν την αποτελεσματική χωρητικότητα ενός γνωστικού δικτύου για την υβριδική προσέγγιση, θεωρώντας περιορισμούς QoS και ισχύος μετάδοσης και λαμβάνοντας επίσης υπόψη την επίδραση της ατελούς γνώσης CSI. Σε αυτή την εργασία, οι δευτερεύοντες χρήστες αρχικά παρακολουθούν το κανάλι για να ανιχνεύσουν τη δραστηριότητα των πρωτεύοντων χρηστών και στη συνέχεια βάσει των αποτελεσμάτων, ο δευτερεύων πομπός επιλέγει το πιλοτικό σύμβολο καθώς και τη στρατηγική ισχύος μετάδοσης. Το πιλοτικό σύμβολο χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των συνιστωσών των καναλιών, χρησιμοποιώντας διαφορετικές μεθόδους εκτίμησης ελαχίστου μέσου τετραγωνικού σφάλματος (MMSE). Ωστόσο, στη φάση της ανίχνευσης και εκτίμησης του καναλιού, υπάρχει πιθανότητα να ληφθούν λανθασμένες αποφάσεις με αποτέλεσμα η αβεβαιότητα του καναλιού να μην περιορίζεται πλήρως. Οι συγγραφείς θεωρούν ότι ο δευτερεύων πομποδέκτης

δεν γνωρίζει τις συνθήκες καναλιού και επομένως ο πομπός στέλνει τα δεδομένα με σταθερό επίπεδο μέσης ισχύος και ρυθμού ανάλογα με το αν το πρωτεύον κανάλι εκτιμάται ως αδρανές ή όχι. Στη φάση μετάδοσης δεδομένων, ανάλογα με τις ικανότητες των δευτερευόντων πομπών και τους υπάρχοντες ενεργειακούς πόρους, μπορεί να υπάρχουν μέγιστοι περιορισμοί στη μέση ισχύ μετάδοσης καθώς και ένας επιπλέον περιορισμός για την παρεμβολή στον πρωτεύοντα δέκτη. Επιπλέον, τίθενται στατιστικά όρια στο μήκος του buffer για να λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί QoS των δευτερευόντων χρηστών. Με αυτόν τον τρόπο, προτείνεται ένα μοντέλο μετάβασης λαμβάνοντας υπόψη την αξιοπιστία των μεταδόσεων, τα αποτελέσματα από τη διαδικασία της παρακολούθησης καναλιού και την εξέλιξη της δραστηριότητας των πρωτευόντων χρηστών, η οποία μοντελοποιείται σαν μια μαρκοβιανή διαδικασία δύο καταστάσεων. Δεδομένης της δυσκολίας που εμφανίζει ο χαρακτηρισμός της χωρητικότητας καναλιού παρουσία της αβεβαιότητας καναλιού, οι συγγραφείς παρουσιάζουν τις εκφράσεις του εφικτού ρυθμού ως κατώτατα όρια για τις στιγμιαίες χωρητικότητες καναλιών, θεωρώντας τα αποτελέσματα της εκτίμησης καναλιού και την παρεμβολή που προκαλείται από τους πρωτεύοντες χρήστες. Επιπλέον, υπολογίζεται η μέγιστη ρυθμαπόδοση υπό στατιστικούς περιορισμούς QoS, βρίσκοντας την κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα του γνωστικού συστήματος για το θεωρούμενο μοντέλο μετάβασης. Στην αριθμητική ανάλυση, παρουσιάζονται αποτελέσματα για τις τεχνικές ισχύος και ρυθμού, καθώς και την επίδραση διαφόρων παραμέτρων όπως οι πιθανότητες λανθασμένης ανίχνευσης και των περιορισμών ισχύος στην απόδοση του συστήματος. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι η αποτελεσματική χωρητικότητα αυξάνεται, καθώς αυξάνεται το όριο παρεμβολής στον πρωτεύοντα δέκτη. Επιπλέον, αποδεικνύεται ότι ο βέλτιστος ρυθμός μετάδοσης του δευτερεύοντος χρήστη είναι μεγαλύτερος όταν το κανάλι είναι αδρανές από ότι στην περίπτωση που το κανάλι είναι απασχολημένο.

### 7.3 Προτεινόμενος μηχανισμός ελέγχου ισχύος για γνωστικά δίκτυα

Από την επισκόπηση των υπάρχοντων μηχανισμών διαχείρισης ραδιοπόρων για παροχή QoS σε γνωστικά δίκτυα, που παρουσιάζεται στην προηγούμενη ενότητα, είναι εμφανής η μεγάλη επίδραση των απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας στην απόδοση των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Προκειμένου να αναλυθεί περαιτέρω η συγκεκριμένη επίδραση, σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζεται μια ενοποιημένη προσέγγιση του προβλήματος ελέγχου ισχύος των δευτερευόντων χρηστών και προτείνεται ένας βελτιωμένος μηχανισμός εκχώρησης ισχύος με σκοπό την παροχή ποιότητας υπηρεσίας. Συγκεκριμένα, προτείνεται ένα καινοτόμο σχήμα ελέγχου ισχύος το οποίο μεγιστοποιεί την αποτελεσματική χωρητικότητα του δευτερεύοντος χρήστη, ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζει την ποιότητα επικοινωνίας του πρωτεύοντος χρήστη μέσω συγκεκριμένων περιορισμών παρεμβολής. Το προτεινόμενο σχήμα εκχώρησης ισχύος εκμεταλλεύεται τα συμβάντα διακοπής λειτουργίας (outage events) του πρωτεύοντος χρήστη ενώ ταυτόχρονα, λαμβάνει υπόψη την παρεμβολή του πρωτεύοντος χρήστη στο δευτερεύοντα χρήστη, έτσι ώστε να μελετάται ένα πιο ρεαλιστικό σενάριο. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η ποιότητα επικοινωνίας του πρωτεύοντος χρήστη, θεωρούνται δύο είδη περιορισμών: ο κλασικός περιορισμός ισχύος παρεμβολής και ένας καινοτόμος περιορισμός του λόγου σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο (SINR). Συγκεκριμένα, ο πρώτος περιορισμός αναφέρεται στην κλασική τεχνική των underlay συστημάτων που περιορίζει την ισχύ μετάδοσης του δευτερεύοντος χρήστη, έτσι ώστε η παρεμβολή στον πρωτεύοντα δέκτη να διατηρείται κάτω από μια συγκεκριμένη τιμή. Όσον αφορά τον άλλο περιορισμό, προτείνεται ο καινοτόμος περιορισμός του αντιστρόφου λόγου σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο (inverse SINR) στον πρωτεύοντα δέκτη. Αυτή η μετρική είναι σημαντική

για την απόδοση του πρωτεύοντος δέκτη, καθώς πέρα από την ισχύ παρεμβολής από το δευτερεύοντα χρήστη, λαμβάνει υπόψη τις μεταβολές στο κανάλι του πρωτεύοντος χρήστη καθώς και τη μεταξύ τους σχέση. Επιπλέον, αναλύονται διαφορετικά σενάρια ανάλογα με τη φύση των περιορισμών (στιγμιαίοι/μέσοι) και μελετάται η επίδραση τους στην απόδοση των χρηστών. Συνεπώς, ανάλογα το είδος και τη φύση του περιορισμού παρεμβολής που επιβάλλεται στο δευτερεύοντα χρήστη, περιγράφονται τέσσερα διαφορετικά σενάρια και υπολογίζεται η βέλτιστη εκχώρηση ισχύος και η αντίστοιχη αποτελεσματική χωρητικότητα για κάθε σενάριο.

Αναλυτικότερα, στη συγκεκριμένη ενότητα, αρχικά περιγράφεται το μοντέλο του συστήματος που χρησιμοποιείται και τονίζονται τα βασικά σημεία συνεισφοράς του προτεινόμενου μοντέλου. Στη συνέχεια, ορίζεται το υπό μελέτη πρόβλημα ελέγχου ισχύος και περιγράφεται το σχήμα βέλτιστης εκχώρησης ισχύος που προκύπτει από τη λύση του, ενώ παράλληλα μελετάται η επίδραση των περιορισμών παρεμβολής στην επικοινωνία του πρωτεύοντος χρήστη. Τέλος, παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης του προτεινόμενου μηχανισμού, έτσι ώστε να αξιολογηθεί η απόδοση του προτεινόμενου σχήματος για τα διαφορετικά σενάρια.

### 7.3.1 Μοντέλο Συστήματος

Στην ανάλυση που ακολουθεί, θεωρείται το μοντέλο συστήματος που απεικονίζεται στο σχήμα 7.1, σύμφωνα με το οποίο ένας δευτερεύων πομπός προσπαθεί να στείλει δεδομένα σε ένα δευτερεύοντα δέκτη, παρουσία ενός πρωτεύοντος χρήστη. Συγκεκριμένα, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 7.1, ένα ζεύγος πρωτεύοντος πομπού ( $PU_{Tx}$ ) και δέκτη ( $PU_{Rx}$ ) συνυπάρχουν με ένα ζεύγος δευτερεύοντος πομπού ( $SU_{Tx}$ ) και δέκτη ( $SU_{Rx}$ ). Επιπλέον, όσον αφορά τις ασύρματες ζεύξεις, υποθέτονται ασυσχέτιστα κανάλια εξασθένησης Nakagami, διακριτού χρόνου. Τα αντίστοιχα λαμβανόμενα μιγαδικά σήματα για τον πρωτεύοντα και δευτερεύοντα δέκτη, τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή  $n$ , είναι:

$$y_p[n] = \sqrt{h_p[n]}x_p[n] + \sqrt{h_{sp}[n]}x_s[n] + z_p[n] \quad (7.3)$$

$$y_s[n] = \sqrt{h_s[n]}x_s[n] + \sqrt{h_{ps}[n]}x_p[n] + z_s[n] \quad (7.4)$$

όπου  $x_p$  και  $x_s$  αναπαριστούν τα μεταδιδόμενα σήματα από τον πρωτεύοντα και δευτερεύοντα πομπό, αντίστοιχα, ενώ  $z_p$  και  $z_s$  αναπαριστούν τον προσθετικό λευκό γκαουσιανό θόρυβο για κάθε ζεύξη. Επιπλέον,  $h_s$ ,  $h_{sp}$ ,  $h_p$  και  $h_{ps}$  δηλώνουν τα αντίστοιχα κέρδη ισχύος καναλιού ανάμεσα στο δευτερεύοντα/πρωτεύοντα πομπό και το δευτερεύοντα/πρωτεύοντα δέκτη, σύμφωνα με το σχήμα 7.1. Σε αυτό το σημείο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι για λόγους απλότητας, ο χρονικός δείκτης  $n$  παραλείπεται στην υπόλοιπη ανάλυση.

Δεδομένου ότι τα κέρδη πλάτους των καναλιών εξασθένησης μοντελοποιούνται σύμφωνα με τη κατανομή Nakagami μοναδιαίου μέσου (Simon & Alouini, 2005), η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf) του κέρδους ισχύος καναλιού ( $h_j$ ) δίνεται από την ακόλουθη κατανομή Γάμμα:

$$f_{h_j}(h_j) = \frac{m_j^{m_j} h_j^{m_j-1}}{\Gamma(m_j)} e^{-m_j h_j} \quad (7.5)$$

όπου  $\Gamma(\cdot)$  είναι η Γάμμα συνάρτηση (Jeffrey & Zwillinger, 2007) και  $m_j$  είναι η παράμετρος Nakagami, που δηλώνει το λόγο της ισχύος του σήματος LoS ως προς την ισχύ της πολυδιαδρομικής

συνιστώσας. Όπως αναφέρεται και σε προηγούμενη ενότητα, η συγκεκριμένη παράμετρος μοντελοποιεί τη δριμύτητα της εξασθένησης, με  $m_j = 1$  να αντιστοιχεί σε συνθήκες Rayleigh εξασθένησης,  $m_j = 0.5$  να αντανακλά πιο σοβαρές συνθήκες εξασθένησης όπως η μονόπλευρη γκαουσιανή εξασθένηση και  $m_j > 1$  να καταλήγει σε λογαριθμικές και Rician προσεγγίσεις των καναλιών εξασθένησης. Επιπρόσθετα, για το συγκεκριμένο μοντέλο γνωστικού συστήματος, θεωρείται ότι η φασματική πυκνότητα της ισχύος θορύβου και το φασματικό εύρος ζώνης του συστήματος είναι, αντίστοιχα,  $N_0$  και  $B$  και ότι τα πακέτα του στρώματος ζεύξης δεδομένων της ζεύξης του δευτερεύοντος χρήστη οργανώνονται σε πλαίσια διάρκειας  $T_f$ .

Στην ανάλυση που ακολουθεί, γίνεται η υπόθεση ότι ο πρωτεύων πομπός δεν μπορεί να αντιληφθεί την παρουσία του δευτερεύοντος χρήστη και μεταδίδει με σταθερή ισχύ  $P_p$ . Αντίθετα, οι δευτερεύοντες χρήστες αποτελούν γνωστικούς κόμβους, το οποίο σημαίνει ότι έχουν την ικανότητα να ανιχνεύσουν το περιβάλλον και να προσαρμόσουν την ισχύ τους, ανάλογα με την ύπαρξη ενός πρωτεύοντος χρήστη και τις συνθήκες καναλιού. Επιπλέον, γίνεται η υπόθεση ότι ο δευτερεύων χρήστης έχει πλήρη γνώση CSI για όλες τις ζεύξεις. Συγκεκριμένα, όσον αφορά τα κανάλια της ζεύξης του πρωτεύοντος χρήστη ( $h_p$ ) και της ζεύξης παρεμβολής από τον  $SU_{Tx}$  στον  $PU_{Rx}$  ( $h_{sp}$ ), θεωρείται ότι τα αντίστοιχα κέρδη καναλιού μπορούν να αποκτηθούν είτε άμεσα χρησιμοποιώντας ένα σήμα ανατροφοδότησης από τον πρωτεύοντα χρήστη, όπως προτείνεται στα (Jovicic & Viswanath, 2009), (L. Zhang et al., 2008), όπου υπάρχει μια συνεργασία ανάμεσα στα δύο είδη χρηστών, είτε έμμεσα μέσω ενός διαχειριστή εύρους ζώνης ο οποίος δρα ως διατητής ανάμεσα στα δύο μέρη (Chen et al., 2008), (Ghasemi & Sousa, 2007). Με αυτόν τον τρόπο, όταν ο πρωτεύων χρήστης μεταδίδει δεδομένα, ο δευτερεύων χρήστης περιορίζει την ισχύ εκπομπής του υπό ένα συγκεκριμένο όριο, έτσι ώστε να μην επηρεάζει την πρωτεύουσα ζεύξη.

Πριν την περαιτέρω ανάλυση του προβλήματος εκχώρησης ισχύος, ορίζονται στο σημείο αυτό, ορισμένες βασικές παράμετροι του συγκεκριμένου μοντέλου, όπως είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) και ο λόγος σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο (SINR) για τον πρωτεύοντα και τον δευτερεύοντα δέκτη. Συγκεκριμένα, οι προαναφερόμενοι λόγοι δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\text{SNR πρωτεύοντος δέκτη: } SNR_p = \frac{h_p \cdot P_p}{N_0 B},$$

$$\text{SINR πρωτεύοντος δέκτη: } SINR_p = \frac{h_p \cdot P_p}{h_{sp} \cdot P_s + N_0 B},$$

$$\text{SINR δευτερεύοντος δέκτη: } SINR_s = \frac{h_s \cdot P_s}{h_{ps} \cdot P_p + N_0 B}.$$

Στην ευρύτερη βιβλιογραφία, θεωρείται ότι η επικοινωνία του πρωτεύοντος χρήστη διακόπτεται (outage event) όταν ο λόγος SINR της ζεύξης του είναι χαμηλότερος από ένα κατώφλι. Ωστόσο, στην ανάλυση που ακολουθεί, όταν αναφέρεται ότι διακόπτεται η επικοινωνία του πρωτεύοντος χρήστη θα θεωρείται η περίπτωση κατά την οποία ο λόγος SNR του πρωτεύοντος χρήστη πέφτει κάτω από ένα όριο και δεν θα λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της παρεμβολής.

Προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι δεν υποβαθμίζεται η ποιότητα επικοινωνίας του πρωτεύοντος χρήστη, ο δευτερεύων χρήστης πρέπει να περιορίσει την ισχύ εκπομπής του ώστε να είναι χαμηλότερη από ένα δεδομένο επίπεδο ισχύος. Ανάλογα με τον περιορισμό παρεμβολής που επιβάλλεται στο δευτερεύοντα χρήστη, αναλύονται τέσσερα διαφορετικά σενάρια για το πρόβλημα εκχώρησης ισχύος. Στα πρώτα δύο σενάρια, αναλύεται το πρόβλημα διαχείρισης ραδιοπόρων του δευτερεύοντος χρήστη δεδομένου ενός μέσου/στιγμιαίου περιορισμού ισχύος παρεμβολής, ενώ στα ακόλουθα δύο σενάρια, προτείνεται ένας καινοτόμος περιορισμός παρεμβολής βάσει του μέσου/στιγμιαίου αντίστροφου λόγου SINR του πρωτεύοντος χρήστη.

### 7.3.2 Βασική συνεισφορά του προτεινόμενου μηχανισμού ελέγχου ισχύος

Όπως είναι εμφανές από την προηγούμενη ενότητα, η έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας χρησιμοποιείται ευρέως τα τελευταία χρόνια προκειμένου να βελτιστοποιηθούν οι τεχνικές διαχείρισης ραδιοπόρων για διάφορα επίγεια ασύρματα δίκτυα καθώς και για την περίπτωση των γνωστικών δικτύων. Ωστόσο, σε όλες τις προαναφερόμενες εργασίες, οι συγγραφείς μελετάνε το αντίστοιχο πρόβλημα διαχείρισης ραδιοπόρων, θεωρώντας είτε το μέσο, είτε το στιγμιαίο περιορισμό ισχύος παρεμβολής, αναλύοντας το μόνο από τη σκοπιά του δευτερεύοντος χρήστη, χωρίς να εστιάζουν στην επίδραση κάθε σχήματος στην επικοινωνία της πρωτεύουσας ζεύξης. Επιπλέον, στα περισσότερα σχήματα, η επίδραση της παρεμβολής του πρωτεύοντος χρήστη στην επικοινωνία του δευτερεύοντος χρήστη δεν λαμβάνεται υπόψη, παρόλο που αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα για τη σχεδίαση ρεαλιστικών σχημάτων εκχώρησης ισχύος.

Σε αυτή την ενότητα, ο στόχος είναι η ανάπτυξη και η μελέτη ενός βελτιωμένου σχήματος εκχώρησης ισχύος, το οποίο μεγιστοποιεί την αποτελεσματική χωρητικότητα της δευτερεύουσας ζεύξης, υπό διαφορετικούς περιορισμούς παρεμβολής. Επιπρόσθετα, σκοπός είναι η μελέτη της επίδρασης των διαφόρων περιορισμών τόσο από τη σκοπιά του πρωτεύοντος όσο και από τη σκοπιά του δευτερεύοντος χρήστη. Αναλυτικότερα, η βασική συνεισφορά του προτεινόμενου μηχανισμού μπορεί να συνοψιστεί στα ακόλουθα σημεία:

- Το προτεινόμενο σχήμα εκχώρησης ισχύος εκμεταλλεύεται το χρονικά μεταβαλλόμενο κανάλι του πρωτεύοντος χρήστη, έτσι ώστε να βελτιώσει περαιτέρω την επίδοση του δευτερεύοντος χρήστη. Συγκεκριμένα, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η αποτελεσματική χωρητικότητα του δευτερεύοντος χρήστη, ο προτεινόμενος μηχανισμός εκμεταλλεύεται τις χρονικές περιόδους κατά τις οποίες ο πρωτεύων χρήστης δεν λειτουργεί (λόγω φαινομένων outage), επιτρέποντας στο δευτερεύοντα χρήστη να εκπέμπει χρησιμοποιώντας τη μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ.
- Εκτός από την ανάλυση του προβλήματος ελέγχου ισχύος δεδομένου του κλασικού περιορισμού ισχύος παρεμβολής, μελετάται το αντίστοιχο πρόβλημα υπό έναν καινοτόμο περιορισμό παρεμβολής, που βασίζεται στον αντίστροφο λόγο SINR του πρωτεύοντος χρήστη. Όπως επαληθεύεται στην ενότητα της αριθμητικής ανάλυσης, ο συγκεκριμένος περιορισμός επιτρέπει στο δευτερεύοντα χρήστη να εκμεταλλεύεται τις μεταβολές του καναλιού της πρωτεύουσας ζεύξης και οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα από πλευράς αποτελεσματικής χωρητικότητας του δευτερεύοντος χρήστη. Επιπλέον, η χρήση του συγκεκριμένου περιορισμού οδηγεί σε χαμηλότερες τιμές της πιθανότητας διακοπής λειτουργίας του πρωτεύοντος χρήστη, εξασφαλίζοντας του ένα συγκεκριμένο κατώφλι ποιότητας επικοινωνίας.
- Στον προτεινόμενο μηχανισμό, λαμβάνεται υπόψη η παρεμβολή του πρωτεύοντος πομπού προς το δευτερεύοντα δέκτη. Ο συγκεκριμένος παράγοντας αποτελεί ένα παράγοντα υποβάθμισης της επικοινωνίας του δευτερεύοντος χρήστη, ο οποίος όμως αγνοείται στους περισσότερους μηχανισμούς εκχώρησης ραδιοπόρων για γνωστικά συστήματα. Όπως επαληθεύεται στην ενότητα της αριθμητικής ανάλυσης, η επίδραση της συγκεκριμένης ζεύξης είναι σημαντική και πρέπει να συμπεριληφθεί στην ανάλυση της βέλτιστης αποτελεσματικής χωρητικότητας προκειμένου να σχεδιαστεί ένα πιο ρεαλιστικό σχήμα εκχώρησης ισχύος.
- Τέλος, για όλους τους περιορισμούς παρεμβολής, μελετάται το αποτέλεσμα του αντίστοιχου προβλήματος βελτιστοποίησης, τόσο για βραχυχρόνιους, όσο και μακροχρόνιους περιορισμούς και κάθε σενάριο συγκρίνεται όχι μόνο από την πλευρά του δευτερεύοντος χρήστη, αλλά

και από την πλευρά του πρωτεύοντος χρήστη. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι η εργασία αυτή αποτελεί την πρώτη ανάλυση για τη βελτιστοποίηση της αποτελεσματικής χωρητικότητας του δευτερεύοντος χρήστη που μελετάει επίσης τον τρόπο με τον οποίο οι απαιτήσεις ποιότητας επηρεάζουν την επικοινωνία του πρωτεύοντος χρήστη.

### 7.3.3 Περιγραφή προβλήματος ελέγχου ισχύος

Πριν την αναλυτική περιγραφή του προβλήματος εκχώρησης ισχύος, κρίνεται απαραίτητο να οριστούν οι περιορισμοί ισχύος που πρέπει να ικανοποιούνται από το δευτερεύοντα χρήστη.

#### Περιορισμοί ισχύος για το δευτερεύοντα χρήστη

Ο πρώτος περιορισμός, ο οποίος λαμβάνεται υπόψη σε όλα τα σενάρια, αναφέρεται σε ένα περιορισμό στιγμιαίας ισχύος εκπομπής, ο οποίος εκφράζει το όριο του ενισχυτή ισχύος της συσκευής ( $P_{max}$ ) του δευτερεύοντος πομπού (Kang et al., 2009). Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι η στιγμιαία ισχύς εκπομπής του δευτερεύοντος πομπού ( $P_s$ ) πρέπει να ικανοποιεί την ακόλουθη ανισότητα:

$$0 \leq P_s \leq P_{max} \quad (7.6)$$

Όσον αφορά την επίδραση της εκπομπής του δευτερεύοντος χρήστη στην επικοινωνία του πρωτεύοντος χρήστη, χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικοί τύποι περιορισμού παρεμβολής. Ο πρώτος τύπος περιορισμού είναι ο κλασικός περιορισμός ισχύος παρεμβολής που αναπαριστά τη λαμβανόμενη ισχύ στον πρωτεύοντα δέκτη από το δευτερεύοντα πομπό. Συγκεκριμένα, μελετάται η περίπτωση του περιορισμού μέσης ισχύος παρεμβολής που μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\mathbf{E}[h_{sp} \cdot P_s] \leq Q_{I,av} \quad (7.7)$$

και η περίπτωση του περιορισμού στιγμιαίας ισχύος παρεμβολής, ο οποίος είναι ο ακόλουθος:

$$h_{sp} \cdot P_s \leq Q_{I,pk} \quad (7.8)$$

όπου τα  $Q_{I,av}$  και  $Q_{I,pk}$  δηλώνουν τα όρια μέσης και στιγμιαίας ισχύος παρεμβολής στον πρωτεύοντα δέκτη, αντίστοιχα.

Όσον αφορά το δεύτερο είδος περιορισμών, προκειμένου να εξασφαλιστεί η ποιότητα επικοινωνίας της ζεύξης του πρωτεύοντος χρήστη, προτείνεται η χρήση μιας σημαντικής μετρικής γνωστής ως αντίστροφος λόγος SINR. Δεδομένου ότι ο λόγος SINR αποτελεί ένα χρήσιμο δείκτη απόδοσης για μια συγκεκριμένης ζεύξης, ο αντίστροφος λόγος SINR μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί, προκειμένου να μετρηθεί η ποιότητα επικοινωνίας μιας ζεύξης (Menon et al., 2009), (Boche et al., 2011). Η ανάλυση που ακολουθεί χωρίζεται στη μελέτη του περιορισμού του μέσου αντίστροφου λόγου SINR της πρωτεύουσας ζεύξης:

$$\mathbf{E} \left[ \frac{h_{sp} \cdot P_s + N_0 \cdot B}{h_p \cdot P_p} \right] \leq Q_{ISINR,av} \quad (7.9)$$

και του περιορισμού του στιγμιαίου αντίστροφου λόγου SINR της πρωτεύουσας ζεύξης:

$$\frac{h_{sp} \cdot P_s + N_0 \cdot B}{h_p \cdot P_p} \leq Q_{ISINR,pk} \quad (7.10)$$

όπου τα  $Q_{ISINR,av}$  και  $Q_{ISINR,pk}$  είναι τα όρια του μέσου και στιγμιαίου αντίστροφου λόγου SINR του πρωτεύοντος χρήστη, αντίστοιχα.

Στο σημείο αυτό, πρέπει να σημειωθεί ότι και για τα δύο είδη περιορισμών, οι μέσοι περιορισμοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις όπου στον πρωτεύοντα χρήστη παρέχονται υπηρεσίες ανεκτικές στην καθυστέρηση και επομένως ένας μέσος περιορισμός μπορεί να εξασφαλίσει μια μακροχρόνια ποιότητα στην πρωτεύουσα ζεύξη. Αντίθετα, οι στιγμιαίοι περιορισμοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν ο πρωτεύων χρήστης πρέπει να ικανοποιεί στιγμιαίες απαιτήσεις ποιότητας επικοινωνίας.

Στην επόμενη υποενότητα, μελετάται το πρόβλημα εκχώρησης ραδιοπόρων για όλα τα πιθανά σενάρια τα οποία προκύπτουν από το συνδυασμό του περιορισμού στιγμιαίας ισχύος εκπομπής με τους τέσσερις περιορισμούς παρεμβολής. Συγκεκριμένα, για το κάθε σενάριο, το σύνολο της ισχύος εκπομπής για τους δευτερεύοντες χρήστες δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

$$\Omega_1 = \{P_s : (7.6), (7.7)\}, \Omega_2 = \{P_s : (7.6), (7.8)\}, \Omega_3 = \{P_s : (7.6), (7.9)\} \text{ και } \Omega_4 = \{P_s : (7.6), (7.10)\}.$$

### Ορισμός προβλήματος

Στην ανάλυση που ακολουθεί, χρησιμοποιείται η κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα  $E_{c,n}(\theta)(bits/s/Hz)$ , η οποία ορίζεται ως ο λόγος της αποτελεσματικής χωρητικότητας ως προς τον όρο  $T_f B$  και δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

$$E_{c,n}(\theta) = \frac{E_c(\theta)}{T_f B} = -\frac{1}{\theta T_f B} \ln \left( \mathbf{E} \left[ e^{-\theta R} \right] \right) \quad (7.11)$$

όπου  $R$  αναπαριστά τη χωρητικότητα του καναλιού της ζεύξης του δευτερεύοντος χρήστη και ορίζεται ως εξής :

$$R = T_f B \log_2 \left( 1 + \frac{P_s(\theta, h_{sp}, h_s, h_{ps}, h_p) h_s}{P_p h_{ps} + N_0 B} \right). \quad (7.12)$$

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μονάδα για τον ρυθμό  $R$  και την αποτελεσματική χωρητικότητα  $E_c(\theta)$  είναι “bits per frame”.

Προκειμένου να απλοποιηθεί η μορφή των εξισώσεων, ορίζεται επίσης ο όρος  $a_{SU} = a_{SU}(\theta) = \theta T_f B / \ln(2)$ , ο οποίος αναφέρεται ως κανονικοποιημένος εκθέτης ποιότητας υπηρεσίας. Επομένως, η κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει του  $a_{SU}$  ως εξής :

$$E_{c,n}(a_{SU}) = -\frac{1}{a_{SU} \ln(2)} \ln \left( \mathbf{E} \left[ \left( 1 + \frac{P_s(a_{SU}, h_{sp}, h_s, h_{ps}, h_p) h_s}{P_p h_{ps} + N_0 B} \right)^{-a_{SU}} \right] \right). \quad (7.13)$$

Ο βασικός στόχος του προτεινόμενου μηχανισμού είναι η μεγιστοποίηση της αποτελεσματικής χωρητικότητας της ζεύξης του δευτερεύοντος χρήστη και η εύρεση του σχήματος βέλτιστης ισχύος εκπομπής του, υπό τον περιορισμό να μην υποβαθμίζει την επικοινωνία του πρωτεύοντος χρήστη. Όπως περιγράφεται, ο δευτερεύων χρήστης επιλέγει ομορτυνιστικά την ισχύ του χρησιμοποιώντας την πληροφορία CSI που είναι γνωστή στον πομπό του. Επιπλέον, θεωρείται ότι ο γνωστικός χρήστης εκμεταλλεύεται τα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία ο πρωτεύων χρήστης είναι σε outage, λόγω των συνθηκών καναλιού της πρωτεύουσας ζεύξης, προκειμένου να αυξήσει την αποτελεσματική χω-

ρητικότητα του. Αυτό σημαίνει ότι όταν η τιμή του λόγου SNR της ζεύξης του πρωτεύοντος χρήστη πέφτει κάτω από ένα κατώφλι ( $Q_{out}$ ), ο δευτερεύων χρήστης εκπέμπει χρησιμοποιώντας τη μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ μετάδοσης. Από την άλλη μεριά, όταν  $SNR_p > Q_{out}$ , ο δευτερεύων χρήστης μεταδίδει τα δεδομένα του χρησιμοποιώντας τη βέλτιστη ισχύ εκπομπής που υπολογίζεται από τον ακόλουθο μηχανισμό. Επομένως, το πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$E_{c,n}^* = \max_{P_s \in \Omega_i} E_{c,n}(a_{SU}) \text{ για } h_p > h_{out} \quad (7.14)$$

όπου  $i = 1, 2, 3, 4$  είναι τα διαφορετικά σενάρια και  $h_{out} = (Q_{out}N_0B) / P_p$  είναι το αντίστοιχο κατώφλι outage για το κέρδος καναλιού του πρωτεύοντος χρήστη. Όπως είναι προφανές, στον προτεινόμενο αλγόριθμο, η βέλτιστη εκχώρηση ισχύος δίνεται από τη σχέση  $P_s^* = P_{max}$  για  $h_p \leq h_{out}$ .

Στη συνέχεια, για λόγους ευκολίας και υπολογισμού, ορίζεται η ακόλουθη συνάρτηση:

$$g(a_{SU}, P_s(a_{SU}, h_{sp}, h_s, h_{ps}, h_p)) = \mathbf{E} \left[ \left( 1 + \frac{P_s(a_{SU}, h_{sp}, h_s, h_{ps}, h_p)h_s}{P_p h_{ps} + N_0 B} \right)^{-a_{SU}} \right]. \quad (7.15)$$

Δεδομένου ότι η λογαριθμική συνάρτηση  $\ln(\cdot)$  είναι μια γνησίως αύξουσα συνάρτηση, το πρόβλημα μεγιστοποίησης της κανονικοποιημένης αποτελεσματικής χωρητικότητας μπορεί να εκφραστεί ως το πρόβλημα ελαχιστοποίησης της βοηθητικής συνάρτησης  $g(a_{SU}, P_s(a_{SU}, h_{sp}, h_s, h_{ps}, h_p))$ . Στην ακόλουθη ενότητα, παρουσιάζονται οι λύσεις του προβλήματος διαχείρισης ραδιοπύρων

$$\min_{P_s \in \Omega_i} \{g(a_{SU}, P_s(a_{SU}, h_{sp}, h_s, h_{ps}, h_p))\} \text{ για } h_p > h_{out} \quad (7.16)$$

για καθένα από τα προαναφερόμενα σενάρια.

### 7.3.4 Σχήματα Βέλτιστης Εκχώρησης Ισχύος

#### Σχήματα ελέγχου ισχύος με περιορισμούς ισχύος παρεμβολής (Σενάρια A)

Στα δύο πρώτα σενάρια, χρησιμοποιείται ο περιορισμός της ισχύος παρεμβολής προκειμένου να ρυθμιστεί η εκπομπή του δευτερεύοντος χρήστη, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα την επικοινωνία του πρωτεύοντος χρήστη. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά, μελετάται η περίπτωση του περιορισμού μέσης ισχύος παρεμβολής, ενώ, στη συνέχεια, αναλύεται η περίπτωση του αντίστοιχου στιγμιαίου περιορισμού.

#### Σχήμα με περιορισμό μέσης ισχύος παρεμβολής (Σενάριο A1)

Το πρώτο σενάριο αναφέρεται στη μεγιστοποίηση της κανονικοποιημένης αποτελεσματικής χωρητικότητας δεδομένου του περιορισμού στιγμιαίας ισχύος εκπομπής και του περιορισμού μέσης ισχύος παρεμβολής για το δευτερεύοντα χρήστη. Επομένως, επιλύεται αναλυτικά το πρόβλημα βελτιστοποίησης που ορίζεται στην (7.16) για  $P_s \in \Omega_1$ .

Όπως αποδεικνύεται στην ενότητα 6.4.2 του προηγούμενου κεφαλαίου, το πρόβλημα (7.16) αποτελεί ένα κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Επομένως, προκειμένου να βρεθεί η λύση του χρησιμοποιείται η συνάρτηση Lagrange, η οποία ορίζεται ως εξής:



$$L = \int_{h_{out}}^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \left( 1 + \frac{P_s(a_{SU}, h_{sp}, h_s, h_{ps}, h_p)h_s}{P_p h_{ps} + N_0 B} \right)^{-a_{SU}} f_{ch}(h_s, h_{ps}, h_{sp}, h_p) dh_s dh_{ps} dh_{sp} dh_p +$$

$$+ \lambda_0 \left\{ \int_{h_{out}}^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} h_{sp} P_s(a_{SU}, h_{sp}, h_s, h_{ps}, h_p) f_{ch}(h_s, h_{ps}, h_{sp}, h_p) dh_s dh_{ps} dh_{sp} dh_p - Q_{I,av} \right\} \quad (7.17)$$

όπου  $f_{ch}(h_s, h_{ps}, h_{sp}, h_p) = f_{h_s}(h_s) f_{h_{ps}}(h_{ps}) f_{h_{sp}}(h_{sp}) f_{h_p}(h_p)$  είναι η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του κέρδους ισχύος των ασυσχέτιστων καναλιών εξασθένισης. Δεδομένου ότι η βέλτιστη λύση θα πρέπει να ικανοποιεί την εξίσωση Lagrange-Euler (Boyd & Vandenberghe, 2004), (Hunt & Zeidler, 2004), αποδεικνύεται ότι ισχύει η ακόλουθη εξίσωση:

$$-\frac{a_{SU} h_s}{P_p h_{ps} + N_0 B} \left( 1 + \frac{P_s(a_{SU}, h_{sp}, h_s, h_{ps}, h_p)h_s}{P_p h_{ps} + N_0 B} \right)^{-a_{SU}-1} + \lambda_0 h_{sp} = 0 \quad (7.18)$$

Συνεπώς, λύνοντας την εξίσωση (7.18) ως προς  $P_s$ , υπολογίζεται η βέλτιστη εκχώρηση ισχύος, η οποία δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$P_s^*(a_{SU}, h_{sp}, h_s, h_{ps}, h_p) = \begin{cases} P_{\max}, & \text{για } \{h_p \leq h_{out}\} \text{ ή } \{h_p > h_{out} \text{ και } h_{sp} \leq h_0^A(h_s, h_{ps})\} \\ P_{opt}^A(a_{SU}, h_{sp}, h_s, h_{ps}), & \text{για } h_p > h_{out} \text{ και } h_0^A(h_s, h_{ps}) < h_{sp} \leq h_1^A(h_s, h_{ps}) \\ 0, & \text{για } h_p > h_{out} \text{ και } h_{sp} > h_1^A(h_s, h_{ps}) \end{cases} \quad (7.19)$$

όπου

$$P_{opt}^A(a_{SU}, h_{sp}, h_s, h_{ps}) = \left( \frac{P_p h_{ps} + N_0 B}{h_s} \right) \left\{ \left[ \frac{\lambda_0 h_{sp} (P_p h_{ps} + N_0 B)}{a_{SU} h_s} \right]^{-\frac{1}{1+a_{SU}}} - 1 \right\} \quad (7.20)$$

και

$$h_0^A(h_s, h_{ps}) = \frac{a_{SU} h_s}{\lambda_0 (P_p h_{ps} + N_0 B)} \left[ \frac{P_{\max} h_s}{P_p h_{ps} + N_0 B} + 1 \right]^{-(a_{SU}+1)}, \quad h_1^A(h_s, h_{ps}) = \frac{a_{SU} h_s}{\lambda_0 (P_p h_{ps} + N_0 B)}.$$

Για το συγκεκριμένο σενάριο, η τιμή της παραμέτρου  $\lambda_0$  υπολογίζεται από την ικανοποίηση του περιορισμού μέσης ισχύος παρεμβολής:

$$\int_{h_{out}}^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} h_{sp} \cdot P_s^*(h_s, h_{sp}, h_{ps}, h_p) \cdot f_{ch}(h_s, h_{ps}, h_{sp}, h_p) dh_s dh_{ps} dh_{sp} dh_p = Q_{I,av} \quad (7.21)$$

Προκειμένου να απλοποιηθεί ο υπολογισμός του ολοκληρώματος (7.21), υπολογίζεται η pdf της τυχαίας μεταβλητής  $h_s / (h_{ps} P_p + N_0 B)$ , όπου τα κέρδη ισχύος  $h_s$  και  $h_{ps}$  ακολουθούν την κατανομή Γάμμα με παραμέτρους  $m_s$  και  $m_{ps}$ , αντίστοιχα. Για να υπολογιστεί η συγκεκριμένη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, αρχικά ορίζονται δύο νέες τυχαίες μεταβλητές:  $g_0 = h_{ps} P_p + N_0 B$  και  $g_1 = h_s$ . Λαμβάνοντας υπόψη ότι  $dh_s dh_{ps} = (1/P_p) dg_0 dg_1$ , η από κοινού pdf  $f_{h_s, h_{ps}}(h_s, h_{ps})$  του κέρδους ισχύος των ασυσχέτιστων καναλιών μπορεί εύκολα να μετατραπεί στην  $f_{g_0, g_1}(g_0, g_1)$  με απλή αντικατάσταση των μεταβλητών.

Στη συνέχεια, ορίζονται οι μεταβλητές  $x$  και  $y$  ως  $x = g_1/g_0$  και  $y = g_0 + g_1$  και υπολογίζεται η

ορίζουσα Jacobian (Papoulis & Pillai, 2002), η οποία δίνεται από τη σχέση

$$J = -\frac{(1+x)^2}{y}. \quad (7.22)$$

Επομένως, η από κοινού pdf των  $x$  και  $y$  μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$f_{x,y}(x,y) = \frac{m_s^{m_s} m_{ps}^{m_{ps}} P_p^{-m_{ps}} e^{N_0 B m_{ps} / P_p}}{\Gamma(m_s) \Gamma(m_{ps})} x^{m_s-1} (1+x)^{-m_{ps}-m_s} y^{m_s} (y - N_0 B (1+x))^{m_{ps}-1} \cdot \exp \left\{ -y \left( \frac{m_s P_p x + m_{ps}}{P_p (1+x)} \right) \right\} \quad (7.23)$$

Ολοκληρώνοντας την  $f_{x,y}(x,y)$  ως προς  $y$ , υπολογίζεται η οριακή κατανομή του  $x$ , η οποία δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$f_x(x) = \int_{N_0 B (1+x)}^{\infty} f_{x,y}(x,y) dy = \frac{m_s^{m_s} m_{ps}^{m_{ps}} P_p^{-m_{ps}} e^{N_0 B m_{ps} / P_p}}{\Gamma(m_s) \Gamma(m_{ps})} x^{m_s-1} (1+x)^{-m_{ps}-m_s} \cdot \int_{N_0 B (1+x)}^{\infty} y^{m_s} (y - N_0 B (1+x))^{m_{ps}-1} \exp \left\{ -y \left( \frac{m_s P_p x + m_{ps}}{P_p (1+x)} \right) \right\} dy \quad (7.24)$$

Χρησιμοποιώντας την (4.11) από το (Jeffrey & Zwillinger, 2007, p.348), αποδεικνύεται ότι

$$f_x(x) = \frac{m_s^{m_s} m_{ps}^{m_{ps}} P_p^{\frac{1+m_s-m_{ps}}{2}} e^{\frac{N_0 B m_{ps}}{P_p}} (N_0 B)^{\frac{m_{ps}+m_s-1}{2}}}{\Gamma(m_s)} x^{m_s-1} (m_s x P_p + m_{ps})^{-\frac{m_s+m_{ps}+1}{2}} \cdot \exp \left\{ -\frac{N_0 B (m_s x P_p + m_{ps})}{2 P_p} \right\} W \left( \frac{1+m_s-m_{ps}}{2}, \frac{-(m_s+m_{ps})}{2}, \frac{N_0 B (m_s x P_p + m_{ps})}{P_p} \right) \quad (7.25)$$

όπου η  $W(\cdot)$  είναι η συνάρτηση Whittaker (Jeffrey & Zwillinger, 2007, p.1024).

Συνεπώς, ο περιορισμός μέσης ισχύος παρεμβολής μπορεί να απλοποιηθεί στην ακόλουθη σχέση:

$$Q_{I,av} = \frac{\Gamma(m_p, m_p h_{out})}{\Gamma(m_p)} \left\{ P_{max} \int_0^{\infty} \left( 1 - \frac{m_{sp}^{-1}}{\Gamma(m_{sp})} \Gamma \left( m_{sp} + 1, m_{sp} \lambda_0^{-1} a_{SU} x (P_{max} x + 1)^{-(a_{SU}+1)} \right) \right) f_x(x) dx + \frac{m_{sp}^{-\frac{a_{SU}}{a_{SU}+1}}}{\Gamma(m_{sp})} \left( \frac{\lambda_0}{a_{SU}} \right)^{-\frac{1}{a_{SU}+1}} \int_0^{\infty} x^{-\frac{a_{SU}}{a_{SU}+1}} \left[ \Gamma \left( m_{sp} + \frac{a_{SU}}{a_{SU}+1}, m_{sp} \lambda_0^{-1} a_{SU} x (P_{max} x + 1)^{-(a_{SU}+1)} \right) - \Gamma \left( m_{sp} + \frac{a_{SU}}{a_{SU}+1}, m_{sp} \lambda_0^{-1} a_{SU} x \right) \right] f_x(x) dx - \frac{m_{sp}^{-1}}{\Gamma(m_{sp})} \int_0^{\infty} x^{-1} \left[ -\Gamma \left( m_{sp} + 1, m_{sp} \lambda_0^{-1} a_{SU} x \right) + \Gamma \left( m_{sp} + 1, m_{sp} \lambda_0^{-1} a_{SU} x (P_{max} x + 1)^{-(a_{SU}+1)} \right) \right] f_x(x) dx \right\} \quad (7.26)$$

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι ο υπολογισμός των αορίστων ολοκληρωμάτων υλοποιείται

εύκολα λόγω της φθίνουσας συμπεριφοράς των συναρτήσεων προς ολοκλήρωση.

Τέλος, χρησιμοποιώντας την (7.19), υπολογίζεται η αποτελεσματική χωρητικότητα για την βέλτιστη εκχώρηση ισχύος, η οποία δίνεται από τη σχέση :

$$\begin{aligned}
 E_{c,n}^*(a_{SU}) = & -\frac{1}{a_{SU} \ln(2)} \ln \left\{ \left( 1 - \frac{\Gamma(m_p, m_p h_{out})}{\Gamma(m_p)} \right) \cdot \int_0^\infty (1 + P_{max}x)^{-a_{SU}} f_x(x) dx + \frac{\Gamma(m_p, m_p h_{out})}{\Gamma(m_p)} \right. \\
 & \cdot \left[ \int_0^\infty \left( 1 - \frac{\Gamma(m_{sp}, m_{sp} \lambda_0^{-1} a_{SU} x (P_{max}x + 1)^{-a_{SU}-1})}{\Gamma(m_{sp})} \right) (1 + P_{max}x)^{-a_{SU}} f_x(x) dx + \frac{1}{\Gamma(m_{sp})} \right. \\
 & \cdot \left. \left. \left( \frac{a_{SU} m_{sp}}{\lambda_0} \right)^{-\frac{a_{SU}}{a_{SU}+1}} \int_0^\infty x^{-\frac{a_{SU}}{a_{SU}+1}} \left( \Gamma \left( m_{sp} + \frac{a_{SU}}{a_{SU}+1}, m_{sp} \lambda_0^{-1} a_{SU} x (1 + P_{max}x)^{-a_{SU}-1} \right) - \right. \right. \\
 & \left. \left. - \Gamma \left( m_{sp} + \frac{a_{SU}}{a_{SU}+1}, m_{sp} \lambda_0^{-1} a_{SU} x \right) \right) f_x(x) dx + \frac{1}{\Gamma(m_{sp})} \int_0^\infty \Gamma(m_{sp}, m_{sp} \lambda_0^{-1} a_{SU} x) f_x(x) dx \right] \right\} \quad (7.27)
 \end{aligned}$$

όπου η συνάρτηση  $f_x(x)$  δίνεται από την (7.25).

*Σχήμα με περιορισμό στιγμιαίας ισχύος παρεμβολής (Σενάριο A2)*

Το δεύτερο σενάριο αναφέρεται στη μεγιστοποίηση της κανονικοποιημένης αποτελεσματικής χωρητικότητας, δεδομένων των περιορισμών στιγμιαίας ισχύος εκπομπής και στιγμιαίας ισχύος παρεμβολής. Επομένως, υπολογίζεται η λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης που ορίζεται στην (7.16) για  $P_s \in \Omega_2$ .

Για το συγκεκριμένο σενάριο, ο υπολογισμός της βέλτιστης ισχύος είναι απλούστερος σε σχέση με το σενάριο A1, καθώς από το συνδυασμό των δύο στιγμιαίων περιορισμών, συμπεραίνεται εύκολα ότι:  $P_s(h_{sp}) \leq \min \left\{ P_{max}, \frac{Q_{I,pk}}{h_{sp}} \right\}$ . Συνεπώς, η στρατηγική βέλτιστης ισχύος του δευτερεύοντος χρήστη δίνεται από τη σχέση :

$$P_s^*(h_{sp}, h_p) = \begin{cases} P_{max}, & \text{για } \{h_p \leq h_{out}\} \text{ ή } \{h_p > h_{out} \text{ και } h_{sp} \leq \frac{Q_{I,pk}}{P_{max}}\} \\ \frac{Q_{I,pk}}{h_{sp}}, & \text{για } h_p > h_{out} \text{ και } h_{sp} > \frac{Q_{I,pk}}{P_{max}} \end{cases} \quad (7.28)$$

Χρησιμοποιώντας την (7.25) και την (7.28), η αντίστοιχη αποτελεσματική χωρητικότητα προκύπτει

ως εξής:

$$\begin{aligned}
 E_{c,n}^*(a_{SU}) = & -\frac{1}{a_{SU} \ln(2)} \ln \left\{ \left( 1 - \frac{\Gamma(m_p, m_p h_{out})}{\Gamma(m_p)} \right) \cdot \int_0^\infty (1 + P_{max} x)^{-a_{SU}} f_x(x) dx + \frac{\Gamma(m_p, m_p h_{out})}{\Gamma(m_p)} \right. \\
 & \cdot \left[ \left( 1 - \frac{\Gamma(m_{sp}, m_{sp} Q_{I,pk}/P_{max})}{\Gamma(m_{sp})} \right) \cdot \int_0^\infty (1 + P_{max} x)^{-a_{SU}} f_x(x) dx + \int_{\frac{Q_{I,pk}}{P_{max}}}^\infty \int_0^\infty \left( 1 + \frac{Q_{I,pk} x}{h_{sp}} \right)^{-a_{SU}} \right. \\
 & \left. \left. \cdot f_x(x) f_{h_{sp}}(h_{sp}) dx dh_{sp} \right] \right\}. \tag{7.29}
 \end{aligned}$$

Από τις σχέσεις (7.19)-(7.29), παρατηρείται ότι στο συγκεκριμένο είδος του περιορισμού παρεμβολής (Σενάριο A), ο δευτερεύων χρήστης δεν χρειάζεται να γνωρίζει τις στιγμιαίες συνθήκες καναλιού του πρωτεύοντος χρήστη, αλλά μόνο τα διαστήματα κατά τα οποία η ζεύξη του πρωτεύοντος χρήστη πέφτει σε outage. Στην ενότητα της αριθμητικής ανάλυσης, τα δύο σενάρια συγκρίνονται από πλευράς αποτελεσματικής χωρητικότητας και της αντίστοιχης εκχώρησης ισχύος.

### Σχήματα με περιορισμούς αντίστροφου λόγου SINR (Σενάριο B)

Σε αυτή την υποενότητα, χρησιμοποιείται ο καινοτόμος περιορισμός που βασίζεται στην έννοια του αντίστροφου λόγου SINR προκειμένου να περιοριστεί η παρεμβολή από το δευτερεύοντα πομπού στον πρωτεύοντα δέκτη. Αρχικά, παρουσιάζεται η λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης με τον περιορισμό του μέσου αντιστρόφου SINR, ενώ το δεύτερο μέρος περιλαμβάνει τη λύση στο πρόβλημα διαχείρισης ραδιοπόρων υπό τον αντίστοιχο στιγμιαίο περιορισμό.

#### Σχήμα με περιορισμό μέσου αντιστρόφου λόγου SINR (Σενάριο B1)

Το συγκεκριμένο σχήμα αναφέρεται στη μεγιστοποίηση της αποτελεσματικής χωρητικότητας δεδομένου του περιορισμού στιγμιαίας ισχύος μετάδοσης του δευτερεύοντος χρήστη και του περιορισμού του μέσου αντιστρόφου λόγου SINR του πρωτεύοντος χρήστη. Αναλυτικότερα, μελετάται το πρόβλημα βελτιστοποίησης που περιγράφεται στην (7.16) όπου  $P_s \in \Omega_3$  και υπολογίζεται η βέλτιστη στρατηγική ισχύος για το δευτερεύοντα χρήστη, η οποία δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_s^*(a_{SU}, h_{sp}, h_s, h_{ps}, h_p) = \begin{cases} P_{max}, \text{ για } \{h_p \leq h_{out}\} \text{ ή } \{h_p > h_{out} \text{ και } h_{sp} \leq h_0^B(h_s, h_{ps}, h_p)\} \\ P_{opt}^B(a_{SU}, h_{sp}, h_s, h_{ps}, h_p), \text{ για } h_p > h_{out} \text{ και } h_0^B(h_s, h_{ps}, h_p) < h_{sp} \leq h_1^B(h_s, h_{ps}, h_p) \\ 0, \text{ για } h_p > h_{out} \text{ και } h_{sp} > h_1^B(h_s, h_{ps}, h_p) \end{cases} \tag{7.30}$$

όπου

$$P_{opt}^B(a_{SU}, h_{sp}, h_s, h_{ps}, h_p) = \left( \frac{P_p h_{ps} + N_0 B}{h_s} \right) \left\{ \left[ \frac{\lambda_0' h_{sp} (P_p h_{ps} + N_0 B)}{a_{SU} h_s P_p h_p} \right]^{-\frac{1}{1+a_{SU}}} - 1 \right\} \tag{7.31}$$

και

$$h_0^B(h_s, h_{ps}, h_p) = h_0^A(h_s, h_{ps}) h_p P_p, \quad h_1^B(h_s, h_{ps}, h_p) = h_1^A(h_s, h_{ps}) h_p P_p.$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η απόδειξη της (7.30) παραλείπεται καθώς είναι παρόμοια με την απόδειξη για τη βέλτιστη ισχύ εκπομπής του σεναρίου A1. Παρομοίως, η τιμή του πολλαπλασιαστή Lagrange  $\lambda'_0$  μπορεί να βρεθεί από την ικανοποίηση του περιορισμού του μέσου αντιστρόφου λόγου SINR. Χρησιμοποιώντας την (7.25) και την (7.30), η αποτελεσματική χωρητικότητα για τη βέλτιστη εκχώρηση ισχύος υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 E_{c,n}^*(a_{SU}) = & -\frac{1}{a_{SU} \ln(2)} \ln \left\{ \left( 1 - \frac{\Gamma(m_p, m_p h_{out})}{\Gamma(m_p)} \right) \cdot \int_0^\infty (1 + P_{max} x)^{-a_{SU}} f_x(x) dx + \right. \\
 & + \int_{h_{out}}^\infty \int_0^\infty (1 + P_{max} x)^{-a_{SU}} \left( 1 - \frac{\Gamma(m_{sp}, m_{sp}(\lambda'_0)^{-1} a_{SU} x P_p h_p (P_{max} x + 1)^{-a_{SU}-1})}{\Gamma(m_{sp})} \right) f_{h_p}(h_p) f_x(x) dx dh_p + \\
 & + \frac{1}{\Gamma(m_{sp})} \int_{h_{out}}^\infty \int_0^\infty \left( \frac{x a_{SU} P_p h_p m_{sp}}{\lambda'_0} \right)^{\frac{-a_{SU}}{a_{SU}+1}} \cdot \left[ \Gamma \left( m_{sp} + \frac{a_{SU}}{a_{SU}+1}, m_{sp}(\lambda'_0)^{-1} a_{SU} x P_p h_p (P_{max} x + 1)^{-a_{SU}-1} \right) - \right. \\
 & \left. - \Gamma \left( m_{sp} + \frac{a_{SU}}{a_{SU}+1}, m_{sp}(\lambda'_0)^{-1} a_{SU} x P_p h_p \right) \right] \cdot f_{h_p}(h_p) f_x(x) dx dh_p + \frac{1}{\Gamma(m_{sp})} \cdot \\
 & \left. \int_{h_{out}}^\infty \int_0^\infty \Gamma(m_{sp}, m_{sp}(\lambda'_0)^{-1} a_{SU} x P_p h_p) f_{h_p}(h_p) f_x(x) dx dh_p \right\}. \tag{7.32}
 \end{aligned}$$

Σχήμα με περιορισμό στιγμιαίου αντιστροφου λόγου SINR (Σενάριο B2)

Το τελευταίο σενάριο αναφέρεται στη μεγιστοποίηση της αποτελεσματικής χωρητικότητας του δευτερεύοντος χρήστη, δεδομένου του περιορισμού στιγμιαίας ισχύος εκπομπής του και του περιορισμού στιγμιαίου αντιστροφου λόγου SINR του πρωτεύοντος χρήστη. Επομένως, επιλύεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης που περιγράφεται στην (7.16) όπου  $P_s \in \Omega_4$ . Η λύση μπορεί να βρεθεί εύκολα από το συνδυασμό των δύο στιγμιαίων περιορισμών. Συγκεκριμένα, αποδεικνύεται ότι η βέλτιστη στρατηγική ισχύος του δευτερεύοντος χρήστη είναι η ακόλουθη:

$$P_s^*(h_{sp}, h_p) = \begin{cases} P_{max}, & \text{για } \{h_p \leq h_{out}\} \text{ ή } \{h_p > h_{qual} \text{ και } h_{sp} \leq h_0^C(h_p)\} \\ \frac{Q_{ISINR,pk} h_p P_p - N_0 B}{h_{sp}}, & \text{για } h_p > h_{qual} \text{ και } h_{sp} > h_0^C(h_p) \\ 0, & \text{για } h_{out} < h_p \leq h_{qual} \end{cases} \tag{7.33}$$

όπου

$$h_{qual} = \frac{N_0 B}{Q_{ISINR,pk} P_p} \text{ και } h_0^C(h_p) = \frac{Q_{ISINR,pk} h_p P_p - N_0 B}{P_{max}}.$$

Αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας την (7.25) και την (7.33), η αποτελεσματική χωρητικότητα για τη βέλ-

τιστη εκχώρηση ισχύος μπορεί να εκφραστεί ως :

$$\begin{aligned}
 E_{c,n}^*(a_{SU}) = & -\frac{1}{a_{SU} \ln(2)} \ln \left\{ \left( 1 - \frac{\Gamma(m_p, m_p h_{out})}{\Gamma(m_p)} \right) \cdot \int_0^\infty (1 + P_{max} x)^{-a_{SU}} f_x(x) dx + \right. \\
 & + \int_{h_{qual}}^\infty \int_0^\infty (1 + P_{max} x)^{-a_{SU}} \cdot \left( 1 - \frac{\Gamma(m_{sp}, m_{sp} (P_{max})^{-1} (Q_{ISINR, pk} h_p P_p - N_0 B))}{\Gamma(m_{sp})} \right) \cdot \\
 & \cdot f_{h_p}(h_p) f_x(x) dx dh_p + \frac{(\Gamma(m_p, m_p h_{out}) - \Gamma(m_p, m_p h_{qual}))}{\Gamma(m_p)} + \\
 & \left. + \int_{h_0^c}^\infty \int_{h_{qual}}^\infty \int_0^\infty \left( 1 + \frac{x(Q_{ISINR, pk} h_p P_p - N_0 B)}{h_{sp}} \right)^{-a_{SU}} f_{h_{sp}}(h_{sp}) f_{h_p}(h_p) f_x(x) dx dh_p dh_{sp} \right\}. \quad (7.34)
 \end{aligned}$$

### 7.3.5 Επίδραση των περιορισμών παρεμβολής στην επικοινωνία του πρωτεύοντος χρήστη

Σε αυτή την ενότητα, μελετάται η επίδραση των διαφορετικών περιορισμών παρεμβολής και των αντίστοιχων σχημάτων βέλτιστης εκχώρησης ισχύος στην επικοινωνία του πρωτεύοντος χρήστη. Προκειμένου να αναλυθεί ποιος περιορισμός (μέσος ή στιγμιαίος) οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα για τον πρωτεύοντα χρήστη, συγκρίνεται η αποτελεσματική χωρητικότητα για τα δύο σενάρια. Όπως αναφέρεται σε προηγούμενη υποενότητα, θεωρείται ότι ο πρωτεύων χρήστης χρησιμοποιεί σταθερή εκχώρηση ισχύος με ισχύ εκπομπής ίση με  $P_p$ . Στην ακόλουθη συγκριτική ανάλυση των τιμών της αποτελεσματικής χωρητικότητας υπό τους περιορισμούς παρεμβολής, θεωρείται η χρονική περίοδος κατά την οποία ο πρωτεύων χρήστης δεν είναι σε outage λόγω των δικών του συνθηκών καναλιού. Αυτό σημαίνει η ανάλυση που ακολουθεί αναφέρεται στην αποτελεσματική χωρητικότητα του πρωτεύοντος χρήστη για τιμές του κέρδους ισχύος της πρωτεύουσας ζεύξης μεγαλύτερες από το κατώφλι outage ( $h_{out}$ ), καθώς για χαμηλότερες τιμές ο δευτερεύων χρήστης εκτέμπει με την ίδια ισχύ ( $P_{max}$ ) ανεξάρτητα από τη φύση του περιορισμού παρεμβολής.

#### Επίδραση περιορισμού ισχύος παρεμβολής

Στη θεωρητική σύγκριση που ακολουθεί, έχουν θεωρηθεί οι ίδιες μέσες και στιγμιαίες τιμές ορίου ισχύος παρεμβολής ( $Q_{I, pk} = Q_{I, av} = Q$ ). Δεδομένου ότι ο πρωτεύων χρήστης μεταδίδει με ισχύ εκπομπής ίση με  $P_p$ , η κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα του δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση :

$$E_{c,n, PU} = -\frac{1}{a_{PU} \ln(2)} \ln \left( \mathbf{E} \left[ \left( 1 + \frac{h_p P_p}{h_{sp} P_s(a_{SU}, h_{sp}, h_s, h_{ps}) + N_0 B} \right)^{-a_{PU}} \right] \right) \quad (7.35)$$

όπου  $a_{PU}$  είναι ο κανονικοποιημένος εκθέτης QoS του πρωτεύοντος χρήστη.

Σε περίπτωση του στιγμιαίου περιορισμού παρεμβολής, η αντίστοιχη αποτελεσματική χωρητικότητα δίνεται από τη σχέση :

$$E_{c,n,PU}^{pk} = -\frac{1}{a_{PU} \ln(2)} \ln \left( \mathbf{E}_{h_p} \left[ \left( 1 + \frac{h_p P_p}{Q + N_0 B} \right)^{-a_{PU}} \right] \right) \quad (7.36)$$

όπου  $\mathbf{E}_x([f(x)])$  είναι η αναμενόμενη τιμή της  $f(x)$ , ως προς την τυχαία μεταβλητή  $x$ .

Όσον αφορά την αποτελεσματική χωρητικότητα του πρωτεύοντος χρήστη υπό το περιορισμό μέσης ισχύος παρεμβολής, προκύπτει ίση με:

$$\begin{aligned} E_{c,n,PU}^{av} &= -\frac{1}{a_{PU} \ln(2)} \ln \left( \mathbf{E}_{h_p, h_{sp}, h_s, h_{ps}} \left[ \left( 1 + \frac{h_p P_p}{h_{sp} P_s + N_0 B} \right)^{-a_{PU}} \right] \right) \\ &\stackrel{a_{PU} < 1}{\geq} -\frac{1}{a_{PU} \ln(2)} \ln \left( \mathbf{E}_{h_p} \left[ \left( 1 + \frac{h_p P_p}{\mathbf{E}_{h_{sp}, h_s, h_{ps}} [h_{sp} P_s] + N_0 B} \right)^{-a_{PU}} \right] \right) \\ &= -\frac{1}{a_{PU} \ln(2)} \ln \left( \mathbf{E}_{h_p} \left[ \left( 1 + \frac{h_p P_p}{Q + N_0 B} \right)^{-a_{PU}} \right] \right) \\ &= E_{c,n,PU}^{pk} \end{aligned} \quad (7.37)$$

Για να αποδειχθεί η ανισότητα της (7.37), ορίζεται αρχικά η συνάρτηση  $f(x) = \left( 1 + \frac{h_p P_p}{x + N_0 B} \right)^{-a_{PU}}$  και υπολογίζεται η δεύτερη παράγωγος της. Παρατηρώντας τη δεύτερη παράγωγο, αποδεικνύεται εύκολα ότι η κυρτότητα εξαρτάται από την τιμή της παραμέτρου  $a_{PU}$ . Πιο συγκεκριμένα, όταν  $a_{PU} < 1$ , η  $f(x)$  είναι αυστηρά κοίλη. Συνδυάζοντας την ανισότητα Jensen (Kuczma & Gilányi, 2008) και το γεγονός ότι η  $f(x)$  είναι κοίλη για αυτές τις τιμές του  $a_{PU}$ , προκύπτει ότι ισχύει η ανισότητα  $\mathbf{E}[f(x)] \leq f(\mathbf{E}[x])$  και συνεπώς αποδεικνύεται η έκφραση (7.37). Επομένως, συμπεραίνεται ότι όταν ο πρωτεύων χρήστης έχει χαλαρούς περιορισμούς ποιότητας υπηρεσίας ( $a_{PU} < 1$ ), ο περιορισμός μέσης παρεμβολής οδηγεί σε καλύτερες τιμές αποτελεσματικής χωρητικότητας. Ωστόσο, το αντίθετο ισχύει όταν υπάρχουν αυστηροί περιορισμοί ποιότητας υπηρεσίας στον πρωτεύοντα χρήστη, κάτι το οποίο επαληθεύεται στην ενότητα της αριθμητικής ανάλυσης.

### Επίδραση περιορισμού αντιστρόφου λόγου SINR

Για να μελετηθεί η επίδραση του περιορισμού του αντιστρόφου λόγου SINR, θεωρούνται επίσης οι ίδιες τιμές μέσου και στιγμιαίου ορίου ( $Q_{ISINR, pk} = Q_{ISINR, av} = Q$ ). Επομένως, η αποτελεσματική χωρητικότητα του πρωτεύοντος χρήστη, σε περίπτωση του στιγμιαίου περιορισμού του αντιστρόφου λόγου SINR, μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$E_{c,n,PU}^{pk} = -\frac{1}{a_{PU} \ln(2)} \ln \left[ \left( 1 + \frac{1}{Q} \right)^{-a_{PU}} \right] \quad (7.38)$$

Επιπρόσθετα, για την περίπτωση του περιορισμού του μέσου αντίστροφου λόγου SINR, ισχύει ότι:

$$\begin{aligned}
 E_{c,n,PU}^{av} &= -\frac{1}{a_{PU} \ln(2)} \ln \left( \mathbf{E}_{h_p, h_{sp}, h_s, h_{ps}} \left[ \left( 1 + \frac{h_p P_p}{h_{sp} P_s + N_0 B} \right)^{-a_{PU}} \right] \right) \\
 &\stackrel{a_{PU} < 1}{\geq} -\frac{1}{a_{PU} \ln(2)} \ln \left[ \left( 1 + \frac{1}{Q} \right)^{-a_{PU}} \right] \\
 &= E_{c,n,PU}^{pk}
 \end{aligned} \tag{7.39}$$

Η ανισότητα στην (7.39), αποδεικνύεται με αντίστοιχο τρόπο με την ανισότητα στην (7.37).

Συνεπώς, παρατηρώντας την επίδραση των περιορισμών παρεμβολής στην επικοινωνία του πρωτεύοντος χρήστη, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η υπεροχή από πλευράς αποτελεσματικής χωρητικότητας του μέσου/στιγμιαίου περιορισμού εξαρτάται από τις απαιτήσεις ποιότητας του χρήστη. Συγκεκριμένα, αν ο πρωτεύων χρήστης έχει αυστηρές απαιτήσεις QoS, τότε οι στιγμιαίοι περιορισμοί παρεμβολής οδηγούν σε καλύτερα αποτελέσματα. Αντίθετα, αν ο πρωτεύων χρήστης δεν έχει αυστηρές απαιτήσεις ποιότητας, τότε προτείνεται η χρήση μέσων περιορισμών παρεμβολής.

### 7.3.6 Αριθμητική ανάλυση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

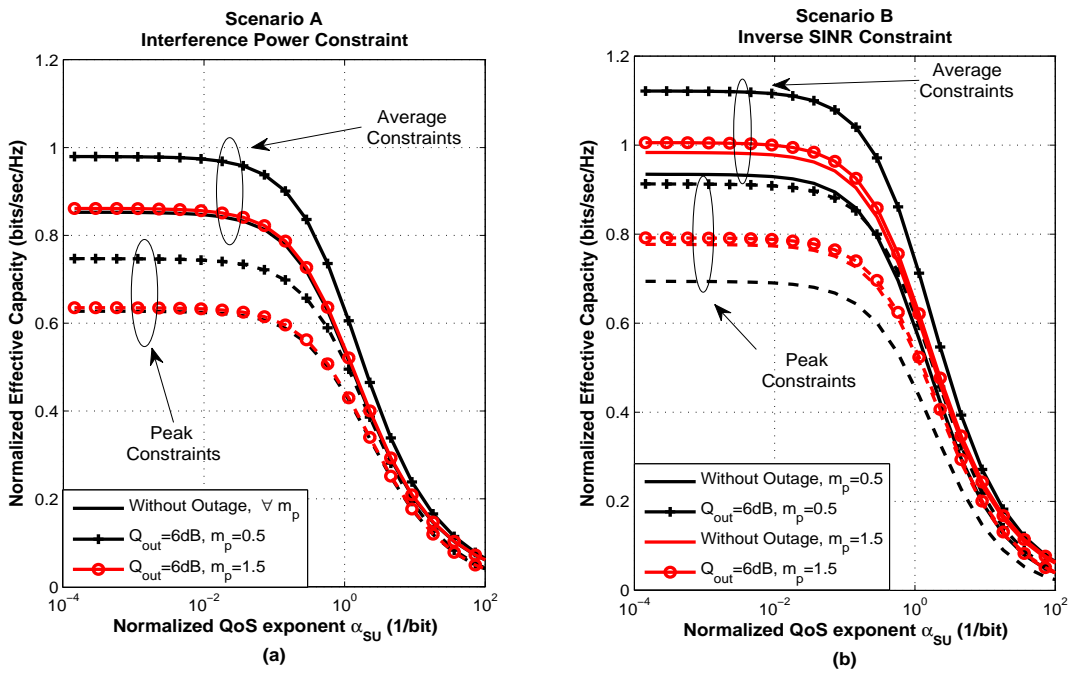
Προκειμένου να μελετηθούν τα αποτελέσματα της διαχείρισης ραδιοπόρων τόσο από την πλευρά του δευτερεύοντος χρήστη, όσο και από την πλευρά του πρωτεύοντος χρήστη, η συγκεκριμένη υποενότητα χωρίζεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος, παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα που αφορούν τη βέλτιστη εκχώρηση ισχύος και την αντίστοιχη αποτελεσματική χωρητικότητα του δευτερεύοντος χρήστη για καθένα από τα σενάρια, ενώ στο δεύτερο μέρος, δίνεται έμφαση στην επίδραση των περιορισμών παρεμβολής στην ποιότητα επικοινωνίας του πρωτεύοντος χρήστη.

Για το σενάριο προσομοίωσης, θεωρείται ότι  $N_0 B = 10^{-2} \text{W}$  και  $T_f B = 1$ . Επίσης, υποθέτεται ότι το όριο ισχύος εκπομπής του δευτερεύοντος χρήστη είναι ίσο με  $P_{max} = P_p = 1 \text{W}$ , το κατώφλι outage SNR του πρωτεύοντος χρήστη είναι  $Q_{out} = 5 \text{dB}$  και τα όρια αντίστροφου λόγου SINR για την πρωτεύουσα ζεύξη είναι  $Q_{ISINR,av} = Q_{ISINR,pk} = -5 \text{dB}$ , εκτός αν δηλώνεται διαφορετικά. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές των περιορισμών ισχύος παρεμβολής ( $Q_{I,av} = Q_{I,pk}$ ) στο σενάριο A έχουν υπολογιστεί έτσι ώστε να οδηγούν στον ίδιο μέσο αντίστροφο λόγο SINR του πρωτεύοντος χρήστη συγκριτικά με το σενάριο B. Επιπλέον, οι τιμές των παραμέτρων Nakagami θεωρούνται ίσες με  $m_{sp} = m_s = m_{ps} = 1$  και  $m_p = 1.5$ , εκτός από τα σχήματα 7.3 -7.5, στα οποία αναφέρονται διαφορετικές τιμές.

#### Αριθμητική ανάλυση για την απόδοση του δευτερεύοντος χρήστη

Το σχήμα 7.3 αναπαριστά την κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα του δευτερεύοντος χρήστη ως προς τον κανονικοποιημένο εκθέτη QoS  $a_{SU}$ , θεωρώντας διαφορετικές τιμές του  $m_p$ . Προκειμένου να δοθεί έμφαση στο κέρδος αποτελεσματικής χωρητικότητας λόγω της εκμετάλλευσης των γεγονότων outage του πρωτεύοντος χρήστη, το προτεινόμενο σχήμα εκχώρησης ισχύος συγκρίνεται με το αντίστοιχο σχήμα το οποίο δεν περιλαμβάνει τη στρατηγική εκμετάλλευσης των φαινόμενα outage. Θα πρέπει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι σε όλα τα σχήματα 7.3 -7.6,

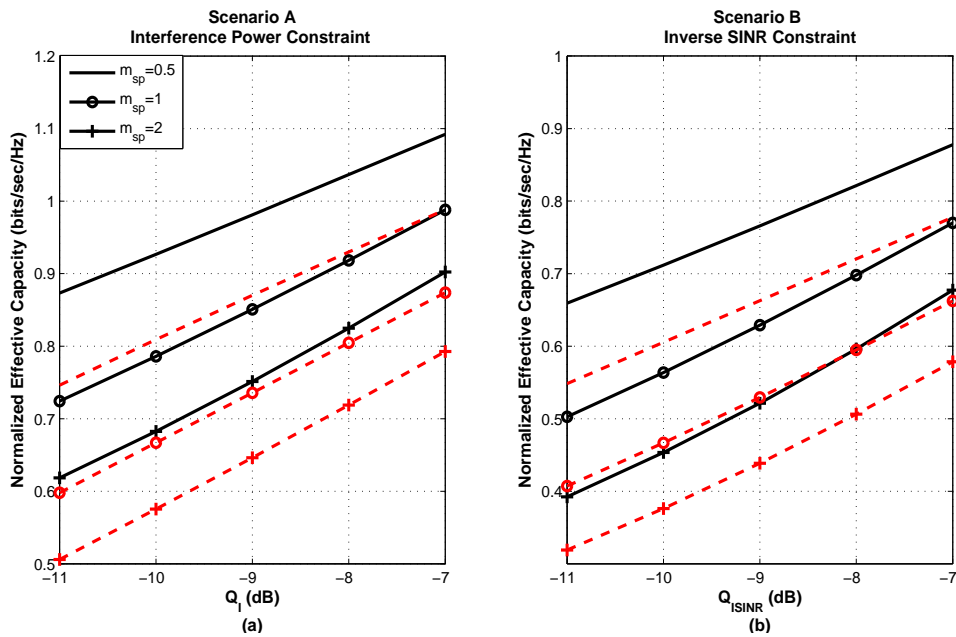




Σχήμα 7.3: Κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα ως προς τον εκθέτη QoS  $\alpha_{SU}$  για διαφορετικές τιμές του  $m_p$ .

οι συνεχείς καμπύλες αντιστοιχούν στα σενάρια με τους περιορισμούς μέσης παρεμβολής, ενώ οι διακεκομμένες καμπύλες αναφέρονται στα σενάρια με τους αντίστοιχους στιγμιαίους περιορισμούς. Ανάλογα το είδος του περιορισμού παρεμβολής, το σχήμα 7.3 αποτελείται από δύο διαγράμματα. Συγκεκριμένα, το διάγραμμα 7.3α αναφέρεται στα σενάρια ισχύος παρεμβολής (Σενάρια Α), ενώ το διάγραμμα 7.3β αναφέρεται στα σενάρια αντίστροφου λόγου SINR (Σενάρια Β). Από τα δύο διαγράμματα, παρατηρείται ότι η αύξηση του κανονικοποιημένου εκθέτη QoS οδηγεί στη μείωση της αποτελεσματικής χωρητικότητας ανεξάρτητα από το σενάριο. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι όταν το σύστημα έχει αυστηρότερες απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας, ο δευτερεύων χρήστης μπορεί να πετύχει μόνο χαμηλότερες τιμές της αποτελεσματικής χωρητικότητας. Στην αντίθετη περίπτωση κατά την οποία υπάρχουν πιο χαλαροί περιορισμοί ποιότητας, ο δευτερεύων χρήστης καταλήγει να έχει πολύ μεγαλύτερες τιμές αποτελεσματικής χωρητικότητας.

Μια άλλη κοινή παρατήρηση για τα δύο διαγράμματα είναι ότι η χρήση των μέσων περιορισμών οδηγεί σε υψηλότερες τιμές της αποτελεσματικής χωρητικότητας συγκριτικά με τους αντίστοιχους στιγμιαίους περιορισμούς. Αυτή η παρατήρηση μπορεί να δικαιολογηθεί δεδομένου ότι οι μέσοι περιορισμοί παρέχουν μεγαλύτερη ευελιξία στο δευτερεύοντα χρήστη επιτρέποντας του να εκχωρήσει δυναμικά την ισχύ εκπομπής του, βάσει των διαφορετικών καταστάσεων εξασθένισης καναλιού, έτσι ώστε να πετύχει μεγαλύτερη αποτελεσματική χωρητικότητα σε σχέση με τους στιγμιαίους περιορισμούς. Επιπλέον, και στα δύο διαγράμματα, παρατηρείται ότι η προτεινόμενη τεχνική εκχώρησης ισχύος, η οποία ενσωματώνει τη στρατηγική εκπομπής με μέγιστη ισχύ όταν ο πρωτεύων χρήστης είναι σε outage, καταλήγει σε μια σημαντική αύξηση της αποτελεσματικής χωρητικότητας σε σχέση με τον απλό αλγόριθμο εκχώρησης ισχύος, ο οποίος δεν χρησιμοποιεί τη συγκεκριμένη τακτική. Συνεπώς, επαληθεύεται το γεγονός ότι ο δευτερεύων χρήστης μπορεί να επωφεληθεί σημαντικά από τα φαινόμενα διακοπής λειτουργίας του πρωτεύοντος χρήστη βελτιώνοντας τη ρυθμιστική του για συγκεκριμένες απαιτήσεις QoS.

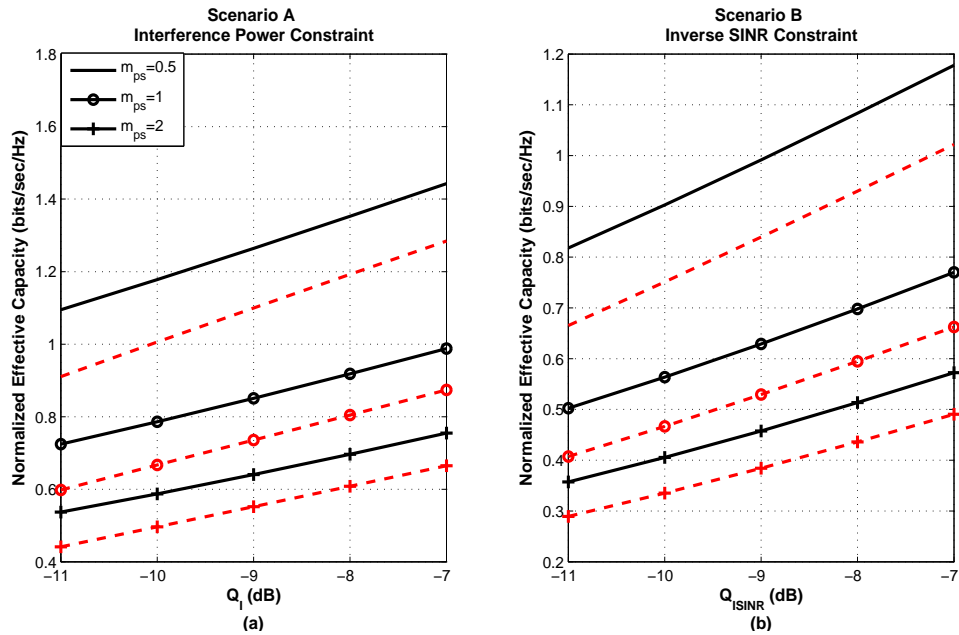


Σχήμα 7.4: Κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα ως προς το όριο παρεμβολής για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου  $m_{sp}$ .

Όσον αφορά την επίδραση της παραμέτρου εξασθένησης  $m_p$  στις τιμές της αποτελεσματικής χωρητικότητας, παρατηρείται ότι καθώς το  $m_p$  μειώνεται, η αποτελεσματική χωρητικότητα του δευτερεύοντος χρήστη αυξάνεται στην περίπτωση του προτεινόμενου μηχανισμού εκχώρησης ισχύος. Το γεγονός αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί δεδομένου ότι η μείωση της παραμέτρου Nakagami  $m_p$  σημαίνει ουσιαστικά ότι η πρωτεύουσα ζεύξη υποφέρει από πιο σοβαρές συνθήκες εξασθένησης. Επομένως, υπάρχει υψηλότερη πιθανότητα για τον πρωτεύοντα χρήστη να πέσει σε outage, λόγω των δικών του χαρακτηριστικών καναλιού. Δεδομένου ότι ο δευτερεύων χρήστης εκμεταλλεύεται τα φαινόμενα outage του πρωτεύοντος χρήστη εκπέμποντας με τη μέγιστη ισχύ, είναι εμφανές ότι χαμηλότερες τιμές του  $m_p$  θα οδηγούν ουσιαστικά σε υψηλότερες τιμές αποτελεσματικής χωρητικότητας. Όσον αφορά την απλή μέθοδο εκχώρησης ισχύος (χωρίς την τεχνική εκμετάλλευσης των φαινομένων outage), παρατηρείται ότι η αλλαγή της παραμέτρου  $m_p$  δεν επηρεάζει καθόλου την αποτελεσματική χωρητικότητα στα σενάρια ισχύος παρεμβολής καθώς η βέλτιστη εκχώρηση ισχύος δεν εξαρτάται από τις συνθήκες καναλιού της πρωτεύουσας ζεύξης. Αντίθετα, αυτό δεν ισχύει για τα σενάρια του περιορισμού του αντίστροφου λόγου SINR, όπου η αντίστοιχη βέλτιστη εκχώρηση ισχύος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά καναλιού του πρωτεύοντος χρήστη. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι σε αυτήν την περίπτωση, όταν η πρωτεύουσα ζεύξη υποφέρει από πιο ήπια εξασθένηση (υψηλότερες τιμές του  $m_p$ ), ο δευτερεύων χρήστης μπορεί να εκπέμψει σε υψηλότερα επίπεδα ισχύος και επομένως να αυξήσει την αποτελεσματική χωρητικότητά του.

Τέλος, συγκρίνοντας τα δύο διαγράμματα, παρατηρείται ότι ο περιορισμός αντίστροφου λόγου SINR (Σενάριο B) οδηγεί σε υψηλότερες τιμές αποτελεσματικής χωρητικότητας σε σχέση με τον περιορισμό της ισχύος παρεμβολής (Σενάριο A). Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα μπορεί να δικαιολογηθεί δεδομένου ότι στο σενάριο B, ο δευτερεύων χρήστης είναι πιο ευέλικτος να προσαρμόσει την ισχύ του καθώς αυτή εξαρτάται επίσης από το κέρδος καναλιού του πρωτεύοντος χρήστη.

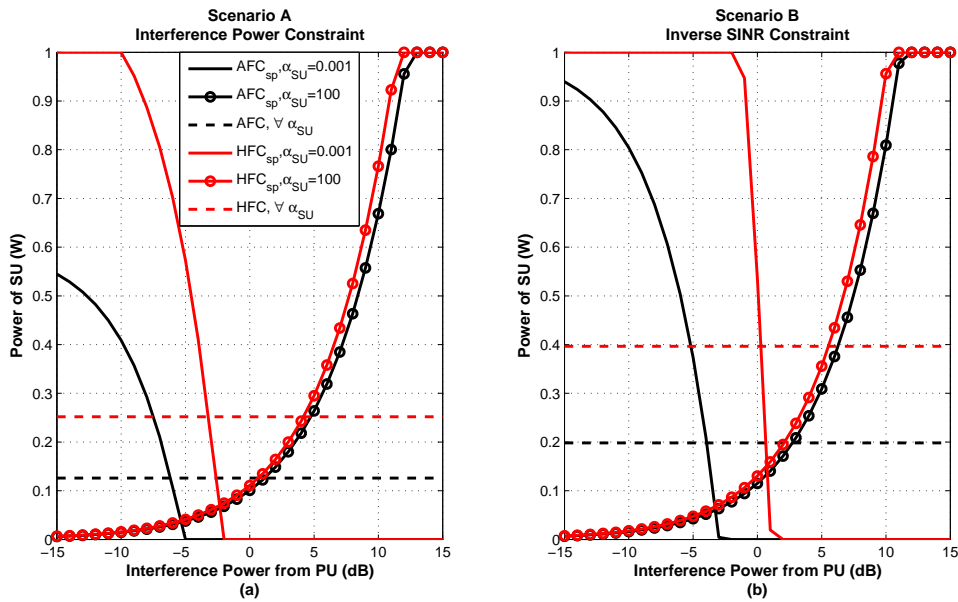
Στα σχήματα 7.4α και 7.4β, απεικονίζεται η κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα ως προς το όριο παρεμβολής για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου εξασθένησης  $m_{sp}$  της ζεύξης



Σχήμα 7.5: Κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα ως προς το όριο παρεμβολής για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου  $m_{ps}$ .

$SU_{TX}$ - $PU_{RX}$ . Μια αρχική παρατήρηση από τα συγκεκριμένα διαγράμματα είναι ότι για αυξουσες τιμές του ορίου παρεμβολής, η αποτελεσματική χωρητικότητα επίσης αυξάνεται. Το γεγονός αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί δεδομένου ότι μια αύξηση του ορίου παρεμβολής σημαίνει ουσιαστικά ότι ο δευτερεύων χρήστης μπορεί να εκπέμπει σε υψηλότερα επίπεδα ισχύος με αποτέλεσμα να αυξάνει την αποτελεσματική χωρητικότητά του. Επιπλέον, παρατηρείται ότι η αποτελεσματική χωρητικότητα αυξάνεται για χαμηλότερες τιμές της παραμέτρου  $m_{sp}$ . Η παρατήρηση αυτή δικαιολογείται δεδομένου ότι υψηλότερες τιμές της παραμέτρου  $m_{sp}$  αντιστοιχούν σε πιο ήπιες συνθήκες εξασθένησης της ζεύξης παρεμβολής  $SU_{TX}$ - $PU_{RX}$ . Συνεπώς, στην περίπτωση αυτή, ο δευτερεύων χρήστης θα πρέπει να εκπέμπει σε χαμηλότερα επίπεδα ισχύος προκειμένου να μην υποβαθμίσει την επικοινωνία του πρωτεύοντος χρήστη.

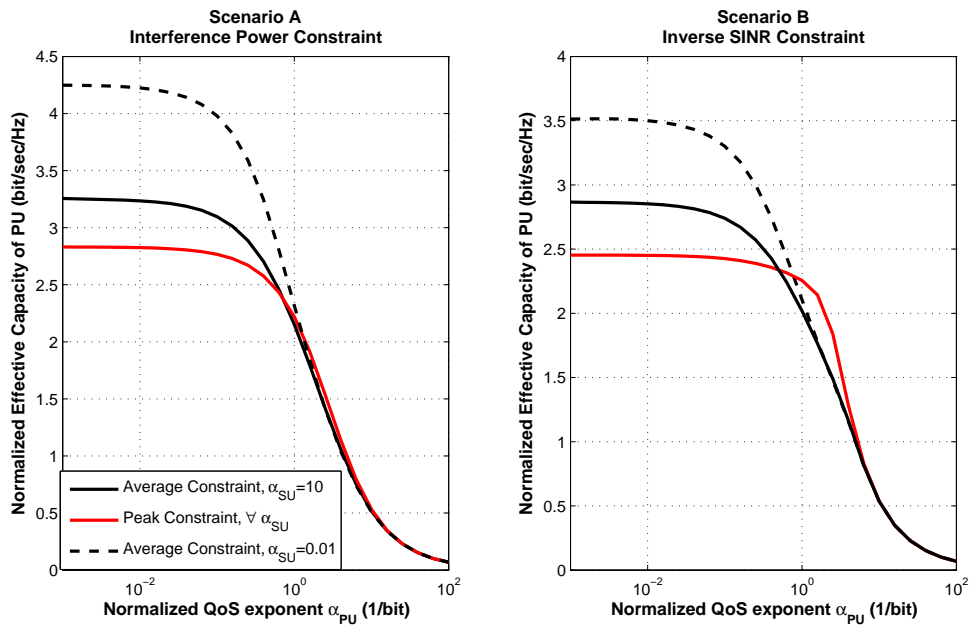
Παρόμοια στο σχήμα 7.5, απεικονίζεται η κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα ως προς το όριο παρεμβολής για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου εξασθένησης  $m_{ps}$  της ζεύξης  $PU_{TX}$ - $SU_{RX}$ . Σε αυτό το σημείο, παρατηρείται ότι η αποτελεσματική χωρητικότητα μειώνεται για αυξανόμενες τιμές της παραμέτρου  $m_{ps}$ . Το γεγονός αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί λαμβάνοντας υπόψη ότι όταν το κανάλι  $PU_{TX}$ - $SU_{RX}$  είναι καλό (υψηλότερες τιμές του  $m_{ps}$ ), ο πρωτεύων χρήστης παρεμβάλλει πολύ περισσότερο στην επικοινωνία του δευτερεύοντος χρήστη, με αποτέλεσμα να υποβαθμίζει το ρυθμό μετάδοσης του. Επιπλέον, συγκρίνοντας το σχήμα 7.4 και το σχήμα 7.5, παρατηρείται ότι η επίδραση της ζεύξης  $PU_{TX}$ - $SU_{RX}$  είναι πολύ σημαντικότερη από την επίδραση της ζεύξης  $SU_{TX}$ - $PU_{RX}$  στην αποτελεσματική χωρητικότητά του δευτερεύοντα χρήστη. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι για ένα δεδομένο όριο παρεμβολής και για την ίδια αύξηση της παραμέτρου Nakagami από  $m_{sp} = m_{ps} = 0.5$  σε  $m_{sp} = m_{ps} = 1$ , η μείωση της αποτελεσματικής χωρητικότητας του δευτερεύοντα χρήστη είναι σχεδόν τριπλάσια για την περίπτωση της παραμέτρου  $m_{ps}$  σε σχέση με την παράμετρο  $m_{sp}$ . Συνεπώς, επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι η παρεμβολή από τον πρωτεύοντα χρήστη παίζει ένα σημαντικό ρόλο στην εκχώρηση ισχύος του δευτερεύοντα χρήστη και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην ανάλυση του σεναρίου του γνωστικού συστήματος, προκειμένου να μελετάται ένα πιο ρεαλιστικό



Σχήμα 7.6: Στιγμιαία ισχύς του δευτερεύοντος χρήστη ως προς την παρεμβολή από τον πρωτεύοντα χρήστη για διαφορετικές τιμές του εκθέτη QoS  $a$ .

σενάριο.

Στο σχήμα 7.6, απεικονίζεται η βέλτιστη εκχώρηση ισχύος του δευτερεύοντος χρήστη ως προς την ισχύ παρεμβολής από τον πρωτεύοντα χρήστη, για διαφορετικές τιμές του κανονικοποιημένου εκθέτη QoS  $a_{SU}$  και για διαφορετικές συνθήκες καναλιού της ζεύξης  $SU_{Tx}-PU_{Rx}$ . Τα ακρωνύμια  $AFC_{sp}$  και  $HFC_{sp}$  αναφέρονται σε συνθήκες μέσης εξασθένησης (Average Fading Conditions) και συνθήκες υψηλής εξασθένησης (Heavy Fading Conditions) της ζεύξης  $SU_{Tx}-PU_{Rx}$ , αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι στο σενάριο μέσης εξασθένησης, το κέρδος ισχύος του καναλιού είναι ίσο με το στατιστικό μέσο του, ενώ στο σενάριο υψηλής εξασθένησης, υπάρχει μια επιπρόσθετη απώλεια ίση με 3 dB στο κέρδος ισχύος καναλιού. Η πρώτη παρατήρηση, σε αυτό το σημείο, είναι ότι και τα δύο σενάρια (σενάριο A και σενάριο B) εμφανίζουν την ίδια συμπεριφορά όσον αφορά την επίδραση της παρεμβολής από τον πρωτεύοντα χρήστη καθώς και τον εκθέτη ποιότητας υπηρεσίας. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά το σενάριο των μέσων περιορισμών (συνεχείς καμπύλες), παρατηρείται ότι όταν το σύστημα έχει χαλαρούς περιορισμούς ποιότητας υπηρεσίας (μικρές τιμές του  $a_{SU}$ ), ο δευτερεύων χρήστης εκπέμπει σε υψηλότερα επίπεδα ισχύος, όταν δεν υπάρχει παρεμβολή από τον πρωτεύοντα χρήστη, έτσι ώστε να μεγιστοποιήσει την αποτελεσματική του χωρητικότητα. Αντίθετα, όταν το σύστημα έχει αυστηρές απαιτήσεις QoS, ο δευτερεύων χρήστης πρέπει να εκπέμπει με υψηλότερη ισχύ, όταν υπάρχει σημαντική παρεμβολή από τον πρωτεύοντα χρήστη, προκειμένου να περιορίσει την επίδραση της και να εξασφαλίσει μια συγκεκριμένη ποιότητα υπηρεσίας για τη δευτερεύουσα ζεύξη. Όσον αφορά τα σενάρια στιγμιαίων περιορισμών (διακεκομμένες καμπύλες), παρατηρείται ότι η αντίστοιχη βέλτιστη εκχώρηση ισχύος είναι ανεξάρτητη τόσο από την παρεμβολή του πρωτεύοντος χρήστη, όσο και από τον εκθέτη QoS (σχέσεις (7.28) και (7.33)). Μια τελευταία παρατήρηση είναι ότι ανάλογα τις συνθήκες καναλιού της ζεύξης παρεμβολής  $SU_{Tx}-PU_{Rx}$ , ο δευτερεύων χρήστης επιτρέπεται να εκπέμπει σε διαφορετικά επίπεδα ισχύος. Αναλυτικότερα, όταν το συγκεκριμένο κανάλι υποφέρει από σοβαρή εξασθένηση, ο δευτερεύων χρήστης μπορεί να μεταδίδει σε πολύ υψηλότερα επίπεδα ισχύος δεδομένου ότι δεν θα επηρεάσει την επικοινωνία του πρωτεύοντος χρήστη, λόγω της υψηλής εξασθένησης του σήματος του.

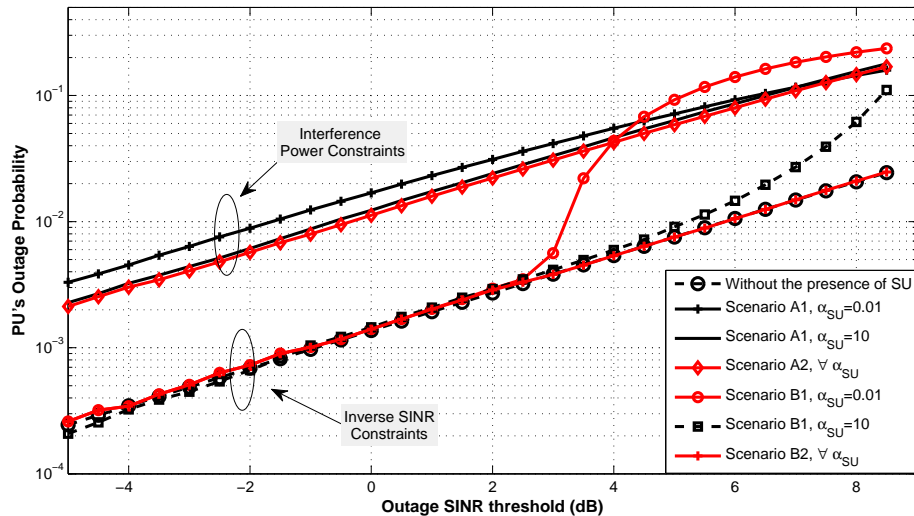


Σχήμα 7.7: Κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα του πρωτεύοντος χρήστη ως προς τον εκθέτη QoS  $a_{PU}$  για διαφορετικές τιμές του εκθέτη QoS  $a_{SU}$  του δευτερεύοντος χρήστη.

### Αριθμητική ανάλυση για την απόδοση του πρωτεύοντος χρήστη

Σε αυτή την υποενότητα, απεικονίζεται η επίδραση των διαφορετικών περιορισμών παρεμβολής στην επικοινωνία του πρωτεύοντος χρήστη. Το σχήμα 7.7 απεικονίζει την κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα του πρωτεύοντος χρήστη ως προς τον κανονικοποιημένο του εκθέτη QoS  $a_{PU}$  για διαφορετικές τιμές του εκθέτη QoS του δευτερεύοντος χρήστη  $a_{SU}$ . Όπως αποδεικνύεται στην προηγούμενη υποενότητα, παρατηρείται ότι οι περιορισμοί μέσης παρεμβολής οδηγούν σε καλύτερα αποτελέσματα όταν ο πρωτεύων χρήστης έχει πιο ευέλικτες απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας. Αντίθετα, οι στιγμιαίοι περιορισμοί είναι περισσότερο κατάλληλοι όταν ο πρωτεύων χρήστης έχει αυστηρές απαιτήσεις QoS. Μια άλλη ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι για υψηλότερες τιμές του εκθέτη QoS του δευτερεύοντος χρήστη  $a_{SU}$ , η αποτελεσματική χωρητικότητα του πρωτεύοντος χρήστη μειώνεται, υπό τους μέσους περιορισμούς. Αυτό δείχνει ότι οι απαιτήσεις ποιότητας του δευτερεύοντος χρήστη επηρεάζουν επίσης το μέγιστο ρυθμό που μπορεί να πετύχει ο πρωτεύων χρήστης για συγκεκριμένες απαιτήσεις QoS. Αντίθετα, όπως είναι αναμενόμενο, η αποτελεσματική χωρητικότητα του πρωτεύοντος χρήστη για τα σενάρια στιγμιαίας παρεμβολής δεν εξαρτάται από το  $a_{SU}$ .

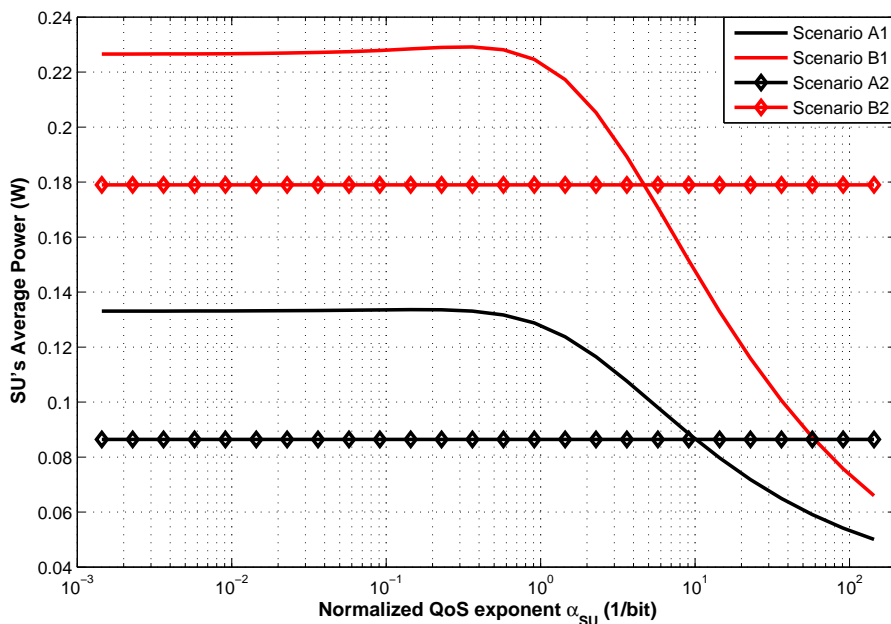
Μια άλλη σημαντική μετρική για την επικοινωνία του πρωτεύοντος χρήστη είναι η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας του (outage probability). Προκειμένου, να μελετηθεί αναλυτικά η επίδραση των περιορισμών παρεμβολής στην απόδοση της επικοινωνίας του πρωτεύοντος χρήστη, το σχήμα 7.8 αναπαριστά την πιθανότητα outage για όλα τα διαφορετικά σενάρια και για δύο διαφορετικές τιμές του κανονικοποιημένου εκθέτη QoS  $a_{SU}$ . Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε αυτή την περίπτωση, οι περιορισμοί του αντίστροφου λόγου SINR και παρεμβολής έχουν θεωρηθεί ότι λαμβάνουν τέτοιες τιμές έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ένα συγκεκριμένο επίπεδο ποιότητας επικοινωνίας στον πρωτεύοντα χρήστη ( $Q_{ISINR} = -10$ dB), ενώ το κατώφλι outage SINR ποικίλει από -5 έως 8 dB. Η συνεχής, μαύρη καμπύλη με τους κυκλικούς δείκτες αναπαριστά την πιθανότητα ο πρωτεύων χρήστης να πέσει σε outage λόγω των συνθηκών του δικού του καναλιού, δίχως να λαμβάνεται υπόψη η παρεμβολή από



Σχήμα 7.8: Πιθανότητα διακοπής λειτουργίας του πρωτεύοντος χρήστη ως προς διαφορετικά κατώφλια outage SINR.

το δευτερεύοντα χρήστη. Μια αρχική παρατήρηση είναι ότι οι στιγμιαίοι περιορισμοί οδηγούν σε χαμηλότερη πιθανότητα διακοπής λειτουργίας του πρωτεύοντος χρήστη σε σχέση με τους αντίστοιχους μέσους περιορισμούς, ανεξάρτητα από τον εκθέτη ποιότητας  $a_{SU}$ . Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο δεδομένου ότι η στιγμιαία φύση των περιορισμών είναι πιο αυστηρή για τον δευτερεύοντα χρήστη. Επιπλέον, παρατηρείται ότι χρησιμοποιώντας τον περιορισμό στιγμιαίου SINR, εξασφαλίζεται ουσιαστικά ότι η λειτουργία του πρωτεύοντος χρήστη δεν διακόπτεται λόγω της παρουσίας του δευτερεύοντος χρήστη.

Όπως παρατηρείται στο σχήμα 7.8, στην περίπτωση που ο δευτερεύων χρήστης έχει χαλαρές απαιτήσεις QoS ( $a_{SU} = 0.01$ ), οι περιορισμοί αντίστροφου λόγου SINR οδηγούν σε σημαντικά χαμηλότερες τιμές της πιθανότητας διακοπής λειτουργίας σε σχέση με τους περιορισμούς ισχύος παρεμβολής, για χαμηλότερες τιμές του κατωφλίου outage. Αντίθετα, για υψηλότερες τιμές του κατωφλίου outage SINR, οι περιορισμοί ισχύος παρεμβολής οδηγούν σε χαμηλότερη πιθανότητα outage για τον πρωτεύοντο χρήστη. Σε περίπτωση που ο δευτερεύων χρήστης έχει αυστηρότερες απαιτήσεις QoS ( $a_{SU} = 10$ ), η πιθανότητα outage του πρωτεύοντος χρήστη έχει πολύ μικρότερες τιμές για το σενάριο με τους περιορισμούς του αντίστροφου SINR, ανεξάρτητα από την τιμή του κατωφλίου διακοπής λειτουργίας. Η επίδραση του εκθέτη QoS του δευτερεύοντος χρήστη στο SINR του πρωτεύοντος χρήστη μπορεί να δικαιολογηθεί δεδομένου ότι η μέση εκχωρούμενη ισχύς του δευτερεύοντος χρήστη μεταβάλλεται σύμφωνα με την παράμετρο  $a_{SU}$ . Πιο συγκεκριμένα, όπως είναι εμφανές στο σχήμα 7.9, η μέση ισχύς του δευτερεύοντος χρήστη για τα σενάρια με τους μέσους περιορισμούς μειώνεται καθώς αυξάνεται ο εκθέτης QoS. Επομένως, για υψηλότερες τιμές της παραμέτρου  $a_{SU}$ , η παρεμβολή από το δευτερεύοντα χρήστη στον πρωτεύοντα χρήστη παίρνει χαμηλότερες τιμές, με αποτέλεσμα να οδηγεί σε μικρότερες τιμές της πιθανότητας διακοπής λειτουργίας. Όπως είναι αναμενόμενο, σε περίπτωση των στιγμιαίων περιορισμών, η μέση ισχύς του δευτερεύοντος χρήστη παραμένει σταθερή, ανεξάρτητα από το  $a_{SU}$ , το οποίο επαληθεύει το γεγονός ότι η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας σε αυτές τις περιπτώσεις δεν επηρεάζεται από τη συγκεκριμένη παράμετρο.



Σχήμα 7.9: Μέση ισχύς του δευτερεύοντος χρήστη ως προς τον κανονικοποιημένο εκθέτη QoS  $\alpha_{SU}$ .

## 7.4 Μηχανισμός ελέγχου ισχύος για παροχή QoS σε γνωστικά δορυφορικά - επίγεια δίκτυα

Η αυξανόμενη ζήτηση για πολυμεσικές υπηρεσίες υψηλού ρυθμού μετάδοσης σε συνδυασμό με την υπο-χρησιμοποίηση των περιορισμένων διαθέσιμων φασματικών πόρων στις δορυφορικές ζώνες συχνοτήτων οδήγησαν, πρόσφατα, τους ερευνητές να προτείνουν την έννοια των γνωστικών δορυφορικών-επίγειων δικτύων. Θεωρώντας τη συγκεκριμένη καινοτόμο αρχιτεκτονική, σε αυτήν την ενότητα, προτείνεται ένας αποδοτικός μηχανισμός διαχείρισης ραδιοπόρων για το επίγειο δίκτυο, που αντιστοιχεί στο δευτερεύον σύστημα. Συγκεκριμένα, αναλύεται ένας καινοτόμος αλγόριθμος εκχώρησης ισχύος, ο οποίος βελτιστοποιεί την αποτελεσματική χωρητικότητα της επίγειας ζεύξης, ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζει μια συγκεκριμένη πιθανότητα διακοπής λειτουργίας για τη δορυφορική ζεύξη. Επιπλέον, για το προτεινόμενο σχήμα εκχώρησης ισχύος, μελετάται τόσο η περίπτωση της τέλει γνώσης CSI, όσο και η περίπτωση της ατελούς γνώσης CSI και σχολιάζονται αναλυτικά τα αριθμητικά αποτελέσματα έτσι ώστε να αξιολογηθεί η επίδοση του προτεινόμενου μηχανισμού.

Αρχικά, παρουσιάζεται μια σύντομη εισαγωγή καθώς και η περιγραφή του μοντέλου συστήματος που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη περίπτωση. Στη συνέχεια, περιγράφεται αναλυτικά το πρόβλημα ελέγχου ισχύος και υπολογίζεται η λύση του τόσο στην περίπτωση της τέλει γνώσης CSI, όσο και στην περίπτωση της ατελούς γνώσης CSI. Τέλος, παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης.

### 7.4.1 Εισαγωγή-Μοντέλο Συστήματος

Όπως αναφέρεται στα προηγούμενα κεφάλαια, τα τελευταία χρόνια εμφανίζεται μια αυξανόμενη ζήτηση για υπηρεσίες πολυμέσων υψηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, η οποία οδηγεί σε μια συνεχώς αυξανόμενη αγορά για ασύρματες υπηρεσίες. Ταυτόχρονα όμως, οι διαθέσιμοι φασματικοί

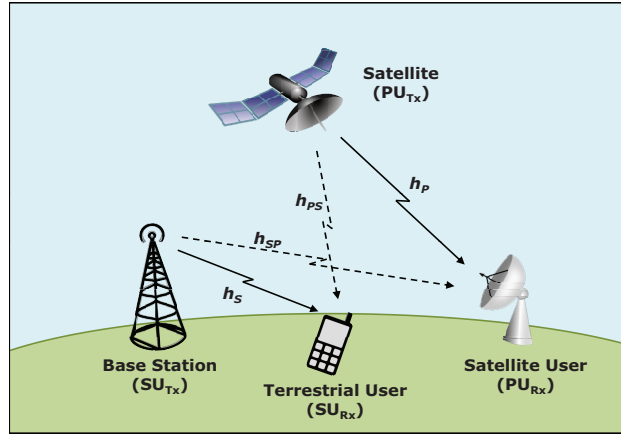
πόροι είναι περιορισμένοι, λόγω της στατικής εκχώρησης συχνοτήτων των ήδη προτυποποιημένων ασύρματων συστημάτων. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην ανάγκη για εξερεύνηση νέων αρχιτεκτονικών δικτύων που θα είναι σε θέση να παρέχουν υπηρεσίες υψηλής ρυθμαπόδοσης και ευρείας κάλυψης. Παράλληλα, βασικοί φυσικοί περιορισμοί, όπως για παράδειγμα οι απαιτήσεις ισχύος ή οι διαφορετικοί τύποι κεραιών για κάλυψη ευρείας περιοχής, οδηγούν στην εξάρτηση των επίγειων ασύρματων επικοινωνιών από τις δορυφορικές επικοινωνίες (Kandeean et al., 2010). Επομένως, είναι εμφανές ότι η δορυφορική τεχνολογία επικοινωνιών είναι σε θέση να καλύψει τυχόν ελαττώματα που παρουσιάζονται στα επίγεια τηλεπικοινωνιακά συστήματα, με αποτέλεσμα, η μελέτη ενός υβριδικού συστήματος (δορυφορικό/επίγειο) να αποτελεί ένα σημαντικό ερευνητικό πεδίο, το οποίο έχει αναλυθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία (Evans et al., 2005).

Ωστόσο, η στατική εκχώρηση των φασματικών ραδιοπόρων δεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις των προτεινόμενων ετερογενών ασύρματων δικτύων. Προκειμένου να είναι εφικτή η συνύπαρξη των επίγειων και των δορυφορικών δικτύων στην ίδια φασματική ζώνη απαιτούνται λειτουργίες ανίχνευσης του εύρους ζώνης καθώς και λειτουργίες για τη δυναμική εκχώρηση του. Προς αυτή την κατεύθυνση, το ενδιαφέρον των ομάδων προτυποποίησης (όπως για παράδειγμα του οργανισμού ETSI) και των ερευνητών έχει επικεντρωθεί στην επέκταση της έννοιας του γνωστικού συστήματος στα δορυφορικά επίγεια δίκτυα (Kandeean et al., 2010), (Sharma et al., 2012). Η συγκεκριμένη έννοια αποτελεί μια υποσχόμενη αρχιτεκτονική δικτύου που επιτρέπει τη συνύπαρξη ενός δορυφορικού δικτύου με ένα επίγειο, το οποίο λειτουργεί στην ίδια ζώνη συχνοτήτων. Για το σενάριο των γνωστικών δορυφορικών-επίγειων δικτύων, θα πρέπει να σχεδιαστούν κατάλληλα διάφορες γνωστικές λειτουργίες, έτσι ώστε να βελτιωθεί η επικοινωνία των δορυφορικών χρηστών που έχουν μη ευνοϊκές συνθήκες διάδοσης, παρέχοντας ταυτόχρονα συγκεκριμένη ποιότητα επικοινωνίας και στους επίγειους χρήστες. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι παρόλο που στη βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα ερευνητικών εργασιών που σχετίζονται με τα επίγεια γνωστικά συστήματα, η έρευνα στην περίπτωση των γνωστικών δορυφορικών επικοινωνιών είναι αρκετά περιορισμένη. Ορισμένα βασικά μοντέλα συστήματος που ενσωματώνουν τα γνωστικά χαρακτηριστικά έχουν παρουσιαστεί στο (Sharma et al., 2012). Ωστόσο, προκειμένου να εξασφαλισθεί η υψηλή απόδοση του δικτύου, θα πρέπει να μελετηθούν επίσης αποδοτικά σχήματα διαχείρισης ραδιοπόρων που να λαμβάνουν υπόψη τα εγγενή χαρακτηριστικά τόσο των δορυφορικών, όσο και των επίγειων δικτύων.

Στη συγκεκριμένη προσέγγιση, θεωρείται η καινοτόμος αρχιτεκτονική ενός γνωστικού δορυφορικού επίγειου δικτύου, όπου ένα επίγειο δίκτυο το οποίο λειτουργεί ως δευτερεύον σύστημα, συνυπάρχει με ένα δορυφορικό δίκτυο που έχει το ρόλο του πρωτεύοντος συστήματος. Επιπλέον, προτείνεται ένα αποδοτικό σχήμα εκχώρησης ισχύος για το επίγειο δίκτυο, το οποίο εξασφαλίζει συγκεκριμένη ποιότητα επικοινωνίας για τους χρήστες και των δύο δικτύων. Συγκεκριμένα, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η παροχή ποιότητας υπηρεσίας στο επίγειο δίκτυο, χρησιμοποιείται η έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας, ενώ ταυτόχρονα η ποιότητα επικοινωνίας της δορυφορικής ζεύξης εξασφαλίζεται μέσω ενός περιορισμού για δεδομένη πιθανότητα διακοπής λειτουργίας. Το προτεινόμενο σχήμα αποτελεί ένα από τα πρώτα σχήματα διαχείρισης ραδιοπόρων για την καινοτόμο αρχιτεκτονική των γνωστικών δορυφορικών-επίγειων δικτύων, το οποίο λαμβάνει υπόψη τις απαιτήσεις ποιότητας και των δύο συστημάτων.

Η αρχιτεκτονική του γνωστικού δορυφορικού-επίγειου, που θεωρείται στην υπόλοιπη υποενότητα, απεικονίζεται στο σχήμα 7.10. Συγκεκριμένα, δεδομένου ότι το δορυφορικό σύστημα αντιμετωπίζει συνήθως δυσμενέστερες συνθήκες διάδοσης, θεωρείται ότι έχει υψηλότερη προτεραιότητα και αποτελεί το πρωτεύον σύστημα, ενώ το επίγειο δίκτυο αντιστοιχεί στο δευτερεύον σύστημα. Από





Σχήμα 7.10: Σενάριο γνωστικού δορυφορικού επίγειου δικτύου υπό μελέτη.

τεχνολογικής πλευράς, το δορυφορικό σύστημα μπορεί να είναι ένα σύστημα DVB-SH και το επίγειο σύστημα μπορεί να είναι είτε ένα δίκτυο UMTS, είτε ένα σύστημα LTE. Το σχήμα 7.10 απεικονίζει το προτεινόμενο μοντέλο συστήματος, στο οποίο θεωρείται μια underlay προσέγγιση κατανομής εύρους ζώνης για την κάτω ζεύξη. Για τις επίγειες ζεύξεις ( $h_s, h_{sp}$ ) θεωρούνται ασυσχέτιστα κανάλια εξασθένησης Nakagami μοναδιαίας μέσης τιμής (Simon & Alouini, 2005). Επομένως, τα αντίστοιχα κέρδη ισχύος καναλιού θεωρείται ότι ακολουθούν τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας που δίνεται από τη σχέση:

$$f_{h_j}(h_j) = \frac{m_j^{m_j} h_j^{m_j-1}}{\Gamma(m_j)} e^{-m_j h_j} \quad (7.40)$$

όπου  $\Gamma(\cdot)$  είναι η συνάρτηση Γάμμα και  $m_j$  είναι η παράμετρος Nakagami.

Όσον αφορά τις δορυφορικές ζεύξεις ( $h_p, h_{ps}$ ), χρησιμοποιείται ένα γνωστό μοντέλο καναλιού για κινητά δορυφορικά συστήματα (Abdi et al., 2003), με βάση το οποίο η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για τα αντίστοιχα κέρδη ισχύος καναλιού δίνεται από τη σχέση:

$$f_{h_j}(h_j) = K \exp\left(-\frac{h_j}{2b_0}\right) {}_1F_1(m_j, 1, c \cdot h_j) \quad (7.41)$$

όπου

$$K = \frac{1}{2b_0} \left( \frac{2b_0 m_j}{2b_0 m_j + \Omega} \right)^{m_j}, \quad c = \frac{\Omega}{2b_0(2b_0 m_j + \Omega)}$$

και  $2b_0$  είναι η μέση ισχύς της συνιστώσας σκέδασης,  $\Omega$  είναι η μέση ισχύς της LoS συνιστώσας και  ${}_1F_1(\cdot, \cdot, \cdot)$  είναι η συμβάλλουσα υπεργεωμετρική συνάρτηση. Επιπλέον, θεωρείται ότι τα πακέτα του στρώματος ζεύξεως δεδομένων οργανώνονται σε πλαίσια με διάρκεια  $T_f$ , το εύρος ζώνης του συστήματος είναι ίσο με  $B$  και η φασματική πυκνότητα του θορύβου είναι  $N_0$ .

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι, δεδομένης της φύσεως εκπομπής του δορυφορικού δικτύου, θεωρείται ότι ο δορυφόρος εκπέμπει με σταθερή ισχύ ίση με  $P_p$ , χωρίς να μπορεί να αισθανθεί τη συνύπαρξη με το επίγειο δίκτυο. Αντίθετα, το επίγειο δίκτυο θεωρείται ότι διαθέτει γνωστικές ικανότητες. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι ο σταθμός βάσης είναι ικανός να προσαρμόζει την ισχύ εκπομπής του ανάλογα με την παρουσία του δορυφορικού δικτύου και των χαρακτηριστικών του ασύρματου καναλιού, έτσι ώστε να μην υποβαθμίζει την δορυφορική ζεύξη.

### 7.4.2 Μηχανισμός εκχώρησης ισχύος

Έχοντας περιγράψει την αρχιτεκτονική του θεωρούμενου μοντέλου συστήματος, στη συνέχεια, παρουσιάζεται το πρόβλημα διαχείρισης ραδιοπόρων και η αντίστοιχη βέλτιστη λύση για τις περιπτώσεις της τέλει και της ατελούς εκτίμησης καναλιού.

#### Μηχανισμός εκχώρησης ισχύος για τέλεια γνώση CSI

Σε αυτή την περίπτωση, υποθέεται ότι ο σταθμός βάσης γνωρίζει την κατάσταση καναλιού κάθε ζεύξης, αποκτώντας την είτε απευθείας συνεργαζόμενος με το δορυφορικό δίκτυο, είτε άμεσα μέσω ενός διαχειριστή εύρους ζώνης. Στόχος του συγκεκριμένου προβλήματος διαχείρισης ραδιοπόρων είναι η μεγιστοποίηση του ρυθμού της επίγειας ζεύξης για συγκεκριμένες απαιτήσεις QoS χωρίς την υποβάθμιση της ποιότητας της δορυφορικής ζεύξης. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιείται η έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας. Συγκεκριμένα, στην ανάλυση που ακολουθεί χρησιμοποιείται η έννοια της κανονικοποιημένης αποτελεσματικής χωρητικότητας, η οποία ορίζεται ως:

$$E_c(\theta) = -\frac{1}{\theta T_f B} \ln \left( \mathbf{E} \left\{ e^{-\theta R[n]} \right\} \right) \quad (7.42)$$

όπου το  $n$  αναπαριστά το χρονικό δείκτη και  $R[n]$  είναι η εργοδική, στοχαστική διαδικασία εξυπηρέτησης διακριτού χρόνου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στη συνέχεια της θεωρητικής ανάλυσης, ο χρονικός δείκτης  $n$  παραλείπεται για λόγους απλότητας.

Στον προτεινόμενο μηχανισμό, υπολογίζεται η βέλτιστη εκχώρηση ισχύος για το σταθμό βάσης, έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα της επίγειας ζεύξης, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα μια δεδομένη πιθανότητα outage για τη δορυφορική ζεύξη. Δεδομένου ότι η χωρητικότητα καναλιού για την επίγεια ζεύξη δίνεται από τη σχέση:

$$R = T_f B \log_2 \left( 1 + \frac{P_s h_s}{P_p h_{ps} + N_0 B} \right) \quad (7.43)$$

και ορίζοντας ως  $a = \theta T_f B / \ln(2)$ , τον κανονικοποιημένο εκθέτη QoS, το πρόβλημα εκχώρησης ραδιοπόρων μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\begin{aligned} \max_{P_s \in [0, P_{pk}]} E_c(a, P_s) &= -\frac{1}{a \ln(2)} \ln \left( \mathbf{E} \left\{ \left[ \left( 1 + \frac{P_s h_s}{P_p h_{ps} + N_0 B} \right)^{-a} \right] \right\} \right) \\ \text{s.t. C.1 :Pr} &\left\{ \frac{h_p P_p}{h_{sp} P_s + N_0 B} < \gamma_{out} \right\} \leq Q_{out} \end{aligned} \quad (7.44)$$

όπου  $P_s = P_s(a, h_{sp}, h_s, h_{ps}, h_p)$  και  $P_{pk}$  αναπαριστούν τη στιγμιαία και τη μέγιστη ισχύ εκπομπής του σταθμού βάσης, αντίστοιχα, και  $P_p$ ,  $\gamma_{out}$  και  $Q_{out}$  είναι η ισχύς εκπομπής, το κατώφλι του λόγου outage SINR και ο περιορισμός της πιθανότητας outage της δορυφορικής ζεύξης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι συγκεκριμένες παράμετροι του συστήματος εξαρτώνται από την επίγεια τεχνολογία καθώς και από τις παρεχόμενες δορυφορικές υπηρεσίες. Προκειμένου να είναι εφικτή η ικανοποίηση του περιορισμού (C.1), θεωρείται ότι για το σηματοθορυβικό λόγο του δορυφόρου, ο οποίος ορίζεται

ως  $\text{SNR}_{\text{sat}} = h_p P_p / (N_0 B)$  ισχύει ότι:

$$\Pr\{\text{SNR}_{\text{sat}} < \gamma_{\text{out}}\} < Q_{\text{out}}. \quad (7.45)$$

Δεδομένου ότι η συνάρτηση του φυσικού λογαρίθμου είναι μια αύξουσα συνάρτηση, το πρόβλημα μεγιστοποίησης (7.44) μπορεί να μετατραπεί σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης της βοηθητικής συνάρτησης:

$$\varphi(a, P_s) = \mathbf{E} \left\{ \left[ \left( 1 + \frac{P_s h_s}{P_p h_{ps} + N_0 B} \right)^{-a} \right] \right\}. \quad (7.46)$$

Επιπλέον, ο περιορισμός της πιθανότητας outage (C.1) μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\mathbf{E} \left\{ 1 - H \left[ \frac{1}{h_{sp}} \left( \frac{h_p P_p}{\gamma_{\text{out}}} - N_0 B \right) - P_s \right] \right\} \leq Q_{\text{out}} \quad (7.47)$$

όπου  $H[\cdot]$  είναι η γνωστή βηματική συνάρτηση Heaviside (Jeffrey & Zwillinger, 2007). Για λόγους ευκολίας, ορίζεται η παράμετρος:

$$P_{\text{out}}(h_{sp}, h_p) = \frac{1}{h_{sp}} \left( \frac{h_p P_p}{\gamma_{\text{out}}} - N_0 B \right), \quad (7.48)$$

όπου οι θετικές τιμές της  $P_{\text{out}}(h_{sp}, h_p)$  αναπαριστούν το όριο μέγιστης ισχύος με το οποίο μπορεί να εκπέμπει ο σταθμός βάσης, χωρίς να προκαλεί outage στη δορυφορική ζεύξη.

Επομένως, το ισοδύναμο πρόβλημα ελαχιστοποίησης μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\begin{aligned} \min_{P_s \in [0, P_{pk}]} \varphi(a, P_s) &= \mathbf{E} \left\{ \left[ \left( 1 + \frac{P_s h_s}{P_p h_{ps} + N_0 B} \right)^{-a} \right] \right\} \\ \text{s.t. C.1} &: \mathbf{E} \{ 1 - H [P_{\text{out}}(h_{sp}, h_p) - P_s] \} \leq Q_{\text{out}} \end{aligned} \quad (7.49)$$

Για να υπολογιστεί η λύση του προβλήματος (7.49), χρησιμοποιείται η μέθοδος δυαδικού προβλήματος Lagrange. Αναλυτικότερα, αρχικά εκφράζεται η Lagrangian του προβλήματος, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$L(P_s, \lambda) = \varphi(a, P_s) + \lambda (\mathbf{E} \{ 1 - H [P_{\text{out}}(h_{sp}, h_p) - P_s] \} - Q_{\text{out}}) \quad (7.50)$$

όπου  $\lambda$  είναι ο πολλαπλασιαστής Lagrange που συνδέεται με την ικανοποίηση του περιορισμού (C.1). Στη συνέχεια, υπολογίζεται η δυαδική συνάρτηση Lagrange  $g(\lambda)$ , η οποία ορίζεται ως:

$$g(\lambda) = \min_{P_s \in [0, P_{pk}]} L(P_s, \lambda) \quad (7.51)$$

Επομένως, το δυαδικό πρόβλημα μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$\max_{\{\lambda\}: \lambda \geq 0} g(\lambda). \quad (7.52)$$

Δεδομένου ότι το συγκεκριμένο πρόβλημα αποτελεί ένα κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης με ένα εφικτό σημείο και χρησιμοποιώντας τη συνθήκη Slater (Θεώρημα 3.1), αποδεικνύεται ότι ισχύουν οι συνθήκες αυστηρής δυαδικότητας (Boyd & Vandenberghe, 2004). Επομένως, το αρχικό πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί ισοδύναμα λύνοντας το δυαδικό πρόβλημα που ορίζεται στην (7.52), δηλαδή, ελαχιστοποιώντας αρχικά τη Lagrangian, ώστε να βρεθεί η δυαδική συνάρτηση για δεδομένη δυαδική μεταβλητή και στη συνέχεια μεγιστοποιώντας τη δυαδική συνάρτηση ως προς τη μεταβλητή  $\lambda$ . Θεωρώντας αρχικά το πρόβλημα για την εύρεση της δυαδικής συνάρτησης για δεδομένο  $\lambda$ , παρατηρείται ότι η συνάρτηση αυτή μπορεί να οριστεί επίσης ως εξής:

$$g(\lambda) = \mathbf{E}\{g'(\mathbf{h})\} - \lambda \cdot Q_{out} \quad (7.53)$$

όπου

$$g'(\mathbf{h}) = \min_{P_s(\mathbf{h}) \in [0, P_{pk}]} \left[ \left( 1 + \frac{P_s(\mathbf{h})h_s}{P_p h_{ps} + N_0 B} \right)^{-a} \right] + \lambda (1 - H[P_{out}(h_{sp}, h_p) - P_s(\mathbf{h})]) \quad (7.54)$$

Επομένως, η δυαδική συνάρτηση μπορεί να βρεθεί λύνοντας τη συνάρτηση  $g'(\mathbf{h})$  για κάθε στιγμιότυπο  $\mathbf{h}$  των καναλιών εξασθένησης. Συνεπώς, το αρχικό πρόβλημα βελτιστοποίησης αποσυντίθεται ουσιαστικά σε παράλληλα υπο-προβλήματα για κάθε στιγμιότυπο των καναλιών εξασθένησης, όπου κάθε υπο-πρόβλημα δίνεται από:

$$\min_{P_s \in [0, P_{pk}]} \left( 1 + \frac{P_s h_s}{P_p h_{ps} + N_0 B} \right)^{-a} + \lambda (1 - H[P_{out}(h_{sp}, h_p) - P_s]) \quad (7.55)$$

Για την επίλυση του προβλήματος ελαχιστοποίησης (7.55) για κάθε κατάσταση εξασθένησης, μελετώνται τρεις διαφορετικές περιοχές κατάστασης καναλιών.

1) *Περιοχή A* ( $P_{out}(h_{sp}, h_p) < 0$ ): Για τη συγκεκριμένη περιοχή εξασθένησης, η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος μπορεί να απλοποιηθεί στην ακόλουθη συνάρτηση:

$$s(P_s) = \left( 1 + \frac{P_s h_s}{P_p h_{ps} + N_0 B} \right)^{-a} + \lambda. \quad (7.56)$$

Όπως είναι εμφανές, σε αυτήν την περιοχή καναλιών, η δορυφορική ζεύξη βρίσκεται σε outage λόγω των συνθηκών του δικού της καναλιού. Επομένως, ακόμα και στην περίπτωση κατά την οποία ο σταθμός βάσης εκπέμπει χρησιμοποιώντας το μέγιστο επίπεδο ισχύος, δεν επηρεάζει την πιθανότητα outage της δορυφορικής ζεύξης. Δεδομένου, επίσης, ότι η (7.56) είναι μια φθίνουσα συνάρτηση του  $P_s$ , συμπεραίνεται ότι η βέλτιστη ισχύς για την συγκεκριμένη περιοχή είναι ίση με  $P_s^* = P_{pk}$ .

2) *Περιοχή B* ( $P_{out}(h_{sp}, h_p) > P_{pk}$ ): Δεδομένου ότι  $P_s \in [0, P_{pk}]$ , η αντικειμενική συνάρτηση σε αυτή την περιοχή μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$u(P_s) = \left( 1 + \frac{P_s h_s}{P_p h_{ps} + N_0 B} \right)^{-a}. \quad (7.57)$$

Παρομοίως με την περιοχή A, παρατηρείται ότι η (7.57) είναι φθίνουσα συνάρτηση του  $P_s$ , επομένως, συμπεραίνεται εύκολα ότι η βέλτιστη εκχώρηση ισχύος είναι  $P_s^* = P_{pk}$ .

3) *Περιοχή C* ( $0 \leq P_{out}(h_{sp}, h_p) \leq P_{pk}$ ): Η συγκεκριμένη περιοχή διαχωρίζεται περαιτέρω σε δύο υποπεριοχές. Στην περίπτωση κατά την οποία ισχύει  $P_s \leq P_{out}(h_{sp}, h_p)$  (Περιοχή  $C_1$ ), η αντικειμενική συνάρτηση δίνεται από την (7.57) και η βέλτιστη εκχώρηση ισχύος δίνεται από τη σχέση  $P_s^* = P_{out}(h_{sp}, h_p)$ . Στην αντίθετη περίπτωση, αν  $P_s > P_{out}(h_{sp}, h_p)$  (Περιοχή  $C_2$ ), η αντικειμενική συνάρτηση δίνεται από την (7.56) και η βέλτιστη ισχύς είναι  $P_s^* = P_{pk}$ . Επομένως, η βέλτιστη ισχύς σε αυτή την περιοχή μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$P_s^* = \begin{cases} P_{pk}, & \text{αν } s(P_{pk}) < u(P_{out}(h_{sp}, h_p)) \\ P_{out}(h_{sp}, h_p), & \text{αν } s(P_{pk}) \geq u(P_{out}(h_{sp}, h_p)) \end{cases} \quad (7.58)$$

Συμπερασματικά, η βέλτιστη εκχώρηση ισχύος μπορεί να βρεθεί για κάθε κατάσταση καναλιού εξασθένησης συνδυάζοντας κατάλληλα τις παραπάνω περιοχές. Αναλυτικότερα, η βέλτιστη ισχύς δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$P_s^* = \begin{cases} P_{pk}, & \text{για } P_{out}(h_{sp}, h_p) < 0 \\ P_{pk}, & \text{για } P_{out}(h_{sp}, h_p) > P_{pk} \\ P_{pk}, & \text{για } 0 \leq P_{out}(h_{sp}, h_p) \leq P_{pk} \text{ και } s(P_{pk}) < u(P_{out}(h_{sp}, h_p)) \\ P_{out}(h_{sp}, h_p), & \text{για } 0 \leq P_{out}(h_{sp}, h_p) \leq P_{pk} \text{ και } s(P_{pk}) \geq u(P_{out}(h_{sp}, h_p)) \end{cases} \quad (7.59)$$

Από τη σχέση (7.59), είναι εμφανές ότι λόγω της περιοχής  $C$ , η στιγμιαία ισχύς εξαρτάται σημαντικά από τις απαιτήσεις QoS του επίγειου χρήστη. Ωστόσο, όπως αποδεικνύεται στη συνέχεια, η μέση ισχύς του σταθμού βάσης εξαρτάται αποκλειστικά από τις παραμέτρους εξασθένησης της δορυφορικής ζεύξης και της ζεύξης παρεμβολής από το σταθμό βάσης στο δορυφορικό χρήστη και είναι ανεξάρτητη από τον εκθέτη QoS.

Αναλυτικότερα, δεδομένης της βέλτιστης εκχώρησης ισχύος που δίνεται από τη σχέση (7.59), η μέση ισχύς εκπομπής υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}[P_s^*] &= P_{pk} \cdot Pr\{P_{out}(h_{sp}, h_p) < 0\} + P_{pk} \cdot Pr\{P_{out}(h_{sp}, h_p) > P_{pk}\} \\ &+ P_{pk} \cdot Pr\{(P_s^* = P_{pk}) \cap (0 \leq P_{out}(h_{sp}, h_p) \leq P_{pk})\} + \mathbf{E}[P_{out}(h_{sp}, h_p)]_{C_2} \end{aligned} \quad (7.60)$$

όπου  $\mathbf{E}[P_s^*]_x$  είναι η αναμενόμενη τιμή της βέλτιστης ισχύος στην περιοχή  $x = \{A, B, C_1, C_2\}$ . Δεδομένου ότι οι δύο πρώτοι όροι της (7.60) εξαρτώνται μόνο από το  $P_{out}(h_{sp}, h_p)$ , αρκεί να αποδειχθεί ότι οι δύο τελευταίοι όροι είναι ανεξάρτητοι από τον εκθέτη ποιότητας  $a$ . Από την ισότητα του (C.1), ισχύει ότι:

$$\begin{aligned} Pr\{P_s^* \leq P_{out}(h_{sp}, h_p)\} - Q_{out} &\Rightarrow Pr\{P_{out}(h_{sp}, h_p) \leq P_{pk}\} + \\ Pr\{(P_s^* = P_{out}(h_{sp}, h_p)) \cap (0 \leq P_{out}(h_{sp}, h_p) \leq P_{pk})\} &= 1 - Q_{out} \Rightarrow \\ \Rightarrow Pr\{(P_s^* = P_{pk}) \cap (0 \leq P_{out}(h_{sp}, h_p) \leq P_{pk})\} &= \\ Pr\{0 \leq P_{out}(h_{sp}, h_p) \leq P_{pk}\} - (1 - Q_{out} - Pr\{P_{out}(h_{sp}, h_p) > P_{pk}\}) & \end{aligned} \quad (7.61)$$

Επομένως, αποδεικνύεται ότι ο τρίτος όρος της (7.60) εξαρτάται μόνο από την τιμή του  $P_{out}(h_{sp}, h_p)$ . Επιπλέον, χρησιμοποιώντας την (7.61), αποδεικνύεται εύκολα ότι η περιοχή  $C_2$  είναι ανεξάρτητη από τον εκθέτη  $a$  και συνεπώς η μέση τιμή της βέλτιστης ισχύος στην περιοχή  $C_2$  είναι επίσης ανεξάρτητη από τον εκθέτη QoS.

### Μηχανισμός εκχώρησης ισχύος για ατελή γνώση CSI

Στην προηγούμενη υποενότητα, θεωρείται ότι ο σταθμός βάσης έχει τέλεια γνώση CSI όλων των ζευξεων, με αποτέλεσμα να είναι ικανός να προσαρμόσει βέλτιστα την ισχύ του σε κάθε στιγμιότυπο των καναλιών εξασθένησης. Ωστόσο, τις περισσότερες φορές, τα κέρδη καναλιού των ζευξεων προς το δορυφορικό χρήστη  $(h_p, h_{sp})$  δεν είναι διαθέσιμα στο σταθμό βάσης. Επομένως, ο προτεινόμενος αλγόριθμος εκχώρησης ισχύος πρέπει να τροποποιηθεί ώστε να λαμβάνει υπόψη την επίδραση της ατελούς εκτίμησης καναλιού.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, θεωρείται ότι τα εκτιμώμενα κέρδη ισχύος των καναλιών εξασθένησης  $\hat{g}_p$  και  $\hat{g}_{sp}$  δίνονται, αντίστοιχα, από τις σχέσεις:

$$\hat{g}_p = g_p + \tilde{g}_p \quad (7.62)$$

και

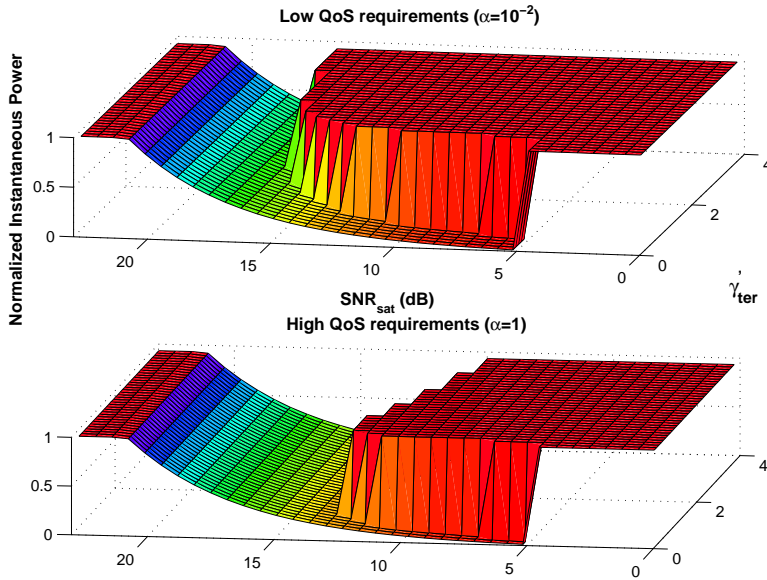
$$\hat{g}_{sp} = g_{sp} + \tilde{g}_{sp} \quad (7.63)$$

όπου  $\tilde{g}_p, \tilde{g}_{sp}$  αναπαριστούν τα σφάλματα εκτίμησης, τα οποία θεωρούνται ως κυκλικά συμμετρικές, γκαουσιανές τυχαίες μεταβλητές με διασπορά  $\sigma_p^2$  και  $\sigma_{sp}^2$ , αντίστοιχα. Όπως είναι αναμενόμενο, η ατελής εκτίμηση των κερδών ισχύος των καναλιών μπορεί να οδηγήσει είτε σε υπερεκτίμηση είτε σε υποεκτίμηση του λόγου SINR της πρωτεύουσας ζεύξης. Στην πρώτη περίπτωση, ο προτεινόμενος μηχανισμός εκχώρησης ισχύος θα οδηγήσει σε μια επιπρόσθετη αύξηση της πιθανότητα outage της δορυφορικής ζεύξης, κυρίως λόγω της μεγαλύτερης ισχύος που θα χρησιμοποιείται από το σταθμό βάσης ( $\hat{P}_{out} > P_{out}$ ). Από την άλλη μεριά, αν ο λόγος SINR της πρωτεύουσας ζεύξης υποεκτιμηθεί, χρησιμοποιώντας τον προτεινόμενο αλγόριθμο, σε περίπτωση που εκτιμάται λανθασμένα ότι η δορυφορική ζεύξη βρίσκεται σε outage, τότε ο σταθμός βάσης θα εκπέμπει με τη μέγιστη ισχύ, με αποτέλεσμα να προκαλεί πραγματικό outage στην πρωτεύουσα ζεύξη. Προκειμένου να περιοριστούν τα συγκεκριμένα φαινόμενα που οδηγούν σε αύξηση της πιθανότητας outage της δορυφορικής ζεύξης, προτείνεται η εισαγωγή ενός διαστήματος προστασίας  $\Delta\gamma_{out}$  στο κατώφλι outage SINR (όπου  $\Delta\gamma_{out} > 0$ ).

Επομένως, λύνεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης που ορίζεται στην (7.44) δεδομένου του τροποποιημένου περιορισμού για την πιθανότητα outage, που δίνεται από τη σχέση:

$$\Pr \left\{ \frac{\hat{h}_p P_p}{\hat{h}_{sp} P_s + N_0 B} < \gamma_{out} + \Delta\gamma_{out} \right\} \leq Q_{out} \quad (7.64)$$

και θεωρώντας τις εκτιμήσεις κέρδους καναλιού  $\hat{h}_p = |\hat{g}_p|^2$ ,  $\hat{h}_{sp} = |\hat{g}_{sp}|^2$ . Η βέλτιστη εκχώρηση ισχύος μπορεί να βρεθεί όπως στην προηγούμενη περίπτωση της τέλει γνώσης CSI. Το τροποποιημένο σχήμα αναμένεται να προκαλεί μικρότερη επιπρόσθετη πιθανότητα outage σε σχέση με το αρχικό σχήμα, δεδομένου ότι το διάστημα προστασίας έχει επιλεχθεί έτσι ώστε να περιορίζει την επίδραση των σφαλμάτων εκτίμησης. Ωστόσο, όπως είναι εμφανές από την (7.64), ενώ η αύξηση του διαστήματος προστασίας καταλήγει σε μείωση της επιπρόσθετης πιθανότητας outage της δορυφορικής ζεύξης,



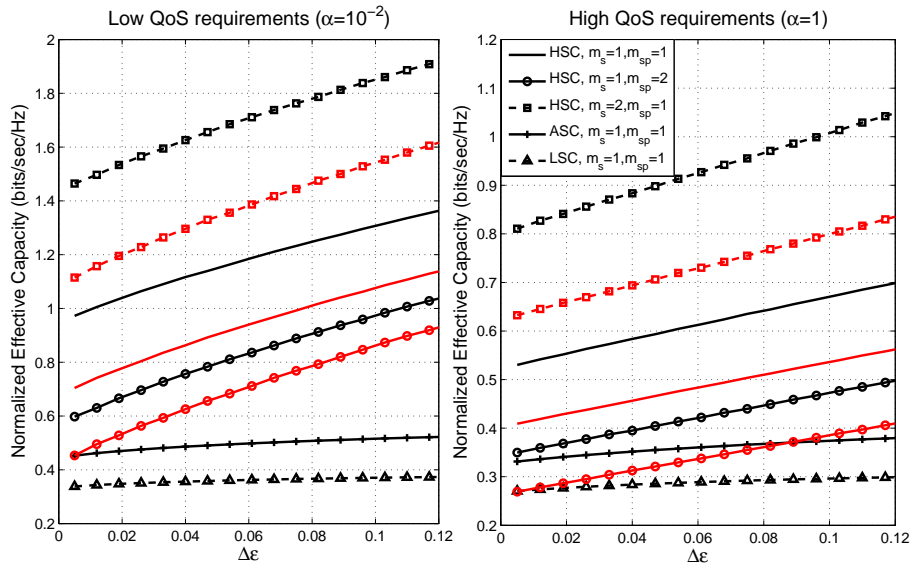
Σχήμα 7.11: Στιγμιαία εκχώρηση ισχύος του σταθμού βάσης ως προς  $\text{SNR}_{\text{sat}}$  και  $\gamma'_{\text{ter}}$ .

καταλήγει επίσης και σε μείωση της αποτελεσματικής χωρητικότητας της επίγειας ζεύξης. Συνεπώς, ένα βασικό πρόβλημα στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η κατάλληλη επιλογή του διαστήματος προστασίας, ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη συμπεριφορά του μηχανισμού τόσο από πλευράς αποτελεσματικής χωρητικότητας του επίγειου συστήματος, όσο και από πλευράς πιθανότητας outage της δορυφορικής ζεύξης.

### 7.4.3 Αριθμητική ανάλυση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

Σε αυτή την υποενότητα, μελετάται η ευαισθησία της βέλτιστης εκχώρησης ισχύος και της αντίστοιχης αποτελεσματικής χωρητικότητας ως προς τις παραμέτρους του συστήματος. Για το σενάριο προσομοίωσης, έχουν θεωρηθεί τυπικές τιμές των παραμέτρων όπως  $T_f = 10^{-6}$ ,  $B = 10^6$ ,  $N_0 = 10^{-8}$  και  $\gamma_{\text{out}} = 5\text{dB}$ . Οι παράμετροι καναλιού των δορυφορικών ζεύξεων παρουσιάζονται στον πίνακα 6.1 του προηγούμενου κεφαλαίου για κάθε σενάριο σκίασης, ενώ όσον αφορά τις επίγειες ζεύξεις, οι παράμετροι εξασθένησης έχουν θεωρηθεί ίσες με  $m_s = m_{sp} = 1$ , εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά. Η κανονικοποιημένη ισχύς εκπομπής του δορυφόρου υπολογίζεται θεωρώντας ότι ισχύει η σχέση  $Pr\{\text{SNR}_{\text{sat}} < \gamma_{\text{out}}\} = 10^{-3}$ , υπό συνθήκες μέτριας σκίασης. Για λόγους ευκολίας, ορίζεται η παράμετρος  $\gamma'_{\text{ter}} = h_s / (h_{ps}P_p + N_0B)$  ως δείκτης για το λόγο καναλιού προς παρεμβολή και θόρυβο του επίγειου χρήστη, καθώς και η παράμετρος  $\Delta\varepsilon = Q_{\text{out}} - Pr\{\text{SNR}_{\text{sat}} < \gamma_{\text{out}}\}$ , η οποία απεικονίζει την υποβάθμιση της πιθανότητας διακοπής λειτουργίας της δορυφορικής ζεύξης λόγω της παρεμβολής από το σταθμό βάσης.

Στο σχήμα 7.11, απεικονίζεται η στιγμιαία εκχώρηση ισχύος του σταθμού βάσης ως προς το σηματοθορυβικό λόγο ( $\text{SNR}_{\text{sat}}$ ) της δορυφορικής ζεύξης και την προαναφερόμενη παράμετρο  $\gamma'_{\text{ter}}$ , για χαμηλές και υψηλές απαιτήσεις QoS του επίγειου χρήστη. Αρχικά, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η απότομη πτώση της ισχύος εκπομπής χωρίζει ουσιαστικά το διάγραμμα σε δύο περιοχές ισχύος ανάλογα με το αν ο σταθμός βάσης προκαλεί ή όχι outage στη δορυφορική ζεύξη. Όπως ήταν αναμενόμενο, για  $\text{SNR}_{\text{sat}} \leq \gamma_{\text{out}}$ , η βέλτιστη ισχύς είναι ίση με την μέγιστη ισχύ ανεξάρτητα από την παράμετρο  $\gamma'_{\text{ter}}$  και τον εκθέτη QoS  $a$ . Ωστόσο, για μεγαλύτερες τιμές του  $\text{SNR}_{\text{sat}}$ , η βέλτιστη ισχύς

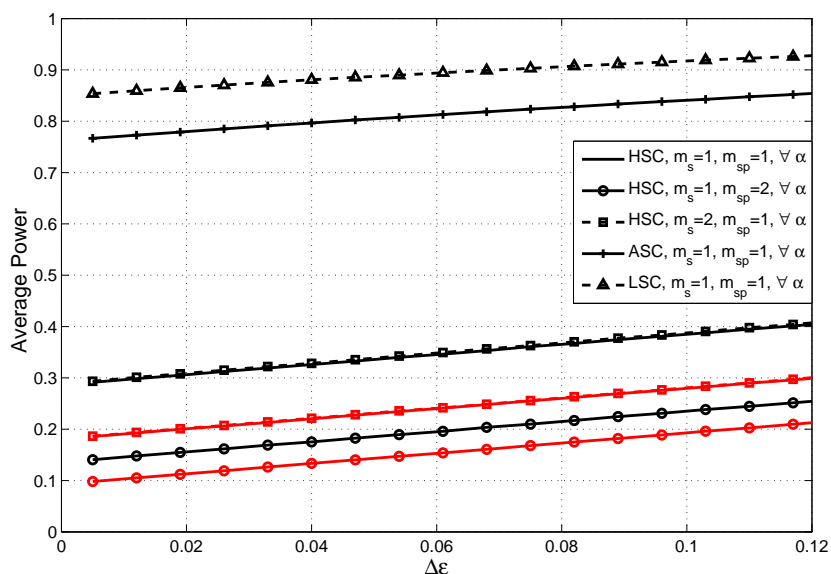


Σχήμα 7.12: Κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα ως προς  $\Delta\epsilon$ .

εξαρτάται από την τιμή του  $\gamma'_{ter}$ . Συγκεκριμένα, αν ο επίγειος χρήστης έχει χαμηλές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας ( $a = 10^{-2}$ ), ο σταθμός βάσης εκπέμπει με τη μέγιστη ισχύ όταν υπάρχουν ευνοϊκές συνθήκες της επίγειας ζεύξης (υψηλότερες τιμές του  $\gamma'_{ter}$ ), έτσι ώστε να μεγιστοποιήσει την αποτελεσματική του χωρητικότητα, ακόμα και αν προκαλεί outage στη δορυφορική ζεύξη. Αντίθετα, όταν η επίγεια ζεύξη έχει αυστηρές απαιτήσεις QoS, ο σταθμός βάσης εκχωρεί περισσότερη ισχύ για χαμηλές τιμές του  $\gamma'_{ter}$ , έτσι ώστε να εγγυάται την ποιότητα επικοινωνίας της συγκεκριμένης ζεύξης. Όσον αφορά την επίδραση του  $\text{SNR}_{\text{sat}}$  στην στιγμιαία ισχύ εκπομπής, παρατηρείται ότι καθώς βελτιώνονται οι συνθήκες καναλιού της δορυφορικής ζεύξης, ο σταθμός βάσης μπορεί να εκπέμπει σε υψηλότερα επίπεδα ισχύος χωρίς να διακόπτει τη λειτουργία της δορυφορικής ζεύξης.

Τα σχήματα 7.12 και 7.13 απεικονίζουν την κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα και τη μέση κανονικοποιημένη ισχύ του σταθμού βάσης, αντίστοιχα, ως προς την παράμετρο  $\Delta\epsilon$ , για διαφορετικές παραμέτρους του καναλιού και για τις περιπτώσεις της τέλει και της ατελούς εκτίμησης καναλιού. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι μαύρες καμπύλες αντιστοιχούν στην περίπτωση της τέλει εκτίμησης καναλιού, ενώ οι κόκκινες καμπύλες αντιστοιχούν στην περίπτωση της ατελούς εκτίμησης καναλιού, θεωρώντας ότι η διασπορά του σφάλματος εκτίμησης για τις δύο ζεύξεις είναι  $\sigma_p = \sigma_{sp} = 0.25$  και ότι το διάστημα προστασίας είναι ίσο με  $\Delta\gamma_{out} = 5dB$ . Τα ακρωνύμια HSC, ASC και LSC αντιστοιχούν στις περιπτώσεις των συνθηκών υψηλής σκίασης (High Shadowing Conditions), μέτριας σκίασης (Average Shadowing Conditions) και ελαφριάς σκίασης (Light Shadowing Conditions), αντίστοιχα. Για λόγους αναγνωσιμότητας, η περίπτωση της ατελούς εκτίμησης καναλιού παρουσιάζεται μόνο για το σενάριο HSC, ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται για τα άλλα δύο σενάρια. Από το σχήμα 7.12, παρατηρείται ότι μια αύξηση της παραμέτρου  $\Delta\epsilon$  οδηγεί σε υψηλότερες τιμές της αποτελεσματικής χωρητικότητας της επίγειας ζεύξης ανεξάρτητα με τον εκθέτη QoS. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο καθώς οι μεγαλύτερες τιμές του  $\Delta\epsilon$  συνεπάγονται ουσιαστικά πιο χαλαρούς περιορισμούς παρεμβολής για το σταθμό βάσης. Όπως είναι ευνόητο, για πιο χαλαρούς περιορισμούς outage της δορυφορικής ζεύξης, ο σταθμός βάσης επιτρέπεται να εκπέμπει σε υψηλότερα επίπεδα ισχύος, κάτι το οποίο γίνεται εμφανές και από το σχήμα

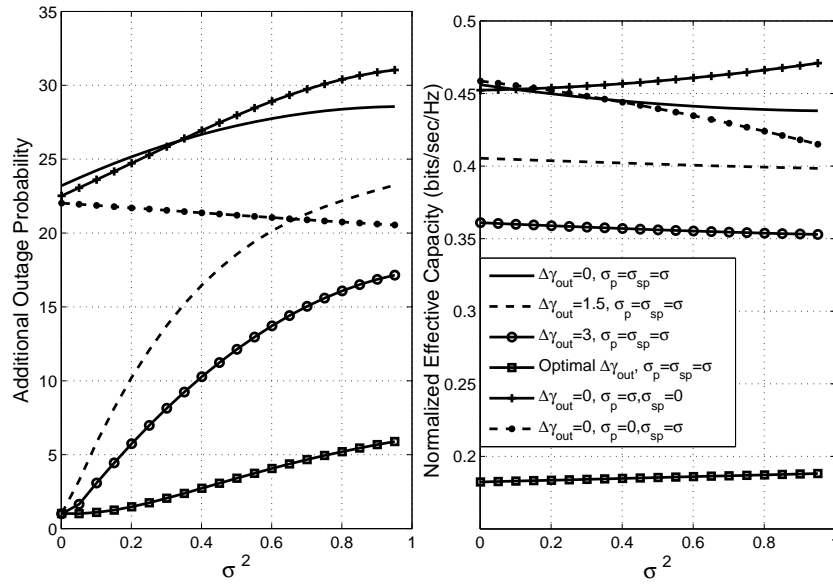


Σχήμα 7.13: Μέση ισχύς του σταθμού βάσης ως προς  $\Delta\epsilon$ .

7.13, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αποτελεσματική χωρητικότητα της επίγειας ζεύξης. Μια κοινή παρατήρηση είναι επίσης ότι η αποτελεσματική χωρητικότητα της επίγειας ζεύξης μειώνεται καθώς οι περιορισμοί ποιότητας υπηρεσίας γίνονται πιο αυστηροί, το οποίο δείχνει ότι το κανάλι μπορεί να υποστηρίξει μόνο χαμηλότερες τιμές ρυθμού μετάδοσης προκειμένου να εγγυηθεί τις απαιτήσεις ποιότητας του επίγειου χρήστη. Στην περίπτωση της ατελούς εκτίμησης καναλιού, είναι εμφανές ότι προκύπτουν χαμηλότερες τιμές αποτελεσματικής χωρητικότητας, κάτι το οποίο δικαιολογείται δεδομένου ότι λόγω του διαστήματος προστασίας του αλγορίθμου, ο τροποποιημένος περιορισμός (7.64) υποχρεώνει τον σταθμό βάσης να εκπέμπει σε χαμηλότερα επίπεδα ισχύος, το οποίο παρατηρείται και από το σχήμα 7.13.

Επιπλέον, από το σχήμα 7.12, παρατηρείται ότι οι συνθήκες σκίασης των δορυφορικών ζεύξεων καθώς και των επίγειων ζεύξεων επηρεάζουν σημαντικά την αποτελεσματική χωρητικότητα της δευτερεύουσας ζεύξης. Συγκεκριμένα, καθώς η δορυφορική ζεύξη έχει συνθήκες πιο ελαφριάς σκίασης, η παρεμβολή από το δορυφόρο στον επίγειο χρήστη αυξάνεται με αποτέλεσμα να οδηγεί σε μειωμένη αποτελεσματική χωρητικότητα. Όσον αφορά τις συνθήκες εξασθένησης της επίγειας ζεύξης, πιο ευνοϊκές συνθήκες της δευτερεύουσας ζεύξης (υψηλότερες τιμές του  $m_s$ ) οδηγούν σε υψηλότερες τιμές του ρυθμού μετάδοσης του επίγειου χρήστη, με αποτέλεσμα να προκύπτουν υψηλότερες τιμές για την κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητά του. Αντίθετα, όταν η ζεύξη παρεμβολής από το σταθμό βάσης στο δορυφορικό χρήστη έχει συνθήκες μικρότερης εξασθένησης (υψηλότερες τιμές του  $m_{sp}$ ), ο σταθμός βάσης περιορίζεται να εκπέμπει σε χαμηλότερα επίπεδα ισχύος, κάτι το οποίο είναι εμφανές και από το σχήμα 7.13, καθώς επηρεάζει περισσότερο την επικοινωνία της πρωτεύουσας ζεύξης, με αποτέλεσμα να μειώνεται η αποτελεσματική χωρητικότητα της επίγειας ζεύξης.

Στο σχήμα 7.13, επαληθεύεται το γεγονός ότι η μέση ισχύς του σταθμού βάσης εξαρτάται αποκλειστικά από τις παραμέτρους καναλιού της δορυφορικής ζεύξης και της ζεύξης παρεμβολής από το σταθμό βάσης στο δορυφορικό χρήστη και είναι ανεξάρτητη από τον εκθέτη QoS  $a$ . Συγκεκριμένα, όταν η δορυφορική ζεύξη έχει ευνοϊκότερες συνθήκες σκίασης, η μέση ισχύς του σταθμού βάσης αυξάνεται. Το γεγονός αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί δεδομένου ότι για καλύτερες συνθήκες καναλιού, ο λόγος  $\text{SNR}_{\text{sat}}$  αυξάνεται και ο σταθμός βάσης μπορεί να εκπέμπει σε υψηλότερα επίπεδα ισχύος



Σχήμα 7.14: Επιπρόσθετη πιθανότητα outage και κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα ως προς τη διασπορά του σφάλματος εκτίμησης.

χωρίς να προκαλεί outage στη δορυφορική ζεύξη.

Τέλος, στο σχήμα 7.14 απεικονίζεται η επιπρόσθετη πιθανότητα outage και η αντίστοιχη αποτελεσματική χωρητικότητα για την περίπτωση της ατελούς εκτίμησης καναλιού ως προς τη διασπορά του σφάλματος εκτίμησης, για διαφορετικές τιμές του διαστήματος ασφαλείας. Η επιπρόσθετη πιθανότητα outage, που αποτελεί και τον άξονα  $y$  του πρώτου διαγράμματος, ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικής πιθανότητας διακοπής λειτουργίας που προκαλείται λόγω της ατελούς εκτίμησης καναλιού ως προς το θεωρητικό όριο  $Q_{out}$  που έχει τεθεί από το σχήμα εκχώρησης ισχύος. Επιπλέον, το βέλτιστο  $\Delta\gamma_{out}$  που αναγράφεται στο σχήμα, αντιστοιχεί σε ένα μεταβλητό διάστημα ασφαλείας το οποίο έχει υπολογιστεί αριθμητικά σαν συνάρτηση του  $\sigma^2$ , έτσι ώστε να ελαχιστοποιεί την επιπρόσθετη πιθανότητα outage. Όπως είναι εμφανές από το σχήμα, καθώς αυξάνεται η διασπορά του σφάλματος εκτίμησης, αυξάνεται και η επιπρόσθετη πιθανότητα outage, εκτός από την περίπτωση που ο σταθμός βάσης έχει ατελή γνώση μόνο για το κανάλι παρεμβολής από το σταθμό βάσης στο δορυφορικό χρήστη (SU<sub>Tx</sub> -PU<sub>Rx</sub>). Σε αυτή την περίπτωση, καθώς η διασπορά σφάλματος αυξάνεται, υπάρχει υψηλότερη πιθανότητα να υπερεκτιμάται το κανάλι παρεμβολής με αποτέλεσμα, ο σταθμός βάσης να εκπέμπει σε χαμηλότερα επίπεδα ισχύος προκειμένου να μην επηρεάσει την πρωτεύουσα ζεύξη και επομένως να μειώνεται η αποτελεσματική χωρητικότητα καθώς και η επιπρόσθετη πιθανότητα outage της δορυφορικής ζεύξης. Τέλος, παρατηρώντας το σχήμα 7.14, επαληθεύεται το γεγονός ότι η αύξηση του διαστήματος ασφαλείας οδηγεί σε χαμηλότερες τιμές της επιπρόσθετης πιθανότητας outage με αντάλλαγμα όμως χαμηλότερες τιμές της αποτελεσματικής χωρητικότητας.

## Κεφάλαιο 8

# Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα

### 8.1 Συμπεράσματα διδακτορικής διατριβής

Η συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή εστιάζει στο πρόβλημα της διαχείρισης ραδιοπόρων σε ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς, προτείνοντας καινοτόμους μηχανισμούς διαχείρισης των ασύρματων πόρων για διάφορες αρχιτεκτονικές δικτύων.

Παρατηρώντας τη δομή της ΔΔ, είναι εμφανές ότι μπορεί να χωριστεί σε τρία βασικά μέρη. Το πρώτο μέρος αποτελείται από τα τρία πρώτα κεφάλαια και αντιστοιχεί στο θεωρητικό υπόβαθρο, το οποίο είναι απαραίτητο για τη βαθύτερη κατανόηση της ΔΔ. Το δεύτερο μέρος εστιάζει στην επίλυση γενικών προβλημάτων της διαχείρισης ραδιοπόρων και αποτελείται από το τέταρτο και το πέμπτο κεφάλαιο. Τέλος, το τρίτο μέρος ασχολείται με το πρόβλημα εκχώρησης ραδιοπόρων σε ασύρματα δίκτυα για παροχή ποιότητας υπηρεσίας και αποτελείται από το έκτο και έβδομο κεφάλαιο.

Αναλυτικότερα, στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφεται η εξέλιξη των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών δικτύων καθώς και διάφορες προηγμένες ασύρματες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο της ΔΔ, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται συνοπτικά τα πιο γνωστά προβλήματα διαχείρισης ραδιοπόρων για τα ασύρματα δίκτυα. Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται τα μαθηματικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την επίλυση των προβλημάτων διαχείρισης ραδιοπόρων, δίνοντας έμφαση κυρίως στη θεωρία βελτιστοποίησης και τη θεωρία παιγνίων. Όπως προαναφέρεται, το δεύτερο και το τρίτο μέρος αντιστοιχούν στη βασική συνεισφορά της ΔΔ και αποτελούνται από τα κεφάλαια 4-7. Πιο συγκεκριμένα, τα κεφάλαια 4-5 αποτελούν το δεύτερο μέρος της ΔΔ και εστιάζουν στην ανάλυση των προτεινόμενων μηχανισμών διαχείρισης ραδιοπόρων χρησιμοποιώντας κυρίως αρχές από τη θεωρία παιγνίων. Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναλύεται το πρόβλημα του ελέγχου ισχύος και προτείνεται ένα καινοτόμο, παιγνιοθεωρητικό σχήμα για τον έλεγχο ισχύος σε δορυφορικά δίκτυα νέας γενιάς. Επιπλέον, το 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο εστιάζει σε προβλήματα εκχώρησης εύρους ζώνης για ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Αναλυτικότερα, μελετάται η διαχείριση εύρους ζώνης τόσο σε δορυφορικά, όσο και σε επίγεια δίκτυα και προτείνονται αποδοτικοί μηχανισμοί, οι οποίοι βασίζονται στη θεωρία παιγνίων και στη θεωρία σχεδίασης μηχανισμών. Τέλος, το τρίτο μέρος αποτελείται από τα κεφάλαια 6 και 7 και εστιάζει στη διαχείριση ραδιοπόρων για παροχή ποιότητας υπηρεσίας. Συγκεκριμένα, στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο, περιγράφεται αρχικά η θεωρία της αποτελεσματικής χωρητικότητας, η οποία αποτελεί ένα απαραίτητο εργαλείο για τη μελέτη των απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας στην ανάλυση ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Στη συνέχεια, γίνεται μια σύντομη επισκόπηση των προτεινόμενων, στη βιβλιογραφία, μηχανισμών διαχείρισης ραδιοπόρων σε επίγεια τηλεπικοινωνιακά δίκτυα για παροχή QoS και, τέλος, προτείνεται ένας αποδοτικός μηχανισμός ελέγχου ισχύος για κινητά δορυ-

φορικά συστήματα, ο οποίος λαμβάνει υπόψη τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας των χρηστών. Το 7<sup>ο</sup> κεφάλαιο εστιάζει σε μηχανισμούς ελέγχου ισχύος για παροχή QoS σε γνωστικά δίκτυα. Αναλυτικότερα, αρχικά παρέχεται μια σύντομη επισκόπηση των ήδη υπάρχοντων μηχανισμών ελέγχου ισχύος για παροχή ποιότητας υπηρεσίας στην περίπτωση των γνωστικών δικτύων. Στη συνέχεια, προτείνεται και αναλύεται εκτενώς ένας αποδοτικός μηχανισμός ελέγχου ισχύος για γνωστικά δίκτυα, ο οποίος λαμβάνει υπόψη τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας τόσο των πρωτεύοντων χρηστών (μέσω περιορισμών παρεμβολής), όσο και των δευτερευόντων χρηστών (μέσω της αποτελεσματικής χωρητικότητας). Τέλος, παρουσιάζεται η καινοτόμος αρχιτεκτονική ενός γνωστικού δορυφορικού-επίγειου δικτύου και προτείνεται ένας αποδοτικός μηχανισμός ελέγχου ισχύος για τη συγκεκριμένη αρχιτεκτονική, λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις ποιότητας επικοινωνίας των χρηστών καθώς και τα εγγενή χαρακτηριστικά του κάθε δικτύου.

## 8.2 Βασική συνεισφορά διδακτορικής διατριβής

Στη συγκεκριμένη υποενότητα περιγράφεται συνοπτικά η βασική συνεισφορά της ΔΔ ανά κεφάλαιο, παραθέτοντας παράλληλα τις αντίστοιχες ερευνητικές δημοσιεύσεις που έχουν προκύψει.

### **Κεφάλαιο 4**

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο προτείνεται ένας καινοτόμος μηχανισμός ελέγχου ισχύος για δορυφορικά δίκτυα νέας γενιάς, ο οποίος βασίζεται σε αρχές της θεωρίας παιγνίων. Αναλυτικότερα, το πρόβλημα του ελέγχου ισχύος μοντελοποιείται ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο με τιμολόγηση για το οποίο αποδεικνύεται η ύπαρξη και η μοναδικότητα της ισορροπίας Nash, ενώ ταυτόχρονα παρέχεται ένας αλγόριθμος χαλάρωσης για την εύρεση του σημείου ισορροπίας. Επιπλέον, για τον προτεινόμενο μηχανισμό αναλύονται δύο διαφορετικά σχήματα τιμολόγησης (ένα στατικό σχήμα και ένα δυναμικό σχήμα), παρουσιάζοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του κάθε σχήματος.

Αντίστοιχη Δημοσίευση :

- Stavroula Vassaki, Athanasios Panagopoulos, Philip Constantinou, "A Game-Theoretic Approach of Power Control Schemes in DVB-RCS Networks", presented at 15th Ka and Broad-band Communications, Navigation and Earth Observation Conference, September 2009.

### **Κεφάλαιο 5**

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο εστιάζει σε μηχανισμούς εκχώρησης εύρους ζώνης για ασύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα νέας γενιάς. Η βασική συνεισφορά του κεφαλαίου μπορεί να χωριστεί στα ακόλουθα σημεία :

- Ανάλυση του προβλήματος διαχείρισης εύρους ζώνης σε δορυφορικά δίκτυα και επίλυση του χρησιμοποιώντας αρχές της θεωρίας παιγνίων. Αναλυτικότερα, το συγκεκριμένο πρόβλημα διαχείρισης ραδιοπύρων μοντελοποιείται αρχικά ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο, για το οποίο αποδεικνύεται η μοναδικότητα της ισορροπίας Nash χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση Nikaido-Isoda. Επιπλέον, το ίδιο πρόβλημα μοντελοποιείται ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο με τιμολόγηση καθώς και ως συνεργατικό παίγνιο. Οι τρεις προτεινόμενοι μηχανισμοί συγκρίνονται ως προς την απόδοσή τους, έτσι ώστε να

μελετηθούν οι αδυναμίες και τα πλεονεκτήματα του κάθε σχήματος. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι είναι η πρώτη φορά που το πρόβλημα εκχώρησης εύρους ζώνης μοντελοποιείται ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο με συζευγμένους περιορισμούς και επιλύεται με τη βοήθεια της συνάρτησης Nikaido-Isoda. Αντίστοιχη Δημοσίευση :

- Stavroula Vassaki, Athanasios Panagopoulos, Philip Constantinou, "Game-theoretic approach of fair bandwidth allocation in DVB-RCS networks" presented at International Workshop on Satellite and Space Communications (IWSSC 2009), Siena, Italy 2009.

- Ανάλυση του προβλήματος εκχώρησης εύρους ζώνης για τηλεπικοινωνιακά δίκτυα ασύρματης πρόσβασης και επίλυση του μέσω δύο διαφορετικών μηχανισμών για το διαμοιρασμό των φασματικών πόρων στους τελικούς χρήστες. Αναλυτικότερα, ο πρώτος αλγόριθμος (κεντρικοποιημένος) βασίζεται στη χρήση κανόνων κατανομής που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση του προβλήματος της χρεωκοπίας, ενώ ο δεύτερος αλγόριθμος (κατανεμημένος) χρησιμοποιεί αρχές από τη θεωρία σχεδίασης μηχανισμών (mechanism design) προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη λύση του προβλήματος.

Αντίστοιχες Δημοσιεύσεις :

- Stavroula Vassaki, Athanasios Panagopoulos, Philip Constantinou, "Bandwidth allocation problem: Bankruptcy Game vs Cooperative Game", presented at IEEE Workshop on Mobile Computing and Networking Technologies 2009 (WMCNT '09), St.Petersburg, Russia, October 2009.
- Stavroula Vassaki, Athanasios D. Panagopoulos, Philip Constantinou, "Evaluation of Channel Dependent Bandwidth Allocation in Wireless Access Networks: Centralized and Distributed Approach", Springer Telecommunication Systems Journal, 2011.

- Ανάλυση και επίλυση του προβλήματος εκχώρησης εύρους ζώνης σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα πολλαπλών δορυφόρων χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο παιγνίου δύο επιπέδων. Συγκεκριμένα, το συγκεκριμένο πρόβλημα μοντελοποιείται σαν ένα παίγνιο πολλαπλών αγοραστών - πολλαπλών πωλητών και προτείνεται ένας καινοτόμος μηχανισμός επίλυσης του.

Αντίστοιχη Δημοσίευση :

- Stavroula Vassaki, Athanasios D. Panagopoulos, Philip Constantinou, Maria Angeles Vázquez-Castro, "Market-Based Bandwidth Allocation for Broadband Satellite Communication Networks", presented at Second International Conference on Advances in Satellite and Space Communications (SPACOMM), 2010, 13-19 June 2010, Athens.

- Ανάλυση και επίλυση του προβλήματος εκχώρησης εύρους ζώνης για γνωστικά δίκτυα. Αναλυτικότερα, προτείνεται ένας καινοτόμος μηχανισμός δημοπρασίας για τη μίσθωση του εύρους ζώνης των πρωτεύοντων χρηστών σε δευτερεύοντες χρήστες για το μοντέλο ενός underlay γνωστικού συστήματος. Επιπλέον, στον ίδιο μηχανισμό αναλύονται τρία διαφορετικά σενάρια εκχώρησης ισχύος για τους δευτερεύοντες χρήστες ανάλογα με το βαθμός γνώσης CSI που διαθέτουν.

Αντίστοιχη Δημοσίευση :

- Stavroula Vassaki, Marios Poulakis, Athanasios Panagopoulos, Philip Constantinou, "An Auction-based Mechanism for Spectrum Leasing in Overlay Cognitive Radio Networks", to be presented in 22nd Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio (PIMRC'13), 8-11 Sept. 2013, London, UK.

### **Κεφάλαιο 6**

Η βασική συνεισφορά του συγκεκριμένου κεφαλαίου αφορά την ανάπτυξη ενός καινοτόμου αλγορίθμου ελέγχου ισχύος για παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε κινητά δορυφορικά συστήματα. Συγκεκριμένα, προτείνεται ένας αποδοτικός μηχανισμός εκχώρησης ισχύος, ο οποίος λαμβάνει υπόψη του τόσο τις απαιτήσεις QoS των δορυφορικών χρηστών, όσο και τα εγγενή χαρακτηριστικά του κινητού δορυφορικού συστήματος. Επιπλέον, παρέχονται εκφράσεις κλειστού τύπου για τη βέλτιστη εκχώρηση ισχύος και την αντίστοιχη αποτελεσματική χωρητικότητα του συστήματος.

Αντίστοιχη Δημοσίευση :

- Stavroula Vassaki, Athanasios D. Panagopoulos, Philip Constantinou, "Effective Capacity and Optimal Power Allocation for Mobile Satellite Systems and Services," *Communications Letters, IEEE* , vol.16, no.1, pp.60-63, January 2012.

### **Κεφάλαιο 7**

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο εστιάζει σε μηχανισμούς ελέγχου ισχύος για παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε γνωστικά δίκτυα. Η βασική συνεισφορά του κεφαλαίου μπορεί να συνοψιστεί στα ακόλουθα σημεία :

- Ανάλυση του προβλήματος ελέγχου ισχύος για παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε γνωστικά δίκτυα. Συγκεκριμένα, προτείνεται ένας αποδοτικός μηχανισμός για την επίλυση του προβλήματος εκχώρησης ισχύος των δευτερευόντων χρηστών, λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις QoS των χρηστών αυτών (μέσω της αποτελεσματικής χωρητικότητας τους) καθώς και την ποιότητα επικοινωνίας των πρωτευόντων χρηστών (μέσω της ικανοποίησης δεδομένων περιορισμών παρεμβολής). Επιπλέον, παρέχεται μια ενοποιημένη μελέτη για τη βέλτιστη εκχώρηση ισχύος δεδομένων διαφορετικών περιορισμών παρεμβολής, ενώ ταυτόχρονα αξιολογείται η απόδοση των προτεινόμενων μηχανισμών και για τα δύο είδη χρηστών.

Αντίστοιχη Δημοσίευση :

- Stavroula Vassaki, Marios Poulakis, Athanasios Panagopoulos, Philip Constantinou, "QoS-driven Power Allocation under Peak and Average Interference Constraints in Cognitive Radio Networks", submitted in *International Journal of Communication Systems, Wiley*, 2013.

- Ανάλυση του προβλήματος ελέγχου ισχύος για παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε γνωστικά δορυφορικά-επίγεια δίκτυα. Αναλυτικότερα, προτείνεται ένας καινοτόμος μηχανισμός εκχώρησης ισχύος για τη σύγχρονη αρχιτεκτονική των γνωστικών δορυφορικών-επίγειων δικτύων. Συγκεκριμένα, παρέχεται μια σχέση κλειστού τύπου για τη βέλτιστη ισχύ του επίγειου σταθμού, ο οποίος θεωρείται ως ο δευτερεύων πομπός, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ποιότητα επικοινωνίας του επίγειου αλλά και του δορυφορικού συστήματος. Ταυτόχρονα, στον προτεινόμενο μηχανισμό λαμβάνονται υπόψη τα εγγενή χαρακτηριστικά των δύο δικτύων προκειμένου να παρουσιαστεί μια ρεαλιστική προσέγγιση για το σχήμα ελέγχου ισχύος.

Αντίστοιχη Δημοσίευση :

- Stavroula Vassaki, Marios Poulakis, Athanasios Panagopoulos, Philip Constantinou, "Power Allocation in Cognitive Satellite Terrestrial Networks with QoS constraints" accepted for publication in *IEEE Communications Letters*, 2013.

### 8.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στο πλαίσιο της ΔΔ έχει πραγματοποιηθεί μια σημαντική βιβλιογραφική επισκόπηση των σχημάτων που επιλύουν προβλήματα διαχείρισης ραδιοπόρων. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη τα ήδη υπάρχοντα σχήματα, προτείνονται καινοτόμοι και αποδοτικοί μηχανισμοί διαχείρισης πόρων για ασύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα νέας γενιάς. Παρόλα αυτά, στο συγκεκριμένο ερευνητικό πεδίο υπάρχουν αρκετά ανοιχτά ερευνητικά θέματα, ορισμένα από τα οποία παρουσιάζονται στη συγκεκριμένη υποενότητα. Δεδομένου ότι το ευρύτερο ερευνητικό πεδίο της ΔΔ μπορεί να χωριστεί σε δύο βασικά μέρη (διαχείριση ραδιοπόρων σε ασύρματα δίκτυα και διαχείριση ραδιοπόρων για παροχή QoS σε ασύρματα δίκτυα), στη συνέχεια παρουσιάζονται τα ανοιχτά θέματα που υπάρχουν σε κάθε πεδίο χωριστά.

Αρχικά, απαριθμούνται ορισμένα ανοιχτά ερωτήματα που αφορούν το πρόβλημα της διαχείρισης ραδιοπόρων χωρίς περιορισμούς ποιότητας υπηρεσίας.

- Όπως αναφέρεται στα αρχικά κεφάλαια, η θεωρία παιγνίων αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για την επίλυση των προβλημάτων διαχείρισης ραδιοπόρων των τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Για το λόγο αυτό τα τελευταία χρόνια έχουν προταθεί πολυάριθμοι μηχανισμοί εκχώρησης των ασυρμάτων πόρων. Ωστόσο, οι περισσότεροι μηχανισμοί που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία θεωρούν ότι υπάρχει τέλεια γνώση του CSI, με αποτέλεσμα να μη λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της αβεβαιότητας που συναντάται στα ρεαλιστικά σενάρια. Επομένως, ένα βασικό θέμα που θα πρέπει να μελετηθεί είναι η ανάπτυξη παιγνιοθεωρητικών μηχανισμών που θα έχουν ως βασική υπόθεση την ατελή γνώση των καναλιών εξασθένησης καθώς και η μελέτη προδραστικών σχημάτων που θα ελαχιστοποιούν την επίδραση της ατελούς γνώσης CSI στην απόδοση του συστήματος.
- Στα κεφάλαια 4 και 5 προτείνονται διάφοροι καινοτόμοι μηχανισμοί διαχείρισης ραδιοπόρων που χρησιμοποιούν αρχές από τη θεωρία παιγνίων. Όπως παρατηρείται από τους μηχανισμούς αυτούς καθώς και από τη βιβλιογραφική επισκόπηση που έχει προηγηθεί στα κεφάλαια αυτά, η μελέτη ενός μη συνεργατικού παιγνίου καταλήγει ουσιαστικά στην εύρεση του σημείου ισορροπίας Nash. Παρόλα αυτά, το συγκεκριμένο σημείο δεν οδηγεί συνήθως σε αποδοτικά βέλτιστες λύσεις. Επομένως, ένα καίριο θέμα είναι η μελέτη και ανάπτυξη μηχανισμών παιγνίων που θα οδηγούν σε αποδοτικότερες λύσεις. Ένας τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι η εισαγωγή τιμολόγησης στο παίγνιο, κάτι το οποίο έχει μελετηθεί σε μεγάλο βαθμό. Ωστόσο, θα παρουσίαζε ενδιαφέρον η βελτιστοποίηση των παραμέτρων τιμολόγησης, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η ισορροπία που εμφανίζει τη βέλτιστη απόδοση. Επιπλέον, προτείνεται να μελετηθούν διαφορετικά είδη παιγνίων, όπως για παράδειγμα επαναλαμβανόμενα παίγνια ή παίγνια Stackelberg, τα οποία οδηγούν σε πιο αποδοτικά σημεία ισορροπίας.
- Η απόδοση των μηχανισμών διαχείρισης ραδιοπόρων που προτείνονται στη βιβλιογραφία αξιολογείται κυρίως μέσω προσομοιώσεων και αποτελεσμάτων αριθμητικής ανάλυσης. Ωστόσο, η υλοποίηση των αλγορίθμων σε πραγματικό περιβάλλον εμφανίζει σημαντικές διαφορές με τα σενάρια προσομοίωσης που υλοποιούνται με αποτέλεσμα η πραγματική απόδοση των προτεινόμενων μηχανισμών να διαφέρει σε σχέση με την αναμενόμενη απόδοση. Επομένως, ένα καίριο πεδίο έρευνας αποτελεί η εφαρμογή των προτεινόμενων μηχανισμών διαχείρισης ραδιοπόρων σε πλατφόρμες υλικού που λειτουργούν σε συνθήκες πραγματικού περιβάλλοντος. Με αυτό τον τρόπο θα γίνει κατανοητή η επίδραση παραγόντων που δεν λαμβάνονται συνήθως

υπόψη στους υπάρχοντες μηχανισμούς, όπως για παράδειγμα η επίδραση της ατελούς γνώσης CSI καθώς και η επίδραση του επιπλέον overhead που θα προκαλείται από την ανταλλαγή μηνυμάτων στην περίπτωση ενός αλγορίθμου παιγνίου.

Όσον αφορά το πρόβλημα διαχείρισης ραδιοπόρων για παροχή ποιότητας υπηρεσίας, παρουσιάζονται στη συνέχεια, ορισμένα ζητήματα, τα οποία θα πρέπει να αντιμετωπιστούν, έτσι ώστε να αναπτυχθούν καινοτόμοι μηχανισμοί διαχείρισης ραδιοπόρων που θα βελτιώνουν περαιτέρω την απόδοση των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

- Οι περισσότεροι προτεινόμενοι μηχανισμοί που αναφέρονται στη βιβλιογραφία για την επίλυση του προβλήματος διαχείρισης ραδιοπόρων με περιορισμούς QoS αποτελούν κεντροποιημένους μηχανισμούς. Συγκεκριμένα, ακόμα και στην περίπτωση των γνωστικών δικτύων, οι μηχανισμοί ελέγχου ισχύος που προτείνονται για τους δευτερεύοντες χρήστες δεν είναι καταναμημένοι. Δεδομένου όμως ότι τα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, και κυρίως τα γνωστικά δίκτυα, πρέπει να είναι αρκετά ευέλικτα έτσι ώστε να μπορούν να επαναπρογραμματίσουν τις λειτουργικές τους παραμέτρους βάσει του μεταβαλλόμενου περιβάλλοντος, η ύπαρξη μιας κεντρικής οντότητας δεν αποτελεί μια πρακτική λύση. Επομένως, ένα σημαντικό θέμα για μελλοντική έρευνα είναι η ανάπτυξη καταναμημένων αποδοτικών μηχανισμών διαχείρισης ραδιοπόρων για παροχή ποιότητας υπηρεσίας. Τα κεντροποιημένα σχήματα εκχώρησης ραδιοπόρων θα πρέπει να αντικατασταθούν από νέους μηχανισμούς, οι οποίοι θα λαμβάνουν υπόψη την εγγενή καταναμημένη φύση των τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Προκειμένου να επιτευχθεί ο συγκεκριμένος στόχος, μια πιθανή λύση είναι η χρήση παιγνιοθεωρητικών τεχνικών. Παράλληλα όμως, σε αυτήν την περίπτωση προκύπτουν άλλα θέματα που θα πρέπει να μελετηθούν, όπως η συνολική πολυπλοκότητα των σχημάτων καθώς και η ύπαρξη, μοναδικότητα και η βελτιστότητα της ισορροπίας. Επιπλέον, μπορούν να μελετηθούν καταναμημένα σχήματα εκχώρησης ραδιοπόρων που βασίζονται είτε στη θεωρία σχεδίασης μηχανισμών (όπως για παράδειγμα μηχανισμοί δημοπρασίας), είτε στην κλασική θεωρία βελτιστοποίησης.
- Ένα άλλο θέμα το οποίο θα πρέπει να μελετηθεί για τα προβλήματα διαχείρισης ραδιοπόρων με παροχή QoS είναι ο αναλυτικός υπολογισμός της αποτελεσματικής χωρητικότητας υπό συνθήκες συνθήκης εξασθένησης που περιλαμβάνουν τις διαλείψεις μεγάλης και μικρής κλίμακας. Επιπλέον, θα πρέπει να σημειωθεί ότι στους περισσότερους μηχανισμούς γίνεται η υπόθεση των ασυσχέτιστων καναλιών, κάτι το οποίο δεν αναπαριστά απαραίτητα ένα ρεαλιστικό μοντέλο. Επομένως, θεωρείται ότι η επίδραση της συσχέτισης θα πρέπει να ληφθεί υπόψη προκειμένου να αναπτυχθούν προηγμένες τεχνικές απαλοιφής των παρεμβολών καθώς και αποδοτικά σχήματα εκχώρησης ραδιοπόρων.
- Όσον αφορά το συγκεκριμένο πρόβλημα διαχείρισης ραδιοπόρων για γνωστικά δίκτυα, ένα θέμα το οποίο πρέπει να αναλυθεί πιο λεπτομερώς είναι το πρόβλημα εκχώρησης ισχύος για συγκεκριμένες απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας σε ένα γνωστικό σύστημα πολλαπλών χρηστών. Παρατηρώντας τη βιβλιογραφία, είναι εμφανές ότι υπάρχουν ελάχιστες αναφορές για την περίπτωση των γνωστικών συστημάτων πολλαπλών χρηστών. Ωστόσο, η έννοια του γνωστικού συστήματος υπονοεί τη συνύπαρξη πολλαπλών ζευγών πρωτεύοντων και δευτερευόντων χρηστών. Επομένως, η ανάλυση ενός προβλήματος διαχείρισης ραδιοπόρων στο οποίο θα βελτιστοποιείται η απόδοση του συστήματος δεδομένων συγκεκριμένων απαιτήσεων QoS των δευτερευόντων χρηστών αποτελεί ένα σημαντικό ερευνητικό ζήτημα, το οποίο θα πρέπει να μελετηθεί.



- Τέλος, για την περίπτωση των γνωστικών δικτύων, θα ήταν ενδιαφέρον να αναλυθεί με ποιο τρόπο τα προτεινόμενα σχήματα εκχώρησης ραδιοπόρων επηρεάζουν την ποιότητα επικοινωνίας των πρωτευόντων χρηστών από πλευράς της αποτελεσματικής χωρητικότητας. Συγκεκριμένα, κρίνεται σημαντικό να μελετηθεί ποια είναι η επίδραση των απαιτήσεων ποιότητας επικοινωνίας των δευτερευόντων χρηστών στην επικοινωνία των πρωτευόντων χρηστών, έτσι ώστε να μπορεί να βελτιωθεί η απόδοση των προτεινόμενων μηχανισμών.

Συνοψίζοντας, πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν ακόμα αρκετά ανοιχτά θέματα σε αυτή την ερευνητική περιοχή, τα οποία πρέπει να μελετηθούν προκειμένου να προκύψουν αποδοτικοί μηχανισμοί για ρεαλιστικά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα.



## Παράρτημα Α΄

# Ορισμοί βασικών συναρτήσεων

### Συναρτήσεις Γάμμα - Gamma functions

- Συνάρτηση Γάμμα (Gamma function):

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt, \quad \operatorname{Re}(z) > 0$$

- Ατελείς συναρτήσεις γάμμα (Incomplete Gamma functions) :

$$\Gamma(a, x) = \int_x^{\infty} e^{-t} t^{a-1} dt, \quad \operatorname{Re}(a) > 0$$

$$\gamma(a, x) = \int_0^x e^{-t} t^{a-1} dt, \quad \operatorname{Re}(a) > 0$$

### Υπεργεωμετρικές συναρτήσεις - Hypergeometric functions

- Συμβάλλουσα υπεργεωμετρική συνάρτηση (Confluent hypergeometric function):

$${}_1F_1(a; \gamma; z) = \Phi(a; \gamma; z) = 1 + \frac{a}{\gamma} \frac{z}{1!} + \frac{a(a+1)}{\gamma(\gamma+1)} \frac{z^2}{2!} + \frac{a}{\gamma} \frac{z}{1!} + \frac{a(a+1)(a+2)}{\gamma(\gamma+1)(\gamma+2)} \frac{z^3}{3!} + \dots$$

- Γκαουσιανή υπεργεωμετρική συνάρτηση (Gauss hypergeometric function):

$$F(a, \beta, \gamma; z) = \frac{1}{B(\beta, \gamma - \beta)} \int_0^1 t^{\beta-1} (1-t)^{\gamma-\beta-1} (1-tz)^{-a} dt, \quad \operatorname{Re}(\gamma), \operatorname{Re}(\beta) > 0$$

όπου  $B(x, y)$  είναι η συνάρτηση Βήτα, η οποία ορίζεται ως εξής:

$$B(x, y) = \int_0^1 t^{x-1} (1-t)^{y-1} dt$$

- Υπεργεωμετρική συνάρτηση (Hypergeometric function):

$${}_pF_q(a_1, a_2, \dots, a_p; \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_q; z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(a_1)_k (a_2)_k \dots (a_p)_k}{(\beta_1)_k (\beta_2)_k \dots (\beta_q)_k} \frac{z^k}{k!}$$

όπου  $(a)_n$  το σύμβολο Pochhammer που ορίζεται ως εξής:

$$(a)_n = a(a+1) \dots (a+n-1) = \frac{\Gamma(a+n)}{\Gamma(a)}$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ισχύει:

$$F(a, \beta, \gamma; z) = {}_2F_1(a, \beta, \gamma; z)$$

### Συνάρτηση Lambert

- Η συνάρτηση Lambert ορίζεται ως η αντίστροφη της συνάρτησης:

$$f(W) = We^W$$

### Συνάρτηση Whittaker

- Συνάρτηση Whittaker:

$$W_{\lambda, \mu}(z) = \frac{\Gamma(-2\mu)}{\Gamma(\frac{1}{2} - \mu - \lambda)} M_{\lambda, \mu}(z) + \frac{\Gamma(2\mu)}{\Gamma(\frac{1}{2} + \mu - \lambda)} M_{\lambda, -\mu}(z)$$

όπου

$$M_{\lambda, \mu}(z) = z^{\mu + \frac{1}{2}} e^{-\frac{z}{2}} \Phi\left(\mu - \lambda + \frac{1}{2}, 2\mu + 1; z\right)$$

και

$$M_{\lambda, -\mu}(z) = z^{-\mu + \frac{1}{2}} e^{-\frac{z}{2}} \Phi\left(-\mu - \lambda + \frac{1}{2}, 2\mu + 1; z\right)$$

### Βηματική Συνάρτηση - Heaviside function

- Βηματική Συνάρτηση:

$$H(x-a) = \begin{cases} 0, & \text{για } x < a \\ 1, & \text{για } x \geq a \end{cases}$$

## Παράρτημα Β΄

# Παράρτημα - Δημοσιεύσεις συγγραφέα

### Δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά με κριτές

1. Stavroula Vassaki, Athanasios D. Panagopoulos, Philip Constantinou, "Evaluation of Channel Dependent Bandwidth Allocation in Wireless Access Networks: Centralized and Distributed Approach", Springer Telecommunication Systems Journal, 2011.
2. Stavroula Vassaki, Athanasios D. Panagopoulos, Philip Constantinou, "Effective Capacity and Optimal Power Allocation for Mobile Satellite Systems and Services," Communications Letters, IEEE , vol.16, no.1, pp.60-63, January 2012.
3. Celandroni, N., Ferro, E., Gotta, A., Oligeri, G., Roseti, C., Luglio, M., Bisio, I., Cello, M., Davoli, F., Panagopoulos, A. D., Poulakis, M., Vassaki, S., De Cola, T., Marchitti, M. A., Hu, Y. F., Pillai, P., Verma, S., Xu, K. and Acar, G. (2013), "A survey of architectures and scenarios in satellite-based wireless sensor networks: system design aspects.", Int. J. Satell. Commun. Network., 31: 1-38.
4. Stavroula Vassaki, Marios Poulakis, Athanasios Panagopoulos, Philip Constantinou, "Power Allocation in Cognitive Satellite Terrestrial Networks with QoS constraints" accepted for publication in IEEE Communications Letters,2013.

### Δημοσιεύσεις σε επιστημονικά συνέδρια με κριτές

1. Konstantinos Maliatsos, Stavroula Vassaki, Philip Constantinou, "Interclass and Intra-class Modulation Recognition using the Wavelet Transform". The 18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio (PIMRC'07), 3-7 September 2007, Athens, Greece.
2. Marios Poulakis, Stavroula Vassaki, Stathes Hadjiefthymiades, "Proactive Radio Resource Management Using Optimal Stopping Theory", presented at 10th IEEE International Symposium on a "World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks", June 2009.
3. Stavroula Vassaki, Athanasios Panagopoulos, Philip Constantinou, "A Game-Theoretic Approach of Power Control Schemes in DVB-RCS Networks", presented at 15th Ka and Broad-band Communications, Navigation and Earth Observation Conference, September 2009.

- 
4. Stavroula Vassaki, Athanasios Panagopoulos, Philip Constantinou, "Game-theoretic approach of fair bandwidth allocation in DVB-RCS networks" presented at International Workshop on Satellite and Space Communications (IWSSC 2009), Siena, Italy 2009.
  5. Stavroula Vassaki, Athanasios Panagopoulos, Philip Constantinou, "Bandwidth allocation problem: Bankruptcy Game vs Cooperative Game", presented at IEEE Workshop on Mobile Computing and Networking Technologies 2009 (WMCNT '09), St.Petersburg, Russia, October 2009.
  6. Stavroula Vassaki, Athanasios D. Panagopoulos, Philip Constantinou, Maria Angeles Vázquez-Castro, "Market-Based Bandwidth Allocation for Broadband Satellite Communication Networks", presented at Second International Conference on Advances in Satellite and Space Communications (SPACOMM), 2010, 13-19 June 2010, Athens.
  7. Stavroula Vassaki, Marios Poulakis, Athanasios Panagopoulos, Philip Constantinou, "Optimal power allocation under QoS constraints in cognitive radio systems," presented at Wireless Communication Systems (ISWCS), 2011 8th International Symposium on , pp.552-556, 6-9 Nov. 2011, Aachen, Germany.
  8. Marios Poulakis, Stavroula Vassaki, Athanasios Panagopoulos, "Satellite-based wireless sensor networks: Radio communication link design", presented at European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2013), 8-12 April 2013, Gothenburg.
  9. Stavroula Vassaki, Marios Poulakis, Athanasios Panagopoulos, Philip Constantinou, "An Auction-based Mechanism for Spectrum Leasing in Overlay Cognitive Radio Networks", to be presented in 22nd Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio (PIMRC'13)

#### **Δημοσιεύσεις σε κεφάλαια βιβλίων**

1. Dimitris E. Charilas, Stavroula G.Vassaki, Athanasios D. Panagopoulos, Philip Constantinou, "Cooperation Incentives in 4G Networks", "Game Theory for Wireless Communications and Networking", CRC Press, 2011.
2. Stavroula Vassaki, Marios I. Poulakis, Athanasios D. Panagopoulos and Philip Constantinou, "Resource Allocation Strategies in Cognitive Radio Networks under QoS Constraints", "Evolution of Cognitive Networks and Self-Adaptive Communication Systems", IGI Global, 2013.

#### **Υποβληθείσες δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια(υπό κρίση)**

1. Stavroula Vassaki, Marios Poulakis, Athanasios Panagopoulos, Philip Constantinou, "QoS-driven Power Allocation under Peak and Average Interference Constraints in Cognitive Radio Networks", submitted in International Journal of Communication Systems, Wiley, 2013.

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 3GPP. (2006). Requirements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) and Universal Terrestrial Radio Access Network (UTRAN). , *TR 25.913 v7.3.0*.
- 3GPP. (2007). Feasibility Study for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) and Universal Terrestrial Radio Access Network (UTRAN). , *TR 25.912 v7.2.0*.
- 3GPP. (2007b). Physical Layer for Ultra Mobile Broadband (UMB) Air Interface Specification. , *C.S0084-001-0 v2.0*.
- Abdi, A., Lau, W. C., Alouini, M.-S., & Kaveh, M. (2003). A new simple model for land mobile satellite channels: first-and second-order statistics. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 2(3), 519–528.
- Ahmed, M. H. (2005). Call admission control in wireless networks: a comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 7(1), 49–68.
- Akin, S., & Gursoy, M. C. (2010). Effective capacity analysis of cognitive radio channels for quality of service provisioning. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 9(11), 3354–3364.
- Akin, S., & Gursoy, M. C. (2011). Performance analysis of cognitive radio systems under QoS constraints and channel uncertainty. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 10(9), 2883–2895.
- Alpcan, T., Başar, T., Srikant, R., & Altman, E. (2002). CDMA uplink power control as a noncooperative game. *Wireless Networks*, 8(6), 659–670.
- Aubin, J. P. (2007). *Mathematical methods of game and economic theory*. Courier Dover Publications.
- Aumann, R. J., & Maschler, M. (1985). Game theoretic analysis of a bankruptcy problem from the Talmud. *Journal of Economic Theory*, 36(2), 195–213.
- Ausubel, L. M., & Milgrom, P. (2006). The lovely but lonely vickrey auction. *Combinatorial auctions*, 17–40.
- Benoit, J.-P. (1997). The nucleolus is contested-garment-consistent: A direct proof. *Journal of Economic Theory*, 77(1), 192–196.

- Bertsekas, D. P. (1982). Constrained optimization and lagrange multiplier methods. *Computer Science and Applied Mathematics, Boston: Academic Press, 1982, 1.*
- Bertsekas, D. P. (1999). Nonlinear Programming.
- Bloem, M., Alpcan, T., & Başar, T. (2007). A Stackelberg game for power control and channel allocation in cognitive radio networks. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools* (p. 4).
- Boche, H., Naik, S., & Alpcan, T. (2011). Characterization of convex and concave resource allocation problems in interference coupled wireless systems. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 59(5), 2382–2394.
- Bolea Alamanac, A., Chan, P. M., Duquerroy, L., Hu, Y. F., Gallinaro, G., Guo, W., & Mignolo, D. (2010). DVB-RCS goes mobile: Challenges and technical solutions. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 28(3-4), 137–155.
- Boyd, S., & Vandenberghe, L. (2004). *Convex optimization*. Cambridge university press.
- Cao, Z., & Zegura, E. W. (1999). Utility max-min: An application-oriented bandwidth allocation scheme. In *INFOCOM'99. Eighteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE* (Vol. 2, pp. 793–801).
- Castro, M. V., & Granados, G. S. (2007). Cross-layer packet scheduler design of a multibeam broadband satellite system with adaptive coding and modulation. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 6(1), 248–258.
- Chang, C.-S. (1994). Stability, queue length, and delay of deterministic and stochastic queueing networks. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 39(5), 913–931.
- Chang, C.-S. (2000). *Performance guarantees in communication networks*. Springer-Verlag New York Incorporated.
- Chen, Y., Yu, G., Zhang, Z., Chen, H.-H., & Qiu, P. (2008). On cognitive radio networks with opportunistic power control strategies in fading channels. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 7(7), 2752–2761.
- Chini, P., Giambene, G., & Kota, S. (2010). A survey on mobile satellite systems. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 28(1), 29–57.
- Chun, Y., Schummer, J., & Thomson, W. (2001). Constrained egalitarianism: a new solution for claims problems.
- Chung, S. T., & Goldsmith, A. J. (2001). Degrees of freedom in adaptive modulation: a unified view. *Communications, IEEE Transactions on*, 49(9), 1561–1571.
- Corless, R. M., Gonnet, G. H., Hare, D. E., Jeffrey, D. J., & Knuth, D. (1993). Lambert's W function in maple. *Maple Technical Newsletter*, 9, 12–22.



- Cui, S., Goldsmith, A. J., & Bahai, A. (2005). Energy-constrained modulation optimization. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 4(5), 2349–2360.
- Curiel, I. J., Maschler, M., & Tijs, S. H. (1987). Bankruptcy games. *Zeitschrift für Operations Research*, 31(5), A143–A159.
- Debreu, G. (1952). A social equilibrium existence theorem. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 38(10), 886.
- Dekel, E., Fudenberg, D., & Levine, D. K. (2004). Learning to play bayesian games. *Games and Economic Behavior*, 46(2), 282–303.
- Du, Q., & Zhang, X. (2009). QoS-driven power-allocation game over fading multiple-access channels. In *Global Telecommunications Conference, 2009. GLOBECOM 2009. IEEE* (pp. 1–6).
- DVB. (2011). Second generation DVB: Interactive Satellite System (DVB-RCS2). *Part2: Lower Layers for Satellite Standard, European Standard*, 1.
- DVB. (2013). Digital Video Broadcasting (DVB); Second Generation DVB Interactive Satellite System.
- Elwalid, A. I., & Mitra, D. (1993). Effective bandwidth of general markovian traffic sources and admission control of high speed networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 1(3), 329–343.
- Erdelyi, A., Magnus, W., Oberhettinger, F., Tricomi, F. G., & Bateman, H. (1953). *Higher transcendental functions* (Vol. 1) (No. 3). McGraw-Hill New York.
- Esposito, R. (1966). Indefinite integral of a confluent hypergeometric function. *Electronics Letters*, 2(12), 438–439.
- ETSI. (2005). 301 790 v1.4.1. *Digital Video Broadcasting (DVB)*, 2005–09.
- ETSI. (2009). 302 307 v1. 2.1. *Digital Video Broadcasting (DVB) 2nd generation framing structure, channel coding & modulation systems for broadcasting, interactive services, news gathering and other broadbands satellite applications (DVB-S2)*, 2009–08.
- ETSI. (2011). TS 102 584,v. 1.3.1. *Digital Video Broadcasting (DVB); DVB-SH Implementation Guidelines*, 2011–01.
- Evans, B., Werner, M., Lutz, E., Bousquet, M., Corazza, G. E., Maral, G., & Rumeau, R. (2005). Integration of satellite and terrestrial systems in future multimedia communications. *Wireless Communications, IEEE*, 12(5), 72–80.
- Faulhaber, G. R., & Farber, D. J. (2003). Spectrum management: Property rights, markets, and the commons. *Rethinking rights and regulations: institutional responses to new communication technologies*, 193–226.

- FCC. (2002). Report of the spectrum efficiency working group. *Force, FCC Spectrum Policy Task*, 2002-11.
- Felegyhazi, M., & Hubaux, J.-P. (2006). *Game theory in wireless networks: A tutorial* (Tech. Rep.). Technical Report LCA-REPORT-2006-002, EPFL.
- Fitzek, F. H., & Katz, M. D. (2006). *Cooperation in wireless networks: principles and applications: real egoistic behavior is to cooperate!* Springer.
- Fontán, F. P., & Espiñeira, P. M. (2008). *Modelling the wireless propagation channel: a simulation approach with MATLAB* (Vol. 5). Wiley.
- Fudenberg, D., & Tirole, J. (1991). *Game theory. 1991*. MIT Press.
- Ghaderi, M., & Boutaba, R. (2006). Call admission control in mobile cellular networks: a comprehensive survey. *Wireless communications and mobile computing*, 6(1), 69–93.
- Ghasemi, A., & Sousa, E. S. (2007). Fundamental limits of spectrum-sharing in fading environments. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 6(2), 649–658.
- Giambene, G. (2007). *Resource management in satellite networks: optimization and cross-layer design*. Springer.
- Goldsmith, A. (2005). *Wireless communications*. Cambridge university press.
- Goldsmith, A., Jafar, S. A., Maric, I., & Srinivasa, S. (2009). Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: An information theoretic perspective. *Proceedings of the IEEE*, 97(5), 894–914.
- Goldsmith, A. J., & Varaiya, P. P. (1997). Capacity of fading channels with channel side information. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 43(6), 1986–1992.
- Goodman, D., & Mandayam, N. (2000). Power control for wireless data. *Personal Communications, IEEE*, 7(2), 48–54.
- Gummalla, A. C. V., & Limb, J. O. (2000). Wireless medium access control protocols. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, 3(2), 2–15.
- Han, Z., & Liu, K. R. (2008). *Resource allocation for wireless networks: basics, techniques, and applications*. Cambridge University Press.
- Han, Z., Niyato, D., Saad, W., Başar, T., & Hjørungnes, A. (2011). *Game theory in wireless and communication networks: theory, models, and applications*. Cambridge University Press.
- Haykin, S. (2005). Cognitive radio: brain-empowered wireless communications. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 23(2), 201–220.
- Holma, H., & Toskala, A. (2007). *HSDPA/HSUPA for UMTS: High speed radio access for mobile communications*. Wiley.

- Hossain, E., Niyato, D., & Han, Z. (2009). *Dynamic spectrum access and management in cognitive radio networks*. Cambridge University Press Cambridge.
- Hunt, B., & Zeidler, E. (2004). *Oxford users' guide to mathematics*. OUP Oxford.
- IEEE802.16e. (2005). IEEE Std 802.16e-2005, Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems.
- Interface. (2006). High Rate Packet Data Air. "Specification, 3GPP2 C". S0024-A. Version, 3.
- ITU-R. (1997). International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000), Recommendation ITU-R, M.687-2.
- Jain, R., Chiu, D.-M., & Hawe, W. R. (1984). *A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer system*. Eastern Research Laboratory, Digital Equipment Corporation.
- Jeffrey, A., & Zwillinger, D. (2007). *Table of integrals, series, and products*. Academic Press.
- Johari, R., & Tsitsiklis, J. N. (2004). Efficiency loss in a network resource allocation game. *Mathematics of Operations Research*, 29(3), 407–435.
- Jovicic, A., & Viswanath, P. (2009). Cognitive radio: An information-theoretic perspective. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 55(9), 3945–3958.
- Kandeepan, S., De Nardis, L., Di Benedetto, M.-G., Guidotti, A., & Corazza, G. E. (2010). Cognitive satellite terrestrial radios. In *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010), 2010 IEEE* (pp. 1–6).
- Kang, X., Liang, Y.-C., Nallanathan, A., Garg, H. K., & Zhang, R. (2009). Optimal power allocation for fading channels in cognitive radio networks: Ergodic capacity and outage capacity. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 8(2), 940–950.
- Kelly, F. P., Maulloo, A. K., & Tan, D. K. (1998). Rate control for communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability. *Journal of the Operational Research society*, 49(3), 237–252.
- Kolding, T. E., Pedersen, K. I., Wigard, J., Frederiksen, F., & Mogensen, P. E. (2003). High speed downlink packet access: WCDMA evolution. *IEEE Vehicular Technology Society News*, 50(1), 4–10.
- Krawczyk, J. B., & Uryasev, S. (2000). Relaxation algorithms to find nash equilibria with economic applications. *Environmental Modeling & Assessment*, 5(1), 63–73.
- Krishna, V. (2009). *Auction theory*. Academic press.
- Kuczma, M., & Gilányi, A. (2008). *An introduction to the theory of functional equations and inequalities: Cauchy's equation and Jensen's inequality*. Springer.

- Lai, L., & El Gamal, H. (2008). The water-filling game in fading multiple-access channels. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 54(5), 2110–2122.
- Laneman, J. N., Tse, D. N., & Wornell, G. W. (2004). Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 50(12), 3062–3080.
- Laneman, J. N., & Wornell, G. W. (2000). Energy-efficient antenna sharing and relaying for wireless networks. In *Wireless Communications and Networking Conference, 2000. WCNC. 2000 IEEE* (Vol. 1, pp. 7–12).
- Lasaulce, S., Debbah, M., & Altman, E. (2009). Methodologies for analyzing equilibria in wireless games. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 26(5), 41–52.
- Lasaulce, S., Hayel, Y., El Azouzi, R., & Debbah, M. (2009). Introducing hierarchy in energy games. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 8(7), 3833–3843.
- Lasaulce, S., & Tembine, H. (2011). *Game theory and learning for wireless networks: Fundamentals and applications*. Academic Press.
- Lazar, A. A., & Semret, N. (1999). Design and analysis of the progressive second price auction for network bandwidth sharing. *Telecommunication Systems-Special issue on Network Economics*, 20, 255–263.
- Lee, B. G., Park, D., & Seo, H. (2009). *Wireless communications resource management*. Wiley-IEEE Press.
- Li, L., & Goldsmith, A. J. (2001). Capacity and optimal resource allocation for fading broadcast channels. i. ergodic capacity. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 47(3), 1083–1102.
- Liang, Y., & Veeravalli, V. V. (2005). Gaussian orthogonal relay channels: Optimal resource allocation and capacity. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 51(9), 3284–3289.
- Ma, Y., Zhang, H., Yuan, D., & Chen, H.-H. (2009). Adaptive power allocation with quality-of-service guarantee in cognitive radio networks. *Computer Communications*, 32(18), 1975 - 1982.
- Maille, P., & Tuffin, B. (2004). Multibid auctions for bandwidth allocation in communication networks. In *INFOCOM 2004. 23 Annual Conference of the IEEE Computer and Communications Societies* (Vol. 1).
- Mao, L., Xu, S., Fu, T., & Huang, Q. (2012). Game theory based power allocation algorithm in high-speed mobile environment. In *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2012 IEEE* (pp. 1–5).
- Maral, G., & Bousquet, M. (2011). *Satellite communications systems: systems, techniques and technology*. Wiley.

- Menon, R., MacKenzie, A., Buehrer, R., & Reed, J. (2009). Interference avoidance in networks with distributed receivers. *Communications, IEEE Transactions on*, 57(10), 3078–3091.
- Mitola III, J., & Maguire Jr, G. Q. (1999). Cognitive radio: making software radios more personal. *Personal Communications, IEEE*, 6(4), 13–18.
- Monderer, D., & Shapley, L. S. (1996). Potential games. *Games and economic behavior*, 14(1), 124–143.
- Morell, A., Seco-Granados, G., & Vazquez-Castro, M. (2008). Cross-layer design of dynamic bandwidth allocation in DVB-RCS. *Systems Journal, IEEE*, 2(1), 62–73.
- Musavian, L., & Aïssa, S. (2009). Fundamental capacity limits of cognitive radio in fading environments with imperfect channel information. *Communications, IEEE Transactions on*, 57(11), 3472–3480.
- Musavian, L., & Aïssa, S. (2010). Effective capacity of delay-constrained cognitive radio in nakagami fading channels. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 9(3), 1054–1062.
- Musavian, L., Aïssa, S., & Lambotharan, S. (2011). Adaptive modulation in spectrum-sharing channels under delay quality-of-service constraints. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 60(3), 901–911.
- Nash, J. (1950). Equilibrium points in n-person games. *Proceedings of the national academy of sciences*, 36(1), 48–49.
- Nash, J. F. (1950). The bargaining problem. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 155–162.
- Nikaido, H., & Isoda, K. (1955). Note on noncooperative convex games. *Pacific Journal of Mathematics*, 5, 807–815.
- Nisan, N., Roughgarden, T., Tardos, E., & Vazirani, V. V. (2007). *Algorithmic game theory*. Cambridge University Press.
- Niyato, D., & Hossain, E. (2006). Queue-aware uplink bandwidth allocation and rate control for polling service in iee 802.16 broadband wireless networks. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 5(6), 668–679.
- Niyato, D., & Hossain, E. (2006b). A queuing-theoretic and optimization-based model for radio resource management in iee 802.16 broadband wireless networks. *Computers, IEEE Transactions on*, 55(11), 1473–1488.
- Niyato, D., & Hossain, E. (2006c). A cooperative game framework for bandwidth allocation in 4g heterogeneous wireless networks. In *Communications, 2006. ICC'06. IEEE International Conference on* (Vol. 9, pp. 4357–4362).

- Niyato, D., & Hossain, E. (2007). QoS-aware bandwidth allocation and admission control in IEEE 802.16 broadband wireless access networks: A non-cooperative game theoretic approach. *Computer Networks*, 51(11), 3305–3321.
- Niyato, D., & Hossain, E. (2009). Dynamics of network selection in heterogeneous wireless networks: an evolutionary game approach. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 58(4), 2008–2017.
- O'Neill, B. (1982). A problem of rights arbitration from the talmud. *Mathematical Social Sciences*, 2(4), 345–371.
- Osborne, M. J., & Rubinstein, A. (1994). *A course in game theory*. MIT press.
- Panagopoulos, A., & Kanellopoulos, J. (2002). Prediction of triple-orbital diversity performance in earth-space communication. *International journal of satellite communications*, 20(3), 187–200.
- Panagopoulos, A. D., Arapoglou, P.-D., & Cottis, P. G. (2004). Satellite communications at Ku, Ka, and V bands: Propagation impairments and mitigation techniques. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, 6(3), 2–14.
- Panagopoulos, A. D., & Kanellopoulos, J. D. (2003). On the rain attenuation dynamics: spatial-temporal analysis of rainfall rate and fade duration statistics. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 21(6), 595–611.
- Papoulis, A., & Pillai, S. U. (2002). *Probability, random variables and stochastic processes*. Tata McGraw-Hill Education.
- Peha, J. M. (2005). Approaches to spectrum sharing. *Communications Magazine, IEEE*, 43(2), 10–12.
- Qiao, D., Gursoy, M. C., & Velipasalar, S. (2010). A noncooperative power control game in multi-access fading channels with quality of service (QoS) constraints. *Physical Communication*, 3(2), 97 - 104.
- Rapoport, A., & Chammah, A. M. (1965). *Prisoner's dilemma* (Vol. 165). University of Michigan Press.
- Ren, S., & Letaief, K. (2009). Maximizing the effective capacity for wireless cooperative relay networks with QoS guarantees. *Communications, IEEE Transactions on*, 57(7), 2148–2159.
- Rezki, Z., & Alouini, M. (2012). Ergodic capacity of cognitive radio under imperfect channel-state information. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 61(5), 2108–2119.
- Rosen, J. (1965). Existence and uniqueness of equilibrium points for concave n-person games. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 520–534.
- Saad, W., Han, Z., Debbah, M., Hjørungnes, A., & Basar, T. (2009). Coalitional game theory for communication networks. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 26(5), 77–97.

- Saraydar, C. U., Mandayam, N. B., & Goodman, D. J. (2002). Efficient power control via pricing in wireless data networks. *Communications, IEEE Transactions on*, 50(2), 291-303.
- Sharma, S. K., Chatzinotas, S., & Ottersten, B. (2012). Satellite cognitive communications: Interference modeling and techniques selection. In *Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (ASMS) and 12th Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC), 2012 6th* (pp. 111-118).
- Shenker, S. (1995). Fundamental design issues for the future internet. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 13(7), 1176-1188.
- Shoham, Y., & Leyton-Brown, K. (2009). *Multiagent systems: Algorithmic, game-theoretic, and logical foundations*. Cambridge University Press.
- Simeone, O., Stanojev, I., Savazzi, S., Bar-Ness, Y., Spagnolini, U., & Pickholtz, R. (2008). Spectrum leasing to cooperating secondary ad hoc networks. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 26(1), 203-213.
- Simon, M. K., & Alouini, M.-S. (2005). *Digital communication over fading channels* (Vol. 95). Wiley-Interscience.
- Slotine, J.-J. E., Li, W., et al. (1991). *Applied nonlinear control* (Vol. 1) (No. 1). Prentice hall New Jersey.
- Tang, J., & Zhang, X. (2007a). Quality-of-service driven power and rate adaptation over wireless links. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 6(8), 3058-3068.
- Tang, J., & Zhang, X. (2007b). Quality-of-service driven power and rate adaptation for multi-channel communications over wireless links. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 6(12), 4349-4360.
- Tang, J., & Zhang, X. (2008). Cross-layer-model based adaptive resource allocation for statistical qos guarantees in mobile wireless networks. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 7(6), 2318-2328.
- Tarokh, V. (2009). *New directions in wireless communications research*. Springer.
- Thomson, W. (2003). Axiomatic and game-theoretic analysis of bankruptcy and taxation problems: a survey. *Mathematical Social Sciences*, 45(3), 249-297.
- Thomson, W. (2009). Bargaining and the theory of cooperative games: John Nash and beyond.
- Topkis, D. M. (1979). Equilibrium points in nonzero-sum n-person submodular games. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 17(6), 773-787.
- Tse, D., & Viswanath, P. (2005). *Fundamentals of wireless communication*. Cambridge university press.

- Uryasev, S., & Rubinstein, R. Y. (1994). On relaxation algorithms in computation of noncooperative equilibria. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 39(6), 1263–1267.
- Von Neumann, J., & Morgenstern, O. (2007). *Theory of games and economic behavior (commemorative edition)*. Princeton university press.
- Wang, B., Han, Z., & Liu, K. R. (2009). Distributed relay selection and power control for multiuser cooperative communication networks using stackelberg game. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 8(7), 975–990.
- Wang, T., Cano, A., Giannakis, G. B., & Laneman, J. N. (2007). High-performance cooperative demodulation with decode-and-forward relays. *Communications, IEEE Transactions on*, 55(7), 1427–1438.
- Wang, W., Cui, Y., Peng, T., & Wang, W. (2007). Noncooperative power control game with exponential pricing for cognitive radio network. In *Vehicular Technology Conference, 2007. VTC2007-Spring. IEEE 65th* (pp. 3125–3129).
- Wang, X., Ma, K., Han, Q., Liu, Z., & Guan, X. (2012). Pricing-based spectrum leasing in cognitive radio networks. *Networks, IET*, 1(3), 116–125.
- Weibull, J. W. (1995). *Evolutionary game theory*. The MIT press.
- Wu, D., & Negi, R. (2003). Effective capacity: a wireless link model for support of quality of service. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 2(4), 630–643.
- Wyglinski, A. M., Nekovee, M., & Hou, T. (2009). *Cognitive radio communications and networks: principles and practice*. Academic Press.
- Xie, X., & Guo, W. (2011). Fundamental effective capacity limits of cognitive radio in fading environments with imperfect channel information. In *Computational Problem-Solving (ICCP), 2011 International Conference on* (pp. 232–235).
- Yang, S., & Hajek, B. (2007). VCG-Kelly mechanisms for allocation of divisible goods: Adapting VCG mechanisms to one-dimensional signals. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 25(6), 1237–1243.
- Yates, R. D. (1995). A framework for uplink power control in cellular radio systems. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 13(7), 1341–1347.
- Zhang, L., Liang, Y.-C., & Xin, Y. (2008). Joint beamforming and power allocation for multiple access channels in cognitive radio networks. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 26(1), 38–51.
- Zhang, X., Tang, J., Chen, H.-H., Ci, S., & Guizani, M. (2006). Cross-layer-based modeling for quality of service guarantees in mobile wireless networks. *Communications Magazine, IEEE*, 44(1), 100–106.



- Zhang, Y., & Guizani, M. (2011). *Game theory for wireless communications and networking*. CRC Press.
- Zhao, Q., & Sadler, B. M. (2007). A survey of dynamic spectrum access. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 24(3), 79-89.
- Zhou, L. (1997). The Nash bargaining theory with non-convex problems. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 681-685.



# Βιογραφικό

Η Σταυρούλα Βασσάκη γεννήθηκε στην Αθήνα στις 7 Ιανουαρίου του 1984. Τον Οκτώβριο του 2006 απέκτησε το δίπλωμα του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού & Μηχανικού Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με βαθμό διπλώματος 8.2. Η διπλωματική της εργασία είχε τίτλο «Αυτόματη αναγνώριση ψηφιακού σήματος» και πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Κινητών Ραδιοεπικοινωνιών υπό την επίβλεψη του καθηγητή και υπεύθυνου του Εργαστηρίου Κινητών Ραδιοεπικοινωνιών κ. Φ. Κωνσταντίνου. Το Δεκέμβριο του 2006 ανακηρύχθηκε Υποψήφια Διδάκτωρ της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Φ. Κωνσταντίνου. Παράλληλα, τον Οκτώβριο του 2008 ολοκλήρωσε τις μεταπτυχιακές της σπουδές με θέμα «Οικονομική και Διοίκηση Τηλεπικοινωνιακών Δικτύων» στο τμήμα Πληροφορικής του Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών. Κατά την περίοδο Σεπτέμβριος 2010 μέχρι τον Αύγουστο του 2013 ήταν υπότροφος της πράξης Ηράκλειτος 2. Τα ερευνητικά της ενδιαφέροντα εντάσσονται στην περιοχές των ασύρματων δικτύων, εστιάζοντας κυρίως σε θέματα διαχείρισης πόρων και μεθόδων βελτιστοποίησης. Έχει εμπειρία στον προγραμματισμό σε γλώσσες C, C++ και στο πρόγραμμα προσομοιώσεων MATLAB. Γνωρίζει αγγλικά και γαλλικά. Είναι επίσης μέλος του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος από τον Μάρτιο του 2007.



# Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τη συγγραφή της διδακτορικής μου διατριβής, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου σε ένα σύνολο ανθρώπων των οποίων η συμβολή υπήρξε καθοριστική για την εκπόνηση της. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, κ. Φίλιππο Κωνσταντίνου, που μου προσέφερε τη θέση της υποψήφιας διδάκτορα, παρέχοντας μου τον απαραίτητο εξοπλισμό αλλά και την απαραίτητη στήριξη για κάθε μου βήμα. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω θερμά για την ενθάρρυνση και τη βοήθεια που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια της διατριβής καθώς και για τις χρήσιμες συμβουλές του.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τον Επικ. Καθηγητή, κ. Αθανάσιο Παναγόπουλο, για τη σημαντική καθοδήγηση που μου προσέφερε όλα αυτά τα χρόνια. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την παρακίνηση του σε κρίσιμες φάσεις, η οποία ήταν καθοριστική για την πορεία της διατριβής, καθώς και για την ψυχολογική στήριξη και την ενθάρρυνση που μου προσέφερε όλα αυτά τα χρόνια.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Κινητών Ραδιοεπικοινωνιών για την επικοινωνία και τη συνεργασία που είχαμε. Ιδιαίτερως, θέλω να ευχαριστήσω τον Αντώνη Γκότση, τον Κώστα Μαλιάτσο και τον Μάριο Μανίκα αλλά και πολλούς άλλους με τους οποίους περάσαμε αρκετές ώρες στο εργαστήριο. Θα ήθελα επιπλέον να ευχαριστήσω τους συνεργάτες αλλά και φίλους μου Δημήτρη Παπανικολάου, Νίκο Παπανικολάου, Γεώργιο Πιτσιλαδή και Χάρη Κουρόγιωργα για τις ευχάριστες ώρες που περάσαμε στον ελεύθερο μας χρόνο. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους στενούς μου φίλους, Άγγελο Λούπη και Κατερίνα Βελλοπούλου, για όσα περάσαμε αυτά τα χρόνια και να τους ευχηθώ ό,τι καλύτερο στην επαγγελματική τους και στην προσωπική τους ζωή. Τέλος, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στο στενό φίλο και συνεργάτη, Μάριο Πουλάκη, για τη συνεργασία μας σε αρκετές δημοσιεύσεις αλλά κυρίως για την ενθάρρυνση και τη στήριξη που μου προσέφερε όλα αυτά τα χρόνια και να του ευχηθώ την άμεση ολοκλήρωση της διατριβής του.

Ολοκληρώνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους γονείς μου, Γεώργιο και Ελένη, καθώς και την αδερφή μου, Μαρία, οι οποίοι με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια και συνεχίζουν να με στηρίζουν σε κάθε μου απόφαση. Η ολοκλήρωση της διατριβής οφείλεται κατά κύριο λόγο στη δική τους ενθάρρυνση και στη πίστη τους σε μένα και το λιγότερο που μπορώ να κάνω είναι να τους την αφιερώσω με όλη μου την αγάπη.

Σταυρούλα Βασσάκη,

Σεπτέμβριος 2013

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) - Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Ηράκλειτος II .



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ  
εινότητα στην κοινωνία της γνώσης  
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ  
2007-2013  
Πρόγραμμα για τη γνώση  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ