



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Μηχανισμοί Βελτιστοποίησης
Χρονοπρογραμματισμού και Διαχείρισης Πόρων
για Διασφάλιση Ποιότητας Υπηρεσίας σε Ασύρματα Δίκτυα**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

του

ΜΑΡΙΟΥ Ι. ΠΟΥΛΑΚΗ

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

Διπλωματούχου Μεταπτυχιακού Διοίκησης και Οικονομικής
των Τηλεπικοινωνιακών Δικτύων Ε.Κ.Π.Α. (2008)

Αθήνα, Μάιος 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Μηχανισμοί Βελτιστοποίησης
Χρονοπρογραμματισμού και Διαχείρισης Πόρων
για Διασφάλιση Ποιότητας Υπηρεσίας σε Ασύρματα Δίκτυα**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

του

ΜΑΡΙΟΥ Ι. ΠΟΥΛΑΚΗ

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

Διπλωματούχου Μεταπτυχιακού Διοίκησης και Οικονομικής
των Τηλεπικοινωνιακών Δικτύων Ε.Κ.Π.Α. (2008)

Συμβουλευτική Επιτροπή: Καθ. Δρ. Φίλιππος Κωνσταντίνου
Επικ. Καθ. Δρ. Αθανάσιος Παναγόπουλος
Καθ. Δρ. Ιωάννης Κανελλόπουλος

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 12^η Μαΐου 2014.

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

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

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

.....
Μ. Θεολόγου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γ. Φικιώρης
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Αθ. Κανάτας
Καθηγητής Πανεπιστημίου
Πειραιώς

.....
Ε. Χατζηευθυμιάδης
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Κ.Π.Α.

Αθήνα, Μάιος 2014

.....

ΜΑΡΙΟΣ Ι. ΠΟΥΛΑΚΗΣ

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

Διπλ. Μεταπτυχιακού στη Διοίκηση και Οικονομική των Τηλεπικοινωνιακών Δικτύων Ε.Κ.Π.Α. (2008)

Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π. (2014)

Copyright © Μάριος Ι. Πουλάκης, 2014

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση της Διδακτορικής μου Διατριβής κατέστη δυνατή χάρη στη βοήθεια ενός πλήθους ανθρώπων τους οποίους θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, κ. Φίλιππο Κωνσταντίνου για την επίβλεψη της Διδακτορικής μου Διατριβής και την παροχή όλων των απαραίτητων εφοδίων για την ολοκλήρωση της. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω θερμά για τις πολύτιμες συμβουλές του, την καθοδήγηση και την έμπρακτη στήριξη που μου προσέφερε από την πρώτη στιγμή της γνωριμίας μας και της ένταξης μου στο Εργαστήριο Κινητών Ραδιοεπικοινωνιών (Ε.Κ.Ρ.) του Ε.Μ.Π., μέχρι σήμερα.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον Επικ. Καθηγητή Ε.Μ.Π., κ. Αθανάσιο Παναγόπουλο, για την ουσιαστική καθοδήγηση, την ψυχολογική στήριξη και την ενθάρρυνση που μου προσέφερε όλα αυτά τα χρόνια. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για το αμέριστο ενδιαφέρον του σε κάθε βήμα της ερευνητικής μου πορείας. Η βοήθεια του ήταν καταλυτικός παράγοντας για την επίτευξη του δύσκολου στόχου μου.

Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου και σε όλα τα μέλη του Ε.Κ.Ρ. για τη συνεργασία που είχαμε. Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Θανάση Μαρούση, τον Κώστα Μαλιάτσο, τον Μάριο Μανίκα, αλλά και πολλούς άλλους με τους οποίους περάσαμε αρκετές ώρες στο εργαστήριο. Θα ήθελα επιπλέον να ευχαριστήσω ένα πρώην μέλος του εργαστηρίου, τη Μαρία Κωλέττα, για την πολύτιμη βοήθεια της στην αρχή της ένταξης μου στο Ε.Κ.Ρ. Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συνεργάτες αλλά και φίλους μου Γιώργο Πιτσιλαδή, Χάρη Κουρούγιωργα, Νίκο Παπανικολάου και Δημήτρη Παπανικολάου, για τη συμπαράσταση τους και τις ευχάριστες ώρες που περάσαμε στον ελεύθερο μας χρόνο.

Ιδιαίτερες, ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στο Ε.Μ.Π. για την οικονομική ενίσχυση που μου προσέφερε μέσω της Ζετούς υποτροφίας από τον Ειδικό Λογαριασμό Κονδυλίων Έρευνας (Ε.Λ.Κ.Ε.).

Ολοκληρώνοντας, δεν θα μπορούσα να παραβλέψω και μερικές προσωπικές ευχαριστίες. Θα ήθελα να ευχαριστήσω εγκάρδια τους γονείς μου, Γιάννη και Νίκη, οι οποίοι με ενθαρρύνουν και με στηρίζουν πάντα σε κάθε μου απόφαση, δίνοντας μου κίνητρο για να παραμείνω συγκεντρωμένος στο στόχο μου μέχρι το τέλος. Η ολοκλήρωση της διατριβής οφείλεται κατά κύριο λόγο σε αυτούς και γι' αυτό το λόγο τους την αφιερώσω με όλη μου την αγάπη. Επιπλέον, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους στενούς μου φίλους από το σχολείο Ηλία, Μάκη και Γιώργο, που καθημερινά με υποστήριξαν σε όλες τις φάσεις της ζωής μου και για όλα όσα έχουμε περάσει μέχρι σήμερα. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την πολύ στενή μου φίλη αλλά και συνεργάτιδα Βούλα Βασσάκη για τη συνεχή και ευχάριστη ενθάρρυνση, στήριξη και παρέα που μου προσέφερε όλα αυτά τα χρόνια.

*Μάριος Πουλλάκης
Αθήνα, Μάιος 2014*

Περίληψη

Η γρήγορη ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων, καθώς και οι υψηλές απαιτήσεις των συνεχώς αυξανόμενων χρηστών και τερματικών, έρχονται σε αντίθεση με την πεπερασμένη φύση των διαθέσιμων πόρων των δικτύων. Ταυτόχρονα, η διασφάλιση της ποιότητας των υπηρεσιών αποτελεί θέμα μείζονος σημασίας για τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, η σχεδίαση αποδοτικών μηχανισμών διαχείρισης πόρων για τη διασφάλιση της ποιότητας υπηρεσιών αποτελεί μεγάλη πρόκληση στα δίκτυα αυτά. Γι' αυτό το λόγο, ο σκοπός της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής είναι η ανάπτυξη και μελέτη καινοτόμων μηχανισμών βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού και διαχείρισης πόρων με κεντρικό γνώμονα τη διασφάλιση της ποιότητας υπηρεσίας στους ασύρματους χρήστες. Η κύρια ερευνητική συνεισφορά της Διδακτορικής Διατριβής μπορεί να χωριστεί σε δυο βασικά μέρη.

Πιο συγκεκριμένα, στο πρώτο μέρος η Διδακτορική Διατριβή εστιάζει στην επίλυση του προβλήματος κατανάλωσης ενέργειας των ασύρματων τερματικών, μέσω της τεχνικής χρονοπρογραμματισμού μετάδοσης. Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας αποτελεί μια πολύ σημαντική απαίτηση για τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα, προκειμένου να επιτυγχάνεται υψηλή αυτονομία μπαταρίας στα τερματικά. Στο πλαίσιο της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής προτείνονται καινοτόμοι, ενεργειακά αποδοτικοί μηχανισμοί ομορτυνιστικού χρονοπρογραμματισμού μετάδοσης δεδομένων, οι οποίοι παράλληλα διασφαλίζουν συγκεκριμένες απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας. Αναλυτικότερα, παρόλο που τα χρονομεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά των ασύρματων καναλιών αντιμετωπίζονται συνήθως ως πηγή αναξιοπιστίας, οι προτεινόμενοι μηχανισμοί εκμεταλλεύονται ομορτυνιστικά αυτές τις μεταβλητές συνθήκες προγραμματίζοντας την ασύρματη επικοινωνία όταν οι συνθήκες του καναλιού είναι ευνοϊκές, με στόχο την αποδοτικότερη χρησιμοποίηση της μπαταρίας. Πιο συγκεκριμένα, προτείνονται δυο καταναμημένοι, ενεργειακά αποδοτικοί μηχανισμοί ομορτυνιστικού χρονοπρογραμματισμού, οι οποίοι χρησιμοποιούν τη θεωρία βέλτιστης παύσης (optimal stopping theory), έτσι ώστε να βρεθεί η βέλτιστη χρονική στιγμή για μετάδοση δεδομένων ανάλογα με τις συνθήκες του καναλιού, λαμβάνοντας υπόψη συγκεκριμένες απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας. Επιπρόσθετα, η τεχνική του ομορτυνιστικού χρονοπρογραμματισμού χρησιμοποιείται για τη σχεδίαση ενεργειακά αποδοτικών δορυφορικών ζεύξεων που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10GHz υπό συνθήκες βροχής και προτείνεται ένας κλιματικά εξαρτώμενος ενεργειακά αποδοτικός μηχανισμός.

Το δεύτερο μέρος της Διδακτορικής Διατριβής ασχολείται με τα προβλήματα διαχείρισης πόρων για διασφάλιση της ποιότητας υπηρεσίας, εστιάζοντας στα γνωστικά ασύρματα δίκτυα, τα οποία στοχεύουν στην αποδοτική χρήση του πεπερασμένου και υποχρησιμοποιούμενου ραδιοφάσματος. Αναλυτικότερα, αρχικά μελετάται η έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας (effective capacity). Η συγκεκριμένη έννοια αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο σχεδίασης αποδοτικών μηχανισμών που παρέχουν στατιστικές εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας, αφού συσχετίζει το ρυθμό εξυπηρέτησης του ασύρματου καναλιού με την απόδοση ποιότητας υπηρεσιών του δικτύου. Στο πλαίσιο της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής προτείνονται καινοτόμοι μηχανισμοί διαχείρισης πόρων για διασφάλιση

ποιότητας υπηρεσίας σε γνωστικά ασύρματα δίκτυα, μελετώντας δυο διαφορετικές προσεγγίσεις υλοποίησης των δικτύων αυτών. Αναλυτικότερα, θεωρείται ένα underlay γνωστικό σύστημα, όπου τα κανάλια διαλείψεων των χρηστών είναι ετεροσυσχετισμένα και προτείνεται ένας κατανεμημένος μηχανισμός ελέγχου ισχύος για τον (μη αδειοδοτημένο) δευτερεύοντα χρήστη. Ο μηχανισμός αυτός μεγιστοποιεί την αποτελεσματική χωρητικότητα του δευτερεύοντα χρήστη μέσω της θεωρίας κυρτής βελτιστοποίησης, δεδομένων περιορισμών ισχύος και παρεμβολής. Επιπρόσθετα, προτείνεται ένας κατανεμημένος μηχανισμός επίλυσης του προβλήματος διαμοιρασμού φάσματος μεταξύ πολλαπλών δευτερευόντων χρηστών με διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας, σε ένα interweave γνωστικό σύστημα. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο, σύμφωνα με το οποίο κάθε δευτερεύων χρήστης ανταγωνίζεται με τους υπόλοιπους, με στόχο τη βελτιστοποίηση της ατομικής του αποτελεσματικής χωρητικότητας, δεδομένου του από κοινού περιορισμού του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος χρησιμοποιείται η θεωρία ανισοτήτων μεταβολών.

Λέξεις Κλειδιά: ασύρματα δίκτυα, αποτελεσματική χωρητικότητα, γνωστικά δίκτυα, διαμοιρασμός φάσματος, διαχείριση πόρων, έλεγχος ισχύος, ενεργειακή απόδοση, θεωρία ανισοτήτων μεταβολών, θεωρία βέλτιστης παύσης, θεωρία κυρτής βελτιστοποίησης, κανάλια διαλείψεων, ομορτυνιστικός χρονοπρογραμματισμός, ποιότητα υπηρεσίας.

Abstract

The rapid development of wireless communication networks, as well as the high requirements of the growing number of users and devices, stand in clear contrast to the limited resources of the networks. At the same time, the quality of service (QoS) assurance constitutes a major issue in modern wireless networks. As a result, the design of efficient resource management schemes for QoS assurance constitutes a great challenge for these networks. Towards this direction, the objective of this PhD Thesis is to study and develop novel optimization mechanisms for QoS-driven scheduling and resource management in wireless networks. The research contribution of this Thesis can be divided in two main parts.

At the first part, the Thesis focuses on the solution of the energy consumption problem in wireless communication devices, using transmission scheduling techniques. Given that the communication interface of wireless devices consumes a significant portion of energy, reduction of the transmission energy consumption is very important for modern wireless networks, in order to maintain high battery autonomy. For this reason, novel energy efficient opportunistic transmission scheduling mechanisms, that assure specific QoS requirements, are proposed in this PhD Thesis. Particularly, even though the wireless channel fluctuations are traditionally treated as a source of unreliability, these variations can be opportunistically exploited, by scheduling data transmissions when the channel conditions are good, according to the proposed mechanisms. This can prolong the battery lifetime of a wireless device. More specifically, two distributed opportunistic scheduling mechanisms that employ the optimal stopping theory to find the optimal time instant to transmit depending on channel conditions, are proposed, taking also into account specific QoS constraints. Furthermore, the opportunistic scheduling technique is utilized in order to design energy efficient satellite links that operate at the frequency range above 10GHz under rainfall conditions, proposing a climatic dependent energy efficient mechanism.

The second part deals with the resource management problems for QoS provisioning, focusing on the cognitive radio networks, which target at the efficient usage of the limited and under-utilized radio spectrum resources. Particularly, the concept of effective capacity is studied, since it constitutes a powerful tool for the cross-layer design of efficient QoS provisioning mechanisms, connecting the wireless channel's service rate with the statistical QoS performance of the network. The PhD Thesis introduces novel resource management mechanisms for QoS provisioning in cognitive radio networks, studying two different implementation approaches. More specifically, considering an underlay cognitive radio system, where the fading channels of the communication links are cross-correlated, this Thesis proposes a distributed power control mechanism for the (unlicensed) secondary user. This mechanism maximizes the effective capacity of the secondary link using principles of convex optimization theory, under specific power and interference constraints. Furthermore, a distributed mechanism that solves the spectrum sharing problem among multiple secondary users with different QoS requirements in an interweave

cognitive radio system, is proposed. This QoS-driven spectrum sharing problem is formulated as a non-cooperative game with a view to maximizing the effective capacity of each secondary user, subject to the coupled constraint of the available bandwidth. A novel solution is proposed by employing the variational inequalities theory.

Key Words: cognitive radio networks, convex optimization theory, effective capacity, energy efficiency, fading channels, opportunistic scheduling, optimal stopping theory, power control, quality of service, resource management, spectrum sharing, variational inequalities theory, wireless networks.

Περιεχόμενα

Κατάλογος Σχημάτων	xiii
Κατάλογος Πινάκων	xv
Κατάλογος Συντημήσεων	xvii
1 Εισαγωγή	1
1.1 Κίνητρα και Θεματολογία της Διδακτορικής Διατριβής	1
1.2 Δομή της Διδακτορικής Διατριβής	4
2 Διαχείριση Πόρων Ασύρματων Δικτύων και Ποιότητα Υπηρεσίας	7
2.1 Ασύρματες Επικοινωνίες	8
2.1.1 Ραδιοφάσμα	8
2.1.2 Ασύρματο Κανάλι	10
2.1.3 Ασύρματα Συστήματα Επικοινωνιών	14
2.1.4 Διαδικασία Προτυποποίησης	23
2.2 Διαχείριση Πόρων Ασύρματων Δικτύων	25
2.2.1 Πόροι Ασύρματων Δικτύων	25
2.2.2 Διατύπωση Προβλήματος Διαχείρισης Πόρων	27
2.2.3 Τεχνικές Διαχείρισης Ασύρματων Πόρων	28
2.3 Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS)	32
3 Μαθηματικά Εργαλεία Βελτιστοποίησης για Διαχείριση Πόρων Ασυρμάτων Δικτύων	37
3.1 Θεωρία Βελτιστοποίησης	37
3.1.1 Ορισμός Προβλήματος Βελτιστοποίησης	38
3.1.2 Βασικοί Ορισμοί	39
3.1.3 Συνθήκες Βελτιστότητας	41
3.1.4 Εξίσωση Euler-Lagrange	43
3.2 Θεωρία Ανισοτήτων Μεταβολών	44
3.2.1 Βασικοί Ορισμοί	44
3.2.2 Συνθήκες ΚΚΤ	45
3.2.3 Ύπαρξη και Μοναδικότητα της Λύσης	46
3.2.4 Θεωρία Παιγνίων και Διασύνδεση με Θεωρία Ανισοτήτων Μεταβολών	48
3.3 Θεωρία Βέλτιστης Παύσης	51
3.3.1 Ορισμός Προβλήματος Βέλτιστης Παύσης	51
3.3.2 Βέλτιστος Κανόνας Παύσης	54
3.3.3 Προβλήματα Πεπερασμένου Ορίζοντα	56
3.3.4 Προβλήματα Ποσοστού Απολαβής (Rate of Return)	57

4	Ενεργειακά Αποδοτικοί Μηχανισμοί Οπορτουλιστικού Χρονοπρογραμματισμού Μετάδοσης Δεδομένων	59
4.1	Εισαγωγή	59
4.2	Κατανάλωση Ισχύος στις Ασύρματες Επικοινωνίες	61
4.3	Πρόβλημα Ενεργειακής Απόδοσης στις Ασύρματες Επικοινωνίες	63
4.4	Οπορτουλιστικός Προγραμματισμός Μετάδοσης και Σχετική Βιβλιογραφία	64
4.4.1	Προγραμματισμός Μετάδοσης Διαφορισμού Χρόνου	66
4.4.2	Προγραμματισμός Μετάδοσης Διαφορισμού Πολλαπλών Χρηστών	70
4.5	Προτεινόμενοι Ενεργειακά Αποδοτικοί Μηχανισμοί Οπορτουλιστικού Χρονοπρογραμματισμού για Διασφάλιση QoS	74
4.5.1	Συνεισφορά των Προτεινόμενων Μηχανισμών	75
4.5.2	Μοντέλο Συστήματος	76
4.5.3	Μοντελοποίηση Προβλήματος Βέλτιστης Παύσης	78
4.5.4	Μηχανισμός Ελαχιστοποίησης Προσοδοκώμενης Κατανάλωσης Ενέργειας	80
4.5.5	Μηχανισμός Ελαχιστοποίησης Μέσης Κατανάλωσης Ενέργειας ανά Μονάδα Χρόνου	82
4.5.6	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων και Σχολιασμός	88
4.6	Κλιματικά Εξαρτώμενη, Ενεργειακά Αποδοτική Σχεδίαση Δορυφορικών Ζεύξεων άνω των 10 GHz	97
4.6.1	Μοντέλα Συστήματος και Καναλιών	99
4.6.2	Προτεινόμενος Κλιματικά Εξαρτώμενος Ενεργειακά Αποδοτικός Μηχανισμός	101
4.6.3	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων και Σχολιασμός	102
4.7	Συμπεράσματα	106
5	Μηχανισμοί Ελέγχου Ισχύος και Διαμοιρασμού Εύρους Ζώνης για Διασφάλιση QoS	109
5.1	Εισαγωγή	109
5.2	Αποτελεσματική Χωρητικότητα	110
5.2.1	Θεωρία Στατιστικών Εγγυήσεων QoS	112
5.2.2	Ορισμός Αποτελεσματικής Χωρητικότητας	112
5.3	Πρόβλημα Μεγιστοποίησης Αποτελεσματικής Χωρητικότητας και Σχετική Βιβλιογραφία	116
5.3.1	Διαχείριση Πόρων σε Ασύρματα Δίκτυα για Διασφάλιση QoS	117
5.3.2	Διαχείριση Πόρων σε Γνωστικά Δίκτυα για Διασφάλιση QoS	119
5.4	Προτεινόμενος Μηχανισμός Ελέγχου Ισχύος για Διασφάλιση QoS σε Γνωστικά Δίκτυα	122
5.4.1	Μοντέλα Συστήματος και Καναλιών	124
5.4.2	Βέλτιστη Πολιτική Ελέγχου Ισχύος	126
5.4.3	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων και Σχολιασμός	130
5.5	Προτεινόμενος Μηχανισμός Διαμοιρασμού Φάσματος για Διασφάλιση QoS σε Γνωστικά Δίκτυα	137
5.5.1	Μοντέλο Συστήματος	139
5.5.2	Παιγνιοθεωρητική Μοντελοποίηση Προβλήματος	140
5.5.3	Μοντελοποίηση Προβλήματος Ανισότητας Μεταβολών και Κατανεμημένος Αλγόριθμος Επίλυσης	141
5.5.4	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων και Σχολιασμός	143
5.6	Συμπεράσματα	146
6	Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα	149
6.1	Σύνοψη Συμπερασμάτων και Συνεισφορά της Διδακτορικής Διατριβής	149
6.2	Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	153
	Παράρτημα Α' Κατανομές Ασύρματων Καναλιών	157

Παράρτημα Β' Αποδείξεις Προτάσεων	161
Βιβλιογραφία	167
Βιογραφικό Σημείωμα του Συγγραφέα	177
Δημοσιεύσεις του Συγγραφέα	179

Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Τεχνολογίες ασύρματων δικτύων.	14
2.2	Συνιστώσες προβλήματος διαχείρισης πόρων ασύρματων δικτύων.	33
4.1	Βασική δομή μονάδας ασύρματων επικοινωνιών.	62
4.2	Προγραμματισμός μετάδοσης διαφορισμού χρόνου.	65
4.3	Προγραμματισμός μετάδοσης διαφορισμού πολλαπλών χρηστών.	66
4.4	Κατανάλωση ενέργειας ως προς το κέρδος καναλιού για διαφορετικές τιμές ρυθμού μετάδοσης.	67
4.5	Κατανάλωση ενέργειας ως προς το ρυθμό μετάδοσης για διαφορετικά κέρδη καναλιού (διαφορετικοί χρήστες).	71
4.6	Μοντέλο συστήματος.	77
4.7	Πρόβλημα ελαχιστοποίησης κατανάλωσης ενέργειας ως πρόβλημα βέλτιστης παύσης.	79
4.8	Αναπαράσταση του προβλήματος χρονοπρογραμματισμού για ένα γύρο.	79
4.9	Διάγραμμα ροής του προτεινόμενου χρονοπρογραμματιστή.	89
4.10	Σύγκλιση του λ του $E^2OTS-II$ για διαφορετικά σενάρια, με $A = 10^{-11}W$ και $P_{max} = 0.1W$ (κανάλια Rayleigh).	92
4.11	Επίδραση κατανάλωσης ενέργειας απόκτησης CSI στη συνολική μέση κατανάλωση ισχύος.	96
4.12	Επίδραση κατανάλωσης ενέργειας απόκτησης CSI στη μέση απόδοση.	96
4.13	Μοντέλο συστήματος και πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού.	99
4.14	Μέση κατανάλωση ενέργειας του CDE^2OS ανά γύρο ως προς το BER για διαφορετικές συχνότητες και τοποθεσίες του δορυφορικού τερματικού.	104
4.15	Κέρδος ενεργειακής απόδοσης του CDE^2OS σε σύγκριση με τον DS ως προς το BER για την Ka-ζώνη (30GHz) και διαφορετικές τοποθεσίες του δορυφορικού τερματικού.	105
5.1	Μοντέλο συστήματος.	113
5.2	Συναρτήσεις ισοδύναμου εύρους ζώνης και αποτελεσματικής χωρητικότητας.	114
5.3	Αποτελεσματική χωρητικότητα ως προς τον εκθέτη QoS για διαφορετικές τιμές ισχύος μετάδοσης και εύρους ζώνης.	117
5.4	Μοντέλα συστήματος.	125
5.5	Εκπεμπόμενη ισχύς ως προς τον εκθέτη QoS και τον κανονικοποιημένο SINR.	129
5.6	Επαλήθευση των αποτελεσμάτων προσομοιώσεων.	131
5.7	Κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα του SU ως προς τον εκθέτη QoS για διαφορετικούς συντελεστές συσχέτισης (συσχέτιση λήψης).	132
5.8	Μέση κατανάλωση ισχύος στον SU_{Tx} ως προς τον εκθέτη QoS για διαφορετικούς συντελεστές συσχέτισης (συσχέτιση λήψης).	132
5.9	Κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα του SU ως προς το I_{max} για διαφορετικούς συντελεστές συσχέτισης και παραμέτρους m (συσχέτιση λήψης).	134
5.10	Κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα του SU ως προς τον εκθέτη QoS για διαφορετικούς συντελεστές συσχέτισης (συσχέτιση εκπομπής).	135

5.11	Μέση κατανάλωση ισχύος στον SU_{Tx} ως προς τον εκθέτη QoS για διαφορετικούς συντελεστές συσχέτισης (συσχέτιση εκπομπής).	135
5.12	Κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα του SU ως προς το I_{max} για διαφορετικούς συντελεστές συσχέτισης και παραμέτρους m (συσχέτιση εκπομπής).	136
5.13	Μοντέλο συστήματος συνύπαρξης SUs με PU.	139
5.14	Εκχώρηση εύρους ζώνης στον SU_1 ($N_s = 2$) ως προς το θ_1 με $B_{tot} = 100\text{KHz}$ για διαφορετικά θ_2	144
5.15	Εκχώρηση εύρους ζώνης στον SU_1 ($N_s = 2$) ως προς το $h_{s,1}$ με $B_{tot} = 100\text{KHz}$ για διαφορετικά $h_{s,2}$	144
5.16	Αποτελεσματική χωρητικότητα του SU_1 ($N_s = 2$) ως προς το θ_1 με $B_{tot} = 100\text{KHz}$ για διαφορετικά θ_2	145
5.17	Σύγκλιση του επαναληπτικού αλγορίθμου με $N_s = 5$ και $B_{tot} = 200\text{KHz}$ για χρήστες με διαφορετικά θ	146

Κατάλογος Πινάκων

2.1	Κατανομή ραδιοφάσματος ανά υπηρεσία.	9
4.1	Σύγκλιση ενδεικτικών κατωφλίων ισχύος για τον $E^2OTS-II$ για κανάλια Rayleigh (Σενάριο A).	93
4.2	Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για διαφορετικά σενάρια.	94
4.3	Αποτελέσματα συγκριτικής αξιολόγησης μηχανισμών για κανάλια Rayleigh.	94
4.4	Αποτελέσματα συγκριτικής αξιολόγησης μηχανισμών για κανάλια Rice.	97
4.5	Τεχνικά χαρακτηριστικά της ζεύξης επικοινωνίας.	103
4.6	Συγκριτικά αποτελέσματα προσομοιώσεων στην Ka-ζώνη (30GHz) για την Αθήνα (GR) σε διαφορετικά σενάρια χρονοπρογραμματισμού.	106
5.1	Σύγκριση μοντέλων συσχέτισης για $m = 1$ και $I_{\max} = -9$ dBW.	137

Κατάλογος Συντμήσεων

3GPP	3rd Generation Partnership Project
6LoWPAN	IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks
ACI	Adjacent Channel Interference
ACM	Adaptive Coding and Modulation
AFS	Amplify and Forward
APTS	Average Power Transmission Scheduler
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
CDEEOS (CDE ² OS)	Climatic-Dependent Energy Efficient Opportunistic Scheduler
CDF	Cumulative Distribution Function
CDMA	Code Division Multiple Access
CIFEC (CIF _{EC})	Correlation Impact Factor on Effective Capacity
CR	Cognitive Radio
CSI	Channel State Information
CSMA / CA	Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
DCS	Digital Cellular System
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications
DF	Decode and Forward
DS/CDMA	Direct Sequence/Code Division Multiple Access
DTS	Deterministic Transmission Scheduler
DVB-RCS	Digital Video Broadcasting - Return Channel via Satellite
DVB-RCS+M	DVB-RCS Mobile
DVB-S	Digital Video Broadcasting via Satellite
DVB-SH	DVB - Satellite services to Handhelds
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
EEOTS (E ² OTS)	Energy Efficient Opportunistic Transmission Scheduler
ESS	Equal Spectrum Sharing
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FCC	Federal Communications Commission
FDD	Frequency Division Duplexing
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FM	Frequency Modulation
GEO	Geostationary/Geosynchronous Orbit
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
GNE	Generalized Nash Equilibrium
GNEP	Generalized Nash Equilibrium Problem
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications

HSPA	High Speed Packet Access
i.i.d	independent and identically distributed
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IF	Intermediate Frequencies
IMT-2000	International Mobile Telecommunications 2000
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ISO	International Standardization Organization
ITU	International Telecommunications Union
KKT	Karush-Kuhn-Tucker
LEO	Low Earth Orbit
LNA	Low Noise Amplifier
LoS	Line of Sight
LPTS	Least Power Transmission Scheduler
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Control
MANET	Mobile Ad hoc NETWORK
MEO	Medium Earth Orbit
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MISO	Multiple Input Single Output
MQAM	M-level Quadrature Amplitude Modulation
NCP	Nonlinear Complementarity Problem
NE	Nash Equilibrium
NEP	Nash Equilibrium Problem
nLoS	non Line of Sight
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OSI	Open Systems Interconnection
PA	Power Amplifier
PDF	Probability Density Function
PTS	Probabilistic Transmission Scheduler
PU	Primary User
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
QSS	QoS-driven Spectrum Sharing
RF	Radio Frequencies
RTS	Random Transmission Scheduler
SDR	Software Defined Radio
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SISO	Single Input Single Output
SNR	Signal to Noise Ratio
SU	Secondary User
TDMA	Time Division Multiple Access
TETRA	TErrestrial Trunked Radio
TIA	Telecommunications Industry Association
U-NII	Unlicensed National Information Infrastructure
UHF	Ultra-High Frequency
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VANET	Vehicular Ad hoc Network
VHF	Very High Frequency
VI	Variational Inequality

WCDMA	Wideband CDMA
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WRAN	Wireless Regional Area Network
WSN	Wireless Sensor Network
WWAN	Wireless Wide Area Network
ΕΕΤΤ	Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων
ΣΒ	Σταθμός Βάσης

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Κίνητρα και Θεματολογία της Διδακτορικής Διατριβής

Οι ασύρματες επικοινωνίες έχουν αλλάξει τον τρόπο ζωής των ανθρώπων τις τελευταίες δεκαετίες προσφέροντας ελευθερία κίνησης στις επικοινωνίες. Επιπρόσθετα, η ανάπτυξη των ασύρματων τεχνολογιών συνεχίζει με ταχείς ρυθμούς υποδεικνύοντας ένα λαμπρό μέλλον για τα ασύρματα δίκτυα. Ωστόσο, οι εξελίξεις στα ασύρματα δίκτυα και οι αναδυόμενες εφαρμογές και υπηρεσίες έχουν οδηγήσει στην αύξηση των απαιτήσεων των χρηστών για υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, χαμηλότερες καθυστερήσεις και υψηλότερη και σταθερότερη ποιότητα υπηρεσιών. Ως αποτέλεσμα, δημιουργούνται συνεχώς νέες τεχνικές προκλήσεις σχεδιασμού εύρωστων ασύρματων δικτύων, έτσι ώστε τα συστήματα νέας γενιάς να πληρούν τις προδιαγραφές που ορίζονται από τις σύγχρονες τάσεις.

Η ανάπτυξη σύγχρονων συστημάτων ασύρματων επικοινωνιών συνοδεύεται με την υιοθέτηση νέων τεχνολογιών φυσικού στρώματος, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη απόδοση συστήματος. Παρ' όλα αυτά, οι αυξανόμενες απαιτήσεις δεν μπορούν να εκπληρωθούν βελτιώνοντας μόνο τις τεχνολογίες μετάδοσης στο φυσικό στρώμα, δεδομένου ότι οι τεχνολογίες αυτές είναι ήδη αρκετά ώριμες και οι διαθέσιμοι πόροι των ασύρματων δικτύων είναι πεπερασμένοι. Επιπρόσθετα, η διασφάλιση της ποιότητας των διαφορετικών παρεχόμενων υπηρεσιών, οι οποίες χαρακτηρίζονται από διαφορετικές απαιτήσεις, αποτελεί μεγάλη πρόκληση, ειδικότερα στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα, λόγω του χρονομεταβαλλόμενου ασύρματου περιβάλλοντος (π.χ. ασύρματο κανάλι, παρεμβολές, θόρυβος, έλλειψη σταθερής υποδομής, κινητικότητα χρηστών). Ως εκ τούτου, για περαιτέρω αύξηση της απόδοσης των ασύρματων συστημάτων, οι μηχανικοί τηλεπικοινωνιών πρέπει να καταφύγουν σε αποδοτικότερους μηχανισμούς χρησιμοποίησης των διαθέσιμων πόρων των ασύρματων συστημάτων. Γι' αυτό το λόγο, η διαχείριση των πόρων των δικτύων αυτών με κεντρικό γνώμονα τη διασφάλιση της ποιότητας των υπηρεσιών κρίνεται απαραίτητη. Ο όρος διαχείριση πόρων στις ασύρματες επικοινωνίες αναφέρεται σε μια σειρά διεργασιών που καθορίζουν τον τρόπο χειρισμού και ανάθεσης των διαθέσιμων πόρων ενός ασύρματου δικτύου στους χρήστες του. Συνεπώς, ένα ασύρματο σύστημα νέας γενιάς μπορεί να μεγιστοποιήσει τη συνολική του απόδοση μόνο αν ενσωματώνει τις πλέον εξελιγμένες τεχνολογίες φυσικού στρώματος και παράλληλα συνδυάζει τη χρήση βέλτιστων διαδικασιών διαχείρισης των διαθέσιμων πόρων του συστήματος για τις τεχνολογίες αυτές.

Παράλληλα, οι ασύρματες φορητές/κινητές συσκευές γίνονται ολοένα και μικρότερες ενσω-

ματώνοντας παράλληλα ισχυρές υπολογιστικές δυνατότητες. Επιπρόσθετα, οι χρήστες αυτών των συσκευών δεν χρειάζεται να έχουν ένα σταθερό σημείο σύνδεσης, αλλά μπορούν να περιπλανηθούν μέσα στο δίκτυο κινούμενοι από ένα σημείο σε ένα άλλο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στις περισσότερες περιπτώσεις, οι συσκευές να μην συνδέονται συνεχώς σε κάποια τροφοδοσία ρεύματος, ενώ η δυνατότητα σύνδεσης τους σε τροφοδοσία να είναι περιορισμένη. Συνεπώς, οι ασύρματοι χρήστες περιορίζονται από την πεπερασμένη χωρητικότητα της μπαταρίας του εκάστοτε τερματικού. Επιπλέον, η ανάγκη για αυξανόμενη μετάδοση δεδομένων μέσω της ασύρματης διεπαφής έχει ως αποτέλεσμα την κατανάλωση περισσότερης ενέργειας, ενώ η τοπική αποθήκευση και επεξεργασία των δεδομένων μπορούν να επιφέρουν επιπρόσθετα σημαντικά ενεργειακά κόστη. Δεδομένου όμως ότι ένα μεγάλο ποσοστό της κατανάλωσης ενέργειας προέρχεται από τα τμήματα της συσκευής που πραγματοποιούν την επικοινωνία, όπως οι κάρτες διεπαφής δικτύου, είναι πολύ σημαντικό για τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας των επικοινωνιών, έτσι ώστε να διατηρείται μεγάλη αυτονομία για την μπαταρία του τερματικού. Γι' αυτό το λόγο, η ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών τεχνικών επικοινωνιών έχει γίνει απαραίτητη, ειδικότερα όταν υπεισέρχεται ο πρόσθετος παράγοντας της διασφάλισης της ποιότητας υπηρεσιών. Παράλληλα, τα χρονομεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά του ασύρματου καναλιού παρουσιάζονται συνήθως ως πηγή αναξιοπιστίας και διαδραματίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην κατανάλωση της μπαταρίας ενός τερματικού. Πιο συγκεκριμένα, όταν οι συνθήκες του καναλιού είναι δυσμενείς, απαιτείται μεγαλύτερη ισχύς μετάδοσης για την παροχή αξιόπιστης επικοινωνίας συγκεκριμένης ποιότητας. Ωστόσο, από μια άλλη οπτική γωνία, είναι δυνατή η οπορτουμιστική εκμετάλλευση των χρονομεταβαλλόμενων συνθηκών μέσω προγραμματισμού της επικοινωνίας, όταν και όπου υπάρχουν ευνοϊκές συνθήκες καναλιού. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να επιτευχθεί αποδοτικότερη χρησιμοποίηση της μπαταρίας στις ασύρματες επικοινωνίες, εκμεταλλεύοντας ουσιαστικά το ασύρματο κανάλι. Βασισμένη σε αυτή την παρατήρηση, η παρούσα Διδακτορική Διατριβή στοχεύει στην ανάπτυξη μηχανισμών διαχείρισης του χρόνου μετάδοσης και πιο συγκεκριμένα στην πρόταση κατανεμημένων μηχανισμών οπορτουμιστικού χρονοπρογραμματισμού μετάδοσης δεδομένων, οι οποίοι ελαχιστοποιούν την κατανάλωση ενέργειας μιας ασύρματης συσκευής. Οι μηχανισμοί αυτοί είναι σημαντικό να λαμβάνουν υπόψη τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας, όσον αφορά τη χρονική ανοχή αναβολής της επικοινωνίας και την ισχύ λαμβανόμενου σήματος στο δέκτη.

Επιπρόσθετα, η ραγδαία ανάπτυξη των ασύρματων συστημάτων και τεχνολογιών και η προσπάθεια ικανοποίησης των αυξανόμενων απαιτήσεων των χρηστών έχει ως αποτέλεσμα τη συμφόρηση του πεπερασμένου φάσματος συχνοτήτων, το οποίο παράλληλα υποχρησιμοποιείται, αφού στην πράξη αξιοποιείται μόνο ένα μικρό ποσοστό του. Για να ξεπεραστούν τα συγκεκριμένα προβλήματα συμφόρησης, τα τελευταία χρόνια έχει προταθεί μια πρωτοποριακή τεχνολογία ασύρματων επικοινωνιών που αλλάζει τα δεδομένα σύμφωνα με τα οποία ρυθμίζεται το ραδιοφάσμα και η οποία αναφέρεται ως γνωστικά συστήματα (cognitive radios). Στα δίκτυα αυτά, το αδειοδοτημένο φάσμα μπορούν να το εκμεταλλευτούν παράλληλα με τους αδειοδοτημένους χρήστες, δηλαδή τους πρωτεύοντες χρήστες, και μη αδειοδοτημένοι χρήστες, οι δευτερεύοντες χρήστες, με έναν έξυπνο και ευέλικτο τρόπο χωρίς να διαταράσσουν την επικοινωνία των αδειοδοτημένων χρηστών. Για να επιτευχθεί αυτό, χρειάζονται αποδοτικοί μηχανισμοί διαχείρισης πόρων των γνωστικών συστημάτων, οι οποίοι θα επιτρέπουν στα δυο είδη χρηστών να λειτουργούν ταυτόχρονα, αρμονικά και με αποδοτικό τρόπο. Παράλληλα, οι συγκεκριμένοι μηχανισμοί θα πρέπει να ενσωματώνουν την κρίσιμη μετρική

της ποιότητας υπηρεσίας, δεδομένου ότι οι διαφορετικές υπηρεσίες έχουν διαφορετικές απαιτήσεις. Αναλυτικότερα, ένας τρόπος υλοποίησης ενός τέτοιου συστήματος είναι επιτρέποντας στους δευτερεύοντες χρήστες να επικοινωνούν μεταξύ τους, ταυτόχρονα με τους πρωτεύοντες χρήστες, τηρώντας όμως συγκεκριμένους περιορισμούς παρεμβολής προς τους πρωτεύοντες χρήστες. Η συγκεκριμένη προσέγγιση ουσιαστικά απαιτεί την ανάπτυξη μηχανισμών διαχείρισης ισχύος των δευτερευόντων χρηστών που να βελτιστοποιούν την απόδοση του γνωστικού συστήματος, εξασφαλίζοντας παράλληλα τις απαιτήσεις σε ποιότητα υπηρεσίας. Υποκινούμενη από αυτό, η παρούσα Διδακτορική Διατριβή στοχεύει στην πρόταση ενός κατανεμημένου μηχανισμού ελέγχου ισχύος για τον δευτερεύοντα χρήστη, ο οποίος μεγιστοποιεί την αποτελεσματική χωρητικότητα (effective capacity) του, δεδομένων περιορισμών ισχύος και παρεμβολής προς τους πρωτεύοντες χρήστες. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η αποτελεσματική χωρητικότητα είναι μια σημαντική έννοια, η οποία ενσωματώνει τη μετρική ποιότητας υπηρεσίας στην απόδοση του ρυθμού μετάδοσης μιας ασύρματης ζεύξης. Επιπρόσθετα, μια άλλη προσέγγιση υλοποίησης ενός γνωστικού συστήματος αναφέρεται στην περίπτωση που οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους όταν και όπου (σε φασματικούς όρους) δεν μεταδίδουν δεδομένα οι πρωτεύοντες χρήστες, δηλαδή όταν και όπου δεν χρησιμοποιούν το φάσμα τους. Η προσέγγιση αυτή δημιουργεί την ανάγκη για αποτελεσματική διαχείριση του αχρησιμοποίητου αδειοδοτημένου φάσματος (εύρους ζώνης). Βασιζόμενη σε αυτή την παρατήρηση, η παρούσα Διδακτορική Διατριβή στοχεύει στην πρόταση ενός κατανεμημένου μηχανισμού διαμοιρασμού του πεπερασμένου διαθέσιμου φάσματος μεταξύ πολλαπλών δευτερευόντων χρηστών, ο οποίος μεγιστοποιεί την αποτελεσματική χωρητικότητα κάθε δευτερεύοντα χρήστη.

Συνεπώς, *το ερευνητικό αντικείμενο της Διδακτορικής Διατριβής είναι η μελέτη προβλημάτων βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού και διαχείρισης πόρων σε ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών με στόχο τη διασφάλιση της ποιότητας υπηρεσίας.* Δεδομένης της γρήγορης ανάπτυξης των ασύρματων δικτύων, των υψηλών απαιτήσεων των χρηστών και της πεπερασμένης φύσης των διαθέσιμων πόρων, σε συνδυασμό με το μείζον θέμα της διασφάλισης της ποιότητας των υπηρεσιών, η σχεδίαση αποδοτικών μηχανισμών που επιλύουν τα παραπάνω προβλήματα καθίσταται μεγάλη πρόκληση. Γι' αυτό το λόγο, στο πλαίσιο της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής προτείνονται, μελετώνται και αναπτύσσονται καινοτόμοι μηχανισμοί βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού και διαχείρισης πόρων. Οι μηχανισμοί αυτοί είτε βασίζονται σε κλασικές τεχνικές βελτιστοποίησης είτε χρησιμοποιούν καινοτόμες τεχνικές βελτιστοποίησης, προερχόμενες από διαφορετικούς επιστημονικούς τομείς, που τα τελευταία χρόνια έχουν αρχίσει να βρίσκουν εφαρμογή στον τομέα των τηλεπικοινωνιών. Οι προτεινόμενοι μηχανισμοί έχουν ως κεντρικό γνώμονα τη διασφάλιση της ποιότητας υπηρεσίας στους ασύρματους χρήστες. Αναλυτικότερα, στο πλαίσιο της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής σχεδιάζονται και αναπτύσσονται οι παρακάτω καινοτόμοι κατανεμημένοι μηχανισμοί διαχείρισης πόρων ασύρματων δικτύων:

- μηχανισμοί ομορτυνιστικού χρονοπρογραμματισμού μετάδοσης δεδομένων με στόχο την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας και κατά συνέπεια την επιμήκυνση της αυτονομίας της μπαταρίας μιας ασύρματης συσκευής, δεδομένων συγκεκριμένων απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας,
- μηχανισμός ομορτυνιστικού χρονοπρογραμματισμού μετάδοσης δεδομένων για δορυφορικές ζεύξεις που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10GHz υπό συνθήκες βροχής, με στόχο

την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας ενός δορυφορικού τερματικού, δεδομένων συγκεκριμένων απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας,

- μηχανισμός ελέγχου ισχύος για τον δευτερεύοντα χρήστη σε underlay γνωστικά δίκτυα, με στόχο τη μεγιστοποίηση της αποτελεσματικής χωρητικότητας του (μετρική που ενσωματώνει την ποιότητα υπηρεσίας), δεδομένων περιορισμών ισχύος και παρεμβολής, και
- μηχανισμός διαμοιρασμού του πεπερασμένου διαθέσιμου αδειοδοτημένου φάσματος μεταξύ πολλαπλών δευτερευόντων χρηστών σε interweave γνωστικά δίκτυα, ο οποίος μεγιστοποιεί την αποτελεσματική χωρητικότητα (μετρική που ενσωματώνει την ποιότητα υπηρεσίας) του κάθε δευτερεύοντα χρήστη.

Συνεπώς, η συγκεκριμένη Διδακτορική Διατριβή επικεντρώνεται στη διαχείριση των πόρων του χρόνου, της ισχύος και του εύρους ζώνης.

1.2 Δομή της Διδακτορικής Διατριβής

Το παρόν σύγγραμμα έχει ως στόχο την παρουσίαση των ερευνητικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της Διδακτορικής Διατριβής. Το κείμενο που ακολουθεί διαρθρώνεται με τον ακόλουθο τρόπο. Αρχικά, τα Κεφάλαια 2 και 3 εφοδιάζουν τον αναγνώστη με το θεωρητικό υπόβαθρο για τα ασύρματα δίκτυα και τα μαθηματικά εργαλεία που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια, προκειμένου να γίνει κατανοητή η συνεισφορά της Διδακτορικής Διατριβής. Η κύρια ερευνητική συνεισφορά της Διδακτορικής Διατριβής μπορεί να χωριστεί σε δυο βασικά μέρη. Στο πρώτο μέρος, το οποίο αποτελείται από το Κεφάλαιο 4, η Διδακτορική Διατριβή εστιάζει στην επίλυση του προβλήματος ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας των ασύρματων τερματικών, προτείνοντας καινοτόμους μηχανισμούς χρονοπρογραμματισμού μετάδοσης δεδομένων. Το δεύτερο μέρος, το οποίο αποτελείται από το Κεφάλαιο 5, ασχολείται με τα προβλήματα διαχείρισης πόρων για διασφάλιση της ποιότητας υπηρεσίας, δίνοντας έμφαση στα γνωστικά ασύρματα δίκτυα. Πιο συγκεκριμένα, στο κεφάλαιο αυτό προτείνονται καινοτόμοι μηχανισμοί ελέγχου ισχύος και διαμοιρασμού φάσματος, οι οποίοι μεγιστοποιούν την αποτελεσματική χωρητικότητα των δευτερευόντων χρηστών. Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της Διδακτορικής Διατριβής και προτάσεις για μελλοντική ερευνά. Στη συνέχεια, ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή για κάθε κεφαλαίο της Διδακτορικής Διατριβής.

Στο Κεφάλαιο 2, γίνεται μια επισκόπηση των ασύρματων δικτύων επικοινωνιών και παρουσιάζονται συνοπτικά τα κυριότερα χαρακτηριστικά και οι προκλήσεις των σύγχρονων ασύρματων δικτύων. Επιπλέον, περιγράφονται οι πόροι που είναι διαθέσιμοι για διαχείριση στα ασύρματα δίκτυα, τα προβλήματα και οι συνήθεις τεχνικές διαχείρισης των πόρων αυτών, καθώς και η έννοια της ποιότητας υπηρεσίας.

Στο Κεφάλαιο 3, αναλύονται τα προχωρημένα μαθηματικά εργαλεία βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο της Διδακτορικής Διατριβής με στόχο την παρουσίαση ενός ολοκληρωμένου πλαισίου βελτιστοποίησης για τα προβλήματα διαχείρισης πόρων. Αναλυτικότερα, περιγράφονται η θεωρία βελτιστοποίησης (optimization theory), η θεωρία ανισοτήτων μεταβολών (variational inequalities theory) και η διασύνδεση της με τη θεωρία παιγνίων (game theory) και τέλος η θεωρία

βέλτιστης παύσης (optimal stopping theory).

Στο Κεφάλαιο 4, η Διδακτορική Διατριβή μελετά το πρόβλημα ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας των ασύρματων τερματικών. Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας αποτελεί μια πολύ σημαντική απαίτηση για τα ασύρματα δίκτυα, προκειμένου να επιτυγχάνεται υψηλή αυτονομία της μπαταρίας των συσκευών, δεδομένων των αυξανόμενων φορητών/κινητών συσκευών μικρού κόστους, οι οποίες δεν συνδέονται σε κάποια συνεχόμενη τροφοδοσία. Στο πλαίσιο της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής προτείνονται καταναλωμένοι, ενεργειακά αποδοτικοί μηχανισμοί ομορτυνιστικού χρονοπρογραμματισμού μετάδοσης δεδομένων για ασύρματες συσκευές, οι οποίοι επιτυγχάνουν την επιμήκυνση της αυτονομίας της μπαταρίας τους. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά μελετάται το γενικότερο πρόβλημα της κατανάλωσης ισχύος στις ασύρματες επικοινωνίες και γίνεται εκτενής βιβλιογραφική επισκόπηση των υπάρχοντων σχημάτων και μηχανισμών. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι προτεινόμενοι μηχανισμοί, οι οποίοι εκμεταλλεύονται ομορτυνιστικά τις χρονικά μεταβαλλόμενες συνθήκες του ασύρματου καναλιού. Αναλυτικότερα, σύμφωνα με τους μηχανισμούς αυτούς, η ασύρματη επικοινωνία μετάδοσης δεδομένων προγραμματίζεται με καινοτόμο τρόπο, όταν οι συνθήκες του ασύρματου καναλιού είναι ευνοϊκές, με στόχο την αποδοτικότερη χρησιμοποίηση της μπαταρίας. Οι προτεινόμενοι μηχανισμοί χρησιμοποιούν καινοφανώς τη θεωρία βέλτιστης παύσης, έτσι ώστε να βρεθεί η βέλτιστη χρονική στιγμή για μετάδοση δεδομένων ανάλογα με τις συνθήκες του καναλιού. Ταυτόχρονα, παρέχονται συγκεκριμένες ντετερμινιστικές εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας, οι οποίες αναφέρονται σε ένα μέγιστο ανεκτό χρονικό όριο, μέσα στο οποίο θα πρέπει να πραγματοποιηθεί η μετάδοση, και σε μια απαιτούμενη στάθμη ισχύος σήματος που θα πρέπει να λαμβάνεται στο δέκτη. Συνεπώς, με αναβολή της ασύρματης επικοινωνίας μέσα στα ανεκτά χρονικά όρια, επιτυγχάνεται επιμήκυνση της διάρκειας της μπαταρίας. Επιπρόσθετα, η τεχνική του ομορτυνιστικού χρονοπρογραμματισμού χρησιμοποιείται σε δορυφορικές ζεύξεις που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10GHz, κάτω από συνθήκες βροχής, οι οποίες εισάγουν επιπρόσθετη εξασθένηση στη ζεύξη επικοινωνίας και προτείνεται ένας κλιματικά εξαρτώμενος ενεργειακά αποδοτικός μηχανισμός για δορυφορικά τερματικά.

Στο Κεφάλαιο 5, η Διδακτορική Διατριβή εστιάζει στα προβλήματα διαχείρισης πόρων για διασφάλιση της ποιότητας υπηρεσίας, δίνοντας έμφαση στα γνωστικά ασύρματα δίκτυα, τα οποία αποτελούν ένα σύγχρονο είδος ασύρματων δικτύων που έχει ως στόχο την αποδοτική χρήση του πεπερασμένου και υποχρησιμοποιούμενου ραδιοφάσματος. Στο πλαίσιο της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής προτείνονται μηχανισμοί ελέγχου ισχύος και διαμοιρασμού φάσματος, οι οποίοι μεγιστοποιούν την αποτελεσματική χωρητικότητα των δευτερευόντων χρηστών. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά περιγράφεται η θεωρία των στατιστικών εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας και μελετάται η έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας, η οποία αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο σχεδίασης αποδοτικών μηχανισμών που παρέχουν στατιστικές εγγυήσεις ποιότητας. Επιπλέον, γίνεται εκτενής βιβλιογραφική επισκόπηση των υπάρχοντων μηχανισμών διαχείρισης πόρων που κάνουν χρήση της αποτελεσματικής χωρητικότητας στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών, καθώς και ειδικότερα στα γνωστικά δίκτυα. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι προτεινόμενοι μηχανισμοί που επικεντρώνονται στην παροχή στατιστικών εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας στα γνωστικά δίκτυα. Αναλυτικότερα, θεωρείται ένα *underlay* γνωστικό σύστημα λαμβάνοντας ρεαλιστικές υποθέσεις για τα ασύρματα κανάλια και προτείνεται ένας καταναλωμένος μηχανισμός ελέγχου ισχύος για τον δευτερεύοντα χρήστη. Ο μηχανισμός αυτός μεγιστοποιεί την αποτελεσματική χωρητικότητα του δευτερεύοντα

χρήστη μέσω της κλασικής θεωρίας κυρτής βελτιστοποίησης, δεδομένων περιορισμών ισχύος και παρεμβολής. Πιο συγκεκριμένα, δεδομένου ότι οι ασύρματες ζεύξεις, οι οποίες δημιουργούνται από γειτονικούς πομπούς και δέκτες, μπορεί να εμφανίζουν εξάρτηση μεταξύ τους, τα κανάλια διαλείψεων των χρηστών θεωρούνται ετεροσυσχετισμένα με στόχο τη σχεδίαση ενός ρεαλιστικού μηχανισμού ελέγχου ισχύος και τη μελέτη των επιπτώσεων της χωρικής συσχέτισης στην προτεινόμενη πολιτική ελέγχου. Επιπρόσθετα, μελετάται το πρόβλημα του διαμοιρασμού του αχρησιμοποίητου αδειοδοτημένου φάσματος ενός πρωτεύοντα χρήστη μεταξύ πολλαπλών δευτερευόντων χρηστών σε ένα interweave γνωστικό σύστημα και προτείνεται ένας κατανεμημένος μηχανισμός επίλυσης του για δευτερεύοντες χρήστες με διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο (non-cooperative game), σύμφωνα με το οποίο κάθε δευτερεύων χρήστης ανταγωνίζεται με τους υπόλοιπους για τους φασματικούς πόρους, με στόχο τη βελτιστοποίηση της ατομικής του αποτελεσματικής χωρητικότητας, δεδομένου του από κοινού περιορισμού του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Λόγω του συζευγμένου περιορισμού, προτείνεται η καινοτόμος επίλυση του προβλήματος με χρήση της θεωρίας ανισοτήτων μεταβολών, όπου προκύπτει ένα πλήρως κατανεμημένος αλγόριθμος επίλυσης.

Τέλος, το Κεφάλαιο 6 αποτελεί το τελευταίο κεφάλαιο στο οποίο συνοψίζονται τα συμπεράσματα της Διδακτορικής Διατριβής, καθώς και η βασική συνεισφορά της στο ερευνητικό πεδίο που κατατάσσεται. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται ορισμένα ανοιχτά θέματα στο ευρύτερο πεδίο της διαχείρισης πόρων ασύρματων δικτύων επικοινωνιών, τα οποία κρίνεται ενδιαφέρον να αντιμετωπιστούν.

Κεφάλαιο 2

Διαχείριση Πόρων Ασύρματων Δικτύων και Ποιότητα Υπηρεσίας

Η εκρηκτική ανάπτυξη των ασύρματων συστημάτων τις τελευταίες δεκαετίες σε συνδυασμό με την πολλαπλασιαστική τάση των φορητών υπολογιστών, των κινητών τηλεφώνων, αλλά και των tablets, υποδεικνύουν ένα λαμπρό μέλλον για τα ασύρματα δίκτυα είτε ως αυτόνομα συστήματα είτε ως μέρος μιας μεγαλύτερης δικτυακής υποδομής. Ωστόσο, προκειμένου να είναι δυνατή η υποστήριξη των συνεχώς αυξανόμενων αναδυόμενων εφαρμογών και υπηρεσιών, πολλές τεχνικές προκλήσεις θα πρέπει να επιλυθούν για το σχεδιασμό εύρωστων ασύρματων δικτύων.

Η εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών χαρακτηρίζεται από τη μετατόπιση από τις απλές αναλογικές υπηρεσίες μικρής χωρητικότητας σε ολοκληρωμένες ψηφιακές υπηρεσίες υψηλής χωρητικότητας. Για παράδειγμα, οι ασύρματες κινητές επικοινωνίες εξελίχθηκαν μέσα από τρεις γενιές, με την τέταρτη να εισέρχεται στην αγορά, ενώ έχουν αρχίσει οι ερευνητικές μελέτες για την πέμπτη γενιά. Το πέρασμα από τη μια γενιά στην επόμενη συνοδεύεται από την υλοποίηση νέων τεχνολογιών ασύρματων διεπαφών, καθώς και με την ενίσχυση της απόδοσης των συστημάτων. Ωστόσο, για να μπορούν να υλοποιηθούν οι τεχνολογίες της επόμενης γενιάς, τα συστήματα θα πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε να πληρούν τις προδιαγραφές που ορίζονται από τις σύγχρονες τάσεις. Αναλυτικότερα, θα πρέπει να είναι ικανά να παρέχουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, αφού οι χρήστες επιθυμούν να απολαμβάνουν ευρυζωνικές υπηρεσίες με πολύ μικρούς χρόνους απόκρισης. Επιπρόσθετα, τα ασύρματα δίκτυα θα πρέπει να διαθέτουν ευέλικτη αρχιτεκτονική υπηρεσιών, έτσι ώστε να μπορούν να ολοκληρώνουν διαφορετικά είδη υπηρεσιών σε μια ασύρματη διεπαφή. Στην περίπτωση που η αρχιτεκτονική είναι σχεδιασμένη και βελτιστοποιημένη για ένα είδος υπηρεσίας, τα υπόλοιπα είδη θα εμφανίζουν χαμηλή ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service - QoS). Τέλος, τα ασύρματα δίκτυα θα πρέπει να εξοπλίζονται με τη δυνατότητα διαχείρισης της ποιότητας των υπηρεσιών, δεδομένου ότι οι μετρικές της ποιότητας διαφέρουν από υπηρεσία σε υπηρεσία. Για παράδειγμα, οι υπηρεσίες φωνής έχουν αυστηρές απαιτήσεις καθυστέρησης, ενώ οι υπηρεσίες ηλεκτρονικού ταχυδρομείου δεν είναι ευαίσθητες στην καθυστέρηση, εφόσον η παράδοση των δεδομένων είναι αξιόπιστη. Συνεπώς, ακόμα και η υψηλή ρυθμοαπόδοση μπορεί να αποτυγχάνει να ικανοποιήσει τους χρήστες, αν το σύστημα δεν ικανοποιεί τις αντίστοιχες μετρικές ποιότητας υπηρεσίας.

Στις πρώτες γενιές, η ενίσχυση της απόδοσης προήλθε κυρίως από τεχνολογικές εξελίξεις στο

φυσικό στρώμα. Ωστόσο, οι προαναφερόμενες απαιτήσεις δεν μπορούν να εκπληρωθούν μόνο βελτιώνοντας τις τεχνολογίες μετάδοσης στο φυσικό στρώμα, δεδομένου ότι η βελτίωση που παρέχεται αποκλειστικά από τις τεχνολογίες αυτές είναι περιορισμένη σε διάφορα επίπεδα. Πρώτον, οι τεχνολογίες αυτές είναι αρκετά ώριμες με αποτέλεσμα να μην υπάρχει μεγάλο περιθώριο βελτίωσης χωρίς απροσδόκητες καινοτομίες. Δεύτερον, οι περισσότερες τεχνολογίες μετάδοσης έχουν αναπτυχθεί έτσι ώστε να επιτυγχάνουν συγκεκριμένους στόχους, χωρίς να μπορούν να παρέχουν μια καθολική λύση βέλτιστης απόδοσης. Τρίτον, οι στόχοι αυτοί επηρεάζονται από τις εκάστοτε απαιτήσεις QoS των χρηστών, ενώ οι διαφορετικές απαιτήσεις οδηγούν σε επιλογή διαφορετικής τεχνολογίας μετάδοσης. Ως εκ τούτου, στα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα, τα οποία θα υποστηρίζουν πολλαπλές διαφορετικές υπηρεσίες, είναι απαραίτητο οι τεχνολογίες μετάδοσης να είναι διαχειρίσιμες σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις QoS.

Όλα τα παραπάνω σηματοδοτούν την αναγκαιότητα ανάπτυξης αποδοτικών μηχανισμών διαχείρισης πόρων των ασύρματων δικτύων με κεντρικό γνώμονα τη διασφάλιση της ποιότητας των υπηρεσιών. Η βελτίωση της απόδοσης των μελλοντικών δικτύων είναι πιο πιθανό να επιτευχθεί με τη βελτιστοποίηση των μηχανισμών διαχείρισης των πόρων τους, οι οποίοι θα υλοποιούνται βασιζόμενοι στις ώριμες πλέον τεχνολογίες του φυσικού στρώματος. Συνεπώς, ο ρόλος της διαχείρισης πόρων αναμένεται να γίνει περισσότερο καθοριστικός στις επόμενες γενεές ασύρματων δικτύων επικοινωνιών. Το συγκεκριμένο κεφάλαιο έχει ως στόχο τον εφοδιασμό του αναγνώστη με τις βασικές γνώσεις σχετικά με τις ασύρματες επικοινωνίες και τους μηχανισμούς διαχείρισης πόρων των ασύρματων δικτύων, καθώς και της έννοιας της ποιότητας υπηρεσίας, έτσι ώστε να ακολουθήσει στα επόμενα κεφάλαια η ερευνητική συνεισφορά της Διδακτορικής Διατριβής. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά, παρουσιάζεται μια εισαγωγή για το ραδιοφάσμα, το ασύρματο κανάλι, τα σύγχρονα ασύρματα συστήματα και τη διαδικασία προτυποποίησης των συστημάτων. Στη συνέχεια, περιγράφονται οι πόροι των ασύρματων δικτύων και διατυπώνεται το πρόβλημα της διαχείρισης τους, καθώς και οι συνήθεις τεχνικές διαχείρισης πόρων. Τέλος, αναλύεται η έννοια της ποιότητας υπηρεσίας στα ασύρματα συστήματα.

2.1 Ασύρματες Επικοινωνίες

Η συγκεκριμένη ενότητα έχει ως στόχο την περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών των ασύρματων επικοινωνιών παρουσιάζοντας το ραδιοφάσμα και το ασύρματο κανάλι, καθώς και την κατηγοριοποίηση και συνοπτική περιγραφή των σύγχρονων ασύρματων συστημάτων μαζί με τη διαδικασία προτυποποίησης τους.

2.1.1 Ραδιοφάσμα

Οι ασύρματες επικοινωνίες βασίζονται στη μετάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο εύρος συχνοτήτων από 3KHz έως 300GHz (ραδιοσυχνότητες), τα οποία ονομάζονται ραδιοκύματα. Τα ραδιοκύματα εκπέμπονται και λαμβάνονται μέσω κεραιών, οι οποίες μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια ραδιοσυχνότητας σε ηλεκτρομαγνητική και το αντίστροφο. Τα ραδιοκύματα με διαφορετικές συχνότητες έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά διάδοσης με αποτέλεσμα η κάθε συχνότητα να είναι περισσότερο κατάλληλη για συγκεκριμένες ασύρματες εφαρμογές. Για παράδειγμα, οι χαμηλές συ-

Πίνακας 2.1: Κατανομή ραδιοφάσματος ανά υπηρεσία.

Υπηρεσία	Ζώνη Συχνοτήτων (MHz)
Ραδιοφωνία FM	87.5-108.0
Τηλεόραση VHF & UHF	174-230, 470-862
Συστήματα TETRA	380-400, 410-430
Κινητή τηλεφωνία GSM 900	885-915, 930-960
Δορυφορική πλοήγηση GNSS	1164-1215, 1559-1610
Κινητή τηλεφωνία DCS 1800 ή GSM 1800	1730-1785, 1825-1880
Συστήματα DECT	1880-1900
Κινητή τηλεφωνία UMTS	1905.1-1920.1, 1920.3-1965.3, 2110.3-2155.3
Δίκτυα WLAN	2400.0-2483.5, 5150.0-5350.0, 5470.0-5725.0

χνότητες είναι κατάλληλες για επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων, ενώ οι υψηλές συχνότητες είναι πιο κατάλληλες για επικοινωνίες μικρών αποστάσεων παρέχοντας ταυτόχρονα υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Ο Πίνακας 2.1 παρουσιάζει ενδεικτικά την κατανομή των ζωνών συχνοτήτων για διάφορα συστήματα και υπηρεσίες ασύρματων επικοινωνιών στην Ελλάδα.

Η ανάπτυξη των ασύρματων συστημάτων και η αύξηση των απαιτήσεων των χρηστών έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ζήτησης του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων. Ωστόσο, το ραδιοφάσμα είναι πεπερασμένο και επιπλέον δεν μπορούν να μεταδίδουν πολλαπλές πηγές ταυτόχρονα στις ίδιες ζώνες συχνοτήτων, διότι μπορεί να προκληθούν παρεμβολές στις επικοινωνίες με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας τους. Συνεπώς, η ρύθμιση και διαχείριση του ραδιοφάσματος από διεθνείς και εθνικούς ρυθμιστικούς οργανισμούς είναι απαραίτητη, προκειμένου να ελέγχονται οι μεταδόσεις ραδιοκυμάτων και να αποφεύγονται κατ' επέκταση οι παρεμβολές μεταξύ των ασύρματων συστημάτων και χρηστών. Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunications Union - ITU) είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο των εκχωρήσεων φάσματος σε παγκόσμιο επίπεδο, ενώ συγκεκριμένα για την Ευρώπη ο αρμόδιος οργανισμός είναι το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (European Telecommunications Standards Institute - ETSI). Ο αντίστοιχος οργανισμός στις Η.Π.Α. είναι η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (Federal Communications Commission - FCC). Ακόμα όμως και όταν ένα τμήμα του φάσματος εκχωρηθεί για χρήση από κάποια συγκεκριμένη υπηρεσία π.χ. κινητή τηλεφωνία, χρειάζεται μια ρυθμιστική αρχή σε εθνικό επίπεδο, η οποία θα καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο το συγκεκριμένο τμήμα του φάσματος διαμοιράζεται μεταξύ των τηλεπικοινωνιακών φορέων που παρέχουν τη συγκεκριμένη υπηρεσία. Γι' αυτό το σκοπό, στην Ελλάδα υπάρχει η Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων (ΕΕΤΤ), η οποία είναι μια ανεξάρτητη διοικητική αρχή που ρυθμίζει και εποπτεύει τον τομέα των τηλεπικοινωνιακών και των ταχυδρομικών υπηρεσιών.

Παλαιότερα, ο διαμοιρασμός του ραδιοφάσματος γινόταν με διάφορες διαδικασίες όπως τα «καλλιστεία» και η κλήρωση (Tanenbaum & Wetherall, 2011). Όμως, εδώ και αρκετά χρόνια, η διαδι-

κασία των δημοπρασιών (A. Goldsmith, 2005) έχει καθιερωθεί για το διαμοιρασμός του φάσματος. Ωστόσο, η διαδικασία αυτή ενδεχομένως να οδηγήσει σε μη αποδοτική χρήση του ραδιοφάσματος. Γι' αυτό το λόγο, τα τελευταία χρόνια γίνεται προσπάθεια να αλλάξει ο κλασικός πλέον τρόπος των δημοπρασιών. Στόχος είναι η βελτίωση της ευελιξίας στη χρήση του ραδιοφάσματος, η ενθάρρυνση της αποδοτικότερης χρησιμοποίησης του και η βελτίωση της τεχνολογικής και οικονομικής απόδοσης της διαχείρισης του. Επιπρόσθετα, σύμφωνα με μια διαφορετική προσέγγιση, κάποιες ζώνες συχνοτήτων δεν εκχωρούνται καθόλου και παραμένουν ελεύθερες για χρήση χωρίς άδεια. Παραδείγματα τέτοιων ζώνων είναι οι ζώνες ISM (Industrial, Scientific and Medical) και U-NII (Unlicensed National Information Infrastructure). Οι συσκευές που λειτουργούν σε αυτές τις ζώνες θα πρέπει να τηρούν κάποιους κανόνες όσον αφορά την ισχύ εκπομπής τους ή τις τεχνικές μετάδοσης που χρησιμοποιούν για να αποφεύγονται οι παρεμβολές. Τέλος, στην ερευνητική κοινότητα έχουν προταθεί πολλές ευέλικτες τεχνικές διαμοιρασμού του ραδιοφάσματος για διάφορες ασύρματες εφαρμογές. Τέτοια παράδειγμα είναι τα Ultra-WideBand (UWB) και τα γνωστικά συστήματα, τα οποία θεωρούν την ύπαρξη δευτερευόντων χρηστών που συνυπάρχουν μαζί με τους πρωτεύοντες χρήστες, υπό διάφορους περιορισμούς, έτσι ώστε να μην επηρεάζεται η επικοινωνία των πρωτευόντων χρηστών.

2.1.2 Ασύρματο Κανάλι

Όπως προαναφέρθηκε, κατά τη μετάδοση ενός ασύρματου σήματος, η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται μέσω της κεραίας ενός πομπού σε ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, η οποία ακτινοβολείται στο περιβάλλον. Αντίστοιχα, κατά τη λήψη ενός σήματος, η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια που προσπίπτει στην κεραία του δέκτη μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Η ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος εξαρτάται σημαντικά από τα χαρακτηριστικά του καναλιού ραδιοδιάδοσης. Ωστόσο, σε αντίθεση με τα ενσύρματα μέσα διάδοσης, το ασύρματο κανάλι είναι χρονομεταβαλλόμενο και δεν είναι εύκολο να αναλυθεί. Πιο συγκεκριμένα, τα χαρακτηριστικά ραδιοδιάδοσης εξαρτώνται σημαντικά από το χώρο, τη συχνότητα λειτουργίας, την ταχύτητα ενός κινητού τερματικού, τις παρεμβολές και από άλλους δυναμικούς παράγοντες. Για παράδειγμα, σε χαμηλές συχνότητες (<500MHz), οι απώλειες του σήματος είναι μικρότερες συγκρινόμενες με τις απώλειες σε μεγαλύτερες συχνότητες. Ωστόσο, για τα σήματα χαμηλών συχνοτήτων, το απαιτούμενο μέγεθος κεραιών είναι μεγάλο, λόγω του μεγάλου μήκους κύματος. Από την άλλη μεριά, σε υψηλές συχνότητες είναι δυνατή η χρήση πομπών χαμηλής ισχύος (της τάξης του 1W) για να υπάρχει επαρκής κάλυψη σήματος, ενώ το απαιτούμενο μέγεθος κεραιών είναι της τάξης των μερικών cm, και συνεπώς δίνεται η δυνατότητα σχεδίασης πομποδεκτών μικρού μεγέθους και ισχύος.

Επιπρόσθετα, η διάδοση σε ανοικτές περιοχές έχει πολύ διαφορετικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τη διάδοση σε εσωτερικούς χώρους και σε αστικές περιοχές. Πιο συγκεκριμένα, σε ανοικτές περιοχές όπου υπάρχει οπτική επαφή (Line of Sight - LoS) μεταξύ του πομπού και του δέκτη και δεν υπάρχουν εμπόδια, η ισχύς ενός σήματος εξασθενεί με το τετράγωνο της απόστασης για μικρές αποστάσεις ή ελεύθερο χώρο. Από την άλλη μεριά, σε περιοχές όπου υπάρχουν εμπόδια, η ισχύς του σήματος εξασθενεί με μεγαλύτερους ρυθμούς σαν συνάρτηση της απόστασης, ανάλογα με το περιβάλλον και τη συχνότητα. Αναλυτικότερα, σε αστικές περιοχές, αλλά και σε εσωτερικούς χώρους, η οπτική επαφή μεταξύ του πομπού και του δέκτη, συνήθως εμποδίζεται από τοίχους, κτίρια, και άλλα αντικείμενα του περιβάλλοντος. Σε αυτές τις περιπτώσεις το σήμα φθάνει στον

δέκτη μέσω των συνιστωσών μη οπτικής επαφής (non Line of Sight - nLoS), όπου τα λαμβανόμενα σήματα έχουν διάφορες τιμές ισχύος, ανάλογα με τη διαδρομή που ακολουθεί το καθένα, καθώς και τα αντικείμενα που παρεμβάλλονται. Λόγω το γεγονόςτος ότι τα λαμβανόμενα σήματα καταφθάνουν στον δέκτη σε διαφορετικές χρονικές στιγμές μέσω διαφορετικών διαδρομών, το προκύπτον σήμα χαρακτηρίζεται από πολυδιαδρομική χρονική διασπορά καθυστέρησης (multipath delay spread), η οποία επηρεάζει τη λήψη των δεδομένων. Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων που μπορεί να υποστηριχθεί από ένα κανάλι επηρεάζεται από την πολυδιαδρομική φύση του καναλιού και από τα χαρακτηριστικά διαλείψεων των πολυδιαδρομικών συνιστωσών. Επιπλέον, ο ρυθμός διακυμάνσεων του καναλιού χαρακτηρίζεται από τη διασπορά Doppler (Doppler spread) του καναλιού, ενώ αυτές οι διακυμάνσεις οφείλονται στην κίνηση μεταξύ του πομπού και του δέκτη ή των αντικειμένων του περιβάλλοντος και επηρεάζουν τη σχεδίαση του δέκτη.

Οι βασικότεροι μηχανισμοί διάδοσης συνοψίζονται παρακάτω (Rappaport, 2002), (Κανάτας κ.ά., 2008):

- *Διάδοση ελεύθερου χώρου (free space) ή LoS*: Ο μηχανισμός αυτός αναφέρεται σε «καθαρά» περιβάλλοντα χωρίς εμπόδια μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Στο μηχανισμό αυτό βασίζονται οι δορυφορικές επικοινωνίες.
- *Ανάκλαση (reflection)*: Αυτός ο μηχανισμός προκύπτει όταν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα προσπίπτουν σε μια λεία επιφάνεια πολύ μεγαλύτερη από το μήκος κύματος του σήματος. Το σήμα σε αυτή την περίπτωση εξασθενεί σύμφωνα με παράγοντες που εξαρτώνται από τη συχνότητα, τη γωνία πρόσπτωσης, τη φύση της επιφάνειας κ.α. Το φαινόμενο αυτό κυριαρχεί συνήθως σε περιβάλλοντα εσωτερικού χώρου.
- *Περιθλάση (diffraction)*: Όταν μεταξύ του πομπού και του δέκτη υπάρχει κάποιο εμπόδιο με μεγάλες διαστάσεις σε σχέση με το μήκος κύματος (π.χ. κτίρια, τοίχοι ή άλλα μεγάλα αντικείμενα), τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που προσπίπτουν στα άκρα του εμφανίζουν δευτερεύουσες πηγές (σύμφωνα με την αρχή του Huygens). Έτσι, επιτυγχάνεται διάδοση σε περιοχές «σκιασμένες», εμφανίζοντας όμως πολύ μεγαλύτερες απώλειες σε σχέση με το αρχικό απευθείας ή το ανακλώμενο σήμα. Το φαινόμενο αυτό είναι πολύ σημαντικό για τις επικοινωνίες εξωτερικού χώρου και ειδικότερα σε αστικές περιοχές, όπου υπάρχουν πολλά κτίρια, ενώ στην περίπτωση επικοινωνιών εσωτερικού χώρου, το περιθλώμενο σήμα είναι πολύ ασθενές.
- *Σκέδαση (scattering)*: Όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει σε ακανόνιστα αντικείμενα (όπως οι τραχιοί τοίχοι, τα οχήματα, το φύλλωμα των δέντρων, τα έπιπλα, κλπ.) ή σε αντικείμενα που έχουν διαστάσεις της τάξης του μήκους κύματος ή μικρότερες, οι ακτίνες σκεδάζονται προς όλες τις κατευθύνσεις με τη μορφή σφαιρικών κυμάτων. Αυτό το φαινόμενο είναι σημαντικό σε περιβάλλοντα με πολλούς σκεδαστές και προκαλεί μείωση των επιπέδων ισχύος ειδικότερα μακριά από τους σκεδαστές.

Ως αποτέλεσμα των παραπάνω μηχανισμών, η διάδοση των ραδιοκυμάτων μπορεί να χαρακτηριστεί από τρία σχεδόν ανεξάρτητα φαινόμενα: τις απώλειες διάδοσης (path losses) σε σχέση με την απόσταση, τις αργές λογαριθμοκανονικές σκιάσεις (slow log-normal shadowing) και τις ταχείες πολυδιαδρομικές διαλείψεις (fast multipath fading).

Ο ακριβής χαρακτηρισμός του ασύρματου καναλιού μέσω βασικών παραμέτρων και μαθηματικών μοντέλων είναι πολύ σημαντικός για την πρόβλεψη της περιοχής κάλυψης και των χαρακτηριστικών απόδοσης, για τον καθορισμό των βέλτιστων τοποθεσιών εγκατάστασης των σταθμών βάσης κλπ., και αποτελεί σημαντική πρόκληση για τα ασύρματα συστήματα. Το κανάλι μπορεί να χαρακτηριστεί από όρους μεγάλης κλίμακας (large-scale) και μικρής κλίμακας (small-scale), σε σχέση με το μήκος κύματος του σήματος. Τα μοντέλα διάδοσης μεγάλης κλίμακας χαρακτηρίζουν την ισχύ του σήματος για μεγάλες αποστάσεις πομπού-δέκτη και προβλέπουν τη μέση τιμή της ισχύος. Συνεπώς, για ένα δέκτη ο οποίος απομακρύνεται από τον πομπό, η μέση λαμβανόμενη ισχύς εξασθενεί σταδιακά και μπορεί να προβλεφθεί από τα μοντέλα μεγάλης κλίμακας. Αντίθετα, ένα μοντέλο διάδοσης μικρής κλίμακας ή μοντέλο διαλείψεων χαρακτηρίζει τις γρήγορες διακυμάνσεις της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος μεταξύ μικρών αποστάσεων (λίγα μήκη κύματος) ή σύντομων χρονικών στιγμών (της τάξης μερικών δευτερολέπτων). Συνεπώς, για ένα δέκτη ο οποίος κινείται σε μικρές αποστάσεις, η στιγμιαία λαμβανόμενη ισχύς σήματος μπορεί να διακυμαίνεται ταχέως, προκαλώντας διαλείψεις μικρής κλίμακας, εξαιτίας του γεγονότος ότι το λαμβανόμενο σήμα αποτελείται από το άθροισμα των συνιστωσών που προέρχονται από διαφορετικές κατευθύνσεις. Αναφέρεται ότι για διαλείψεις μικρής κλίμακας, η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος μπορεί να αλλάζει τιμή κατά 30 με 40 dB, όταν ο δέκτης μετακινηθεί κατά ένα ποσοστό του μήκους κύματος.

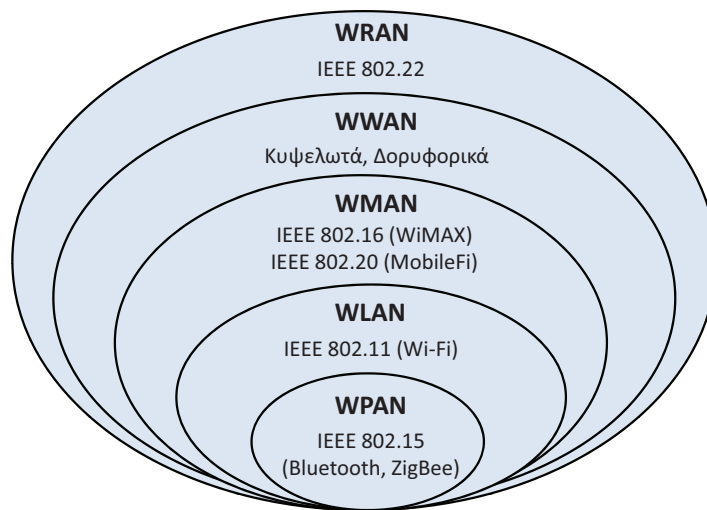
Αναλυτικότερα, τα μοντέλα καναλιού μεγάλης κλίμακας προβλέπουν τη συμπεριφορά του καναλιού για αποστάσεις πολύ μεγαλύτερες από το μήκος κύματος και είναι δυο ειδών: τα αναλυτικά ή φυσικά μοντέλα και τα στατιστικά ή εμπειρικά μοντέλα. Συνήθως, αποτελούνται από συναρτήσεις της απόστασης και των χαρακτηριστικών του περιβάλλοντος. Όσον αφορά τα αναλυτικά μοντέλα, αυτά λαμβάνουν υπόψη τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος διάδοσης, όπως τα κτίρια, τη μορφολογία του εδάφους κ.α. και καθορίζουν τις πιθανές διαδρομές διάδοσης, το οποίο ονομάζεται παρακολούθηση ακτίνας (ray tracing). Τα μοντέλα αυτά παρέχουν πολύ αξιόπιστες προβλέψεις για τη συμπεριφοράς διάδοσης, όμως είναι υπολογιστικά πολύπλοκα. Παραδείγματα αναλυτικών μοντέλων είναι το μοντέλο απωλειών ελευθέρου χώρου και το μοντέλο δυο ακτίνων. Αντίθετα, τα στατιστικά μοντέλα βασίζονται σε μετρήσεις των χαρακτηριστικών διάδοσης για διαφορετικούς τύπους περιβάλλοντος όπως αστικές, ημιαστικές και αγροτικές περιοχές. Η στατιστική προσέγγιση χωρίζεται σε δυο συνιστώσες: η μία βασίζεται σε εκτιμήσεις της μέσης τιμής απωλειών διάδοσης (π.χ. το εκθετικό μοντέλο διάδοσης, το μοντέλο Okumura-Hata κλπ.) και η άλλη αναπαριστά τις τοπικές διακυμάνσεις του καναλιού, οι οποίες ονομάζονται διαλείψεις σκίασης (shadow fading) ή διαλείψεις μεγάλης κλίμακας (large-scale fading) (π.χ. λογαριθμοκανονική σκίαση). Τα συγκεκριμένα μοντέλα παρέχουν ευκολότερη περιγραφή σε σχέση με τα αναλυτικά μοντέλα για διάφορους τύπους περιβαλλόντων χωρίς όμως να παρέχουν την ίδια ακρίβεια.

Παράλληλα, τα μοντέλα καναλιού μικρής κλίμακας περιγράφουν τη μεταβλητότητα του καναλιού σε κλίμακα μήκους κύματος. Η διάδοση μικρής κλίμακας μοντελοποιείται λαμβάνοντας υπόψη την πολυδιαδρομική διασπορά του εκπεμπόμενου σήματος, η οποία προκαλεί διαλείψεις μικρής κλίμακας (small-scale fading) ή απλώς διαλείψεις. Αναλυτικότερα, διαφορετικές εκδόσεις του μεταδιδόμενου σήματος από τον πομπό καταφθάνουν στον δέκτη μέσω διαδρομών διαφορετικού μήκους με διαφορετική χρονική καθυστέρηση και με σχετική ολίσθηση φάσης. Στον δέκτη γίνεται υπέρθεση των συνιστωσών αυτών οδηγώντας είτε σε αθροιστική είτε σε αφαιρετική συμβολή. Επιπρόσθετα, δεδομένου ότι οι σχετικές θέσεις του πομπού και του δέκτη αλλά και των εμποδίων

του περιβάλλοντος μπορεί να μεταβάλλονται, προκύπτει ένα δυναμικό περιβάλλον πολυδιαδρομικής διάδοσης. Τα αποτελέσματα των πολυδιαδρομικών διαλείψεων είναι γρήγορες μεταβολές στην ισχύ του λαμβανόμενου σήματος για μικρές χωρικές ή χρονικές μετατοπίσεις, τυχαίες διαμορφώσεις συχνότητας λόγω των διαφορετικών ολισθήσεων Doppler στα διαφορετικά πολυδιαδρομικά σήματα και χρονική διασπορά που προκαλείται από το διαφορετικό χρόνο άφιξης των πολυδιαδρομικών σημάτων. Συνεπώς, στις διαλείψεις κυριαρχούν τα πολυδιαδρομικά φαινόμενα και τα φαινόμενα Doppler, ενώ εξαρτώνται από τη συχνότητα και είναι χρονομεταβαλλόμενες.

Οι διαλείψεις μικρής κλίμακας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως προς τη διασπορά στο χρόνο (time dispersion) και τη διασπορά στη συχνότητα (frequency dispersion). Πιο συγκεκριμένα, η πολυδιαδρομική διασπορά καθυστέρησης προκαλεί χρονική διασπορά και διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα, ενώ η διασπορά Doppler προκαλεί διασπορά συχνότητας και διαλείψεις επιλεκτικές ως προς το χρόνο. Η μέτρηση της χρονικής διασποράς των πολλαπλών διαδρομών γίνεται στο πεδίο του χρόνου μέσω διαφόρων παραμέτρων διασποράς της καθυστέρησης (π.χ. το προφίλ καθυστέρησης ισχύος, η ρίζα μέσου τετραγώνου), ενώ στο πεδίο της συχνότητας γίνεται μέσω του εύρους ζώνης συνοχής (coherent bandwidth). Συγκρίνοντας τις παραμέτρους αυτές με την τιμή του εύρους ζώνης του σήματος και τη διάρκεια του συμβόλου, οι διαλείψεις μικρής κλίμακας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε επίπεδες διαλείψεις (flat fading) και διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα (frequency selective fading). Η κατηγοριοποίηση αυτή καθορίζει πότε το μεταδιδόμενο σήμα αντιλαμβάνεται το κανάλι επίπεδο ως προς τη συχνότητα και πότε το αντιλαμβάνεται ως συχνοεπιλεκτικό. Ωστόσο, τα παραπάνω δεν παρέχουν πληροφορία για τη χρονομεταβαλλόμενη φύση του καναλιού, η οποία προκαλείται από την κίνηση του πομπού και του δέκτη ή του περιβάλλοντος τους. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται η διασπορά Doppler και ο χρόνος συνοχής (coherent time), τα οποία συγκρινόμενα με τα χαρακτηριστικά του σήματος κατηγοριοποιούν τις διαλείψεις μικρής κλίμακας σε γρήγορες διαλείψεις (fast fading) και σε αργές διαλείψεις (slow fading). Συνεπώς, η κατηγοριοποίηση αυτή καθορίζει πότε οι αλλαγές του καναλιού γίνονται κατά τη διάρκεια ενός συμβόλου και πότε όχι.

Όπως αναφέρθηκε τα φαινόμενα πολλαπλών διαδρομών και Doppler περιγράφουν τα χαρακτηριστικά του καναλιού στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο των συχνοτήτων. Όμως, χρειάζεται περισσότερη ανάλυση όσον αφορά τα χαρακτηριστικά του πλάτους του ασύρματου καναλιού. Τα πιο συνηθισμένα στατιστικά μοντέλα διαλείψεων μικρής κλίμακας (Simon & Alouini, 2005; Stüber, 2002; Shankar, 2012) που χαρακτηρίζουν το πλάτος του καναλιού είναι οι κατανομές Rayleigh, Rice και Nakagami- m . Το μοντέλο Rayleigh θεωρεί ότι δεν υπάρχει καμία διαδρομή LoS μεταξύ πομπού και δέκτη, ενώ το μοντέλο Rice θεωρεί ότι υπάρχει διαδρομή LoS μεταξύ πομπού και δέκτη. Επιπλέον, το μοντέλο Nakagami- m ενσωματώνει την παράμετρο m , η οποία μοντελοποιεί το κανάλι ανάλογα με τη δριμύτητα των διαλείψεων και μπορεί να θεωρηθεί ως γενικευμένη περίπτωση των προηγούμενων. Τέλος, σημειώνεται ότι στο Παράρτημα Α' παρουσιάζονται οι πιο συνηθισμένες στατιστικές κατανομές μοντελοποίησης των ασύρματων καναλιών, οι οποίες χρησιμοποιούνται και στην παρούσα Διδακτορική Διατριβή.



Σχήμα 2.1: Τεχνολογίες ασύρματων δικτύων.

2.1.3 Ασύρματα Συστήματα Επικοινωνιών

Οι ασύρματες τεχνολογίες επικοινωνιών μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με διάφορους τρόπους ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους, όπως για παράδειγμα την εμβέλεια (περιοχή κάλυψης), τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, την ισχύ μετάδοσης κ.α. Στη συγκεκριμένη υποενότητα γίνεται μια σύντομη παρουσίαση των σύγχρονων ασύρματων τεχνολογιών επικοινωνιών, κατηγοριοποιώντας με βάση την εμβέλεια τους. Πιο συγκεκριμένα, τα ασύρματα δίκτυα μπορούν να χωριστούν με αυξανόμενη εμβέλεια (Hossain et al., 2009) σε ασύρματα προσωπικά δίκτυα (Wireless Personal Area Networks - WPANs), ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless Local Area Networks - WLANs), ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (Wireless Metropolitan Area Networks - WMANs), ασύρματα δίκτυα ευρείας κάλυψης (Wireless Wide Area Networks - WWANs) και ασύρματα περιφερειακά δίκτυα (Wireless Regional Area Networks - WRANs), όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται και κάποιες άλλες κατηγορίες τεχνολογιών/δικτύων οι οποίες είναι πολύ σημαντικές για τις σύγχρονες ασύρματες επικοινωνίες νέας γενιάς.

Ασύρματα προσωπικά δίκτυα (WPANs)

Τα WPANs σχεδιάζονται με στόχο την παροχή ασύρματης διασύνδεσης συσκευών που βρίσκονται σε μικρές αποστάσεις μεταξύ τους. Η τεχνολογία των WPANs είναι μια τεχνολογία μικρής εμβέλειας στην οποία ανήκουν οι τεχνολογίες Bluetooth και ZigBee που βασίζονται στη σειρά προτύπων IEEE 802.15.

Bluetooth: Το πρότυπο Bluetooth (IEEE 802.15.1) (Garg, 2007) προορίζεται για ασύρματες επικοινωνίες χαμηλής ισχύος και μικρής εμβέλειας. Το πρότυπο αυτό είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί στην ISM ζώνη συχνοτήτων 2.4-2.4835 GHz. Ανάλογα με την ισχύ εκπομπής τους και κατ' επέκτα-

ση την περιοχή κάλυψής τους, οι συσκευές Bluetooth διαχωρίζονται σε τρεις κλάσεις: Κλάση 1, Κλάση 2 και Κλάση 3. Η ισχύς εκπομπής για την κάθε κλάση είναι αντίστοιχα 1mW, 2.5mW και 100mW, ενώ η αντίστοιχη εμβέλεια τους είναι 1m, 10m και 100 m, υποστηρίζοντας μέχρι και 24Mbps στην έκδοση 3.0. Τέλος, αναφέρεται ότι στο φυσικό στρώμα χρησιμοποιείται η τεχνική διασποράς φάσματος προσαρμοστικής μεταπήδησης συχνότητας (adaptive frequency hopping spread spectrum).

ZigBee: Η τεχνολογία ZigBee (Farahani, 2008) βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.15.4 και χρησιμοποιείται για συσκευές και εφαρμογές χαμηλού ρυθμού μετάδοσης και χαμηλής ισχύος, όπως είναι οι ασύρματοι αισθητήρες. Το ZigBee λειτουργεί ανάλογα με την εκάστοτε χώρα στις ζώνες συχνοτήτων των 868MHz, 915MHz και 2.4GHz (ISM) και έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να έχει απλούστερα πρωτόκολλα από το Bluetooth και οι συσκευές να έχουν απλούστερα ραδιο-κυκλώματα. Στο φυσικό στρώμα, χρησιμοποιείται η τεχνική διασποράς φάσματος απευθείας ακολουθίας (direct sequence spread spectrum), ενώ μπορούν να εφαρμοστούν διάφορα σχήματα διαμόρφωσης. Σύμφωνα με την τεχνολογία αυτή, η μέγιστη ισχύς εκπομπής είναι 1mW, οι υποστηριζόμενοι ρυθμοί μετάδοσης είναι μέχρι και 250kbps ανά κανάλι για τη συχνότητα των 2.4GHz, ενώ η εμβέλεια μετάδοσης κυμαίνεται μεταξύ 10 και 75m.

Ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLANs)

Η τεχνολογία των WLANs έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να παρέχει ασύρματες επικοινωνίες υψηλών ρυθμών μετάδοσης με τοπική εμβέλεια (Molisch, 2011). Η πιο γνωστή αρχιτεκτονική WLANs είναι η αρχιτεκτονική με σταθερή υποδομή ή αλλιώς δομημένη, όπου υπάρχει ένα σημείο πρόσβασης (access point) στο οποίο διασυνδέονται οι ασύρματοι χρήστες για πρόσβαση στο Διαδίκτυο ή για μεταξύ τους επικοινωνία. Σύμφωνα με μια άλλη αρχιτεκτονική των WLANs, οι χρήστες μπορούν να επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους, σχηματίζοντας αδόμητα (ad hoc) δίκτυα. Η εμβέλεια των WLANs είναι περίπου 100m και τα πιο γνωστά πρότυπα για τα δίκτυα αυτά είναι το σύνολο IEEE 802.11 (π.χ. 802.11b, 802.11g, 802.11n). Τα πρότυπα αυτά λειτουργούν στις ζώνες συχνοτήτων 2.4-2.4835 GHz, 5.15-5.35 GHz και 5.470-5.725 GHz. Στο φυσικό στρώμα χρησιμοποιούνται οι τεχνικές διασποράς φάσματος απευθείας ακολουθίας, διασποράς φάσματος μεταπήδησης συχνότητας και ορθογωνικής πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM). Σημειώνεται ότι στο στρώμα ζεύξης δεδομένων οι βασικές προδιαγραφές στηρίζονται στην πολλαπλή πρόσβαση ανίχνευσης φέροντος με αποφυγή συγκρούσεων (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance - CSMA/CA). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι τα IEEE 802.11b και IEEE 802.11g λειτουργούν στην περιοχή συχνοτήτων των 2.4GHz και επιτυγχάνουν ρυθμούς 11 και 54Mbps αντίστοιχα, ενώ το IEEE 802.11n λειτουργεί στις περιοχές συχνοτήτων των 2.4 και 5GHz και υποστηρίζει ρυθμούς έως 600Mbps, χρησιμοποιώντας την τεχνική πολλαπλών εισόδων - πολλαπλών εξόδων (Multiple Input Multiple Output - MIMO) στο φυσικό στρώμα.

Ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (WMANs)

Τα WMANs έχουν ως στόχο την παροχή ευρυζωνικής ασύρματης πρόσβασης ως εναλλακτική λύση της ενσύρματης πρόσβασης του τελικού χρήστη [π.χ. μέσω DSL (Digital Subscriber Line)],

ειδικότερα σε περιοχές όπου δεν υπάρχει ενσύρματη υποδομή. Τα κυριότερα πρότυπα της τεχνολογίας αυτής είναι δυο: το IEEE 802.16 και το IEEE 802.20.

IEEE 802.16 (WiMAX): Η ομάδα προτύπων IEEE 802.16 είναι γνωστή και ως WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) και χρησιμοποιείται για τελική πρόσβαση χρηστών αλλά και ως τεχνολογία δικτύων κορμού. Αναλυτικότερα, το IEEE 802.16 ενσωματώνει προηγμένες τεχνολογίες μετάδοσης όπως η OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), η AMC (Adaptive Modulation and Coding), η AFEC (Adaptive Forward Error Correction) και η H-ARQ (Hybrid Automatic Repeat reQuest) (Molisch, 2011). Με αυτές τις τεχνικές το πρότυπο IEEE 802.16 μπορεί να υποστηρίξει ρυθμούς έως και 75Mbps, με μέγιστη εμβέλεια 50km. Επιπρόσθετα, ορίζεται ένα πλαίσιο QoS, έτσι ώστε να υποστηρίζονται διαφορετικά είδη εφαρμογών.

Το IEEE 802.16 υποστηρίζει την τοπολογία σημείο προς σημείο (point to point) και την τοπολογία σημείο προς πολλαπλά σημεία (point to multi-point), οι οποίες χρησιμοποιούνται κυρίως για δίκτυα κορμού και τελική πρόσβαση παρόμοια με τα κυψελωτά δίκτυα, όπου ένας σταθμός βάσης ελέγχει τις μεταδόσεις από και προς τους συνδρομητές. Επιπλέον, υποστηρίζεται και η τοπολογία πλέγματος (π.χ. 802.16j), σύμφωνα με την οποία ένας συνδρομητής μπορεί να λειτουργήσει ως επαναλήπτης του σήματος ενός άλλου συνδρομητή, έτσι ώστε να φτάσει το σήμα στο σταθμό βάσης [λειτουργία πολλαπλών αλμάτων (multi-hop)]. Τέλος, αναφέρεται ότι το IEEE 802.16 λειτουργεί στις συχνότητες 10-66GHz για επικοινωνίες οπτικής επαφής (LoS), το 802.16a λειτουργεί στις συχνότητες 2-11GHz για επικοινωνίες μη οπτικής επαφής (nLoS) και η τεχνολογία κινητού WiMAX που βασίζεται στο πρότυπο 802.16e υποστηρίζει υψηλή κινητικότητα χρηστών.

IEEE 802.20 (MobileFi): Η τεχνολογία MobileFi (Bolton et al., 2007) βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.20 και είναι σχεδιασμένη για παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών σε κινητούς χρήστες. Πιο συγκεκριμένα, έχει στόχο την υποστήριξη κινητικότητας χρηστών μέχρι και 250km/h. Το πρότυπο υποστηρίζει κανάλια εύρους ζώνης 1.25MHz και 5MHz, για συχνότητες χαμηλότερες από 3.5GHz. Η ασύρματη διεπαφή βασίζεται στην τεχνική OFDM με προσαρμοσμένη κωδικοποίηση και ελάχιστους ρυθμούς λήψης και αποστολής δεδομένων 4Mbps και 0.8Mbps αντίστοιχα, ανά κυψέλη.

Ασύρματα δίκτυα ευρείας κάλυψης (WWANs)

Τα WWANs έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να παρέχουν ασύρματες επικοινωνίες σε ευρείες γεωγραφικές περιοχές. Τέτοια δίκτυα είναι τα κυψελωτά δίκτυα και τα δορυφορικά δίκτυα.

Κυψελωτά δίκτυα: Στα κυψελωτά δίκτυα (cellular networks) (Rappaport, 2002), μια γεωγραφική περιοχή χωρίζεται σε κυψέλες και ένας σταθμός βάσης παρέχει ασύρματες υπηρεσίες στους κινητούς χρήστες που βρίσκονται σε αυτή την κυψέλη. Οι χρήστες των δικτύων αυτών μπορούν να κινούνται μεταξύ των κυψελών, συνεπώς η διαχείριση των μεταπομπών (handover) και της κινητικότητας αποτελούν σημαντικές λειτουργίες των κυψελωτών δικτύων. Δεδομένου ότι έχουν αναπτυχθεί αρκετές κυψελωτές τεχνολογίες, οι οποίες έχουν εξελιχθεί με την πάροδο του χρόνου, στη συνέχεια παρουσιάζεται μια σύντομη αναδρομή σε αυτές (Garg, 2007), (Κανάτας κ.ά., 2008).

Αρχικά, εμφανίστηκαν τα κυψελωτά συστήματα πρώτης γενιάς (1st Generation - 1G), τα οποία

Βασίζονταν στην αναλογική τεχνολογία χρησιμοποιώντας διαμόρφωση συχνότητας (FM) και παρέιχαν υπηρεσίες φωνής μαζί με ορισμένες επιπλέον υπηρεσίες. Κάποια παραδείγματα συστημάτων 2G είναι το ευρωπαϊκό NMT (Nordic Mobile Telephone), το ιαπωνικό NNT (Nippon Telephone and Telegraph) και το αμερικάνικο AMPS (American Mobile Phone System). Ωστόσο, κατά την διάρκεια της δεκαετίας του 1980, η εμφάνιση των ψηφιακών επικοινωνιών επέτρεψε την ανάπτυξη μιας νέας γενιάς προτύπων και συστημάτων κινητών τηλεπικοινωνιών, γνωστή ως δεύτερη γενιά (2G) κυψελωτών συστημάτων. Μερικά παραδείγματα συστημάτων 2G είναι το δίκτυο GSM (Global System for Mobile Communication), το οποίο αποτελεί το πρώτο ευρωπαϊκό κυψελωτό ψηφιακό σύστημα και βασίζεται στην τεχνική πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης χρόνου (Time Division Multiple Access - TDMA), τα αμερικάνικα ψηφιακά συστήματα IS-95 (Interim Standard - 95) και IS-54/IS-136, τα οποία βασίζονται στην τεχνική πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης κώδικα (Code Division Multiple Access - CDMA) και στην τεχνική TDMA, αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, στην Ιαπωνία υπάρχει το σύστημα PDC (Personal Digital Cellular radio) το οποίο επίσης βασίζεται στην τεχνική TDMA. Συγκριτικά με τα προγενέστερα πρότυπα, τα οποία παρείχαν υπηρεσίες χαμηλού εύρους ζώνης (υπηρεσίες φωνής), τα συστήματα 2G έδωσαν τη δυνατότητα παροχής υπηρεσιών δεδομένων μέσω των κινητών τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Όσον αφορά το ευρωπαϊκό σύστημα GSM, το οποίο χρησιμοποιείται και στην Ελλάδα, αυτό λειτουργεί στις περιοχές συχνοτήτων των 900MHz, των 1800MHz [GSM 1800 ή DCS (Digital Cellular System) 1800] και των 1900 MHz [GSM 1900 ή PCS (Personal Communications Service) 1900] και χρησιμοποιεί TDMA σε συνδυασμό με FDD (Frequency Division Duplexing). Η απόσταση των καναλιών στο σύστημα αυτό είναι 200kHz, ενώ επιτυγχάνει μέγιστη απόσταση μετάδοσης 35km. Το GSM υποστηρίζει υπηρεσίες φωνής (13kbps) και υπηρεσίες δεδομένων μέχρι 9.6kbps. Πιο συγκεκριμένα, οι αρχικές υπηρεσίες δεδομένων που εισήχθησαν ήταν τα σύντομα μηνύματα κειμένου (Short Message Service - SMS), οι υπηρεσίες δεδομένων τύπου μεταγωγής κυκλώματος που επέτρεπαν την ανταλλαγή e-mails, καθώς και άλλες εφαρμογές δεδομένων. Επιπρόσθετα, με τη χρήση της τεχνικής διαμόρφωσης GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) επιτυγχάνεται ρυθμός μετάδοσης διαμόρφωσης 270.83kbps ανά κανάλι.

Ως εξέλιξη των συστημάτων 2G, προέκυψαν τα συστήματα 2.5G, με στόχο την αναβάθμιση των προσφερόμενων υπηρεσιών δεδομένων και την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης. Μερικά παραδείγματα τέτοιων συστημάτων είναι το GPRS (General Packet Radio Service) που χρησιμοποιεί τεχνολογία μεταγωγής πακέτων και ενσωματώθηκε στο πρότυπο GSM υποστηρίζοντας ρυθμούς μέχρι 171.2kbps ανά χρήστη, το HSCSD (High-Speed Circuit-Switched Data) που παρέχει ρυθμούς μέχρι 57.6kbps και το αμερικάνικο IS-95B που υποστηρίζει ρυθμούς 64-115.2kbps. Τέλος, το σύστημα EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) που υποστηρίζει μέχρι 384kbps ανά χρήστη καλείται και σύστημα 2.75G.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1990, η υψηλή ζήτηση για υπηρεσίες με υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, όπως η βιντεοκλήση, η πλοήγηση στο Διαδίκτυο κλπ., οδήγησαν στην εμφάνιση των κυψελωτών συστημάτων τρίτης γενιάς (3G). Τα συστήματα αυτά έχουν ως κύρια χαρακτηριστικά την υποστήριξη υψηλών ρυθμών δεδομένων (μέχρι και 2 Mbps) και την υποστήριξη μεταβαλλόμενων απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας. Οι μελέτες και οι προτυποποιήσεις πάνω στα συστήματα 3G πραγματοποιούνται κάτω από το σύνολο των προτύπων IMT-2000 (International Mobile Telecommunications 2000) της ITU. Ως επί το πλείστον, οι τεχνολογίες μετάδοσης που προτάθηκαν από τα IMT-2000 επέλεξαν ως βασική τεχνική πολλαπλής πρόσβασης την DS/CDMA (Direct Seque-

nce/Code Division Multiple Access). Σε μια προσπάθεια εναρμονισμού των διαφορετικών τεχνολογιών, προέκυψαν δυο κύριες τεχνολογίες συστημάτων 3G, η WCDMA (Wideband CDMA) και η cdma2000, οι οποίες υποστηρίζουν υπηρεσίες μεταγωγής κυκλώματος και πακέτων. Η τεχνολογία WCDMA, η οποία ονομάζεται και UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) βασίζεται στην τεχνολογία GSM και ο υπεύθυνος φορέας για την προτυποποίηση της είναι ο 3GPP (3rd Generation Partnership Project). Τα κανάλια που χρησιμοποιούνται έχουν εύρος ζώνης 5MHz και χρησιμοποιείται απευθείας διασπορά φάσματος με ακολουθία ρυθμού 3.84Mcps. Όσον αφορά την τεχνολογία cdma2000, αυτή βασίζεται στην τεχνολογία IS-95 και ο υπεύθυνος φορέας για την προτυποποίηση της είναι ο 3GPP2. Η τεχνολογία cdma2000 3x χρησιμοποιεί είτε απευθείας διασπορά φάσματος με ακολουθία ρυθμού 3.6864Mcps και εύρος 3.75MHz είτε ομαδοποιεί τρία φέροντα των 1.25MHz σε ένα των 3.75MHz με απευθείας διασπορά, με ακολουθία 1.2288Mcps στο καθένα. Τέλος, αναφέρεται ότι στην Ελλάδα χρησιμοποιείται το σύστημα UMTS και λειτουργεί στις περιοχές συχνοτήτων των 1900MHz και 2100MHz.

Επειδή η πρώτη έκδοση των συστημάτων 3G δεν εκπλήρωσε τις απαιτήσεις για υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, εισήχθηκε το σύστημα HSPA (High Speed Packet Access) ως βελτίωση του συστήματος WCDMA, το οποίο υποστηρίζει ρυθμούς λήψης δεδομένων μέχρι 14.4Mbps και ρυθμούς αποστολής δεδομένων μέχρι 5.76Mbps. Ως συνέχεια της εξέλιξης των κυψελωτών δικτύων αναπτύχθηκε το πρότυπο LTE (Long Term Evolution) από τον 3GPP. Το πρότυπο αυτό έχει σκοπό να παρέχει μέγιστο στιγμιαίο ρυθμό λήψης δεδομένων 100Mbps σε εύρος ζώνης 20MHz και μέγιστο στιγμιαίο ρυθμό αποστολής δεδομένων 50Mbps σε εύρος ζώνης 20MHz μέσω της εισαγωγής νέων σχημάτων μετάδοσης και νέων τεχνολογιών πολλαπλών κεραιών. Το πρότυπο αυτό οριοθετεί τη μετάβαση από τα συστήματα 3G σε συστήματα τέταρτης γενιάς 4G (Dahlman et al., 2011). Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκε από την ITU μια νέα οικογένεια προτύπων με όνομα IMT-advanced. Τα συστήματα 4G (π.χ. LTE-advanced) ορίζουν στις προδιαγραφές τους την υποστήριξη ρυθμών μέχρι 1Gbps για νομαδική χρήση (χαμηλής κινητικότητας) και 100Mbps για κινητούς χρήστες, με χρήση εύρους ζώνης 100MHz. Οι εφαρμογές των συστημάτων 4G αναμένεται να καλύψουν μεγάλο εύρος προηγμένων εφαρμογών. Τα συστήματα αυτά είναι IP (Internet Protocol)-βασισμένα και στοχεύουν στην υβριδική/ενοποιημένη λειτουργία με τα WLAN και τα WPAN. Τέλος, έχουν αρχίσει οι ερευνητικές μελέτες για την πέμπτη γενιά (5G) συστημάτων, όπου έχει προταθεί η χρήση διαφόρων πιθανών τεχνικών, όπως είναι η τεχνική massive MIMO, η μετάδοση στις χιλιοστομετρικές ζώνες συχνοτήτων, τα γνωστικά δίκτυα κλπ.

Δορυφορικά δίκτυα: Τα δορυφορικά συστήματα έχουν σκοπό την κάλυψη μεγάλων γεωγραφικών περιοχών καθώς επίσης και απομακρυσμένων σημείων όπου δεν υπάρχουν δίκτυα υποδομής, υποστηρίζοντας ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών και υπηρεσιών (Richharia & Westbrook, 2010). Οι δορυφόροι που χρησιμοποιούνται για τα συστήματα αυτά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με την τροχιά τους σε γεωστατικούς/γεωσύγχρονους (Geostationary/Geosynchronous Orbit - GEO), χαμηλής τροχιάς (Low Earth Orbit - LEO) και μεσαίας τροχιάς (Medium Earth Orbit - MEO). Οι βασικές δυσκολίες που αντιμετωπίζουν τα δορυφορικά συστήματα, και κυρίως τα GEO (π.χ. το BGAN/Inmarsat) λόγω της μεγάλης απόστασης από την επιφάνεια της γης, είναι η σχετικά μεγάλη καθυστέρηση στη διάδοση του σήματος, το οποίο μπορεί να αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για ορισμένες υπηρεσίες (π.χ. φωνητικές επικοινωνίες) καθώς επίσης και οι μεγάλες απαιτήσεις σε ισχύ

μετάδοσης. Γι' αυτό το λόγο, είναι προτιμότερη η χρήση των LEO συστημάτων, για υπηρεσίες φωνής και δεδομένων. Τα συστήματα LEO (π.χ. τα Iridium και Globalstar) χρειάζονται προσεγγιστικά 30-80 δορυφόρους για την παροχή παγκόσμιας κάλυψης. Επιπρόσθετα, αναφέρεται ότι μια από τις πιο ελκυστικές υπηρεσίες που παρέχεται μέσω των δορυφορικών συστημάτων είναι η ευρυεκπομπή βίντεο και ήχου σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές, με κόστος αρκετά ανταγωνιστικό σε σχέση με αυτό των επίγειων συστημάτων.

Όσον αφορά τις σταθερές δορυφορικές επικοινωνίες, το πρότυπο DVB-S (Digital Video Broadcasting via Satellite) έχει προταθεί από τον οργανισμό ETSI για την εμπρόσθια ζεύξη μεταξύ του σταθμού εδάφους πύλης (gateway) και των τερματικών, για την παροχή αμφίδρομων ευρυζωνικών υπηρεσιών μέσω δορυφόρου. Από την άλλη μεριά, το πρότυπο DVB-RCS (DVB - Return Channel via Satellite) έχει προταθεί για την αντίστοιχη ζεύξη επιστροφής. Επιπλέον, η εισαγωγή νέων υπηρεσιών υψηλής ευκρίνειας HD (High Definition) και η ανάγκη για πιο γρήγορη μετάδοση δεδομένων και υψηλότερη φασματική απόδοση, οδήγησε στην εξέλιξη των προηγούμενων προτύπων στα DVB-S2 και DVB-RCS2, αντίστοιχα. Όσον αφορά τα κινητά δορυφορικά συστήματα, έχουν προταθεί τα πρότυπα DVB-RCS+M (DVB-RCS Mobile) και DVB-SH (DVB - Satellite services to Handhelds). Το πρώτο αφορά την παροχή θαλάσσιων, αεροναυτικών και σιδηροδρομικών κινητών δορυφορικών υπηρεσιών, ενώ το δεύτερο αποτελεί ένα πρότυπο μετάδοσης σχεδιασμένο για να παρέχει υπηρεσίες ήχου, εικόνας και δεδομένων σε οχήματα και φορητές συσκευές, συνιστώντας ένα υβριδικό (δορυφορικό-επίγειο) σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί και επίγειους συμπληρωματικούς σταθμούς.

Ασύρματα περιφερειακά δίκτυα (WRANs)

Τα WRANs βασίζονται στο πρότυπο IEEE 802.22 (Cordeiro et al., 2005) και επιδιώκουν την υποστήριξη μιας ευρείας εμβέλειας μετάδοσης (π.χ. 50-100km), χρησιμοποιώντας τις ζώνες συχνοτήτων που έχουν ανατεθεί για την τηλεόραση. Το πρότυπο IEEE 802.22 υποστηρίζει στατικές επικοινωνίες σημείου προς πολλαπλά σημεία. Πιο συγκεκριμένα, ο σταθμός βάσης σε μια WRAN κυψέλη ελέγχει τις επικοινωνίες από και προς τους συνδρομητές. Η τεχνική OFDMA σε συνδυασμό με την προσαρμοζόμενη διαμόρφωση και κωδικοποίηση, χρησιμοποιείται στο φυσικό στρώμα, ενώ για να βελτιωθεί η ρυθμοαπόδοση του συστήματος, το IEEE 802.22 υποστηρίζει τεχνικές σύνδεσης φάσματος έτσι ώστε πολλαπλά κανάλια 6MHz να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα για μετάδοση. Δεδομένου ότι τα δίκτυα αυτά λειτουργούν στις ίδιες συχνότητες με τις υπηρεσίες τηλεόρασης και ότι πολλά τέτοια δίκτυα μπορεί να λειτουργούν παράλληλα, η διαχείριση της παρεμβολής αποτελεί πολύ σημαντικό ζήτημα. Για τους παραπάνω λόγους χρησιμοποιούνται οι τεχνικές δυναμικής ανίχνευσης και πρόσβασης φάσματος που βασίζονται στην έννοια των γνωστικών ασύρματων συστημάτων, τα οποία περιγράφονται παρακάτω.

Άλλες κατηγορίες ασύρματων δικτύων

Παραπάνω παρουσιάστηκε μια κατηγοριοποίηση των ασύρματων δικτύων ανάλογα με την εμβέλεια τους. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συνοπτικά τρεις άλλες σημαντικές κατηγορίες ασύρματων δικτύων: τα δίκτυα πολλαπλών αλμάτων (multi-hop networks), τα συνεργατικά δίκτυα (cooperative networks) και τα γνωστικά δίκτυα (cognitive radios).

Δίκτυα πολλαπλών αλμάτων: Ο περιορισμός της απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη που υπάρχει τα παραδοσιακά δίκτυα, όπου η επικοινωνία πραγματοποιείται σε ένα άλμα (single-hop), μπορεί να αρθεί μέσω της επικοινωνίας πολλαπλών αλμάτων (multi-hop). Στα δίκτυα επικοινωνιών πολλαπλών αλμάτων, οι κόμβοι μπορούν να λαμβάνουν και να επανεκπέμπουν την κίνηση του δικτύου συνεργατικά, λειτουργώντας ως επαναλήπτες, με στόχο να μεταφερθεί η κίνηση στον τελικό προορισμό. Τα πλεονεκτήματα των επικοινωνιών αυτού του είδους είναι ότι αυξάνεται η περιοχή κάλυψης του δικτύου και βελτιώνεται η ρυθμοαπόδοση του. Στη συνέχεια, περιγράφονται τρία πολύ γνωστά παραδείγματα δικτύων τέτοιου είδους: τα ασύρματα αδόμητα δίκτυα (wireless ad hoc networks), τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (wireless sensor networks - WSNs) και τα ασύρματα δίκτυα πλέγματος (wireless mesh networks).

- *Ασύρματα αδόμητα δίκτυα:* Τα ασύρματα αδόμητα δίκτυα (ad-hoc) αποτελούν μια αποκεντρωμένη κατηγορία δικτύων, η οποία δεν βασίζεται σε κάποια προϋπάρχουσα σταθερή υποδομή, και μπορούν να αυτο-οργανώνονται μεταξύ τους. Ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο είδος αδόμητων δικτύων είναι τα κινητά ασύρματα αδόμητα δίκτυα (Mobile Ad hoc NETWORKS - MANETs), σύμφωνα με τα οποία μια αυτόνομη ομάδα κινητών κόμβων επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ζεύξεων σχετικά περιορισμένου εύρους ζώνης (Santi, 2012). Δεδομένου ότι οι κόμβοι είναι κινητοί, η τοπολογία του δικτύου μπορεί να αλλάζει συχνά. Γι' αυτό το λόγο, τα δίκτυα αυτά θα πρέπει να αυτο-οργανώνονται για να επιτυγχάνεται η συνδεσιμότητα μεταξύ των κόμβων, ενώ η επικοινωνία πραγματοποιείται μέσω πολλαπλών αλμάτων. Λόγω της αυτόνομης και αυτο-οργανωμένης φύσης των δικτύων αυτών, η σχεδίαση των πρωτοκόλλων MAC (Medium Access Control) και δρομολόγησης αποτελούν σημαντικές ερευνητικές προκλήσεις. Τα πιο συνηθισμένα πρότυπα για τα ασύρματα αδόμητα δίκτυα είναι το IEEE 802.11 και το Bluetooth. Τέλος, μια ειδική κατηγορία των δικτύων αυτών είναι τα VANETs (Vehicular Ad hoc Networks), τα οποία χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία μεταξύ οχημάτων και την παροχή έξυπνων εφαρμογών για τα συστήματα μεταφορών.

- *Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων:* Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (Karl & Willig, 2005) αποτελείται από ασύρματους κόμβους αισθητήρες, κατανεμημένους σε μια γεωγραφική περιοχή. Οι κόμβοι αισθητήρες είναι σχεδιασμένοι να μετράνε και να συγκεντρώνουν σήματα στόχων από το περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα, οι κόμβοι αυτοί είναι εξοπλισμένοι με ασύρματους πομποδέκτες για να εκπέμπουν και να λαμβάνουν τα μετρούμενα δεδομένα μεταξύ τους με στόχο τα δεδομένα να καταλήξουν μέσω επικοινωνίας πολλαπλών αλμάτων σε ένα κόμβο καταθόθρα (sink), ο οποίος είναι συνδεδεμένος με το εξωτερικό δίκτυο. Τα πιο συνηθισμένα πρότυπα για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι το IEEE 802.15.4, το ZigBee και το 6LoWPAN (IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks) το οποίο επιτρέπει τη χρήση του πρωτοκόλλου IPv6. Τα δίκτυα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για στρατιωτικές εφαρμογές, εφαρμογές περιβαλλοντικής παρακολούθησης, ιατρικές εφαρμογές κλπ. Ένα από τα σημαντικότερα θέματα στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι η κατανάλωση ενέργειας και γενικότερα η αποδοτική χρήση των ασύρματων πόρων τους, δεδομένου του μικρού μεγέθους και του χαμηλού κόστους των κόμβων. Επιπλέον, μεγάλη πρόκληση αποτελεί ο συγχρονισμός μεταξύ των κόμβων αυτών δεδομένου του μεγάλου αριθμού των κόμβων που απαρτίζουν συνήθως ένα τέτοιο δίκτυο.

- *Ασύρματα δίκτυα πλέγματος:* Παρόμοια με τα αδόμητα δίκτυα, τα ασύρματα δίκτυα πλέγματος χρησιμοποιούν την επικοινωνία πολλαπλών αλμάτων, έτσι ώστε να μεταφέρουν την κίνηση από ένα πομπό σε ένα δέκτη ή σε ένα εξωτερικό δίκτυο (Santi, 2012). Ωστόσο, στα συγκεκριμένα

δίκτυα, υπάρχουν κάποιοι στατικοί κόμβοι, που καλούνται δρομολογητές πλέγματος και σχηματίζουν ένα πλέγμα κορμού. Ο κάθε δρομολογητής πλέγματος μπορεί να υποστηρίξει πολλαπλούς χρήστες πλέγματος είτε κινητούς είτε σταθερούς. Πιθανές εφαρμογές των δικτύων αυτών είναι η υποστήριξη του δικτύου κορμού των κυψελωτών συστημάτων ή οι εφαρμογές παρακολούθησης και εποπτείας. Τα ασύρματα δίκτυα πλέγματος μπορούν να υλοποιηθούν με διάφορες τεχνολογίες όπως οι τεχνολογίες IEEE 802.11, IEEE 802.15, IEEE 802.16, η κυψελωτή, καθώς και συνδυασμός τους. Και στα δίκτυα αυτά χρειάζεται αποδοτική διαχείριση πόρων και σχεδίαση των πρωτοκόλλων MAC και δρομολόγησης.

Συνεργατικά δίκτυα: Μια άλλη τεχνολογία που χρησιμοποιείται στα ασύρματα δίκτυα βελτιώνοντας την απόδοση των συμβατικών δικτύων είναι ο συνεργατικός διαφορισμός (cooperative diversity) (K. R. Liu et al., 2009). Πιο συγκεκριμένα, οι τεχνικές συνεργατικού διαφορισμού αναφέρονται στο σύνολο των τεχνικών που εκμεταλλεύονται την ύπαρξη ενός ή περισσότερων ενδιάμεσων κόμβων-επαναληπτών (relays) ανάμεσα στον πομπό και στον δέκτη. Οι επαναλήπτες επανεκπέμπουν το σήμα του πομπού, το οποίο τελικά φθάνει στον δέκτη μέσω ανεξαρτήτων διαδρομών, επιτυγχάνοντας κέρδος διαφορισμού. Συνεπώς, ο δέκτης χρησιμοποιεί τόσο το απευθείας σήμα από τον πομπό, όσο και τα σήματα από τους ενδιάμεσους κόμβους προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση του συστήματος. Τα βασικά είδη των τεχνικών συνεργατικού διαφορισμού είναι η ενίσχυση και προώθηση (Amplify and Forward - AF) και η αποκωδικοποίηση και προώθηση (Decode and Forward - DF). Σύμφωνα με την πρώτη τεχνική, κάθε μη-αναγεννητικός επαναλήπτης απλά ενισχύει και προωθεί το λαμβανόμενο σήμα προς τον δέκτη. Αντίθετα, σύμφωνα με τη δεύτερη τεχνική, κάθε αναγεννητικός επαναλήπτης, 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 περιορίζουν τη διάδοση σφαλμάτων.

Γνωστικά δίκτυα: Η τεχνολογία των γνωστικών ασύρματων συστημάτων (Cognitive Radios - CRs) εισάγει ένα νέο τρόπο σχεδίασης συστημάτων ασύρματων επικοινωνιών που έχει ως στόχο να βελτιώσει τη χρησιμοποίηση του εύρους ζώνης (Mitola III, 1999; Hossain et al., 2009). Όπως προαναφέρθηκε, μια από τις κυριότερες προκλήσεις των ασύρματων δικτύων επικοινωνιών νέας γενιάς είναι η εξυπηρέτηση της ολοένα και αυξανόμενης ζήτησης για φασματικούς πόρους, η οποία προκαλείται από τις αναδυόμενες εφαρμογές και υπηρεσίες. Ωστόσο, η προσπάθεια ικανοποίησης των υψηλών απαιτήσεων των χρηστών και των υπηρεσιών έχει ως αποτέλεσμα τη συμφόρηση του πεπερασμένου φάσματος συχνοτήτων, το οποίο παράλληλα υποχρησιμοποιείται, αφού στην πράξη αξιοποιείται ένα μικρό ποσοστό του συνολικού αδειοδοτημένου φάσματος (K. R. Liu & Wang, 2010; B. Wang & Liu, 2011). Ο βασικός λόγος που οδηγεί στη μη αποδοτική χρήση του εύρους ζώνης είναι το υπάρχον στατικό σχήμα αδειοδότησης του, όπου το φάσμα που εκχωρείται στους αδειοδοτημένους χρήστες δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί από άλλους χρήστες ή εφαρμογές ακόμα και αν παραμένει αχρησιμοποίητο. Προκειμένου να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα, προτάθηκε η πρωτοποριακή τεχνολογία επικοινωνιών των γνωστικών δικτύων, η οποία αλλάζει τα δεδομένα σύμφωνα με τα οποία ρυθμίζεται το ραδιοφάσμα (Mitola III, 1999). Ως γνωστικό δίκτυο ορίζεται η ραδιοπλατφόρμα η οποία μπορεί να επαναρυθμίζει και να προσαρμόζει τις παραμέτρους λειτουργίας της σε πραγ-

ματικό χρόνο, βασιζόμενη στις μεταβαλλόμενες συνθήκες και απαιτήσεις του περιβάλλοντος (π.χ. διαθέσιμο εύρος ζώνης, συνθήκες καναλιού, δραστηριότητα άλλων χρηστών), μέσω της γνωστικής λειτουργίας (cognition). Σε ένα σύστημα CR, η εκχώρηση του εύρους ζώνης γίνεται περισσότερο ευέλικτη επιτρέποντας στους μη αδειοδοτημένους χρήστες να έχουν πρόσβαση στο εύρος ζώνης υπό συγκεκριμένους περιορισμούς. Συνεπώς, το αδειοδοτημένο ραδιοφάσμα μπορούν να το εκμεταλλευτούν και μη αδειοδοτημένοι χρήστες, οι οποίοι ονομάζονται δευτερεύοντες χρήστες (Secondary Users - SUs), με έναν έξυπνο και ευέλικτο τρόπο (Hossain et al., 2009), χωρίς να διαταράσσουν την επικοινωνία των αδειοδοτημένων χρηστών, δηλαδή των πρωτεύοντων χρηστών (Primary Users - PUs).

Δυο είναι τα βασικά χαρακτηριστικά των γνωστικών συστημάτων: η γνωστική ικανότητα (cognitive capability) και η επανα-ρυθμισιμότητα (reconfigurability). Προτού ένα σύστημα CR προσαρμόσει τη λειτουργία του ανάλογα με τις μεταβολές του περιβάλλοντος, θα πρέπει πρώτα να συλλέξει/ανιχνεύσει τις απαραίτητες πληροφορίες από το ασύρματο περιβάλλον. Αυτό ονομάζεται γνωστική ικανότητα και επιτρέπει στο CR να αναγνωρίζει μια εκπεμπόμενη κυματομορφή, τη συχνότητα λειτουργίας, τα πρωτόκολλα επικοινωνίας, τη γεωγραφική πληροφορία κλπ. Οι λειτουργίες αυτές μπορούν να βασιστούν σε τεχνικές επεξεργασίας σήματος και σε τεχνικές μηχανικής μάθησης (machine learning). Στη συνέχεια, ένα CR μπορεί δυναμικά να ρυθμίζει τις παραμέτρους λειτουργίας του ανάλογα με τις μεταβολές του περιβάλλοντος, το οποίο καλείται επανα-ρυθμισιμότητα και βασίζεται στην έννοια του Software Defined Radio (SDR). Ένα SDR είναι ένα σύστημα ραδιοεπικοινωνιών το οποίο μπορεί να ρυθμίζει τις παραμέτρους μετάδοσης και λήψης (π.χ. ισχύς μετάδοσης, συχνότητα λειτουργίας, μέθοδος διαμόρφωσης και πρωτόκολλα) μέσω προγραμματιζόμενου υλικού, ελεγχόμενου από λογισμικό.

Συνεπώς, οι κύριοι στόχοι των γνωστικών δικτύων είναι η αξιόπιστη επικοινωνία οποτεδήποτε και οπουδήποτε και η αποδοτική χρησιμοποίηση του ραδιοφάσματος. Για να επιτευχθούν αυτά, η γνωστική διαδικασία ξεκινάει με την ανίχνευση των ερεθισμάτων και τελειώνει με τη δράση. Οι βασικές λειτουργίες που θα πρέπει να πραγματοποιεί η ασύρματη διεπαφή ενός CR είναι (Haykin, 2005; B. Wang & Liu, 2011):

- *Ανάλυση του ασύρματου περιβάλλοντος (radio-scene analysis)*: όπου γίνεται εκτίμηση της θερμοκρασίας παρεμβολής (interference temperature)¹ του περιβάλλοντος και εντοπισμός και συνεχής παρακολούθηση των φασματικών κενών στα οποία δεν εκπέμπει ο πρωτεύων χρήστης, μέσω της διαδικασίας της ανίχνευσης φάσματος (spectrum sensing).
- *Διαχείριση φάσματος (spectrum management)*: όπου γίνεται η ανάλυση του φάσματος (spectrum analysis) και η απόφαση της καλύτερης ζώνης συχνοτήτων για μετάδοση ανάλογα με την απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας. Για να γίνουν τα παραπάνω απαιτείται εκτίμηση της κατάστασης του καναλιού και πρόβλεψη της χωρητικότητας του. Επίσης, στη διαχείριση φάσματος περιλαμβάνεται και η διαχείριση των μεταπομπών, δηλαδή της κινητικότητας φάσματος (spectrum mobility), όπου ένας χρήστης αλλάζει τη συχνότητα λειτουργίας του ανάλογα με τη δραστηριότητα του πρωτεύοντος χρήστη.

¹ Η θερμοκρασία παρεμβολής είναι ένα μέγεθος που μετρά την ισχύ ραδιοσυχνοτήτων στον δέκτη από άλλους πομπούς και πηγές θορύβου και είναι ίση με την ισοδύναμη θερμοκρασία της ισχύος στην κεραία ανά μονάδα εύρους ζώνης, μετρούμενη σε μονάδες °K.

- *Δυναμικός διαμοιρασμός φάσματος (dynamic spectrum sharing) και έλεγχος ισχύος μετάδοσης (transmission power control)*: όπου για να είναι εφικτή η αποδοτική χρήση του φάσματος, αυτό θα πρέπει να μοιράζεται αποδοτικά με τους πρωτεύοντες ή τους υπόλοιπους δευτερεύοντες χρήστες χρησιμοποιώντας κατάλληλα σχήματα πρόσβασης, χρονοπρογραμματισμού και ελέγχου ισχύος, έτσι ώστε να αποφεύγονται οι συγκρούσεις και οι παρεμβολές.

Συνεπώς, για να υλοποιηθούν τα γνωστικά συστήματα στην πράξη, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη τεχνικών διαμοιρασμού του αδειοδοτημένου φάσματος (spectrum sharing). Οι τεχνικές διαμοιρασμού μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω ευρύτερες κατηγορίες: στην underlay (μη επικαλυπτική) προσέγγιση, στην interweave (διαπλεκτική) προσέγγιση και στην overlay (επικαλυπτική) προσέγγιση (A. Goldsmith et al., 2009). Σύμφωνα με την underlay προσέγγιση, επιτρέπεται στους δευτερεύοντες χρήστες να επικοινωνούν μεταξύ τους ταυτόχρονα με τους πρωτεύοντες χρήστες, εξασφαλίζοντας όμως συγκεκριμένους περιορισμούς παρεμβολής προς τους πρωτεύοντες χρήστες. Αντίθετα, σύμφωνα με την interweave προσέγγιση, οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους μόνο όταν οι πρωτεύοντες χρήστες «απουσιάζουν», δηλαδή όταν δεν μεταδίδουν δεδομένα και συνεπώς δεν χρησιμοποιούν ουσιαστικά το φάσμα τους. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί ανιχνεύοντας τα φασματικά κενά ή φασματικές τρύπες (spectrum holes) ή «λευκά» διαστήματα φάσματος (spectrum white spaces). Τέλος, σύμφωνα με την overlay προσέγγιση, οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να μεταδίδουν τα δεδομένα τους ταυτόχρονα με τους πρωτεύοντες χρήστες, δεσμευόμενοι όμως να «βοηθούν» τους πρωτεύοντες χρήστες και να αναμεταδίδουν τα μηνύματά τους, έτσι ώστε να αντισταθμίζουν την παρεμβολή που τους προκαλούν. Η καθεμία από τις παραπάνω προσεγγίσεις έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της και απαιτεί διαφορετικό βαθμό πληροφόρησης. Για παράδειγμα, η underlay προσέγγιση επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών χωρίς να χρειάζεται ανίχνευση φάσματος και της τρέχουσας δραστηριότητας των πρωτευόντων χρηστών όπως απαιτεί η interweave προσέγγιση, όμως περιορίζει την ισχύ μετάδοσης λόγω των ορίων παρεμβολής στους πρωτεύοντες, κάτι που απαιτεί τη γνώση αυτής της παρεμβολής. Τέλος, η overlay προσέγγιση δεν έχει τα μειονεκτήματα των δυο προηγούμενων, αλλά είναι πολύ δύσκολο να υλοποιηθεί στην πράξη καθώς απαιτεί περισσότερη πληροφόρηση και πιο συγκεκριμένα απαιτεί τη γνώση των «κωδικοβιβλίων» (codebooks) και πιθανώς και των μηνυμάτων των πρωτευόντων χρηστών.

Λόγω της ευρείας ερευνητικής δημοτικότητας των γνωστικών δικτύων, πολλοί οργανισμοί έχουν αρχίσει να προτυποποιούν την τεχνολογία των γνωστικών συστημάτων. Πιο συγκεκριμένα, το πρότυπο IEEE 802.22 προτάθηκε για την επαναχρησιμοποίηση του τηλεοπτικού φάσματος χωρίς να προκαλεί παρεμβολές στους τηλεοπτικούς παρόχους. Επιπρόσθετα, η επιτροπή IEEE Standards Coordinating Committee (SCC) 41 ή Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN) έχει ξεκινήσει μια σειρά προτύπων που ονομάζονται IEEE 1900, τα οποία εστιάζουν στα ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς και στη διαχείριση του φάσματος, παρέχοντας επανα ρυθμίσιμα δίκτυα και τερματικά σε ετερογενή περιβάλλοντα.

2.1.4 Διαδικασία Προτυποποίησης

Η αλληλεπίδραση μεταξύ των συστημάτων επικοινωνιών δημιούργησε την ανάγκη προτυποποίησης τους είτε για λόγους συμβατότητας είτε για λόγους διαλειτουργικότητας. Τα πρότυπα καθορίζονται από εθνικούς ή διεθνείς οργανισμούς και επιτροπές (A. Goldsmith, 2005), (Κανάτας κ.ά., 2008).

Η ITU διαδραματίζει κυρίαρχο ρόλο στις διαδικασίες προτυποποίησης, με σκοπό το συντονισμό των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων σε παγκόσμιο επίπεδο. Πιο συγκεκριμένα, η ITU είναι υπεύθυνη για τη διαχείριση του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων, ενώ εκδίδει κανονισμούς και πρότυπα για όλο το φάσμα των τηλεπικοινωνιών. Στην Ευρώπη σημαντική συμβολή έχει το ETSI, το οποίο ιδρύθηκε με σκοπό την καθιέρωση πανευρωπαϊκών προτύπων για μια κοινή ευρωπαϊκή αγορά τηλεπικοινωνιών σε συνεργασία με δημόσιους και ιδιωτικούς φορείς. Ο αντίστοιχος οργανισμός στις Η.Π.Α. είναι ο TIA (Telecommunications Industry Association). Άλλοι γνωστοί οργανισμοί που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στις διαδικασίες προτυποποίησης είναι το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE) και ο Διεθνής Οργανισμός Προτυποποίησης (International Standardization Organization - ISO).

Η δημιουργία ενός προτύπου ασύρματων επικοινωνιών, είναι μια συνεχόμενη διαδικασία. Οι ομάδες προτυποποίησης εξελίσσουν συνεχώς τα πρότυπα τους με στόχο την ικανοποίηση των νέων απαιτήσεων και αναγκών για υπηρεσίες και εφαρμογές. Παρόλο που η διαδικασία αυτή είναι διαφορετική για την κάθε ομάδα, οι βασικές φάσεις που ακολουθούνται μπορούν να συνοψιστούν στις ακόλουθες (Dahlman et al., 2011):

1. *Απαιτήσεις:* Αυτή αποτελεί την αρχική φάση, όπου αποφασίζονται οι απαιτήσεις που θα πρέπει να επιτυγχάνονται από το εκάστοτε πρότυπο. Η φάση αυτή διαρκεί σχετικά λίγο, ενώ οι απαιτήσεις μπορούν να μεταβληθούν, να προστεθούν καινούργιες αλλά και να αφαιρεθούν παλιές, εφόσον χρειαστεί από τις επόμενες φάσεις.
2. *Αρχιτεκτονική:* Κατά τη φάση αυτή, αποφασίζονται οι κύριες δομικές μονάδες και διεπαφές, έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις που έχουν τεθεί. Η συγκεκριμένη φάση είναι συνήθως αρκετά χρονοβόρα και ενδέχεται να αλλάξει τις απαιτήσεις της προηγούμενης φάσης.
3. *Λεπτομερείς προδιαγραφές:* Σε αυτή τη φάση, η κάθε διεπαφή προδιαγράφεται αναλυτικά και ενδεχομένως να απαιτεί την αναθεώρηση των προηγούμενων φάσεων.
4. *Δοκιμή και επαλήθευση:* Αυτή αποτελεί την τελική φάση, όπου δοκιμάζονται οι προδιαγραφές των διεπαφών με πραγματικό εξοπλισμό. Στην ουσία δεν αποτελεί πραγματικό μέρος της προτυποποίησης για τις ομάδες, αλλά αποτελεί την τελική επαλήθευση του προτύπου και λαμβάνει χώρα παράλληλα μέσω των δοκιμών που πραγματοποιούν οι προμηθευτές. Αν προκύψουν προβλήματα κατά τη φάση αυτή, μπορεί να οδηγήσουν στη μεταβολή κυρίως των λεπτομερών προδιαγραφών και λιγότερο συχνά των αποφάσεων προηγούμενων φάσεων. Η φάση αυτή τελειώνει όταν τα αποτελέσματα των δοκιμών είναι σταθερά και επαληθεύουν το πρότυπο μέσω του εξοπλισμού.

Συνήθως, χρειάζονται ένα με δυο χρόνια ή και περισσότερο αν το πρότυπο ξεκινάει από το μηδέν, από την ολοκλήρωση του προτύπου μέχρι αυτό να εμπορευματοποιηθεί. Συνεπώς, όπως φαίνεται από τα παραπάνω, η διαδικασία της προτυποποίησης είναι μια χρονοβόρα διαδικασία η οποία προκύπτει μέσω αλληλοεπικαλυπτόμενων, διασυνδεδεμένων και επαναληπτικών φάσεων.

2.2 Διαχείριση Πόρων Ασύρματων Δικτύων

Όπως προαναφέρθηκε, οι εξελίξεις στα ασύρματα δίκτυα έχουν οδηγήσει στην αύξηση των απαιτήσεων των εφαρμογών και των χρηστών για υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων, χαμηλότερες καθυστερήσεις και υψηλότερη και σταθερότερη ποιότητα υπηρεσιών. Αυτές οι απαιτήσεις μπορούν να υποστηριχθούν από τα ασύρματα δίκτυα, έως ένα βαθμό, μέσω της ανάπτυξης νέων τεχνολογιών στο φυσικό στρώμα και στο στρώμα δικτύου. Ωστόσο, δεδομένης της πεπερασμένης φύσης των διαθέσιμων πόρων, είναι σχεδόν αδύνατον να πραγματοποιηθεί η επίτευξη αυτών των στόχων χωρίς την αποδοτική διαχείριση των πόρων των ασύρματων δικτύων. Στη συγκεκριμένη ενότητα, περιγράφεται το πρόβλημα της διαχείρισης πόρων στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών. Αρχικά, παρουσιάζονται οι διαθέσιμοι πόροι των ασύρματων δικτύων και στη συνέχεια ακολουθεί η γενική διατύπωση του προβλήματος διαχείρισης πόρων, καθώς και οι τεχνικές διαχείρισης με στόχο τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους. Παρόλο που τα διαφορετικά συστήματα και οι διαφορετικές εφαρμογές ασύρματων επικοινωνιών που είναι διαθέσιμα στις μέρες μας έχουν διαφορετικές απαιτήσεις και στόχους (π.χ. ρυθμών μετάδοσης δεδομένων, ισχύος, γεωγραφικής κάλυψης και κινητικότητας), οι προκλήσεις που καλούνται να επιλυθούν για το σχεδιασμό και την υλοποίηση τους μπορούν να ομαδοποιηθούν και να συνοψιστούν όπως περιγράφεται στη συγκεκριμένη ενότητα. Αναλυτικότερα, η διαχείριση πόρων των ασύρματων δικτύων μπορεί να οριστεί ως εξής:

Ορισμός 2.1. Η *διαχείριση πόρων* στις ασύρματες επικοινωνίες αναφέρεται σε μια σειρά αποδοτικών διεργασιών, οι οποίες καθορίζουν τον τρόπο και τις διαδικασίες ελέγχου, διαμοιρασμού και ανάθεσης των διαθέσιμων πόρων ενός ασύρματου δικτύου στον εκάστοτε χρήστη του.

Η διαχείριση πόρων καθορίζει τη βέλτιστη χρήση των πόρων του δικτύου σύμφωνα με την πληροφορία του ασύρματου περιβάλλοντος (π.χ. ασύρματου καναλιού) και τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσιών των χρηστών. Η σημαντικότητα της διαχείρισης πόρων οφείλεται κυρίως στην πεπερασμένη φύση των πόρων. Πιο συγκεκριμένα, ενώ η ασύρματη ζεύξη μπορεί εκ φύσεως να απολέσει στενωπό (bottleneck) στην απόδοση του συστήματος, η διαχείριση πόρων στοχεύει στην όσο το δυνατόν αποδοτικότερη παροχή της απαιτούμενης ποιότητας υπηρεσίας σε κάθε χρήστη. Η διαχείριση πόρων είναι απαραίτητη σε κάθε δίκτυο ανεξάρτητα από τις δυνατότητες που προσφέρει και γι' αυτό έχει προσεγγίσει τόσο μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια.

Για να είναι αποδοτικό ένα σχήμα διαχείρισης πόρων θα πρέπει πρώτα να καθοριστούν ορισμένοι παράγοντες. Αρχικά, υπάρχει ένα σύνολο διαθέσιμων πόρων που θα πρέπει να διαμοιραστούν μεταξύ των υπάρχοντων χρηστών. Στη συνέχεια, υπάρχει η διαθέσιμη πληροφορία στο διαχειριστή των πόρων και οι μέθοδοι ανταλλαγής πληροφορίας μεταξύ των χρηστών και των πρωτοκόλλων των διαφόρων στρωμάτων. Επιπλέον, υπάρχουν οι απαιτήσεις των υπηρεσιών του κάθε χρήστη, οι οποίες μπορεί να καθορίζονται διαφορετικά ανάλογα με το είδος της υπηρεσίας και την εκάστοτε μετρική απόδοσης. Τέλος, υπάρχουν οι στόχοι που θα πρέπει να βελτιστοποιηθούν σε σχέση με τις μετρικές απόδοσης του παρόχου υπηρεσιών.

2.2.1 Πόροι Ασύρματων Δικτύων

Η σωστή διαχείριση των πόρων οδηγεί στη βελτίωση της απόδοσης ενός δικτύου, ένας στόχος που επιδιώκεται από κάθε δραστηριότητα διαχείρισης. Συνεπώς, αρχικά είναι απαραίτητο να οριστούν

οι διαχειρίσιμοι πόροι που είναι διαθέσιμοι στα ασύρματα δίκτυα. Συνήθως, ως πόροι αναφέρονται οι φυσικές οντότητες μέσα στο ασύρματο δίκτυο, οι οποίες επηρεάζουν την απόδοση του. Υπάρχουν διάφορα είδη πόρων προς διαχείριση στα ασύρματα συστήματα (Priggouris et al., 2006; B. G. Lee et al., 2009), οι σημαντικότεροι είναι οι ακόλουθοι:

1. *Εύρος ζώνης (bandwidth)*: Το εύρος ζώνης είναι το πλάτος της ζώνης συχνοτήτων που καταλαμβάνει το ζεύγος του πομπού-δέκτη για να πραγματοποιήσει τη μετάδοση ενός σήματος. Αποτελεί ένα βασικό πόρο των ασύρματων δικτύων, καθώς το εύρος ζώνης είναι αυτό που καθορίζει το μέγιστο αξιόπιστο ρυθμό μετάδοσης και την πρόσβαση στο ασύρματο μέσο. Ωστόσο, το εύρος ζώνης που θα χρησιμοποιήσει κάθε σύστημα και υπηρεσία είναι πεπερασμένο και καθορίζεται από την αρμόδια ρυθμιστική αρχή. Η αύξηση του εύρους ζώνης οδηγεί σε αύξηση της χρέωσης για την απόκτηση του, όταν η συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων είναι αδειοδοτούμενη, ενώ οδηγεί σε συγκρούσεις και παρεμβολές όταν η περιοχή συχνοτήτων είναι μη αδειοδοτούμενη (π.χ. ISM) και δεν υπάρχει αποκλειστική χρήση του φάσματος. Συνεπώς, ο μεγάλος αριθμός χρηστών και υπηρεσιών, καθώς και το κόστος της χρησιμοποίησης του φάσματος συχνοτήτων αποτελούν περιοριστικούς παράγοντες για το εύρος ζώνης και γι' αυτό θα πρέπει να υπάρχουν αποδοτικοί μηχανισμοί διαχείρισης του.
2. *Ισχύς (power)*: Η ενέργεια που απαιτείται για να παραδοθεί ένα bit ή ένα σύμβολο στον δέκτη αποτελεί περιοριστικό παράγοντα. Όσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς, τόσο βελτιώνεται η ποιότητα της ασύρματης ζεύξης, αφού ο πομπός μπορεί να εισάγει περισσότερη πληροφορία σε κάθε σύμβολο που μεταδίδεται και συνεπώς να αυξήσει το ρυθμό μετάδοσης. Επομένως, η ισχύς μετάδοσης (ή αλλιώς εκπομπής) είναι ένας θεμελιώδης πόρος, ο οποίος όμως χαρακτηρίζεται από πολλούς περιοριστικούς παράγοντες. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση της ισχύος περιορίζεται από τις δυνατότητες και το κόστος των ενισχυτών ισχύος, μειώνει την αυτονομία της μπαταρίας ενός τερματικού το οποίο δεν συνδέεται σε τροφοδοσία, καθώς επίσης οδηγεί σε μείωση της συνολικής απόδοσης ενός δικτύου επειδή αυξάνει τις παρεμβολές στις υπόλοιπες συσκευές. Συνεπώς, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη αποδοτικών σχημάτων διαχείρισης της ισχύος μετάδοσης ανάλογα με το περιβάλλον. Επιπρόσθετα, αναφέρεται ότι τα μέγιστα επιτρεπτά επίπεδα ισχύος εκπομπής συνήθως ρυθμίζονται από τους οργανισμούς αδειοδότησης του φάσματος.
3. *Κεραίες (antennas)*: Ο αριθμός των κεραιών στον πομπό ή τον δέκτη διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοση μιας ασύρματης ζεύξης. Οι κεραιές αποτελούν έναν ελκυστικό πόρο, αφού η χρήση περισσότερων κεραιών μπορεί να αυξήσει τη χωρητικότητα του καναλιού χωρίς τη χρήση επιπλέον εύρους ζώνης ή ισχύος. Επιπρόσθετα, δεδομένου ότι η χωρητικότητα του καναλιού εξαρτάται από τη χρήση των κεραιών, η οποία θα πρέπει να ρυθμίζεται ανάλογα με το περιβάλλον/κανάλι, η αποδοτική λειτουργία τους είναι απαραίτητη και επιτυγχάνεται με αποδοτικές μεθόδους διαχείρισης κεραιών. Ωστόσο, η αύξηση του αριθμού των κεραιών χαρακτηρίζεται από περιορισμούς, καθώς αυξάνει την πολυπλοκότητα και το κόστος του πομπού και του δέκτη αλλά και την πολυπλοκότητα της διαχείρισής τους. Παρ' όλα αυτά, αναμένεται να παίξουν σημαντικό τεχνολογικό ρόλο στην ανάπτυξη ευρυζωνικών τεχνολογιών, δεδομένου ότι είναι λιγότερο δαπανηρός πόρος από το εύρος ζώνης και την ισχύ.

4. *Αποθήκευση (storage)*: Οι πόροι αποθήκευσης αναφέρονται στην πεπερασμένη χωρητικότητα των διάφορων αποθηκευτικών στοιχείων, τα οποία υπάρχουν σε κάθε οντότητα μέσα στα δίκτυα (π.χ. τερματικά, δρομολογητές) και ο ρόλος τους είναι να αντιμετωπίσουν τις πιθανές εκρήξεις δεδομένων, οι οποίες δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν άμεσα από τις επεξεργαστικές ή μεταγωγικές ικανότητες αυτών των οντοτήτων. Σε τέτοιες περιπτώσεις, τα στοιχεία αυτά αποθηκεύουν προσωρινά τα εισερχόμενα πακέτα, μειώνοντας κατά συνέπεια την πιθανότητα να χαθούν δεδομένα. Συνεπώς, η σωστή διαχείριση των πόρων αποθήκευσης είναι απαραίτητη.
5. *Επεξεργασία (processing)*: Οι πόροι επεξεργασίας αντιπροσωπεύουν την πεπερασμένη υπολογιστική ισχύ των διάφορων στοιχείων του δικτύου (π.χ. τερματικά, δρομολογητές). Πρακτικά, η επεξεργασία καθορίζει τις δυνατότητες του υλικού που εμπλέκεται στην παράδοση των υπηρεσιών των δικτύων. Η υψηλή ικανότητα επεξεργασίας στους τερματικούς και τους ενδιάμεσους κόμβους του δικτύου μπορεί να παρέχει σημαντική βελτίωση της απόδοσης ενός δικτύου (πχ. η ταχύτητα με την οποία επεξεργάζονται τα πακέτα δεδομένων, τα πρωτόκολλα κλπ.). Η κατανάλωση όλων των διαθέσιμων πόρων επεξεργασίας ενός κόμβου μπορεί να υποβιβάσει τη συνολική απόδοση του δικτύου και συνεπώς θα πρέπει να γίνεται αποδοτική διαχείριση τους.
6. *Χρόνος (time)*: Τέλος, ένας πολύτιμος πόρος που διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στα ασύρματα δίκτυα και είναι συνήθως άμεσα συνδεδεμένος με την προσφερόμενη ποιότητα υπηρεσιών είναι ο χρόνος. Η ποσότητα του χρόνου που δαπανάται για συγκεκριμένες λειτουργίες, καθώς και ο χρονικός προγραμματισμός των λειτουργιών αυτών επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση ενός ασύρματου δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, τα ασύρματα δίκτυα λειτουργούν κάτω από χρονομεταβαλλόμενες συνθήκες (π.χ. ασύρματο κανάλι, τοπολογία και φορτίο δικτύου), οι οποίες παρουσιάζονται συνήθως ως πηγή αναξιοπιστίας. Ωστόσο, οι μεταβολές αυτές στο χρόνο παρέχουν ευκαιρίες για χρονοπρογραμματισμό π.χ. της ασύρματης μετάδοσης, έτσι ώστε να βελτιωθεί η απόδοση της επικοινωνίας. Δεδομένου όμως ότι ο χρόνος περιορίζεται στα ασύρματα δίκτυα από τις εκάστοτε χρονικές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσιών (π.χ. καθυστέρηση, διακύμανση καθυστέρησης), καθώς και από άλλους χρονικούς περιορισμούς (π.χ. κινητικότητα, δραστηριότητα μετάδοσης άλλων χρηστών), είναι απαραίτητη η ανάπτυξη αποδοτικών μηχανισμών διαχείρισης χρόνου. Το αντίθετο μπορεί να εμποδίσει την αποδοτική διαχείριση των υπολοίπων πόρων.

2.2.2 Διατύπωση Προβλήματος Διαχείρισης Πόρων

Τα προβλήματα διαχείρισης πόρων διατυπώνονται συνήθως με μαθηματικές εκφράσεις. Πιο συγκεκριμένα, τα προβλήματα αυτά παίρνουν τη μορφή προβλημάτων βελτιστοποίησης με περιορισμούς (constrained optimization), όπου μια προκαθορισμένη αντικειμενική συνάρτηση (στόχος) βελτιστοποιείται κάτω από περιορισμούς που υπαγορεύουν την εφικτότητα της λύσης. Η διαχείριση των πόρων θα πρέπει να αντανakλά την πολιτική του παρόχου υπηρεσιών, ενώ η διατύπωση και η επίλυση της μπορούν να παίρνουν διάφορες μορφές, ανάλογα με το αρχικό πρόβλημα.

Στόχος στα προβλήματα διαχείρισης πόρων είναι συνήθως η μεγιστοποίηση μιας μετρικής απόδοσης (π.χ. συνολική ή ατομική ρυθμοαπόδοση) ή αντίστοιχα η ελαχιστοποίηση μιας μετρικής κόστους (π.χ. κατανάλωση ενέργειας μετάδοσης), που σχετίζονται με την ποσότητα των κατανα-

λισκομένων πόρων για να διασφαλιστεί η ποιότητα υπηρεσίας. Συνεπώς, αρχικά θα πρέπει να καθοριστεί η κατάλληλη μετρική του συστήματος που χρειάζεται βελτιστοποίηση, συναρτήσει των πόρων που εκχωρούνται. Δεδομένου ότι η μετρική αυτή θα πρέπει να αποτελεί μια σημαντική παράμετρο για το δίκτυο αλλά και να σχετίζεται άμεσα με τις απαιτήσεις για ποιότητα υπηρεσίας του κάθε ξεχωριστού χρήστη, ως μετρική απόδοσης, χρησιμοποιείται η συνάρτηση χρησιμότητας (utility function), η οποία ποσοτικοποιεί την ικανοποίηση του εκάστοτε χρήστη με βάση τους διαθέσιμους πόρους που του έχουν εκχωρηθεί. Η συνάρτηση χρησιμότητα ορίζεται με διαφορετικό τρόπο ανάλογα με τον εκάστοτε στόχο, τα χαρακτηριστικά της κάθε εφαρμογής (π.χ. μεταφορά δεδομένων, βίντεο πραγματικού χρόνου), το στρώμα OSI (Open Systems Interconnection) το οποίο ενδιαφέρει (π.χ. φυσικό στρώμα, στρώμα δικτύου) ή ακόμα και ανάλογα με το είδος του δικτύου (π.χ. κυβελωτό, συνεργατικό, γνωστικό). Μερικά παραδείγματα στόχων είναι η μείωση της κατανάλωσης ισχύος μετάδοσης, η μεγιστοποίηση της ρυθμοαπόδοσης των χρηστών, η ελαχιστοποίηση του ρυθμού σφαλμάτων (Bit Error Rate - BER), η ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης κλπ. Επίσης, αναφέρεται ότι ανάλογα με τον εκάστοτε στόχο, μπορεί να χρησιμοποιείται στη διατύπωση του προβλήματος είτε η ατομική συνάρτηση χρησιμότητας, εάν το ενδιαφέρον επικεντρώνεται σε ένα χρήστη είτε ένας συνδυασμός των χρησιμότητων όλων των χρηστών, όταν το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στη συνολική απόδοση του δικτύου.

Συνεπώς, ο γενικός και κύριος στόχος πίσω από τη διαχείριση πόρων είναι η βελτίωση της απόδοσης του δικτύου. Εντούτοις, υπάρχουν και πιο συγκεκριμένοι στόχοι, ανάλογα με την οπτική γωνία από την οποία παρατηρούνται από τους δύο βασικούς πρωταγωνιστές ενός δικτύου: τον χρήστη/πελάτη που χρησιμοποιεί τις υπηρεσίες και τον πάροχο στον οποίο ανήκει το δίκτυο και προσφέρει τις υπηρεσίες. Ο χρήστης αναμένει από ένα υψηλής απόδοσης δίκτυο την εξασφάλιση καλής ποιότητας υπηρεσιών, μικρής καθυστέρησης και υψηλής διαθεσιμότητας, ενώ από τη μεριά του παρόχου αναμένεται υψηλή χωρητικότητα και υψηλή εξισορροπημένη χρησιμοποίηση του δικτύου. Ως εκ τούτου, το βασικό ζητούμενο είναι να γίνεται σωστή διαχείριση έτσι ώστε να ικανοποιούνται και ο πάροχος του δικτύου και οι χρήστες των υπηρεσιών.

Τέλος, όσον αφορά τους περιορισμούς του προβλήματος διαχείρισης πόρων προέρχονται είτε από την πεπερασμένη φύση των διαθέσιμων πόρων (π.χ. εύρος ζώνης, ισχύς) είτε από τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας των χρηστών (π.χ. καθυστέρηση, παρεμβολή) είτε τέλος από άλλους περιορισμούς που καθορίζονται από τον διαχειριστή του δικτύου (π.χ. περιορισμοί δικαιοσύνης). Επιπρόσθετα, ανάλογα με το εκάστοτε πρόβλημα διαχείρισης, οι περιορισμοί μπορεί να είναι είτε στιγμιαίοι ή περιορισμοί μέση τιμής, καθώς επίσης είτε ατομικοί ή συλλογικοί.

2.2.3 Τεχνικές Διαχείρισης Ασύρματων Πόρων

Η διαχείριση των πόρων των ασύρματων δικτύων μπορεί να υλοποιηθεί είτε με κεντροποιημένο είτε με κατανεμημένο τρόπο. Στην κεντροποιημένη διαχείριση, ένας κεντρικός διαχειριστής συλλέγει τη συνολική πληροφορία (π.χ. φορτίο δικτύου, κατάσταση καναλιών) από κάθε ζεύγος πομπού-δέκτη και κατανέμει ανάλογα τους διαθέσιμους πόρους. Το κύριο πλεονέκτημα της κεντροποιημένης διαχείρισης πόρων είναι ότι προσφέρει ευσταθή και συνεπή διαχείριση αφού υπάρχει ένας μοναδικός διαχειριστής, απλοποιώντας τη διατύπωση του προβλήματος και οδηγώντας συνήθως σε καθολικά βέλτιστη λύση για το πρόβλημα διαχείρισης. Ωστόσο, η κατανεμημένη προ-

σέγγιση εμφανίζει αρκετά μειονεκτήματα, όπως για παράδειγμα είναι η πεπερασμένη δυνατότητα κλιμάκωσης, αφού η αύξηση του αριθμού των χρηστών οδηγεί σε αύξηση της πολυπλοκότητας του προβλήματος και συνεπώς του χρόνου επίλυσης του. Επιπρόσθετα, η προσέγγιση αυτή απαιτεί αυξημένη σηματοδοσία, αφού ολόκληρη η πληροφορία πρέπει να περνάει από τον κεντρικό διαχειριστή, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τις αποφάσεις.

Τα παραπάνω προβλήματα μπορούν να επιλυθούν με την κατανεμημένη διαχείριση πόρων. Σύμφωνα με αυτή, κάθε ζεύγος πομπού-δέκτη καθορίζει τους πόρους που θα χρησιμοποιήσει βασισμένο στην τοπική πληροφορία και χωρίς την ύπαρξη ενός κεντρικοποιημένου διαχειριστή και των προβλημάτων που επακολουθούν από αυτόν. Όμως, δεδομένου ότι υπάρχουν πλέον πολλαπλοί διαχειριστές, και οι αποφάσεις του ενός επηρεάζουν τις αποφάσεις των υπολοίπων, οι λύσεις σύγκλισης ή ισορροπίας που προκύπτουν είναι τοπικές και δεν είναι πάντα εφικτή η εύρεση της καθολικά βέλτιστης λύσης, η οποία θα είναι και ευσταθής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η συνολική απόδοση που επιτυγχάνεται με την κατανεμημένη διαχείριση πόρων να είναι χαμηλότερη σε σύγκριση με την αντίστοιχη απόδοση μιας κεντρικοποιημένης προσέγγισης.

Τέλος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η υβριδική προσέγγιση, η οποία εμφανίζει τα πλεονεκτήματα και των δυο παραπάνω. Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση, υπάρχει ένας κεντρικός διαχειριστής, ο οποίος όμως δεν καθορίζει την ακριβή κατανομή των πόρων σε κάθε χρήστη για κάθε χρονική στιγμή, αλλά παρέχει κάποιες πληροφορίες αναφοράς (π.χ. φορτίο δικτύου, κόστος χρήσης πόρων) που βοηθούν στην εύρεση ενός ευσταθούς και αποδοτικού σημείου λειτουργίας. Στη συνέχεια, κάθε ζεύγος πομπού-δέκτη καθορίζει τη χρήση των πόρων βασισμένο στην πληροφορία αναφοράς και την τοπική πληροφορία που συλλέγει. Συνεπώς, στην υβριδική προσέγγιση, το συνολικό πρόβλημα διαχείρισης διαχωρίζεται σε δύο υποπροβλήματα: το πρόβλημα καθορισμού της πληροφορίας αναφοράς στον κεντρικό διαχειριστή και το τοπικό πρόβλημα καθορισμού της κατανομής των πόρων σε κάθε ζεύγος πομπού-δέκτη.

Συμπερασματικά, κατά τη σχεδίαση ενός σχήματος διαχείρισης πόρων θα πρέπει να μελετάται προσεκτικά η πληροφόρηση που είναι διαθέσιμη και η οποία απαιτείται, και να λαμβάνεται υπόψη στη συνολική σηματοδοσία. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι βασικότερες τεχνικές διαχείρισης πόρων που χρησιμοποιούνται στα ασύρματα δίκτυα (Hossain et al., 2009; B. G. Lee et al., 2009; Kyriazakos & Karetzos, 2004; Priggouris et al., 2006).

Διαχείριση εύρους ζώνης (bandwidth management)

Επειδή οι φασματικοί πόροι είναι πεπερασμένοι και υπάρχει αυξανόμενη ζήτηση, η διαχείριση του εύρους ζώνης είναι απαραίτητη για τη βελτίωση της απόδοσης ενός δικτύου. Αναλυτικότερα, η διαχείριση εύρους ζώνης αναφέρεται στον τρόπο διαμοιρασμού (sharing) του διαθέσιμου εύρους ζώνης στους χρήστες του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, με το διαμοιρασμό πραγματοποιείται η εκχώρηση (allocation) των διαφορετικών ζωνών του διαθέσιμου φάσματος (π.χ. φερόντων, υπο-φερόντων) στον εκάστοτε χρήστη. Επιπρόσθετα, όταν πολλαπλοί χρήστες επιθυμούν να προσπελάσουν το κοινό μέσο, απαιτείται έλεγχος της πρόσβασης στο μέσο (medium access control) ή αλλιώς προγραμματισμός χρηστών (user scheduling) σε κάθε χρονική στιγμή, έτσι ώστε να μην υπάρχουν συγκρούσεις και παρεμβολές. Επιπλέον, μέρος της διαχείρισης εύρους ζώνης αποτελεί και ο έλεγχος αποδοχής (admission control), ο οποίος καθορίζει το κατά πόσο το περιορισμένο

εύρος ζώνης επαρκεί, έτσι ώστε μια νέα σύνδεση να γίνει αποδεκτή από το δίκτυο. Ο σκοπός του ελέγχου αποδοχής είναι να περιοριστεί ο αριθμός των χρηστών στο σύστημα ή πιο σωστά να βρεθεί ο βέλτιστος αριθμός χρηστών που να μεγιστοποιεί την απόδοση του συστήματος. Τέλος, ως κατηγορία της διαχείρισης εύρους ζώνης θα μπορούσε να θεωρηθεί και ο έλεγχος των μεταπομπών (handovers). Μεταπομπή είναι η διαδικασία μεταφοράς της σύνδεσης ενός κινητού τερματικού από ένα σταθμό βάσης ή μια κυψέλη ή γενικότερα ένα κανάλι σε ένα άλλο, έτσι ώστε να αποφευχθεί η διακοπή της σύνδεσης, εφόσον υπάρχει διαθέσιμο εύρος ζώνης. Συνεπώς, η αποδοτική διαχείριση των μεταπομπών είναι απαραίτητη, αφού ένας χρήστης είναι πιο ευαίσθητος στη διακοπή της σύνδεσης (connection drop) σε σχέση με τον αποκλεισμό των νέων συνδέσεων (connection block), δεδομένου όμως ταυτόχρονα και ενός μέγιστου επιπέδου πιθανότητας αποκλεισμού. Συμπερασματικά, ο βασικός στόχος της διαχείρισης εύρους ζώνης είναι η εξασφάλιση της απαραίτητης ποιότητας υπηρεσίας για τους υπάρχοντες και για τους νέους χρήστες, καθώς και η δημιουργία μίας ιεραρχίας ανάμεσα στους χρήστες διαφορετικών υπηρεσιών.

Διαχείριση ισχύος (power management)

Η διαχείριση της ισχύος είναι άλλη μια σημαντική τεχνική διαχείρισης πόρων, καθώς η ισχύς μετάδοσης καθορίζει την ποιότητα της ασύρματης ζεύξης. Η αύξηση της ισχύος μετάδοσης προκαλεί αύξηση της ισχύος λήψης στον δέκτη και συνεπώς βελτίωση της ποιότητας σύνδεσης. Ωστόσο, η αύξηση της ισχύος μετάδοσης ενός χρήστη έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των παρεμβολών προς τους υπόλοιπους χρήστες καθώς επίσης και τη μείωση της αυτονομίας της μπαταρίας του τερματικού. Συνεπώς, η διαχείριση ισχύος αποτελεί μια πολύ σημαντική λειτουργία και ειδικότερα για την άνω ζεύξη μιας σύνδεσης, καθώς οδηγεί τόσο στη μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης, όσο και στον περιορισμό της παρεμβολής προς τους άλλους χρήστες. Αναλυτικότερα, η διαχείριση ισχύος έχει τρεις πτυχές. Η πρώτη είναι ο έλεγχος ισχύος (power control), σύμφωνα με τον οποίο τα επίπεδα ισχύος μετάδοσης των διαφόρων αμοιβαίως παρεμβαλλόμενων ζευγών πομπού-δέκτη ελέγχονται, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η αρμονική τους συνύπαρξη μέσα στο δίκτυο. Η δεύτερη πτυχή διαχείρισης ισχύος είναι η εκχώρηση ισχύος (power allocation), η οποία αναφέρεται στον τρόπο κατανομής μιας συγκεκριμένης ποσότητας ισχύος μετάδοσης μεταξύ των πολλαπλών ορθογωνικών υπο-φερόντων με στόχο τη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας της ασύρματης σύνδεσης. Τέλος, η τρίτη πτυχή είναι η προσαρμογή ισχύος (power adaptation), σύμφωνα με την οποία καθορίζεται και προσαρμόζεται η ισχύς μετάδοσης ανάλογα με το χρονομεταβαλλόμενο περιβάλλον, δηλαδή με τις μεταβολές στην άφιξη της κίνησης, τις μεταβολές στην τοπολογία του δικτύου και τις μεταβολές του ασύρματου καναλιού². Παράλληλα, η διαχείριση ισχύος μπορεί αρχικά να χωριστεί σε δύο κατηγορίες: την αργή διαχείριση, η οποία αντισταθμίζει τις αργές μεταβολές του καναλιού (απώλειες διάδοσης, σκίασης) και τη γρήγορη διαχείριση, η οποία αντισταθμίζει τις γρήγορες μεταβολές του καναλιού (πολυδιαδρομικές διαλείψεις). Επιπρόσθετα, μπορεί να χωριστεί σε διαχείριση ανοικτού βρόχου, όπου η ισχύς καθορίζεται στον πομπό χρησιμοποιώντας τοπικές παραμέτρους, εκτιμήσεις και μετρήσεις χωρίς ανάδραση από τον δέκτη, και σε διαχείριση κλειστού βρόχου, όπου χρησιμοποιείται ανάδραση από τον δέκτη για να αποφασιστεί και να διορθωθεί η ισχύς μετάδοσης.

²Σημειώνεται ότι η παρούσα Διδακτορική Διατριβή προτείνει εκτός των άλλων και ένα μηχανισμό διαχείρισης ισχύος, ο οποίος κάνει έλεγχο και προσαρμογή ισχύος, ωστόσο για λόγους συντομίας υιοθετείται ο όρος έλεγχος ισχύος για τον προτεινόμενο μηχανισμό.

Διαχείριση κεραιών (antenna management)

Τα τελευταία χρόνια, οι κεραιές αποτελούν έναν ελκυστικό πόρο, αφού μπορούν να αυξήσουν τη χωρητικότητα και την απόδοση μιας ζεύξης χωρίς την ανάγκη επιπλέον εύρους ζώνης ή ισχύος. Ωστόσο, η αύξηση του αριθμού των κεραιών στον πομπό ή/και στον δέκτη οδηγεί σε αύξηση του κόστους των κυκλωμάτων λειτουργίας και συνεπώς του συνολικού κόστους μιας συσκευής. Το αυξημένο κόστος σε συνδυασμό με το χρονομετάβαλλόμενο ασύρματο κανάλι δημιουργεί την ανάγκη μηχανισμών διαχείρισης των κεραιών μιας συσκευής, το οποίο σημαίνει την ανάγκη για αποδοτική λειτουργία τους ανάλογα με τις μεταβολές του καναλιού, καθώς και τον προσδιορισμό του βέλτιστου αριθμού τους. Αναφέρεται ότι υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες πολλαπλών κεραιών MIMO, συμπεριλαμβανομένης της τεχνικής διαφορισμού μετάδοσης (diversity transmission) και της τεχνικής χωρικής πολυπλεξίας μετάδοσης (spatial multiplexing transmission). Σύμφωνα με την τεχνική διαφορισμού μετάδοσης, μεταδίδεται το ίδιο σήμα μέσω διαφορετικών κεραιών, προκειμένου να εκμεταλλευθεί το φαινόμενο χωρικού διαφορισμού στα κανάλια διαλείψεων. Από την άλλη μεριά, με τη χωρική πολυπλεξία μετάδοσης, μεταδίδονται πολλαπλές ροές (streams) ανεξαρτήτων δεδομένων από πολλαπλές κεραιές, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί ο ρυθμός μετάδοσης. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα να λειτουργούν και οι δυο τεχνικές ταυτόχρονα, αλλά υπάρχει ένα ισοζύγιο (tradeoff) μεταξύ του κέρδους πολυπλεξίας και του κέρδους διαφορισμού. Συνεπώς, θα πρέπει να επιλέγεται το πλέον κατάλληλο σχήμα ανάλογα με το εκάστοτε περιβάλλον. Τέλος, εκτός από τις επικοινωνίες MIMO σημείου προς σημείο, υπάρχουν και οι τεχνολογίες μετάδοσης MIMO πολλαπλών χρηστών, όπου για την πολλαπλή μετάδοση χρησιμοποιούνται διαφορετικοί χρήστες, οι οποίοι παίζουν το ρόλο των πολλαπλών κεραιών. Παραδείγματα είναι η πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χώρου (space division multiple access - SDMA) και η συνεργατική μορφοποίηση δέσμης (collaborative beamforming).

Διαχείριση κίνησης (traffic management)

Η διαχείριση της κίνησης ενός ασύρματου δικτύου αναφέρεται στις διαδικασίες χειρισμού των πακέτων για την πραγματοποίηση της επικοινωνίας μεταξύ των ζευγών πομπού-δέκτη. Αναλυτικότερα, η διαχείριση κίνησης μπορεί να αναλυθεί περαιτέρω στη διαχείριση των ουρών αναμονής (queue management), στον προγραμματισμό των πακέτων (packet scheduling) και στη διαχείριση δρομολόγησή τους (routing management). Πιο συγκεκριμένα, τα πακέτα που φθάνουν σε ένα ασύρματο τερματικό, αποθηκεύονται προσωρινά σε μια ουρά αναμονής μέχρι να εξυπηρετηθούν και να μεταδοθούν στο ασύρματο μέσο. Η διαχείριση των ουρών ή αλλιώς διαχείριση συμφόρησης (congestion management) αναφέρεται στις λειτουργίες χειρισμού των εισερχομένων πακέτων σε ένα κόμβο, έτσι ώστε να αποφεύγεται η συμφόρηση στο δίκτυο. Ωστόσο, αν υπάρξει συμφόρηση, το δίκτυο πρέπει να επανέλθει με γρήγορο και σταθερό ρυθμό σε μία πιο ευσταθή κατάσταση λειτουργίας. Αυτό μπορεί να γίνει είτε απορρίπτοντας τα νέα πακέτα το οποίο όμως κατ'επέκταση θα μειώσει το ρυθμό αποστολής είτε μέσω πρόληψης της συμφόρησης. Όσον αφορά τον προγραμματισμό των πακέτων, αυτός αναφέρεται στη διαδικασία επιλογής των πακέτων που θα εξυπηρετηθούν από μια ουρά αναμονής για να μεταδοθούν ασύρματα με βάση μια πολιτική προγραμματισμού (π.χ. μέγιστου σηματοπαρεμβολικού λόγου, κυκλικής εξυπηρέτησης, δίκαιης απόδοσης). Η πολιτική αυτή λαμβάνει υπόψη τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας αλλά και την κατάσταση του καναλιού και

του δικτύου. Τέλος, όσον αφορά τη δρομολόγηση της κίνησης, η οποία αφορά κυρίως τα δίκτυα πολλαπλών αλμάτων, αναφέρεται στην επιλογή του κατάλληλου κόμβου μέσω του οποίου θα δρομολογηθεί η κίνηση για να φτάσει στον τελικό προορισμό. Η παραπάνω διαδικασία, απαιτεί συνεχή παρακολούθηση της τοπολογίας και του φορτίου του δικτύου, ενώ απαιτεί να λαμβάνεται υπόψη η πεπερασμένη επεξεργαστική ισχύς των διαφόρων οντοτήτων μέσα στο δίκτυο.

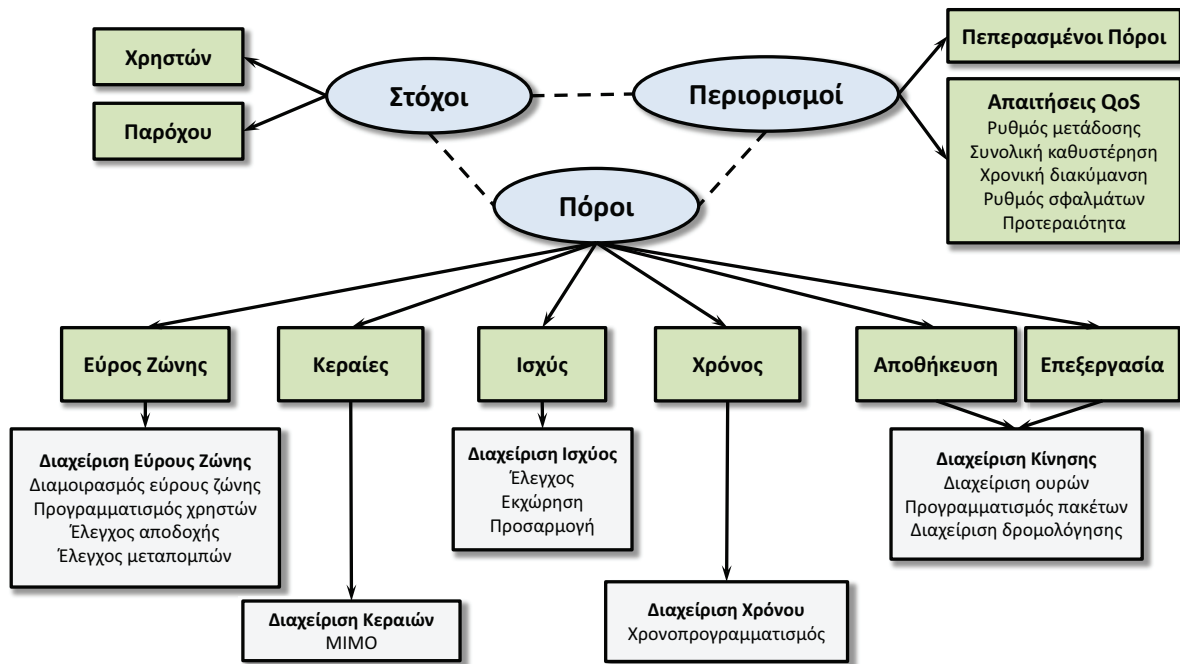
Διαχείριση χρόνου (time management) ή χρονοπρογραμματισμός (time scheduling)

Η διαχείριση του χρόνου αναφέρεται στις διεργασίες σχεδίασης, προγραμματισμού και συνεχούς ελέγχου του χρόνου που δαπανάται σε συγκεκριμένες λειτουργίες με στόχο την αύξηση της απόδοσης του συστήματος. Η διαχείριση χρόνου αποτελεί μια πολύ σημαντική και απαραίτητη διαδικασία για την αποδοτική λειτουργία ενός συστήματος, καθώς μπορεί να επηρεάσει την αποτελεσματική διαχείριση των υπολοίπων πόρων. Επιπρόσθετα, η διαχείριση χρόνου είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη διασφάλιση της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών, δεδομένου ότι η ποιότητα υπηρεσίας είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τον πεπερασμένο χρόνο, ο οποίος δεν μπορεί να αποθηκευτεί. Στα ασύρματα δίκτυα πιο συχνά συναντάται ο όρος χρονοπρογραμματισμός των λειτουργιών, που αντιπροσωπεύει τη διαχείριση χρόνου. Λόγω του ότι τα δίκτυα αυτά λειτουργούν κάτω από χρονομεταβαλλόμενες συνθήκες (π.χ. ασύρματο κανάλι, τοπολογία και φορτίο δικτύου), οι μεταβολές αυτές στο χρόνο μπορούν να αντιμετωπιστούν ως ευκαιρίες για χρονοπρογραμματισμό των διάφορων λειτουργιών, βελτιώνοντας την απόδοση της επικοινωνίας, και όχι ως πηγές αναξιοπιστίας. Για παράδειγμα, στον χρονοπρογραμματισμό μετάδοσης με επίγνωση της κατάστασης του καναλιού (channel-aware transmission scheduling), καθορίζεται πότε είναι βέλτιστο να εκπέμψει δεδομένα ένα τερματικό ανάλογα με την κατάσταση του ασύρματου καναλιού, έτσι ώστε να επιτευχθεί ένα συγκεκριμένος στόχος (π.χ. μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, αύξηση της ρυθμοαπόδοσης). Σημειώνεται ότι ο χρονοπρογραμματισμός αναφέρεται σε προβλήματα χρονικής βελτιστοποίησης ή αλλιώς εύρεσης της βέλτιστης χρονικής στιγμή για μια λειτουργία, η οποία αφορά συνήθως ένα χρήστη. Συνεπώς, ο χρονοπρογραμματισμός διαφοροποιείται από τον προγραμματισμό πολλαπλών χρηστών που αναφέρεται στην πρόσβαση των διαφόρων χρηστών στο κοινό μέσο και τον προγραμματισμό πακέτων που αναφέρεται στη διαχείριση των πακέτων στο δίκτυο και ειδικότερα στη διαχείριση των ουρών και των οντοτήτων επεξεργασίας.

Τέλος, αναφέρεται ότι οι παραπάνω τεχνικές μπορούν να συνεργαστούν μεταξύ τους για να επιτύχουν συνολικά αποδοτικότερη λειτουργία του δικτύου. Το Σχήμα 2.2, απεικονίζει συγκεντρωτικά όλες τις συνιστώσες που υπάρχουν στα προβλήματα διαχείρισης πόρων των ασύρματων δικτύων και αναλυτικότερα τους διαθέσιμους πόρους μαζί με τις τεχνικές διαχείρισής τους, καθώς και τους στόχους και τους περιορισμούς που εμφανίζονται. Η συγκεκριμένη Διδακτορική Διατριβή μελετάει και προτείνει νέες μεθόδους χρονοπρογραμματισμού, ελέγχου ισχύος και διαμοιρασμού εύρους ζώνης, οι οποίοι θα παρουσιαστούν αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια.

2.3 Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS)

Η διασφάλιση της ποιότητας των υπηρεσιών αποτελεί ένα πολύ σημαντικό θέμα στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα λόγω του χρονομεταβαλλόμενου περιβάλλοντος και δεδομένης της ραγδαίας



Σχήμα 2.2: Συνιστώσες προβλήματος διαχείρισης πόρων ασύρματων δικτύων.

αύξησης των εφαρμογών και υπηρεσιών, οι οποίες χαρακτηρίζονται από διαφορετικές απαιτήσεις. Η ποιότητα υπηρεσιών είναι ένα ευρύ θέμα και μπορεί να θεωρηθεί ως ένα μέτρο απόδοσης των προσφερόμενων υπηρεσιών στα δίκτυα επικοινωνιών. Γενικότερα, έχουν προταθεί διάφοροι ορισμοί για τον όρο ποιότητα υπηρεσίας (Cardei et al., 2005), οι οποίοι μπορούν να συνοψιστούν στον παρακάτω ορισμό.

Ορισμός 2.2. Η *ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service - QoS)* ορίζεται ως το σύνολο των ποσοτικών και ποιοτικών μετρικών επίδοσης μιας προσφερόμενης υπηρεσίας από ένα σύστημα, οι οποίες καθορίζουν τον βαθμό ικανοποίησης ενός χρήστη, ενώ παράλληλα ο ορός αυτός αναφέρεται και στην ικανότητα του συστήματος να διασφαλίζει συγκεκριμένες απαιτήσεις επίδοσης για την παρεχόμενη υπηρεσία.

Συνεπώς, ο όρος QoS μπορεί να αναφέρεται σε αυτή καθεαυτή την ποιότητα υπηρεσίας, όπως την αντιλαμβάνεται ένας χρήστης ή στην ικανότητα διασφάλισης ενός συγκεκριμένου επιπέδου ποιότητας από το σύστημα. Αξίζει να αναφερθεί ότι η υποστήριξη της ποιότητας των υπηρεσιών αποτελεί μεγαλύτερη πρόκληση για τα ασύρματα δίκτυα σε σχέση με τα ενσύρματα. Εκτός από τη συμφόρηση του δικτύου και τη δρομολόγηση πολλαπλών αλμάτων που εμφανίζονται και στα δυο είδη δικτύων και οι οποίες επηρεάζουν τις παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας, στα ασύρματα δίκτυα παρουσιάζονται πρόσθετες προκλήσεις, οι οποίες κάνουν την υποστήριξη ποιότητας μια προσαρμοστική διαδικασία. Η κυριότερη από αυτές είναι το χρονομεταβαλλόμενο ασύρματο περιβάλλον (π.χ. ασύρματο κανάλι, παρεμβολές, θόρυβος), το οποίο κάνει την ποιότητα ασταθή και απρόβλεπτη. Επιπρόσθετα, η έλλειψη σταθερής υποδομής αλλά και η κινητικότητα των χρηστών, σε πολλά ασύρματα συστήματα (π.χ. αδόμητα δίκτυα), δυσκολεύει περαιτέρω την υποστήριξη QoS στα δίκτυα αυτά. Τέλος, συχνά τα ασύρματα δίκτυα αφορούν επικοινωνίες μακρινών αποστάσεων (π.χ. δορυφορικά συστήματα), όπου εμφανίζεται μεγάλη καθυστέρηση διάδοσης, επηρεάζοντας άμεσα την

παρεχόμενη ποιότητα.

Ένα ασύρματο σύστημα υποστηρίζει συνήθως ένα ευρύ σύνολο εφαρμογών. Γι' αυτό το λόγο, η υποστήριξη QoS συνεπάγεται την ανάγκη προσαρμοστικότητας στις διάφορες εφαρμογές. Συνεπώς, διαφορετικές πολιτικές πρέπει να εφαρμόζονται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Ωστόσο, ένας χρήστης ενδιαφέρεται να λαμβάνει μια υπηρεσία επικοινωνιών με μια συγκεκριμένη ποιότητα, που θα είναι αρκετά σταθερή και δεν θα υποβιβάζεται με το χρόνο, χωρίς να τον ενδιαφέρει η τεχνική υλοποίηση του δικτύου. Συνεπώς, πρέπει να γίνει πιο συγκεκριμένη η γενική έννοια της ποιότητας για τα ασύρματα δίκτυα και το πώς αυτή γίνεται αντιληπτή από τον χρήστη του δικτύου, έτσι ώστε να είναι δυνατή στη συνέχεια η ενσωμάτωση της στα προβλήματα διαχείρισης πόρων. Η ποιότητα μιας υπηρεσίας μπορεί να χαρακτηριστεί μέσω ενός συνόλου παραμέτρων ή μετρικών επίδοσης, οι οποίες διαμορφώνουν ένα προφίλ ποιότητας υπηρεσιών (Zander et al., 2001). Οι βασικές παράμετροι QoS σε ένα ασύρματο σύστημα είναι οι παρακάτω:

- *Ρυθμός δεδομένων (data rate)*. Ο ρυθμός δεδομένων καθορίζει τον αριθμό των bits που μπορεί να απολαμβάνει ένας χρήστης στη μονάδα του χρόνου. Όλες οι υπηρεσίες έχουν έναν απαιτούμενο ρυθμό για να μπορούν να λειτουργήσουν αποδοτικά, ενώ επιπρόσθετα οι ραγδαίως αναπτυσσόμενες υπηρεσίες έχουν υψηλές απαιτήσεις σε ρυθμούς μετάδοσης. Συνεπώς, ένας ελάχιστος ρυθμός δεδομένων θα πρέπει να παρέχεται εγγυημένα στον χρήστη για την εκάστοτε υπηρεσία, ενώ θα πρέπει να καθορίζεται και ο υψηλότερος δυνατός ρυθμός που μπορεί να επιτευχθεί από τις δυνατότητες του συστήματος.
- *Συνολική καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (end-to-end delay)*. Η συνολική καθυστέρηση των πακέτων μεταξύ δυο σημείων του δικτύου αναφέρεται στο συνολικό χρονικό διάστημα που απαιτείται για να μεταφερθούν τα πακέτα από ένα σημείο σε ένα άλλο. Το χρονικό διάστημα αυτό προκύπτει ως άθροισμα των επιμέρους καθυστερήσεων στις διάφορες οντότητες του δικτύου (δηλαδή την καθυστέρηση μετάδοσης, την καθυστέρηση διάδοσης, την καθυστέρηση αναμονής σε ουρές, την καθυστέρηση επεξεργασίας και την καθυστέρηση προγραμματισμού). Μια μέγιστη τιμή καθυστέρησης θα πρέπει να μην υπερβαίνεται για την εκάστοτε παρεχόμενη υπηρεσία, έτσι ώστε να έχει αποδεκτή απόδοση για τον χρήστη.
- *Χρονική διακύμανση (jitter)*. Ο όρος jitter μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με δυο τρόπους όταν αναφέρεται στη μετάδοση των πακέτων (Mansour & Patt-Shamir, 2001). Ο πρώτος είναι η διακύμανση καθυστέρησης (delay variation ή delay jitter) που ορίζεται ως η μέγιστη διαφορά μεταξύ των συνολικών καθυστερήσεων δυο πακέτων ή αλλιώς η διαφορά μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης καθυστέρησης από άκρο σε άκρο. Ο δεύτερος είναι η διακύμανση ρυθμού (rate jitter) που αναφέρεται στη διαφορά μεταξύ του ελάχιστου και του μέγιστου χρόνου μεταξύ διαδοχικών αφίξεων πακέτων (inter-arrival times) που αντιστοιχεί στο αντίστροφο του ρυθμού αφίξεων. Δεδομένου, ότι το jitter διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην απόδοση κυρίως των υπηρεσιών πραγματικού χρόνου και των διαδραστικών υπηρεσιών, η εξασφάλιση μιας μέγιστης τιμής jitter είναι απαραίτητη.
- *Ρυθμός σφαλμάτων (bit error rate)*. Ο ρυθμός σφαλμάτων είναι το ποσοστό των εσφαλμένων bits που λαμβάνονται στον προορισμό ως προς το σύνολο των μεταδιδόμενων bits. Δεδομένου

ότι η εκάστοτε παρεχόμενη υπηρεσία απαιτεί ένα συγκεκριμένο ρυθμό σφαλμάτων για να λειτουργήσει αποδοτικά και να μην αλλοιώνεται η μεταδιδόμενη πληροφορία, θα πρέπει να υπάρχει μια μέγιστη επιτρεπτή τιμή ρυθμού σφαλμάτων για την προσφερόμενη υπηρεσία.

- *Προτεραιότητα (priority)*. Στα ασύρματα δίκτυα που παρέχουν μεγάλο αριθμό υπηρεσιών και εξυπηρετούν μεγάλο αριθμό χρηστών είναι πολύ σημαντικό να υπάρχει μια μετρική που να υποδεικνύει τη σχετική σημαντικότητα των διαφορετικών υπηρεσιών, με βάση την οποία θα εξυπηρετούνται μέσω προτεραιοτήτων. Για παράδειγμα οι εφαρμογές πραγματικού χρόνου έχουν υψηλότερη προτεραιότητα για εξυπηρέτηση από τις υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου.

Επιπρόσθετα με τις παραπάνω παραμέτρους, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η διαθεσιμότητα των υπηρεσιών, καθώς αυτή μπορεί να μεταβάλλεται με το χρόνο ή με το είδος της υπηρεσίας. Προφανώς, οι χρήστες των οποίων τα προφίλ ποιότητας υπηρεσιών έχουν υψηλή κατανάλωση πόρων (π.χ. υψηλό ρυθμό μετάδοσης) ή έχουν σχετικά χαμηλή προτεραιότητα, είναι πιθανό να αντιμετωπίζουν συχνά το φαινόμενο το δίκτυο να μην μπορεί να τους εξυπηρετήσει. Συνεπώς, εισάγονται άλλες δυο παράμετροι ποιότητας που μετράνε τη διαθεσιμότητα μιας υπηρεσίας:

- *Πιθανότητα αποκλεισμού*. Η πιθανότητα αποκλεισμού της υπηρεσίας αναφέρεται στην πιθανότητα να μην μπορεί να ξεκινήσει μια σύνδεση λόγω έλλειψης πόρων. Η πιθανότητα αυτή θα πρέπει να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα.
- *Πιθανότητα διακοπής*. Η πιθανότητα διακοπής της υπηρεσίας αναφέρεται στην πιθανότητα μια ενεργή υπηρεσία να πρέπει να τερματίσει ανεπιθύμητα τη σύνδεση της λόγω έλλειψης πόρων. Δεδομένου ότι ένας χρήστης είναι πιο ευαίσθητος στη διακοπή μιας τρέχουσας σύνδεσης σε σχέση με τον αποκλεισμό μιας νέας, η πιθανότητα αυτή θα πρέπει να διατηρείται σε αρκετά χαμηλά επίπεδα.

Οι τιμές των παραπάνω μετρικών διαφέρουν μεταξύ των διαφορετικών υπηρεσιών. Αυτό οφείλεται στη διαφορετική ανοχή στις αλλαγές των τιμών των μετρικών που χαρακτηρίζουν τις υπηρεσίες. Ο συνδυασμός των παραπάνω παραμέτρων για διαφορετικές τιμές και απαιτήσεις, διαμορφώνει ένα άπειρο σύνολο προφίλ QoS. Ωστόσο, οι υπάρχουσες τεχνολογίες μετάδοσης αλλά και το κόστος για τον πάροχο, περιορίζουν τον αριθμό των προσφερόμενων υπηρεσιών. Έτσι τα περισσότερα συστήματα προσφέρουν ένα συγκεκριμένο σύνολο υπηρεσιών φορέα (bearer services), όπου η κάθε μια από τις παραπάνω παραμέτρους μπορεί να λάβει μια συγκεκριμένη διακριτή τιμή. Μια βασική κατηγοριοποίηση των υπηρεσιών μπορεί να βασιστεί στα παρακάτω χαρακτηριστικά (Gomez & Sanchez, 2005):

- *Αξιοπιστία*, η οποία σχετίζεται με τη σημασία των απωλειών πακέτων. Κάποιες υπηρεσίες είναι σχετικά ανεκτικές σε σφάλματα χωρίς να υποβαθμίζεται η ποιότητα στον τελικό χρήστη (π.χ. υπηρεσίες φωνής). Εντούτοις, κάποιες άλλες ανέχονται μηδενικά σφάλματα (π.χ. υπηρεσίες δεδομένων, υπηρεσίες ηλεκτρονικού ταχυδρομείου).
- *Επείγων χαρακτήρας*, ο οποίος σχετίζεται με τη μέγιστη καθυστέρηση. Οι υπηρεσίες που σχετίζονται με αλληλεπιδράσεις χρηστών (π.χ. βιντεοδιάσκεψη) δεν μπορούν να λειτουργήσουν

αποδοτικά με μεγάλες καθυστερήσεις. Αντίθετα, οι υπηρεσίες δεδομένων, ηλεκτρονικού ταχυδρομείου κλπ. που δεν απαιτούν άμεσες αλληλεπιδράσεις έχουν μεγαλύτερες ανοχές σε καθυστερήσεις.

Γενικότερα, οι υπηρεσίες που χαρακτηρίζονται ως επείγουσες αλλά έχουν χαλαρές απαιτήσεις αξιοπιστίας, ονομάζονται υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (*real-time*), όπως για παράδειγμα είναι η τηλεδιάσκεψη, το *Voice over IP (VoIP)* και οι ροές βίντεο/ήχου (*streaming*). Συνήθως, οι υπηρεσίες αυτές έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις ρυθμού δεδομένων. Αντίθετα, οι υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου (*non real-time*), απαιτούν συνήθως υψηλή αξιοπιστία, ενώ δεν θεωρούνται ότι έχουν επείγοντα χαρακτήρα, όπως είναι η ανταλλαγή δεδομένων και η ανταλλαγή μηνυμάτων. Τέλος, υπάρχουν κάποιες υπηρεσίες που τοποθετούνται κάπου στο ενδιάμεσο (π.χ. πλοήγηση στο Διαδίκτυο), οι οποίες είναι ευαίσθητες στα σφάλματα και στην καθυστέρηση, όχι όμως τόσο αυστηρά όσο οι υπηρεσίες πραγματικού χρόνου.

Τέλος, ανάλογα με τη φύση των εγγυήσεων που παρέχονται, διακρίνονται τα δυο παρακάτω μοντέλα εγγυήσεων *QoS*:

- *Ντετερμινιστικές εγγυήσεις QoS*: όταν οι εγγυήσεις που παρέχονται είναι ντετερμινιστικές, παρέχεται ακριβώς μια συγκεκριμένη τιμή μετρικών ποιότητας π.χ. ρυθμού δεδομένων ή καθυστέρησης, καθ' όλη τη διάρκεια της σύνδεσης. Η επίτευξη αυτού του είδους εγγυήσεων είναι δύσκολη και πολύπλοκη, γι' αυτό στην πράξη συνήθως συναντάται υπό τη μορφή ντετερμινιστικών ορίων ανοχής. Ένα παράδειγμα είναι όταν υπάρχει η εγγύηση της μέγιστης ανεκτής καθυστέρησης για όλα τα πακέτα δεδομένων που μεταδίδονται.
- *Στατιστικές εγγυήσεις QoS*: όταν οι εγγυήσεις που παρέχονται είναι στατιστικής φύσης, εξασφαλίζεται η μέση τιμή ή μια συγκεκριμένη πιθανότητα για τις μετρικές ποιότητας. Αυτό το είδος εγγυήσεων είναι και το πιο συνηθισμένο λόγω της χρονομεταβαλλόμενης φύσης του ασύρματου περιβάλλοντος. Ένα παράδειγμα στατιστικών εγγυήσεων είναι όταν ένα ποσοστό των πακέτων επιτρέπεται να έχει καθυστέρηση μεγαλύτερη από μια συγκεκριμένη τιμή ή η πιθανότητα υπέρβασης ενός ορίου καθυστέρησης πρέπει να είναι μικρότερη από μια τιμή κατωφλίου.

Τέλος, σημειώνεται ότι ανάλογα με το είδος και τα χαρακτηριστικά της παρεχόμενης υπηρεσίας χρησιμοποιείται το κατάλληλο μοντέλο εγγυήσεων.

Κεφάλαιο 3

Μαθηματικά Εργαλεία

Βελτιστοποίησης για Διαχείριση Πόρων Ασυρμάτων Δικτύων

Τα προβλήματα διαχείρισης πόρων συνήθως διατυπώνονται με τη μορφή προβλημάτων βελτιστοποίησης με περιορισμούς (constrained optimization), όπου μια προκαθορισμένη αντικειμενική συνάρτηση (στόχος) πρέπει να βελτιστοποιηθεί υπό συγκεκριμένους περιορισμούς που υπαγορεύουν την εφικτότητα της λύσης. Ο στόχος στα προβλήματα διαχείρισης πόρων είναι είτε η μεγιστοποίηση μιας μετρικής απόδοσης είτε η ελαχιστοποίηση μιας μετρικής κόστους, που σχετίζονται με την ποσότητα των καταναλισκόμενων πόρων για να διασφαλιστεί η ποιότητα υπηρεσίας. Ωστόσο, ανάλογα με τη φύση του προβλήματος (δηλαδή της αντικειμενικής συνάρτησης, των πόρων και των περιορισμών) τα προβλήματα διαχείρισης πόρων μπορούν να επιλυθούν με διαφορετικά μαθηματικά εργαλεία. Γι' αυτό το λόγο, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά εργαλεία βελτιστοποίησης, τα οποία χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής, με στόχο την παρουσίαση ενός ολοκληρωμένου πλαισίου επίλυσης για τα προβλήματα βελτιστοποίησης που εμφανίζονται συνήθως κατά τη διαχείριση πόρων των ασύρματων δικτύων. Αναλυτικότερα, στη συνέχεια παρουσιάζονται, η θεωρία βελτιστοποίησης (optimization theory), η θεωρία ανισοτήτων μεταβολών (variational inequalities theory) μαζί με κάποιες βασικές έννοιες από τη θεωρία παιγνίων (game theory) και τέλος η θεωρία βέλτιστης παύσης (optimal stopping theory).

3.1 Θεωρία Βελτιστοποίησης

Αρχικά, παρουσιάζονται ορισμένες αρχές από τη θεμελιώδη θεωρία βελτιστοποίησης (optimization theory) (Bazaraa et al., 2006; Boyd & Vandenberghe, 2004; Floudas & Pardalos, 2009; Bertsekas, 1999). Αναλυτικότερα, παρουσιάζεται ο ορισμός ενός προβλήματος βελτιστοποίησης, κάποιιοι απαραίτητοι βασικοί ορισμοί και οι συνθήκες βελτιστότητας, ενώ τέλος παρουσιάζεται η εξίσωση Euler-Lagrange.

3.1.1 Ορισμός Προβλήματος Βελτιστοποίησης

Πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς

Προτού εξεταστεί το πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, το οποίο είναι το πιο σύνθηδες για προβλήματα διαχείρισης πόρων, παρουσιάζεται το αντίστοιχο πρόβλημα χωρίς περιορισμούς (unconstrained optimization problem). Πιο συγκεκριμένα, η γενική μορφή ενός τέτοιου προβλήματος έχει την παρακάτω μορφή:

$$\min_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n} f(\mathbf{x}) \quad (3.1)$$

όπου το διάνυσμα $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ αποτελεί τη μεταβλητή βελτιστοποίησης του προβλήματος και η συνάρτηση $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ αντιστοιχεί στην προς βελτιστοποίηση αντικειμενική συνάρτηση (ή συνάρτηση κόστους για τη συγκεκριμένη περίπτωση ελαχιστοποίησης). Ένα διάνυσμα \mathbf{x}^* καλείται (ολικό) βέλτιστο ή αλλιώς λύση του προβλήματος (3.1), εάν έχει τη μικρότερη αντικειμενική τιμή από όλα τα διανύσματα στο \mathbb{R}^n , δηλαδή εάν για κάθε $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^n$ ισχύει ότι $f(\mathbf{x}^*) \leq f(\mathbf{z})$. Επιπρόσθετα, ένα διάνυσμα $\hat{\mathbf{x}}$ καλείται τοπικό βέλτιστο, εάν υπάρχει $\varepsilon > 0$ τέτοιο ώστε $f(\hat{\mathbf{x}}) \leq f(\mathbf{z})$ με $\|\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{z}\|_2 \leq \varepsilon$. Αναφέρεται ότι ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης μπορεί να μετασχηματιστεί σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης της μορφής (3.1), εάν θεωρηθεί η αντίθετη αντικειμενική συνάρτηση $-f$.

Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς

Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς (constrained optimization problem) ορίζεται στη γενική του μορφή ως εξής:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x} \in \Omega} \quad & f(\mathbf{x}) \\ \text{s.t.} \quad & g_i(\mathbf{x}) \leq 0, \text{ για } i = 1, \dots, m \\ & h_j(\mathbf{x}) = 0, \text{ για } j = 1, \dots, p \end{aligned} \quad (3.2)$$

όπου το διάνυσμα $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ αποτελεί τη μεταβλητή βελτιστοποίησης του προβλήματος στο σύνολο $\Omega \subseteq \mathbb{R}^n$, η συνάρτηση $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ αντιστοιχεί στην προς βελτιστοποίηση αντικειμενική συνάρτηση (ή συνάρτηση κόστους για τη συγκεκριμένη περίπτωση ελαχιστοποίησης), ενώ οι συναρτήσεις $g_i, h_j: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ είναι οι συναρτήσεις περιορισμών ανισοτήτων και ισοτήτων, αντίστοιχα. Εάν απουσιάζουν οι περιορισμοί, δηλαδή $m = p = 0$, το πρόβλημα (3.2) απλοποιείται σε πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς για $\Omega = \mathbb{R}^n$. Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι εφικτό (feasible), εάν υπάρχει τουλάχιστον ένα σημείο που να ικανοποιεί τους περιορισμούς του προβλήματος, το οποίο ονομάζεται εφικτό σημείο. Το σύνολο των εφικτών σημείων ονομάζεται εφικτό σύνολο ή σύνολο περιορισμών. Ένα διάνυσμα \mathbf{x}^* καλείται (ολικό) βέλτιστο ή αλλιώς λύση του προβλήματος (3.2), εάν έχει τη μικρότερη αντικειμενική τιμή από όλα τα διανύσματα στο Ω που ικανοποιούν τους περιορισμούς (εφικτά σημεία), δηλαδή εάν για κάθε $\mathbf{z} \in \Omega$ με $g_i(\mathbf{z}) \leq 0$ και $h_j(\mathbf{z}) = 0$ για $i = 1, \dots, m$ και $j = 1, \dots, p$ ισχύει ότι $f(\mathbf{x}^*) \leq f(\mathbf{z})$. Επιπρόσθετα, ένα διάνυσμα $\hat{\mathbf{x}}$ καλείται τοπικό βέλτιστο, εάν υπάρχει $\varepsilon > 0$ τέτοιο ώστε $f(\hat{\mathbf{x}}) \leq f(\mathbf{z})$ για τα εφικτά \mathbf{z} με $\|\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{z}\|_2 \leq \varepsilon$. Εάν για ένα εφικτό σημείο \mathbf{x} , ισχύει $g_i(\mathbf{x}) = 0$, τότε ο συγκεκριμένος περιορισμός ανισότητας καλείται

ενεργός (active) στο x , διαφορετικά ο περιορισμός ανισότητας $g_i(x) \leq 0$ καλείται ανενεργός (inactive). Τέλος, αναφέρεται ότι ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης μπορεί να μετασχηματιστεί σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης της μορφής (3.2), εάν θεωρηθεί η αντίθετη αντικειμενική συνάρτηση $-f$.

3.1.2 Βασικοί Ορισμοί

Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης λέγεται γραμμικό πρόγραμμα (linear program), εάν η αντικειμενική συνάρτηση και οι συναρτήσεις των περιορισμών είναι γραμμικές συναρτήσεις του x . Εάν κάποια από τις παραπάνω συναρτήσεις είναι μη γραμμική, το πρόβλημα λέγεται μη γραμμικό πρόγραμμα (non-linear program). Επιπρόσθετα, εάν το σύνολο Ω περιέχει ακέραια σύνολα, το πρόβλημα λέγεται ακέραιο πρόγραμμα (integer program). Μία ειδική κατηγορία μη γραμμικών προγραμμάτων είναι τα προβλήματα κυρτής βελτιστοποίησης (convex optimization problems), στα οποία για ένα κυρτό σύνολο Ω , η αντικειμενική συνάρτηση και οι συναρτήσεις περιορισμών ανισοτήτων είναι κυρτές, ενώ οι συναρτήσεις περιορισμών ισοτήτων είναι αφινικές (affine) ή αλλιώς ομοπαράλληλικές¹. Για ένα πρόβλημα κυρτής βελτιστοποίησης συνεπάγεται ότι το εφικτό σύνολο είναι κυρτό. Τέλος, για την αντίθετη συνάρτηση $-f$, η οποία είναι κοίλη, προκύπτει το ισοδύναμο πρόβλημα κοίλης μεγιστοποίησης (concave maximization).

Στη συνέχεια, ακολουθούν οι ορισμοί των κυρτών συνόλων και συναρτήσεων.

Ορισμός 3.1. Ένα σύνολο $\Omega \subseteq \mathbb{R}^n$ είναι *κυρτό*, αν για κάθε $x, y \in \Omega$ και για κάθε $\theta \in [0, 1]$, ισχύει

$$\theta x + (1 - \theta)y \in \Omega \quad (3.3)$$

Δηλαδή, για ένα κυρτό σύνολο Ω , κάθε ευθύγραμμο τμήμα μεταξύ δυο σημείων του Ω βρίσκεται μέσα στο Ω .

Ορισμός 3.2. Δεδομένου ενός κυρτού συνόλου $\Omega \subseteq \mathbb{R}^n$, μια *συνάρτηση* $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ είναι

- *κυρτή (convex)* στο Ω , εάν

$$f(\alpha x + (1 - \alpha)y) \leq \alpha f(x) + (1 - \alpha)f(y), \quad \forall x, y \in \Omega \text{ και } \alpha \in (0, 1) \quad (3.4)$$

- *γνησίως κυρτή (strictly convex)* στο Ω , εάν

$$f(\alpha x + (1 - \alpha)y) < \alpha f(x) + (1 - \alpha)f(y), \quad \forall x, y \in \Omega \text{ με } x \neq y \text{ και } \alpha \in (0, 1) \quad (3.5)$$

- *ισχυρά κυρτή (strongly convex)* στο Ω , εάν υπάρχει σταθερά $c > 0$, τέτοια ώστε

$$f(\alpha x + (1 - \alpha)y) \leq \alpha f(x) + (1 - \alpha)f(y) - \frac{c}{2}\alpha(1 - \alpha)\|x - y\|^2, \quad \forall x, y \in \Omega \text{ και } \alpha \in (0, 1) \quad (3.6)$$

Δηλαδή, για μια κυρτή συνάρτηση, το ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει δυο σημεία της γραφικής παράστασης της συνάρτησης βρίσκεται πάνω από τη γραφική της παράσταση. Μια συνάρτηση

¹Μια συνάρτηση ονομάζεται αφινική, εάν είναι το άθροισμα μιας γραμμικής συνάρτησης και μιας σταθεράς.

ονομάζεται κοίλη (concave), αν η $-f$ είναι κυρτή. Από τον προηγούμενο ορισμό, είναι εμφανές ότι ισχύουν τα παρακάτω:

$$\boxed{\text{Ισχυρά Κυρτή} \Rightarrow \text{Γνησίως Κυρτή} \Rightarrow \text{Κυρτή}}$$

Επιπρόσθετα, η κυρτότητα μιας συνάρτησης μπορεί να επαληθευτεί με τη βοήθεια του παρακάτω θεωρήματος.

Θεώρημα 3.1 (Boyd & Vandenberghe, 2004). *Μια διαφορίσιμη συνάρτηση $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ είναι κυρτή στο κυρτό $\Omega \subseteq \mathbb{R}^n$, αν και μόνο αν ισχύει μια από τις παρακάτω συνθήκες για τα $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in \Omega$:*

$$\begin{aligned} \text{Συνθήκη πρώτου βαθμού: } f(\mathbf{y}) &\geq f(\mathbf{x}) + \nabla f(\mathbf{x})^T (\mathbf{y} - \mathbf{x}) \\ \text{Συνθήκη δευτέρου βαθμού (για διπλά διαφορίσιμη } f): \nabla^2 f(\mathbf{x}) &\succeq 0 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Σημειώνεται ότι το $\nabla^2 f(\mathbf{x})$ συμβολίζει τον Hessian πίνακα της f , ο οποίος δίνεται ως εξής:

$$\mathcal{H}_f(\mathbf{x}) = \nabla^2 f(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} \end{bmatrix}$$

και επίσης το $\nabla^2 f(\mathbf{x}) \succeq 0$ σημαίνει ότι ο πίνακας $\nabla^2 f(\mathbf{x})$ είναι θετικά ημιορισμένος (positive semidefinite).

Μια σημαντική ιδιότητα των κυρτών συναρτήσεων είναι 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 Ω , τότε ισχύει η παρακάτω ανισότητα:

$$f(\mathcal{E}[\mathbf{x}]) \leq \mathcal{E}[f(\mathbf{x})] \tag{3.8}$$

όπου η $\mathcal{E}[\cdot]$ είναι η συνάρτηση προσδοκώμενης τιμής.

Δεδομένου ότι σε κάποιες περιπτώσεις η κυρτότητα μιας συνάρτησης δεν είναι απαραίτητη, παρουσιάζονται οι παρακάτω ορισμοί συναρτήσεων.

Ορισμός 3.3. Μια συνάρτηση $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ ονομάζεται *οιονεί κυρτή (quasi-convex)* στο κυρτό $\Omega \subseteq \mathbb{R}^n$, αν για κάθε $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in \Omega$, ισχύει η παρακάτω ανισότητα:

$$f(\alpha \mathbf{x} + (1 - \alpha)\mathbf{y}) \leq \max\{f(\mathbf{x}), f(\mathbf{y})\}, \text{ για } \alpha \in (0, 1) \tag{3.9}$$

Δηλαδή, για μια οιονεί κυρτή συνάρτηση, η τιμή της συνάρτησης σε ένα τμήμα μεταξύ δυο σημείων δεν ξεπερνάει τη μέγιστη τιμή των δυο ακριανών σημείων. Μια συνάρτηση ονομάζεται οιονεί κοίλη (quasi-concave), αν η $-f$ είναι οιονεί κυρτή. Κάθε κυρτή συνάρτηση είναι οιονεί κυρτή.

Ορισμός 3.4. Μια διαφορίσιμη συνάρτηση $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ είναι *ψευδο-κυρτή (pseudo-convex)* στο ανοικτό $\Omega \subseteq \mathbb{R}^n$, αν για κάθε $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in \Omega$, με $\nabla f(\mathbf{x})^T (\mathbf{y} - \mathbf{x}) \geq 0$, ισχύει $f(\mathbf{y}) \geq f(\mathbf{x})$ ή ισοδύναμα αν $f(\mathbf{y}) < f(\mathbf{x})$, $\nabla f(\mathbf{x})^T (\mathbf{y} - \mathbf{x}) < 0$.

Μια συνάρτηση ονομάζεται ψευδο-κοίλη (pseudo-concave), αν η $-f$ είναι ψευδο-κυρτή. Κάθε διαφορίσιμη κυρτή συνάρτηση είναι ψευδο-κυρτή.

3.1.3 Συνθήκες Βελτιστότητας

Στη συγκεκριμένη υποενότητα παρουσιάζονται οι βασικές συνθήκες βελτιστότητας ενός σημείου για τα προβλήματα βελτιστοποίησης χωρίς/με περιορισμούς.

Πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς

Αρχικά περιγράφονται συνοπτικά κάποιες συνθήκες βελτιστότητας για το πρόβλημα χωρίς περιορισμούς (3.1).

- Αναγκαίες Συνθήκες

1. Πρώτου βαθμού: αν η $f(\mathbf{x})$ είναι διαφορίσιμη στο $\bar{\mathbf{x}}$ και αν το $\bar{\mathbf{x}}$ είναι τοπικό βέλτιστο, τότε $\nabla f(\bar{\mathbf{x}}) = 0$.
2. Δευτέρου βαθμού: αν η $f(\mathbf{x})$ είναι διπλά διαφορίσιμη στο $\bar{\mathbf{x}}$ και αν το $\bar{\mathbf{x}}$ είναι τοπικό βέλτιστο, τότε $\nabla f(\bar{\mathbf{x}}) = 0$ και $\nabla^2 f(\bar{\mathbf{x}}) \succeq 0$.

Αν ένα σημείο $\bar{\mathbf{x}}$ ικανοποιεί την $\nabla f(\bar{\mathbf{x}}) = 0$ δεν σημαίνει ότι απαραίτητα είναι βέλτιστο σημείο, αλλά αποτελεί στάσιμο (stationary) σημείο. Ένα στάσιμο σημείο μπορεί να είναι βέλτιστο σημείο ή σημείο (saddle) καμπής (σαγματικό). Γι' αυτό το λόγο, εκτός από τις αναγκαίες συνθήκες υπάρχουν και οι ικανές συνθήκες που εξασφαλίζουν τη βελτιστότητα ενός σημείου.

- Ικανές Συνθήκες

1. Πρώτου βαθμού: αν η $f(\mathbf{x})$ είναι ψευδο-κυρτή στο $\bar{\mathbf{x}}$, τότε το $\bar{\mathbf{x}}$ είναι ολικό βέλτιστο αν και μόνο αν $\nabla f(\bar{\mathbf{x}}) = 0$.
2. Δευτέρου βαθμού: αν η $f(\mathbf{x})$ είναι διπλά διαφορίσιμη στο $\bar{\mathbf{x}}$, αν $\nabla f(\bar{\mathbf{x}}) = 0$ και $\nabla^2 f(\bar{\mathbf{x}}) \succeq 0$, τότε το $\bar{\mathbf{x}}$ είναι τοπικό βέλτιστο.

Πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς

Στη συνέχεια περιγράφονται ορισμένες αναγκαίες και ικανές συνθήκες για τη βελτιστότητα του αρχικού προβλήματος βελτιστοποίησης με περιορισμούς. Αναλυτικότερα, για το (3.2), το οποίο δεν είναι απαραίτητα κυρτό, ορίζεται η συνάρτηση Lagrange $\mathcal{L}: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}$ ως εξής:

$$\mathcal{L}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = f(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^m \lambda_i g_i(\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^p \mu_j h_j(\mathbf{x}) \quad (3.10)$$

όπου τα διανύσματα $\boldsymbol{\lambda} = (\lambda_1, \dots, \lambda_m)$ και $\boldsymbol{\mu} = (\mu_1, \dots, \mu_p)$ ονομάζονται διανύσματα πολλαπλασιαστών Lagrange που σχετίζονται με τους περιορισμούς ανισοτήτων και ισοτήτων, αντίστοιχα. Παρακάτω, παρουσιάζονται τα θεωρήματα που προσφέρουν κάποιες αναγκαίες και ικανές συνθήκες βελτιστότητας πρώτου βαθμού. Όσον αφορά τις συνθήκες βελτιστότητας δευτέρου βαθμού ο αναγνώστης παραπέμπεται στα (Bertsekas, 1999; Bazaraa et al., 2006).

Θεώρημα 3.2 (Αναγκαίες συνθήκες Karush-Kuhn-Tucker (Bazaraa et al., 2006)). Έστω το πρόβλημα (3.2) για ανοικτό $\Omega \subseteq \mathbb{R}^n$ με f, g_i για $i = 1, \dots, m$ και h_j για $j = 1, \dots, p$ να είναι συνεχώς διαφορίσιμες σε κάποιο $\mathbf{x}^* \in \Omega$. Επίσης, έστω ότι για το σημείο \mathbf{x}^* ισχύουν κάποιες κατάλληλες συνθήκες κανονικότητας (regularity conditions) ή αλλιώς constraint qualifications². Τότε, αν το \mathbf{x}^* πλύνει τοπικά το πρόβλημα (3.2), υπάρχουν βαθμωτά διανύσματα πολλαπλασιαστών $\boldsymbol{\lambda}^* = (\lambda_1^*, \dots, \lambda_m^*)$ και $\boldsymbol{\mu}^* = (\mu_1^*, \dots, \mu_p^*)$ τέτοια ώστε

$$h_j(\mathbf{x}^*) = 0, \quad \forall j = 1, \dots, p \quad (3.11\alpha')$$

$$g_i(\mathbf{x}^*) \leq 0, \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (3.11\beta')$$

$$\lambda_i^* \geq 0, \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (3.11\gamma')$$

$$\lambda_i^* g_i(\mathbf{x}^*) = 0, \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (3.11\delta')$$

$$\nabla_{\mathbf{x}} \mathcal{L}(\mathbf{x}^*, \boldsymbol{\lambda}^*, \boldsymbol{\mu}^*) = \nabla f(\mathbf{x}^*) + \sum_{i=1}^m \lambda_i^* \nabla g_i(\mathbf{x}^*) + \sum_{j=1}^p \mu_j^* \nabla h_j(\mathbf{x}^*) = 0 \quad (3.11\epsilon')$$

Οι παραπάνω συνθήκες ονομάζονται συνθήκες Karush-Kuhn-Tucker (KKT) και το σημείο που τις ικανοποιεί ονομάζεται σημείο KKT.

Οι δυο πρώτες συνθήκες είναι οι συνθήκες εφικτότητας του αρχικού προβλήματος, η τρίτη αποτελεί τη συνθήκη εφικτότητας του δυαδικού προβλήματος (Boyd & Vandenberghe, 2004), η τέταρτη αναφέρεται ως συνθήκη συμπληρωματικής χαλαρότητας (complementary slackness), ενώ η τελευταία ως συνθήκη στασιμότητας (stationarity).

Οι συνθήκες KKT αποτελούν αναγκαίες και όχι πάντα ικανές συνθήκες για μια λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Συνεπώς, οι λύσεις που προκύπτουν από τις συνθήκες KKT δεν είναι απαραίτητα και λύσεις του προβλήματος βελτιστοποίησης, αλλά αποτελούν ένα στάσιμο σημείο. Ωστόσο, εάν το πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι κυρτό, τότε οι παραπάνω συνθήκες αποτελούν και ικανές συνθήκες. Επιπρόσθετα, ισχύει το ακόλουθο γενικότερο θεώρημα.

Θεώρημα 3.3 (Ικανές συνθήκες Karush-Kuhn-Tucker (Bazaraa et al., 2006)). Έστω το πρόβλημα (3.2) για ανοικτό $\Omega \subseteq \mathbb{R}^n$ με f, g_i για $i = 1, \dots, m$ και h_j για $j = 1, \dots, p$ συνεχώς διαφορίσιμες σε ένα σημείο $\mathbf{x}^* \in \Omega$, στο οποίο ισχύουν οι συνθήκες KKT, δηλαδή υπάρχουν βαθμωτά διανύσματα πολλαπλασιαστών $\boldsymbol{\lambda}^*$ και $\boldsymbol{\mu}^*$ τέτοια ώστε να ισχύουν οι (3.11). Εάν η f είναι ψευδο-κυρτή στο \mathbf{x}^* , οι g_i είναι οιονεί κυρτές στο \mathbf{x}^* για $i = 1, \dots, m$ και οι h_j είναι οιονεί κυρτές στο \mathbf{x}^* για τα j στα οποία $\mu_j^* > 0$ και οιονεί κοίλεις στο \mathbf{x}^* για τα j στα οποία $\mu_j^* < 0$, τότε το σημείο \mathbf{x}^* είναι ολικά βέλτιστη λύση του (3.2). Αν οι συνθήκες περί κυρτότητας περιορίζονται σε μια περιοχή γύρω από το \mathbf{x}^* , τότε το \mathbf{x}^* είναι τοπικό ελάχιστο του (3.2).

Σε μια απλούστερη μορφή το παραπάνω θεώρημα ισχύει για ένα κυρτό σύνολο, με f ψευδο-κυρτή, g_i οιονεί κυρτές και h_j αφινικές. Συνεπώς, το θεώρημα ισχύει και για ένα κυρτό πρόβλημα. Τέλος, αναφέρεται ότι μια σημαντική ιδιότητα των προβλημάτων κυρτής βελτιστοποίησης είναι ότι κάθε τοπική βέλτιστη λύση είναι και ολική βέλτιστη. Επιπρόσθετα, ένα εφικτό σημείο \mathbf{x} είναι

²Μερικά παράδειγμα είναι οι συνθήκες κανονικότητας γραμμικής ανεξαρτησίας για τα ενεργά ∇g_i και τα ∇h_i , οι συνθήκες κανονικότητας του Slater, οι συνθήκες κανονικότητας του Abadie κλπ. (Bazaraa et al., 2006).

βέλτιστο για ένα κυρτό πρόβλημα με διαφορίσιμη αντικειμενική συνάρτηση, αν και μόνο αν

$$\nabla f(\mathbf{x})^T(\mathbf{y} - \mathbf{x}) \geq 0 \quad (3.12)$$

για κάθε εφικτό \mathbf{y} , ενώ για ένα κυρτό πρόβλημα χωρίς περιορισμούς η αντίστοιχη συνθήκη για το βέλτιστο \mathbf{x} είναι η εξής:

$$\nabla f(\mathbf{x}) = 0 \quad (3.13)$$

3.1.4 Εξίσωση Euler-Lagrange

Μια ιδιαίτερα χρήσιμη εξίσωση για τα προβλήματα βελτιστοποίησης που εμφανίζουν ολοκληρώματα στις αντικειμενικές συναρτήσεις και στις συναρτήσεις περιορισμών είναι η εξίσωση Euler-Lagrange (Zeidler et al., 2004; Gelfand & Fomin, 2000; Van Brunt, 2004), η οποία προέρχεται από τη θεωρία του λογισμού μεταβολών (calculus of variations). Αρχικά, παρουσιάζεται το παρακάτω θεώρημα που αφορά το βασικό πρόβλημα βελτιστοποίησης από το οποίο προκύπτει η εξίσωση Euler-Lagrange, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποιες γενικεύσεις της εξίσωσης.

Θεώρημα 3.4 (Zeidler et al., 2004). Έστω $t_a, t_b, q(t_a), q(t_b) \in \mathbb{R}$ με $t_a < t_b$ και το ακόλουθο πρόβλημα βελτιστοποίησης:

$$\min_{q(t)} \int_{t_a}^{t_b} F(q(t), q'(t), t) dt, \quad \text{με } q(t_a) = q_a, q(t_b) = q_b \quad (3.14)$$

όπου η συνάρτηση $F: \mathbb{R} \times \mathbb{R} \times [t_a, t_b] \rightarrow \mathbb{R}$ είναι διπλά συνεχώς διαφορίσιμη. Αν η $q(t)$ με $t \in [t_a, t_b]$ είναι διπλά συνεχώς διαφορίσιμη και αποτελεί λύση του (3.1.4), τότε ισχύει η ακόλουθη εξίσωση, η οποία ονομάζεται εξίσωση Euler-Lagrange:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial F(q(t), q'(t), t)}{\partial q'} - \frac{\partial F(q(t), q'(t), t)}{\partial q} = 0 \quad (3.15)$$

Από τη λύση της εξίσωσης Euler-Lagrange προκύπτουν τα στάσιμα σημεία του προβλήματος με αποτέλεσμα να αποτελεί την αναγκαία συνθήκη για τη λύση του προβλήματος. Για τις ικανές συνθήκες ο αναγνώστης παραπέμπεται στο (Zeidler et al., 2004). Αναφέρεται ότι στην ειδική περίπτωση όπου $F(q(t), t)$, η εξίσωση Euler-Lagrange απλοποιείται στην παρακάτω εξίσωση και επιπλέον δεν υπάρχει η απαίτηση των συνοριακών συνθηκών:

$$\frac{\partial F(q(t), t)}{\partial q} = 0 \quad (3.16)$$

Επιπρόσθετα, σε μια γενικότερη περίπτωση όπου το $\mathbf{t} = (t_1, \dots, t_N)$ είναι διάνυσμα με τιμές σε μια περιοχή $D \in \mathbb{R}^N$ και η $\mathbf{q} = (q_1, \dots, q_K) = \mathbf{q}(\mathbf{t})$ είναι διανυσματική συνάρτηση με συγκεκριμένες συνοριακές συνθήκες, προκύπτει το παρακάτω σύστημα εξισώσεων Euler-Lagrange:

$$\sum_{n=1}^N \frac{\partial}{\partial t_n} \frac{\partial F}{\partial \frac{\partial q_k}{\partial t_n}} - \frac{\partial F}{\partial q_k} = 0, \quad \text{για } k = 1, \dots, K \quad (3.17)$$

όπου $F = F(q_1, \dots, q_K, \frac{\partial q_1}{\partial t_1}, \dots, \frac{\partial q_1}{\partial t_N}, \dots, \frac{\partial q_K}{\partial t_1}, \dots, \frac{\partial q_K}{\partial t_N}, t_1, \dots, t_N)$.

Τέλος, αναφέρεται ότι για τα προβλήματα όπου εμφανίζονται περιορισμοί (με ή χωρίς ολοκληρώματα) ορίζεται μια συνάρτηση με πολλαπλασιαστές Lagrange αντίστοιχα με τη συνάρτηση Lagrange της θεωρίας βελτιστοποίησης, η οποία εισάγεται στην εξίσωση Euler-Lagrange αντί της F (Zeidler et al., 2004). Συνεπώς, οι συνθήκες KKT μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με την εξίσωση Euler-Lagrange (Smith, 1998) για προβλήματα βελτιστοποίησης με περιορισμούς που εμφανίζουν ολοκληρώματα.

3.2 Θεωρία Ανισοτήτων Μεταβολών

Στη συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζεται η θεωρία ανισοτήτων μεταβολών (variational inequalities theory), η οποία ασχολείται με προβλήματα που συνιστούν μια γενικότερη κλάση προβλημάτων μη γραμμικής ανάλυσης. Πιο συγκεκριμένα, η θεωρία ανισοτήτων μεταβολών (Facchinei & Pang, 2003; Nagurney, 1999; Scutari et al., 2010, 2012) είναι κατάλληλη για τη μελέτη και επίλυση μεγάλου εύρους μαθηματικών προβλημάτων, όπως συστήματα μη γραμμικών εξισώσεων, προβλήματα βελτιστοποίησης, μοντέλα ισορροπίας, προβλήματα συμπληρωματικότητας, προβλήματα σταθερού σημείου κ.α. Αποτελεί ένα ισχυρό μαθηματικό εργαλείο για τη μελέτη προβλημάτων αλληλεπιδράσεων ανάμεσα σε διάφορες οντότητες, τα οποία είναι συνηθισμένα στις ασύρματες επικοινωνίες και μπορεί να εφαρμοστεί ακόμα και στις περιπτώσεις που η κλασική θεωρία παιγνίων δεν μπορεί να εφαρμοστεί.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται πρώτα κάποιοι βασικοί ορισμοί και θεωρήματα της θεωρίας ανισοτήτων μεταβολών. Έπειτα, μελετάται η ύπαρξη και η μοναδικότητα της λύσης ενός προβλήματος ανισότητας μεταβολών. Τέλος, παρουσιάζονται κάποια βασικά στοιχεία από τη θεωρία παιγνίων και πιο συγκεκριμένα τη μη συνεργατική θεωρία παιγνίων, καθώς και η διασύνδεση της με τη θεωρία ανισοτήτων μεταβολών.

3.2.1 Βασικοί Ορισμοί

Η θεωρία των ανισοτήτων μεταβολών αποτελεί ένα γενικό μαθηματικό πλαίσιο που περικλείει την κυριή βελτιστοποίηση και φέρει άμεση σχέση με τη θεωρία παιγνίων. Αναλυτικότερα, το πρόβλημα ανισότητας μεταβολών (Variational Inequality - VI) ορίζεται στη συνέχεια.

Ορισμός 3.5. Δεδομένου ενός συνόλου $\mathcal{K} \subseteq \mathbb{R}^n$ και μιας συνάρτησης $F: \mathcal{K} \rightarrow \mathbb{R}^n$, το πρόβλημα VI, το οποίο ορίζεται ως $VI(\mathcal{K}, F)$, στοχεύει στην εύρεση ενός $x^* \in \mathcal{K}$ που καλείται λύση του VI, τέτοιου ώστε

$$F(x^*)^T(x - x^*) \geq 0, \quad \forall x \in \mathcal{K} \quad (3.18)$$

όπου $(\cdot)^T$ είναι ο ανάστροφος πίνακας ή ισοδύναμα

$$\langle F(x^*), x - x^* \rangle \geq 0, \quad \forall x \in \mathcal{K} \quad (3.19)$$

όπου $\langle \cdot, \cdot \rangle$ είναι η απεικόνιση του εσωτερικού γινόμενου.

Το σύνολο των λύσεων του προβλήματος αυτού συμβολίζεται με $SOL(\mathcal{K}, F)$.

Για τη συνέχεια, θεωρείται ότι το \mathcal{K} είναι κλειστό και η \mathbf{F} είναι συνεχής. Ένα πρόβλημα ανισότητας μεταβολών μπορεί αντιστοιχηθεί με ένα κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης (3.2), όπου το ∇f αντικαθίσταται από μια γενική συνάρτηση \mathbf{F} [βλ. (3.12)], όπως φαίνεται από την παρακάτω πρόταση.

Πρόταση 3.1 (Nagurney, 1999). Έστω \mathbf{x}^* λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}} \quad & f(\mathbf{x}) \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{x} \in \mathcal{K} \end{aligned} \quad (3.20)$$

όπου $f: \mathcal{K} \rightarrow \mathbb{R}$ είναι συνεχώς διαφορίσιμη και το σύνολο $\mathcal{K} \subseteq \mathbb{R}^n$ είναι κλειστό και κυρτό. Τότε το \mathbf{x}^* είναι λύση του προβλήματος $VI(\mathcal{K}, \nabla f)$.

Αν η f είναι κυρτή συνάρτηση τότε ισχύει και το αντίστροφο, ενώ για $\mathcal{K} = \mathbb{R}^n$ τότε το πρόβλημα γίνεται πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς. Σημειώνεται ότι, αν η συνάρτηση \mathbf{F} δεν μπορεί να εκφραστεί ως κλίση (gradient) μιας δυνητικής συνάρτησης f (δηλαδή όταν η \mathbf{F} δεν έχει συμμετρικό Jacobian πίνακα), τα προβλήματα VI διαχωρίζονται από τα κλασικά προβλήματα κυρτής βελτιστοποίησης, καθιστώντας τη θεωρία ανισοτήτων μεταβολών γενικότερη, αφού περιλαμβάνει ένα μεγαλύτερο εύρος προβλημάτων.

Επιπρόσθετα ισχύουν οι παρακάτω προτάσεις.

Πρόταση 3.2 (Nagurney, 1999). Το πρόβλημα επίλυσης ενός συστήματος εξισώσεων $\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$ είναι ισοδύναμο με το πρόβλημα $VI(\mathbb{R}^n, \mathbf{F})$.

Πρόταση 3.3 (Nagurney, 1999). Έστω ένα μη γραμμικό πρόβλημα συμπληρωματικότητας (Non-linear Complementarity Problem - NCP), το οποίο για μια συνάρτηση $\mathbf{F}: \mathbb{R}_+^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ ορίζεται ως το πρόβλημα εύρεσης ενός $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$, τέτοιου ώστε

$$\mathbf{0} \leq \mathbf{x} \perp \mathbf{F}(\mathbf{x}) \geq \mathbf{0} \quad (3.21)$$

Το παραπάνω πρόβλημα $NCP(\mathbf{F})$ είναι ισοδύναμο με το πρόβλημα $VI(\mathbb{R}_+^n, \mathbf{F})$.

Σημειώνεται ότι για $\mathbf{z}, \mathbf{y} \in \mathbb{R}^n$, η $\mathbf{0} \leq \mathbf{z} \perp \mathbf{y} \geq \mathbf{0}$ σημαίνει ότι $\mathbf{z} \geq \mathbf{0}$, $\mathbf{y} \geq \mathbf{0}$ και $\mathbf{z}^T \mathbf{y} = \mathbf{0}$ (ορθογωνιότητα).

3.2.2 Συνθήκες KKT

Για τα προβλήματα VI ορίζονται αντίστοιχα οι συνθήκες KKT. Αναλυτικότερα, έστω το πρόβλημα $VI(\mathcal{K}, \mathbf{F})$ με το σύνολο \mathcal{K} να ενσωματώνει περιορισμούς ισότητας και ανισοτήτων ως εξής:

$$\mathcal{K} \equiv \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n : \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}, \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}\} \quad (3.22)$$

με $\mathbf{h}: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^p$ και $\mathbf{g}: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ να είναι συνεχώς διαφορίσιμες. Επίσης, έστω ότι ισχύουν κάποιες κατάλληλες συνθήκες κανονικότητας (Facchinei & Pang, 2003), τότε οι συνθήκες KKT για

το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι οι ακόλουθες:

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (3.23\alpha)$$

$$\mathbf{0} \leq \boldsymbol{\lambda} \perp \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \quad (3.23\beta)$$

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\lambda}^T \nabla \mathbf{g}(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\mu}^T \nabla \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (3.23\gamma)$$

Επιπρόσθετα, ισχύει το παρακάτω θεώρημα.

Θεώρημα 3.5 (Facchinei & Pang, 2003). Έστω $\mathcal{K} = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n : \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}, \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}\}$ με $\mathbf{h}: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^p$ και $\mathbf{g}: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ να είναι συνεχώς διαφορίσιμες και μια συνάρτηση $\mathbf{F}: \mathcal{K} \rightarrow \mathbb{R}^n$. Ισχύουν τα παρακάτω:

1. Έστω $\mathbf{x} \in \text{SOL}(\mathcal{K}, \mathbf{F})$. Αν ισχύουν οι συνθήκες κανονικότητας του Abadie (Facchinei & Pang, 2003) στο \mathbf{x} , τότε υπάρχουν διανύσματα $\boldsymbol{\mu} \in \mathbb{R}^p$ και $\boldsymbol{\lambda} \in \mathbb{R}^m$ τέτοια ώστε να ισχύουν οι συνθήκες KKT (3.23).
2. Αντίστροφα, αν οι \mathbf{h} είναι αφινικές, οι \mathbf{g} είναι κυρτές και το $(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu})$ ικανοποιεί τις KKT (3.23), τότε αποτελεί και λύση του VI(\mathcal{K}, \mathbf{F}).

3.2.3 Ύπαρξη και Μοναδικότητα της Λύσης

Στη συνέχεια, μελετάται η ύπαρξη και η μοναδικότητα των λύσεων ενός προβλήματος VI. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά την ύπαρξη λύσεων, ισχύει το παρακάτω θεώρημα.

Θεώρημα 3.6 (Facchinei & Pang, 2003). Έστω ένα κυρτό και συμπαγές (δηλαδή κλειστό και φραγμένο) σύνολο $\mathcal{K} \subseteq \mathbb{R}^n$ και μια συνεχής συνάρτηση $\mathbf{F}: \mathcal{K} \rightarrow \mathbb{R}^n$. Το σύνολο $\text{SOL}(\mathcal{K}, \mathbf{F})$ είναι μη κενό και συμπαγές.

Ωστόσο, κάτω από συγκεκριμένες προϋποθέσεις για τη συνάρτηση \mathbf{F} , ένα πρόβλημα VI μπορεί να έχει λύσεις χωρίς το σύνολο \mathcal{K} να είναι φραγμένο. Αρχικά, αναφέρονται κάποιοι ορισμοί για τη μονοτονία της \mathbf{F} , η οποία διαδραματίζει τον αντίστοιχο ρόλο με την κυρτότητα της f στα κλασικά προβλήματα βελτιστοποίησης.

Ορισμός 3.6. Δεδομένου ενός κυρτού συνόλου $\mathcal{K} \subseteq \mathbb{R}^n$, μια συνάρτηση $\mathbf{F}: \mathcal{K} \rightarrow \mathbb{R}^n$ είναι

- *μονότονη (monotone)* στο \mathcal{K} , εάν

$$(\mathbf{F}(\mathbf{x}) - \mathbf{F}(\mathbf{y}))^T (\mathbf{x} - \mathbf{y}) \geq 0, \quad \forall \mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathcal{K} \quad (3.24)$$

- *γνησίως μονότονη (strictly monotone)* στο \mathcal{K} , εάν

$$(\mathbf{F}(\mathbf{x}) - \mathbf{F}(\mathbf{y}))^T (\mathbf{x} - \mathbf{y}) > 0, \quad \forall \mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathcal{K} \text{ και } \mathbf{x} \neq \mathbf{y} \quad (3.25)$$

- *ισχυρά μονότονη (strongly monotone)* στο \mathcal{K} , εάν υπάρχει σταθερά $c > 0$, τέτοια ώστε

$$(\mathbf{F}(\mathbf{x}) - \mathbf{F}(\mathbf{y}))^T (\mathbf{x} - \mathbf{y}) \geq c \|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|^2, \quad \forall \mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathcal{K} \quad (3.26)$$

Επιπρόσθετα, η μονοτονία μιας συνάρτησης συνδέεται άμεσα και με τον Jacobian πίνακα της συνάρτησης³. Θεωρώντας μια \mathbf{F} συνεχώς διαφορίσιμη στο \mathcal{K} , ισχύουν τα παρακάτω:

- Η $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ είναι μονότονη στο \mathcal{K} $\Leftrightarrow \mathcal{J}_{\mathbf{F}}(\mathbf{x}) \succeq \mathbf{0}, \forall \mathbf{x} \in \mathcal{K}$
- Η $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ είναι γνησίως μονότονη στο \mathcal{K} $\Leftarrow \mathcal{J}_{\mathbf{F}}(\mathbf{x}) \succ \mathbf{0}, \forall \mathbf{x} \in \mathcal{K}$
- Η $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ είναι ισχυρά μονότονη στο \mathcal{K} $\Leftrightarrow \mathcal{J}_{\mathbf{F}}(\mathbf{x}) - c\mathbf{I} \succeq \mathbf{0}, \forall \mathbf{x} \in \mathcal{K}$

όπου $\mathcal{J}_{\mathbf{F}}$ είναι ο Jacobian πίνακας της \mathbf{F} . Το $\mathbf{A} \succeq 0$ ($\mathbf{A} \succ 0$) σημαίνει ότι ο πίνακας \mathbf{A} είναι θετικά ημιορισμένος (ορισμένος) [positive semidefinite (definite)] και το $\mathbf{A} - c\mathbf{I} \succeq 0$, με \mathbf{I} τον μοναδιαίο πίνακα, σημαίνει ότι ο πίνακας \mathbf{A} είναι ισχυρά θετικά ορισμένος (strongly or uniformly positive definite).

Είναι εμφανές ότι ισχύει το παρακάτω

$$\boxed{\text{Ισχυρά Μονότονη} \Rightarrow \text{Γνησίως Μονότονη} \Rightarrow \text{Μονότονη}}$$

Επιπρόσθετα, εάν η συνάρτηση \mathbf{F} μπορεί να εκφραστεί ως η κλίση μιας βαθμωτής συνάρτησης f (δηλαδή $\mathbf{F} = \nabla f$), η μονοτονία της \mathbf{F} μπορεί να αντιστοιχηθεί με την κυρτότητα της f , ως εξής:

- f κυρτή $\Leftrightarrow \nabla f$ μονότονη $\Leftrightarrow \nabla^2 f \succeq \mathbf{0}$
- f γνησίως κυρτή $\Leftrightarrow \nabla f$ γνησίως μονότονη $\Leftarrow \nabla^2 f \succ \mathbf{0}$
- f ισχυρά κυρτή $\Leftrightarrow \nabla f$ ισχυρά μονότονη $\Leftrightarrow \nabla^2 f - c\mathbf{I} \succeq \mathbf{0}$

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα θεώρημα που συνδέει τη λύση ενός προβλήματος VI(\mathcal{K}, \mathbf{F}) με τη μονοτονία της συνάρτησης \mathbf{F} .

Θεώρημα 3.7 (Facchinei & Pang, 2003; Scutari et al., 2012). Έστω ένα κυρτό και κλειστό σύνολο $\mathcal{K} \subseteq \mathbb{R}^n$ και μια συνεχής συνάρτηση $\mathbf{F}: \mathcal{K} \rightarrow \mathbb{R}^n$, τότε ισχύουν τα παρακάτω:

- Αν η \mathbf{F} είναι μονότονη στο \mathcal{K} , το σύνολο $\text{SOL}(\mathcal{K}, \mathbf{F})$ είναι (πιθανώς κενό) κυρτό.
- Αν η \mathbf{F} είναι γνησίως μονότονη στο \mathcal{K} , το σύνολο $\text{SOL}(\mathcal{K}, \mathbf{F})$ έχει το πολύ μια λύση.
- Αν η \mathbf{F} είναι ισχυρά μονότονη στο \mathcal{K} , το σύνολο $\text{SOL}(\mathcal{K}, \mathbf{F})$ έχει μια μοναδική λύση.

Συνεπώς, η μονοτονία της \mathbf{F} δεν εγγυάται την ύπαρξη της λύσης, ενώ η ισχυρή μονοτονία της \mathbf{F} υποδηλώνει μοναδική λύση. Αν γίνει ο παραλληλισμός με τα προβλήματα κυρτής βελτιστοποίησης, προκύπτουν αντίστοιχες συνθήκες για την ύπαρξη λύσης όπως π.χ. ότι η ισχυρή κυρτότητα μιας συνάρτησης f υποδηλώνει μοναδική λύση ενός αντίστοιχου προβλήματος ελαχιστοποίησης. Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την ύπαρξη της λύσης ο αναγνώστης παραπέμπεται στο (Facchinei & Pang, 2003).

³Για μια συνάρτηση $\mathbf{G}: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$, ο Jacobian πίνακας της δίνεται ως $\mathcal{J}_{\mathbf{G}}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial G_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial G_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial G_m}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial G_m}{\partial x_n} \end{bmatrix}$. Επιπρόσθετα, για μια συνάρτηση $g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, ο Jacobian πίνακας μπορεί να συνδεθεί με τον Hessian πίνακα ως εξής $\mathcal{H}_g(\mathbf{x}) = \mathcal{J}_{\nabla g}(\mathbf{x})$.

3.2.4 Θεωρία Παιγνίων και Διασύνδεση με Θεωρία Ανισοτήτων Μεταβολών

Η θεωρία παιγνίων (game theory) (Osborne & Rubinstein, 1994; Fudenberg & Tirole, 1991) μελετάει τις αλληλεπιδράσεις ανάμεσα σε διάφορες οντότητες οι οποίες πρέπει να λάβουν μια απόφαση και έχουν αντικρουόμενα ή κοινά συμφέροντα. Σε αντίθεση τα προβλήματα βελτιστοποίησης, τα οποία αναφέρονται σε μια μοναδική οντότητα, ένα παίγνιο αναφέρεται σε ένα σύνολο οντοτήτων στο οποίο η κάθε οντότητα θα πρέπει να λάβει μια απόφαση, έτσι ώστε να βελτιστοποιήσει την απόδοσή της, επηρεάζοντας όμως ταυτόχρονα και τις αποφάσεις των υπόλοιπων οντοτήτων. Η θεωρία παιγνίων χρησιμοποιείται εκτενώς τα τελευταία χρόνια για την επίλυση προβλημάτων ασύρματων δικτύων (Han et al., 2012; K. R. Liu & Wang, 2010), όπου οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παικτών δεν είναι αμελητέες και οι κεντροποιημένες προσεγγίσεις δεν είναι αποδεκτές.

Τα παίγνια μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε διάφορες κατηγορίες (όπως στατικά και δυναμικά, στοχαστικά και μη στοχαστικά κλπ.) και μια από αυτές (ίσως η πιο γνωστή) είναι τα μη συνεργατικά και τα συνεργατικά παίγνια. Τα μη συνεργατικά παίγνια μελετάνε τις στρατηγικές επιλογές που αφορούν τις αλληλεπιδράσεις ανάμεσα σε ανταγωνιστικούς παίκτες, οι οποίοι αποτελούν λογικούς πράκτορες, δηλαδή ο κάθε παίκτης επιθυμεί να βελτιστοποιήσει την απόδοσή του. Αντίθετα, τα συνεργατικά παίγνια μελετάνε τη συμπεριφορά λογικών παικτών όταν αυτοί συνεργάζονται, δηλαδή σχηματίζουν συμφωνίες ανάμεσα τους. Στην παρούσα Διδακτορική Διατριβή χρησιμοποιούνται έννοιες από τα μη συνεργατικά παίγνια, τα οποία παρουσιάζονται συνοπτικά στη συνέχεια.

Προβλήματα Ισορροπίας Nash

Γενικά, σε ένα μη συνεργατικό παίγνιο υπάρχουν N παίκτες, όπου ο καθένας έχει τη δική του αντικειμενική συνάρτηση, καθώς και ένα σύνολο στρατηγικών, το οποίο μπορεί να εξαρτάται από τις ενέργειες των υπολοίπων παικτών. Πιο συγκεκριμένα όμως, στα προβλήματα ισορροπίας Nash (Nash Equilibrium Problems - NEPs), το σύνολο των στρατηγικών του i -οστού παίκτη $\mathcal{Q}_i \subseteq \mathbb{R}^{n_i}$ δεν εξαρτάται από τις στρατηγικές των υπολοίπων παικτών. Επιπρόσθετα, η αντικειμενική συνάρτηση του i -οστού παίκτη $f_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{-i})$ εξαρτάται από τις στρατηγικές όλων των παικτών, οι οποίες περιγράφονται από το διάνυσμα $\mathbf{x} \triangleq (\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N) = (\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{-i})$, όπου \mathbf{x}_i είναι η στρατηγική του παίκτη i και το $\mathbf{x}_{-i} \triangleq (\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_{i-1}, \mathbf{x}_{i+1}, \dots, \mathbf{x}_N)$ αντιστοιχεί στο διάνυσμα των στρατηγικών όλων παικτών εκτός του παίκτη i . Το σύνολο στο οποίο ανήκει η από κοινού στρατηγική όλων των παικτών δίνεται από το $\mathcal{Q} = \prod_{i=1}^N \mathcal{Q}_i$, ενώ $\mathcal{Q}_{-i} \triangleq \prod_{j \neq i} \mathcal{Q}_j$. Συνεπώς, ένα NEP ορίζεται ως ένα παίγνιο \mathcal{G} κανονικής (ή στρατηγικής) μορφής, το οποίο αποτελείται από τρεις βασικές συνιστώσες (το σύνολο των παικτών, τα σύνολα των στρατηγικών τους και τις αντικειμενικές συναρτήσεις), ως εξής:

$$\mathcal{G} = \langle \mathcal{N}, \mathcal{Q}, \mathbf{f} \rangle \quad (3.27)$$

όπου $\mathcal{N} = (1, \dots, N)$ και $\mathbf{f} \triangleq (f_i)_{i=1}^N$. Ο στόχος του κάθε παίκτη i , δεδομένων των στρατηγικών των άλλων παικτών \mathbf{x}_{-i} , είναι η επιλογή ενός $\mathbf{x}_i \in \mathcal{Q}_i$ που θα βελτιστοποιεί την αντικειμενική του συνάρτηση (ή πιο συγκεκριμένα στην παρούσα περίπτωση θα ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση κόστους)

$f_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{-i})$, δηλαδή θα λύνει το παρακάτω πρόβλημα βελτιστοποίησης:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}_i} \quad & f_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{-i}) \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{x}_i \in \mathcal{Q}_i \end{aligned} \quad (3.28)$$

Συνεπώς, ένα NEP μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύνολο συζευγμένων προβλημάτων βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια, ακολουθεί ο βασικός ορισμός της ισοροπίας κατά Nash.

Ορισμός 3.7. Έστω $\mathcal{Q} = \prod_{i=1}^N \mathcal{Q}_i$ και $f_i: \mathcal{Q} \rightarrow \mathbb{R}$, για $i \in \mathcal{N}$. Ένα εφικτό σημείο \mathbf{x}^* ονομάζεται αμιγής⁴ ισοροπία κατά Nash (Nash Equilibrium - NE) ή αλλιώς λύση του NEP (3.28), αν ισχύει

$$f_i(\mathbf{x}_i^*, \mathbf{x}_{-i}^*) \leq f_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{-i}^*), \quad \forall \mathbf{x}_i \in \mathcal{Q}_i \quad (3.29)$$

για κάθε παίκτη $i = 1, \dots, N$.

Πιο συγκεκριμένα, ένα σημείο ισοροπίας κατά Nash είναι ένα εφικτό προφίλ στρατηγικών \mathbf{x}^* με την ιδιότητα κανένας παίκτης να μην επωφελείται από μια μονομερή απόκλιση από το σημείο \mathbf{x}_i^* . Συνεπώς, μια ισοροπία κατά Nash θεωρείται μια κατάσταση ενός μη συνεργατικού παιγνίου κατά την οποία κανένας παίκτης δεν μπορεί να βελτιώσει την απόδοσή του, αλλάζοντας τη στρατηγική του, δεδομένου ότι οι άλλοι παίκτες διατηρούν αμετάβλητες τις στρατηγικές τους. Επιπρόσθετα, ένα σημείο NE μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ένα σταθερό σημείο των συναρτήσεων βέλτιστης απόκρισης (best response) του κάθε παίκτη, οι οποίες ορίζονται στη συνέχεια.

Ορισμός 3.8. Η *συνάρτηση βέλτιστης απόκρισης* ενός παίκτη i , δεδομένου του προφίλ στρατηγικών των υπολοίπων παικτών \mathbf{x}_{-i} είναι το σύνολο των στρατηγικών του συγκεκριμένου παίκτη για το οποίο ισχύει

$$\mathcal{B}_i(\mathbf{x}_{-i}) = \{ \mathbf{x}_i \in \mathcal{Q}_i \mid f_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{-i}) \leq f_i(\mathbf{x}'_i, \mathbf{x}_{-i}), \forall \mathbf{x}'_i \in \mathcal{Q}_i \} \quad (3.30)$$

Συνεπώς, το $\mathcal{B}_i(\mathbf{x}_{-i})$ είναι το (πιθανώς κενό) σύνολο των βέλτιστων λύσεων του i -οστού προβλήματος βελτιστοποίησης (3.28) και $\mathcal{B}(\mathbf{x}) \triangleq \mathcal{B}_1(\mathbf{x}_{-1}) \times \dots \times \mathcal{B}_N(\mathbf{x}_{-N})$. Είναι εμφανές ότι ένα σημείο \mathbf{x}^* είναι NE αν και μόνο αν είναι ένα σταθερό σημείο του $\mathcal{B}(\mathbf{x})$, δηλαδή αν και μόνο αν $\mathbf{x}^* \in \mathcal{B}(\mathbf{x}^*)$. Αυτή η προσέγγιση, η οποία ονομάζεται προσέγγιση σταθερού σημείου, είναι πολύ βασική για τη μελέτη των NEPs, ωστόσο απαιτεί τη δυνατότητα υπολογισμού της συνάρτησης βέλτιστης απόκρισης σε κλειστή μορφή, κάτι που δεν είναι πάντα εφικτό. Αναφέρεται ότι, λόγω της ανταγωνιστικής φύσης των μη συνεργατικών παιγνίων, ένα NE μπορεί να μην είναι κατά Pareto βέλτιστο⁵, ενώ έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι για τη βελτίωση της απόδοσης ενός NE.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα βασικό θεώρημα για την ύπαρξη ενός σημείου NE.

Θεώρημα 3.8 (Han et al., 2012). Έστω ένα παίγνιο \mathcal{G} σε κανονική μορφή $(\mathcal{N}, \mathcal{Q}, \mathbf{f})$. Αν $\forall i \in \mathcal{N}$, το σύνολο $\mathcal{Q}_i \subseteq \mathbb{R}^{n_i}$ είναι συμπαγές και κυρτό, καθώς και η συνάρτηση $f_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{-i})$ είναι συνεχής ως προς το προφίλ των στρατηγικών $\mathbf{x} \in \mathcal{Q}$ και ομοιόμορφα κυρτή⁶ ως προς το $\mathbf{x}_i \in \mathcal{Q}_i$ για δεδομένο $\mathbf{x}_{-i} \in \mathcal{Q}_{-i}$, τότε το παίγνιο \mathcal{G} έχει τουλάχιστον μια αμιγή ισοροπία Nash.

⁴Στην περίπτωση που κάθε παίκτης επιλέγει μια στρατηγική με ντετερμινιστικό τρόπο, τότε η στρατηγική αναφέρεται ως αμιγής ή γνήσια στρατηγική (pure strategy). Στη συνέχεια, οι επιλεγόμενες στρατηγικές θα θεωρούνται αμιγείς.

⁵Ένα προφίλ στρατηγικών είναι κατά Pareto βέλτιστο, αν η απόκλιση από αυτό το σημείο θέτει τουλάχιστον ένα παίκτη σε δυσμενέστερη θέση.

⁶Υπενθυμίζεται ότι ο στόχος του κάθε παίκτη είναι να ελαχιστοποιήσει την αντικειμενική συνάρτησή του [βλ. (3.28)].

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η διασύνδεση των NEPs με τα προβλήματα VI, δημιουργώντας έναν επιπλέον τρόπο επίλυσης τους με σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα της θεωρίας ανισοτήτων μεταβολών. Η παρακάτω πρόταση δίνει τις ικανές συνθήκες κάτω από τις οποίες ένα σημείο NE μπορεί να υπολογιστεί επιλύοντας ένα πρόβλημα VI.

Πρόταση 3.4 (Facchinei & Pang, 2003). Έστω ένα NEP $\mathcal{G} = \langle \mathcal{N}, \mathcal{Q}, \mathbf{f} \rangle$, με $\mathcal{N} = (1, \dots, N)$, $\mathcal{Q} \triangleq \prod_{i=1}^N \mathcal{Q}_i$ (με καρτεσιανή δομή) και $\mathbf{f} \triangleq (f_i)_{i=1}^N$, όπου ισχύουν τα ακόλουθα για κάθε παίκτη i :

1. Το σύνολο στρατηγικών $\mathcal{Q}_i \subseteq \mathbb{R}^{n_i}$ είναι κλειστό και κυρτό.
2. Για δεδομένο $\mathbf{x}_{-i} \in \mathcal{Q}_{-i}$, η συνάρτηση $f_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{-i})$ είναι κυρτή και συνεχώς διαφορίσιμη στο $\mathbf{x}_i \in \mathcal{Q}_i$.

Τότε, το παίγνιο \mathcal{G} είναι ισοδύναμο με το πρόβλημα $VI(\mathcal{Q}, \mathbf{F})$, όπου $\mathbf{F}(\mathbf{x}) \triangleq (\nabla_{\mathbf{x}_i} f_i(\mathbf{x}))_{i=1}^N$

Συνεπώς, κάτω από τις κατάλληλες προϋποθέσεις, ένα NEP μπορεί να διατυπωθεί ως πρόβλημα VI και επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί το Θεώρημα 3.7 για να εξαχθούν συμπεράσματα όσον αφορά την ύπαρξη και τη μοναδικότητα σημείων ισορροπίας κατά Nash.

Γενικευμένα προβλήματα ισορροπίας Nash

Στα NEPs, θεωρείται ότι το εφικτό σύνολο του κάθε παίκτη δεν εξαρτάται από τις επιλογές των αντιπάλων παικτών. Ωστόσο, αυτή η υπόθεση δεν ισχύει πάντα. Τα γενικευμένα πρόβλημα ισορροπίας Nash (Generalized Nash Equilibrium Problems - GNEPs), επεκτείνουν τα κλασικά NEPs θεωρώντας ότι το σύνολο των στρατηγικών του κάθε παίκτη μπορεί να εξαρτάται από τις στρατηγικές των αντιπάλων παικτών \mathbf{x}_{-i} . Έστω $\mathcal{Q}_i(\mathbf{x}_{-i}) \subseteq \mathbb{R}^{n_i}$ το εφικτό σύνολο του παίκτη i , όταν οι υπόλοιποι παίκτες επιλέξουν \mathbf{x}_{-i} . Αντίστοιχα με τα NEPs, σε ένα GNEP ο στόχος του κάθε παίκτη i , δεδομένων των στρατηγικών των άλλων παικτών \mathbf{x}_{-i} , είναι η επιλογή ενός $\mathbf{x}_i \in \mathcal{Q}_i(\mathbf{x}_{-i})$ που λύνει το παρακάτω πρόβλημα βελτιστοποίησης:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}_i} \quad & f_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{-i}) \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{x}_i \in \mathcal{Q}_i(\mathbf{x}_{-i}) \end{aligned} \tag{3.31}$$

Ομοίως με τα απλά NEP, ορίζεται και το γενικευμένο σημείο ισορροπίας κατά Nash.

Ορισμός 3.9. Έστω $\mathcal{Q}(\mathbf{x})$ ένα κοινό σύνολο στρατηγικών και $f_i: \mathcal{Q}(\mathbf{x}) \rightarrow \mathbb{R}$, για $i \in \mathcal{N}$, τότε ένα εφικτό σημείο \mathbf{x}^* ονομάζεται *γενικευμένη ισορροπία κατά Nash (Generalized Nash Equilibrium - GNE)* ή αλλιώς λύση του GNEP (3.31), αν ισχύει

$$f_i(\mathbf{x}_i^*, \mathbf{x}_{-i}^*) \leq f_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{-i}^*), \forall \mathbf{x}_i \in \mathcal{Q}_i(\mathbf{x}_{-i}^*) \tag{3.32}$$

για κάθε παίκτη $i = 1, \dots, N$, με $\mathcal{Q}_i(\mathbf{x}_{-i}) \triangleq \{\mathbf{x}_i \mid (\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{-i}) \in \mathcal{Q}(\mathbf{x})\}$.

Τα GNEP είναι αρκετά δύσκολο να επιλυθούν, ενώ κάτω από τις κατάλληλες προϋποθέσεις μπορούν να διατυπωθούν ως προβλήματα οισοεί ανισοτήτων μεταβολών (Quasi Variational Inequalities - QVI) (Facchinei & Pang, 2003). Τέλος, όπως θα παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 5, κάτω από τις κατάλληλες προϋποθέσεις, τα GNEP με συζευγμένους περιορισμούς (coupled constraints) μπορούν να μετασχηματιστούν σε πρόβλημα VI.

3.3 Θεωρία Βέλτιστης Παύσης

Όπως προαναφέρθηκε, η διαχείριση χρόνου αποτελεί μια πολύ σημαντική και απαραίτητη διαδικασία για την αποδοτική λειτουργία ενός συστήματος, καθώς μπορεί να επηρεάσει την αποδοτική διαχείριση των υπολοίπων πόρων. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στα ασύρματα δίκτυα, τα οποία λειτουργούν κάτω από χρονομεταβαλλόμενες συνθήκες. Γι' αυτό το λόγο, στη συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζεται η θεωρία βέλτιστης παύσης (optimal stopping theory) ως ένα μαθηματικό εργαλείο επίλυσης προβλημάτων χρονικής βελτιστοποίησης ή αλλιώς εύρεσης της βέλτιστης χρονικής στιγμής για την εκτέλεση μιας λειτουργίας. Αρχικά, παρουσιάζεται το γενικό πρόβλημα βέλτιστης παύσης και κάποιες βασικές έννοιες της συγκεκριμένης θεωρίας. Στη συνέχεια, μελετάται η ύπαρξη ενός βέλτιστου κανόνα παύσης και η αρχή της βελτιστότητας, ενώ τέλος παρουσιάζονται τα προβλήματα πεπερασμένου ορίζοντα και τα προβλήματα ποσοστού απολαβής (rate of return), τα οποία χρησιμοποιούνται στην παρούσα Διδακτορική Διατριβή.

3.3.1 Ορισμός Προβλήματος Βέλτιστης Παύσης

Η θεωρία βέλτιστης παύσης (Chow et al., 1971; Ferguson, 2006; DeGroot, 2004; Peskir & Shiryaev, 2006) μελετάει τα προβλήματα επιλογής της χρονικής στιγμής για να ληφθεί μια απόφαση (να εκτελεστεί μια συγκεκριμένη λειτουργία), προκειμένου να μεγιστοποιηθεί το προσδοκώμενο κέρδος (ή αντίστοιχα να ελαχιστοποιηθεί το προσδοκώμενο κόστος). Η επιλογή της βέλτιστης χρονικής στιγμής βασίζεται σε διαδοχικά παρατηρηθείσες τυχαίες μεταβλητές. Προβλήματα τέτοιου είδους συναντώνται σε διάφορες επιστημονικές περιοχές όπως π.χ. στον τομέα της στατιστικής, όπου η λειτουργία που πρέπει να εκτελεστεί μπορεί να αντιστοιχεί στην εξέταση μιας υπόθεσης ή την εκτίμηση μιας παραμέτρου ή στον τομέα της επιχειρησιακής έρευνας, όπου η λειτουργία μπορεί να αντιστοιχεί στην αντικατάσταση ενός μηχανήματος, στην πρόσληψη μιας γραμματέως κλπ. Συνεπώς, η θεωρία βέλτιστης παύσης είναι κατάλληλη για την επίλυση ενός μεγάλου εύρους προβλημάτων, συμπεριλαμβανομένων και προβλημάτων που εμφανίζονται στα ασύρματα δίκτυα. Αναφέρεται ότι η συγκεκριμένη θεωρία μπορεί να θεωρηθεί τμήμα της θεωρίας στοχαστικής βελτιστοποίησης, η οποία ασχολείται με προβλήματα όπου υπεισέρχεται τυχαιότητα στη διαδικασία βελτιστοποίησης.

Αρχικά, παρουσιάζεται ο ορισμός ενός προβλήματος βέλτιστης παύσης.

Ορισμός 3.10. Ένα πρόβλημα βέλτιστης παύσης (optimal stopping problem) ή αλλιώς ένα πρόβλημα εύρεσης ενός βέλτιστου κανόνα παύσης (optimal stopping rule problem), ορίζεται από τα ακόλουθα δύο αντικείμενα :

- μια ακολουθία τυχαίων μεταβλητών: X_1, X_2, \dots των οποίων η κοινή κατανομή θεωρείται γνωστή, και
- μια ακολουθία συναρτήσεων ανταμοιβής (reward functions) πραγματικών τιμών: $y_0, y_1(x_1), y_2(x_1, x_2), \dots, y_\infty(x_1, x_2, \dots)$.

Δεδομένων των δύο αντικειμένων, το πρόβλημα βέλτιστης παύσης έγκειται στην επιλογή της χρονικής στιγμής N^* που μεγιστοποιεί την προσδοκώμενη ανταμοιβή. Συνεπώς, αν η τυχαία ανταμοιβή για παύση στο N δίνεται από $Y_N = y_N(x_1, \dots, x_N)$, δεδομένων των παρατηρήσεων $X_1 = x_1, X_2 =$

$x_2, \dots, X_N = x_N$, το πρόβλημα βέλτιστης παύσης μπορεί να αναπαρασταθεί μαθηματικά ως εξής:

$$V^* = \sup_{N \in \mathcal{C}} \mathcal{E} [Y_N] \quad (3.33)$$

όπου το $\mathcal{C} = \{N : 0 \leq N \leq \infty\}$ αντιπροσωπεύει το σύνολο (την κλάση) των χρονικών στιγμών παύσης ή αλλιώς το σύνολο των κανόνων παύσης (stopping rules) και $\mathcal{E}[\cdot]$ είναι η συνάρτηση προσδοκώμενης τιμής.

Αναλυτικότερα, δεδομένων των δύο παραπάνω ακολουθιών, το πρόβλημα παύσης μπορεί να περιγραφεί ως ακολούθως. Ο αποφασίζων (ή αλλιώς παίκτης) παρατηρεί την ακολουθία των τυχαίων μεταβλητών X_1, X_2, \dots για όσο χρονικό διάστημα επιθυμεί. Για κάθε $n = 1, 2, \dots$ αφού παρατηρηθούν τα $X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n$ οι επιλογές του αποφασίζοντα είναι είτε να σταματήσει την παρατήρηση και να λάβει τη γνωστή ανταμοιβή $y_n(x_1, \dots, x_n)$ (η οποία μπορεί να λαμβάνει και αρνητικές τιμές) ή να συνεχίσει και να παρατηρήσει το X_{n+1} . Αν ο αποφασίζων επιλέξει να μην γίνει καμία παρατήρηση, τότε λαμβάνει τη σταθερή ανταμοιβή y_0 , ενώ αν δεν σταματήσει ποτέ, τότε λαμβάνει $y_\infty(x_1, x_2, \dots)$. Το πρόβλημα έγκειται στην επιλογή της χρονικής στιγμής που μεγιστοποιεί την προσδοκώμενη ανταμοιβή. Αντίστοιχα, αν στο προς επίλυση πρόβλημα θεωρηθεί αντί για τη συνάρτηση ανταμοιβής μια συνάρτηση απωλειών ή κόστους, τότε το αντίστοιχο πρόβλημα παύσης έγκειται στην ελαχιστοποίηση της προσδοκώμενης απώλειας.

Η επιλογή της βέλτιστης χρονικής στιγμής παύσης μπορεί να γίνει μέσω τυχαίων αποφάσεων. Πιο συγκεκριμένα, δεδομένου ότι ο αποφασίζων έχει φτάσει στο στάδιο n έχοντας παρατηρήσει τα $X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n$, στη συνέχεια μπορεί να επιλέξει να σταματήσει με μια πιθανότητα $\phi_n(x_1, \dots, x_n)$, η οποία εξαρτάται από αυτές τις παρατηρήσεις. Ένας (τυχαίος) κανόνας παύσης αποτελείται από την ακολουθία αυτών των συναρτήσεων

$$\phi = (\phi_0, \phi_1(x_1), \phi_2(x_1, x_2), \dots) \quad (3.34)$$

όπου για όλα τα n και τα x_1, \dots, x_n , $0 \leq \phi_n(x_1, \dots, x_n) \leq 1$. Ο κανόνας παύσης δεν θεωρείται τυχαίος αν κάθε $\phi_n(x_1, \dots, x_n)$ είναι 0 ή 1.

Επομένως, το ϕ_0 αντιπροσωπεύει την πιθανότητα ο αποφασίζων να μην κάνει καμία παρατήρηση. Το $\phi_1(x_1)$ αντιπροσωπεύει την πιθανότητα να σταματήσει μετά την πρώτη παρατήρηση $X_1 = x_1$ κ.ο.κ. Συνεπώς, ο κανόνας παύσης ϕ και η ακολουθία παρατηρήσεων $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots)$ καθορίζει την τυχαία χρονική στιγμή παύσης $0 \leq N \leq \infty$, με $N = \infty$ την περίπτωση η παρατήρηση να μην σταματήσει ποτέ. Η συνάρτηση μάζας πιθανότητας του N δεδομένου ότι $\mathbf{X} = \mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots)$ συμβολίζεται με $\psi = (\psi_0, \psi_1, \dots, \psi_\infty)$, όπου

$$\begin{aligned} \psi_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= \Pr(N = n | \mathbf{X} = \mathbf{x}) \quad \text{για } n = 0, 1, 2, \dots \\ \psi_\infty(x_1, x_2, \dots) &= \Pr(N = \infty | \mathbf{X} = \mathbf{x}) \end{aligned} \quad (3.35)$$

Η συνάρτηση μάζας πιθανότητας ψ σχετίζεται με τον κανόνα παύσης ϕ ως εξής:

$$\begin{aligned} \psi_0 &= \phi_0 \\ \psi_1(x_1) &= (1 - \phi_0)\phi_1(x_1) \\ &\vdots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \vdots \\ \psi_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= \left[\prod_{j=1}^{n-1} (1 - \phi_j(x_1, \dots, x_j)) \right] \phi_n(x_1, \dots, x_n) \quad (3.36) \\ & \vdots \\ \psi_\infty(x_1, x_2, \dots) &= 1 - \sum_{j=0}^{\infty} \psi_j(x_1, \dots, x_j) \end{aligned}$$

όπου το $\psi_\infty(x_1, x_2, \dots)$ αντιστοιχεί στην πιθανότητα ο παίκτης να μην σταματήσει ποτέ, δεδομένων όλων των παρατηρήσεων.

Επομένως, το πρόβλημα έγκειται στην επιλογή ενός κανόνα παύσης ϕ που να μεγιστοποιεί το προσδοκώμενο κέρδος, το οποίο ορίζεται ως εξής:

$$V(\phi) = \mathcal{E}[y_N(X_1, \dots, X_N)] = \mathcal{E} \sum_{j=0}^{\infty} \psi_j(X_1, \dots, X_j) y_j(X_1, \dots, X_j) \quad (3.37)$$

όπου το $= \infty$ συμπεριλαμβάνει το ∞ στο άθροισμα. Σε όρους τυχαίου χρόνου παύσης N , ο κανόνας παύσης ϕ μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\phi_n(X_1, X_2, \dots, X_n) = \Pr(N = n \mid N \geq n, \mathbf{X} = \mathbf{x}) \quad \text{για } n = 0, 1, \dots \quad (3.38)$$

Σε μερικές εφαρμογές, η ακολουθία ανταμοιβών περιγράφεται πιο ρεαλιστικά ως μια ακολουθία τυχαίων μεταβλητών $Y_0, Y_1, \dots, Y_\infty$ των οποίων η κοινή κατανομή με τις παρατηρήσεις X_1, X_2, \dots είναι γνωστή. Η πραγματική τιμή του Y_n μπορεί να μην είναι γνωστή τη χρονική στιγμή n , την οποία ο παίκτης πρέπει να λάβει την απόφαση για αν θα σταματήσει ή όχι. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να αντικατασταθεί η ακολουθία τυχαίων ανταμοιβών Y_n με την ακολουθία των συναρτήσεων ανταμοιβής $y_n(x_1, \dots, x_n)$ για $n = 0, 1, \dots, \infty$, όπου $y_n(x_1, \dots, x_n) = \mathcal{E}[Y_n \mid X_1 = x_1, \dots, X_n = x_n]$. Οποιοσδήποτε κανόνας παύσης ϕ για την ακολουθία $Y_0, Y_1, \dots, Y_\infty$ δίνει την ίδια προσδοκώμενη απολαβή και για την ακολουθία $y_0, y_1, \dots, y_\infty$.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ένας άλλος τρόπος περιγραφής ενός βέλτιστου κανόνα παύσης, ο οποίος είναι ίσως πιο διαδομένος από τον προηγούμενο. Έστω (Ω, \mathcal{B}, P) ο πιθανοτικός χώρος στον οποίο ορίζονται όλες οι τυχαίες μεταβλητές και \mathcal{F}_n το υπό- σ -πεδίο του \mathcal{B} που παράγεται από την ακολουθία X_1, \dots, X_n (το μικρότερο σ -πεδίο που περιέχει τα σύνολα $\{X_1 \leq x_1, \dots, X_n \leq x_n\}$ για όλα τα x_1, \dots, x_n). Με $\mathcal{F}_0 = \{\Omega, \emptyset\}$ και \mathcal{F}_∞ να είναι το σ -πεδίο που παράγεται από το $\bigcup \mathcal{F}_n$, η

$$\mathcal{F}_0 \subset \mathcal{F}_1 \subset \dots \subset \mathcal{F}_n \subset \dots \subset \mathcal{F}_\infty \subset \mathcal{B} \quad (3.39)$$

αντιπροσωπεύει την αύξουσα ακολουθία των σ -πεδίων. Για μια αυθαίρετη τυχαία μεταβλητή Z , η υπό συνθήκη προσδοκώμενη τιμή της Z δεδομένων των X_1, \dots, X_n δίνεται ως εξής:

$$\mathcal{E}[Z \mid \mathcal{F}_n] = \mathcal{E}[Z \mid X_1, \dots, X_n] \quad (3.40)$$

Συνεπώς, ένα πρόβλημα βέλτιστης παύσης μπορεί να εκφραστεί από τα ακόλουθα δυο αντικείμενα,

χωρίς να αναφέρονται οι τυχαίες μεταβλητές $X_1, X_2 \dots$:

- μια αύξουσα ακολουθία $\mathcal{F}_0 \subset \mathcal{F}_1 \subset \dots \subset \mathcal{F}_n \subset \dots \subset \mathcal{F}_\infty \subset \mathcal{B}$, και
- μια ακολουθία τυχαίων μεταβλητών ανταμοιβής $Y_0, Y_1, \dots, Y_n, \dots, Y_\infty$.

Χωρίς βλάβη της γενικότητας μπορεί να θεωρηθεί ότι η Y_n είναι \mathcal{F}_n -μετρήσιμη ως συνάρτηση των X_1, \dots, X_n (συμπεριλαμβανομένου του $n = \infty$). Ένας κανόνας παύσης ορίζεται ως η τυχαία μεταβλητή N , η οποία λαμβάνει τιμές στο $\{0, 1, \dots, \infty\}$, τέτοια ώστε το γεγονός $\{N = n\}$ να ανήκει στο \mathcal{F}_n . Αυτό είναι ισοδύναμο με το ότι η απόφαση για παύση στο n εξαρτάται μόνο από τα X_1, \dots, X_n και όχι από τα X_{n+1}, \dots . Συνεπώς, το πρόβλημα βέλτιστης παύσης έγκειται στην επιλογή του κανόνα παύσης N που μεγιστοποιεί την προσδοκώμενη απολαβή $\mathcal{E}[Y_N]$ (ή πιο σωστά $\mathcal{E}[Y_N | \mathcal{F}_n]$).

Η συγκεκριμένη προσέγγιση είναι γενικότερη από την πρώτη προσέγγιση για το λόγο ότι υπάρχουν σ -πεδία τα οποία δεν παράγονται από τυχαίες μεταβλητές. Παρ' όλα αυτά, οι κανόνες παύσης που ορίζονται με αυτό τον τρόπο είναι μη τυχαίοι. Ωστόσο, χωρίς βλάβη της γενικότητας, κάποιος μπορεί να εστιαστεί σε μη τυχαίους κανόνες παύσης. Αυτό μπορεί να γίνει συνδέοντας σε κάθε X_j μια ανεξάρτητη ομοιόμορφη τυχαία μεταβλητή, $U_j(0, 1)$. Για δεδομένο κανόνα παύσης ϕ μπορεί να διατυπωθεί ένας ισοδύναμος μη τυχαίος κανόνας παύσης σταματώντας στο j αν $U_j < \phi(X_1, \dots, X_j)$.

Ένα από τα πολύ γνωστά προβλήματα βέλτιστης παύσης είναι το πρόβλημα πώλησης σπιτιού, όπου υπάρχει ένα σπίτι διαθέσιμο προς πώληση και σε καθημερινή βάση λαμβάνεται μια διαφορετική προσφορά για την αγορά του, ενώ κάθε προσφορά που παρουσιάζεται έχει ένα κόστος παρατήρησης, το οποίο μπορεί να ερμηνευθεί σαν κόστος ζωής. Επιπρόσθετα, άλλα γνωστά προβλήματα (Ferguson, 2006) είναι το πρόβλημα του μέσου όρου, το πρόβλημα του κουλοχέρη, το πρόβλημα ανίχνευσης σημείου αλλαγής κλπ. Τέλος, σε μια ειδική κατηγορία προβλημάτων βέλτιστης παύσης, η οποία θα περιγραφεί σε επόμενη υποενότητα, ανήκει ένα πολύ γνωστό πρόβλημα, το κλασικό πρόβλημα της γραμματέως.

3.3.2 Βέλτιστος Κανόνας Παύσης

Στη συνέχεια ακολουθούν κάποιοι βασικοί ορισμοί, θεωρήματα και προτάσεις που αφορούν την ύπαρξη του βέλτιστου κανόνα παύσης, τον υπολογισμό του και την αρχή της βελτιστότητας.

Θεώρημα 3.9 (Ferguson, 2006). Έστω το γενικό πρόβλημα βέλτιστης παύσης με την ακολουθία παρατηρήσεων $X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots$ και την ακολουθία των ανταμοιβών $Y_0, Y_1, \dots, Y_\infty$, όπου $Y_n = y_n(X_1, \dots, X_n)$. Αν ικανοποιούνται οι ακόλουθες δυο συνθήκες:

$$A1. \limsup_{n \rightarrow \infty} Y_n \leq Y_\infty \text{ a.s. (almost surely)}$$

$$A2. \mathcal{E}[\sup_n Y_n] < \infty$$

τότε υπάρχει ένας βέλτιστος κανόνας παύσης, δηλαδή υπάρχει ένα N^* τέτοιο ώστε $\mathcal{E}[Y_{N^*}] = V^*$, με $V^* = \sup_N \mathcal{E}[Y_N]$.

Επιπρόσθετα, μια σημαντική έννοια στη θεωρία βέλτιστης παύσης είναι οι κανονικοί κανόνες παύσης, οι οποίοι ορίζονται παρακάτω.

Ορισμός 3.11. Ένας κανόνας παύσης ονομάζεται κανονικός (*regular*), αν για κάθε n , ισχύει

$$\mathcal{E}[Y_N | \mathcal{F}_n] > Y_n \text{ a.s. στο } \{N > n\} \quad (3.41)$$

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η αρχή της βελτιστότητας και η εξίσωση βελτιστότητας οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό ενός βέλτιστου κανόνα παύσης. Αναλυτικότερα, σε ένα πρόβλημα παύσης, ο παίκτης μπορεί να λάβει ανταμοιβή y_0 στο αρχικό στάδιο χωρίς καμία παρατήρηση ή να λάβει V^* ακολουθώντας το βέλτιστο κανόνα. Συνεπώς, είναι βέλτιστο να σταματήσει χωρίς να κάνει καμία παρατήρηση αν και μόνο αν $y_0 = V^*$. Αν εφαρμοστεί αυτό και στα επόμενα στάδια, προκύπτει ότι αν έχουν παρατηρηθεί τα $X_1 = x_1, \dots, X_n = x_n$, ο παίκτης μπορεί να σταματήσει και να λάβει $y_n(x_1, \dots, x_n)$ ή να ακολουθήσει ένα βέλτιστο κανόνα για τα επόμενα στάδια και να λάβει

$$V_n^*(x_1, \dots, x_n) = \sup_{N \geq n} \mathcal{E}[Y_N | X_1 = x_1, \dots, X_n = x_n] \quad (3.42)$$

όπου το $\sup_{N \geq n}$ αντιστοιχεί στο supremum του συνόλου όλων των κανόνων σταματήματος N , τέτοιων ώστε $\Pr(N \geq n) = 1$. Σημειώνεται ότι $V_0^* = V^*$. Επομένως, είναι βέλτιστο να σταματήσει ο παίκτης στο στάδιο n έχοντας παρατηρήσει τα $X_1 = x_1, \dots, X_n = x_n$, αν και μόνο αν $y_n(x_1, \dots, x_n) = V_n^*(x_1, \dots, x_n)$. Αυτό είναι γνωστό ως *αρχή της βελτιστότητας (principle of optimality)*⁷. Η αρχή αυτή ισχύει κάτω από τις συνθήκες A1 και A2 του Θεωρήματος 3.9, όμως θέλει τροποποίηση επειδή γενικά υπάρχουν μη αριθμήσιμοι κανόνες παύσης $N \geq n$. Γι' αυτό το λόγο, χρησιμοποιείται ο όρος του essential supremum, που ορίζεται στη συνέχεια.

Ορισμός 3.12. Έστω X_t ένα σύνολο τυχαίων μεταβλητών για $t \in T$. Μια τυχαία μεταβλητή Z αποτελεί *essential supremum* του $(X_t)_{t \in T}$ και συμβολίζεται ως $Z = \text{ess sup}_{t \in T} X_t$, αν

1. $\Pr(Z \geq X_t) = 1$ για κάθε $t \in T$, και
2. αν υπάρχει οποιαδήποτε άλλη τυχαία μεταβλητή Z' τέτοια ώστε $\Pr(Z' \geq X_t) = 1$ για κάθε $t \in T$, τότε $\Pr(Z' \geq Z) = 1$

Ένα essential supremum, $Z = \text{ess sup}_{t \in T} X_t$ υπάρχει πάντα και επιπρόσθετα, υπάρχει ένα αριθμήσιμο σύνολο $J \in T$, τέτοιο ώστε το $Z = \sup_{t \in J} X_t$ να είναι essential supremum.

Συνεπώς, για

$$V_n^* = \text{ess sup}_{N \geq n} \mathcal{E}[Y_N | \mathcal{F}_n] \quad (3.43)$$

προκύπτει το παρακάτω θεώρημα, το οποίο αποτελεί την *εξίσωση βελτιστότητας (optimality equation)*.

Θεώρημα 3.10 (Ferguson, 2006). *Αν ισχύει η συνθήκη A2 του Θεωρήματος 3.9, τότε ισχύει*

$$V_n^* = \max \{Y_n, \mathcal{E}[V_{n+1}^* | \mathcal{F}_n]\} \quad (3.44)$$

Επομένως, από την αρχή της βελτιστότητας προκύπτει το παρακάτω θεώρημα για το βέλτιστο κανόνα παύσης.

⁷Η αρχή της βελτιστότητας αποτελεί βασική αρχή για προβλήματα δυναμικού προγραμματισμού.

Θεώρημα 3.11 (Ferguson, 2006). *Αν ισχύουν οι συνθήκες A1 και A2 του Θεωρήματος 3.9, τότε ο κανόνας παύσης N^* , ο οποίος δίνεται ως εξής:*

$$N^* = \min\{n \geq 0: Y_n = V_n^*\} \quad (3.45)$$

αποτελεί βέλτιστο κανόνα παύσης.

Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι χρήσιμη η παρακάτω εναλλακτική μορφή του βέλτιστου κανόνα :

$$N^* = \min\{n \geq 0: Y_n \geq \mathcal{E}[V_{n+1}^* | \mathcal{F}_n]\} \quad (3.46)$$

3.3.3 Προβλήματα Πεπερασμένου Ορίζοντα

Ένα πρόβλημα παύσης θεωρείται ότι έχει πεπερασμένο ορίζοντα εάν υπάρχει ένα γνωστό άνω όριο σταδίων (παρατηρήσεων), όπου κάποιος παίκτης μπορεί να σταματήσει. Πιο συγκεκριμένα, εάν ο παίκτης πρέπει να σταματήσει υποχρεωτικά μετά από την παρατήρηση των X_1, \dots, X_T , το πρόβλημα λέγεται *πρόβλημα παύσης πεπερασμένου ορίζοντα (finite horizon stopping problem)*, με ορίζοντα T . Τα προβλήματα πεπερασμένου ορίζοντα αποτελούν μια ειδική περίπτωση των γενικότερων προβλημάτων θέτονας $y_{T+1} = \dots = y_\infty = -\infty$ (για την περίπτωση του προβλήματος μεγιστοποίησης). Γενικότερα, τέτοια προβλήματα συνήθως λύνονται με τη μέθοδο της οπισθοδρομικής επαγωγής (backward induction). Πιο συγκεκριμένα, αφού η παύση πρέπει να γίνει υποχρεωτικά στο T , υπολογίζεται αρχικά ο βέλτιστος κανόνας στο στάδιο $T - 1$, στη συνέχεια στο στάδιο $T - 2$, κ.ο.κ. μέχρι το αρχικό στάδιο 0. Ορίζοντας το $V_T^{(T)}(x_1, \dots, x_T) = y_T(x_1, \dots, x_T)$, προκύπτει με οπισθοδρομική επαγωγή για $j = T - 1$ μέχρι $j = 0$, ότι

$$V_j^{(T)}(x_1, \dots, x_j) = \max\left\{y_j(x_1, \dots, x_j), \mathcal{E}(V_{j+1}^{(T)}(x_1, \dots, x_j, X_{j+1}) | X_1 = x_1, \dots, X_j = x_j)\right\} \quad (3.47)$$

Το $V_j^{(T)}(x_1, \dots, x_j)$ αντιπροσωπεύει τη μέγιστη απολαβή που μπορεί κάποιος να λάβει ξεκινώντας από το στάδιο j και έχοντας παρατηρήσει τα $X_1 = x_1, \dots, X_j = x_j$. Στο στάδιο j , συγκρίνεται η απολαβή $y_j(x_1, \dots, x_j)$ που θα έχει ο παίκτης αν σταματήσει, με την απολαβή που αναμένεται να έχει αν συνεχίσει χρησιμοποιώντας το βέλτιστο κανόνα για τα στάδια $j + 1$ μέχρι T , δηλαδή με το $\mathcal{E}(V_{j+1}^{(T)}(x_1, \dots, x_j, X_{j+1}) | X_1 = x_1, \dots, X_j = x_j)$. Η βέλτιστη απολαβή είναι το μέγιστο αυτών των δύο ποσοτήτων. Επομένως, για ένα παίκτη θεωρείται βέλτιστο να σταματήσει στο j , εάν $V_j^{(T)}(x_1, \dots, x_j) = y_j(x_1, \dots, x_j)$, ενώ σε αντίθετη περίπτωση θα πρέπει να συνεχίσει. Η συνολική τιμή («αξία») του προβλήματος παύσης είναι $V_0^{(T)}$.

Υπάρχουν διάφορα γνωστά προβλήματα πεπερασμένου ορίζοντα. Το πιο γνωστό από αυτά είναι το κλασικό πρόβλημα της γραμματέως (secretary problem), το οποίο συναντάται και ως πρόβλημα του γάμου, και οι διάφορες παραλλαγές του (Freeman, 1983). Πιο συγκεκριμένα, το πρόβλημα της γραμματέως αναφέρεται στο πρόβλημα επιλογής της καλύτερης γραμματέως ανάμεσα σε n υποψήφια για μία διαθέσιμη θέση, δεδομένου ότι οι γραμματείς περνάνε από συνέντευξη διαδοχικά χωρίς επιστροφή (χωρίς δυνατότητα επανάκλησης). Η βέλτιστη λύση για το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι ο «κανόνας του 37%», ο οποίος υποδηλώνει ότι πρέπει να περάσει από συνέντευξη το 37% των υποψηφίων και στη συνέχεια να επιλεγεί η καλύτερη υποψήφια σε σχέση με τις προηγούμενες που

έχουν περάσει μέχρι τότε. Άλλα γνωστά προβλήματα πεπερασμένου ορίζοντα είναι το πρόβλημα του παρκαρίσματος (parking problem) και το πρόβλημα του Cayley-Moser.

3.3.4 Προβλήματα Ποσοστού Απολαβής (Rate of Return)

Στα προβλήματα βέλτιστης παύσης τα οποία επαναλαμβάνονται στο χρόνο θεωρείται συχνά ως πιο κατάλληλος στόχος η μεγιστοποίηση της μέσης απολαβής ανά μονάδα χρόνου. Αυτό οδηγεί σε προβλήματα επιλογής του κανόνα παύσης N , έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί ο λόγος $\mathcal{E}[Y_N]/\mathcal{E}[N]$. Σημειώνεται ότι επιλέγεται ο συγκεκριμένος λόγος και όχι η πραγματική προσδοκώμενη τιμή της απολαβής ανά στάδιο $\mathcal{E}[Y_N/N]$, επειδή αν ένα πρόβλημα επαναλαμβάνεται ανεξάρτητα L φορές με ένα σταθερό κανόνα παύσης, ο οποίος οδηγεί σε ανεξάρτητους και όμοια κατανομημένους (independent and identically distributed - i.i.d.) χρόνους παύσης N_1, \dots, N_L και i.i.d απολαβές Y_{N_1}, \dots, Y_{N_L} , η συνολική απολαβή αντιστοιχεί σε $Y_{N_1} + \dots + Y_{N_L}$ και ο συνολικός χρόνος σε $N_1 + \dots + N_L$. Συνεπώς, η μέση απολαβή ανά μονάδα χρόνου δίνεται από το λόγο $(Y_{N_1} + \dots + Y_{N_L})/(N_1 + \dots + N_L)$. Αν διαιρεθούν και οι δυο όροι με L και υπάρχουν οι αντίστοιχες προσδοκώμενες τιμές, τότε ο λόγος αυτός συγκλίνει στο $\mathcal{E}[Y_N]/\mathcal{E}[N]$ σύμφωνα με το νόμο των μεγάλων αριθμών. Ο λόγος αυτός ονομάζεται ποσοστό απολαβής (rate of return) και ο στόχος είναι η μεγιστοποίηση του.

Σε μια γενικότερη περίπτωση, αν τα διαφορετικά στάδια έχουν διαφορετική χρονική διάρκεια προκύπτει το παρακάτω πρόβλημα βέλτιστης παύσης. Έστω μια ακολουθία παρατηρήσεων X_1, X_2, \dots και δυο ακολουθίες ανταμοιβών Y_1, Y_2, \dots και T_1, T_2, \dots με τις Y_n και T_n να είναι \mathcal{F}_n -μετρήσιμες, όπου \mathcal{F}_n είναι το σ -πεδίο που παράγεται από την ακολουθία X_1, \dots, X_n . Πιο συγκεκριμένα, το Y_n αντιστοιχεί στην απολαβή δεδομένης της παύσης στο n και το T_n αντιστοιχεί στο συνολικό χρόνο που χρειάζεται για να φτάσει κάποιος στο στάδιο n . Όσον αφορά το T_n , αυτό θεωρείται θετικό με $T_1 \leq T_2 \leq \dots$ a.s. Σημειώνεται ότι ισχύει $\mathcal{E}[T_N] \geq \mathcal{E}[T_1] > 0$ και για τους κανόνες παύσης θεωρείται $N \geq 1$. Επιπλέον, για να αποφευχθούν οι απροσδιοριστίες θεωρείται ότι $\mathcal{E}[T_N] < \infty$. Συνεπώς, στα συγκεκριμένα προβλήματα, το σύνολο των κανόνων παύσης ορίζεται ως $\mathcal{C} = \{N: N \geq 1, \mathcal{E}[T_N] < \infty\}$ και ο στόχος είναι η εύρεση του κανόνα παύσης $N \in \mathcal{C}$ που μεγιστοποιεί το ποσοστό απολαβής, το οποίο μπορεί να αναπαρασταθεί μαθηματικά ως εξής:

$$V^* = \sup_{N \in \mathcal{C}} \frac{\mathcal{E}[Y_N]}{\mathcal{E}[T_N]} \quad (3.48)$$

Επιπρόσθετα, ισχύει το παρακάτω θεώρημα που συσχετίζει ένα πρόβλημα ποσοστού απολαβής με τα συνήθη προβλήματα βέλτιστης παύσης, θεωρώντας ως απολαβή το $Y_N - \lambda T_N$ για κάποιο λ .

Θεώρημα 3.12 (Ferguson, 2006). Έστω λ με $\sup_{N \in \mathcal{C}} \mathcal{E}[Y_N - \lambda T_N] = 0$ και για το βέλτιστο $N^* \in \mathcal{C}$ ισχύει $\mathcal{E}[Y_{N^*} - \lambda T_{N^*}] = 0$. Τότε, το $\sup_{N \in \mathcal{C}} \mathcal{E}[Y_N]/\mathcal{E}[T_N] = \lambda$ λαμβάνεται για το N^* , δηλαδή ισχύει $\mathcal{E}[Y_{N^*}]/\mathcal{E}[T_{N^*}] = \lambda$, και αντίστροφα.

Αναφέρεται ότι το βέλτιστο ποσοστό απολαβής λ μπορεί να θεωρηθεί ως ο συντελεστής κόστους ή χρέωσης του χρόνου. Επομένως, ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης ποσοστού απολαβής μπορεί να επιλυθεί ως εξής: αρχικά λύνεται το σύννηθες πρόβλημα βέλτιστης παύσης για το $Y_N - \lambda T_N$ με κάποιο αυθαίρετο λ και βρίσκεται η τιμή του προβλήματος και στη συνέχεια αναζητείται το λ που μηδενίζει την υπολογισμένη τιμή του προβλήματος. Τέλος, ισχύει η παρακάτω πρόταση.

Πρόταση 3.5 (Ferguson, 2006). Έστω ότι για κάθε λ υπάρχει ένας βέλτιστος κανόνας παύσης $N(\lambda) \in \mathcal{C}$, ο οποίος μεγιστοποιεί το $\mathcal{E}[Y_N - \lambda T_N]$ και η βέλτιστη απολαβή δίνεται ως εξής:

$$V(\lambda) = \sup_{N \in \mathcal{C}} [\mathcal{E}[Y_N] - \lambda \mathcal{E}[T_N]] = \mathcal{E}[Y_{N(\lambda)}] - \lambda \mathcal{E}[T_{N(\lambda)}] \quad (3.49)$$

Τότε, η συνάρτηση $V(\lambda)$ είναι φθίνουσα και κυρτή ως προς το λ .

Κεφάλαιο 4

Ενεργειακά Αποδοτικοί Μηχανισμοί Οπορτουνιστικού Χρονοπρογραμματισμού Μετάδοσης Δεδομένων

4.1 Εισαγωγή

Η ραγδαία εξέλιξη των ασύρματων δικτύων επικοινωνιών και των υπηρεσιών δεδομένων, καθώς και η αυξανόμενη ζήτηση για συσκευές μικρής κλίμακας και χαμηλού κόστους (π.χ. αισθητήρες) οι οποίες ενσωματώνουν ισχυρές υπολογιστικές δυνατότητες, οδήγησε στην απαίτηση για αποδοτική διαχείριση των πόρων των δικτύων. Επιπρόσθετα, η αυξανόμενη ζήτηση για μετάδοση δεδομένων μέσω της ασύρματης διεπαφής, σε συνδυασμό με την ελευθερία που προσφέρεται στους ασύρματους χρήστες να μπορούν να επικοινωνούν κινούμενοι μέσα στο δίκτυο, έχουν ως αποτέλεσμα την κατανάλωση μεγάλης ποσότητας ενέργειας. Συνεπώς, δεδομένου ότι ένα μεγάλο ποσοστό της καταναλισκόμενης ενέργειας προέρχεται από τα τμήματα της συσκευής που πραγματοποιούν την επικοινωνία, όπως οι κάρτες διεπαφής δικτύου, η ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών τεχνικών επικοινωνιών έχει γίνει απαραίτητη, έτσι ώστε να διατηρείται μεγάλη αυτονομία για την μπαταρία του τερματικού. Παράλληλα, όπως έχει προαναφερθεί (βλ. Κεφάλαιο 2), το ασύρματο κανάλι εμφανίζει στοχαστικά χαρακτηριστικά (π.χ. διαλείψεις μικρής κλίμακας εξαιτίας των πολυδιαδρομικών φαινομένων, διαλείψεις μεγάλης κλίμακας εξαιτίας των φαινομένων σκίασης). Αυτά συνήθως αντιμετωπίζονται ως μια πηγή αναξιοπιστίας η οποία διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην κατανάλωση της μπαταρίας ενός τερματικού (αφού όταν οι συνθήκες του καναλιού είναι «κακές» (δυσμενείς) απαιτείται μεγαλύτερη ισχύς μετάδοσης για την παροχή αξιόπιστης επικοινωνίας συγκεκριμένης ποιότητας) και αποτελούν μεγάλη πρόκληση για τον αποδοτικό σχεδιασμό των ασύρματων δικτύων. Ωστόσο, από μια άλλη οπτική γωνία, η οπορτουνιστική εκμετάλλευση των χρονομεταβαλλόμενων συνθηκών είναι δυνατή μέσω προγραμματισμού της επικοινωνίας, όταν και όπου το κανάλι είναι «καλό» (ευνοϊκό). Με αυτό τον τρόπο, μπορεί να επιτευχθεί αποδοτικότερη χρησιμοποίηση της μπαταρίας στις ασύρματες επικοινωνίες, εκμεταλλεύοντας ουσιαστικά το ασύρματο κανάλι.

Υποκινούμενο από τα παραπάνω και δεδομένου του πρόσθετου παράγοντα της διασφάλισης της QoS, το κεφάλαιο αυτό προτείνει μηχανισμούς διαχείρισης του χρόνου μετάδοσης των δεδομένων και πιο συγκεκριμένα καταναμημένους μηχανισμούς οπορτουνιστικού χρονοπρογραμματισμού, οι οποίοι ελαχιστοποιούν την κατανάλωση ενέργειας μιας ασύρματης συσκευής. Οι μηχανισμοί αυτοί αναβάλλουν την επικοινωνία και χρησιμοποιούν καινοφανώς τη θεωρία βέλτιστης παύσης με στόχο την εύρεση της βέλτιστης χρονικής στιγμής προκειμένου μια ασύρματη συσκευή να εκπέμψει δεδομένα ανάλογα με τις συνθήκες του ασύρματου καναλιού. Ταυτόχρονα, λαμβάνονται υπόψη συγκεκριμένες απαιτήσεις QoS, οι οποίες αφορούν τη χρονική ανοχή αναβολής της επικοινωνίας και την ισχύ λαμβανόμενου σήματος στο δέκτη. Αναλυτικότερα, το πρόβλημα μοντελοποιείται ως ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης βέλτιστης παύσης και εξετάζονται δυο διαφορετικές προσεγγίσεις: η πρώτη αναφέρεται στην ελαχιστοποίηση της προσδοκώμενης κατανάλωσης ενέργειας και η δεύτερη στην ελαχιστοποίηση της μέσης κατανάλωσης ενέργειας ανά μονάδα χρόνου. Επιπρόσθετα, με στόχο την ενεργειακά αποδοτική σχεδίαση ζευξων επικοινωνίας ευρυζωνικών δορυφορικών τερματικών (satellite terminals) πεπερασμένης μπαταρίας με ένα γεωστατικό (GEO) δορυφόρο, που λειτουργεί σε συχνότητες άνω των 10GHz (π.χ. στις Ku και Ka ζώνες), υπό συνθήκες βροχής, προτείνεται ένας κλιματικά εξαρτώμενος, οπορτουνιστικός χρονοπρογραμματιστής. Ο μηχανισμός αυτός μπορεί να ενσωματωθεί σε σύγχρονα δορυφορικά πρότυπα (π.χ. DVB-S2, DVB-RCS2), έτσι ώστε να παρέχει ενεργειακά αποδοτική μετάδοση δεδομένων.

Συνεπώς, το συγκεκριμένο κεφάλαιο έχει ως σκοπό να παρουσιάσει το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας των ασύρματων τερματικών και στη συνέχεια να προτείνει καινοτόμους, ενεργειακά αποδοτικούς μηχανισμούς, οι οποίοι εξοικονομούν την μπαταρία μιας ασύρματης συσκευής, παρέχοντας συγκεκριμένες ντετερμινιστικές εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας. Αναλυτικότερα, το κεφάλαιο οργανώνεται ως εξής: αρχικά παρουσιάζεται μια πλήρης περιγραφή του βασικού μοντέλου κατανάλωσης ισχύος στα ασύρματα τερματικά και μελετάται το γενικότερο πρόβλημα της ενεργειακής απόδοσης στις ασύρματες επικοινωνίες. Έπειτα, το κεφάλαιο επικεντρώνεται στην τεχνική οπορτουνιστικού προγραμματισμού (opportunistic scheduling) μετάδοσης και παρουσιάζεται εκτενής βιβλιογραφική επισκόπηση των υπάρχοντων σχημάτων. Στη συνέχεια, αναλύονται οι προτεινόμενοι ενεργειακά αποδοτικοί μηχανισμοί οπορτουνιστικού χρονοπρογραμματισμού. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφονται το μοντέλο συστήματος και το μελετώμενο πρόβλημα ελαχιστοποίησης ως πρόβλημα βέλτιστης παύσης και παρουσιάζονται η μαθηματική ανάλυση που καταλήγει στις βέλτιστες πολιτικές μετάδοσης για τις δυο προτεινόμενες προσεγγίσεις και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μαζί με τα προκύπτοντα συμπεράσματα. Ακολουθώντας, αναλύεται ο προτεινόμενος, κλιματικά εξαρτώμενος, ενεργειακά αποδοτικός, οπορτουνιστικός χρονοπρογραμματιστής για δορυφορικά τερματικά που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10GHz. Αναλυτικότερα, παρουσιάζονται τα θεωρούμενα μοντέλα συστήματος και καναλιών, καθώς και ο προτεινόμενος χρονοπρογραμματιστής, ενώ τέλος σχολιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και τα προκύπτοντα συμπεράσματα. Ολοκληρώνοντας, παρουσιάζονται τα συνολικά συμπεράσματα του κεφαλαίου.

4.2 Κατανάλωση Ισχύος στις Ασύρματες Επικοινωνίες

Στη συγκεκριμένη ενότητα, περιγράφεται το βασικό μοντέλο κατανάλωσης ισχύος μιας ασύρματης συσκευής μαζί με τις τυπικές τιμές των παρουσιαζόμενων παραμέτρων. Αναλυτικότερα, μια ασύρματη συσκευή (π.χ. συσκευή αδόμητου δικτύου, αισθητήρας, κλπ.) καταναλώνει ενέργεια κατά την εκτέλεση πολλών διαφορετικών λειτουργιών, όπως η επικοινωνία, η επεξεργασία δεδομένων, η αποθήκευση στη μνήμη κλπ. Το κεφάλαιο αυτό επικεντρώνεται στην κατανάλωση ενέργειας κατά την επικοινωνία, δηλαδή κατά την ανταλλαγή δεδομένων, η οποία αποτελεί μια από τις πιο ενεργοβόρες λειτουργίες ενός ασύρματου τερματικού και είναι ύψιστης σημασίας και ενδιαφέροντος για τους μηχανικούς επικοινωνιών. Για το λόγο αυτό, η συνολική κατανάλωση ισχύος μιας ασύρματης συσκευής (P_{tot}) διαχωρίζεται σε δυο βασικά μέρη: την κατανάλωση ισχύος για επικοινωνία (P_{com}) και την κατανάλωση ισχύος των υπόλοιπων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων (P_{electr}) και δίνεται ως εξής:

$$P_{tot} = P_{com} + P_{electr} \quad (4.1)$$

Ένα ρεαλιστικό μοντέλο μιας μονάδας ασύρματων επικοινωνιών (Q. Wang et al., 2006) παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1. Μια μονάδα ασύρματων επικοινωνιών αποτελείται αρχικά από μια μπαταρία, η οποία παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια στα υπόλοιπα κυκλώματα της συσκευής (ραδιο-κυκλώματα και άλλα ηλεκτρονικά κυκλώματα). Τα ραδιο-κυκλώματα ή αλλιώς κυκλώματα επικοινωνιών είναι υπεύθυνα για την επικοινωνία της συσκευής με το περιβάλλον και συνεπώς και για τη μετάδοση και λήψη των δεδομένων μέσω του κατάλληλα διαμορφωμένου ραδιοσήματος. Πιο συγκεκριμένα, τα ραδιο-κυκλώματα αποτελούνται από τα ψηφιακά κυκλώματα βασικής ζώνης, τα κυκλώματα ενδιάμεσων συχνοτήτων και ραδιοσυχνοτήτων (intermediate frequencies-IF/radio frequencies-RF) (υπεύθυνα για τη μετατροπή συχνότητας, τη διαμόρφωση ή αποδιαμόρφωση του σήματος κλπ.), τους ενισχυτές RF [ενισχυτές ισχύος (power amplifier - PA) για την μετάδοση και ενισχυτές χαμηλού θορύβου (low noise amplifier - LNA) για τη λήψη] και τέλος τον μεταγωγέα, που ρυθμίζει το πότε η μονάδα επικοινωνιών λειτουργεί ως πομπός (Tx) και πότε ως δέκτης (Rx).

Όπως προαναφέρθηκε, το συγκεκριμένο κεφάλαιο επικεντρώνεται στην κατανάλωση ισχύος της επικοινωνίας, δηλαδή στον πρώτο όρο της (4.1), ο οποίος μπορεί να αναλυθεί σε δυο επιπλέον όρους: την καταναλισκόμενη ισχύ μετάδοσης δεδομένων (P_T) και την καταναλισκόμενη ισχύ λήψης (P_R), ως εξής:

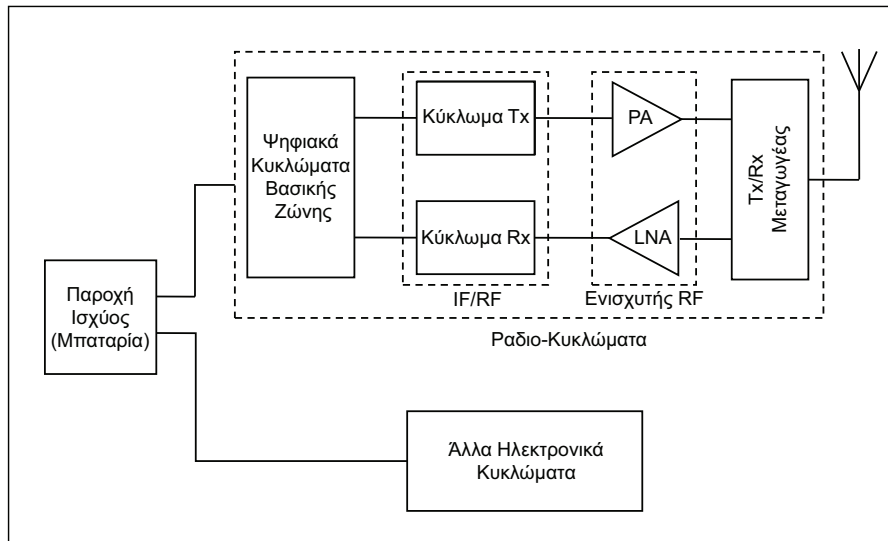
$$P_{com} = P_T + P_R \quad (4.2)$$

Με βάση το Σχήμα 4.1 και θεωρώντας σταθερό ρυθμό δεδομένων, η συνολική κατανάλωση ισχύος για μετάδοση και για λήψη δεδομένων αντίστοιχα, δίνεται ως εξής:

$$P_T(h) = P_{TB} + P_{TRF} + P_A(h) = P_{T0} + P_A(h) \quad (4.3)$$

$$P_R = P_{RB} + P_{RRF} + P_L = P_{R0} \quad (4.4)$$

όπου τα P_{TB} / P_{RB} , P_{TRF} / P_{RRF} και $P_A(h) / P_L$ είναι οι καταναλώσεις ισχύος στα κυκλώματα βασικής ζώνης, στα IF/RF κυκλώματα και στους ενισχυτές κατά τη διάρκεια μετάδοσης και λήψης δεδομένων, αντίστοιχα. Επιπλέον, το $h = |g|^2$ είναι το κέρδος ισχύος του ασύρματου καναλιού (αποτελούμενο από τις απώλειες διάδοσης, τα φαινόμενα σκίασης και πολυδιαδρομικών διαλείψεων)



Σχήμα 4.1: Βασική δομή μονάδας ασύρματων επικοινωνιών.

για συντελεστή καναλιού g . Όπως φαίνεται, η καταναλισκόμενη ισχύς λήψης (P_{R0}) θεωρείται σταθερή και δεν εξαρτάται από την εμβέλεια της επικοινωνίας και τις συνθήκες του καναλιού. Αντίθετα, η καταναλισκόμενη ισχύς μετάδοσης θεωρείται μεταβλητή και χωρίζεται σε δυο μέρη, μια σταθερή ισχύ που δεν εξαρτάται από την εμβέλεια της επικοινωνίας και τις συνθήκες του καναλιού (P_{T0}) και την ισχύ που καταναλώνεται από τον ενισχυτή ισχύος ($P_A(h)$) και εξαρτάται από τις απαιτήσεις μετάδοσης και το ασύρματο κανάλι. Στη συνέχεια παρουσιάζονται, ορισμένες τυπικές τιμές για εμπορικές μονάδες επικοινωνίας RF (Q. Wang et al., 2006). Για τους πομποδέκτες RF CC1000 πολύ χαμηλής ισχύος: $P_{R0} = 22.2\text{mW}$ και $P_{T0} = 15.9\text{mW}$ στα 433MHz και για τους πομποδέκτες RF CC2420, οι οποίοι είναι συμβατοί με τα πρότυπα IEEE 802.15.4 και ZigBee : $P_{R0}=59.1\text{mW}$ και $P_{T0}=26.5\text{mW}$ στα 2.4GHz.

Η ισχύς εξόδου RF του ενισχυτή PA δίνεται ως εξής:

$$P_{Tx}(h) = \eta \cdot P_A(h) \quad (4.5)$$

όπου το η είναι ο δείκτης αποδοτικότητας μετατροπής ισχύος του ενισχυτή (drain efficiency) (Kazimierczuk, 2008), ο οποίος εξαρτάται από την κλάση του ενισχυτή (π.χ. ένας ενισχυτής RF κλάσης B έχει ιδανικά $\eta = 78.5\%$). Συνεπώς, η συνολική κατανάλωση ισχύος μετάδοσης δεδομένων δίνεται ακολουθώντας:

$$P_T(h) = P_{T0} + P_{Tx}(h)/\eta \quad (4.6)$$

Επιπρόσθετα, δεδομένου ενός απαιτούμενου επιπέδου ισχύος του σήματος που φτάνει στο δέκτη (π.χ. ευαισθησία δέκτη) $P_{Rx \min}$, έτσι ώστε να γίνει ορθή αποκωδικοποίηση του σήματος, η καταναλισκόμενη ισχύς μετάδοσης δεδομένων για επικοινωνία μονού άλματος (single-hop) για δεδομένο ασύρματο περιβάλλον, δίνεται από

$$P_T(h) = P_{T0} + \frac{D \cdot P_{Rx \min}}{\eta \cdot h} \quad (4.7)$$

όπου το D μπορεί να υπολογιστεί από τα χαρακτηριστικά των κεραιών.

Τέλος, για επικοινωνία πολλαπλών αλμάτων (multi-hop), η οποία είναι πολύ συνηθισμένη στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα, υπολογίζεται η αντίστοιχη κατανάλωση ισχύος. Θεωρείται ότι οι κόμβοι που μετέχουν σε μια μετάδοση πολλαπλών αλμάτων μπορούν να αποκωδικοποιήσουν και να προωθήσουν το σήμα (decode and forward) χωρίς να το ενισχύουν και επίσης έχουν τα ίδια διαγράμματα ακτινοβολίας. Συνεπώς, η συνολική κατανάλωση ισχύος πολλαπλών αλμάτων (για n άλματα) υπολογίζεται προσθέτοντας τις μεταδιδόμενες και λαμβανόμενες ισχύς των επιμέρους αλμάτων, θεωρώντας τις ίδιες απαιτήσεις λήψης P_{Rxmin} για κάθε κόμβο, ως εξής:

$$P_T(\mathbf{h}, n) = n(P_{R0} + P_{T0}) + \frac{D \cdot P_{Rxmin}}{\eta} \sum_{i=1}^n \frac{1}{h_i} \quad (4.8)$$

όπου το $\mathbf{h} = (h_1, \dots, h_n)$ είναι το διάνυσμα των κερδών ισχύος όλων των αλμάτων.

Το υπόλοιπο κεφάλαιο επικεντρώνεται στην κατανάλωση ισχύος επικοινωνίας θεωρώντας ότι η συνεισφορά της υπερισχύει σε σχέση με την κατανάλωση ισχύος των υπολοίπων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Σημειώνεται ότι, σε κάποιες εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη επεξεργαστική ισχύ (π.χ. βιντεοπαρακολούθηση), η κατανάλωση ισχύος των υπολοίπων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων έχει την κύρια συνεισφορά στη συνολική κατανάλωση ισχύος, αλλά αυτό είναι εκτός του αντικειμένου της συγκεκριμένης Διδακτορικής Διατριβής.

4.3 Πρόβλημα Ενεργειακής Απόδοσης στις Ασύρματες Επικοινωνίες

Τα τελευταία χρόνια, το πρόβλημα της μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας στις ασύρματες επικοινωνίες έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον των ερευνητών σε πολλά επίπεδα της OSI διαστρωμάτωσης. Πολλοί μηχανισμοί έχουν προταθεί με σκοπό τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στα ασύρματα συστήματα, βασιζόμενοι σε εναλλαγές της κατάστασης (αναμονή-sleep/αφύπνιση-wakeup) της ασύρματης κάρτας μιας συσκευής [π.χ. (R. Zheng et al., 2003; Yang & Vaidya, 2004; Peng & Wang, 2008)]. Επιπρόσθετα, η καταναλισκόμενη ενέργεια μπορεί να μειωθεί τροποποιώντας τη διαδικασία σχεδιασμού δρομολόγησης σε υψηλότερα στρώματα OSI (Yu et al., 2007; Farajwala & Cano-Tinoco, 2009). Ωστόσο, οι περισσότερες ερευνητικές προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί στα κατώτερα στρώματα: φυσικό στρώμα και στρώμα ζεύξης δεδομένων.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το γενικό πρόβλημα της ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας επικοινωνίας στα ασύρματα δίκτυα μαζί με τους κυριότερους περιορισμούς που εμφανίζονται συνήθως. Αρχικά, τονίζεται ότι η έννοια των ενεργειακά αποδοτικών επικοινωνιών προέκυψε από τις προσπάθειες των μηχανικών να βελτιστοποιήσουν την κατανάλωση ενέργειας κατά την επικοινωνία. Το γενικό πρόβλημα ελαχιστοποίησης (Cheng et al., 2011) που θεωρείται συνήθως στις ενεργειακά αποδοτικά επικοινωνίες μπορεί να μοντελοποιηθεί ως εξής:

$$\begin{aligned} \min \quad & \{ \text{Κατανάλωση Ενέργειας} \} \\ \text{s.t.} \quad & \text{Περιορισμός Ρυθμού Μετάδοσης ή } SNR_{\text{receiver}} \\ & \text{Περιορισμός Καθυστέρησης} \end{aligned} \quad (4.9)$$

όπου το $SNR_{receiver}$ είναι ο σηματοθρομβικός λόγος (Signal to Noise Ratio - SNR) στο δέκτη. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η καταναλισκόμενη ενέργεια μεταφράζεται στην κατανάλωση ενέργειας για τη μετάδοση ενός bit, δεδομένου ότι η ισχύς μετάδοσης είναι μεταβλητό μέγεθος ως προς το κανάλι και υπάρχει η δυνατότητα προσαρμογής. Η ισχύς μετάδοσης για ένα κανάλι λευκού προσθετικού γκαουσιανού θορύβου (Additive White Gaussian Noise - AWGN) δίνεται από το θεώρημα του Shannon ως εξής:

$$P_{Tx} = \frac{(2^{R/W} - 1) N_0 W}{h} \quad (4.10)$$

όπου το R είναι η χωρητικότητα του καναλιού, το W είναι το εύρος ζώνης του καναλιού, το h είναι το κέρδος ισχύος του καναλιού και το N_0 είναι η πυκνότητα ισχύος του θορύβου. Η ενέργεια μετάδοσης ανά bit (σε μονάδες J/bit) προκύπτει αν η ισχύς μετάδοσης πολλαπλασιαστεί με το χρόνο μετάδοσης ενός bit $1/R$ και δίνεται από

$$E_{cons} = E_{Tx} = \frac{P_{Tx}}{R} = \frac{(2^{R/W} - 1) N_0 W}{hR} \quad (4.11)$$

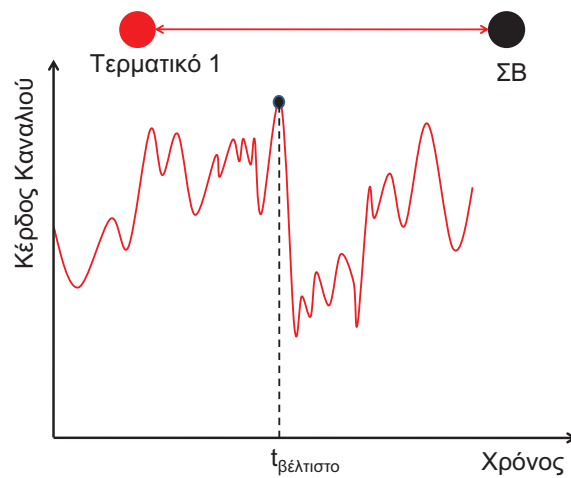
Τέλος, παρουσιάζεται μια χρήσιμη μετρική για την αξιολόγηση μιας ενεργειακά αποδοτικής τεχνικής. Η μετρική αυτή ονομάζεται κέρδος ενεργειακής απόδοσης \mathcal{G}_{EE} και αποτελεί το κέρδος ενέργειας που επιτυγχάνεται συγκρίνοντας την κατανάλωση ενέργειας χρησιμοποιώντας την συγκεκριμένη τεχνική ($E_{cons,w/-}$) και την κατανάλωση ενέργειας χωρίς τη χρήση της ($E_{cons,w/o}$) και η οποία μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\mathcal{G}_{EE} = \left(1 - \frac{E_{cons,w/-}}{E_{cons,w/o}} \right) \times 100\% \quad (4.12)$$

4.4 Οπορτουλιστικός Προγραμματισμός Μετάδοσης και Σχετική Βιβλιογραφία

Στη συγκεκριμένη ενότητα, εξετάζεται η τεχνική του οπορτουλιστικού προγραμματισμού, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενεργειακά αποδοτική χρήση της πεπερασμένης μπαταρίας των ασύρματων συσκευών. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι βασικές αρχές του οπορτουλιστικού προγραμματισμού και γίνεται μια πλήρης βιβλιογραφική επισκόπηση των υπάρχοντων σχημάτων.

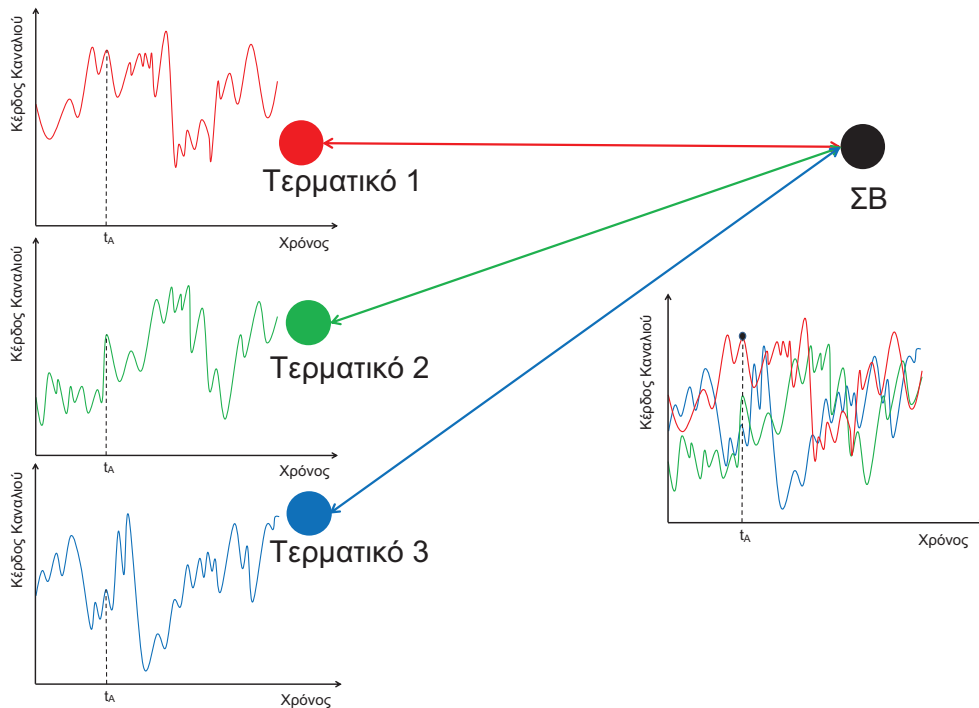
Όπως έχει προαναφερθεί, οι συνθήκες του καναλιού επικοινωνίας στα ασύρματα δίκτυα αλλάζουν τυχαία από χρονική στιγμή σε χρονική στιγμή και από χρήστη σε χρήστη, ανάλογα με τις μεταβολές του περιβάλλοντος. Παρόλο που οι διακυμάνσεις του καναλιού παραδοσιακά αντιμετωπιζονταν ως πηγές αναξιопιστίας, σύμφωνα με πρόσφατες ερευνητικές μελέτες, αυτές μπορούν να αξιοποιηθούν οπορτουλιστικά μέσω προγραμματισμού της μετάδοσης των δεδομένων, όταν και όπου οι συνθήκες του καναλιού είναι ευνοϊκές. Ο οπορτουλιστικός προγραμματισμός (Q. Zhang et al., 2007; G ulpınar et al., 2011) αναφέρεται συνήθως στην οπορτουλιστική μετάδοση δεδομένων, δηλαδή στη μετάδοση δεδομένων (ή στη μετάδοση περισσότερων δεδομένων) όταν το κανάλι μεταξύ του αποστολέα (π.χ. τερματικό) και του παραλήπτη (π.χ. Σταθμός Βάσης - ΣΒ) βρίσκεται σε «καλή» κατάσταση και στη μη μετάδοση δεδομένων (ή αντίστοιχα στη μετάδοση λιγότερων δεδομένων) όταν η κατάσταση είναι «κακή». Η τεχνική αυτή αυξάνει την ρυθμοαπόδοση του συστήματος και μειώνει την κατανάλωση ενέργειας του τερματικού.



Σχήμα 4.2: Προγραμματισμός μετάδοσης διαφορισμού χρόνου.

Ο οπορτουνοιστικός προγραμματισμός μπορεί να χωριστεί σε δυο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία είναι ο οπορτουνοιστικός προγραμματισμός διαφορισμού χρόνου (time diversity scheduling) ή αλλιώς οπορτουνοιστικός χρονοπρογραμματισμός (time scheduling), ο οποίος εκμεταλλεύεται τις διακυμάνσεις του ασύρματου καναλιού στο χρόνο και επιλέγει την καλύτερη χρονική στιγμή για επικοινωνία. Με άλλα λόγια, ο πομπός εκπέμπει δεδομένα (ή εκπέμπει δεδομένα με μεγαλύτερο ρυθμό) όταν οι συνθήκες του καναλιού είναι καλύτερες, ενώ αναστέλλει την μετάδοση δεδομένων (ή μεταδίδει δεδομένα με χαμηλότερο ρυθμό) όταν οι συνθήκες του καναλιού είναι χειρότερες (βλ. Σχήμα 4.2). Η δεύτερη κατηγορία είναι ο οπορτουνοιστικός προγραμματισμός διαφορισμού πολλαπλών χρηστών (multi-user diversity scheduling), ο οποίος εκμεταλλεύεται τις μεταβλητές συνθήκες καναλιού από χρήστη σε χρήστη (ετερογένεια στο χρόνο και στο χώρο) και επιλέγει τον «καλύτερο» χρήστη για επικοινωνία σε όρους συνθηκών καναλιού. Σε ένα δίκτυο πολλαπλών χρηστών οι οποίοι επικοινωνούν με έναν ΣΒ, όπως αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 4.3, ο προγραμματισμός της μετάδοσης των δεδομένων τους, βελτιώνει την απόδοση του δικτύου, επιλέγοντας τον χρήστη με τις καλύτερες συνθήκες καναλιού.

Η βασική θεώρηση στις τεχνικές προγραμματισμού μετάδοσης είναι η γνώση της κατάστασης του καναλιού (Channel State Information - CSI), έτσι ώστε να μπορεί να αποφασιστεί αν, πότε και που θα πραγματοποιηθεί η επικοινωνία μεταξύ των ασύρματων τερματικών. Σύμφωνα με αυτή τη θεώρηση, ο προγραμματιστής μετάδοσης μπορεί να έχει πλήρη γνώση της κατάστασης του καναλιού μεταξύ του εκάστοτε πομπού και δέκτη στην αρχή κάθε χρονοθυρίδας, μέσω ενός καναλιού ανάδρασης (feedback channel). Όταν συμβαίνει αυτό και επιπρόσθετα όταν οι αποφάσεις προγραμματισμού βασίζονται σε όλες τις προηγούμενες και τις τρέχουσες καταστάσεις καναλιού, αλλά όχι στις μελλοντικές, η γνώση CSI συνήθως αναφέρεται ως αιτιατή ή πλήρης. Ο προγραμματισμός τέτοιου είδους αναφέρεται και ως προγραμματισμός «εντός λειτουργίας» (online) ή πραγματικού χρόνου για να διαφοροποιηθεί από την τεχνική κατά την οποία ο προγραμματιστής θεωρείται ότι



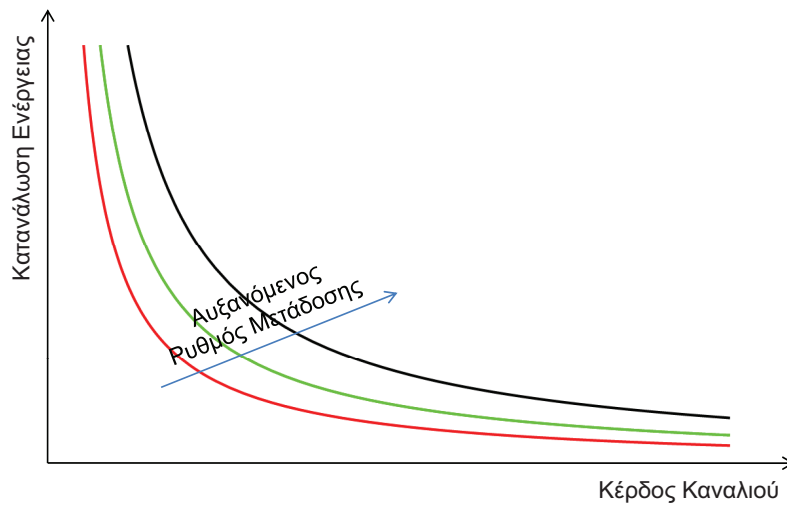
Σχήμα 4.3: Προγραμματισμός μετάδοσης διαφορισμού πολλαπλών χρηστών.

μαθαίνει τις μελλοντικές καταστάσεις του καναλιού στην αρχή του χρονικού οριζοντα και ονομάζεται προγραμματισμός μη αιτιατός ή «εκτός λειτουργίας» (offline). Εντούτοις, η πλήρης γνώση CSI είναι μια ιδανική υπόθεση, η οποία σε πολλές περιπτώσεις δεν μπορεί να υλοποιηθεί στην πράξη. Γι' αυτό το λόγο, πολλοί ερευνητές χρησιμοποιούν ως υπόθεση τη μερική γνώση CSI που είναι μια πιο ρεαλιστική θεώρηση, καθώς λαμβάνονται υπόψη οι διάφορες αβεβαιότητες στην απόκτηση της CSI.

4.4.1 Προγραμματισμός Μετάδοσης Διαφορισμού Χρόνου

Στη συνέχεια, περιγράφεται με ποιόν τρόπο ο προγραμματισμός μετάδοσης διαφορισμού χρόνου μπορεί να προσφέρει ενεργειακή απόδοση, παρουσιάζοντας τα υπάρχοντα σχήματα στη βιβλιογραφία. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται δυο κύριες προσεγγίσεις, οι οποίες βασίζονται στη σχέση της κατανάλωσης ενέργειας με το κέρδος του καναλιού και τον ρυθμό μετάδοσης (χωρητικότητα καναλιού) [βλ. (4.11)]. Η σχέση αυτή μπορεί να απεικονιστεί γραφικά από το σύνολο των καμπυλών του Σχήματος 4.4. Όπως παρατηρείται, η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να μειωθεί σημαντικά αν η μετάδοση των δεδομένων προγραμματιστεί όταν το κέρδος του καναλιού είναι μεγάλο για συγκεκριμένο ρυθμό μετάδοσης. Αυτό μπορεί να υλοποιηθεί, ορίζοντας μια τιμή-κατώφλι για το κέρδος του καναλιού, η οποία αν ξεπεραστεί ο χρήστης θα μεταδίδει δεδομένα. Επιπρόσθετα, μείωση της κατανάλωσης ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί αν ο ρυθμός μετάδοσης προσαρμοστεί με βάση την τρέχουσα κατάσταση του καναλιού. Παρακάτω, παρουσιάζονται οι ερευνητικές εργασίες που αφορούν τον ενεργειακά αποδοτικό προγραμματισμό διαφορισμού χρόνου.

Ένα καταναμημένο συνεργατικό σχήμα προσαρμογής ρυθμού μετάδοσης προτάθηκε στην ερευνητική εργασία (Q. Zhang et al., 2007), με στόχο την επίτευξη ενεργειακής απόδοσης σε ασύρ-



Σχήμα 4.4: Κατανάλωση ενέργειας ως προς το κέρδος καναλιού για διαφορετικές τιμές ρυθμού μετάδοσης.

ματα αδόμητα δίκτυα μέσω οπορτουνοιστικής μετάδοσης δεδομένων, εκμεταλλεύοντας το διαφορισμό χρόνου. Δεδομένου ότι είναι δύσκολο να βελτιστοποιηθεί η συνολική απόδοση του συστήματος χωρίς συνεργασία μεταξύ των κόμβων του δικτύου, οι συγγραφείς πρότειναν ένα σχήμα συνεργατικής και οπορτουνοιστικής μετάδοσης σε περιβάλλοντα διαλείψεων. Πιο συγκεκριμένα, ο προτεινόμενος μηχανισμός περιλαμβάνει ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ των κόμβων και επιλογή του ρυθμού μετάδοσης του καθενός, τα οποία μπορούν να πραγματοποιηθούν μέσω συνεργασίας των κόμβων. Αρχικά, ο κάθε κόμβος λαμβάνει τη σχετική πληροφορία για όλες τις ζεύξεις μέσα στην εμβέλεια παρεμβολής του. Η πληροφορία αυτή περιλαμβάνει τον απαιτούμενο χρόνο για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις κίνησης και την αντίστοιχη κατανάλωση ισχύος για όλους τους πιθανούς ρυθμούς μετάδοσης της εκάστοτε ζεύξης. Στη συνέχεια, όλοι οι κόμβοι υπολογίζουν το πλέον ενεργειακά αποδοτικό σύνολο ρυθμών μετάδοσης για όλες τις ζεύξεις μέσα στην εμβέλεια παρεμβολής τους, χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο επιλογής ρυθμού. Ακολούθως, ο εκάστοτε κόμβος ενημερώνει τους γείτονες του για την εφικτότητα του νέου συνόλου ρυθμών, δηλαδή για το αν οι περιορισμοί σε QoS ικανοποιούνται. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να υπάρξει σύγκλιση και το σύνολο των ρυθμών να γίνει εφικτό. Το υπολογιζόμενο σύνολο ρυθμών εφαρμόζεται για την επικοινωνία και έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Το προτεινόμενο ρυθμοπροσαρμοστικό πρόβλημα ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας είναι NP-πλήρες και για να λυθεί οι συγγραφείς το αποσύνθεσαν σε υποπροβλήματα για τον κάθε κόμβο, τα οποία επιλύθηκαν με μια ευρετική (heuristic) μέθοδο.

Στην ερευνητική εργασία (Van Phan & Kim, 2007), οι συγγραφείς πρότειναν ένα ενεργειακά αποδοτικό σχήμα για WSN με κανάλια διαλείψεων. Με βάση τον προτεινόμενο οπορτουνοιστικό μηχανισμό, η μετάδοση των δεδομένων ξεκινάει μόνο όταν είναι εφικτό και κάτω από ευνοϊκές συνθήκες καναλιού. Αναλυτικότερα, χρησιμοποιείται ο συνδυασμός δυο τμημάτων του πρωτοκόλλου

MAC, η μετάδοση που βασίζεται σε δυαδική απόφαση και η backoff προσαρμογή που βασίζεται στη γνώση του καναλιού. Το σχήμα μετάδοσης προσδιορίζει πότε θα ξεκινήσει η μετάδοση σύμφωνα με την τρέχουσα κατάσταση του καναλιού. Πιο συγκεκριμένα, η μετάδοση αρχίζει μόνο όταν το κέρδος του καναλιού ξεπερνάει μια βέλτιστη τιμή κατωφλίου, η οποία προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας μια διαδικασία απόφασης Markov και υπολογίζεται με τεχνικές δυναμικού προγραμματισμού. Αυτή η τεχνική αποφεύγει την άσκοπη κατανάλωση ενέργειας. Επιπρόσθετα, ο αλγόριθμος backoff προσαρμογής ευνοεί του κόμβους αισθητήρων που έχουν καλύτερες συνθήκες καναλιού, εκχωρώντας τους μικρότερο παράθυρο ανταγωνισμού (contention window), έτσι ώστε να έχουν γρηγορότερη πρόσβαση στο κανάλι σε σχέση με τους υπόλοιπους. Μέσω προσομοιώσεων, οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι εισήχθησαν στο πρότυπο IEEE 802.11 με κάποιες τροποποιήσεις και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το σχήμα βελτιώνει την ενεργειακή απόδοση μέχρι και 70% σε σχέση με το απλό IEEE 802.11, ενώ η προκύπτουσα ρυθμοαπόδοση είναι συγκρίσιμη.

Οι συγγραφείς στην εργασία (Chakraborty et al., 2006) παρουσίασαν ένα σχήμα ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας, το οποίο χρονοπρογραμματίζει τη μετάδοση των δεδομένων εκμεταλλευόμενο την ιστορία κίνησης ενός ασύρματου κινητού κόμβου. Σύμφωνα με το σχήμα αυτό, η επικοινωνία μπορεί να αναβληθεί μέχρι ένα ανεκτό χρονικό όριο, με την προσδοκία για μικρότερες απώλειες διάδοσης. Πιο συγκεκριμένα, οι συγγραφείς εκμεταλλεύονται το γεγονός ότι η μείωση της φυσικής απόστασης κατά την επικοινωνία δύο κόμβων, συνήθως οδηγεί σε μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Αυτό είναι προφανές στην περίπτωση της επικοινωνίας μονού άλματος, αφού η κατανάλωση ισχύος είναι ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης μεταξύ των επικοινωνούντων κόμβων (κάτω από συνθήκες LoS). Εντούτοις, στην περίπτωση της επικοινωνίας πολλαπλών αλμάτων, η μείωση της φυσικής απόστασης δεν συνεπάγεται πάντα μείωση δικτυακής απόστασης, καθώς υπάρχουν και άλλοι σημαντικοί παράγοντες που παίζουν ρόλο, όπως είναι η κατάσταση του δικτύου και η πυκνότητα των κόμβων. Ωστόσο, το μήκος των επιμέρους αλμάτων θα είναι μικρότερο και σε ένα σχετικά αραιό δίκτυο, η μείωση της φυσικής απόστασης είναι πολύ πιθανόν να εξοικονομήσει ενέργεια.

Πιο αναλυτικά, η συγκεκριμένη ερευνητική εργασία εξετάζει το πρόβλημα της πρόβλεψης του πότε η φυσική απόσταση μεταξύ δύο κόμβων θα μειωθεί. Εάν προβλεφθεί ότι ένας κινητός κόμβος θα κινηθεί προς το μέρος του άλλου, η επικοινωνία αναβάλλεται για κάποια μελλοντική χρονική στιγμή έως ένα άνω χρονικό όριο για την εκάστοτε εφαρμογή. Συνεπώς, αν ο κόμβος αποφασίσει να αναβάλλει την επικοινωνία, στη συνέχεια θα πρέπει να αποφασίσει πότε θα επικοινωνήσει μέσα στο ανεκτό χρονικό όριο. Το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι ανάλογο με ένα πολύ γνωστό πρόβλημα στη θεωρία βέλτιστης παύσης, το πρόβλημα της γραμματέως (βλ. Κεφάλαιο 3). Υπενθυμίζεται ότι η λύση του προβλήματος της γραμματέως είναι ο «κανόνας του 37%», σύμφωνα με τον οποίο αρχικά αξιολογείται το 37% των υποψηφίων και στη συνέχεια επιλέγεται η επόμενη υποψήφια που θα εμφανιστεί με τη μεγαλύτερη βαθμολογία συγκριτικά με όλες τις προηγούμενες. Βασιζόμενοι σε αυτόν τον κανόνα, οι συγγραφείς πρότειναν μια βέλτιστη πολιτική, η οποία αποτελείται από την απλή αλλά αποδοτική ευρετική μέθοδο της ελαχίστης απόστασης. Πιο συγκεκριμένα, δεδομένου του ιστορικού των θέσεων του κόμβου, θεωρήθηκε ότι το πρώτο 37% των «υποψηφίων», δηλαδή των αποστάσεων μεταξύ των κόμβων, έχει περάσει και συνεπώς οι κόμβοι θα επικοινωνήσουν με την πρώτη ευκαιρία που η απόσταση τους είναι μικρότερη ή ίση από την ελάχιστη που έχει παρατηρηθεί μέχρι την τρέχουσα χρονική στιγμή, σύμφωνα με το ιστορικό. Γι' αυτό το λόγο, ο κόμβος ελέγχει

σε κάθε χρονοθυρίδα εάν η τρέχουσα απόσταση είναι μικρότερη ή ίση από την τρέχουσα ελάχιστη, χωρίς να ξεπερνιέται το άνω χρονικό όριο, έτσι ώστε να πραγματοποιήσει την μετάδοση δεδομένων.

Στην ερευνητική εργασία (J. Lee & Jindal, 2009) προτάθηκαν σχεδόν-βέλτιστες (near-optimal) πολιτικές χαμηλής πολυπλοκότητας για το πρόβλημα του χρονοπρογραμματισμού μιας ζεύξης σημείου προς σημείο, με περιορισμό καθυστέρησης. Πιο συγκεκριμένα, θεωρείται το πρόβλημα της μετάδοσης B bits μέσα σε χρονικό διάστημα T για κανάλι διαλείψεων με ανεξάρτητες μεταβολές από χρονοθυρίδα σε χρονοθυρίδα. Ο χρονοπρογραμματιστής μετάδοσης αποφασίζει πόσα bits θα μεταδοθούν σε κάθε χρονοθυρίδα, ανάλογα με την τρέχουσα κατάσταση του καναλιού και τον αριθμό των υπολειπόμενων προς μετάδοση bits. Το προτεινόμενο σχήμα ισοσταθμίζει κατά βέλτιστο τρόπο την οπορτουνιστικότητα (δεδομένης της γνώσης του καναλιού) και το μέγιστο χρονικό όριο καθυστέρησης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μοντελοποιηθεί η ντετερμινιστική κίνηση σε μεταδόσεις πολυμέσων όταν υπάρχουν αυστηρά χρονικά όρια.

Αναλυτικότερα, ο προτεινόμενος χρονοπρογραμματιστής καθορίζει τον αριθμό των bits που θα εξυπηρετηθούν σε κάθε χρονική στιγμή, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η προσδοκώμενη κατανάλωση ενέργειας και να μεταδοθούν όλα τα δεδομένα μέσα στο χρονικό όριο T . Ο μηχανισμός αυτός λαμβάνει υπόψη ένα συνδυασμό παραμέτρων: τα εναπομείναντα bits, τον αριθμό των υπόλοιπων χρονοθυρίδων, την τρέχουσα κατάσταση καναλιού, καθώς και ένα κατώφλι καναλιού. Όταν το τρέχον κέρδος καναλιού είναι ίσο με την τιμή του κατώφλιου, τότε μεταδίδεται ένα ποσοστό των εναπομεινάντων bits. Εάν το κέρδος του καναλιού είναι μεγαλύτερο ή μικρότερο από το κατώφλι, τότε μεταδίδονται περισσότερα ή λιγότερα bits, αντίστοιχα. Συνεπώς, ο χρονοπρογραμματιστής συμπεριφέρεται περισσότερο οπορτουνιστικά όταν η τρέχουσα χρονική στιγμή είναι μακριά από το T , και λιγότερο οπορτουνιστικά όταν προσεγγίζεται το T . Το πρόβλημα βελτιστοποίησης μοντελοποιείται ακολουθιακά μέσω του δυναμικού προγραμματισμού. Λόγω της δυσκολίας εύρεσης αναλυτικής λύσης για τον βέλτιστο χρονοπρογραμματιστή, προτάθηκαν υπο-βέλτιστοι (sub-optimal) αλγόριθμοι. Επιπρόσθετα, εξετάστηκε η περίπτωση της μετάδοσης μικρού αριθμού bits, κατά την οποία η μετάδοση ολόκληρου του πακέτου μπορεί να είναι επιθυμητή για να αποφευχθεί η αύξηση της πλεονάζουσας πληροφορίας (overhead) εξαιτίας των πολλαπλών μεταδόσεων.

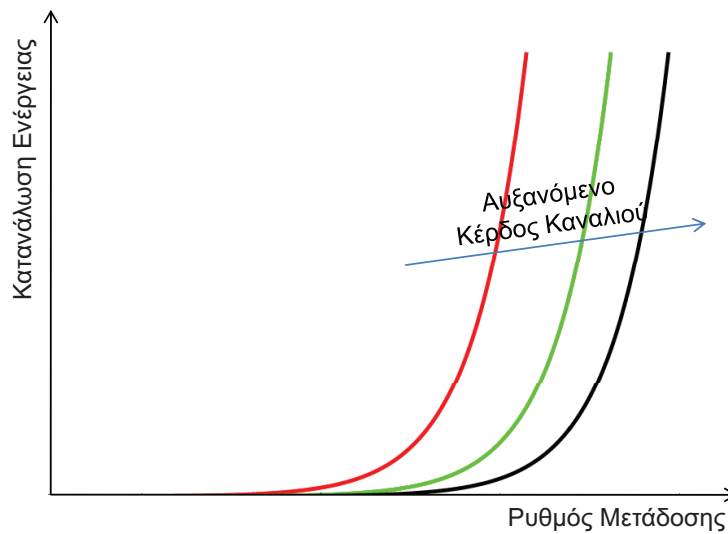
Τέλος, ένα πολύ σημαντικό θέμα που δεν πρέπει να αγνοείται είναι το κόστος της απόκτησης της CSI, δεδομένου ότι η τεχνική του οπορτουνιστικού χρονοπρογραμματισμού απαιτεί την γνώση της κατάστασης του καναλιού. Οι συγγραφείς στην εργασία (Li & Neely, 2010) θεώρησαν βέλτιστους αλγόριθμους χρονοπρογραμματισμού σε όρους ενέργειας και ρυθμοαπόδοσης. Πιο συγκεκριμένα, προτάθηκε ένας δυναμικός αλγόριθμος απόκτησης της CSI που σταθεροποιεί την ασύρματη κάτω ζεύξη, λαμβάνοντας υπόψη την πιο ρεαλιστική θεώρηση ότι η απόκτηση της CSI δημιουργεί επιπρόσθετη κατανάλωση ισχύος. Δεδομένου ότι μπορεί να είναι επαρκές και περισσότερο ενεργειακά αποδοτικό να μεταδίδονται δεδομένα χωρίς τη γνώση CSI, σε περιπτώσεις χαμηλής κίνησης, οι συγγραφείς πρότειναν ένα δυναμικό αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού, ο οποίος επιτυγχάνει μετάδοση δεδομένων με ή χωρίς γνώση CSI, χρησιμοποιώντας ουρές αναμονής και στατιστικά καναλιού. Οι προσομοιώσεις επιβεβαίωσαν ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος προσαρμόζεται μεταξύ των λειτουργιών γνώσης και μη γνώσης του καναλιού για διάφορες παραμέτρους συστήματος, συμπεριλαμβανομένων διαφορετικών τιμών της ισχύος ανίχνευσης καναλιού, ισχύων μετάδοσης και ρυθμών μετάδοσης δεδομένων.

4.4.2 Προγραμματισμός Μετάδοσης Διαφορισμού Πολλαπλών Χρηστών

Η παρουσία πολλαπλών χρηστών στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών, οι οποίοι υπόκεινται σε ανεξάρτητες διαλείψεις, έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη πιθανότητα ένας ή περισσότεροι χρήστες να έχουν καλό κανάλι κάποια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Επιτρέποντας μόνο σε αυτούς τους χρήστες να μεταδώσουν δεδομένα τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή, το κοινό μέσο χρησιμοποιείται πιο αποδοτικά και η συνολική απόδοση του συστήματος μεγιστοποιείται. Όσο περισσότεροι είναι οι χρήστες του δικτύου, τόσο μεγαλύτερη πιθανότητα υπάρχει για καλά κανάλια και το κέρδος του διαφορισμού πολλαπλών χρηστών είναι μεγαλύτερο. Παρομοίως με την περίπτωση του διαφορισμού χρόνου που εξετάστηκε στην προηγούμενη υποενότητα, οι κυριότερες προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται για ενεργειακά αποδοτικό διαφορισμό πολλαπλών χρηστών, βασίζονται στη συνάρτηση της κατανάλωσης ενέργειας (4.11). Το Σχήμα 4.5 απεικονίζει το σύνολο των καμπυλών της κατανάλωσης ενέργειας ως προς το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων για διαφορετικές τιμές στιγμιαίου κέρδους καναλιού, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις συνθήκες καναλιού των διαφορετικών χρηστών που θέλουν να επικοινωνήσουν με τον ίδιο κόμβο. Όπως παρατηρείται, η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να μειωθεί σημαντικά αν επιλεγεί ο καλύτερος χρήστης ή το σύνολο των καλύτερων χρηστών σε όρους συνθηκών καναλιού, οι οποίοι θα γίνουν ενεργοί χρήστες (αντιπρόσωποι) και θα μεταδώσουν δεδομένα κάτω από συγκεκριμένους περιορισμούς (π.χ. περιορισμός ρυθμού μετάδοσης). Ένα κρίσιμο ζήτημα που εμφανίζεται είναι η στρατηγική επιλογής των ενεργών χρηστών, η οποία θα μπορούσε για παράδειγμα να είναι μια πολιτική καταφλίου όπως στην περίπτωση του προγραμματισμού μετάδοσης διαφορισμού χρόνου. Παράλληλα, ο προγραμματιστής μετάδοσης διαφορισμού πολλαπλών χρηστών θα πρέπει να εξασφαλίζει ένα συγκεκριμένο επίπεδο δικαιοσύνης μεταξύ των χρηστών, το οποίο δεν θυσιάζεται για να επιτευχθεί μεγαλύτερη απόδοση συστήματος. Επιπρόσθετα, μείωση της κατανάλωσης ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί αν για τον κάθε χρήστη προσαρμόζεται ο ρυθμός μετάδοσης του ανάλογα με τις συνθήκες καναλιού του. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι ερευνητικές εργασίες που έχουν προταθεί όσον αφορά την συγκεκριμένη ενεργειακά αποδοτική τεχνική.

Οι συγγραφείς στην ερευνητική εργασία (Bhorkar et al., 2006), παρουσίασαν ενεργειακά βέλτιστες στρατηγικές οπορτουνοιστικού ελέγχου για ένα TDMA δίκτυο πολλαπλών χρηστών, δεδομένων κάποιων περιορισμών ελάχιστου ρυθμού μετάδοσης. Πιο συγκεκριμένα, θεωρείται ένα TDMA σύστημα, όπου ο χρόνος χωρίζεται σε χρονοθυρίδες ίσης διάρκειας και το ασύρματο κανάλι παρουσιάζει διαλείψεις μεγάλης κλίμακας. Επιπλέον, ο ΣΒ έχει το ρόλο του κεντροκοποιημένου προγραμματιστή μετάδοσης, ο οποίος έχει τέλεια γνώση της CSI για όλες τις ασύρματες ζεύξεις και καθορίζει τον μοναδικό χρήστη που θα μεταδώσει σε κάθε χρονοθυρίδα, καθώς και την ισχύ μετάδοσης του, δεδομένου ενός περιορισμού ρυθμού μετάδοσης. Η προτεινόμενη μέθοδος προγραμματίζει να μεταδώσει δεδομένα ο χρήστης με τις καλύτερες συνθήκες καναλιού, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ένας συγκεκριμένος ρυθμός μετάδοσης ταυτόχρονα με τη χρονική δικαιοσύνη μεταξύ των χρηστών, με στόχο την ελαχιστοποίηση της μέσης κατανάλωσης ισχύος.

Αναλυτικότερα, οι συγγραφείς της συγκεκριμένης εργασίας πρότειναν ένα πρόβλημα από κοινού ελαχιστοποίησης της μέσης ισχύος μετάδοσης, δεδομένου του περιορισμού μέσου ρυθμού μετάδοσης. Χρησιμοποιώντας την Lagrangian μέθοδο και μια στοχαστική προσέγγιση που βασίζεται σε έναν online αλγόριθμο για την εκτίμηση των απαραίτητων παραμέτρων, υπολογίζεται η βέλτιστη πο-



Σχήμα 4.5: Κατανάλωση ενέργειας ως προς το ρυθμό μετάδοσης για διαφορετικά κέρδη καναλιού (διαφορετικοί χρήστες).

λιτική επιλογής του χρήστη που θα μεταδώσει και της αντίστοιχης ισχύος μετάδοσης. Επιπρόσθετα με το στόχο της ενεργειακής απόδοσης, θεωρείται ένας επιπλέον μακροπρόθεσμος περιορισμός δικαιοσύνης μέσου ποσοστού χρονοθυρίδων που κατανέμονται σε κάθε χρήστη. Ο συγκεκριμένος περιορισμός εξασφαλίζει ότι ο κάθε χρήστης θα μεταδίδει δεδομένα για ένα συγκεκριμένο μέσο ποσοστό του συνολικού χρόνου, έτσι ώστε να γίνεται δίκαιος διαμοιρασμός της πρόσβασης. Επιπλέον, για να ξεπεραστούν τα προβλήματα του μακροπρόθεσμου περιορισμού, προτάθηκε και ένας προγραμματιστής βραχυπρόθεσμης δικαιοσύνης μέσω ενός ευρετικού αλγορίθμου. Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν το γεγονός ότι όταν αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών το κέρδος που λαμβάνεται από την τεχνική διαφορισμού πολλαπλών χρηστών μεγαλώνει.

Στην ερευνητική εργασία (Hwang et al., 2009) προτείνεται μια μέθοδος που μειώνει την κατανάλωση ισχύος μετάδοσης σε WLAN τα οποία βασίζονται στο πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης με ανίχνευση φέροντος (Carrier Sense Multiple Access - CSMA), χρησιμοποιώντας τον διαφορισμό πολλαπλών χρηστών και τον έλεγχο ισχύος. Σύμφωνα με αυτό το σχήμα, ένα τερματικό στέλνει ένα πακέτο δεδομένων σε κάποια χρονοθυρίδα, εάν ο SNR είναι μεγαλύτερος από ένα συγκεκριμένο κατώφλι που σχετίζεται με τη συγκεκριμένη χρονοθυρίδα. Ο διαφορισμός πολλαπλών χρηστών επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας το οπορτουνιστικό p-επίμονο CSMA (opportunistic p-persistent CSMA - OpCSMA) σχήμα. Σύμφωνα με το απλό pCSMA σχήμα, κάθε χρήστης αποκτάει πρόσβαση στο ασύρματο μέσο με πιθανότητα p , ανεξάρτητα από την τιμή του αντίστοιχου SNR του. Αντίθετα, στο σχήμα OpCSMA, ο κάθε χρήστης διατηρεί την ίδια πιθανότητα πρόσβασης χρησιμοποιώντας όμως μια τυχαία μεταβλητή που καθορίζεται από την τιμή του SNR, εκμεταλλεύοντας τον διαφορισμό πολλαπλών χρηστών. Πιο αναλυτικά, ένας χρήστης αποκτάει πρόσβαση στο κανάλι μόνο εάν ο SNR του ξεπερνάει μια προκαθορισμένη τιμή κατώφλιου, η οποία προκύπτει από έναν τύπο σχετιζόμενο με την αντίστροφη αθροιστική συνάρτηση κατανομής (cumulative distribution function -

cdf) του SNR, κατά τη διάρκεια μιας χρονοθυρίδας. Η τιμή του κατωφλίου μειώνεται όσο περνάει ο χρόνος, επιτρέποντας στον χρήστη με την υψηλότερη τιμή SNR να αποκτάει πρόσβαση στο κοινό κανάλι νωρίτερα απ' ό,τι οι υπόλοιποι και να εκπέμπει με χαμηλότερη ισχύ.

Για να αξιολογηθεί η ενεργειακή απόδοση του συγκεκριμένου σχήματος, οι συγγραφείς χρησιμοποιούν τη μετρική του προσδοκώμενου αθροίσματος ισχύων, η οποία ισούται με την αναμενόμενη τιμή του αθροίσματος των εκπεμπόμενων ισχύων ανά πακέτο για όλους τους χρήστες και αναπαριστά τη συνολική κατανάλωση ισχύος ολόκληρου του δικτύου τυχαίας πρόσβασης. Συνεπώς, το προσδοκώμενο άθροισμα ισχύων εξαρτάται από την πολιτική ελέγχου ισχύος και τον αριθμό των χρηστών που μεταδίδουν σε κάθε ευκαιρία μετάδοσης. Για να μειωθεί το προσδοκώμενο άθροισμα ισχύων, συνδυάζεται η μέθοδος ελέγχου ισχύος αποκομμένης αντιστροφής καναλιού (truncated channel inversion) με το σχήμα OpCSMA, εφαρμόζοντας την περιγραφόμενη πολιτική κατωφλίων. Το μοντέλο μη πεπερασμένων χρηστών θεωρήθηκε και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν ότι το προτεινόμενο σχήμα εξοικονομεί σημαντική ποσότητα ενέργειας συγκρινόμενο με το συμβατικό pCSMA, ενώ διατηρεί την ίδια ρυθμοαπόδοση. Επιπρόσθετα, το προτεινόμενο μοντέλο δοκιμάστηκε σε ένα IEEE 802.11 WLAN και τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντική εξοικονόμηση αλλά και μακροπρόθεσμη δικαιοσύνη. Τέλος, οι συγγραφείς ανέλυσαν κάποια πιθανά προβλήματα του μοντέλου, όπως προβλήματα βραχυπρόθεσμης δικαιοσύνης που μπορεί να προκαλέσουν μεγάλη διακύμανση καθυστέρησης (το οποίο είναι ανεπιθύμητο για εφαρμογές πραγματικού χρόνου). Επιπλέον, σημειώνεται ότι ο έλεγχος ισχύος μετάδοσης μπορεί να παρεμποδίσει τη λειτουργία του CSMA εξαιτίας της επιδείνωσης του προβλήματος του κρυμμένου τερματικού. Συνεπώς, όταν λυθούν αυτά τα προβλήματα, το OpCSMA θα μπορεί αποτελέσει ένα πρωτόκολλο υψηλής ενεργειακής απόδοσης για τα ασύρματα δίκτυα.

Ένα οπορτουνοιστικό σχήμα μετάδοσης δεδομένων για συστήματα πολλαπλής πρόσβασης βασιζόμενα σε τύπους (type-based multiple access systems), το οποίο επιλέγει το σύνολο αισθητήρων που θα μεταδώσουν με στόχο την ενεργειακή απόδοση, προτείνεται στην (Jeon et al., 2010). Το μελετώμενο πρόβλημα θεωρεί έναν άγνωστο στόχο, ο οποίος πρέπει να εντοπιστεί, και αισθητήρες που λαμβάνουν στατιστικά και χρονικά i.i.d. παρατηρήσεις του στόχου, οι οποίες στη συνέχεια μεταδίδονται σε ένα κέντρο σύντηξης δεδομένων (fusion center). Ο στόχος των συγγραφέων είναι η ελαχιστοποίηση της μέσης κατανάλωσης ισχύος των αισθητήρων, έτσι ώστε να τηρείται ένας περιορισμός απόδοσης όσον αφορά τα σφάλματα εντοπισμού. Γι' αυτό το λόγο, προτάθηκε ένα type-based οπορτουνοιστικό σχήμα πολλαπλής πρόσβασης το οποίο λειτουργεί σε περιβάλλον διαλείψεων. Το σχήμα αυτό εκμεταλλεύεται το διαφορισμό πολλαπλών χρηστών σε μεγάλα WSNs, όπου δεν χρειάζεται να είναι ενεργοί όλοι οι κόμβοι αισθητήρων, με στόχο τη μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση, έχοντας γνώση του καναλιού. Οι κόμβοι που έχουν κέρδη καναλιού μεγαλύτερα από κάποιο κατώφλι (το οποίο εκπέμπεται από το κέντρο σύντηξης) συμμετέχουν στο σχήμα πολλαπλής πρόσβασης και μεταδίδουν δεδομένα με ελεγχόμενες ισχύες με διπλεξία διαίρεσης χρόνου. Το σύνολο αυτών των κόμβων (ενεργοί κόμβοι) απαιτούν μικρότερη ποσότητα ενέργειας για να στείλουν τα δεδομένα τους στο κέντρο και συνεπώς ο χρόνος ζωής του δικτύου επιμηκύνεται.

Πιο συγκεκριμένα, οι συγγραφείς διατύπωσαν ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης της μέσης κατανάλωσης ισχύος από τους ενεργούς αισθητήρες, ενώ ικανοποιείται μια συγκεκριμένη απόδοση σε σφάλματα εντοπισμού. Για να λυθεί το συγκεκριμένο πρόβλημα, προτάθηκε αρχικά μια πολιτική ελέγχου ισχύος που μεγιστοποιεί έναν εκθέτη σφάλματος της απόδοσης εντοπισμού και στη συνέχεια

υπολογίστηκε ένα κατώφλι που ελαχιστοποιεί τη μέση κατανάλωση ισχύος από τους ενεργούς κόμβους. Οι προσομοιώσεις του σχήματος έδειξαν ότι απαιτείται μικρότερος αριθμός αισθητήρων και μικρότερη μέση ενέργεια για να επιτευχθεί η ίδια απόδοση εντοπισμού σε ένα καθεστώς χαμηλού SNR, σε σχέση με ένα σχήμα τυχαίας επιλογής, όπου οι κόμβοι είναι ενεργοί, ανεξάρτητα από την ποιότητα του καναλιού τους.

Τέλος, στην εργασία (Yoon et al., 2011) μελετήθηκε ένα πολύ σημαντικό ζήτημα που εμφανίζεται στα σχήματα που εκμεταλλεύονται το διαφορισμό πολλαπλών χρηστών, το θεμελιώδες ισοζύγιο μεταξύ εξοικονόμησης ενέργειας και ρυθμοαπόδοσης. Για να εξισορροπηθεί το κέρδος απόδοσης από το διαφορισμό πολλαπλών χρηστών και η κατανάλωση ενέργειας για την ανάδραση καναλιού προτάθηκε ένα ενεργειακά αποδοτικό σχήμα οπορτουλιστικού προγραμματισμού. Το προτεινόμενο σχήμα έχει ως στόχο να βελτιώσει την ενεργειακή απόδοση κάτω από τον περιορισμό της δίκαιης κατανομής πόρων, ελέγχοντας τον αριθμό των χρηστών που στέλνουν πίσω στον ΣΒ την κατάσταση του καναλιού τους. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί συνδυάζοντας τον οπορτουλιστικό προγραμματισμό με την ενεργειακή απόδοση που προσφέρεται από τον προγραμματισμό αναμονής/αφύπνισης.

Πιο συγκεκριμένα, θεωρείται ένα σύστημα χρονοθυρίδων με μια συχνότητα για το κανάλι κάτω ζεύξης, το οποίο αποτελείται από N χρήστες χαμηλής κινητικότητας και ένα ΣΒ. Σε κάθε χρονοθυρίδα, ο ΣΒ εκπέμπει ένα πιλοτικό σήμα και στη συνέχεια n από τους N χρήστες ανταποκρίνονται στέλνοντας στον ΣΒ τους λαμβανόμενους SNRs. Οι χρήστες που ανταποκρίνονται αναφέρονται ως «μη-κοιμώμενοι» χρήστες, ενώ οι υπόλοιποι ως «κοιμώμενοι». Για να διατυπωθεί το πρόβλημα βελτιστοποίησης, οι συγγραφείς θεώρησαν ότι η ενεργειακή απόδοση εκφράζεται σε bits ανά μονάδα ενέργειας και δίνεται από τον λόγο της μέσης ρυθμοαπόδοσης προς τη μέση κατανάλωση ενέργειας ενός συγκεκριμένου συνόλου «μη-κοιμώμενων» χρηστών. Ο στόχος είναι η μεγιστοποίηση της μέσης απόδοσης κάτω από τον περιορισμό της δίκαιης κατανομής των πόρων, η οποία εκφράζεται ως ο μέσος χρόνος των ενεργών χρηστών. Αρχικά, θεωρήθηκε ένα δίκτυο όπου οι χρήστες έχουν πανομοιότυπο μέσο SNR και το πρόβλημα μετατράπηκε σε πρόβλημα εύρεσης του βέλτιστου αριθμού ενεργών χρηστών που θα μεγιστοποιεί τη μέση απόδοση. Το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι ένα οιονεί κυρτό ακέραιο πρόβλημα, το οποίο μπορεί να επιλυθεί μέσω της μεθόδου χαλάρωσης του ακέραίου περιορισμού των ενεργών χρηστών. Στη συνέχεια, θεωρήθηκε η γενικότερη περίπτωση όπου οι χρήστες έχουν διαφορετικά στατιστικά καναλιού (διαφορετικούς μέσους SNRs). Λόγω της πολυπλοκότητας υπολογισμού της βέλτιστης λύσης, προτάθηκαν δυο ευρετικές προσεγγίσεις του συγκεκριμένου προβλήματος: μια που χρησιμοποιεί τη μέση τιμή των μέσων SNR και μια άλλη που κατηγοριοποιεί τους χρήστες σε διαφορετικά σύνολα ανάλογα με το αν έχουν παρόμοιο μέσο SNR. Η αξιολόγηση του ενεργειακά αποδοτικού οπορτουλιστικού προγραμματιστή έδειξε ότι μπορεί να αυξήσει σημαντικά τη διάρκεια ζωής του δικτύου με πολύ μικρό κόστος στη ρυθμοαπόδοση του συστήματος.

Μέχρι στιγμής, παρουσιάστηκαν οι βασικές αρχές της κατανάλωσης ισχύος στις ασύρματες επικοινωνίες, καθώς και η τεχνική του οπορτουλιστικού προγραμματισμού με πλήρη βιβλιογραφική επισκόπηση των προτεινόμενων μεθόδων. Στη συνέχεια, του κεφαλαίου αναλύονται οι ενεργειακά αποδοτικοί μηχανισμοί οπορτουλιστικού χρονοπρογραμματισμού, οι οποίοι προτάθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής.

4.5 Προτεινόμενοι Ενεργειακά Αποδοτικοί Μηχανισμοί Οπορτουνοιστικού Χρονοπρογραμματισμού για Διασφάλιση QoS

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, αποδοτικότερη χρησιμοποίηση της μπαταρίας των ασύρματων τερματικών μπορεί να επιτευχθεί με την εκμετάλλευση των χρονομεταβαλλόμενων συνθηκών του ασύρματου καναλιού. Προς αυτή την κατεύθυνση, η συγκεκριμένη ενότητα μελετά το πρόβλημα της ενεργειακής απόδοσης της επικοινωνίας μιας ασύρματης συσκευής κάτω από συγκεκριμένες απαιτήσεις QoS και προτείνει δυο καταναμημένους μηχανισμούς οπορτουνοιστικού χρονοπρογραμματισμού μετάδοσης δεδομένων, οι οποίοι επιμηκύνουν την αυτονομία της μπαταρίας μιας ασύρματης συσκευής. Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιείται καινοφανώς η θεωρία βέλτιστης παύσης, έτσι ώστε να βρεθεί η βέλτιστη χρονική στιγμή προκειμένου μια ασύρματη συσκευή να εκπέμψει δεδομένα ανάλογα με τις συνθήκες του ασύρματου καναλιού. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τους προτεινόμενους μηχανισμούς γίνεται αναβολή της επικοινωνίας μέχρι να βρεθεί η χρονική στιγμή με τις βέλτιστες αναμενόμενες συνθήκες καναλιού, παρέχοντας ταυτόχρονα ντετερμινιστικές εγγυήσεις QoS. Οι απαιτήσεις για QoS αναφέρονται σε ένα μέγιστο ανεκτό χρονικό όριο (time deadline) μέσα στο οποίο θα πρέπει να πραγματοποιηθεί η μετάδοση και σε μια απαιτούμενη λαμβανόμενη στάθμη ισχύος σήματος στο δέκτη. Επιπρόσθετα, θεωρείται ότι οι προτεινόμενοι μηχανισμοί έχουν πλήρη γνώση της κατάστασης του καναλιού (full CSI).

Αναλυτικότερα, το πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού μοντελοποιείται ως ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης βέλτιστης παύσης και προτείνεται ο καταναμημένος, ενεργειακά αποδοτικός, οπορτουνοιστικός χρονοπρογραμματιστής μετάδοσης E^2OTS (*Energy Efficient Opportunistic Transmission Scheduler*). Δυο διαφορετικές προσεγγίσεις χρησιμοποιούνται ανάλογα με τους προς επίτευξη στόχους: η πρώτη αναφέρεται στην ελαχιστοποίηση της προσδοκώμενης κατανάλωσης ενέργειας ($E^2OTS - I$) και η δεύτερη στην ελαχιστοποίηση της μέσης κατανάλωσης ενέργειας ανά μονάδα χρόνου ($E^2OTS - II$) που στην ορολογία της θεωρίας βέλτιστης παύσης αναφέρεται ως ποσοστό απολαβής (rate of return). Από τη μαθηματική ανάλυση προκύπτουν πολιτικές χρονοπρογραμματισμού μετάδοσης πολλαπλών κατωφλίων (multithreshold policies), οι οποίες χαρακτηρίζουν τον χρονοπρογραμματισμό μετάδοσης και για τις δυο προσεγγίσεις. Επιπρόσθετα, για τον $E^2OTS - II$ προτείνεται ένας επαναληπτικός αλγόριθμος για τον υπολογισμό των κατωφλίων μετάδοσης. Τέλος, η απόδοση των προτεινόμενων σχημάτων αξιολογείται μέσω προσομοιώσεων για τα συνήθη κανάλια διαλείψεων και επιπλέον συγκρίνονται με άλλα ευρετικά σχήματα χρονοπρογραμματισμού. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα προτεινόμενα σχήματα επιτυγχάνουν σημαντικό κέρδος σε κατανάλωση ενέργειας και κατ' επέκταση σημαντική αύξηση της αυτονομίας της μπαταρίας.

Η δομή της συγκεκριμένης ενότητας είναι η εξής: αρχικά, παρουσιάζεται η συνεισφορά των προτεινόμενων μηχανισμών συγκρινόμενη με τις σχετικές ερευνητικές εργασίες που υπάρχουν στη βιβλιογραφία, ενώ στη συνέχεια, περιγράφεται το μοντέλο του θεωρούμενου συστήματος, καθώς και το μετελωμένο πρόβλημα ως πρόβλημα βέλτιστης παύσης. Έπειτα, παρουσιάζεται ο προτεινόμενος οπορτουνοιστικός χρονοπρογραμματιστής και πιο συγκεκριμένα η μαθηματική ανάλυση που καταλήγει στις βέλτιστες πολιτικές χρονοπρογραμματισμού για τις δυο προτεινόμενες προσεγγίσεις. Τέλος, περιγράφονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και τα προκύπτοντα συμπεράσματα.

4.5.1 Συνεισφορά των Προτεινόμενων Μηχανισμών

Το πρόβλημα της εξοικονόμησης ενέργειας στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον των ερευνητών την τελευταία δεκαετία. Ποικίλες προσεγγίσεις, από διαφορετικά OSI στρώματα έχουν προταθεί με σκοπό την υλοποίηση ενεργειακά αποδοτικών δικτύων. Ωστόσο, οι περισσότερες ερευνητικές προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί στα κατώτερα στρώματα (φυσικό και ζεύξης δεδομένων). Επιπρόσθετα, ο προγραμματισμός μετάδοσης δεδομένων έχει χρησιμοποιηθεί σε πρόσφατες ερευνητικές εργασίες [π.χ. (Uysal-Biyikoglu et al., 2002; W. Chen et al., 2008; Nuggehalli et al., 2006; Berry & Gallager, 2002)] με σκοπό την επίτευξη μεγαλύτερης αποδοτικότητας στα ασύρματα συστήματα σε όρους ενέργειας ή ρυθμοαπόδοσης. Το κίνητρο για αυτές τις εργασίες ήταν η παρατήρηση ότι σε πολλούς μηχανισμούς κωδικοποίησης καναλιού, η απαιτούμενη ενέργεια για τη μετάδοση δεδομένων μέσω μιας ασύρματης ζεύξης μπορεί να μειωθεί είτε μεταδίδοντας τα δεδομένα για μεγαλύτερη χρονική διάρκεια, είτε χρησιμοποιώντας ένα ρυθμο-προσαρμοζόμενο σχήμα (J. Lee & Jindal, 2009), είτε εκμεταλλεύοντας τις στοχαστικές συνθήκες του ασύρματου καναλιού (Tarello et al., 2008; Fu et al., 2006; X. Liu et al., 2001; Li & Neely, 2010).

Παράλληλα, η θεωρία βέλτιστης παύσης έχει αρχίσει πολύ πρόσφατα να χρησιμοποιείται στη μελέτη προβλημάτων βελτιστοποίησης των ασύρματων δικτύων. Πιο συγκεκριμένα, οι συγγραφείς στις εργασίες (D. Zheng et al., 2009, 2008) πρότειναν έναν κατανεμημένο οπορτουνοιστικό μηχανισμό προγραμματισμού σε αδόμητα δίκτυα τυχαίας πρόσβασης. Σύμφωνα με αυτόν, πραγματοποιείται ένας συνδυασμός ανίχνευσης καναλιού και κατανεμημένου προγραμματισμού, με σκοπό τη βελτιστοποίηση του ισοζυγίου μεταξύ του κέρδους ρυθμοαπόδοσης και του κόστους της επιπλέον ανίχνευσης καναλιού. Η μέση ρυθμοαπόδοση του συνολικού δικτύου αλλά και των επιμέρους χρηστών βελτιστοποιείται με χρήση της θεωρίας παιγνίων και της θεωρίας βέλτιστης παύσης, θεωρώντας το πρόβλημα ως πρόβλημα απόφασης μη πεπερασμένου ορίζοντα. Οι συγγραφείς στην ερευνητική εργασία (Chakraborty et al., 2006) εκμεταλλεύονται το ιστορικό κίνησης των κινητών κόμβων με σκοπό να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας αναβάλλοντας την επικοινωνία. Η απόφαση για το αν θα αναβληθεί ή όχι η επικοινωνία, έτσι ώστε να βρεθούν μικρότερες απώλειες καναλιού, δηλαδή να βρεθούν σε μικρότερη απόσταση ο πομπός με το δέκτη, λαμβάνεται χρησιμοποιώντας τη λύση του προβλήματος της γραμματέως. Επιπρόσθετα, η εργασία (Ye et al., 2009) μελετά το πρόβλημα της κατανεμημένης συνάθροισης δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Για την προς μεγιστοποίηση ανταμοιβή θεωρήθηκε ένα μέγεθος ανάλογο του κέρδους συνάθροισης, το οποίο αναπαριστά ένα ισοζύγιο μεταξύ ενέργειας και καθυστέρησης συνάθροισης. Το πρόβλημα παύσης της συνάθροισης διατυπώνεται ως ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης βέλτιστης παύσης πεπερασμένου ορίζοντα. Οι συγγραφείς στην (Huang et al., 2008) χρησιμοποιούν επίσης τη θεωρία βέλτιστης παύσης σε γνωστικά δίκτυα, όπου οι δευτερεύοντες χρήστες εκμεταλλεύονται τις ευκαιρίες φάσματος με στόχο να μεγιστοποιήσουν την ανταμοιβή της συνεχόμενης μετάδοσης δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, αναζητείται η βέλτιστη χρονική στιγμή στην οποία ο δευτερεύων χρήστης πρέπει να σταματήσει τη μετάδοση και να ελέγξει το κανάλι, έτσι ώστε να επηρεάζει όσο το δυνατόν λιγότερο τους πρωτεύοντες χρήστες. Τέλος, ένας μηχανισμός προδραστικής διαχείρισης πόρων ανώτερου στρώματος προτάθηκε στην ερευνητική εργασία (Poulakis et al., 2009) με σκοπό την προδέσμευση πόρων του δικτύου, έτσι ώστε να μειωθεί η πιθανότητα διακοπής των κλήσεων λόγω μεταπομπής στα ασύρματα κυβελωτά δίκτυα. Οι συγγραφείς υιοθετούν την θεωρία βέλτιστης παύσης και πιο συγκεκριμένα τη λύση του

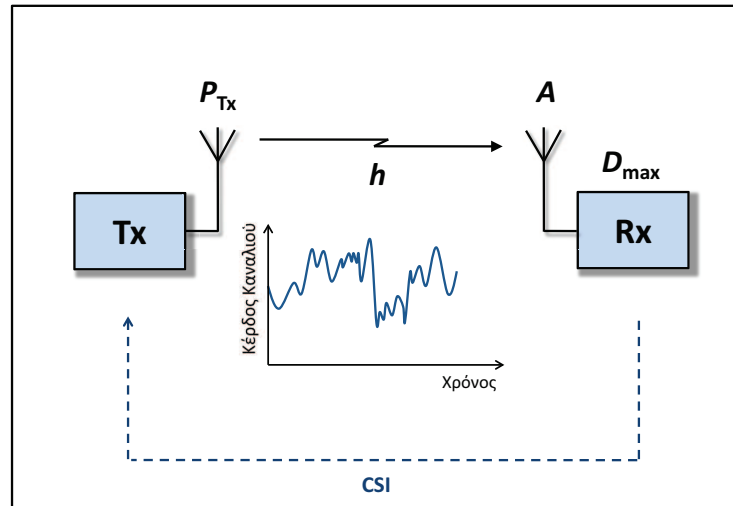
προβλήματος παρκαρίσματος, έτσι ώστε να καθοριστεί η βέλτιστη χρονική στιγμή πραγματοποίησης του αιτήματος προδέσμευσης εύρους ζώνης με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους προδέσμευσης.

Η βασική διαφορά των προτεινόμενων μηχανισμών σε σχέση με τα προαναφερόμενα σχήματα είναι ότι ο E^2OTS αποτελεί έναν καταναμημένο χρονοπρογραμματιστή για ασύρματες συσκευές, ο οποίος εκμεταλλεύεται τις χρονομεταβαλλόμενες συνθήκες του καναλιού επικοινωνίας, έτσι ώστε να βρεθεί η ενεργειακά βέλτιστη χρονική στιγμή για επικοινωνία, βασιζόμενος στην καινοτόμο χρήση της θεωρίας βέλτιστης παύσης. Επιπρόσθετα, ο προτεινόμενος οπορτουниστικός χρονοπρογραμματιστής διαφέρει στον τρόπο που χρησιμοποιεί τη θεωρία βέλτιστης παύσης, αφού θεωρείται πεπερασμένος ορίζοντας για το πρόβλημα, εισάγοντας τους περιορισμούς QoS που αναφέρθηκαν παραπάνω. Οι θεωρήσεις αυτές αντανακλούν σε ρεαλιστικότερα ασύρματα δίκτυα. Επιπλέον, η ελαχιστοποίηση του ποσοστού απολαβής της θεωρίας βέλτιστης παύσης είναι πρωτοπόρα και δεν έχει χρησιμοποιηθεί στη βιβλιογραφία σε προβλήματα ασύρματων επικοινωνιών. Η προτεινόμενη μέθοδος επίλυσης του προβλήματος βασίζεται σε έναν καταναμημένο αλγόριθμο, ο οποίος έχει χαμηλό υπολογιστικό κόστος, ενώ οι πολυπλοκότεροι υπολογισμοί εκτελούνται στο αρχικό στάδιο, μόνο μια φορά. Επιπρόσθετα, τονίζεται ότι λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς ο σημαντικός όρος της κατανάλωσης ενέργειας για την απόκτηση της CSI, κάτι που συνήθως αμελείται, οδηγώντας σε περισσότερο ρεαλιστικά αποτελέσματα. Συνεπώς, ο E^2OTS βελτιστοποιεί το ισοζύγιο μεταξύ της αποδοτικής κατανάλωσης ενέργειας που επιτυγχάνεται με τη μετάδοση σε καλύτερες συνθήκες καναλιού και της κατανάλωσης ενέργειας των επιπλέον παρατηρήσεων καναλιού, μέχρι ένα μέγιστο επιθυμητό χρονικό όριο που καθορίζεται από τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας. Τέλος, σημειώνεται ότι εξαιτίας της ευελιξίας και του καταναμημένου χαρακτήρα του, ο E^2OTS μπορεί να ενσωματωθεί σε σύγχρονα πρότυπα ασύρματων επικοινωνιών, έτσι ώστε να προσφέρει ενεργειακά αποδοτική μετάδοση δεδομένων παρέχοντας ταυτόχρονα ντετερμινιστικές εγγυήσεις QoS.

4.5.2 Μοντέλο Συστήματος

Ο στόχος του E^2OTS είναι η ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας μετάδοσης δεδομένων μιας ασύρματης συσκευής. Για να επιτευχθεί αυτό, μελετώνται δυο διαφορετικές προσεγγίσεις, οι οποίες καταλήγουν σε δυο διαφορετικές πολιτικές χρονοπρογραμματισμού, ανάλογα με τους προς επίτευξη στόχους και τις απαιτήσεις της εφαρμογής που θα χρησιμοποιηθεί: 1) η προσέγγιση ελαχιστοποίησης της προσδοκώμενης κατανάλωσης ενέργειας (E^2OTS-I) και 2) η προσέγγιση ελαχιστοποίησης της μέσης κατανάλωσης ενέργειας ανά μονάδα χρόνου ($E^2OTS-II$). Συνεπώς, δυο οπορτουниστικοί μηχανισμοί χρονοπρογραμματισμού μετάδοσης δεδομένων κατασκευάζονται, οι οποίοι εκμεταλλεύονται τις «ευκαιρίες» καναλιού. Αναλυτικότερα, θεωρείται ένα σύστημα μονού άλματος, όπου οι κόμβοι επικοινωνούν χωρίς να παρεμβάλουν μεταξύ τους¹, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.6. Εξαιτίας της ευελιξίας και του καταναμημένου χαρακτήρα των προτεινόμενων χρονοπρογραμματιστών, η ανάλυση επικεντρώνεται στην ενεργειακά αποδοτική επικοινωνία μιας μεμονωμένης ζεύξης σημείου προς σημείο. Επιπλέον, θεωρείται ότι η ζεύξη επικοινωνίας χαρακτηρίζεται μόνο από μπλοκ επίπεδες διαλείψεις μικρής κλίμακας, ωστόσο, η ανάλυση μπορεί εύκολα να επε-

¹ Αυτό μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας ένα σχήμα πολλαπλής πρόσβασης το οποίο δεν εμπλέκει τον χρόνο π.χ. FDMA (Frequency Division Multiple Access), CDMA.



Σχήμα 4.6: Μοντέλο συστήματος.

καθεί και για άλλες περιπτώσεις. Επιπρόσθετα, λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση συγκεκριμένες απαιτήσεις QoS, οι οποίες ορίζονται ως ένα άνω χρονικό όριο έως όπου θα πρέπει να πραγματοποιηθεί η μετάδοση και ένα συγκεκριμένο όριο στη στάθμη του λαμβανόμενου σήματος στον δέκτη. Πιο συγκεκριμένα, ο περιορισμός του χρονικού ορίου συνεπάγεται ότι ο δέκτης πρέπει να λαμβάνει μια συγκεκριμένη ποσότητα δεδομένων μέσα σε αυτό το όριο, θεωρώντας ότι υπάρχουν συνεχώς διαθέσιμα δεδομένα για μετάδοση στον πομπό. Συνεπώς, το χρονικό όριο αναβολής μετάδοσης συνεπάγεται ένα άνω όριο μεταξύ των χρόνων διαδοχικών αφίξεων δεδομένων στο δέκτη, το οποίο επίσης οδηγεί σε ένα άνω όριο διακύμανσης της καθυστέρησης για ένα χρονικά επαναλαμβανόμενο πρόβλημα. Η υπόθεση των συνεχώς διαθέσιμων δεδομένων (όποτε αποφασίσει να εκπέμψει η συσκευή) μπορεί να υλοποιηθεί είτε θεωρώντας ότι τα δεδομένα είναι αποθηκευμένα σε εσωτερική μνήμη είτε θεωρώντας ότι η συσκευή έχει την ικανότητα να τα αποκτάει ακαριαία (π.χ. πραγματοποιώντας μέτρηση).

Επιπρόσθετα, γίνεται η υπόθεση ότι το κανάλι εμφανίζει διακυμάνσεις, οι οποίες ακολουθούν μια γνωστή στατιστική μακροπρόθεσμη κατανομή. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (probability density function - pdf) του καναλιού μπορεί να εκτιμηθεί μέσω μη παραμετρικών τεχνικών εκτίμησης πυκνότητας (non-parametric density estimation techniques), όπως η εκτίμηση πυκνότητας πυρήνα (Kernel density estimation) που παρέχει εκτιμήσεις pdfs απευθείας από τα μετρούμενα δεδομένα χωρίς γνώση υποκείμενων κατανομών (Izenman, 1991; Shen & Li, 2004; Shen & Agrawal, 2006). Επιπλέον, οι μακροπρόθεσμες pdfs του καναλιού μπορούν να εκτιμηθούν μέσω στατιστικών μεθόδων παρακολούθησης ακτίνας θεωρώντας ένα συγκεκριμένο τοπικό περιβάλλον σκέδασης. Τέλος, γίνεται η υπόθεση της πλήρους γνώσης CSI, δηλαδή ότι η στιγμιαία τιμή του κέρδους του καναλιού στον δέκτη, θεωρείται γνωστή από τον πομπό, και συνεπώς μπορεί να αποφασίζει αν το κανάλι είναι καλό ή κακό. Αυτή η πληροφορία μπορεί να παρασχεθεί μέσω σημάτων αναφοράς ή πιλοτικών σημάτων (pilot signals) (Yue et al., 2004; Aktas & Mitra, 2004) τα οποία εκπέμπονται περιοδικά από τον δέκτη. Σύμφωνα με αυτή την τεχνική, μικρά σήματα, τα οποία είναι γνωστά στον προορισμό, εκπέμπονται περιοδικά από μία πηγή και συνεπώς, μπορεί να βρεθεί το κέρδος καναλιού από την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος.

Με βάση το θεώρημα του Shannon, η χωρητικότητα του καναλιού ή αλλιώς ο μέγιστος στιγμιαίος

ρυθμός αξιόπιστης μετάδοσης δεδομένων σε μια ζεύξη, δίνεται ως εξής:

$$R = W \log_2 \left(1 + \frac{h \cdot P_{Tx}}{N_0 W} \right) \quad (4.13)$$

όπου W είναι το εύρος ζώνης, $h = |g|^2$ είναι το κέρδος ισχύος του καναλιού για συντελεστή καναλιού g , P_{Tx} είναι η ισχύς μετάδοσης του σήματος και N_0 είναι η πυκνότητα ισχύος του θορύβου. Όπως φαίνεται από την (4.13), η εκπεμπόμενη ισχύς, η οποία συνδέεται άμεσα με την κατανάλωση ενέργειας του τερματικού, είναι αντιστρόφως ανάλογη με το κέρδος ισχύος του καναλιού για δεδομένες απαιτήσεις λαμβανόμενης ισχύος στο δέκτη. Συνεπώς, όταν οι συνθήκες του καναλιού είναι ευνοϊκές, η απαιτούμενη ισχύς μετάδοσης για δεδομένο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων μειώνεται. Σε αυτή την παρατήρηση βασίζονται οι προτεινόμενοι μηχανισμοί χρονοπρογραμματισμού, οι οποίοι έχουν ως στόχο την εύρεση της βέλτιστης χρονικής στιγμής που πρέπει να εκπέμψει το τερματικό, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η απαιτούμενη εκπεμπόμενη ενέργεια για τις συγκεκριμένες απαιτήσεις QoS και κατ'επέκταση να αυξάνεται η αυτονομία του τερματικού.

4.5.3 Μοντελοποίηση Προβλήματος Βέλτιστης Παύσης

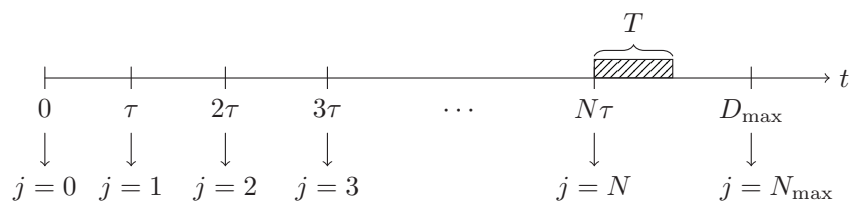
Όπως έχει προαναφερθεί στο Κεφάλαιο 3, η θεωρία βέλτιστης παύσης (Chow et al., 1971; Ferguson, 2006) ασχολείται με προβλήματα που έχουν ως στόχο την επιλογή της βέλτιστης χρονικής στιγμής να εκτελεστεί μια συγκεκριμένη λειτουργία προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η προσδοκώμενη ανταμοιβή ή αντίστοιχα να ελαχιστοποιηθεί η προσδοκώμενη απώλεια. Στη συνέχεια, θεωρείται η δεύτερη περίπτωση, δεδομένου ότι το μελετώμενο πρόβλημα αποτελεί πρόβλημα ελαχιστοποίησης. Η επιλογή στα προβλήματα βέλτιστης παύσης βασίζεται σε διαδοχικά παρατηρηθείσες τυχαίες μεταβλητές ενώ πιο συγκεκριμένα, τα προβλήματα αυτά ορίζονται από δύο αντικείμενα: 1) μια ακολουθία τυχαίων μεταβλητών: X_1, X_2, \dots των οποίων η κοινή κατανομή θεωρείται γνωστή και 2) μια ακολουθία συναρτήσεων απωλειών πραγματικών τιμών: $y_0, y_1(x_1), y_2(x_1, x_2), \dots, y_\infty(x_1, x_2, \dots)$. Δεδομένων των δύο αντικειμένων, το πρόβλημα παύσης έγκειται στην επιλογή της χρονικής στιγμής που ελαχιστοποιεί την προσδοκώμενη απώλεια, δηλαδή της κατάλληλης χρονικής στιγμής $0 \leq N \leq \infty$ που βελτιστοποιεί την $\mathcal{E}[Y_N]$, όπου το $Y_N = y_N(x_1, \dots, x_N)$ αντιστοιχεί στην τυχαία απώλεια δεδομένης της παύσης στο N και $\mathcal{E}[\cdot]$ είναι η συνάρτηση προσδοκώμενης τιμής. Επιπρόσθετα, στα προβλήματα παύσης πεπερασμένου ορίζοντα, υπάρχει ένα άνω όριο παρατηρήσεων N_{\max} και μπορούν να θεωρηθούν ως ειδική περίπτωση των γενικότερων προβλημάτων θέτοντας $y_{N_{\max}+1} = \dots = y_\infty = \infty$ για την περίπτωση του προβλήματος ελαχιστοποίησης.

Όσον αφορά το μελετώμενο πρόβλημα, αυτό αναζητά την ενεργειακά βέλτιστη χρονική στιγμή για επικοινωνία μεταξύ δυο ασύρματων συσκευών, η οποία ελαχιστοποιεί την προσδοκώμενη κατανάλωση ενέργειας μετάδοσης, λαμβάνοντας υπόψη ότι η κατανάλωση ισχύος μετάδοσης αντανakλά τα στοχαστικά χαρακτηριστικά του καναλιού επικοινωνίας για δεδομένες απαιτήσεις QoS στο δέκτη. Το συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ένα πρόβλημα βέλτιστης παύσης πεπερασμένου ορίζοντα, όπως αναπαρίσταται στο Σχήμα 4.7.

Για να μοντελοποιηθούν οι προτεινόμενοι χρονοπρογραμματιστές, αρχικά θεωρείται ότι το εν λόγω πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού λαμβάνει χώρα για ένα γύρο. Ως μέγιστο ανεκτό χρονικό όριο, μέχρι το οποίο μπορεί να αναβληθεί η μετάδοση των δεδομένων για κάθε γύρο, θεωρείται

αποφασίζων	↔	ασύρματη συσκευή
παρατηρήσεις	↔	καταστάσεις καναλιού
συνάρτηση απωλειών	↔	κατανάλωση ενέργειας
παύση	↔	μετάδοση

Σχήμα 4.7: Πρόβλημα ελαχιστοποίησης κατανάλωσης ενέργειας ως πρόβλημα βέλτιστης παύσης.



Σχήμα 4.8: Αναπαράσταση του προβλήματος χρονοπρογραμματισμού για ένα γύρο.

το D_{\max} (ορίζοντας προβλήματος), ενώ θεωρείται ότι η συσκευή ελέγχει τις συνθήκες του καναλιού ανά τ χρονικά διαστήματα, δηλαδή στις χρονικές στιγμές που είναι ακέραια πολλαπλάσια του τ . Δεδομένου του πεπερασμένου οριζοντία D_{\max} , συνεπάγεται ένας μέγιστος αριθμός παρατηρήσεων καναλιού $N_{\max} = D_{\max}/\tau$ μέχρι τη μετάδοση των δεδομένων, ενώ τα επιμέρους στάδια παρακολούθησης του καναλιού συμβολίζονται ως $j = 1, \dots, N_{\max}$. Συνεπώς, το πρόβλημα έγκειται στην εύρεση της βέλτιστης χρονικής στιγμής παύσης N για μετάδοση των δεδομένων, η οποία ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας, εντός του χρονικού διαστήματος $[0, D_{\max}]$. Η χρονική διάρκεια αναβολής της επικοινωνίας από τον χρονοπρογραμματιστή, ονομάζεται *διάρκεια χρονοπρογραμματισμού (scheduling duration)* και ισούται με $N \cdot \tau$. Εάν ο χρόνος για το συγκεκριμένο γύρο φτάσει στο D_{\max} και δεν έχει πραγματοποιηθεί μετάδοση δεδομένων, τότε η συσκευή μεταδίδει τα δεδομένα στο $t = D_{\max}$ ανεξάρτητα των συνθηκών καναλιού. Επιπρόσθετα, αναφέρεται ότι μεταξύ των ελέγχων της κατάστασης καναλιού, η συσκευή μπαίνει σε κατάσταση αναμονής, έτσι ώστε να μειωθεί περαιτέρω η κατανάλωση ενέργειας. Η αναπαράσταση του προβλήματος για ένα γύρο φαίνεται στο Σχήμα 4.8, όπου T είναι η χρονική διάρκεια της μετάδοσης δεδομένων.

Σχετικά με την παράμετρο τ του μοντέλου, σημειώνεται ότι για να μπορούν οι χρονοπρογραμματιστές να εκμεταλλευτούν τις διακυμάνσεις του καναλιού, ο χρόνος μεταξύ διαδοχικών παρατηρήσεων καναλιού τ θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από το χρόνο συνοχής, ο οποίος αντιπροσωπεύει το χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια του οποίου το κανάλι παραμένει σταθερό. Αντίθετα, θεωρούνται σταθερές συνθήκες καναλιού καθ' όλη τη διάρκεια της μετάδοσης δεδομένων, δηλαδή ότι η παράμετρος T είναι μικρότερη ή ίση από το χρόνο συνοχής του καναλιού. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αναλυτικά οι δυο προσεγγίσεις του E^2OTS .

4.5.4 Μηχανισμός Ελαχιστοποίησης Προσδοκώμενης Κατανάλωσης Ενέργειας

Πρόβλημα ελαχιστοποίησης

Σύμφωνα με την πρώτη προσέγγιση, δηλαδή τον E^2OTS-I , ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της προσδοκώμενης κατανάλωσης ενέργειας. Για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος, θεωρείται ένα γύρος εκτέλεσης. Έστω ότι E_N είναι η κατανάλωση ενέργειας (δηλαδή η συνάρτηση απωλειών) της ασύρματης συσκευής, τότε το πρόβλημα μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα πρόβλημα βέλτιστης παύσης, όπου αναζητείται ο κανόνας παύσης $1 \leq N \leq N_{\max}$ της αναβολής της μετάδοσης δεδομένων, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η προσδοκώμενη κατανάλωση ενέργειας της ασύρματης συσκευής $\mathcal{E}[E_N]$. Για να είναι πιο ρεαλιστικό το μοντέλο, θεωρείται ότι καταναλώνεται μια επιπρόσθετη ποσότητα ενέργειας e_c , για ένα μικρό χρονικό διάστημα (μικρότερο από T), κάθε φορά που γίνεται έλεγχος της κατάστασης του καναλιού (Li & Neely, 2010). Επομένως, δεδομένου ότι ο έλεγχος του καναλιού σταματάει στο N και στη συνέχεια πραγματοποιείται η μετάδοση των δεδομένων, η συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια E_N είναι το άθροισμα της καταναλισκόμενης ενέργειας για τον έλεγχο του καναλιού και της ισχύος μετάδοσης P_N πολλαπλασιασμένης με T και μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$E_N = P_N T + N e_c \stackrel{(4.13)}{=} \frac{\left(2^{\frac{R}{W}} - 1\right)}{h_N} N_0 W T + N e_c = \frac{A}{h_N} T + N e_c \quad (4.14)$$

όπου το $A = \left(2^{\frac{R}{W}} - 1\right) N_0 W$ αντιπροσωπεύει τη (σταθερή) απαιτούμενη ισχύ του λαμβανόμενου σήματος στο δέκτη, δεδομένων των απαιτήσεων QoS. Ο βέλτιστος κανόνας παύσης εξάγεται από την παρατήρηση της ακολουθίας κέρδους καναλιού h_j , κάθε τ χρονικές στιγμές, και της ακολουθίας E_j , η οποία θεωρείται ότι είναι \mathcal{F}_j -μετρήσιμη (Ferguson, 2006), όπου \mathcal{F}_j είναι το σ -πεδίο που παράγεται από την ακολουθία h_j . Το σύνολο των κανόνων παύσης (ή αλλιώς των χρονικών στιγμών παύσης) συμβολίζεται ως $\mathcal{C}_1 = \{N: 1 \leq N \leq N_{\max}\}$, ενώ υπενθυμίζεται ότι ένας κανόνας παύσης ορίζεται ως η τυχαία μεταβλητή N , τέτοια ώστε το γεγονός $\{N = j\}$ να ανήκει στο \mathcal{F}_j .

Επιπρόσθετα, λόγω του πεπερασμένου ορίζοντα του προβλήματος, ο οποίος οδηγεί σε πεπερασμένες τιμές για την E_N , αποδεικνύεται ότι ικανοποιούνται οι ακόλουθες δυο συνθήκες:

$$\begin{cases} A1: \liminf_{n \rightarrow \infty} E_n \geq E_\infty \text{ a.s.} \\ A2: \mathcal{E}[\inf_n E_n] > -\infty \end{cases}$$

Επομένως, υπάρχει βέλτιστος κανόνας παύσης.

Πολιτική χρονοπρογραμματισμού πολλαπλών κατωφλίων

Μετά από την παρακολούθηση της κατάστασης του καναλιού κάθε χρονική στιγμή τ , θα πρέπει να αποφασιστεί αν είναι βέλτιστο για τη συσκευή να σταματήσει να αναβάλλει την επικοινωνία και να εκπέμψει τα δεδομένα ή όχι. Αυτή η απόφαση, δηλαδή αν αξίζει να σταματήσει ή να συνεχίσει, εξαρτάται από την προσδοκία για καλύτερες συνθήκες καναλιού στις μελλοντικές χρονικές στιγμές. Τα προβλήματα πεπερασμένου ορίζοντα συνήθως λύνονται με τη μέθοδο της οπισθοδρομικής επαγωγής, ξεκινώντας από το τελικό στάδιο και πηγαίνοντας πίσω στο αρχικό (βλ. Κεφάλαιο 3).

4.5 Προτεινόμενοι Ενεργειακά Αποδοτικοί Μηχανισμοί Οπορτουλιστικού Χρονοπρογραμματισμού

Για να επιλυθεί το συγκεκριμένο πρόβλημα, σε κάθε στάδιο j συγκρίνονται η απώλεια $P_j T$ που θα έχει η συσκευή αν σταματήσει, με την απώλεια που αναμένεται να έχει αν συνεχίσει χρησιμοποιώντας το βέλτιστο κανόνα για τα στάδια $j + 1$ μέχρι N_{\max} , λαμβάνοντας υπόψη το κόστος ελέγχου καναλιού e_c που υπεισέρχεται σε κάθε στάδιο. Επομένως, ο βέλτιστος κανόνας παύσης για την ασύρματη συσκευή προκύπτει ελέγχοντας μια ακολουθία κατωφλίων και αποφασίζοντας αν θα εκπέμψει ή θα συνεχίσει σε κάθε στάδιο j . Συνεπώς, θεωρώντας ότι το κόστος e_c έχει ήδη πληρωθεί όταν θα πρέπει να ληφθεί η απόφαση, η ακόλουθη εξίσωση αναπαριστά την ελάχιστη απώλεια (κατανάλωση ενέργειας) ξεκινώντας από ένα συγκεκριμένο στάδιο j και έχοντας παρατηρήσει τα $H_1 = h_1, \dots, H_j = h_j$:

$$V_j^{(N_{\max})} = \min \{P_j T, A_{N_{\max}-j}\} + e_c, \quad \text{για } j = 1, \dots, N_{\max} \quad (4.15)$$

όπου το $A_{N_{\max}-j} = \mathcal{E}[V_{j+1}^{(N_{\max})} | \mathcal{F}_j]$ εξαρτάται μόνο από τον αριθμό των εναπομεινάντων σταδίων $N_{\max} - j$. Συνεπώς, ο βέλτιστος κανόνας παύσης συνιστά το σταμάτημα της αναβολής και την εκκίνηση της μετάδοσης των δεδομένων στο στάδιο j , εάν $P_j T \leq A_{N_{\max}-j}$. Έτσι προκύπτει ένα βέλτιστο κατώφλι ισχύος μετάδοσης για κάθε στάδιο j , το οποίο εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$P_{th,j}^* = \frac{A_{N_{\max}-j}}{T} \quad (4.16)$$

Για να εξασφαλιστεί το άνω όριο αναβολής (χρονοπρογραμματισμού) D_{\max} , τίθεται $A_0 = P_{\max} T$ για το στάδιο $j = N_{\max}$, όπου το P_{\max} εκφράζει τη μέγιστη ισχύ μετάδοσης που μπορεί να παράγει στην έξοδο του ο RF ενισχυτής ισχύος του πομπού. Ακολουθώντας τη μέθοδο της οπισθοδρομικής επαγωγής, μπορούν να υπολογιστούν τα $A_{N_{\max}-j}$, για κάθε επιμέρους στάδιο, ως εξής:

$$\begin{aligned} A_{N_{\max}-j} &= \mathcal{E}[\min\{PT, A_{N_{\max}-j-1}\}] + e_c = \int_0^{\frac{A_{N_{\max}-j-1}}{T}} pT dF_P + \\ &+ \int_{\frac{A_{N_{\max}-j-1}}{T}}^{P_{\max}} A_{N_{\max}-j-1} dF_P + e_c, \quad \text{για } j = 1, \dots, N_{\max} - 1 \end{aligned} \quad (4.17)$$

όπου η $F_P(p)$ είναι η κανονικοποιημένη κατά P_{\max} cdf της τυχαίας μεταβλητής της ισχύος μετάδοσης. Επομένως, για κάθε στάδιο μπορούν να υπολογιστούν τα βέλτιστα κατώφλια ισχύος $P_{th,j}^*$. Εύκολα αποδεικνύεται ότι τα βέλτιστα κατώφλια ισχύος δίνονται ως εξής:

$$P_{th,j}^* = \int_0^{P_{th,j+1}^*} p dF_P + P_{th,j+1}^* - P_{th,j+1}^* F_P(P_{th,j+1}^*) + \frac{e_c}{T}, \quad \text{για } j = 1, \dots, N_{\max} - 1 \quad (4.18)$$

και $P_{th,N_{\max}}^* = \frac{A_0}{T} = P_{\max}$ για $j = N_{\max}$. Συνεπώς, ο βέλτιστος κανόνας παύσης του προτεινόμενου μοντέλου $E^2OTS - I$, ο οποίος ελαχιστοποιεί την προσδοκώμενη κατανάλωση ενέργειας, μεταφράζεται σε μια βέλτιστη πολιτική χρονοπρογραμματισμού πολλαπλών κατωφλίων. Σύμφωνα με αυτή, η συσκευή μπορεί σε πραγματικό χρόνο να συγκρίνει την απαιτούμενη ισχύ μετάδοσης P_j , η οποία προκύπτει από την τρέχουσα κατάσταση του καναλιού και τις απαιτήσεις QoS στο δέκτη,

με το αντίστοιχο κατώφλι σε κάθε στάδιο. Η πολιτική πολλαπλών κατωφλίων χαρακτηρίζεται από το ακόλουθο διάνυσμα βέλτιστων κατωφλίων:

$$\mathbf{P}_{th}^* = [P_{th,1}^*, \dots, P_{th,N_{max}}^*] \quad (4.19)$$

Συνοψίζοντας, αν η απαιτούμενη ισχύς είναι μικρότερη από το αντίστοιχο κατώφλι, η συσκευή εκπέμπει τα δεδομένα αμέσως, διαφορετικά αναβάλλει την επικοινωνία για το επόμενο στάδιο. Αυτό μπορεί να αναπαρασταθεί με την επόμενη συνθήκη ελέγχου για $j = 1, \dots, N_{max}$:

$\begin{array}{ll} \text{Εάν } P_j \leq P_{th,j}^* & \rightarrow \text{ μετάδοση στο στάδιο } j \\ \text{Αλλιώς} & \rightarrow \text{ αναβολή μετάδοσης} \end{array}$

4.5.5 Μηχανισμός Ελαχιστοποίησης Μέσης Κατανάλωσης Ενέργειας ανά Μονάδα Χρόνου

Πρόβλημα ελαχιστοποίησης

Σύμφωνα με τη δεύτερη προτεινόμενη προσέγγιση, δηλαδή τον $E^2OTS-II$, ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της μέσης κατανάλωσης ενέργειας ανά μονάδα χρόνου, δηλαδή της μέσης κατανάλωσης ισχύος. Δεδομένου ότι στο συγκεκριμένο πρόβλημα υπεισέρχεται ο πρόσθετος παράγοντας του χρόνου (εκτός του D_{max}), θεωρείται ότι το πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού επαναλαμβάνεται στο χρόνο. Η μέση ενέργεια ανά μονάδα χρόνου μπορεί να θεωρηθεί ως το ποσοστό απολαβής σύμφωνα με τη θεωρία βέλτιστης παύσης (βλ. Κεφάλαιο 3) και επομένως το υπό μελέτη πρόβλημα αντιστοιχεί σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης του ποσοστού απολαβής, το οποίο είναι καινοτόμο σε σύγκριση με τη γνωστή μεγιστοποίηση του ποσοστού απολαβής (Ferguson, 2006).

Αρχικά, θεωρείται ότι το πρόβλημα που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.8, επαναλαμβάνεται για L γύρους. Όπως και στην προσέγγιση του E^2OTS-I , ο σκοπός είναι να βρεθεί η βέλτιστη χρονική στιγμή μετάδοσης σε όρους κατανάλωση ενέργειας μέσα σε ένα χρονικό περιθώριο. Ωστόσο στη συγκεκριμένη περίπτωση ενδιαφέρει σε μεγαλύτερο βαθμό ο χρόνος, προκειμένου να αυξηθεί περαιτέρω η μακροπρόθεσμη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Ως συνάρτηση απωλειών παραμένει η κατανάλωση ενέργειας της ασύρματης συσκευής E_N , η οποία δίνεται από την (4.14). Έστω ότι για το επαναλαμβανόμενο πρόβλημα υπάρχει μια ακολουθία χρονικών στιγμών παύσης για κάθε γύρο N_1, \dots, N_L και η αντίστοιχη ακολουθία απωλειών (κατανάλωσης ενέργειας) E_{N_1}, \dots, E_{N_L} , με $1 \leq N_l \leq N_{max}$ για $l = 1, \dots, L$. Σε κάθε γύρο, μετά την παύση ακολουθεί η χρονική περίοδος μετάδοσης των δεδομένων T . Συνεπώς, η συνολική χρονική διάρκεια ενός γύρου T_{N_l} αποτελείται από τη χρονική διάρκεια χρονοπρογραμματισμού και τη χρονική διάρκεια μετάδοσης. Επομένως, η μέση κατανάλωση ενέργειας ανά μονάδα χρόνου δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\frac{\sum_{l=1}^L E_{N_l}}{\sum_{l=1}^L T_{N_l}} \xrightarrow[\text{μεγάλων αριθμών}]{\text{νόμος}} \frac{\mathcal{E}[E_N]}{\mathcal{E}[T_N]} \quad (4.20)$$

όπου $T_N = N\tau + T$.

Το υπο μελέτη πρόβλημα μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα πρόβλημα βέλτιστης παύσης, όπου αναζητείται ο κανόνας παύσης $1 \leq N \leq N_{max}$ της αναβολής της μετάδοσης δεδομένων, έτσι ώστε

4.5 Προτεινόμενοι Ενεργειακά Αποδοτικοί Μηχανισμοί Οπορτουμιστικού Χρονοπρογραμματισμού

να ελαχιστοποιηθεί ο λόγος $\mathcal{E}[E_N]/\mathcal{E}[T_N]$, ο οποίος ονομάζεται ποσοστό απολαβής. Ο βέλτιστος κανόνας παύσης προκύπτει από την παρατήρηση της ακολουθία κέρδους καναλιού h_j κάθε τ χρονικές στιγμές και των δυο ακολουθιών E_j και T_j που θεωρούνται ότι είναι \mathcal{F}_j -μετρήσιμες. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το σύνολο των κανόνων παύσης δίνεται από $\mathcal{C}_2 = \{N: 1 \leq N \leq N_{\max}, \mathcal{E}[T_N] < \infty\}$.

Έστω Z_N η απολαβή ενός διαφορετικού προβλήματος παύσης, η οποία δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$Z_N = E_N - \lambda T_N \stackrel{(4.14)}{=} \frac{A}{h_N} T + Ne_c - \lambda N\tau - \lambda T \quad (4.21)$$

όπου A είναι η λαμβανόμενη ισχύς στον δέκτη [όπως και στην (4.14)]. Με βάση το Θεώρημα 3.12, τα ακόλουθα προβλήματα είναι ισοδύναμα:

$$\inf_{N \in \mathcal{C}_2} \frac{\mathcal{E}[E_N]}{\mathcal{E}[T_N]} = \lambda^* \Leftrightarrow \inf_{N \in \mathcal{C}_2} \mathcal{E}[E_N - \lambda^* T_N] = 0 \quad (4.22)$$

Συνεπώς, το πρόβλημα ελαχιστοποίησης του ποσοστού απολαβής της (4.20) μπορεί να μετατραπεί σε ένα ισοδύναμο σύνθετο πρόβλημα βέλτιστης παύσης, το πρόβλημα ελαχιστοποίησης του $\mathcal{E}[Z_N]$ για κάποιο λ . Επιπρόσθετα, έστω ότι για κάθε λ , υπάρχει μια βέλτιστη χρονική στιγμή παύσης $N(\lambda) \in \mathcal{C}_2$, η οποία ελαχιστοποιεί το $\mathcal{E}[Z_N]$ και η βέλτιστη απολαβή δίνεται ως εξής:

$$V(\lambda) = \inf_{N \in \mathcal{C}_2} [\mathcal{E}[E_N] - \lambda \mathcal{E}[T_N]] = \mathcal{E}[E_{N(\lambda)}] - \lambda \mathcal{E}[T_{N(\lambda)}] \quad (4.23)$$

Ο στόχος είναι να βρεθεί η βέλτιστη μέση κατανάλωση ενέργειας ανά μονάδα χρόνου λ^* , η οποία οδηγεί στη βέλτιστη χρονική στιγμή παύσης $N^* = N(\lambda^*)$. Το βέλτιστο λ^* βρίσκεται επιλύοντας την εξίσωση $V(\lambda^*) = 0$. Συνεπώς, το πρόβλημα μπορεί να χωριστεί σε δυο υποπροβλήματα, το πρώτο αφορά την ελαχιστοποίηση του $\mathcal{E}[Z_N]$ για κάποιο λ (δηλαδή την εύρεση της $V(\lambda)$) και το δεύτερο την επίλυση της $V(\lambda^*) = 0$. Συμπερασματικά, το πρόβλημα ελαχιστοποίησης μπορεί να μοντελοποιηθεί από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\lambda^* = \inf_{N \in \mathcal{C}_2} \frac{\mathcal{E}[P_N T + Ne_c]}{\mathcal{E}[T_N]}, \quad N^* = \arg \inf_{N \in \mathcal{C}_2} \frac{\mathcal{E}[P_N T + Ne_c]}{\mathcal{E}[T_N]} \quad (4.24)$$

Τέλος, η ύπαρξη του βέλτιστου κανόνα παύσης αποδεικνύεται μέσω της ικανοποίησης των ακόλουθων συνθηκών, λόγω της πεπερασμένης φύσης του Z_N .

$$\begin{cases} A1: \liminf_{n \rightarrow \infty} Z_n \geq Z_\infty \text{ a.s.} \\ A2: \mathcal{E}[\inf_n Z_n] > -\infty \end{cases}$$

Πολιτική χρονοπρογραμματισμού πολλαπλών κατωφλίων

Παρόμοια με την προηγούμενη προσέγγιση, μετά από την παρακολούθηση της κατάστασης του καναλιού κάθε χρονική στιγμή τ , θα πρέπει να αποφασιστεί αν είναι βέλτιστο για τη συσκευή να σταματήσει και να εκπέμψει ή όχι. Για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός της λύσης της προηγούμενης προσέγγισης και της λύση του προβλήματος ελαχιστοποίησης του ποσοστού απολαβής, που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη υποενότητα. Σύμφωνα

με το συνδυασμό των δυο προβλημάτων, ο βέλτιστος κανόνας παύσης για την ασύρματη συσκευή προκύπτει ελέγχοντας μια ακολουθία κατωφλίων και αποφασίζοντας αν θα εκπέμψει ή θα συνεχίσει σε κάθε στάδιο j του κάθε γύρου. Η ακόλουθη εξίσωση αναπαριστά την ελάχιστη απώλεια (κατανάλωση ενέργειας) ξεκινώντας από ένα συγκεκριμένο στάδιο j και έχοντας παρατηρήσει τα $H_1 = h_1, \dots, H_j = h_j$:

$$V_j^{(N_{\max})} = \min \{P_j T - \lambda T, A_{N_{\max}-j}\} + e_c - \lambda \tau, \quad \text{για } j = 1, \dots, N_{\max} \quad (4.25)$$

όπου το $A_{N_{\max}-j} = \mathcal{E}[V_{j+1}^{(N_{\max})} | \mathcal{F}_j]$ εξαρτάται μόνο από τον αριθμό των εναπομεινάντων σταδίων $N_{\max} - j$. Από την (4.25) παρατηρείται ότι γίνεται μια σύγκριση της απώλειας που θα έχει η συσκευή $P_j T - \lambda T$ αν σταματήσει και εκπέμψει τα δεδομένα στο στάδιο j , με την απώλεια που αναμένεται ότι θα έχει αν συνεχίσει χρησιμοποιώντας το βέλτιστο κανόνα για τα στάδια $j + 1$ μέχρι N_{\max} , λαμβάνοντας υπόψη το κόστος $e_c - \lambda \tau$ που υπεισέρχεται για την αναβολή σε κάθε στάδιο. Αναφέρεται ότι το λ μπορεί να θεωρηθεί ως ο συντελεστής κόστους του χρόνου. Επομένως, ο βέλτιστος κανόνας παύσης συνιστά την παύση της αναβολής και τη μετάδοση δεδομένων στο στάδιο j , εάν $P_j T - \lambda T \leq A_{N_{\max}-j}$, το οποίο δίνει ένα βέλτιστο κατώφλι ισχύος μετάδοσης σε κάθε στάδιο j , για δεδομένο λ , ως

$$P_{th,j}(\lambda) = \frac{A_{N_{\max}-j}(\lambda)}{T} + \lambda \quad (4.26)$$

Για να εξασφαλιστεί το όριο χρονοπρογραμματισμού D_{\max} στο στάδιο $j = N_{\max}$, τίθεται $A_0 = P_{\max} T - \lambda T$. Ακολουθώντας τη μέθοδο της οπισθοδρομικής επαγωγής, υπολογίζονται τα $A_{N_{\max}-j}$ για κάθε επιμέρους στάδιο ως εξής:

$$\begin{aligned} A_{N_{\max}-j}(\lambda) = \mathcal{E} [\min\{PT - \lambda T, A_{N_{\max}-j-1}(\lambda)\}] + e_c - \lambda \tau = & \int_0^{\frac{A_{N_{\max}-j-1}(\lambda)}{T} + \lambda} (pT - \lambda T) dF_P + \\ & + \int_{\frac{A_{N_{\max}-j-1}(\lambda)}{T} + \lambda}^{P_{\max}} A_{N_{\max}-j-1}(\lambda) dF_P + e_c - \lambda \tau, \quad \text{για } j = 1, \dots, N_{\max} - 1 \end{aligned} \quad (4.27)$$

Κατ' επέκταση, μπορούν να υπολογιστούν τα αντίστοιχα βέλτιστα κατώφλια ισχύος $P_{th,j}$ σε κάθε στάδιο j για δεδομένο λ . Επομένως, για το το βέλτιστο λ^* , το οποίο ικανοποιεί την εξίσωση $V(\lambda^*) = 0$, η βέλτιστη πολιτική που ελαχιστοποιεί τη μέση κατανάλωση ενέργειας ανά μονάδα χρόνου, για το προτεινόμενο μοντέλο $E^2OTS-II$, αντιστοιχεί σε μια πολιτική χρονοπρογραμματισμού πολλαπλών κατωφλίων που ορίζεται από το ακόλουθο διάνυσμα:

$$\mathbf{P}_{th}^* = [P_{th,1}^*, \dots, P_{th,N_{\max}}^*] \quad (4.28)$$

όπου $P_{th,j}^* = P_{th,j}(\lambda^*)$. Με βάση την πολιτική αυτή, σε κάθε στάδιο συγκρίνεται η απαιτούμενη ισχύς P_j που χρειάζεται η συσκευή για να εκπέμψει τα δεδομένα, όπως προκύπτει από την τρέχουσα κατάσταση του καναλιού και τις απαιτήσεις QoS στο δέκτη, με το αντίστοιχο κατώφλι. Αν η P_j είναι μικρότερη από το αντίστοιχο κατώφλι, τότε η συσκευή μεταδίδει δεδομένα.

Επομένως, για να υπολογιστούν τα κατώφλια ισχύος θα πρέπει να υπολογιστεί το βέλτιστο λ^* ,

4.5 Προτεινόμενοι Ενεργειακά Αποδοτικοί Μηχανισμοί Οπορτουμιστικού Χρονοπρογραμματισμού

το οποίο ικανοποιεί την εξίσωση $V(\lambda^*) = 0$ που δίνει την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Ο προτεινόμενος υπολογιστικός αλγόριθμος παρουσιάζεται στην επόμενη υποενότητα, αφού πρώτα παρουσιαστούν ορισμένες προτάσεις που ισχύουν για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Σημειώνεται ότι το $A_{N_{\max}}(\lambda)$ που εμφανίζεται παρακάτω δεν αναπαριστά ένα πραγματικό κατώφλι, όμως μπορεί να υπολογιστεί από την (4.27).

Πρόταση 4.1. Για το βέλτιστο λ^* ισχύει η παρακάτω ισοδυναμία:

$$V(\lambda^*) = 0 \Leftrightarrow A_{N_{\max}}(\lambda^*) = 0$$

Η απόδειξη βρίσκεται στο Παράρτημα Β'. Αξίζει να σημειωθεί ότι η παραπάνω ισοδυναμία είναι εύλογη, αφού το $A_{N_{\max}}(\lambda)$ δίνει εξ ορισμού την ελάχιστη απολαβή που αναμένεται να αποκτηθεί χρησιμοποιώντας το βέλτιστο κανόνα για όλα τα N_{\max} στάδια ξεκινώντας από το στάδιο 0. Επομένως, το $A_{N_{\max}}(\lambda)$ αντιπροσωπεύει τη συνολική βέλτιστη απολαβή.

Επιπρόσθετα, ισχύει η ακόλουθη πρόταση όσον αφορά τα βέλτιστα κατώφλια ισχύος.

Πρόταση 4.2. Τα βέλτιστα κατώφλια ισχύος $P_{th,j}^*$ είναι αύξοντα ως προς το $j = 1, \dots, N_{\max}$, δηλαδή ισχύει

$$P_{th,j}^* \leq P_{th,j+1}^*, \quad \forall j = 1, \dots, N_{\max} - 1 \quad (4.29)$$

Απόδειξη. Για την απόδειξη της παραπάνω πρότασης είναι ισοδύναμο να αποδειχθεί ότι $A_{i+1}(\lambda^*) \leq A_i(\lambda^*)$, $\forall i = 0, \dots, N_{\max} - 2$. Αρχικά, έστω ότι $A_1(\lambda^*) > A_0(\lambda^*)$. Τότε, προκύπτει ότι $A_2(\lambda^*) = \mathcal{E}[\min\{PT - \lambda T, A_1(\lambda^*)\}] + e_c - \lambda\tau \geq \mathcal{E}[\min\{PT - \lambda T, A_0(\lambda^*)\}] + e_c - \lambda\tau = A_1(\lambda^*) > A_0(\lambda^*)$. Συνεπώς, επαγωγικά ισχύει ότι $A_{N_{\max}}(\lambda^*) > A_0(\lambda^*) = P_{\max}T - \lambda T$. Όμως, αφού $A_{N_{\max}}(\lambda^*) = 0$ (βλ. Πρόταση 4.1), συνεπάγεται ότι $\lambda^* > P_{\max}$, κάτι που είναι άτοπο. Επομένως, συνεπάγεται ότι $A_1(\lambda^*) \leq A_0(\lambda^*)$ και ισοδύναμα μπορεί να αποδειχθεί ότι $A_{j+1}(\lambda^*) \leq A_j(\lambda^*)$, για όλα τα $j = 0, \dots, N_{\max} - 2$. \square

Συνεπώς, τα κατώφλια ισχύος αυξάνονται όσο αυξάνεται το j , κάτι που είναι λογικό, αφού οι προσδοκίες για εύρεση χαμηλότερης ισχύος μετάδοσης μειώνονται όσο πλησιάζει το χρονικό όριο D_{\max} . Υπενθυμίζεται ότι για να διασφαλιστεί ότι το D_{\max} είναι το άνω χρονικό όριο όπου το σταμάτημα αποτελεί ντετερμινιστικό γεγονός, το τελικό κατώφλι ισούται με τη μέγιστη ισχύ P_{\max} που μπορεί να παράγει ο πομπός.

Στη συνέχεια αποδεικνύεται ότι η εξίσωση $A_{N_{\max}}(\lambda^*) = 0$ έχει μοναδική λύση. Για το σκοπό αυτό, αποδεικνύεται ότι η συνάρτηση είναι συνεχής, γνησίως φθίνουσα και ότι έχει τουλάχιστον μία λύση.

Πρόταση 4.3. Η $A_j(\lambda)$ είναι συνεχής και γνησίως φθίνουσα ως προς το $\lambda \in [0, +\infty)$, $\forall j = 0, \dots, N_{\max}$.

Η απόδειξη βρίσκεται στο Παράρτημα Β'.

Σημειώνεται ότι καθώς το λ αυξάνεται από το 0 στο $+\infty$, το $A_0(\lambda)$ παίρνει τιμές από το $A_0(0) = P_{\max}T \geq 0$ στο $-\infty$, αντίστοιχα. Το $A_1(\lambda)$ παίρνει τιμές από το $A_1(0) = \mathcal{E}[PT] + e_c \geq 0$ στο $-\infty$ και το $A_2(\lambda)$ παίρνει τιμές από το $A_2(0) = \mathcal{E}[\min\{PT, \mathcal{E}[PT] + e_c\}] + e_c \geq 0$ στο $-\infty$. Επαναληπτικά, το $A_{N_{\max}-1}(\lambda)$ παίρνει τιμές από το $A_{N_{\max}-1}(0) \geq 0$ στο $-\infty$ και το $A_{N_{\max}}(\lambda)$ παίρνει

τιμές από το $A_{N_{\max}}(0) \geq 0$ στο $-\infty$. Συνεπώς, το $A_{N_{\max}}(\lambda) = 0$ έχει τουλάχιστον μία λύση. Συνδυάζοντας αυτό με την Πρόταση 4.3, η εξίσωση $A_{N_{\max}}(\lambda^*) = 0$ έχει μία μοναδική λύση λ^* , η οποία είναι το βέλτιστο ποσοστό απολαβής, δηλαδή η ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας ανά μονάδα χρόνου.

Συνοψίζοντας, η βέλτιστη πολιτική χρονοπρογραμματισμού, σύμφωνα με τον μηχανισμό $E^2OTS-II$, μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας το ελάχιστο ποσοστό απολαβής και μπορεί να μοντελοποιηθεί από την ακόλουθη συνθήκη ελέγχου για κάθε στάδιο $j = 1, \dots, N_{\max}$:

- $V(\lambda^*) = 0 \rightarrow \lambda^*$: min rate of return (μοναδική λύση)
- Πολιτική Χρονοπρογραμματισμού:
 - Εάν $P_j \leq P_{th,j}(\lambda^*) \rightarrow$ μετάδοση στο στάδιο j
 - Αλλιώς \rightarrow αναβολή μετάδοσης

Υπολογιστικός αλγόριθμος

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για τη βέλτιστη πολιτική χρονοπρογραμματισμού απαιτείται ο υπολογισμός του βέλτιστου λ^* . Στη συνέχεια, περιγράφεται ένας αναλυτικός επαναληπτικός αλγόριθμος υπολογισμού των βέλτιστων τιμών του λ^* και των αντίστοιχων κατωφλίων. Αρχικά, ορίζονται μερικές βοηθητικές συναρτήσεις. Δεδομένου ότι ακολουθείται η βέλτιστη πολιτική πολλαπλών κατωφλίων, η μέση κατανάλωση ενέργειας ανά μονάδα χρόνο μπορεί να εκφραστεί εναλλακτικά ως εξής:

$$\frac{\mathcal{E}[E_{N(\lambda)}]}{\mathcal{E}[T_{N(\lambda)}]} = \frac{U(\mathbf{P}_{th}(\lambda))}{Q(\mathbf{P}_{th}(\lambda))} = \Phi(\mathbf{P}_{th}(\lambda)) \quad (4.30)$$

Στόχος είναι η εύρεση της ελάχιστης τιμής της συνάρτησης Φ και της αντίστοιχης βέλτιστης τιμής του διανύσματος \mathbf{P}_{th} . Έστω η συνάρτηση $W(\mathbf{P}_{th}(\lambda), \lambda) = U(\mathbf{P}_{th}(\lambda)) - \lambda Q(\mathbf{P}_{th}(\lambda))$, τότε το ισοδύναμο πρόβλημα ελαχιστοποίησης μπορεί να εκφραστεί ως ακολούθως:

$$\min_{\lambda} W(\mathbf{P}_{th}(\lambda), \lambda) = 0$$

με τα βέλτιστα κατώφλια για κάποιο λ να δίνονται ως $\mathbf{P}_{th}(\lambda) = \arg \min_{\mathbf{P}_{th}} W(\mathbf{P}_{th}, \lambda)$. Όπως παρατηρείται, η συνάρτηση $W(\mathbf{P}_{th}(\lambda), \lambda) = W(\lambda)$ είναι ισοδύναμη με τη συνάρτηση $V(\lambda)$. Συνεπώς, η επίλυση της $W(\lambda^*) = 0$ είναι ισοδύναμη με την επίλυση της $V(\lambda^*) = 0$. Ο υπολογισμός του βέλτιστου λ^* μπορεί να υλοποιηθεί με τον ακόλουθο επαναληπτικό αλγόριθμο, ο οποίος είναι μια παραλλαγή της μεθόδου Newton (Ferguson, 2006; Bertsekas, 1999), ως εξής:

$$\lambda_{n+1} = \lambda_n - \frac{W(\lambda_n)}{W'(\lambda_n)} = \frac{\mathcal{E}[E_{N(\lambda_n)}]}{\mathcal{E}[T_{N(\lambda_n)}]} = \Phi(\mathbf{P}_{th}(\lambda_n)) \quad (4.31)$$

Επομένως, οι βέλτιστες τιμές των κατωφλίων και του λ μπορούν να υπολογιστούν από τον ακόλουθο επαναληπτικό αλγόριθμο:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{th,n} &= \mathbf{P}_{th}(\lambda_n) = \arg \min_{\mathbf{P}_{th}} W(\mathbf{P}_{th}, \lambda_n) \\ \lambda_{n+1} &= \Phi(\mathbf{P}_{th,n}) \end{aligned}$$

Για μια οποιαδήποτε αρχική τιμή λ_0 , ο αλγόριθμος Newton συγκλίνει τετραγωνικά στη μοναδική βέλτιστη μέση κατανάλωση ενέργειας ανά μονάδα χρόνο λ^* και το διάνυσμα κατωφλίων ισχύος

συγκλίνει στο αντίστοιχο βέλτιστο διάνυσμα \mathbf{P}_{th}^* .

Επιπρόσθετα, παρουσιάζεται ο αναλυτικός τύπος της συνάρτησης του ποσοστού απολαβής Φ . Σημειώνεται ότι, δεδομένης της τυχαίας μεταβλητής του κέρδους καναλιού H με cdf $F_H(h)$ και των απαιτήσεων QoS στο δέκτη, μπορεί να υπολογιστεί η τυχαία μεταβλητή της ισχύος μετάδοσης P με cdf $F_P(p)$. Έστω P_N , η τυχαία μεταβλητή παύσης της ισχύος μετάδοσης, η οποία αντιπροσωπεύει την τυχαία μεταβλητή της ισχύος δεδομένου ότι η παύση πραγματοποιείται στο N . Αποδεικνύεται, ότι η cdf της τυχαίας μεταβλητής P_N δίνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} F_{P_{N,j}}(p) &= \Pr [P_{N,j} < p] = \Pr [P \leq p \mid \text{παύση στο } j] = \\ &= \frac{\Pr [P \leq p \ \& \ \text{παύση στο } j]}{\Pr [\text{παύση στο } j]} = \begin{cases} 1 & , p > P_{th,j} \\ \frac{F_P(p)}{F_P(P_{th,j})} & , p \leq P_{th,j} \end{cases} \end{aligned}$$

όπου $\Pr[\text{παύση στο } j] = \rho_j = \prod_{i=1}^{j-1} (1 - F_P(P_{th,i}))F_P(P_{th,j})$. Επιπλέον, η μέση τιμή της τυχαίας μεταβλητής P_N ισούται με

$$\mathcal{E}[P_N] = \sum_{j=1}^{N_{\max}} \mathcal{E}[P \mid \text{παύση στο } j] \cdot \Pr[\text{παύση στο } j]$$

Είναι προφανές ότι $\mathcal{E}[P \mid \text{παύση στο } j] = \mathcal{E}[P_{N,j}] = \int_0^{P_{\max}} p dF_{P_{N,j}} = \int_0^{P_{th,j}} \frac{p}{F_P(P_{th,j})} dF_P$.

Ως εκ τούτου,

$$\mathcal{E}[P_N T] = \sum_{j=1}^{N_{\max}} \left(\rho_j \int_0^{P_{th,j}} \frac{p}{F_P(P_{th,j})} dF_P \right) T$$

Επιπρόσθετα, έστω T_N η τυχαία μεταβλητή παύσης της συνολικής χρονικής διάρκειας του γύρου, δεδομένης της παύσης στο N . Η μέση τιμή του T_N δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\mathcal{E}[T_N] = \mathcal{E}[N]\tau + T = \sum_{j=1}^{N_{\max}} \rho_j j \tau + T \quad (4.32)$$

Συνεπώς, προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση για τη μέση κατανάλωση ενέργειας ανά μονάδα χρόνου:

$$\Phi(\mathbf{P}_{th}) = \frac{\mathcal{E}[P_N T] + \mathcal{E}[N] e_c}{\mathcal{E}[T_N]} = \frac{\sum_{j=1}^{N_{\max}} \left(\rho_j \int_0^{P_{th,j}} \frac{p}{F_P(P_{th,j})} dF_P \right) T + \left(\sum_{j=1}^{N_{\max}} \rho_j j \right) e_c}{\sum_{j=1}^{N_{\max}} \rho_j j \tau + T} \quad (4.33)$$

Συμπερασματικά, ο προτεινόμενος επαναληπτικός αλγόριθμος υπολογίζει τα \mathbf{P}_{th} και λ σε κάθε επανάληψη $n = 0, 1, \dots$ και συγκλίνει τετραγωνικά στις βέλτιστες τιμές λ^* και \mathbf{P}_{th}^* . Για κάθε n , προκύπτει ότι $\mathbf{P}_{th,n} = \mathbf{P}_{th}(\lambda_n) = [P_{th,1}(\lambda_n), \dots, P_{th,N_{\max}}(\lambda_n)]$, όπου $P_{th,N_{\max}}(\lambda_n) = P_{\max}$ για

$j = N_{\max}$ και

$$P_{th,j}(\lambda_n) = \int_0^{P_{th,j+1}(\lambda_n)} p dF_P + P_{th,j+1}(\lambda_n) - P_{th,j+1}(\lambda_n) \times \\ \times F_P(P_{th,j+1}(\lambda_n)) + \frac{e_c}{T} - \lambda_n \frac{\tau}{T}, \quad \text{για } j = 1, \dots, N_{\max} - 1 \quad (4.34)$$

και $\lambda_{n+1} = \Phi(\mathbf{P}_{th,n}) = \Phi(\mathbf{P}_{th}(\lambda_n))$

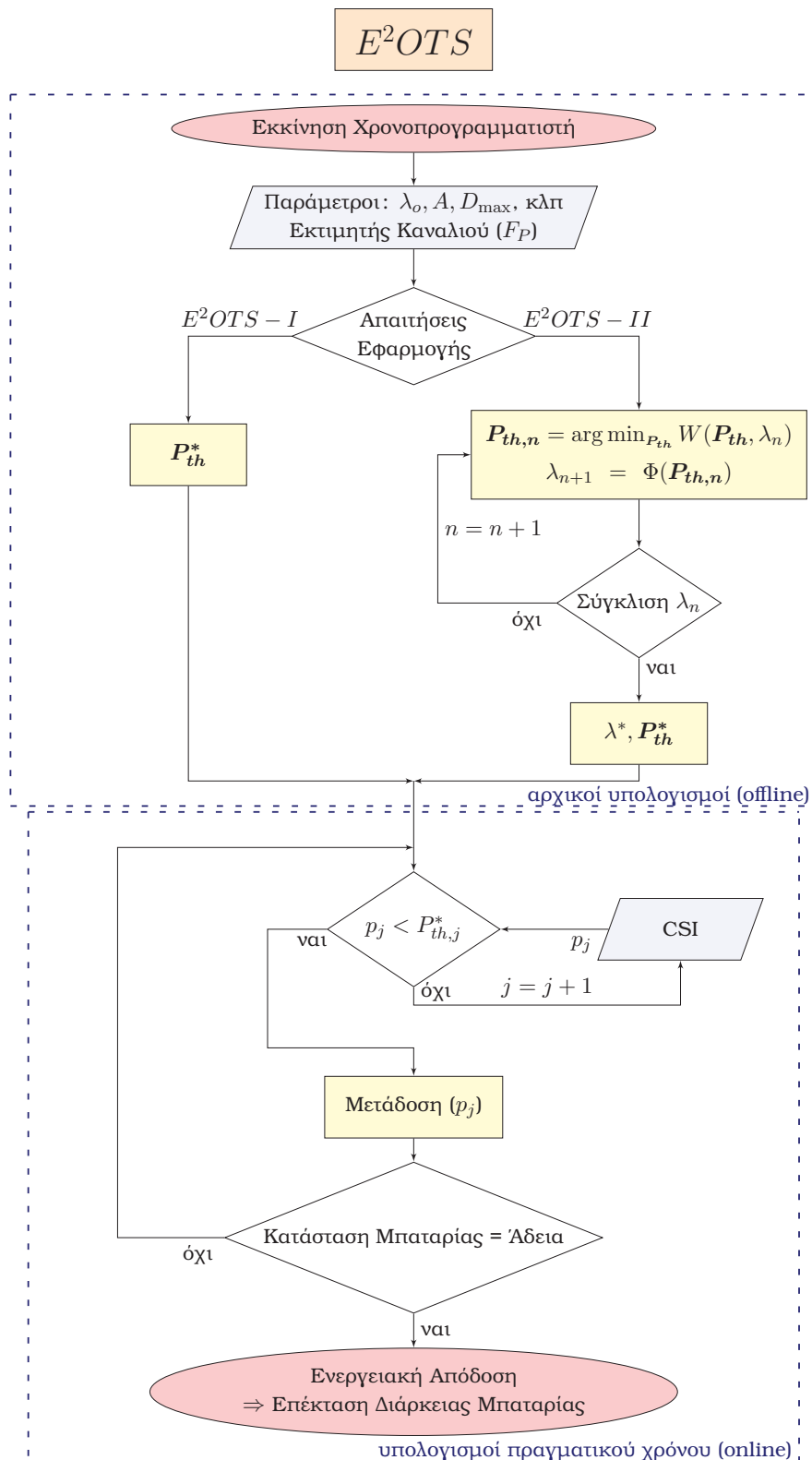
Επιπρόσθετα, μπορεί να αποδειχθεί μέσω οπισθοδρομικής επαγωγής (βλ. Παράρτημα Β) ότι το διάλυμα των κατώφλιων ισχύος \mathbf{P}_{th} , για $j = 1, \dots, N_{\max} - 1$, μπορεί να υπολογιστεί εναλλακτικά ως εξής:

$$P_{th,j}(\lambda) = \sum_{k=j+1}^{N_{\max}} \left(\prod_{i=j+1}^{k-1} (1 - F_P(P_{th,i}(\lambda))) \int_0^{P_{th,k}(\lambda)} p dF_P \right) - \\ - \left(\frac{\lambda\tau}{T} - \frac{e_c}{T} \right) \left\{ \sum_{k=j+1}^{N_{\max}} \prod_{i=j+1}^{k-1} (1 - F_P(P_{th,i}(\lambda))) + 1 \right\} \quad (4.35)$$

Τέλος, το Σχήμα 4.9 απεικονίζει το διάγραμμα ροής του προτεινόμενου χρονοπρογραμματιστή, συνοψίζοντας τις δυο προσεγγίσεις που παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Όπως παρατηρείται, ο κατανεμημένος αλγόριθμος μπορεί να διαχωριστεί σε δυο στάδια: 1) το αρχικό στάδιο «εκτός λειτουργίας» (offline), κατά το οποίο πραγματοποιούνται οι πολυπλοκότεροι υπολογισμοί πριν η ασύρματη συσκευή μπει σε λειτουργία και το οποίο εκτελείται μια φορά και 2) το στάδιο «εντός λειτουργίας» (online) ή πραγματικού χρόνου κατά το οποίο ο χρονοπρογραμματιστής παίρνει σε πραγματικό χρόνο αποφάσεις μετάδοσης, ενώ η συσκευή βρίσκεται σε λειτουργία. Ο χρονοπρογραμματιστής μπορεί να υπολογίσει offline τις βέλτιστες πολιτικές με τα αντίστοιχα κατώφλια για διάφορες εφαρμογές και να τις αποθηκεύσει στη μνήμη της συσκευής, έτσι ώστε να μπορεί να τα ανακτήσει όταν εκτελείται μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Συνεπώς, δεδομένου ότι μια ασύρματη συσκευή εκτελεί συνήθως γνωστές εφαρμογές, ο παραπάνω διαχωρισμός αφαιρεί σημαντικό υπολογιστικό φορτίο από το χρονοπρογραμματιστή εν ώρα λειτουργίας, προσφέροντας ευελιξία και αποδοτικότητα.

4.5.6 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων και Σχολιασμός

Στις προηγούμενες ενότητες παρουσιάστηκαν οι δυο θεωρητικές προσεγγίσεις του E^2OTS για τη λύση του προβλήματος ελαχιστοποίησης κατανάλωσης ενέργειας μετάδοσης δεδομένων, χρησιμοποιώντας τη θεωρία βέλτιστης παύσης. Στη συγκεκριμένη υποενοότητα, γίνεται αξιολόγηση της απόδοσης των προτεινόμενων μηχανισμών. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζεται το μοντέλο προσομοιώσεων, οι μετρικές αξιολόγησης, τα προκύπτοντα αριθμητικά αποτελέσματα για διαφορετικά σενάρια παραμέτρων, καθώς και τα αποτελέσματα προσομοιώσεων που συγκρίνουν τα προτεινόμενα σχήματα με κάποια ευρετικά σχήματα χρονοπρογραμματισμού, έτσι ώστε να επαληθευτεί η εγκυρότητα της θεωρητικής ανάλυσης και να αξιολογηθούν οι μηχανισμοί.



Σχήμα 4.9: Διάγραμμα ροής του προτεινόμενου χρονοπρογραμματιστή.

Μοντέλο προσομοίωσης και μετρικές αξιολόγησης

Για να αξιολογηθούν οι δυο προτεινόμενοι μηχανισμοί, πραγματοποιήθηκαν εκτενείς προσομοιώσεις σε MatLab. Πιο συγκεκριμένα, θεωρείται ένα ασύρματο δίκτυο, όπου οι ασύρματες ζεύξεις εμφανίζουν διαλείψεις μικρής κλίμακας. Οι ασύρματες συσκευές έχουν πεπερασμένη μπαταρία με ίδια αρχική χωρητικότητα, ενώ η διάρκεια των προσομοιώσεων για κάθε εκτέλεση είναι απολύτως ανάλογη της χωρητικότητας της μπαταρίας. Για τις μελετώμενες εφαρμογές θεωρείται το χρονικό όριο αναβολής της μετάδοσης (χρονοπρογραμματισμού) D_{max} , ενώ γίνεται η υπόθεση ότι υπάρχουν πάντα δεδομένα διαθέσιμα για μετάδοση. Σε όλα τα πειράματα προσομοιώσεων χρησιμοποιούνται στατικά τερματικά ή τερματικά χαμηλής κινητικότητας, δηλαδή τερματικά των οποίων η κίνηση δεν επηρεάζει σημαντικά την cdf του καναλιού. Επιπρόσθετα, το μοντέλο καναλιών WINNER II (IST-WINNER II, 2007) εφαρμόζεται για τον υπολογισμό των μέσων απωλειών διάδοσης.

Όπως έχει προαναφερθεί, θεωρούνται ασύρματα κανάλια με γνωστή cdf, καθώς και πλήρης γνώση της πληροφορίας κατάστασης καναλιού μέσω πιλοτικών σημάτων. Εάν αυτή η γνώση συνδυαστεί με τις απαιτήσεις QoS ισχύος στο δέκτη, μπορεί να υπολογιστεί η αντίστοιχη cdf της ισχύος μετάδοσης $F_P(p)$. Όσον αφορά τα κανάλια διαλείψεων, μελετώνται οι δύο πιο συνηθισμένες περιπτώσεις: 1) οι διαλείψεις Rayleigh και 2) οι διαλείψεις Rice, έτσι ώστε να παρουσιαστεί πως τα χαρακτηριστικά των καναλιών επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Επιπρόσθετα, η ενέργεια που χρειάζεται για την απόκτηση της CSI υπολογίζεται ως $e_c = p_c t_c$, όπου το p_c αναφέρεται στην κατανάλωση ενέργειας λήψης δεδομένων και το t_c είναι η χρονική διάρκεια λήψης του σήματος αναφοράς. Σχετικά με αυτές τις παραμέτρους, έγινε η υπόθεση ότι το μέγεθος του πακέτου του πιλοτικού σήματος αναφοράς είναι αρκετά μικρότερο από το μέγεθος των προς μετάδοση δεδομένων, συνεπώς και το t_c θεωρείται σημαντικά μικρότερο από το T . Επίσης, η απόδοση του χρονοπρογραμματιστή για διάφορες τιμές του e_c εξετάζεται στις προσομοιώσεις, ενώ αναφέρεται ότι η ακριβής τιμή της κατανάλωσης ενέργειας λήψης μπορεί να υπολογιστεί από μετρήσεις, ανάλογα με την εκάστοτε τεχνολογία της ασύρματης συσκευής.

Οι κύριες μετρικές αξιολόγησης που χρησιμοποιούνται είναι η μέση κατανάλωση ενέργειας και η διάρκεια ζωής της μπαταρίας των τερματικών. Μια άλλη σημαντική μετρική που χρησιμοποιείται είναι η μέση απόδοση, η οποία απεικονίζει πόσο ενεργειακά αποδοτικό είναι ένα σχήμα για τη μετάδοση δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, όσο πιο μικρές τιμές παίρνει η μέση απόδοση, τόσο ενεργειακά αποδοτικότερος είναι ένας μηχανισμός. Οι μονάδες της μέσης απόδοσης είναι Joules/MB ή ισοδύναμα W/MBps και εκφράζεται ως εξής:

$$\text{Μέση Απόδοση} = \frac{\text{Μέση Κατανάλωση Ενέργειας}}{\text{Μέση Ρυθμοαπόδοση}} \quad (4.36)$$

Προτού παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, προτείνονται για λόγους σύγκρισης, πέντε επιπλέον ευρετικά σχήματα χρονοπρογραμματισμού δεδομένων. Αυτά τα ευρετικά σχήματα βασίζονται είτε σε απλές μακροπρόθεσμες στατιστικές μεθόδους είτε σε λύσεις κάποιων άλλων απλών προβλημάτων βέλτιστης παύσης, με σκοπό την εύρεση μηχανισμών απόφασης για επικοινωνία ή αναβολή. Αναλυτικότερα, οι ευρετικές μέθοδοι είναι οι ακόλουθες:

1. *Ντετερμινιστικός Χρονοπρογραμματιστής Μετάδοσης (Deterministic Transmission Scheduler - DTS)*. Ο συγκεκριμένος χρονοπρογραμματιστής βασίζεται στην απλή μέθοδο προγραμμα-

4.5 Προτεινόμενοι Ενεργειακά Αποδοτικοί Μηχανισμοί Οπορτουνοιστικού Χρονοπρογραμματισμού

τισμού της μετάδοσης των δεδομένων μιας συσκευής ανά σταθερές ισαπέχουσες χρονικές στιγμές. Πιο συγκεκριμένα, ο χρονοπρογραμματιστής ειδοποιεί τη συσκευή να εκπέμψει δεδομένα κάθε D_{\max} . Αυτή η μέθοδος, παρ' όλη την απλότητα της, είναι απαραίτητη ως αναφορά.

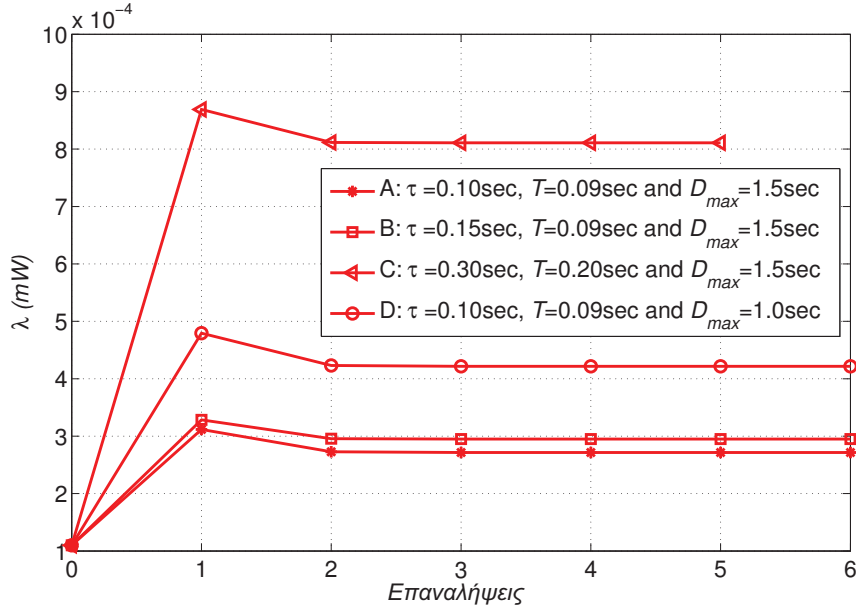
2. *Τυχαίος Χρονοπρογραμματιστής Μετάδοσης (Random Transmission Scheduler - RTS)*. Ο RTS είναι το αντίθετο του DTS, αφού ο χρονοπρογραμματιστής δεν δίνει εντολή για μετάδοση δεδομένων σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, αλλά η συσκευή εκπέμπει σε μια τυχαία χρονική στιγμή μέσα στο διάστημα $[0, D_{\max}]$.
3. *Πιθανοτικός Χρονοπρογραμματιστής Μετάδοσης (Probabilistic Transmission Scheduler - PTS)*. Ένας εύλογος μηχανισμός χρονοπρογραμματισμού μετάδοσης ειδοποιεί τη συσκευή να εκπέμψει δεδομένα, εάν η πιθανότητα να βρεθεί τιμή ισχύος μικρότερη από την τρέχουσα τιμή p_j είναι μικρότερη από ένα κατώφλι. Πιο συγκεκριμένα, ο χρονοπρογραμματιστής αποφασίζει ακολουθώντας την παρακάτω συνθήκη ελέγχου:

<u>Εάν</u> $\Pr [P < p_j] < \text{κατώφλι}$	\rightarrow μετάδοση
<u>Αλλιώς</u>	\rightarrow αναβολή

4. *Χρονοπρογραμματιστής Μετάδοσης Μέσης Ισχύος (Average Power Transmission Scheduler - APTS)*. Η ευρετική μέθοδος APTS βασίζεται στη μέση παρατηρούμενη ισχύ όπως αυτή υπολογίζεται από την αρχή του τρέχοντος γύρου. Αναλυτικότερα, ο χρονοπρογραμματιστής αποφασίζει αν η συσκευή θα μεταδώσει δεδομένα ή θα αναβάλει την επικοινωνία, συγκρίνοντας την τρέχουσα τιμή ισχύος p_j με τη μέση τιμή από την αρχή του γύρου, ως εξής:

<u>Εάν</u> $p_j < \text{average}_{\forall i \in [1, j-1]}(p_i)$	\rightarrow μετάδοση
<u>Αλλιώς</u>	\rightarrow αναβολή

5. *Χρονοπρογραμματιστής Μετάδοσης Ελάχιστης Ισχύος (Least Power Transmission Scheduler - LPTS)*. Ο LPTS βασίζεται στη λύση ενός πολύ γνωστού προβλήματος βέλτιστης παύσης, του προβλήματος της γραμματέως (βλ. Κεφάλαιο 3). Συνοπτικά, το πρόβλημα της γραμματέως αναφέρεται στο πρόβλημα επιλογής της καλύτερης υποψήφιας γραμματέως για μια διαθέσιμη θέση, δεδομένου ότι οι γραμματείς περνάνε από συνέντευξη διαδοχικά χωρίς επιστροφή. Η βέλτιστη λύση για το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι ο «κανόνας του 37%», ο οποίος υποδηλώνει ότι πρέπει να περάσει από συνέντευξη το 37% των υποψηφίων και στη συνέχεια να επιλεγεί η καλύτερη υποψήφια σε σχέση με τις προηγούμενες που έχουν περάσει μέχρι τότε. Αν γίνει μια μικρή προσαρμογή στο πρόβλημα της ελαχιστοποίησης ενέργειας, προκύπτει ότι η βέλτιστη πολιτική σύμφωνα με τη λύση του προβλήματος γραμματέως είναι να παρατηρηθεί το 37% του συνολικού χρόνου D_{\max} , για το συγκεκριμένο γύρο, και στη συνέχεια να επιλεγεί η χρονική στιγμή για μετάδοση j με την ελάχιστη ισχύ p_j συγκρινόμενη με τις προηγούμενες



Σχήμα 4.10: Σύγκλιση του λ του $E^2OTS-II$ για διαφορετικά σενάρια, με $A = 10^{-11}W$ και $P_{max} = 0.1W$ (κανάλια Rayleigh).

τιμές ισχύος. Μια αλγοριθμική αναπαράσταση του $LPTS$ φαίνεται παρακάτω:

<u>Εάν</u> $j \cdot \tau < 0.37 \cdot D_{max}$	\rightarrow αναβολή
<u>Αλλιώς</u> <u>εάν</u> $p_j < p_{min} = \min_{\forall i \in [1, j-1]}(p_i)$	\rightarrow μετάδοση
<u>αλλιώς</u>	\rightarrow αναβολή

Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Rayleigh διαλείψεις καναλιού: Αρχικά, θεωρείται η περίπτωση των Rayleigh διαλείψεων για τα ασύρματα κανάλια, όπου η pdf του κέρδους ισχύος καναλιού δίνεται ως εξής (βλ. Παράρτημα Α):

$$f_H(h) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{h}{2\sigma^2}\right) \quad (4.37)$$

όπου το σ προκύπτει από το μέσο κέρδος ισχύος καναλιού $\mathcal{E}[h] = 2\sigma^2$.

Αποδεικνύεται ότι η κανονικοποιημένη κατά P_{max} cdf της ισχύος μετάδοσης δίνεται ακολούθως:

$$F_P(p) = \frac{\exp\left(-\frac{A}{2\sigma^2 p}\right)}{\exp\left(-\frac{A}{2\sigma^2 P_{max}}\right)} \quad (4.38)$$

όπου $p(h) = A/h$, με A τη λαμβανόμενη ισχύ στον δέκτη [όπως και στην (4.14)].

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα των προτεινόμενων χρονοπρογραμματισμών για διαφορετικά σενάρια παραμέτρων. Αρχικά, εξετάζεται η σύγκλιση του προτεινόμενου επαναληπτικού αλγόριθμου για την προσέγγιση της ελαχιστοποίησης του ποσοστού απολαβής ($E^2OTS-II$), ο οποίος υπολογίζει τις βέλτιστες τιμές της μέσης κατανάλωσης ενέργειας ανά μονάδα χρόνου λ^* και του διανύσματος κατωφλίων ισχύος \mathbf{P}_{th}^* . Το Σχήμα 4.10 απεικονίζει τη σύγκλιση,

4.5 Προτεινόμενοι Ενεργειακά Αποδοτικοί Μηχανισμοί Οπορτουλιστικού Χρονοπρογραμματισμού

Πίνακας 4.1: Σύγκλιση ενδεικτικών κατωφλίων ισχύος για τον $E^2OTS-II$ για κανάλια Rayleigh (Σενάριο A).

Επαναλήψεις	$P_{th,1}(\mu\text{W})$	$P_{th,3}(\mu\text{W})$	$P_{th,5}(\mu\text{W})$	$P_{th,8}(\mu\text{W})$
1	1.6187	1.7697	1.9783	2.5227
2	0.0984	0.5687	1.0483	1.9127
3	0.4527	0.8392	1.2475	2.0353
4	0.4622	0.8464	1.2530	2.0387
5	0.4623	0.8465	1.2530	2.0387
6	0.4623	0.8465	1.2530	2.0387

δηλαδή τον αριθμό των απαιτούμενων επαναλήψεων, έτσι ώστε να προκύψει το λ^* για διαφορετικά σενάρια προσομοιώσεων. Πιο συγκεκριμένα, θεωρήθηκαν τα ακόλουθα σενάρια :

- Σενάριο A: $\tau = 0.10 \text{ sec}$, $T = 0.09 \text{ sec}$, $D_{\max} = 1.5 \text{ sec}$ και $N_{\max} = 15$,
- Σενάριο B: $\tau = 0.15 \text{ sec}$, $T = 0.09 \text{ sec}$, $D_{\max} = 1.5 \text{ sec}$ και $N_{\max} = 10$,
- Σενάριο C: $\tau = 0.30 \text{ sec}$, $T = 0.20 \text{ sec}$, $D_{\max} = 1.5 \text{ sec}$ και $N_{\max} = 5$,
- Σενάριο D: $\tau = 0.10 \text{ sec}$, $T = 0.09 \text{ sec}$, $D_{\max} = 1.0 \text{ sec}$ και $N_{\max} = 10$.

Όπως παρατηρείται, ο αλγόριθμος συγκλίνει αρκετά γρήγορα χωρίς να επηρεάζεται από την αλλαγή των παραμέτρων, κάτι που ήταν αναμενόμενο εξαιτίας της τετραγωνικής φύσης της σύγκλισης του αλγορίθμου. Επιπρόσθετα, από το Σχήμα 4.10 φαίνεται ότι οι τιμές του λ^* μειώνονται όσο ο μέγιστος αριθμός παρατηρήσεων N_{\max} αυξάνεται. Αυτό είναι λογικό, αν σκεφτεί κανείς ότι οι ευκαιρίες για παύση αυξάνονται, όσο αυξάνεται ο αριθμός των παρατηρήσεων και συνεπώς των συγκρίσεων με τα βέλτιστα κατώφλια. Ωστόσο, υπενθυμίζεται ότι επιπρόσθετη κατανάλωση ενέργειας υπεισέρχεται από τις παρατηρήσεις, κάτι το οποίο λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς. Επιπρόσθετα, ο Πίνακας 4.1 απεικονίζει την αντίστοιχη σύγκλιση των τιμών κάποιων ενδεικτικών κατωφλίων ισχύος για το Σενάριο A του Σχήματος 4.10.

Ο Πίνακας 4.2 παρουσιάζει τα κυριότερα αποτελέσματα σύγκρισης των σεναρίων προσομοίωσης του Σχήματος 4.10, για τους προτεινόμενους μηχανισμούς E^2OTS-I και $E^2OTS-II$. Όπως παρατηρείται, η ενεργειακή απόδοση και στις δυο προσεγγίσεις είναι μεγαλύτερη, καθώς ο μέγιστος αριθμός παρατηρήσεων N_{\max} αυξάνεται.

Στη συνέχεια, συγκρίνονται οι δυο προτεινόμενες προσεγγίσεις με τα πέντε ευρετικά σχήματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Τα αποτελέσματα αναφέρονται στο Σενάριο A, όπου το $\lambda^* = 2.72 \cdot 10^{-4} \text{ mW}$ για τον $E^2OTS-II$, αλλά τονίζεται ότι για τα υπόλοιπα σενάρια τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα είναι παρόμοια. Πιο συγκεκριμένα, ο Πίνακας 4.3 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της συγκριτικής αξιολόγησης. Για τις προσομοιώσεις, θεωρούνται πανομοιότυπες συνθήκες καναλιών και δικτύων για όλα τα σχήματα. Οι μετρικές που εξετάζονται είναι η διάρκεια ζωής της μπαταρίας των ασύρματων συσκευών, δηλαδή η χρονική διάρκεια μέχρι η μπαταρία να εξαντληθεί, η μέση κατανάλωση ισχύος και η μέση απόδοση, η οποία ενσωματώνει τη μέση κατανάλωση ισχύος και τη

Πίνακας 4.2: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για διαφορετικά σενάρια.

Σενάρια	E^2OTS-I		$E^2OTS-II$		
	Μέση κατανάλωση ισχύος (mW)	Μέση απόδοση (mJ/MB)	λ^* (mW)	Μέση κατανάλωση ισχύος (mW)	Μέση απόδοση (mJ/MB)
A	$4.42 \cdot 10^{-4}$	0.017	$2.72 \cdot 10^{-4}$	$3.05 \cdot 10^{-4}$	0.023
B	$4.45 \cdot 10^{-4}$	0.019	$2.95 \cdot 10^{-4}$	$3.32 \cdot 10^{-4}$	0.025
C	$1.09 \cdot 10^{-3}$	0.060	$8.11 \cdot 10^{-4}$	$1.00 \cdot 10^{-3}$	0.066
D	$6.62 \cdot 10^{-4}$	0.019	$4.22 \cdot 10^{-4}$	$5.29 \cdot 10^{-4}$	0.026

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα συγκριτικής αξιολόγησης μηχανισμών για κανάλια Rayleigh.

	Διάρκεια μπαταρίας (h+min)	Μέση διάρκεια χρονοπρογραμμα- τισμού (sec)	Μέση απόδοση (mJ/MB)	Μέση κατανάλωση ισχύος (mW)	Μέση ρυθμοαπόδοση (kbps)
E^2OTS-I	3h 40min	0.43	0.017	$4.42 \cdot 10^{-4}$	205.34
$E^2OTS-II$	5h 36min	0.89	0.023	$3.05 \cdot 10^{-4}$	103.98
DTS	0h 53min	1.50	0.346	$2.59 \cdot 10^{-3}$	60.00
RTS	0h 29min	0.80	0.399	$5.67 \cdot 10^{-3}$	113.63
PTS	1h 39min	0.79	0.095	$1.34 \cdot 10^{-3}$	113.27
$APTS$	1h 01min	0.28	0.041	$1.63 \cdot 10^{-3}$	317.94
$LPTS$	1h 32min	1.08	0.144	$1.49 \cdot 10^{-3}$	83.01

ρυθμοαπόδοση. Επιπλέον με τις άλλες μετρικές αξιολόγησης, παρουσιάζεται και η μέση διάρκεια χρονοπρογραμματισμού. Η διάρκεια αυτή αντιπροσωπεύει τις μέσες τιμές (για όλες τις εκτελέσεις προσομοιώσεων) των χρονικών περιόδων μέσα στο διάστημα $[0, D_{\max}]$ κατά τις οποίες αναβάλλεται η μετάδοση των δεδομένων από τον αντίστοιχο χρονοπρογραμματιστή. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτή η μετρική είναι πολύ χρήσιμη για τον υπολογισμό της καθυστέρησης από άκρο σε άκρο (end-to-end delay) που υπόκεινται τα δεδομένα κάθε μετάδοσης. Ειδικότερα, για μια ασύρματη ζεύξη σημείου προς σημείο, όπως η μελετώμενη, μπορεί να οριστεί η καθυστέρηση ενός πακέτου από άκρο σε άκρο ως το άθροισμα της διάρκειας χρονοπρογραμματισμού για το συγκεκριμένο πακέτο και της διάρκειας μετάδοσης του πακέτου T , θεωρώντας την καθυστέρηση διάδοσης αμελητέα.

Όπως παρατηρείται από τον Πίνακα 4.3, και οι δυο προτεινόμενες προσεγγίσεις υπερεισχύουν σε όλες τις μετρικές έναντι όλων των άλλων σχημάτων. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά την ενεργειακή απόδοση, επιτυγχάνεται 122% και 238% επέκταση του χρόνου ζωής της μπαταρία για τον E^2OTS-I και τον $E^2OTS-II$ αντίστοιχα, συγκρίνοντας τους με τον πιο αποδοτικό από τους υπόλοιπους χρονοπρογραμματιστές ανά περίπτωση. Επιπλέον, σημειώνεται ότι η πειραματική τιμή της μέσης κατανάλωσης ισχύος για τον $E^2OTS-II$ είναι $3.05 \cdot 10^{-4}$ mW, η οποία είναι πολύ κοντά στην θεωρητικά υπολογισμένη τιμή λ^* . Συγκρίνοντας τα προτεινόμενα σχήματα E^2OTS-I και $E^2OTS-II$ μεταξύ τους, αναφέρεται ότι το πρώτο οδηγεί σε καλύτερη μέση απόδοση και άρα είναι πιο κατάλληλο για εφαρμογές οι οποίες πρέπει να είναι ενεργειακά αποδοτικές όσον αφορά

4.5 Προτεινόμενοι Ενεργειακά Αποδοτικοί Μηχανισμοί Οπορτουνοιστικού Χρονοπρογραμματισμού

τη μετάδοση δεδομένων, όμως είναι επιθυμητή και η μεγαλύτερη ρυθμοαπόδοση σε σχέση με αυτή που συνεπάγεται από τις απαιτήσεις QoS. Από την άλλη μεριά, το δεύτερο σχήμα καταλήγει σε αρκετά μικρότερες τιμές μέσης κατανάλωσης ενέργειας, κάτι που οδηγεί σε μεγαλύτερη αυτονομία μπαταρίας (53% επέκταση σε σχέση με το πρώτο σχήμα), και συνεπώς το καθιστά κατάλληλο για εφαρμογές που ο κρίσιμος παράγοντας είναι η ενέργεια, ενώ οι ανάγκες ρυθμοαπόδοσης ικανοποιούνται από τις απαιτήσεις QoS.

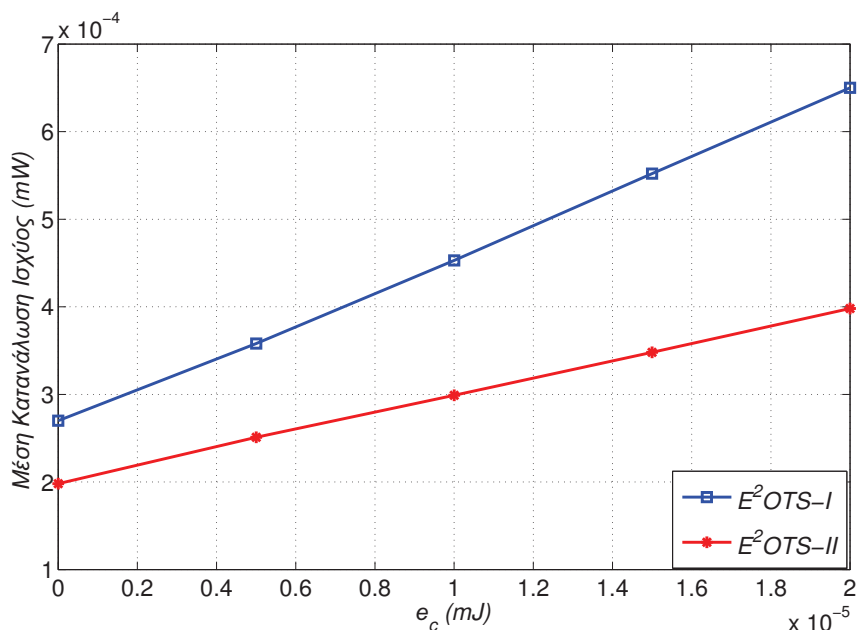
Στις προηγούμενες προσομοιώσεις, θεωρήθηκε ότι η ασύρματη συσκευή εκπέμπει δεδομένα συνεχόμενα μέχρι να τελειώσει η μπαταρία της και τότε τελειώνει η εκάστοτε εκτέλεση της προσομοίωσης. Επιπρόσθετα, μελετάται και ένα επιπλέον σενάριο για τα δυο προτεινόμενα σχήματα, σύμφωνα με το οποίο η συσκευή θα πρέπει να εκπέμπει μια συγκεκριμένη ποσότητα δεδομένων (π.χ. 1GB), η οποία διαιρείται σε μικρότερα πακέτα (π.χ. 90 kbits) για κάθε μετάδοση, σε κάθε εκτέλεση της προσομοίωσης. Σε αυτό το σενάριο το σχήμα E^2OTS-I τελειώνει τη μετάδοση των συνολικών δεδομένων σε 10h και 31min και καταλήγει σε μέση απόδοση 0.017 mJ/MB, μέση κατανάλωση ισχύος $4.54 \cdot 10^{-4}$ mW και μέση ρυθμοαπόδοση 211.20kbps. Από τη άλλη μεριά, το σχήμα $E^2OTS-II$ τελειώνει τη μετάδοση των συνολικών δεδομένων σε 21h και 55min και καταλήγει σε μέση απόδοση 0.024 mJ/MB, μέση κατανάλωση ισχύος $2.99 \cdot 10^{-4}$ mW και μέση ρυθμοαπόδοση 101.38 kbps. Όπως παρατηρείται, τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Ωστόσο, δεδομένου ότι το σχήμα E^2OTS-I τελειώνει τη μετάδοση γρηγορότερα, η ενεργειακή του απόδοση μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω χρησιμοποιώντας μια πρόσθετη τεχνική, η οποία εισάγει την ασύρματη συσκευή σε κατάσταση αναμονής για τον υπόλοιπο χρόνο μέχρι το σχήμα $E^2OTS-II$ να τελειώσει τη μετάδοση. Αυτό οδηγεί σε ίδια μέση ρυθμοαπόδοση και για τα δυο σχήματα, διατηρώντας τη μέση απόδοση όπως πριν. Ωστόσο, η μέση κατανάλωση ισχύος μειώνεται στο $2.18 \cdot 10^{-4}$ mW για το E^2OTS-I .

Τέλος, λόγω της σημασίας της κατανάλωσης ενέργειας απόκτησης της CSI, στα Σχήματα 4.11 και 4.12 παρουσιάζεται η επίδραση του e_c στη μέση κατανάλωση ισχύος και στη μέση απόδοση μιας συσκευής, αντίστοιχα. Όπως παρατηρείται, οι τιμές του e_c παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στον υπολογισμό της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας και κατ'επέκταση της μέσης απόδοσης. Υπενθυμίζεται ότι τα δυο προτεινόμενα σχήματα λαμβάνουν υπόψη αυτή την παράμετρο στους υπολογισμούς των βέλτιστων πολιτικών χρονοπρογραμματισμού [βλ. (4.18) και (4.34)]. Επιπρόσθετα, τα δυο σχήματα επαληθεύουν την παρατήρηση ότι η επιλογή μεταξύ του E^2OTS-I και του $E^2OTS-II$ θα πρέπει να γίνεται ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι τα δυο προτεινόμενα σχήματα υπερισχύουν και για τις δυο μετρικές σε σχέση με τις ευρετικές μεθόδους, για όλες τις τιμές του e_c που παρουσιάζονται στα σχήματα, ωστόσο για λόγους απλότητας τα αποτελέσματα παραλείπονται.

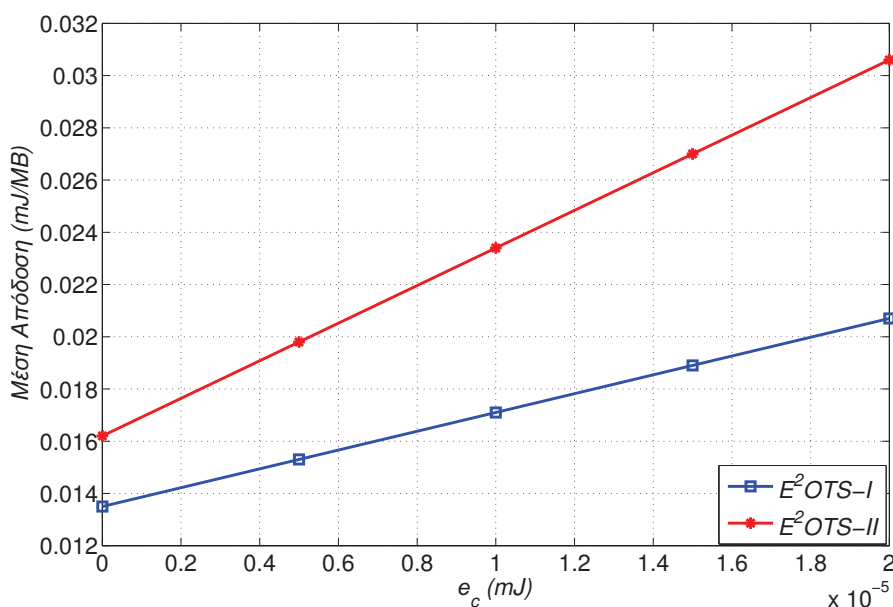
Ricean διαλείψεις καναλιού: Στη συνέχεια, θεωρείται η περίπτωση των Ricean διαλείψεων καναλιού. Η pdf του κέρδους ισχύος καναλιού δίνεται ως εξής (βλ. Παράρτημα Α):

$$f_H(h) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{s^2}{2\sigma^2} - \frac{h}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{s\sqrt{h}}{\sigma^2}\right) \quad (4.39)$$

όπου το $I_0(\cdot)$ είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel πρώτου είδους μηδενικής τάξης, το s είναι η παράμετρος μη κεντρικότητας και το σ προέρχεται από την $\mathcal{E}[h] = s^2 + 2\sigma^2$.



Σχήμα 4.11: Επίδραση κατανάλωσης ενέργειας απόκτησης CSI στη συνολική μέση κατανάλωση ισχύος.



Σχήμα 4.12: Επίδραση κατανάλωσης ενέργειας απόκτησης CSI στη μέση απόδοση.

Αποδεικνύεται ότι η κανονικοποιημένη κατά P_{\max} cdf της ισχύος μετάδοσης δίνεται ως

$$F_P(p) = Q_1 \left(\frac{s}{\sigma}, \frac{\sqrt{\frac{A}{p}}}{\sigma} \right) / Q_1 \left(\frac{s}{\sigma}, \frac{\sqrt{\frac{A}{P_{\max}}}}{\sigma} \right) \quad (4.40)$$

όπου $p(h) = A/h$, με το A να είναι ίδιο όπως στην (4.14) και $Q_1(\cdot)$ να είναι η συνάρτηση- Q πρώτης τάξης του Marcum.

Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα συγκριτικής αξιολόγησης μηχανισμών για κανάλια Rice.

	Διάρκεια μπαταρίας (h+min)	Μέση διάρκεια χρονοπρογραμμα- τισμού (sec)	Μέση απόδοση (mJ/MB)	Μέση κατανάλωση ισχύος (mW)	Μέση ρυθμοαπόδοση (kbps)
<i>E²OTS – I</i>	3h 32min	0.45	0.019	$4.72 \cdot 10^{-4}$	195.92
<i>E²OTS – II</i>	5h 47min	1.04	0.026	$2.93 \cdot 10^{-4}$	88.39
<i>DTS</i>	2h 03min	1.50	0.179	$1.34 \cdot 10^{-3}$	60.00
<i>RTS</i>	1h 06min	0.80	0.152	$2.13 \cdot 10^{-3}$	112.20
<i>PTS</i>	2h 55min	0.79	0.069	$9.69 \cdot 10^{-4}$	112.57
<i>APTS</i>	1h 20min	0.29	0.032	$1.25 \cdot 10^{-3}$	315.33
<i>LPTS</i>	2h 50min	1.08	0.066	$6.86 \cdot 10^{-4}$	83.04

Στη περίπτωση των Ricean διαλείψεων, η σύγκλιση της βέλτιστης μέσης κατανάλωσης ενέργειας ανά μονάδα χρόνου και των βέλτιστων κατωφλίων ισχύος για την προσέγγιση του ποσοστού απολαβής είναι επίσης αρκετά γρήγορη. Επειδή η συμπεριφορά της σύγκλισης είναι παρόμοια με την περίπτωση των διαλείψεων Rayleigh, δεν παρουσιάζεται στο κείμενο, ωστόσο αναφέρεται ότι για το Σενάριο A, η υπολογιζόμενη τιμή του λ^* είναι $2.64 \cdot 10^{-4}$ mW. Επιπρόσθετα, οι προκύπτουσες βέλτιστες τιμές του λ^* είναι φθίνουσες καθώς αυξάνεται ο μέγιστος αριθμός παρατηρήσεων N_{\max} και σε αυτή την περίπτωση.

Τα εξαγόμενα αποτελέσματα συγκριτικής αξιολόγησης των διαφόρων μηχανισμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4. Όπως παρατηρείται, η θεωρητικά υπολογιζόμενη τιμή λ^* είναι πολύ κοντά στην πειραματική τιμή της μέσης κατανάλωσης ισχύος του *E²OTS – II*, η οποία είναι $2.93 \cdot 10^{-4}$ mW. Επιπλέον, φαίνεται ότι οι δυο προτεινόμενες προσεγγίσεις υπερεισχύουν έναντι όλων των άλλων σχημάτων σε όρους ενεργειακής απόδοσης και μέσης απόδοσης, επιτυγχάνοντας 21% και 98% επέκταση του χρόνου ζωής της μπαταρίας για το *E²OTS – I* και το *E²OTS – II* αντίστοιχα, συγκρίνοντας τα με τον πιο αποδοτικό από τους υπόλοιπους χρονοπρογραμματιστές ανά περίπτωση.

Συμπερασματικά, οι δυο προτεινόμενοι μηχανισμοί καταφέρνουν να μειώσουν σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας που δαπανιέται για τη μετάδοση δεδομένων σε μια ασύρματη συσκευή, διασφαλίζοντας τις απαιτήσεις για QoS. Οι μηχανισμοί χρησιμοποιούν τη θεωρία βέλτιστης παύσης και χρονοπρογραμματίζουν ομορποτυνιστικά τη μετάδοση των δεδομένων εκμεταλλεύοντας τις χρονομεταβαλλόμενες συνθήκες των ασύρματων καναλιών, παρέχοντας πολλά υποσχόμενη ενεργειακή απόδοση και κατ' επέκταση επέκταση της διάρκειας της μπαταρίας μιας συσκευής.

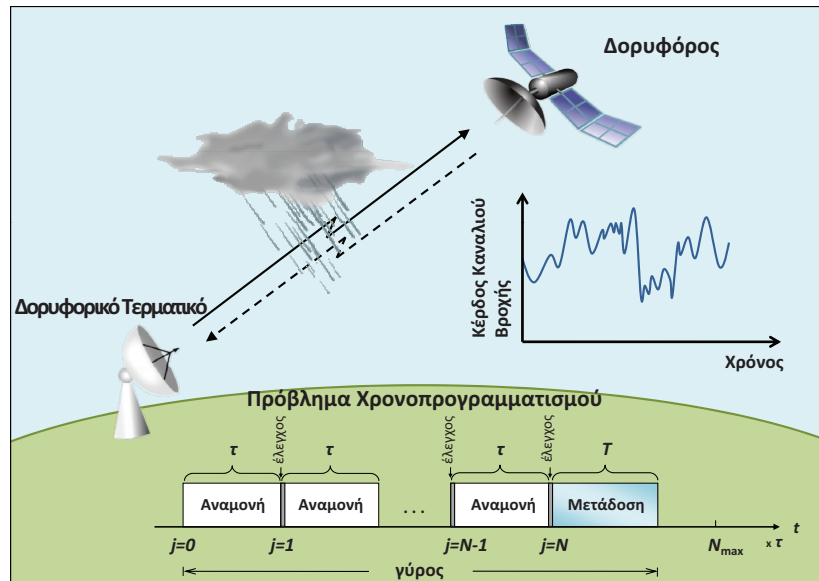
4.6 Κλιματικά Εξαρτώμενη, Ενεργειακά Αποδοτική Σχεδίαση Δορυφορικών Ζεύξεων άνω των 10 GHz

Οι σύγχρονες δορυφορικές επικοινωνίες απαιτούν μεγάλες τιμές χωρητικότητας ζεύξης για να υποστηρίξουν τους υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Γι' αυτό το λόγο, στα δορυφορικά συστήματα επικοινωνιών χρησιμοποιούνται συνήθως συχνότητες άνω των 10GHz, όπου η συμφόρηση στη χρήση του φάσματος είναι χαμηλότερη. Εντούτοις, καθώς ξεπερνιέται το όριο συχνοτήτων των 10GHz,

αρχίζουν να διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο οι διαλείψεις λόγω των τροποσφαιρικών καιρικών φαινομένων με κυρίαρχη την απόσβεση λόγω βροχής (Panagoroulos et al., 2004). Η πιθανότητα υπέρβασης της απόσβεσης λόγω των φαινομένων βροχής (Κανελλόπουλος, 1999) μοντελοποιείται συνήθως από την λογαριθμοκανονική κατανομή (lognormal distribution), η οποία δείχνει πολύ καλή συμπεριφορά παγκοσμίως (Filip & Vilar, 1990; Panagoroulos & Kanelloroulos, 2003). Επιπρόσθετα, δεδομένου ότι σε μια ασύρματη συσκευή η μονάδα επικοινωνιών καταναλώνει σημαντικό μέρος της ενέργειας, η μείωση της ισχύος μετάδοσης αποτελεί ένα πολύ σημαντικό θέμα, ειδικότερα για τα τερματικά που δεν έχουν συνεχή παροχή ρεύματος και η εξασθένιση του σήματος λόγω των αποσβέσεων του καναλιού είναι μεγάλη. Ωστόσο, μέσω της οπορτουνιστικής εκμετάλλευσης των τυχαίων διακυμάνσεων του καναλιού, δηλαδή χρονοπρογραμματίζοντας τη μετάδοση των δεδομένων, μπορεί να επιτευχθεί σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες ενότητες.

Στη συγκεκριμένη ενότητα, μελετάται το πρόβλημα της ενεργειακής απόδοσης των άνω ζεύξεων επικοινωνίας μεταξύ ευρυζωνικών δορυφορικών τερματικών (satellite terminals) πεπερασμένης μπαταρίας [ή ενός σταθμού εδάφους πύλης (gateway)] και ενός γεωστατικού (GEO) δορυφόρου που λειτουργεί σε συχνότητες άνω των 10GHz (π.χ. στις Ku και Ka ζώνες). Ωστόσο, σημειώνεται ότι η ακόλουθη ανάλυση μπορεί να εφαρμοστεί και για τη μετάδοση κάτω ζεύξης από ένα GEO δορυφόρο σε ένα δορυφορικό τερματικό. Αναλυτικότερα, αναζητείται η βέλτιστη χρονική στιγμή για μετάδοση δεδομένων από το δορυφορικό τερματικό στο δορυφόρο υπό συνθήκες βροχής, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας του τερματικού. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται η θεωρία βέλτιστης παύσης και προτείνεται ένας κλιματικά εξαρτώμενος ενεργειακά αποδοτικός οπορτουνιστικός χρονοπρογραμματιστής CDE^2OS (Climatic-Dependent Energy Efficient Opportunistic Scheduler), ο οποίος χαρακτηρίζεται από μια πολιτική χρονοπρογραμματισμού μετάδοσης πολλαπλών κατωφλίων. Πιο συγκεκριμένα, ο CDE^2OS αναβάλλει την επικοινωνία μέχρι να βρεθούν οι βέλτιστες αναμενόμενες συνθήκες καναλιού σε όρους απόσβεσης λόγω βροχής, θεωρώντας συγκεκριμένες απαιτήσεις QoS, οι οποίες αναφέρονται σε ένα μέγιστο ανεκτό χρονικό όριο αναβολής της μετάδοσης και σε μια απαιτούμενη στάθμη ισχύος στο δέκτη. Για την ανάλυση θεωρείται πλήρη γνώση της CSI που αντιστοιχεί στις διαλείψεις λόγω βροχής. Η απόδοση του προτεινόμενου μηχανισμού αξιολογείται μέσω προσομοιώσεων, για διαφορετικές παραμέτρους συστήματος, συγκρίνοντας τον με άλλα ευρετικά σχήματα. Τα αποτελέσματα επαληθεύουν την ενεργειακή απόδοση που επιτυγχάνει το προτεινόμενο σχήμα. Τέλος, σημειώνεται ότι ο CDE^2OS αποτελεί έναν κατανεμημένο μηχανισμό, ο οποίος μπορεί να ενσωματωθεί σε σύγχρονα δορυφορικά πρότυπα (π.χ. DVB-S2, DVB-RCS2), έτσι ώστε να παρέχει ενεργειακά αποδοτική μετάδοση δεδομένων ή ενεργειακά αποδοτικό διαφορισμό μετάδοσης (transmission diversity).

Η συγκεκριμένη ενότητα οργανώνεται ως εξής: αρχικά, περιγράφονται τα θεωρούμενα μοντέλα συστήματος και καναλιών, καθώς και η ανάλυση της διαθεσιμότητας της δορυφορικής ζεύξης (link budget). Έπειτα, παρουσιάζεται ο προτεινόμενος κλιματικά εξαρτώμενος, ενεργειακά αποδοτικός μηχανισμός και τέλος σχολιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και τα προκύπτοντα συμπεράσματα.



Σχήμα 4.13: Μοντέλο συστήματος και πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού.

4.6.1 Μοντέλα Συστήματος και Καναλιών

Αρχικά, περιγράφεται το μοντέλο συστήματος που χρησιμοποιείται. Αναλυτικότερα, μελετάται η άνω ζεύξη μεταξύ ενός δορυφορικού τερματικού και ενός GEO δορυφόρου που λειτουργεί σε συχνότητες άνω των 10 GHz, ωστόσο, η ανάλυση μπορεί να εφαρμοστεί και στην κάτω ζεύξη, αντίστοιχα. Ως πηγή διαλείψεων θεωρείται η απόσβεση λόγω του φαινομένου της βροχής. Επιπρόσθετα, για την επικοινωνία θεωρούνται συγκεκριμένες απαιτήσεις QoS, οι οποίες καθορίζουν ένα μέγιστο ανεκτό χρονικό όριο D_{max} , μέσα στο οποίο θα πρέπει να έχει πραγματοποιηθεί η επικοινωνία, καθώς και μια συγκεκριμένη στάθμη ισχύος λήψης σήματος στον δορυφόρο. Πιο συγκεκριμένα, το μέγιστο χρονικό όριο υποδηλώνει ότι ο δέκτης θα πρέπει να λαμβάνει περιοδικά μια ποσότητα δεδομένων μέχρι το συγκεκριμένο χρονικό όριο, θεωρώντας ότι υπάρχουν συνεχώς διαθέσιμα δεδομένα για μετάδοση στον πομπό². Το συγκεκριμένο όριο εξαρτάται από την εκάστοτε δορυφορική εφαρμογή/υπηρεσία και μπορεί να λαμβάνει διάφορες τιμές (από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι αρκετά λεπτά). Επιπρόσθετα, θεωρείται ότι υπάρχει πλήρης γνώση της στιγμιαίας CSI μέσω πιλοτικών σημάτων.

Το Σχήμα 4.13 απεικονίζει το μοντέλο συστήματος και το μελετώμενο πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού για τη διάρκεια ενός γύρου. Ο στόχος του προτεινόμενου CDE^2OS είναι να ελαχιστοποιήσει την κατανάλωση ενέργειας του δορυφορικού τερματικού εκμεταλλεύοντας τις ευκαιρίες για ευνοϊκές συνθήκες καναλιού μέσω χρονοπρογραμματισμού της μετάδοσης δεδομένων. Αναλυτικότερα, το μελετώμενο πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού αποτελεί πρόβλημα πεπερασμένου ορίζοντα, όπου ο ορίζοντας είναι το ανεκτό χρονικό όριο $D_{max} = N_{max} \cdot \tau$ μέχρι το οποίο μπορεί να αναβληθεί η επικοινωνία. Το δορυφορικό τερματικό ελέγχει τις συνθήκες του καναλιού σε κάθε επιμέρους στάδιο $j = 1, \dots, N_{max}$, δηλαδή κάθε τ χρονικά διαστήματα. Ως εκ τούτου, ο μέγιστος επιτρεπτός αριθμός των παρατηρήσεων καναλιού είναι N_{max} . Το πρόβλημα αποτελεί ένα πρόβλημα

²Τα δεδομένα μπορεί να είναι αποθηκευμένα στην εσωτερική μνήμη του δορυφορικού τερματικού ή μπορούν να αποκτηθούν ακαριαία (π.χ. πραγματοποιώντας μέτρηση).

βέλτιστης παύσης και έγκειται στην εύρεση της βέλτιστης χρονικής στιγμής N για μετάδοση των δεδομένων, μέχρι το D_{max} , έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η κατανάλωση ενέργειας. Εάν ο χρόνος στο συγκεκριμένο γύρο φτάσει το D_{max} , και δεν έχει πραγματοποιηθεί μετάδοση δεδομένων, τότε το τερματικό μεταδίδει ακαριαία. Για να μπορεί ο CDE^2OS να εκμεταλλεύεται τις διακυμάνσεις του καναλιού λόγω της βροχής, η παράμετρος τ , η οποία αντικατοπτρίζει τη συχνότητα των ελέγχων του καναλιού, θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το χρόνο συνοχής του καναλιού. Επιπρόσθετα, θεωρούνται σταθερές συνθήκες καναλιού καθ' όλη τη διάρκεια της μετάδοσης δεδομένων, δηλαδή η παράμετρος T θεωρείται μικρότερη ή ίση του χρόνου συνοχής. Αναφέρεται ότι, η μονάδα επικοινωνίας του τερματικού εισέρχεται σε κατάσταση αναμονής μεταξύ των ελέγχων της κατάστασης καναλιού, έτσι ώστε να εξοικονομηθεί περισσότερη ενέργεια. Επιπλέον, από μια άλλη οπτική γωνία, αν τα ίδια δεδομένα επανεκπεμφθούν πολλές φορές, ο προτεινόμενος χρονοπρογραμματιστής μπορεί να θεωρηθεί ως μια ενεργειακά αποδοτική βελτίωση της τεχνικής διαφορισμού χρόνου (time diversity) (Fukuchi & Nakayama, 2004; Kourogiorgas et al., 2013), όπου προκύπτουν οι βέλτιστοι χρόνοι επαναμετάδοσης αντί για τους σταθερούς χρόνους του διαφορισμού χρόνου.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η ανάλυση link budget της ζεύξης. Πιο συγκεκριμένα, η λαμβανόμενη ισχύς από το δορυφόρο δίνεται από τον ακόλουθο τύπο (Maini & Agrawal, 2011):

$$P_{r,sat} = G_{sat} \cdot G_{st} \cdot P_{st} \cdot LG \quad (4.41)$$

όπου το LG αντιστοιχεί στο συνολικό κέρδος της ζεύξης, το G_{sat} είναι το κέρδος της κεραίας του δορυφόρου, ενώ τα G_{st} και P_{st} είναι το κέρδος και η ισχύς μετάδοσης του δορυφορικού τερματικού, αντίστοιχα. Σχετικά με τις συνολικές απώλειες, οι οποίες είναι το αντίστροφο του LG , θεωρούνται οι απώλειες ελευθέρου χώρου (FSL), οι οποίες δίνονται από τη σχέση $FSL = (4\pi d/\lambda)^2$, με d την απόσταση μεταξύ του τερματικού και του δορυφόρου και λ το μήκος κύματος του σήματος, καθώς και οι απώλειες λόγω βροχής. Όσον αφορά το δεύτερο είδος απωλειών, αν θεωρηθεί ότι g είναι ο συντελεστής διαλείψεων καναλιού λόγω βροχής, τότε η απόσβεση λόγω βροχής σε dB ($A_{dB} = -20 \log_{10} g$) μοντελοποιείται ως λογαριθμοκανονική τυχαία μεταβλητή (Filip & Vilar, 1990; Panagoroulos & Kanelloroulos, 2003). Επομένως, όπως μπορεί να αποδειχθεί (Paroulis & Pillai, 2002), το κέρδος ισχύος του καναλιού λόγω βροχής $h = |g|^2 \in (0, 1)$ μοντελοποιείται ως μια λογαριθμο-λογαριθμοκανονική (log-lognormal) τυχαία μεταβλητή με pdf που δίνεται ως εξής (βλ. Παράρτημα Α):

$$f_h(h) = \frac{-1}{h \ln(h) \sqrt{2\pi} S_a} \exp \left[-\frac{(\ln(\xi \ln(h)) - \ln A_m)^2}{2S_a^2} \right] \quad (4.42)$$

όπου $\xi = -10/\ln 10$, ενώ τα $\ln A_m$ και S_a είναι οι στατιστικές παράμετροι του λογαριθμοκανονικού καναλιού υπό βροχή. Αυτές οι παράμετροι μπορούν να εκτιμηθούν χρησιμοποιώντας τη μέθοδο που προτείνεται στο (Panagoroulos & Kanelloroulos, 2003) ή προσαρμόζοντας την μέθοδο πρόβλεψης ITU-R P.618 (ITU-R Recommendation P.618-11, 2013). Ο σημειακός ρυθμός βροχόπτωσης υπολογίζεται από τους χάρτες βροχής της ITU-R (ITU-R Recommendation P.837-6, 2012). Επιπλέον, δεδομένων των χαρακτηριστικών της ζεύξης και του σεναρίου εφαρμογής που καθορίζουν τις απαιτήσεις της ελάχιστης $P_{r,sat}$, μπορεί να υπολογιστεί η απαιτούμενη ισχύς μετάδοσης στο δορυφορικό τερματικό, ως εξής:

$$P_{st} = C \cdot h^{-1} \quad (4.43)$$

όπου το

$$C = \frac{P_{r,sat} \cdot FSL}{G_{sat} \cdot G_{st}} \quad (4.44)$$

αντιπροσωπεύει τις κανονικοποιημένες απαιτήσεις ισχύος στο δορυφόρο. Επομένως, το P_{st} θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το C , αφού $h \in (0, 1)$. Χωρίς βλάβη της γενικότητας, για την δορυφορική ζεύξη θεωρούνται τεχνικές διαμόρφωσης BPSK (Binary Phase-Shift Keying) και QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying). Για τις συγκεκριμένες τεχνικές, η μετρική QoS του ρυθμού σφαλμάτων bit (BER) δίνεται ως εξής $BER = Q\left(\sqrt{2E_b/N_0}\right)$ (A. Goldsmith, 2005) για το μη κωδικοποιημένο σήμα, όπου το E_b είναι η ενέργεια του bit, το N_0 είναι η πυκνότητα ισχύος του θορύβου στο δορυφορικό δέκτη και $Q(\cdot)$ είναι η συνάρτηση Q . Επομένως, για το επιθυμητό BER, η απαιτούμενη λαμβανόμενη ισχύς στο δορυφόρο $P_{r,sat}$, για το μη κωδικοποιημένο σήμα, δίνεται από τη σχέση $P_{r,sat} = 0.5[Q^{-1}(BER)]^2 R_b N_0$, όπου R_b είναι ο ρυθμός bit.

4.6.2 Προτεινόμενος Κλιματικά Εξαρτώμενος Ενεργειακά Αποδοτικός Μηχανισμός

Για την επίλυση του μελετώμενου προβλήματος χρησιμοποιείται η θεωρία βέλτιστης παύσης για την επιλογή της βέλτιστης χρονικής στιγμής για μετάδοση των δεδομένων. Αναλυτικότερα, η επιλογή αυτή βασίζεται στην παρατήρηση της ακολουθίας κέρδους καναλιού h_j κάθε τ χρονικές στιγμές και της ακολουθίας των συναρτήσεων απωλειών, όπου στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η ακολουθία της κατανάλωσης ενέργειας του δορυφορικού τερματικού E_j . Η E_j θεωρείται ότι είναι \mathcal{F}_j -μετρήσιμη, όπου \mathcal{F}_j είναι το σ -πεδίο που παράγεται από την ακολουθία h_j . Επομένως, έστω ότι το E_N είναι η κατανάλωση ενέργειας του δορυφορικού τερματικού τη χρονική στιγμή N ενός γύρου χρονοπρογραμματισμού, τότε το πρόβλημα μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα πρόβλημα βέλτιστης παύσης όπου επιλέγεται ο βέλτιστος κανόνας παύσης $1 \leq N \leq N_{\max}$ που ελαχιστοποιεί την προσδοκώμενη κατανάλωση ενέργειας $\mathcal{E}[E_N]$. Για να είναι πιο ρεαλιστικό το μοντέλο, θεωρείται ότι καταναλώνεται μια επιπρόσθετη ποσότητα ενέργεια e_c κάθε φορά που γίνεται έλεγχος του καναλιού. Επομένως, δεδομένου ότι το δορυφορικό τερματικό σταματάει τον έλεγχο και ξεκινάει να εκπέμπει δεδομένα την χρονική στιγμή N , η συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια E_N μπορεί να εκφραστεί ως το άθροισμα της καταναλισκόμενης ενέργειας για τον έλεγχο του καναλιού και της ισχύος μετάδοσης P_N πολλαπλασιασμένης με T και δίνεται ως εξής:

$$E_N = P_N \cdot T + N \cdot e_c \stackrel{(4.43)}{=} C \cdot h_N^{-1} \cdot T + N \cdot e_c \quad (4.45)$$

όπου P_N και h_N είναι η ισχύς μετάδοσης και το κέρδος ισχύος του καναλιού λόγω βροχής τη χρονική στιγμή N , αντίστοιχα.

Ορίζοντας το σύνολο των κανόνων παύσης ως $\mathcal{C}_1 = \{N : 1 \leq N \leq N_{\max}\}$, αποδεικνύεται εύκολα ότι υπάρχει βέλτιστος κανόνας παύσης για το συγκεκριμένο πρόβλημα λόγω της πεπερασμένης φύσης του προβλήματος και της E_j . Στη συνέχεια, περιγράφεται ο τρόπος υπολογισμού του βέλτιστου κανόνα παύσης. Αναλυτικότερα, μετά από την παρακολούθηση της κατάστασης του καναλιού σε κάθε στάδιο, ο χρονοπρογραμματιστής θα πρέπει να αποφασίσει αν είναι βέλτιστο για το τερματικό να σταματήσει και να εκπέμπει δεδομένα ή να συνεχίσει. Αυτό εξαρτάται από την προσδοκία για καλύτερες συνθήκες καναλιού στις μελλοντικές χρονικές στιγμές. Επομένως, σε κάθε στάδιο j συγκρίνεται η κατανάλωση ενέργειας μετάδοσης $P_j T$ που θα έχει το δορυφορικό τερματικό αν

μεταδώσει δεδομένα, με την κατανάλωση που αναμένεται να έχει αν συνεχίσει χρησιμοποιώντας το βέλτιστο κανόνα για τα στάδια $j + 1$ μέχρι N_{\max} . Επιπρόσθετα, λαμβάνεται υπόψη το κόστος ελέγχου καναλιού e_c σε κάθε στάδιο, θεωρώντας ότι το κόστος αυτό έχει ήδη πληρωθεί όταν θα πρέπει να ληφθεί η απόφαση. Επομένως, η ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας ξεκινώντας από ένα συγκεκριμένο στάδιο j και έχοντας παρατηρήσει τα $H_1 = h_1, \dots, H_j = h_j$, δίνεται ως εξής:

$$V_j^{(N_{\max})} = \min \left\{ P_j T, \mathcal{E}[V_{j+1}^{(N_{\max})} | \mathcal{F}_j] \right\} + e_c, \text{ για } j = 1, \dots, N_{\max} \quad (4.46)$$

όπου το $\mathcal{E}[V_{j+1}^{(N_{\max})} | \mathcal{F}_j]$ εξαρτάται μόνο από τον αριθμό των εναπομεινάντων σταδίων $N_{\max} - j$. Επομένως, ο βέλτιστος κανόνας παύσης συνιστά την παύση και μετάδοση στο στάδιο j , εάν $P_j T \leq \mathcal{E}[V_{j+1}^{(N_{\max})} | \mathcal{F}_j]$. Αυτό δίνει ένα βέλτιστο κατώφλι ισχύος μετάδοσης για κάθε στάδιο j , το οποίο μέσω της μεθόδου της οπισθοδρομικής επαγωγής και με παρόμοιο τρόπο με την προηγούμενη ενότητα αποδεικνύεται ότι δίνεται για κάθε στάδιο $j = 1, \dots, N_{\max}$ ως εξής:

$$P_{th,j}^* = \begin{cases} \int_C^{P_{th,j+1}^*} p dF_P + P_{th,j+1}^* \left(1 - F_P \left(P_{th,j+1}^* \right) \right) + \frac{e_c}{T}, & \text{για } j = 1, \dots, N_{\max} - 1 \\ P_{\max}, & \text{για } j = N_{\max} \end{cases} \quad (4.47)$$

όπου το P_{\max} εκφράζει τη μέγιστη ισχύ μετάδοσης του RF ενισχυτή του δορυφορικού τερματικού και εξασφαλίζει ότι το όριο αναβολής (χρονοπρογραμματισμού) θα είναι το D_{\max} . Επιπρόσθετα, η $F_P(p)$ αντιστοιχεί στην κανονικοποιημένη κατά P_{\max} cdf της τυχαίας μεταβλητής της ισχύος μετάδοσης.

Επομένως, προέκυψε μια βέλτιστη πολιτική χρονοπρογραμματισμού μετάδοσης πολλαπλών κατωφλίων που ελαχιστοποιεί την προσδοκώμενη κατανάλωση ενέργειας του δορυφορικού τερματικού. Σύμφωνα με αυτή, η τρέχουσα απαιτούμενη ισχύς P_j , που προκύπτει από τις τρέχουσες συνθήκες καναλιού και τους περιορισμούς QoS στο δορυφόρο, συγκρίνεται με τα αντίστοιχα κατώφλια ισχύος σε κάθε στάδιο. Η βέλτιστη πολιτική πολλαπλών κατωφλίων του CDE^2OS χαρακτηρίζεται από το ακόλουθο διάνυσμα βέλτιστων κατωφλίων:

$$\mathbf{P}_{th}^* = [P_{th,1}^*, \dots, P_{th,N_{\max}}^*] \quad (4.48)$$

και μπορεί να αναπαρασταθεί με την επόμενη συνθήκη ελέγχου για $j = 1, \dots, N_{\max}$:

$\underline{\text{Εάν}} P_j \leq P_{th,j}^* \rightarrow$	μετάδοση στο στάδιο j
$\underline{\text{Αλλιώς}} \rightarrow$	αναβολή μετάδοσης

4.6.3 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων και Σχολιασμός

Για να αξιολογηθεί η απόδοση του προτεινόμενου CDE^2OS , πραγματοποιήθηκαν εκτενείς προσομοιώσεις για διαφορετικές παραμέτρους του συστήματος. Αναλυτικότερα, η άνω ζεύξη μεταξύ του δορυφορικού τερματικού και του GEO δορυφόρου θεωρείται ότι λειτουργεί στις ζώνες συχνοτήτων Ku και Ka, ενώ ρεαλιστικές υποθέσεις θεωρούνται και για τα υπόλοιπα τεχνικά χαρακτηριστικά της

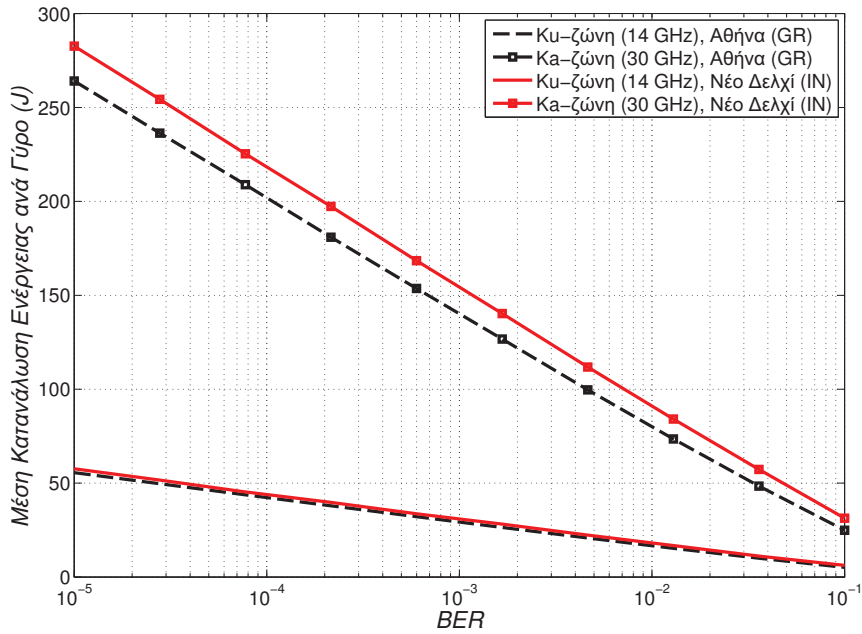
Πίνακας 4.5: Τεχνικά χαρακτηριστικά της ζεύξης επικοινωνίας.

Χαρακτηριστικά	Τυπικές Τιμές
Δορυφόρος	GEO
Ζώνη συχνοτήτων	Ku (14GHz) / Ka (30GHz)
Κέρδος κεραίας δορυφόρου	60 dB _i
G/T δορυφόρου	35 dBK ⁻¹
Γεωγραφική τοποθεσία τερματικού	Αθήνα (GR) / Νέο Δελχί (IN)
Κέρδος κεραίας τερματικού	10 dB _i
Ρυθμός Δεδομένων	1 Mbps
Διαμόρφωση	BPSK/QPSK

ζεύξης επικοινωνίας, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.5. Οι χάρτες της ITU-R (ITU-R Recommendation P.837-6, 2012) χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των παραμέτρων βροχόπτωσης ανάλογα με την γεωγραφική τοποθεσία του δορυφορικού τερματικού. Επιπλέον, οι μακροπρόθεσμες στατιστικές παράμετροι της εξασθένισης λόγω βροχής υπολογίζονται με την μεθοδολογία που παρουσιάζεται στο (Panagoroulos & Kanelloroulos, 2003). Χωρίς βλάβη της γενικότητας, θεωρούνται $P_{\max} = 15W$ και γωνία ανύψωσης 40° . Επιπρόσθετα, για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων σε διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες (δηλαδή για διαφορετικούς στατιστικούς ρυθμούς βροχόπτωσης), εξετάζονται δυο διαφορετικές γεωγραφικές τοποθεσίες για το δορυφορικό τερματικό [Αθήνα (GR) / Νέο Δελχί (IN)]. Όσον αφορά τις παραμέτρους χρονοπρογραμματισμού, οι έλεγχοι του καναλιού πραγματοποιούνται κάθε $\tau = 30s$, η διάρκεια μετάδοσης δεδομένων είναι $T = 30s$ και το ανεκτό χρονικό όριο είναι $D_{\max} = 300s$, εκτός αν αναφέρεται σαφώς κάτι διαφορετικό.

Το Σχήμα 4.14 απεικονίζει τη μέση κατανάλωση ενέργειας ανά γύρο που επιτυγχάνεται μέσω του CDE^2OS ως προς τις επιθυμητές τιμές του BER που αντιστοιχούν στις ελάχιστες απαιτήσεις ισχύος λήψης στον δορυφόρο. Το δορυφορικό τερματικό λειτουργεί στην Ku-ζώνη (14GHz) και την Ka-ζώνη (30GHz), ενώ εξετάζονται δυο διαφορετικές γεωγραφικές τοποθεσίες, έτσι ώστε να αξιολογηθεί ο προτεινόμενος χρονοπρογραμματιστής σε περιοχές με διαφορετικούς ρυθμούς βροχόπτωσης. Όπως παρατηρείται, η κατανάλωση ενέργειας είναι μεγαλύτερη για την Ka-ζώνη σε σχέση με την Ku-ζώνη, λόγω του γεγονότος ότι οι απώλειες διάδοσης και τα φαινόμενα διαλείψεων είναι ισχυρότερα σε μεγαλύτερες συχνότητες. Επιπρόσθετα, η μέση κατανάλωση ενέργειας είναι μεγαλύτερη όταν το τερματικό βρίσκεται στο Νέο Δελχί σε σύγκριση με την Αθήνα, λόγω των ισχυρότερων συνθηκών βροχόπτωσης. Ωστόσο, οι διαφορές που παρατηρούνται στις δυο τοποθεσίες είναι μικρές κάτι που υποδεικνύει τη σταθερότητα του CDE^2OS , ο οποίος παρέχει κλιματικά εξαρτώμενη ενεργειακά αποδοτική μετάδοση δεδομένων. Επιπλέον, στη Ku-ζώνη η μέση κατανάλωση ενέργειας είναι σχεδόν ίδια και για τις δυο μελετώμενες τοποθεσίες.

Για λόγους σύγκρισης, θεωρούνται επιπρόσθετα δυο ευρετικά σχήματα μετάδοσης. Πιο συγκεκριμένα, το πρώτο σχήμα είναι ο ντετερμινιστικός χρονοπρογραμματιστής (Deterministic Scheduler - DS) ο οποίος προγραμματίζει τη μετάδοση σε σταθερές ισαπέχουσες χρονικές στιγμές (κάθε D_{\max}), ενώ το δεύτερο είναι ο τυχαίος χρονοπρογραμματιστής (Random Scheduler - RS) με βάση τον ο-

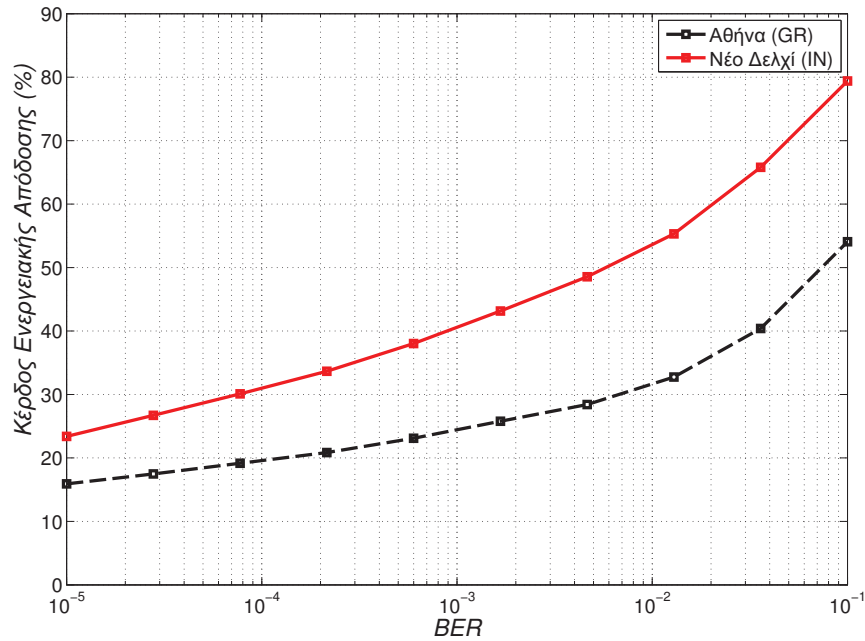


Σχήμα 4.14: Μέση κατανάλωση ενέργειας του CDE^2OS ανά γύρο ως προς το BER για διαφορετικές συχνότητες και τοποθεσίες του δορυφορικού τερματικού.

ποίο το τερματικό μεταδίδει δεδομένα σε τυχαίες χρονικές στιγμές μέσα στο χρονικό διάστημα $[0, D_{max}]$. Οι παραπάνω ευρετικοί μηχανισμοί μπορούν να θεωρηθούν ως μια ειδική περίπτωση του διαφορισμού χρόνου αν τα ίδια δεδομένα μεταδίδονται σε κάθε μετάδοση. Συνεπώς, σε μια τέτοια περίπτωση ο CDE^2OS μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ενεργειακά αποδοτικό σχήμα διαφορισμού χρόνου. Επιπρόσθετα, για την αξιολόγηση του προτεινόμενου σχήματος χρησιμοποιείται η μετρική του κέρδους ενεργειακής απόδοσης (\mathcal{G}_{EE}). Η μετρική αυτή περιγράφεται ως το ποσοστό του κέρδους κατανάλωσης ενέργειας που επιτυγχάνεται συγκρίνοντας τη μέση ενέργεια που καταναλώνεται με τον προτεινόμενο χρονοπρογραμματιστή με τη μέση ενέργεια χρησιμοποιώντας ένα χρονοπρογραμματιστή X . Το κέρδος ενεργειακής απόδοσης μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\mathcal{G}_{EE}^X = \left(1 - \frac{\text{Μέση Καταν. Ενέργειας (CD}^2\text{EOS)}}{\text{Μέση Καταν. Ενέργειας (X)}} \right) \times 100\% \quad (4.49)$$

Το Σχήμα 4.15 παρουσιάζει το κέρδος ενεργειακής απόδοσης που επιτυγχάνει ο προτεινόμενος χρονοπρογραμματιστής σε σχέση με τον DS για διάφορες τιμές BER, για ένα δορυφορικό τερματικό που λειτουργεί στην Ka-ζώνη συχνοτήτων, εξετάζοντας περιοχές με διαφορετικούς ρυθμούς βροχόπτωσης. Από το σχήμα αυτό μπορεί να παρατηρηθεί ότι ο CDE^2OS επιτυγχάνει σημαντικό κέρδος κατανάλωσης ενέργειας, το οποίο αυξάνεται καθώς αυξάνεται ο BER, δηλαδή καθώς οι απαιτήσεις ποιότητας γίνονται λιγότερο αυστηρές. Πιο συγκεκριμένα, για πιο χαλαρές απαιτήσεις λαμβανόμενης ισχύος στο δορυφόρο, η παράμετρος C μειώνεται και συνεπώς τα κατώφλια ισχύος γίνονται αυστηρότερα, βελτιώνοντας την απόδοση. Επιπλέον, όταν το δορυφορικό τερματικό βρίσκεται σε τοποθεσία με ισχυρότερα φαινόμενα βροχής (δηλ. στο Νέο Δελχί), ο προτεινόμενος χρονοπρογραμματιστής επιτυγχάνει σημαντικά μεγαλύτερο κέρδος. Αναλυτικότερα, για $BER = 10^{-3}$ που είναι μια τυπική τιμή για υπηρεσίες φωνής, ο CDE^2OS προσφέρει επιπλέον κέρδος ενεργειακής



Σχήμα 4.15: Κέρδος ενεργειακής απόδοσης του CDE^2OS σε σύγκριση με τον DS ως προς το BER για την Ka-ζώνη (30GHz) και διαφορετικές τοποθεσίες του δορυφορικού τερματικού.

απόδοσης 16% στο Νέο Δελχί σε σύγκριση με το κέρδος στην Αθήνα. Αυτό καταδεικνύει την κλιματική σταθερότητα που προσφέρει ο CDE^2OS , ο οποίος διατηρεί σχετικά σταθερή την ενεργειακή κατανάλωση σε περιοχές με διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες (βλ. Σχήμα 4.14), σε σύγκριση με τον DS. Παρόμοια αποτελέσματα εξάγονται και για τον RS, όπως φαίνεται και παρακάτω.

Τέλος, ο Πίνακας 4.6 αναπαριστά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για διαφορετικά σενάρια χρονοπρογραμματισμού, έτσι ώστε να παρουσιαστούν οι επιδράσεις των παραμέτρων χρονοπρογραμματισμού στην απόδοση του προτεινόμενου μηχανισμού. Σημειώνεται ότι θεωρείται η περίπτωση της Ka-ζώνης συχνοτήτων για ένα τερματικό που βρίσκεται στην Αθήνα. Πιο συγκεκριμένα, θεωρούνται τρία διαφορετικά σενάρια: Σενάριο Α ($\tau = 30s$, $T = 30s$ και $D_{\max} = 300s$), Σενάριο Β ($\tau = 30s$, $T = 30s$ και $D_{\max} = 600s$) και Σενάριο Γ ($\tau = 60s$, $T = 30s$ και $D_{\max} = 600s$). Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, τα Σενάρια Α και Γ έχουν το ίδιο N_{\max} για διαφορετικά ανεκτά χρονικά όρια, ενώ το Σενάριο Β έχει το διπλάσιο N_{\max} . Αναλυτικότερα, ο Πίνακας 4.6 δείχνει τις κανονικοποιημένες απαιτήσεις ισχύος C στο δορυφόρο [βλ. (4.44)], τη μέση κατανάλωση ενέργειας του CDE^2OS ανά γύρο και το αντίστοιχο κέρδος ενεργειακής απόδοσης σε σχέση με τα DS και RS. Επιπλέον, παρουσιάζονται η μέση απόδοση και η μέση διάρκεια χρονοπρογραμματισμού του CDE^2OS . Η μέση απόδοση δίνεται από το λόγο της μέσης κατανάλωσης ενέργειας προς τη μέση ρυθμοαπόδοση, με μικρότερες τιμές να αντιστοιχούν σε μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση. Επιπρόσθετα, η μέση διάρκεια χρονοπρογραμματισμού αντιστοιχεί στο μέσο χρόνο αναβολής της μετάδοσης των δεδομένων. Όπως παρατηρείται από τον συγκεκριμένο πίνακα, το Σενάριο Β έχει ελαφρώς καλύτερη απόδοση σε όλες τις μετρικές λόγω του μεγαλύτερου N_{\max} το οποίο αυξάνει τις ευκαιρίες να βρεθούν καλύτερες συνθήκες καναλιού. Παρ' όλα αυτά, οι τιμές των μετρικών για όλα τα σενάρια είναι αρκετά κοντά, επιβεβαιώνοντας τη σταθερότητα που προσφέρει ο προτεινόμενος χρονοπρογραμματισμός.

Πίνακας 4.6: Συγκριτικά αποτελέσματα προσομοιώσεων στην Ka-ζώνη (30GHz) για την Αθήνα (GR) σε διαφορετικά σενάρια χρονοπρογραμματισμού.

	Σενάριο A		Σενάριο B		Σενάριο Γ	
BER	10^{-4}	10^{-2}	10^{-4}	10^{-2}	10^{-4}	10^{-2}
C (W)	6.41	2.51	6.41	2.51	6.41	2.51
Μέση κατανάλωση ενέργειας (J)	201.61	79.97	198.45	77.98	201.81	79.98
\mathcal{G}_{EE}^{DS} (%)	19.51	31.69	20.98	33.84	19.53	31.54
\mathcal{G}_{EE}^{RS} (%)	19.73	31.68	21.11	33.41	19.75	31.82
Μέση απόδοση (mJ/MB)	53763	21326	52921	20796	53816	21328
Μέση διάρκεια χρονοπρογραμματισμού (s)	172.1	161.3	327.5	279.1	344.7	322.7

Συμπερασματικά, η χρήση του προτεινόμενου μηχανισμού σε δορυφορικές ζεύξεις που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10GHz υπό συνθήκες βροχής επιτυγχάνει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Βασιζόμενος σε ένα βέλτιστο κανόνα παύσης, ο μηχανισμός χρονοπρογραμματίζει οπορτουνιστικά τη μετάδοση των δεδομένων εκμεταλλεύοντας τις διαλείψεις λόγω βροχής, ενώ παράλληλα εξασφαλίζει τις απαιτήσεις για QoS. Συνεπώς, ο CDE^2OS μπορεί να παρέχει ενεργειακά αποδοτική μετάδοση δεδομένων, η οποία χαρακτηρίζεται από κλιματική σταθερότητα, σε σύγχρονα δορυφορικά συστήματα.

4.7 Συμπεράσματα

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο μελέτησε ένα από τα πιο κρίσιμα προβλήματα των σύγχρονων ασύρματων δικτύων επικοινωνιών, το οποίο αφορά τη σχεδίαση ενεργειακά αποδοτικών μηχανισμών μετάδοσης δεδομένων. Λόγω της πεπερασμένης μπαταρίας των ασύρματων συσκευών κρίνεται απαραίτητη η αποδοτικότερη χρήση των ενεργειακών πόρων. Γι' αυτό το λόγο, μελετήθηκαν τεχνικές χρονοπρογραμματισμού μετάδοσης που χρησιμοποιούνται για τη σχεδίαση ενεργειακά αποδοτικών ασύρματων δικτύων. Αρχικά, παρουσιάστηκε μια σύντομη περιγραφή των βασικών αρχών της κατανάλωσης ισχύος στις ασύρματες επικοινωνίες και του προβλήματος της ενεργειακής απόδοσης, καθώς και μια πλήρης βιβλιογραφική επισκόπηση των ενεργειακά αποδοτικών σχημάτων που βασίζονται στην τεχνική του οπορτουλιστικού προγραμματισμού.

Στη συνέχεια, προτάθηκαν δυο κατανεμημένοι μηχανισμοί οπορτουλιστικού χρονοπρογραμματισμού μετάδοσης, οι οποίοι εκμεταλλεύονται τις χρονομεταβαλλόμενες συνθήκες του καναλιού επικοινωνίας. Στόχος ήταν η επίλυση του προβλήματος ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας μιας ασύρματης συσκευής δεδομένων συγκεκριμένων απαιτήσεων QoS. Το πρόβλημα διατυπώθηκε ως πρόβλημα χρονικής βελτιστοποίησης, θεωρώντας δυο διαφορετικές προσεγγίσεις, ανάλογα με τους προς επίτευξη στόχους. Με βάση τη θεωρία βέλτιστης παύσης, προτάθηκαν βέλτιστες πολιτικές χρονοπρογραμματισμού πολλαπλών καταωφλίων, οι οποίες αναβάλλουν τη μετάδοση των δεδομένων μέχρι να βρεθεί η ενεργειακά βέλτιστη χρονική στιγμή για επικοινωνία, για συγκεκριμένες απαιτήσεις ισχύος λήψης και κάτω από συγκεκριμένο περιορισμό χρονικού ορίου αναβολής. Οι προ-

τεινόμενοι μηχανισμοί βελτιστοποιούν το ισοζύγιο μεταξύ της αποδοτικής κατανάλωσης ενέργειας που επιτυγχάνεται με τη μετάδοση σε καλύτερες συνθήκες καναλιού και της κατανάλωσης ενέργειας των επιπλέον παρατηρήσεων καναλιού, μέχρι ένα μέγιστο επιθυμητό χρονικό όριο. Η αξιολόγηση των προτεινόμενων μηχανισμών μέσω προσομοιώσεων έδειξε ότι η ενεργειακή απόδοση που προσφέρουν είναι πολλά υποσχόμενη παρέχοντας σημαντική επέκταση της διάρκειας της μπαταρίας της συσκευής. Συνεπώς, οι προτεινόμενοι μηχανισμοί, εξαιτίας της ευελιξίας και του κατανεμημένου χαρακτήρα τους, μπορούν να ενσωματωθούν σε σύγχρονα πρότυπα ασύρματων επικοινωνιών, έτσι ώστε να προσφέρουν ενεργειακά αποδοτική μετάδοση δεδομένων, παρέχοντας ταυτόχρονα ντετερμινιστικές εγγυήσεις QoS.

Επιπρόσθετα, προτάθηκε ένας κλιματικά εξαρτώμενος ομορτουριστικός χρονοπρογραμματιστής για δορυφορικές ζεύξεις που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10GHz υπό συνθήκες βροχής. Αυτός ο κατανεμημένος μηχανισμός βασίζεται στην εφαρμογή της θεωρίας βέλτιστης παύσης, εκμεταλλεύοντας τις διαλείψεις λόγω βροχής, με στόχο την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας ενός δορυφορικού τερματικού, ενώ παράλληλα εξασφαλίζει τις απαιτήσεις για QoS. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για διαφορετικές παραμέτρους του συστήματος κατέδειξαν ότι ο προτεινόμενος χρονοπρογραμματιστής επιτυγχάνει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, η οποία χαρακτηρίζεται από σταθερότητα για διαφορετικές κλιματικές περιοχές και σενάρια χρονοπρογραμματισμού. Συμπερασματικά, ο κλιματικά εξαρτώμενος χρονοπρογραμματιστής μπορεί να ενσωματωθεί σε σύγχρονα δορυφορικά συστήματα και να παρέχει ενεργειακά αποδοτική μετάδοση δεδομένων.

Κεφάλαιο 5

Μηχανισμοί Ελέγχου Ισχύος και Διαμοιρασμού Εύρους Ζώνης για Διασφάλιση QoS

5.1 Εισαγωγή

Μια από τις κυριότερες προκλήσεις των ασύρματων δικτύων επικοινωνιών νέας γενιάς είναι η εξυπηρέτηση της ολοένα αυξανόμενης ζήτησης για φασματικούς πόρους, η οποία προκαλείται από τις αναδυόμενες εφαρμογές και υπηρεσίες και τις αυξανόμενες απαιτήσεις των χρηστών. Ωστόσο, η προσπάθεια ικανοποίησης αυτών των υψηλών απαιτήσεων έχει ως αποτέλεσμα τη συμφόρηση του πεπερασμένου φάσματος συχνοτήτων, το οποίο παράλληλα υποχρησιμοποιείται στην πράξη. Για να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα, έχει προταθεί από την ερευνητική κοινότητα η έννοια των γνωστικών συστημάτων (CRs). Σύμφωνα με τα CRs, το αδειοδοτημένο ραδιοφάσμα χρησιμοποιείται και από μη αδειοδοτημένους χρήστες (δευτερεύοντες χρήστες - SUs) με έναν έξυπνο και ευέλικτο τρόπο, χωρίς να διαταράσσουν την επικοινωνία των αδειοδοτημένων χρηστών (πρωτεύοντες χρήστες - PUs). Η υλοποίηση των CRs στην πράξη μπορεί να γίνει μέσω διαφορετικών τεχνικών διαμοιρασμού φάσματος [προσεγγίσεις underlay, interweave και overlay (βλ. Κεφάλαιο 2)]. Συνεπώς, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη αποτελεσματικών μηχανισμών διαχείρισης πόρων, οι οποίοι θα επιτρέπουν στα CRs να λειτουργούν αρμονικά και με αποδοτικό τρόπο μαζί με το δίκτυο των PUs. Παράλληλα, η μετρική της QoS διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα, δεδομένου ότι οι διαφορετικές υπηρεσίες και χρήστες έχουν διαφορετικές απαιτήσεις και επομένως η συγκεκριμένη μετρική θα πρέπει να ενσωματώνεται στους μηχανισμούς διαχείρισης πόρων. Ένα χρήσιμο εργαλείο, κατάλληλο για την ανάλυση της στατιστικής απόδοσης QoS των ασύρματων μεταδόσεων, όπου οι διαδικασίες εξυπηρέτησης καθορίζονται από το χρονομεταβαλλόμενο ασύρματο κανάλι, είναι η έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας, η οποία ενσωματώνει την έννοια των στατιστικών εγγυήσεων QoS στα μοντέλα ασύρματων καναλιών.

Υποκινούμενο από τα παραπάνω, το συγκεκριμένο κεφάλαιο προτείνει μηχανισμούς ελέγχου ισχύος και διαμοιρασμού φάσματος για συστήματα CRs, οι οποίοι μεγιστοποιούν την αποτελεσματική χωρητικότητα των SUs για δυο προσεγγίσεις υλοποίησης των συστημάτων αυτών. Αναλυτικότερα,

θεωρώντας ένα underlay γνωστικό σύστημα, προτείνεται ένας κατανεμημένος μηχανισμός ελέγχου ισχύος για τον SU, ο οποίος μεγιστοποιεί την αποτελεσματική χωρητικότητα του μέσω της κλασικής θεωρίας κυρτής βελτιστοποίησης, δεδομένων περιορισμών ισχύος και παρεμβολής. Στο προτεινόμενο σχήμα λαμβάνεται υπόψη ότι τα κανάλια επικοινωνίας του SU και του PU είναι ετεροσυσχετισμένα και μελετώνται οι επιπτώσεις της χωρικής συσχέτισης στην προτεινόμενη πολιτική ελέγχου ισχύος και στην αντίστοιχη αποτελεσματική χωρητικότητα του SU. Ανάλογα με το ποιες ζεύξεις θεωρούνται συσχετισμένες, μελετώνται δυο σενάρια συσχέτισης: το μοντέλο συσχέτισης λήψης PU-SU και το μοντέλο συσχέτισης εκπομπής PU-SU. Επιπρόσθετα, θεωρώντας την interweave προσέγγιση των συστημάτων CRs, προτείνεται ένας κατανεμημένος μηχανισμός διαμοιρασμού του πεπερασμένου διαθέσιμου (αχρησιμοποίητου) φάσματος μεταξύ πολλαπλών SUs, ο οποίος μεγιστοποιεί την αποτελεσματική χωρητικότητα κάθε SU. Πιο συγκεκριμένα, το πρόβλημα διαμοιρασμού φάσματος για διασφάλιση της QoS μεταξύ των SUs μοντελοποιείται ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο, με στόχο τη βελτιστοποίηση της ατομικής αποτελεσματικής χωρητικότητας του εκάστοτε χρήστη, δεδομένου του συζευγμένου (από κοινού) περιορισμού του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Το συγκεκριμένο παίγνιο αποτελεί ένα γενικευμένο πρόβλημα ισορροπίας Nash, το οποίο για να επιλυθεί χρησιμοποιείται η θεωρία των ανισοτήτων μεταβολών και προτείνεται ένας πλήρως κατανεμημένος αλγόριθμος επίλυσης.

Επομένως, το κεφάλαιο αυτό στοχεύει αρχικά στην παρουσίαση των προβλημάτων διαχείρισης πόρων για διασφάλιση της QoS σε γνωστικά συστήματα και στη συνέχεια στην πρόταση καινοτόμων μηχανισμών ελέγχου ισχύος και διαμοιρασμού φάσματος, οι οποίοι μεγιστοποιούν την αποτελεσματική χωρητικότητα των SUs. Η δομή του κεφαλαίου είναι η ακόλουθη: αρχικά παρουσιάζεται η θεωρία των στατιστικών εγγυήσεων QoS και της αποτελεσματικής χωρητικότητας. Στη συνέχεια, μελετάται το γενικό πρόβλημα μεγιστοποίησης της αποτελεσματικής χωρητικότητας, παρουσιάζοντας βασικές ερευνητικές εργασίες διαχείρισης πόρων από τη βιβλιογραφία, που χρησιμοποιούν την έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών, καθώς και ειδικότερα στα γνωστικά δίκτυα. Έπειτα, αναλύεται ο προτεινόμενος μηχανισμός ελέγχου ισχύος για διασφάλιση QoS σε ένα underlay CR σύστημα. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα μοντέλα συστήματος και καναλιών και η προτεινόμενη πολιτική ελέγχου ισχύος, η οποία βασίζεται στην παροχή QoS και οδηγεί σε μεγιστοποίηση της αποτελεσματικής χωρητικότητας της ζεύξης του SU, ενσωματώνοντας την έννοια της χωρικής συσχέτισης των καναλιών διαλείψεων. Ο προτεινόμενος μηχανισμός αξιολογείται μέσω προσομοιώσεων και σχολιάζονται τα προκύπτοντα συμπεράσματα. Ακολούθως, αναλύεται ο προτεινόμενος μηχανισμός διαμοιρασμού φάσματος για διασφάλιση QoS, όπου παρουσιάζεται το μοντέλο συστήματος που μελετάται και η παιγνιοθεωρητική μοντελοποίηση του προβλήματος. Στη συνέχεια, το παίγνιο διατυπώνεται ως πρόβλημα ανισότητας μεταβολών και αναλύεται ο κατανεμημένος αλγόριθμος επίλυσης του, ενώ τέλος σχολιάζονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων και τα προκύπτοντα συμπεράσματα. Ολοκληρώνοντας, παρουσιάζονται τα συνολικά συμπεράσματα του κεφαλαίου.

5.2 Αποτελεσματική Χωρητικότητα

Η διασφάλιση της QoS διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα. Ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις QoS, οι διαφορετικοί χρήστες αναμένεται να ανέχονται δια-

φορετικά επίπεδα καθυστέρησης για να απολαμβάνουν ικανοποιητικά τις υπηρεσίες τους. Για παράδειγμα, σε υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου (π.χ. λήψη δεδομένων), στόχος είναι η μεγιστοποίηση της ρυθμοαπόδοσης με χαλαρούς περιορισμούς καθυστέρησης. Αντίθετα, για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (π.χ. τηλεδιάσκεψη), η βασική απαίτηση είναι η εξασφάλιση ενός αυστηρού περιορισμού καθυστέρησης (ο οποίος όταν παραβιάζεται καθιστά άχρηστη την υπηρεσία), παρά η επίτευξη υψηλής φασματικής απόδοσης. Τέλος, υπάρχουν κάποιες υπηρεσίες που τοποθετούνται κάπου στο ενδιάμεσο (π.χ. πλοήγηση στο Διαδίκτυο), οι οποίες είναι ευαίσθητες στην καθυστέρηση, όχι όμως τόσο αυστηρά όσο οι υπηρεσίες πραγματικού χρόνου. Συνεπώς, οι διαφορετικοί χρήστες επιβάλλουν διαφορετικές και πολλές φορές αντικρουόμενες απαιτήσεις καθυστερήσεων QoS, κάτι που αποτελεί μεγάλη πρόκληση, ειδικότερα για τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα, λόγω της χρονομεταβαλλόμενης φύσης του ασύρματου καναλιού. Επιπλέον, η εξασφάλιση ενός ντετερμινιστικού ορίου καθυστέρησης είναι ιδιαίτερα δύσκολη για κάποιες κατηγορίες υπηρεσιών και γι' αυτό το λόγο, μια πιο πρακτική λύση, που χρησιμοποιείται συχνά και στην οποία θα εστιάσει το συγκεκριμένο κεφάλαιο, είναι η παροχή στατιστικών εγγυήσεων QoS (Chang, 2000). Σύμφωνα με αυτή, εξασφαλίζεται ένα συγκεκριμένο όριο καθυστέρησης, δεδομένης μίας μικρής πιθανότητας υπέρβασης του.

Επιπρόσθετα, πολλές ερευνητικές προσπάθειες έχουν πραγματοποιηθεί με στόχο τη βελτίωση της φασματικής απόδοσης των ασύρματων δικτύων (Verdú, 2002), οι οποίες βασίζονταν στη θεωρία πληροφορίας και πιο συγκεκριμένα στη χωρητικότητα κατά Shannon (Cover & Thomas, 2006), προτείνοντας σχήματα προσαρμογής ισχύος και ρυθμού μετάδοσης (A. J. Goldsmith & Varaiya, 1997; A. J. Goldsmith & Chua, 1997). Ωστόσο, η θεωρία του Shannon δεν παρέχει καθόλου περιορισμούς σε όρους καθυστέρησης. Γι' αυτό το σκοπό, προτάθηκαν στη βιβλιογραφία οι δυαδικές έννοιες του ισοδύναμου εύρους ζώνης (effective bandwidth) και της αποτελεσματικής ή ισοδύναμης χωρητικότητας (effective capacity), οι οποίες παρέχουν ισχυρά εργαλεία αξιολόγησης της απόδοσης της στατιστικής QoS και ολοκληρώνουν τη θεωρία πληροφορίας. Η θεωρία του ισοδύναμου εύρους ζώνης μελετήθηκε εκτενώς στις αρχές της δεκαετίας του 1990, εστιάζοντας στα ενσύρματα δίκτυα ασύγχρονου τρόπου μεταφοράς (Asynchronous Transfer Mode - ATM) (Chang, 1994; Elwalid & Mitra, 1993). Αυτή η θεωρία επέτρεψε την ανάλυση των στατιστικών μεγεθών του δικτύου, όπως οι κατανομές των ουρών αναμονής, οι πιθανότητες υπερχείλισης των ουρών και οι πιθανότητες υπέρβασης του ορίου καθυστέρησης, τα οποία είναι πολύ σημαντικά για την παροχή στατιστικών εγγυήσεων QoS. Επιπρόσθετα, η έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας (Wu & Negi, 2003), η οποία είναι η δυαδική έννοια του ισοδύναμου εύρους ζώνης, είναι κατάλληλη για την ανάλυση της στατιστικής απόδοσης QoS των ασύρματων μεταδόσεων, όπου οι διαδικασίες εξυπηρέτησης καθορίζονται από το χρονομεταβαλλόμενο ασύρματο κανάλι. Αναφέρεται ότι η έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας καταφέρνει να ενσωματώσει την έννοια της QoS, που καθορίζεται από τους χρήστες και τις υπηρεσίες, όπως αναφέρεται στο στρώμα ζεύξης δεδομένων, στα μοντέλα ασύρματων καναλιών του φυσικού στρώματος. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται αναλυτικότερα η θεωρία των στατιστικών εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας και η έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας.

5.2.1 Θεωρία Στατιστικών Εγγυήσεων QoS

Η θεωρία των στατιστικών εγγυήσεων QoS μελετήθηκε εκτενώς στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Στην ερευνητική εργασία (Chang, 1994), ο συγγραφέας βασιζόμενος στη θεωρία μεγάλων αποκλίσεων (large deviation theory), απέδειξε ότι για ένα σύστημα δυναμικής ουράς με στάσιμες και εργοδικές διαδικασίες άφιξης και εξυπηρέτησης (υπό τη συνθήκη ότι ο μέσος ρυθμός άφιξης είναι μικρότερος από το μέσο ρυθμό εξυπηρέτησης), το μήκος της ουράς της διαδικασίας $Q(t)$ θα συγκλίνει (για $t \rightarrow \infty$) σε μια κατανομή τυχαίας μεταβλητής για την οποία ισχύει η ακόλουθη ισότητα:

$$-\lim_{Q_{\max} \rightarrow \infty} \frac{\ln(\Pr\{Q(\infty) > Q_{\max}\})}{Q_{\max}} = \theta \quad (5.1)$$

Αναλυτικότερα, η παραπάνω σχέση σημαίνει ότι η πιθανότητα το μέγεθος της ουράς Q να υπερβαίνει ένα δεδομένο κατώφλι Q_{\max} δίνεται ως εξής:

$$\Pr\{Q > Q_{\max}\} \approx \begin{cases} \epsilon e^{-\theta Q_{\max}}, & \text{για μικρά } Q_{\max} \\ e^{-\theta Q_{\max}}, & \text{για μεγάλα } Q_{\max} \end{cases} \quad (5.2)$$

όπου το Q δηλώνει το μήκος της ουράς σταθερής κατάστασης και το ϵ ορίζεται ως η πιθανότητα να μην είναι άδειος ο ενταμιευτής (buffer) (Wu & Negi, 2003). Επομένως, η πιθανότητα το μήκος της ουράς να υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο κατώφλι Q_{\max} φθίνει εκθετικά καθώς το κατώφλι αυτό αυξάνεται. Η παράμετρος QoS θ ονομάζεται εκθέτης QoS και είναι μια θετική σταθερά, η οποία αντιπροσωπεύει τον εκθετικά φθίνοντα ρυθμό της πιθανότητας παραβίασης του ορίου που ορίζεται από τις απαιτήσεις QoS. Σημειώνεται ότι οι μεγαλύτερες τιμές του θ καταδεικνύουν αυστηρότερες απαιτήσεις QoS και αντιστοιχούν σε γρήγορο ρυθμό μείωσης της πιθανότητας υπέρβασης, ενώ οι μικρότερες τιμές του θ δηλώνουν πιο ευέλικτες (χαλαρές) απαιτήσεις QoS και αντιστοιχούν σε μικρότερο ρυθμό μείωσης της πιθανότητας υπέρβασης.

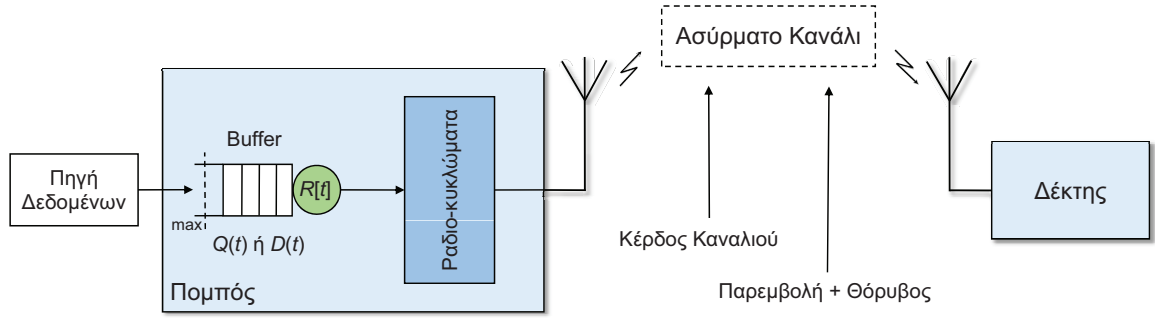
Αντίστοιχα, όταν η μετρική ποιότητας που ενδιαφέρει δεν είναι το μέγιστο μήκος της ουράς του buffer, αλλά η μέγιστη καθυστέρηση των πακέτων στον buffer (D_{\max}), αποδεικνύεται ότι η αντίστοιχη πιθανότητα υπέρβασης δίνεται από την ακόλουθη σχέση (Chang, 2000):

$$\Pr\{D > D_{\max}\} \approx \epsilon e^{-\theta \delta D_{\max}} \quad (5.3)$$

όπου το D δηλώνει την καθυστέρηση σταθερής κατάστασης και το δ είναι μια παράμετρος η οποία μπορεί να προσδιοριστεί από τις διαδικασίες αφίξεων και εξυπηρέτησης (Wu & Negi, 2003). Σημειώνεται ότι στη βιβλιογραφία ο παράγοντας ϵ συχνά παραλείπεται.

5.2.2 Ορισμός Αποτελεσματικής Χωρητικότητας

Η έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας ενσωματώνει την καίρια μετρική των απαιτήσεων QoS σε καθυστέρηση, στην απόδοση του ρυθμού μετάδοσης μιας ασύρματης ζεύξης και αποτελεί τη δυαδική έννοια του ισοδύναμου εύρους ζώνης (Chang, 1994; Elwalid & Mitra, 1993). Το ισοδύναμο εύρος ζώνης απεικονίζει τον ελάχιστο σταθερό ρυθμό εξυπηρέτησης που απαιτείται, δεδομένης μιας συγκεκριμένης διαδικασίας άφιξης, προκειμένου να παρέχονται συγκεκριμένες εγγυήσεις QoS που καθορίζονται από την παράμετρο θ . Πιο συγκεκριμένα, έστω μια στάσιμη και εργοδική στοχαστική



Σχήμα 5.1: Μοντέλο συστήματος.

διαδικασία άφιξης διακριτού χρόνου $\{a[i], i = 1, 2, \dots\}$, η οποία αντιστοιχεί στον στιγμιαίο ρυθμό εισερχόμενης κίνησης και η χρόνο-συσσωρευμένη διαδικασία άφιξης που δίνεται από τη σχέση $A(t) = \sum_{i=1}^t a[i]$. Επιπλέον, έστω ότι η ασυμπτωτική γεννήτρια συνάρτηση λογαριθμικών ροπών (log-moment generating function) υπάρχει και ορίζεται ως εξής:

$$\Lambda_A(\theta) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln \left(\mathcal{E} \left[e^{\theta A(t)} \right] \right) \quad (5.4)$$

τότε η συνάρτηση του ισοδύναμου εύρους ζώνης δίνεται από την ακόλουθη σχέση για $\theta > 0$:

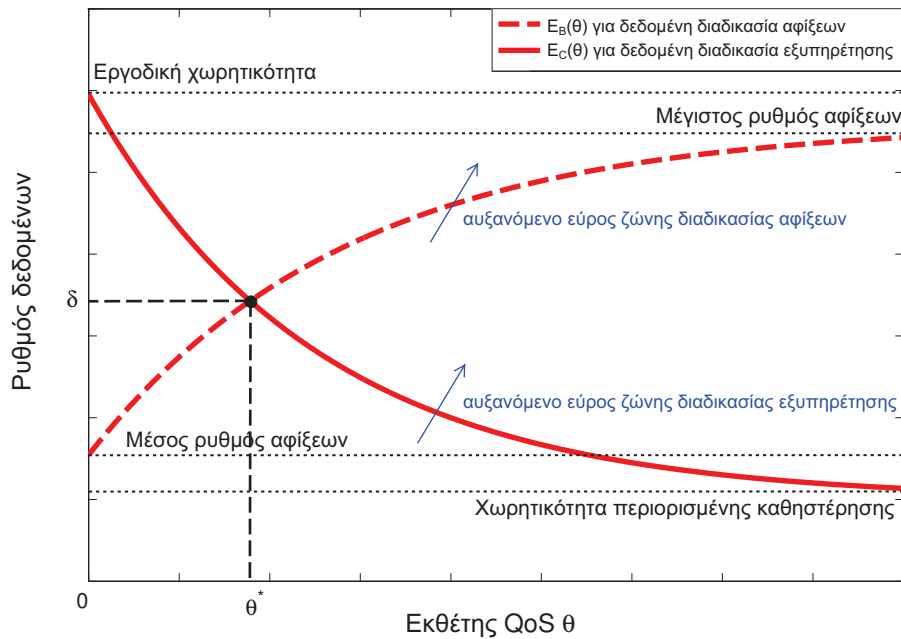
$$E_B(\theta) = \frac{\Lambda_A(\theta)}{\theta} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{\theta t} \ln \left(\mathcal{E} \left[e^{\theta A(t)} \right] \right) \quad (5.5)$$

όπου η $\mathcal{E}[\cdot]$ είναι η συνάρτηση προσδοκώμενης τιμής.

Αντίστοιχα, η αποτελεσματική χωρητικότητα ορίζεται (Wu & Negi, 2003; Tang & Zhang, 2007a) ως ο μέγιστος σταθερός 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 θ . Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται το μοντέλο συστήματος που χρησιμοποιείται για την κατανόηση της έννοιας της αποτελεσματικής χωρητικότητας. Συνεπώς, με βάση τον προηγούμενο ορισμό, η αποτελεσματική χωρητικότητα χαρακτηρίζει μια συγκεκριμένη διαδικασία εξυπηρέτησης. Έστω μια στάσιμη και εργοδική στοχαστική διαδικασία εξυπηρέτησης διακριτού χρόνου $\{R[i], i = 1, 2, \dots\}$, η οποία αντιστοιχεί στον στιγμιαίο ρυθμό με τον οποίο μπορεί να μεταδίδει το ασύρματο κανάλι, 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 εξής:

$$\Lambda_C(\theta) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln \left(\mathcal{E} \left[e^{\theta S(t)} \right] \right) \quad (5.6)$$

η οποία είναι μια κυρτή διαφορίσιμη συνάρτηση για όλες τις πραγματικές τιμές του θ , τότε η συνάρτηση της αποτελεσματικής χωρητικότητας της διαδικασίας εξυπηρέτησης, δίνεται από την



Σχήμα 5.2: Συναρτήσεις ισοδύναμου εύρους ζώνης και αποτελεσματικής χωρητικότητας.

παρακάτω σχέση για $\theta > 0$:

$$E_C(\theta) = -\frac{\Lambda_C(-\theta)}{\theta} = -\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{\theta t} \ln \left(\mathcal{E} \left[e^{-\theta S(t)} \right] \right). \quad (5.7)$$

Στο Σχήμα 5.2 απεικονίζονται γραφικά οι συναρτήσεις του ισοδύναμου εύρους ζώνης και της αποτελεσματικής χωρητικότητας ως προς την παράμετρο θ . Όπως παρατηρείται, όσον αφορά τη συνάρτηση του ισοδύναμου εύρους ζώνης, αυτή είναι μια γνησίως αύξουσα συνάρτηση. Αναλυτικότερα, όσο οι απαιτήσεις QoS γίνονται πιο αυστηρές (μεγάλες τιμές του θ), το κανάλι πρέπει να υποστηρίξει υψηλότερους ρυθμούς εξυπηρέτησης προκειμένου να διασφαλίσει συγκεκριμένες απαιτήσεις ποιότητας, ενώ στην περίπτωση που υπάρχουν χαμηλότερες απαιτήσεις ποιότητας (μικρές τιμές του θ), απαιτείται χαμηλότερος ρυθμός εξυπηρέτησης. Σημειώνεται ότι για $\theta \rightarrow 0$, το ισοδύναμο εύρος ζώνης τείνει στο μέσο ρυθμό άφιξης δεδομένων, ενώ για $\theta \rightarrow \infty$, τείνει στον μέγιστο ρυθμό αφίξεων. Όσον αφορά την αποτελεσματική χωρητικότητα, αυτή είναι μια γνησίως φθίνουσα συνάρτηση ως προς τον εκθέτη QoS. Η συγκεκριμένη μονοτονία δικαιολογείται λαμβάνοντας υπόψη ότι όταν υπάρχουν αυστηροί περιορισμοί QoS (μεγάλες τιμές του θ), το κανάλι μπορεί να παρέχει εγγυήσεις ποιότητας μόνο όταν υποστηρίζονται χαμηλοί ρυθμοί άφιξης. Επομένως, για $\theta \rightarrow \infty$, η αποτελεσματική χωρητικότητα συγκλίνει στον ελάχιστο ρυθμό εξυπηρέτησης, δηλαδή στη χωρητικότητα περιορισμένης καθυστέρησης (delay-limited capacity). Αντίθετα, όταν το σύστημα έχει χαλαρές απαιτήσεις ποιότητας (μικρές τιμές του θ), δηλαδή όταν μπορεί να ανέχεται μεγάλες καθυστερήσεις, τότε μπορούν να υποστηριχθούν μεγαλύτεροι ρυθμοί άφιξης. Συνεπώς, για $\theta \rightarrow 0$, η αποτελεσματική χωρητικότητα συγκλίνει στο μέσο ρυθμό εξυπηρέτησης, δηλαδή στην εργοδική χωρητικότητα (Shannon).

Με βάση το Σχήμα 5.2, μπορεί να υπολογιστεί η πιθανότητα υπέρβασης του ορίου καθυστέρησης

σης, για συγκεκριμένες διαδικασίες άφιξης και εξυπηρέτησης, ως εξής (Tang & Zhang, 2007b):

1. Αρχικά, καθορίζονται οι συναρτήσεις της αποτελεσματικής χωρητικότητας $E_C(\theta)$ και του ισοδύναμου εύρους ζώνης $E_B(\theta)$, σύμφωνα με τα στατιστικά χαρακτηριστικά των διαδικασιών άφιξης και εξυπηρέτησης.
2. Στη συνέχεια υπολογίζεται το σημείο τομής (δ, θ^*) των δυο συναρτήσεων, για το οποίο ισχύει $E_B(\theta^*) = E_C(\theta^*) = \delta$.
3. Έπειτα, υπολογίζεται κατά προσέγγιση η πιθανότητα ϵ να μην είναι άδειος ο buffer, από τη σχέση $\epsilon \approx \frac{\lim_{\theta \rightarrow 0} E_B(\theta)}{\lim_{\theta \rightarrow 0} E_C(\theta)}$.
4. Τέλος, για ένα συγκεκριμένο όριο καθυστέρησης D_{\max} και για το σημείο (δ, θ^*) που υπολογίστηκε προηγουμένως, η πιθανότητα υπέρβασης δίνεται ως $\Pr\{D > D_{\max}\} \approx \epsilon e^{-\theta^* \delta D_{\max}}$.

Σημειώνεται ότι για την απλή περίπτωση του σταθερού ρυθμού αφίξεων λ (ο οποίος είναι ίσος με το ισοδύναμο εύρος ζώνης στη συγκεκριμένη περίπτωση), η πιθανότητα υπέρβασης δίνεται από τη σχέση $\Pr\{D > D_{\max}\} \approx \epsilon e^{-\theta \lambda D_{\max}}$, από την οποία μπορεί να υπολογιστεί η ελάχιστη απαιτούμενη τιμή του θ , έτσι ώστε να η πιθανότητα αυτή να διατηρείται κάτω από ένα όριο (Soret et al., 2010; Du & Zhang, 2011). Επιπλέον, για να εξασφαλίζεται το συγκεκριμένο θ , η αποτελεσματική χωρητικότητα για τη δεδομένη διαδικασία εξυπηρέτησης θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το λ .

Επιπρόσθετα, η αποτελεσματική χωρητικότητα που δίνεται από την (5.7) μπορεί να απλοποιηθεί σημαντικά στην περίπτωση ασυσχέτιστων καναλιών. Αναλυτικότερα, για μια χρονικά ασυσχέτιστη διαδικασία εξυπηρέτησης $\{R[i], i = 1, 2, \dots\}$, η αποτελεσματική χωρητικότητα δίνεται ως εξής:

$$E_C(\theta) = -\frac{1}{\theta} \ln \left(\mathcal{E} \left[e^{-\theta R[i]} \right] \right) \quad (5.8)$$

Στα ασύρματα κανάλια, η συνάρτηση $R[i]$ αναπαριστά συνήθως τη χωρητικότητα κατά Shannon, δηλαδή τον μέγιστο στιγμιαίο ρυθμό αξιόπιστης μετάδοσης δεδομένων κατά τη διάρκεια ενός πλαισίου T_f , η οποία ορίζεται σε μονάδες bits/πλαίσιο ως εξής:

$$R[i] = T_f B \log_2(1 + SINR[i]) \quad (5.9)$$

όπου T_f είναι η διάρκεια των πλαισίων δεδομένων στο επίπεδο ζεύξεως, B είναι το συνολικό εύρος ζώνης του συστήματος και το $SINR$ αναφέρεται στο λόγο σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο (Signal to Interference plus Noise Ratio - SINR). Αναφέρεται ότι μια συνήθης υπόθεση στη βιβλιογραφία είναι το κανάλι να θεωρείται αμετάβλητο κατά την διάρκεια T_f ενός πλαισίου, ενώ θεωρείται ότι μεταβάλλεται από το ένα πλαίσιο στο άλλο. Επιπρόσθετα, συχνά συναντάται 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.

Τέλος, τονίζεται ότι η έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για τη σχεδίαση αποδοτικών μηχανισμών που παρέχουν εγγυήσεις QoS, καθώς ενοποιεί έννοιες ανάμεσα στο φυσικό στρώμα και το στρώμα ζεύξεως δεδομένων με στόχο τη διαστρωματική (cross-layer) σχεδίαση, συσχετίζοντας το ρυθμό εξυπηρέτησης του ασύρματου καναλιού με την απόδοση QoS του δικτύου μέσω μιας απλής παραμέτρου, του εκθέτη θ . Γι' αυτό το λόγο, τα τελευταία

χρόνια οι ερευνητές χρησιμοποιούν ευρέως την έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας για να μελετήσουν διάφορα προβλήματα διαχείρισης πόρων. Στη συνέχεια, μελετάται το γενικό πρόβλημα μεγιστοποίησης της αποτελεσματικής χωρητικότητας και η σχετική βιβλιογραφική επισκόπηση.

5.3 Πρόβλημα Μεγιστοποίησης Αποτελεσματικής Χωρητικότητας και Σχετική Βιβλιογραφία

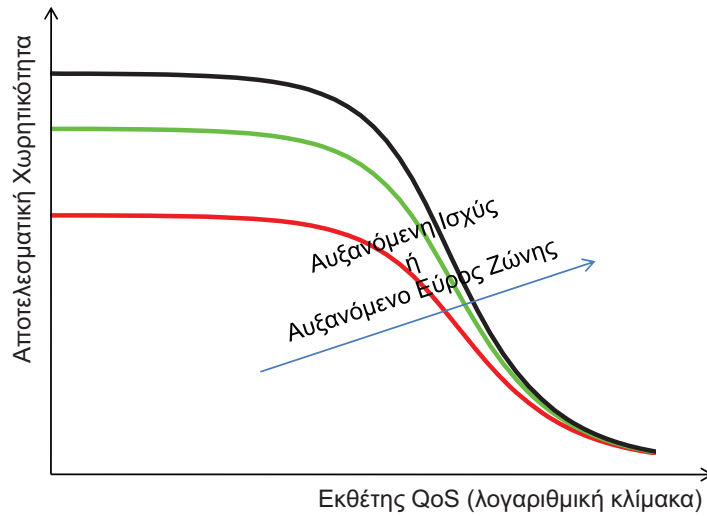
Στη συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζεται το γενικό πρόβλημα μεγιστοποίησης της αποτελεσματικής χωρητικότητας που εμφανίζεται στα προβλήματα διαχείρισης πόρων των ασύρματων δικτύων μαζί με τους κυριότερους περιορισμούς του. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται οι σημαντικότερες ερευνητικές εργασίες που αφορούν προβλήματα διαχείρισης πόρων για διασφάλιση QoS με χρήση της αποτελεσματικής χωρητικότητας στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών, καθώς και ειδικότερα στα γνωστικά δίκτυα.

Η έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας αποτελεί ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο, το οποίο επιτρέπει στους ερευνητές να μελετήσουν την επίδραση διάφορων χαρακτηριστικών του φυσικού στρώματος στην απόδοση ανωτέρων στρωμάτων, αλλά και να αναπτύξουν αποδοτικά σχήματα διαχείρισης πόρων. Γι' αυτό το λόγο, τα τελευταία χρόνια έχουν προταθεί διάφοροι μηχανισμοί διαχείρισης πόρων, οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη τις απαιτήσεις QoS των ασύρματων χρηστών, μέσω της αποτελεσματικής χωρητικότητας. Το γενικό πρόβλημα μεγιστοποίησης που θεωρείται συνήθως μπορεί να μοντελοποιηθεί ως εξής:

$$\begin{aligned}
 \max \quad & \{ \text{(Κανονικοποιημένη) Αποτελεσματική Χωρητικότητα} \} \\
 \text{s.t.} \quad & \text{Περιορισμός διαθέσιμων πόρων} \\
 & \text{Περιορισμός αρμονικής λειτουργία δικτύου}
 \end{aligned}
 \tag{5.10}$$

Η μεγιστοποίηση της αποτελεσματικής χωρητικότητας πραγματοποιείται ως προς το διαχειριζόμενο πόρο κατά περίπτωση (π.χ. ισχύς μετάδοσης, εύρος ζώνης, κεραιές), ενώ οι περιορισμοί του προβλήματος, οι οποίοι μπορεί να είναι είτε περιορισμοί μέσης τιμής είτε στιγμιαίας τιμής, αφορούν συνήθως περιορισμούς λόγω της πεπερασμένης φύσης των πόρων (π.χ. περιορισμούς ισχύος μετάδοσης, διαθέσιμου εύρους ζώνης) και περιορισμούς αρμονικής λειτουργίας του δικτύου (π.χ. περιορισμός προκαλούμενης παρεμβολής σε άλλα τερματικά).

Για τη βελτιστοποίηση της αποτελεσματικής χωρητικότητας, τα προτεινόμενα σχήματα εκμεταλλεύονται τη συμπεριφορά της συνάρτησης για τις διαφορετικές τιμές των διαθέσιμων πόρων. Το Σχήμα 5.3 παρουσιάζει τη σχέση της αποτελεσματικής χωρητικότητας με τον εκθέτη QoS, μέσω του συνόλου καμπυλών για διαφορετικές τιμές της ισχύος μετάδοσης και του εύρους ζώνης, θεωρώντας την (5.8), για χωρητικότητα Shannon. Όπως παρατηρείται, η αποτελεσματική χωρητικότητα μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά εάν αυξηθεί η ισχύς μετάδοσης, καθώς και όταν ανατεθεί στη συσκευή περισσότερο εύρος ζώνης. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η σχετική βιβλιογραφική επισκόπηση για τα ασύρματα και τα γνωστικά δίκτυα.



Σχήμα 5.3: Αποτελεσματική χωρητικότητα ως προς τον εκθέτη QoS για διαφορετικές τιμές ισχύος μετάδοσης και εύρους ζώνης.

5.3.1 Διαχείριση Πόρων σε Ασύρματα Δίκτυα για Διασφάλιση QoS

Ένας από τους πρώτους μηχανισμούς που προτάθηκε στη συγκεκριμένη ερευνητική περιοχή παρουσιάζεται στην ερευνητική εργασία (Tang & Zhang, 2007a), όπου προτείνεται ένα σχήμα ελέγχου ισχύος για μια ασύρματη ζεύξη σημείου προς σημείο, η οποία εμφανίζει διαλείψεις Nakagami- m . Ο στόχος είναι η μεγιστοποίηση της ρυθμοαπόδοσης του συστήματος για συγκεκριμένες απαιτήσεις καθυστέρησης QoS και πιο συγκεκριμένα η μεγιστοποίηση της αποτελεσματικής χωρητικότητας, δεδομένου ενός περιορισμού μέσης ισχύος μετάδοσης. Αρχικά, θεωρούνται ασυσχέτιστα κανάλια και υπολογίζεται η βέλτιστη πολιτική ελέγχου ισχύος, ενώ στη συνέχεια θεωρούνται πιο ρεαλιστικά σενάρια εισάγονται προσαρμοστικές τεχνικές διαμόρφωσης και συσχετισμένα κανάλια. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι όταν το σύστημα έχει χαμηλές απαιτήσεις QoS, η βέλτιστη κατανομή ισχύος συγκλίνει στο γνωστό σχήμα water-filling (A. J. Goldsmith & Varaiya, 1997; A. Goldsmith, 2005), ενώ όταν το σύστημα πρέπει να ικανοποιήσει αυστηρούς περιορισμούς ποιότητας, η βέλτιστη πολιτική ελέγχου ισχύος είναι παρόμοια με το μηχανισμό total channel inversion (A. J. Goldsmith & Varaiya, 1997; A. Goldsmith, 2005). Επιπλέον, προέκυψε το συμπέρασμα ότι η θεώρηση συσχετισμένων καναλιών επηρεάζει σημαντικά τον μηχανισμό ελέγχου ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, θεωρώντας ένα μαρκοβιανό μοντέλο εξασθένησης καναλιού, αποδεικνύεται ότι όταν αυξάνεται η συσχέτιση καναλιού, ο μηχανισμός ελέγχου ισχύος συγκλίνει γρηγορότερα στην τεχνική total channel inversion, για μεγάλες τιμές του θ .

Επιπρόσθετα, στην εργασία (Tang & Zhang, 2008), αναλύθηκε η κάτω ζεύξη ενός ασύρματου δικτύου κινητών τερματικών που εμφανίζει διαλείψεις Nakagami- m και προτάθηκε ένας μηχανισμός ελέγχου αποδοχής και εκχώρησης πόρων. Αναλυτικότερα, χρησιμοποιείται η έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας, έτσι ώστε να είναι εφικτή η μελέτη της επίδρασης τεχνικών του φυσικού στρώματος (π.χ. ο προσαρμοστικός έλεγχος ισχύος και η καθυστέρηση ανατροφοδότησης της CSI),

στην επίδοση των πρωτοκόλλων των ανώτερων στρωμάτων. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζεται ένα σχήμα δυναμικής διαχείρισης πόρων, το οποίο εκχωρεί σε κινητούς χρήστες ετερογενών δικτύων την κατάλληλη ισχύ, καθώς και τον κατάλληλο αριθμό χρονοθυρίδων, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους (π.χ. εξασθένιση καναλιού, απαιτήσεις QoS), έτσι ώστε να παρέχονται εγγυήσεις συγκεκριμένου ορίου καθυστέρησης για κάθε χρήστη. Επιπλέον, μελετάται ο τρόπος με τον οποίο το σχήμα προσαρμοστικού ελέγχου ισχύος επηρεάζει την παροχή εγγυήσεων QoS, ενώ χρησιμοποιούνται τρία διαφορετικά σχήματα ελέγχου ισχύος: το σχήμα water-filling, ένας αλγόριθμος ελέγχου σταθερής ισχύος, καθώς και το σχήμα που προτείνεται στην (Tang & Zhang, 2007a). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το τελευταίο σχήμα υπερέχει σημαντικά σε σχέση με τα άλλα δυο. Επιπρόσθετα, το προτεινόμενο σχήμα από κοινού ελέγχου ισχύος και χρονοθυρίδων παρέχει εγγυήσεις για τις απαιτήσεις QoS κάθε χρήστη και παράλληλα ελαχιστοποιεί τη συνολική ενέργεια του συστήματος, οδηγώντας σε μείωση της ισχύος μετάδοσης ή ισοδύναμα σε αύξηση της περιοχής αποδοχής.

Οι συγγραφείς στην (X. Zhang et al., 2006) παρουσίασαν έναν μηχανισμό ελέγχου ισχύος που έχει ως βασικό γνώμονα την παροχή QoS για πολυκαναλικές επικοινωνίες. Αναλυτικότερα, χρησιμοποιείται η έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας και παρουσιάζεται ένα διαστρωματικό μοντέλο συστήματος για μια ασύρματη ζεύξη σημείο προς σημείο. Στην προσέγγιση αυτή, χρησιμοποιούνται τεχνικές διαφορισμού, πολλαπλών εισόδων - πολλαπλών εξόδων MIMO μαζί με τεχνικές προσαρμοστικής κωδικοποίησης και διαμόρφωσης (Adaptive Coding and Modulation - ACM) και αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο η δομή του φυσικού στρώματος επηρεάζει την αποτελεσματική χωρητικότητα του ασύρματου δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, 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 υπερχειλίσης του buffer. Από την ανάλυση προκύπτει ότι η χρήση τεχνικών MIMO αυξάνει σημαντικά την αποτελεσματική χωρητικότητα του συστήματος σε σχέση με τη χρήση της τεχνικής μονής εισόδου - μονής εξόδου SISO (Single Input Single Output). Επιπλέον, συγκρίνοντας τις τεχνικές MIMO με τεχνικές πολλαπλών εισόδων - μονής εξόδου MISO (Multiple Input Single Output), προκύπτει ότι για πιο χαλαρούς περιορισμούς QoS, η αποτελεσματική χωρητικότητα των συστημάτων MISO μπορεί να είναι υψηλότερη από αυτή των MIMO συστημάτων, ανάλογα την διαθέσιμη CSI. Παρ' όλα αυτά, τα συστήματα MIMO οδηγούν πάντα σε καλύτερες τιμές αποτελεσματικής χωρητικότητας, για αυστηρότερες απαιτήσεις QoS.

Το πρόβλημα εκχώρησης πόρων σε συνεργατικά δίκτυα επαναληπτών παρουσιάστηκε στην (Ren & Letaief, 2009), όπου μελετήθηκε ένα ασύρματο δίκτυο επαναληπτών και προτάθηκε ένας μηχανισμός εκχώρησης χρονοθυρίδων, έτσι ώστε να βελτιστοποιείται η ρυθμοαπόδοση του συστήματος για συγκεκριμένους περιορισμούς QoS. Θεωρώντας μπλοκ κανάλια διαλείψεων, υπολογίζεται η βέλτιστη διάρκεια της χρονοθυρίδας που πρέπει να εκχωρηθεί σε κάθε επαναλήπτη για να προωθηθεί επιτυχώς το σήμα της πηγής, με στόχο τη μεγιστοποίηση της αποτελεσματικής χωρητικότητας του συστήματος. Η ανάλυση έδειξε ότι για χαλαρούς περιορισμούς QoS, η βέλτιστη πολιτική καταλήγει στην επιλογή του επαναλήπτη με την καλύτερη μέση κατάσταση καναλιού, ενώ για αυστηρές απαιτήσεις QoS απαιτείται η συνεργασία περισσότερων επαναληπτών προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η αποτελεσματική χωρητικότητα. Επιπρόσθετα, ο προτεινόμενος μηχανισμός βέλτιστης εκχώρησης χρονοθυρίδων συγκρίνεται με έναν ομοιογενή μηχανισμό κατά τον οποίο επιλέγεται κάθε φορά μόνο ο επαναλήπτης με την καλύτερη μέση κατάσταση καναλιού και με έναν μηχανισμό ίσης

εκχώρησης, σύμφωνα με τον οποίο εκχωρούνται χρονοθυρίδες ίδιας διάρκειας σε όλους τους επαναλήπτες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το προτεινόμενο σχήμα υπερέχει σε σχέση με τα άλλα δύο σχήματα από πλευράς αποτελεσματικής χωρητικότητας, για κάθε δεδομένη τιμή του εκθέτη QoS, ενώ για ένα συγκεκριμένο στόχο αποτελεσματικής χωρητικότητας, εμφανίζεται ένα ισοζύγιο ανάμεσα στην ισχύ μετάδοσης και τον αριθμό των επαναληπτών. Επιπλέον, ένα πιο ρεαλιστικό σενάριο μοντέλου συστήματος με συσχετισμένα κανάλια μελετάται και αποδεικνύεται η αρνητική επίδραση της συσχέτισης.

Επιπρόσθετα, η έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τη θεωρία παιγνίων προκειμένου να αναπτυχθούν καταναμημένοι μηχανισμοί εκχώρησης πόρων. Αναλυτικότερα, οι ερευνητικές εργασίες (Du & Zhang, 2009; Qiao et al., 2010) μελέτησαν ένα μη συνεργατικό παίγνιο ελέγχου ισχύος ανάμεσα σε κινητούς χρήστες που λειτουργούν σε περιβάλλον διαλείψεων και οι οποίοι επιθυμούν να μεγιστοποιήσουν την αποτελεσματική χωρητικότητα τους. Ο κάθε κινητός χρήστης, έχοντας συγκεκριμένους περιορισμούς QoS και πλήρη γνώση της CSI, προσπαθεί να μεγιστοποιήσει την αποτελεσματική χωρητικότητα του, δεδομένων των περιορισμών μέσης ισχύος. Στις εργασίες αυτές, μελετάται η περίπτωση του παιγνίου δύο ατόμων και αποδεικνύεται ότι το συγκεκριμένο παίγνιο ελέγχου ισχύος έχει μια μοναδική ισορροπία Nash. Η απόδοση του συγκεκριμένου παιγνίου συγκρίνεται με την απόδοση ενός water-filling παιγνίου (Lai & El Gamal, 2008) και προκύπτει ότι για αυστηρούς περιορισμούς QoS, το προτεινόμενο παίγνιο οδηγεί σε υψηλότερες τιμές αποτελεσματικής χωρητικότητας σε σχέση με το water-filling παίγνιο, ενώ για χαλαρές απαιτήσεις QoS, τα δύο παίγνια έχουν παρόμοια συμπεριφορά. Εντούτοις, προκύπτει ότι η εισαγωγή των περιορισμών QoS οδηγεί σε μια ισορροπία στην οποία οι χρήστες μπορούν να μεταδώσουν δεδομένα ταυτόχρονα αντίθετα με το παίγνιο water-filling σύμφωνα με το οποίο το πολύ ένας χρήστης μπορεί να μεταδίδει σε κάθε κατάσταση. Τέλος, παρόμοια με τις προηγούμενες εργασίες, στην (Mao et al., 2012) χρησιμοποιήθηκε η μη συνεργατική θεωρία παιγνίων και μελετήθηκε το πρόβλημα ελέγχου ισχύος με περιορισμούς QoS σε ένα περιβάλλον κινητών τερματικών υψηλής ταχύτητας για ένα παίγνιο δυο χρηστών.

5.3.2 Διαχείριση Πόρων σε Γνωστικά Δίκτυα για Διασφάλιση QoS

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι ερευνητικές εργασίες διαχείρισης πόρων που χρησιμοποιούν την έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας σε γνωστικά δίκτυα. Βασική απαίτηση στα γνωστικά δίκτυα είναι η διασφάλιση της ανεπηρέαστης επικοινωνίας των PUs, η οποία επιτυγχάνεται με την επιβολή συγκεκριμένων περιορισμών στην επικοινωνία των SUs. Όμως, οι περιορισμοί αυτοί έχουν ως αποτέλεσμα να υποβαθμίζεται η επικοινωνία των SUs (π.χ. περιορίζονται οι ρυθμοί μετάδοσης τους) και να γίνεται πιο δύσκολη η ικανοποίηση των απαιτήσεών τους σε QoS. Επομένως, είναι εμφανές ότι απαιτούνται αποδοτικοί μηχανισμοί διαχείρισης πόρων που θα ικανοποιούν τις απαιτήσεις QoS των αδειοδοτημένων και μη αδειοδοτημένων χρηστών, δεδομένων των χρονομεταβαλλόμενων συνθηκών των ασύρματων καναλιών. Δεδομένου ότι οι ερευνητικές εργασίες στη βιβλιογραφία που σχετίζονται με την αποτελεσματική χωρητικότητα αφορούν κυρίως την underlay και την υβριδική underlay/interweave προσέγγιση, η υποεπένδυση αυτή επικεντρώνεται στις συγκεκριμένες περιπτώσεις γνωστικών δικτύων.

Αναλυτικότερα, στα συστήματα CRs και πιο συγκεκριμένα στην underlay προσέγγιση διαμοι-

ρασμού, θεωρείται ότι ο SU μπορεί να εκπέμπει ταυτόχρονα με τον PU, εφόσον η ισχύς μετάδοσης του περιορίζεται από ένα όριο παρεμβολής, έτσι ώστε να μην υποβαθμίζεται η επικοινωνία του PU. Οι περιορισμοί παρεμβολής αναφέρονται στη μέγιστη επιτρεπόμενη παρεμβολή από τον SU στον PU και μπορούν να εκφραστούν ως όριο της μέγιστης στιγμιαίας ή μέσης λαμβανόμενης ισχύος παρεμβολής στον πρωτεύοντα δέκτη. Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί και άλλοι περιορισμοί για την μετάδοση του SU (π.χ. περιορισμοί πιθανότητας διακοπής λειτουργίας του PU), αλλά οι περισσότεροι από αυτούς μπορούν να αναχθούν στους βασικούς περιορισμούς ισχύος παρεμβολής.

Στην ερευνητική εργασία (Ma et al., 2009), παρουσιάστηκε το πρόβλημα ελέγχου ισχύος σε ένα underlay γνωστικό δίκτυο και προτάθηκε ένα διαστρωματικό σχήμα επιλυσης, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι δευτερεύοντες χρήστες έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις ποιότητας επικοινωνίας. Πιο συγκεκριμένα, θεωρείται ένα γνωστικό σύστημα το οποίο αποτελείται από έναν SU και έναν PU, με τα κανάλια των χρηστών να υπόκεινται σε διαλείψεις Nakagami- m , και παρουσιάζεται το πρόβλημα μεγιστοποίησης της αποτελεσματικής χωρητικότητας του SU, δεδομένων συγκεκριμένων μέσων και στιγμιαίων περιορισμών ισχύος μετάδοσης, καθώς και ενός περιορισμού μέσης ισχύος παρεμβολής. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης διαχωρίζεται σε δύο υποπροβλήματα προκειμένου να μειωθεί η συνολική υπολογιστική πολυπλοκότητα και αναπτύσσεται ένας επαναληπτικός αλγόριθμος επίλυσης, δεδομένων των περιορισμών ισχύος. Παράλληλα, μελετάται η πολιτική ελέγχου ισχύος του SU για το δυαδικό πρόβλημα, όπου ελαχιστοποιείται η μέση ισχύς παρεμβολής στον πρωτεύοντα δέκτη, παρέχοντας ταυτόχρονα εγγυήσεις QoS για τον SU, μέσω ενός περιορισμού της αποτελεσματικής χωρητικότητας του. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αποτελεσματική χωρητικότητα αποτελεί μια φθίνουσα συνάρτηση του εκθέτη QoS και ότι η πολιτική ελέγχου ισχύος οδηγεί σε καλύτερες τιμές από πλευράς αποτελεσματικής χωρητικότητας για λιγότερο αυστηρούς περιορισμούς παρεμβολής. Επιπρόσθετα, για το δυαδικό πρόβλημα αποδεικνύεται ότι η μέση ισχύς παρεμβολής αυξάνεται με την αύξηση του κατωφλίου αποτελεσματικής χωρητικότητας και το ίδιο συμβαίνει καθώς οι απαιτήσεις QoS γίνονται πιο αυστηρές.

Οι συγγραφείς στην (Musavian & Aïssa, 2010) παρουσίασαν ένα σχήμα ελέγχου ισχύος για δευτερεύοντες χρήστες με συγκεκριμένες απαιτήσεις QoS σε ένα underlay γνωστικό σύστημα με κανάλια Nakagami- m . Αναλυτικότερα, θεωρείται ένα σύστημα, το οποίο αποτελείται από έναν SU και έναν PU και υπολογίζεται η πολιτική ελέγχου ισχύος που μεγιστοποιεί την αποτελεσματική χωρητικότητα του SU, δεδομένου ενός περιορισμού μέσης ισχύος παρεμβολής στον πρωτεύοντα δέκτη. Αναλυτικότερα, παρέχονται εκφράσεις κλειστού τύπου για τη βέλτιστη ισχύ, την αντίστοιχη αποτελεσματική χωρητικότητα και την ισχύ που καταναλώνει ο δευτερεύων πομπός. Το προτεινόμενο σχήμα συγκρίνεται με δύο ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές ελέγχου ισχύος, την τεχνική που μεγιστοποιεί τη χωρητικότητα του καναλιού και τη γνωστή τεχνική total channel inversion που οδηγεί σε σταθερό ρυθμό μετάδοσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο προτεινόμενος μηχανισμός υπερισχύει των δυο άλλων. Επιπρόσθετα, η κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα αυξάνεται καθώς αυξάνεται είτε η παράμετρος εξασθένισης m της ζεύξης μεταξύ του δευτερεύοντα πομπού και του δευτερεύοντα δέκτη είτε το όριο παρεμβολής, ενώ φθίνει σημαντικά όταν βελτιώνεται το κανάλι της ζεύξης παρεμβολής.

Προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση της χρήσης των τεχνικών ACM, προτάθηκε στην (Musavian et al., 2011) ένα σχήμα μεταβλητού ρυθμού, μεταβλητής ισχύος MQAM (M-level Quadrature Amplitude Modulation), σε ένα underlay γνωστικό σύστημα, το οποίο αποτελείται από έναν δευ-

τερεύοντα και έναν πρωτεύοντα χρήστη, δεδομένων συγκεκριμένων περιορισμών καθυστέρησης για τους δευτερεύοντες χρήστες. Αναλυτικότερα, θεωρούνται περιορισμοί για την πιθανότητα διακοπής λειτουργίας (outage probability) του PU, ανεξάρτητα από την ύπαρξη των SUs στο δίκτυο, οι οποίοι στη συνέχεια μετασχηματίζονται σε περιορισμούς είτε μέσης είτε στιγμιαίας ισχύος παρεμβολής για κανάλια εξασθένησης Rayleigh ή Nakagami- m . Επιπλέον, θεωρείται ότι ο PU εκπέμπει είτε με ένα σχήμα σταθερής ισχύος είτε με ένα σχήμα βέλτιστης ισχύος που μεγιστοποιεί τη χωρητικότητα του καναλιού, χωρίς να λαμβάνει υπόψη την ύπαρξη του SU. Πιο συγκεκριμένα, επιλύεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης της αποτελεσματικής χωρητικότητας του SU, θεωρώντας ότι μπορεί να χρησιμοποιήσει διαμόρφωση MQAM με συνεχείς ή διακριτούς ασπериσμούς, και παρουσιάζονται οι στρατηγικές βέλτιστης ισχύος. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο περιορισμός ισχύος παρεμβολής για τεχνικές ελέγχου σταθερής ισχύος του PU, είναι πολύ αυστηρότερος από τον αντίστοιχο περιορισμό βέλτιστης κατανομής ισχύος του πρωτεύοντα. Επιπρόσθετα, η αποτελεσματική χωρητικότητα για περιορισμούς μέσης ισχύος είναι σημαντικά υψηλότερη σε σχέση με την περίπτωση των περιορισμών στιγμιαίας ισχύος, ενώ η αποτελεσματική χωρητικότητα που επιτυγχάνεται με τη χρήση διακριτού MQAM είναι μικρότερη από αυτή της συνεχούς MQAM. Ωστόσο, η διαφορά σε όρους αποτελεσματικής χωρητικότητας είναι μικρή σε σχέση με αυτή που προκύπτει συγκρίνοντας τη βέλτιστη περίπτωση, δηλαδή την περίπτωση χωρίς περιορισμούς διαμόρφωσης, και την περίπτωση της συνεχούς διαμόρφωσης. Τέλος, αποδεικνύεται ότι η αποτελεσματική χωρητικότητα φθίνει σημαντικά, όταν μειώνεται η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας.

Παρόλο που οι περισσότερες ερευνητικές εργασίες έχουν ως βασική υπόθεση την πλήρη γνώση της CSI κατά τη σχεδίαση των σχημάτων διαχείρισης πόρων, στις ασύρματες επικοινωνίες, η κατάσταση καναλιού μεταβάλλεται συνεχώς χρονικά με αποτέλεσμα η εκτίμηση των συνιστωσών του να αποτελεί μια δύσκολη διεργασία. Γι' αυτό το λόγο, η ανάλυση της ατελούς γνώσης CSI και οι επιδράσεις της στα σχήματα εκχώρησης πόρων αποτελεί ένα ενδιαφέρον πρόβλημα. Αναφέρεται, ότι η εκτίμηση καναλιού συνήθως υλοποιείται χρησιμοποιώντας έναν εκτιμητή ελαχίστου μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Minimum Mean Square Error - MMSE), ενώ το σφάλμα θεωρείται ότι ακολουθεί μια γνωστή κατανομή (π.χ. γκαουσιανή κατανομή μηδενικού μέσου) με γνωστή διακύμανση στον πομπό και τον δέκτη, η οποία αντικατοπτρίζει την ποιότητα της εκτίμησης καναλιού και αντιμετωπίζεται σαν μια επιπλέον πηγή γκαουσιανού θορύβου. Μια από τις πρώτες μελέτες που αναλύει το πρόβλημα ελέγχου ισχύος με περιορισμούς QoS, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της ατελούς γνώσης CSI, παρουσιάστηκε στην εργασία (Xie & Guo, 2011). Πιο συγκεκριμένα, μελετάται η εύρεση της πολιτικής ελέγχου ισχύος του δευτερεύοντος χρήστη που μεγιστοποιεί την αποτελεσματικότητα του χωρητικότητα υπό τον περιορισμό της μέσης ισχύος παρεμβολής, θεωρώντας το ίδιο μοντέλο συστήματος με την εργασία (Musavian et al., 2011) (η οποία παρουσιάστηκε προηγουμένως), όπου τα κανάλια εμφανίζουν διαλείψεις Rayleigh. Οι συγγραφείς αναλύουν την αποτελεσματική χωρητικότητα ενός underlay γνωστικού συστήματος στο οποίο θεωρείται ότι ο SU έχει μερική γνώση της CSI για τη ζεύξη ανάμεσα στον δευτερεύοντα πομπό και στον πρωτεύοντα δέκτη, ενώ θεωρείται πλήρης γνώση της CSI για τις υπόλοιπες ζεύξεις. Το κέρδος ισχύος καναλιού της ζεύξης παρεμβολής μπορεί να εκτιμηθεί ατελώς με ένα σφάλμα εκτίμησης καναλιού γνωστής διακύμανσης. Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται εκφράσεις για τη βέλτιστη αποτελεσματική χωρητικότητα και την αντίστοιχη μέση καταναλισκόμενη ισχύ, ως προς τη διακύμανση του σφάλματος εκτίμησης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η βέλτιστη αποτελεσματική χωρητικότητα, καθώς και η απαιτούμενη ισχύς αυξάνονται,

καθώς μειώνεται η διακύμανση του σφάλματος εκτίμησης του καναλιού.

Επιπρόσθετα, στην ερευνητική εργασία (Akin & Gursoy, 2010), μελετήθηκε η απόδοση των γνωστικών συστημάτων για μια υβριδική underlay/interweave προσέγγιση διαμοιρασμού, θεωρώντας ότι οι δευτερεύοντες χρήστες έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις QoS. Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή, ένας SU εκπέμπει με διαφορετική ισχύ ανάλογα με το αν είναι ενεργοί οι PUs ή όχι. Πιο συγκεκριμένα, αναλύεται η αποτελεσματική χωρητικότητα των καναλιών προκειμένου να υπολογιστεί η απόδοση και να καθοριστεί η επίδραση των παραμέτρων ανίχνευσης καναλιού στη ρυθμοαπόδοση που επιτυγχάνεται παρουσία των υπάρχοντων περιορισμών QoS. Στο συγκεκριμένο μοντέλο, ο SU ανιχνεύει 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 PUs δεν είναι γνωστές, χρησιμοποιούνται μέθοδοι ανίχνευσης που βασίζονται στη λαμβανόμενη ενέργεια, μέσω ενός προβλήματος υποθέσεων (hypothesis testing problem) ανάμεσα στον θόρυβο και το σήμα του πρωτεύοντος σε συνδυασμό με το θόρυβο. Επιπρόσθετα, προτείνεται ένα μοντέλο μετάβασης κατάστασης ορίζοντας τις πιθανότητες μετάβασης για δύο περιπτώσεις. Η πρώτη αφορά την περίπτωση τέλει γνώσης CSI μόνο στο δευτερεύοντα δέκτη, όπου ο SU μεταδίδει τα δεδομένα του χρησιμοποιώντας δύο σταθερούς ρυθμούς μετάδοσης ανάλογα με την εκτιμώμενη δραστηριότητα των PUs. Η δεύτερη περίπτωση είναι η περίπτωση τέλει γνώσης CSI στον δευτερεύοντα πομπό και δέκτη, όπου ο δευτερεύων πομπός προσαρμόζει την ισχύ του ανάλογα με τις συνθήκες του καναλιού και την εκτιμώμενη δραστηριότητα των PUs. Η κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα και οι βέλτιστες πολιτικές ισχύος υπολογίζονται υπό συγκεκριμένους περιορισμούς μέσης ισχύος για τις περιπτώσεις κατελημμένου και αδρανούς καναλιού. Επίσης, παρουσιάζονται αποτελέσματα 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 προκύπτει, η αποτελεσματική χωρητικότητα αυξάνεται, καθώς αυξάνεται το κατώφλι ανίχνευσης ή καθώς μειώνεται η πιθανότητα λανθασμένης εκτίμησης. Επιπρόσθετα, παρατηρείται ότι η αύξηση του εκθέτη QoS οδηγεί σε μείωση της αποτελεσματικής χωρητικότητας, του ρυθμού μετάδοσης, καθώς και των κερδών από την προσαρμογή του ρυθμού και της ισχύος. Τέλος, στην ερευνητική εργασία (Akin & Gursoy, 2011) αναλύεται η αποτελεσματική χωρητικότητα ενός γνωστικού δικτύου για την προηγούμενη υβριδική προσέγγιση, θεωρώντας περιορισμούς QoS και ισχύος μετάδοσης και λαμβάνοντας επιπρόσθετα υπόψη την επίδραση της ατελούς γνώσης CSI.

5.4 Προτεινόμενος Μηχανισμός Ελέγχου Ισχύος για Διασφάλιση QoS σε Γνωστικά Δίκτυα

Με βάση τις προηγούμενες ενότητες, τα γνωστικά συστήματα αποτελούν μια επαναστατική τεχνολογία, η οποία στοχεύει στην αποδοτική και ευέλικτη χρήση του πεπερασμένου ραδιοφάσματος. Επιπρόσθετα, η ενσωμάτωση της μετρικής της QoS στους μηχανισμούς διαχείρισης πόρων είναι απαραίτητη δεδομένου ότι οι διαφορετικές υπηρεσίες και χρήστες έχουν διαφορετικές απαιτήσεις QoS, δηλαδή διαφορετικά επίπεδα ανοχής σε καθυστέρηση. Χρήσιμο εργαλείο γι' αυτό το σκοπό είναι η έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας, η οποία αναφέρεται στον μέγιστο σταθερό ρυθμό αφίξεων που μπορεί να υποστηρίξει ένα συγκεκριμένο ασύρματο κανάλι, έτσι ώστε να παρέχονται

στατιστικές εγγυήσεις QoS, όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως. Η αποτελεσματική χωρητικότητα έχει υιοθετηθεί για την ανάπτυξη αποδοτικών τεχνικών διαχείρισης πόρων σε διάφορα ασύρματα επίγεια και δορυφορικά δίκτυα (Tang & Zhang, 2007a; Vassaki et al., 2012; Harsini & Lahouiti, 2012), ενώ πρόσφατα έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται σε γνωστικά δίκτυα (Musavian & Aïssa, 2010), όπου έχουν προταθεί μηχανισμοί ελέγχου ισχύος με στόχο την βελτιστοποίηση της αποτελεσματικής χωρητικότητας. Η βασική υπόθεση σε αυτές τις εργασίες είναι ότι τα θεωρούμενα κανάλια διαλείψεων είναι χωρικά ασυσχέτιστα και στατιστικά ανεξάρτητα.

Παρ' όλα αυτά, οι ασύρματες ζεύξεις οι οποίες δημιουργούνται από γειτονικούς πομπούς και δέκτες ενδέχεται να εμφανίζουν εξάρτηση μεταξύ τους όσον αφορά τις διαλείψεις μικρής και μεγάλης κλίμακας. Αυτό οφείλεται στην ομοιότητα που παρουσιάζει το περιβάλλον εξαιτίας των κοινών αντικειμένων σκίασης και σκέδασης. Επομένως, δεδομένου ότι αυτή η εξάρτηση μεταξύ των ζεύξεων μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόδοση της επικοινωνίας, η επίδραση της συσχέτισης των καναλιών θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στη μελέτη ρεαλιστικών ασύρματων συστημάτων. Η συγκεκριμένη ενότητα εστιάζει, στη συσχέτιση που εμφανίζεται μεταξύ των καναλιών διαλείψεων μικρής κλίμακας². Ωστόσο, παρά την πρακτική σημασία της συσχέτισης των καναλιών διαλείψεων, λίγες ερευνητικές μελέτες έχουν ασχοληθεί με την ετεροσυσχέτιση (cross-correlation) των πολυδιαδρομικών διαλείψεων στα ασύρματα συστήματα (Y. Chen & Ling, 2010; C.-X. Wang et al., 2010; Bithas & Mathiopoulos, 2009; Song et al., 2009), ενώ οι συγγραφείς στην (Q. Wang et al., 2012) μελέτησαν τη γενίκευση του τύπου της αποτελεσματικής χωρητικότητας σε χρονικά συσχετισμένα κανάλια (αυτοσυσχετισμένα) διαλείψεων Nakagami- m , μιας απλής ασύρματης ζεύξης. Επιπλέον, όσον αφορά τα γνωστικά συστήματα, η βιβλιογραφία που ασχολείται με τη συσχέτιση των καναλιών διαλείψεων είναι πολύ περιορισμένη (Duong et al., 2010) και αναφέρεται στην εργοδική χωρητικότητα των δικτύων διαμοιρασμού συχνότητας, η οποία δεν λαμβάνει υπόψη καθόλου τον παράγοντα της QoS (Makki & Eriksson, 2011; Ghasemi & Sousa, 2007).

Υποκινούμενη από τα παραπάνω, η συγκεκριμένη ενότητα μελετά το πρόβλημα της διαχείρισης του πόρου της ισχύος μετάδοσης με γνώμονα τη διασφάλιση της QoS σε ένα underlay γνωστικό σύστημα, το οποίο αποτελεί έναν πιθανό τρόπο υλοποίησης των CRs συστημάτων όπου οι SUs μπορούν να εκπέμπουν ταυτόχρονα με τους PUs, εξασφαλίζοντας όμως ένα συγκεκριμένο περιορισμό ισχύος παρεμβολής, έτσι ώστε να μην διαταράσσουν την επικοινωνία τους. Αναλυτικότερα, προτείνεται ένας καινοτόμος μηχανισμός ελέγχου ισχύος για τον SU, ο οποίος μεγιστοποιεί την αποτελεσματική χωρητικότητα του μέσω της θεωρίας κυρτής βελτιστοποίησης, δεδομένων περιορισμών ισχύος και παρεμβολής. Ο προτεινόμενος μηχανισμός λαμβάνει υπόψη ότι τα κανάλια επικοινωνίας του SU και του PU είναι ετεροσυσχετισμένα και μελετάται η επίδραση της χωρικής συσχέτισης (spatial correlation) στην προτεινόμενη πολιτική ελέγχου ισχύος και στην αντίστοιχη αποτελεσματική χωρητικότητα του SU. Ανάλογα με το ποιες ζεύξεις θεωρούνται συσχετισμένες, μελετώνται δυο σενάρια συσχέτισης: το *μοντέλο συσχέτισης λήψης PU-SU* (*PU-SU receive correlation model*) και το *μοντέλο συσχέτισης εκπομπής PU-SU* (*PU-SU transmit correlation model*). Το πρώτο αναφέρεται στη συσχέτιση των καναλιών μεταξύ των ζεύξεων «δευτερεύων πομπός - πρωτεύων δέκτης» και «δευτερεύων πομπός - δευτερεύων δέκτης», ενώ το δεύτερο αναφέρεται στη συσχέτιση των καναλιών μεταξύ

²Η διαφορά στη γωνία άφιξης και τη σχετική απόσταση παίζει κύριο ρόλο στον υπολογισμό του βαθμού συσχέτισης των καναλιών διαλείψεων μικρής κλίμακας μέσω απλών στοχαστικών γεωμετρικών μοντέλων (Y. Chen & Ling, 2010; C.-X. Wang et al., 2010).

των ζεύξεων «πρωτεύων πομπός - δευτερεύων δέκτης» και «δευτερεύων πομπός - δευτερεύων δέκτης». Ο προτεινόμενος κατανεμημένος μηχανισμός αξιολογείται μέσω προσομοιώσεων, για διαφορετικές παραμέτρους συστήματος. Τέλος, επισημαίνεται ότι είναι η πρώτη φορά που μελετάται η έννοια της χωρικής συσχέτισης των Nakagami- m διαλείψεων μεταξύ διαφορετικών ζεύξεων σε γνωστικά συστήματα τα οποία βασίζονται στην παροχή QoS, με στόχο τη σχεδίαση ενός ρεαλιστικού μηχανισμού ελέγχου ισχύος, ο οποίος μπορεί να ενσωματωθεί σε μελλοντικά πρότυπα γνωστικών δικτύων, φέρνοντας την υλοποίηση τους πιο κοντά στην πράξη.

Η δομή της ενότητας είναι η ακόλουθη: αρχικά, παρουσιάζονται τα μελετώμενα μοντέλα συστήματος και καναλιών για τα δυο σενάρια χωρικής συσχέτισης των καναλιών διαλείψεων. Στη συνέχεια, αναλύεται το προτεινόμενο σχήμα ελέγχου ισχύος, το οποίο βασίζεται στην παροχή QoS και οδηγεί σε μεγιστοποίηση της αποτελεσματικής χωρητικότητας της ζεύξης του SU, ενσωματώνοντας την έννοια της συσχέτισης των καναλιών. Τέλος, αξιολογείται ο προτεινόμενος μηχανισμός μέσω προσομοιώσεων και σχολιάζονται τα προκύπτοντα αποτελέσματα.

5.4.1 Μοντέλα Συστήματος και Καναλιών

Σύμφωνα με το μελετώμενο μοντέλο συστήματος, θεωρείται ένα σύστημα CR το οποίο χρησιμοποιεί το ίδιο εύρος ζώνης με ένα αδειοδοτημένο σύστημα. Αναλυτικότερα, θεωρείται ένα ζεύγος πρωτεύοντος πομπού (PU_{Tx}) και δέκτη (PU_{Rx}), το οποίο συνυπάρχει με ένα ζεύγος δευτερεύοντος πομπού (SU_{Tx}) και δέκτη (SU_{Rx}), όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.4. Το ζεύγος SU επικοινωνεί χρησιμοποιώντας την underlay προσέγγιση διαμοιρασμού φάσματος, όπου η εκπεμπόμενη ισχύς περιορίζεται από ένα περιορισμό μέσης ισχύος παρεμβολής, έτσι ώστε να μην επηρεάζεται η επικοινωνία του PU^1 . Ο PU_{Tx} εκπέμπει βάσει ενός σχήματος σταθερής ισχύος ίσης με P_p , ενώ ο SU_{Tx} είναι ένας γνωστικός κόμβος που μπορεί να παρατηρεί το περιβάλλον και να προσαρμόζει την ισχύ του ανάλογα με τις μεταβαλλόμενες συνθήκες και απαιτήσεις. Επιπλέον, θεωρείται ότι η φασματική πυκνότητα ισχύος και το φασματικό εύρος ζώνης του συστήματος είναι N_0 και B , αντίστοιχα, ενώ τα πακέτα του στρώματος ζεύξης δεδομένων οργανώνονται σε πλαίσια χρονικής διάρκειας T_f .

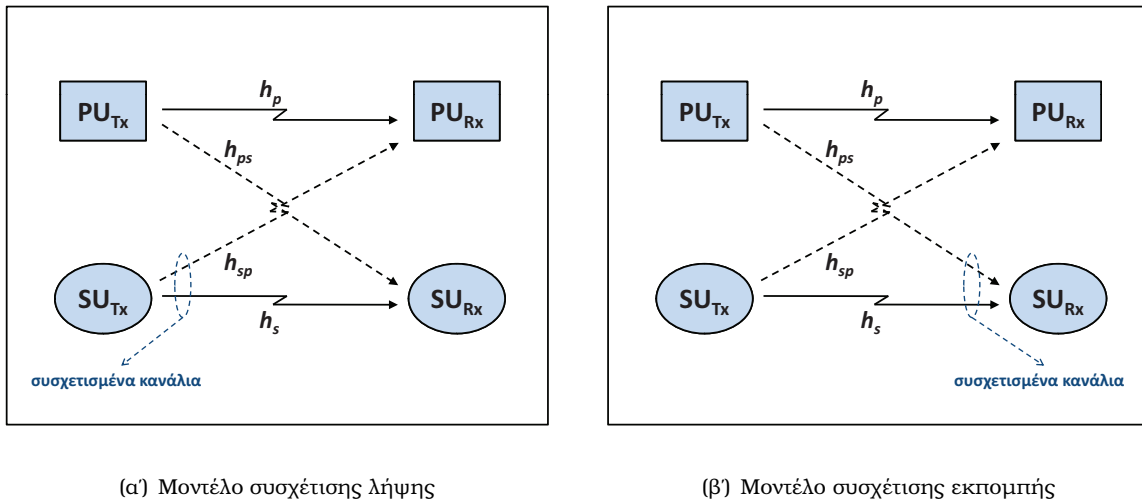
Δεδομένων μπλοκ επίπεδων καναλιών διαλείψεων Nakagami- m διακριτού χρόνου, για τις πρωτεύουσες και δευτερεύουσες ζεύξεις, τα λαμβανόμενα μιγαδικά σήματα στον πρωτεύοντα και στον δευτερεύοντα δέκτη κατά τη χρονική στιγμή n δίνονται, αντίστοιχα, ακολούθως:

$$y_p[n] = g_p[n] \cdot x_p[n] + g_{sp}[n] \cdot x_s[n] + z_p[n] \quad (5.11)$$

$$y_s[n] = g_s[n] \cdot x_s[n] + g_{ps}[n] \cdot x_p[n] + z_s[n] \quad (5.12)$$

όπου τα x_p και x_s αντιπροσωπεύουν τα εκπεμπόμενα μιγαδικά σήματα από τον πρωτεύοντα και τον δευτερεύοντα πομπό αντίστοιχα, ενώ τα z_p και z_s αντιστοιχούν στους μιγαδικούς λευκούς προσθετικούς γκαουσιανούς θορύβους (AWGN) για την πρωτεύουσα και την δευτερεύουσα ζεύξη. Επιπρόσθετα, τα g_s , g_{sp} , g_p και g_{ps} συμβολίζουν τους αντίστοιχους συντελεστές καναλιών μεταξύ του δευτερεύοντος/πρωτεύοντος πομπού και δευτερεύοντος/πρωτεύοντος δέκτη. Οι συντελεστές κα-

¹Σημειώνεται ότι το προτεινόμενο σχήμα μπορεί να επεκταθεί σε ένα σύστημα πολλαπλών SUs, χρησιμοποιώντας ένα σχήμα πολλαπλής πρόσβασης (π.χ. TDMA) ή προγραμματισμού χρηστών, το οποίο θα διαχωρίζει το γενικότερο πρόβλημα σε υποπροβλήματα σαν το μελετώμενο.



Σχήμα 5.4: Μοντέλα συστήματος.

ναλιών διακριτού χρόνου θεωρούνται στάσιμες και εργοδικές τυχαίες διαδικασίες, οι οποίες είναι αμετάβλητες κατά τη διάρκεια ενός πλαισίου T_f , αλλά μεταβάλλονται από πλαίσιο σε πλαίσιο. Τα αντίστοιχα κέρδη ισχύος καναλιών συμβολίζονται ως h_s , h_{sp} , h_p και h_{ps} , αντίστοιχα (βλ. Σχήμα 5.4), όπου $h_i = |g_i|^2$. Επιπρόσθετα, θεωρείται πλήρης γνώση της πληροφορίας της κατάστασης καναλιού (CSI), η οποία αποκτάται χρησιμοποιώντας πιλοτικά σήματα και παρατηρώντας ένα σήμα ανατροφοδότησης από τον PU (Jovicic & Viswanath, 2009; Y. Chen et al., 2008).

Αναλυτικότερα, σχετικά με το χρησιμοποιούμενο μοντέλο καναλιών, θεωρούνται κανάλια διαλείψεων Nakagami- m τα οποία είναι χωρικά ετεροσυσχετισμένα. Πιο συγκεκριμένα, η χωρική συσχέτιση αντιπροσωπεύει τη συσχέτιση μεταξύ των πολυδιαδρομικών φαινομένων των διαφορετικών ζεύξεων για την ίδια χρονική στιγμή. Υποθέτοντας ότι οι σκεδαστές που βρίσκονται πλησίον των πομπών εμφανίζουν διαλείψεις ανεξάρτητες από τους σκεδαστές που βρίσκονται πλησίον στους δέκτες (μονόπλευρη συσχέτιση), προτείνονται δυο περιπτώσεις συσχέτισης προς μελέτη: η συσχέτιση λήψης και η συσχέτιση εκπομπής. Πιο συγκεκριμένα, η συσχέτιση λήψης αναφέρεται στην συσχέτιση ανάμεσα στα κανάλια που δημιουργούνται από ένα συγκεκριμένο πομπό προς πολλούς δέκτες, ενώ η συσχέτιση εκπομπής αναφέρεται στη συσχέτιση ανάμεσα στα κανάλια που δημιουργούνται από πολλούς πομπούς προς ένα συγκεκριμένο δέκτη. Και τα δυο μοντέλα συσχέτισης θα πρέπει να εξετάζονται σε ένα μοντέλο καναλιών ενός συστήματος CR, έτσι ώστε να μπορεί να γίνει ακριβής σχεδιασμός και αξιολόγηση της απόδοσης του συγκεκριμένου συστήματος. Όσον αφορά το μελετώμενο σύστημα, η συσχέτιση των καναλιών ανάμεσα στους δυο δέκτες ($PU_{Rx} - SU_{Rx}$) για δεδομένο τον πομπό SU_{Tx} ονομάζεται χωρική *συσχέτιση λήψης PU-SU* (βλ. Σχήμα 5.4(α)), ενώ η συσχέτιση των καναλιών ανάμεσα στους δυο πομπούς ($PU_{Tx} - SU_{Tx}$) για δεδομένο τον δέκτη SU_{Rx} ονομάζεται χωρική *συσχέτιση εκπομπής PU-SU* (βλ. Σχήμα 5.4(β)).

Σύμφωνα με τις προαναφερόμενες προσεγγίσεις συσχέτισης (Σχήμα 5.4), κάποια κανάλια είναι διδιάστατα συσχετισμένα, ενώ κάποια άλλα μεταβάλλονται ανεξάρτητα. Όσον αφορά τα ανεξάρτητα κανάλια διαλείψεων, τα πλάτη τους μοντελοποιούνται σύμφωνα με την κατανομή Nakagami- m (Simon & Alouini, 2005), και συνεπώς η pdf των αντίστοιχων κερδών ισχύος των καναλιών h_i δίνεται

από την ακόλουθη μονοδιάστατη κατανομή Γάμμα (βλ. Παράρτημα Α):

$$f_{h_i}(h_i) = \frac{h_i^{m_i-1} \cdot e^{-\frac{h_i}{\beta_i}}}{\beta_i^{m_i} \Gamma(m_i)}, \text{ για } h_i \geq 0 \quad (5.13)$$

όπου η $\Gamma(\cdot)$ είναι η συνάρτηση Γάμμα (Gradshteyn & Ryzhik, 2007), το $\beta_i = \mathcal{E}[h_i]/m_i$ είναι η παράμετρος κλίμακας και το $m_i \in [0.5, +\infty)$ είναι η παράμετρος μορφοποίησης διαλείψεων ή αλλιώς παράμετρος Nakagami, η οποία αντιπροσωπεύει τη δριμύτητα των διαλείψεων μέσω της συνεισφοράς της συνιστώσας οπτικής επαφής σε σχέση με την πολυδιαδρομική συνιστώσα. Πιο συγκεκριμένα, το $m_i = 0.5$ αντιπροσωπεύει κανάλια που εμφανίζουν ισχυρές διαλείψεις, όπως οι μονόπλευρες γκαουσιανές διαλείψεις, το $m_i = 1$ αντιστοιχεί σε Rayleigh κανάλια διαλείψεων, το $m_i > 1$ οδηγεί σε προσεγγίσεις Rician και λογαριθμοκανονικών καναλιών διαλείψεων και τέλος το $m_i \rightarrow +\infty$ αντιπροσωπεύει τα AWGN κανάλια χωρίς διαλείψεις.

Όσον αφορά τα συσχετισμένα κανάλια, θεωρείται ότι τα πλάτη των καναλιών ακολουθούν τη διδιάστατη κατανομή Nakagami- m και συνεπώς τα κέρδη ισχύος των καναλιών ακολουθούν τη διδιάστατη κατανομή Γάμμα. Αναλυτικότερα, θεωρώντας δυο συσχετισμένες μεταβλητές Γάμμα h_i, h_j με κοινή παράμετρο μορφοποίησης διαλείψεων $m > 0$ (κοινή παράμετρος Nakagami) και παραμέτρους κλίμακας $\beta_i, \beta_j > 0$, τότε η από κοινού pdf (Song et al., 2009; Holm & Alouini, 2004; Shankar, 2012), δίνεται ως εξής (βλ. Παράρτημα Α):

$$f_{h_i, h_j}(h_i, h_j | \rho) = \frac{(h_i h_j)^{\frac{m-1}{2}} \cdot e^{-\frac{h_i}{\beta_i(1-\rho)} - \frac{h_j}{\beta_j(1-\rho)}}}{(\beta_i \beta_j)^{\frac{m+1}{2}} \Gamma(m) (1-\rho) \rho^{\frac{m-1}{2}}} \cdot I_{m-1} \left(\frac{2\sqrt{\rho}}{1-\rho} \sqrt{\frac{h_i h_j}{\beta_i \beta_j}} \right), \text{ για } h_i, h_j \geq 0 \quad (5.14)$$

όπου η $I_{m-1}(\cdot)$ είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel πρώτου είδους και $m - 1$ τάξης, τα $\beta_i = \mathcal{E}[h_i]/m$ και $\beta_j = \mathcal{E}[h_j]/m$ είναι οι παράμετροι κλίμακας και το $\rho \in (0, 1)$ είναι ο συντελεστής συσχέτισης, ο οποίος δίνεται ως

$$\rho = \frac{Cov(h_i, h_j)}{\sqrt{Var(h_i)Var(h_j)}} \quad (5.15)$$

όπου το $Cov(\cdot, \cdot)$ είναι η συνάρτηση συνδιακύμανσης και το $Var(\cdot)$ είναι η συνάρτηση διακύμανσης. Είναι προφανές, ότι όταν $\rho \rightarrow 0$, η διδιάστατη pdf καταλήγει στο γινόμενο των δυο μονοδιάστατων pdf Γάμμα. Χωρίς βλάβη της γενικότητας, στην παρακάτω ανάλυση, θεωρούνται τυχαίες μεταβλητές με μοναδιαία μέση τιμή. Τέλος, αναφέρεται ότι τα στατιστικά χαρακτηριστικά των καναλιών διαλείψεων (π.χ. μέση ισχύς, δριμύτητα διαλείψεων και συντελεστής συσχέτισης) μπορούν να εκτιμηθούν με βάση κάποιες ερευνητικές εργασίες που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία (Ko & Alouini, 2003; Karasawa & Iwai, 2000).

5.4.2 Βέλτιστη Πολιτική Ελέγχου Ισχύος

Σύμφωνα με το μελετώμενο πρόβλημα, εξετάζεται η βελτιστοποίηση της ρυθμοαπόδοσης της δευτερεύουσας ζεύξης ενός underlay CR συστήματος για συγκεκριμένες απαιτήσεις QoS, για χωρικά συσχετισμένα κανάλια διαλείψεων Nakagami- m . Πιο συγκεκριμένα, μελετάται η μεγιστοποίηση της αποτελεσματικής χωρητικότητας της δευτερεύουσας ζεύξης, δεδομένου ότι εξασφαλίζονται οι απαιτήσεις του SU σε QoS και ταυτόχρονα δεν προκαλείται σημαντική παρεμβολή στον πρωτεύοντα

δέκτη. Στόχος είναι ο υπολογισμός της βέλτιστης πολιτικής ελέγχου ισχύος και της επίδρασης της χωρικής συσχέτισης των ζεύξεων. Υπενθυμίζεται ότι η έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας ενσωματώνει την καίρια μετρική των απαιτήσεων QoS σε καθυστέρηση, στην απόδοση του ρυθμού μετάδοσης μιας ασύρματης ζεύξης. Οι απαιτήσεις QoS προσδιορίζονται από των εκθέτη QoS θ . Για μια (χρονικά) ασυσχέτιστη, στάσιμη και εργοδική στοχαστική διαδικασία εξυπηρέτησης διακριτού χρόνου $\{R[n], n = 1, 2, \dots\}$, η αποτελεσματική χωρητικότητα (σε μονάδες bits/πλαίσιο) δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$E_c(\theta) = -\frac{1}{\theta} \ln \left(\mathcal{E} \left[e^{-\theta R[n]} \right] \right) \quad (5.16)$$

όπου η $\mathcal{E}[\cdot]$ είναι η συνάρτηση προσδοκώμενης τιμής. Για λόγους απλότητας, παραλείπεται ο δείκτης n στην ακόλουθη ανάλυση. Σημειώνεται ότι, η παράμετρος QoS θ είναι μια θετική σταθερά με μονάδες 1/bit, η οποία καταδεικνύει τον εκθετικά φθίνοντα ρυθμό της πιθανότητας παραβίασης της απαίτησης ποιότητας ως προς το όριο για το μήκος της ουράς του buffer ή το όριο της καθυστέρησης (βλ. Ενότητα 5.2). Μεγαλύτερες τιμές του θ καταδεικνύουν αυστηρότερες απαιτήσεις QoS, ενώ οι μικρότερες τιμές δηλώνουν πιο ευέλικτες (χαλαρές) απαιτήσεις QoS.

Πιο συγκεκριμένα, θεωρείται το πρόβλημα μεγιστοποίησης της αποτελεσματικής χωρητικότητας του SU, δεδομένου του περιορισμού να μην επηρεάζεται η επικοινωνία του PU. Δυο περιορισμοί ισχύος θεωρούνται για τη μετάδοση του SU. Ο πρώτος είναι περιορισμός μέγιστης στιγμιαίας ισχύος, ο οποίος εκφράζει τη μέγιστη τιμή εκπεμπόμενης ισχύος που μπορεί να παράγει ο ενισχυτής ισχύος RF του SU_{Tx} , και εκφράζεται ως εξής:

$$0 \leq P_s \leq P_{\max} \quad (5.17)$$

όπου P_s είναι η ισχύς μετάδοσης του SU. Ο δεύτερος περιορισμός είναι ένας περιορισμός μέσης ισχύος παρεμβολής, σύμφωνα με τον οποίο η μέση λαμβανόμενη ισχύς παρεμβολής στον PU_{Rx} πρέπει να είναι μικρότερη από το όριο παρεμβολής I_{\max} , έτσι ώστε να προστατεύεται η επικοινωνία του PU. Αυτός ο περιορισμός μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\mathcal{E} [h_{sp} P_s] \leq I_{\max} \quad (5.18)$$

Επιπρόσθετα, ο μέγιστος στιγμιαίος ρυθμός αξιόπιστης μετάδοσης δεδομένων της δευτερεύουσας ζεύξης κατά τη διάρκεια ενός πλαισίου T_f (σε μονάδες bits/πλαίσιο), ορίζεται ακολούθως:

$$R = T_f B \log_2 \left(1 + \frac{P_s h_s}{P_p h_{ps} + N_0 B} \right) \quad (5.19)$$

όπου το N_0 αντιστοιχεί στην πυκνότητα ισχύος του θορύβου.

Στην παρακάτω ανάλυση χρησιμοποιείται η κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα $E_{c,norm}$ (σε μονάδες bits/s/Hz), η οποία ορίζεται ως η αποτελεσματική χωρητικότητα διαιρεμένη με $T_f B$. Επίσης, ορίζεται ο κανονικοποιημένος εκθέτης QoS $a(\theta) = \theta T_f B / \ln 2$. Επομένως, η κανονικοποιημένη αποτελεσματική, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της χωρικής συσχέτισης των

καναλιών διαλείψεων, μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$E_{c,norm}(\theta, \rho) = -\frac{1}{a(\theta) \ln 2} \ln \left(\mathcal{E}_{\vec{h}|\rho} \left[\left(1 + \frac{P_s h_s}{P_p h_{ps} + N_0 B} \right)^{-a(\theta)} \right] \right) \quad (5.20)$$

όπου η $\mathcal{E}_{\vec{h}|\rho}[\cdot]$ είναι η συνάρτηση προσδοκώμενης τιμής για συγκεκριμένο συντελεστή συσχέτισης ρ , ως προς τα κέρδη ισχύος των καναλιών, τα οποία μπορούν να αναπαρασταθούν με το διάνυσμα $\vec{h} = [h_s, h_{sp}, h_{ps}]$. Συνεπώς, το μελετώμενο πρόβλημα μεγιστοποίησης, το οποίο δίνει τη βέλτιστη τιμή κανονικοποιημένης αποτελεσματικής χωρητικότητας $E_{c,norm}^{opt}$, μπορεί να διατυπωθεί μαθηματικά ως εξής:

$$E_{c,norm}^{opt}(\theta, \rho) = \left\{ \begin{array}{l} \max_{P_s} E_{c,norm}(\theta, \rho) \\ \text{s.t.} \quad 0 \leq P_s \leq P_{\max} \\ \mathcal{E}_{\vec{h}|\rho}[h_{sp} P_s] \leq I_{\max} \end{array} \right\} \quad (\text{Π.5.1})$$

Πρόταση 5.1. Το πρόβλημα μεγιστοποίησης (Π.5.1) έχει μοναδική λύση, η οποία δίνεται από τον ακόλουθο τύπο και χαρακτηρίζει τη βέλτιστη πολιτική ελέγχου ισχύος:

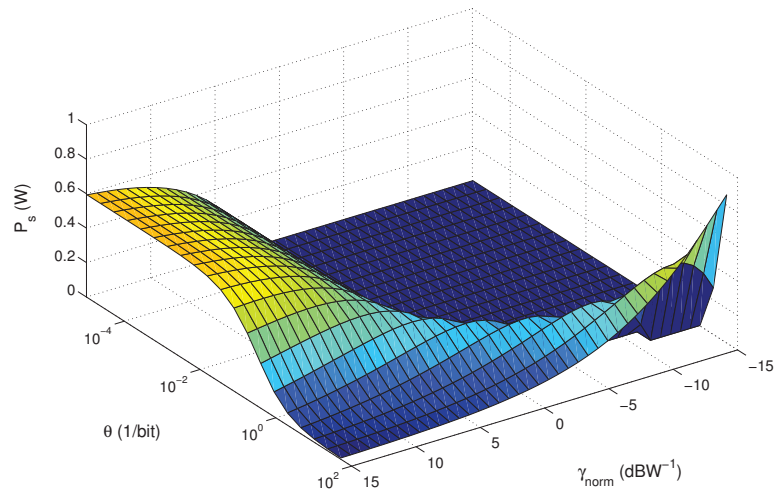
$$P_s^{opt}(\theta, h_{sp}, h_s, h_{ps}, \rho) = \left[\left(\frac{a(\theta)}{\lambda_0(\rho) h_{sp}} \right)^{\frac{1}{1+a(\theta)}} \cdot \left(\frac{P_p h_{ps} + N_0 B}{h_s} \right)^{\frac{a(\theta)}{1+a(\theta)}} - \frac{P_p h_{ps} + N_0 B}{h_s} \right]_0^{P_{\max}} \quad (5.21)$$

όπου το $\lambda_0(\rho)$ μπορεί να υπολογιστεί θύνοντας την ισότητα του περιορισμού μέσης παρεμβολής (5.18).

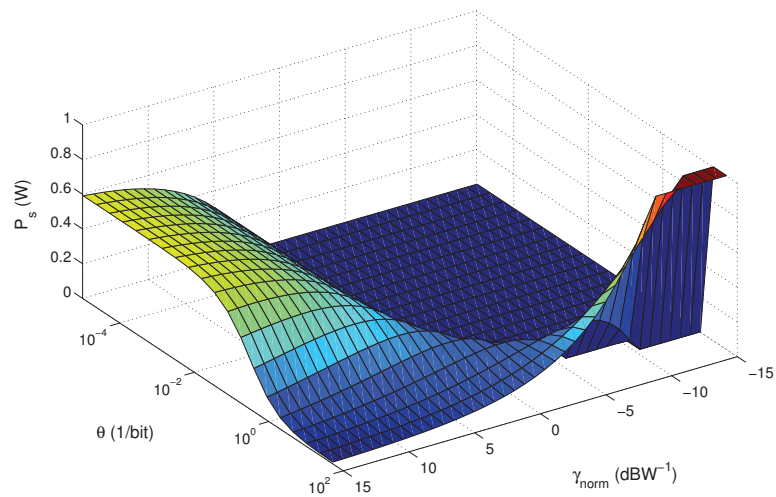
Η απόδειξη βρίσκεται στο Παράρτημα Β'.

Από την (5.21), μπορεί να αποδειχθεί όμοια με την (Tang & Zhang, 2007a), ότι για χαλαρές απαιτήσεις σε QoS ($\theta \rightarrow 0$), η βέλτιστη πολιτική ελέγχου ισχύος συγκλίνει σε μια προσέγγιση ελέγχου ισχύος water-filling, όπου ο SU_{TX} εκπέμπει με μεγαλύτερη ισχύ όταν ο κανονικοποιημένος ως προς την ισχύ μετάδοσης SINR, $\gamma_{norm} = \frac{h_s}{(P_p h_{ps} + N_0 B)}$, λαμβάνει υψηλές τιμές, ενώ εκπέμπει με χαμηλότερη ισχύ όταν το γ_{norm} λαμβάνει χαμηλές τιμές. Αναφέρεται ότι το συγκεκριμένο σχήμα βελτιστοποιεί την εργοδική χωρητικότητα της ζεύξης. Αντίθετα, για αυστηρές απαιτήσεις σε QoS ($\theta \rightarrow \infty$), η βέλτιστη πολιτική ελέγχου ισχύος συγκλίνει σε μια προσέγγιση ελέγχου ισχύος channel-inversion, όπου ο SU_{TX} εκπέμπει με υψηλότερες τιμές ισχύος όταν το γ_{norm} λαμβάνει μικρές τιμές, ενώ εκπέμπει με χαμηλότερη ισχύ όταν το γ_{norm} λαμβάνει μεγάλες τιμές, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται σταθερός SINR στο δέκτη και επομένως σταθερή χωρητικότητα. Όσον αφορά τις ενδιάμεσες τιμές του εκθέτη QoS θ , η πολιτική ελέγχου ισχύος τοποθετείται ανάμεσα στα σχήματα water-filling και channel-inversion. Η συμπεριφορά αυτή φαίνεται στο Σχήμα 5.5, όπου απεικονίζεται η βέλτιστη πολιτική ισχύος ως προς τον εκθέτη QoS και τον κανονικοποιημένο SINR. Αναλυτικότερα, το Σχήμα 5.5(α') παρουσιάζει την περίπτωση των ασυσχέτιστων καναλιών, ενώ τα Σχήματα 5.5(β') και 5.5(γ') απεικονίζουν την περίπτωση που τα κανάλια εμφανίζουν ισχυρή συσχέτιση, για την προσέγγιση συσχέτισης λήψης και εκπομπής, αντίστοιχα. Όπως παρατηρείται, η συμπεριφορά και για τις δυο προσεγγίσεις συσχέτισης είναι παρόμοια, με ελαφρώς εντονότερες μεταβολές στις ακραίες περιπτώσεις σε σχέση με τα ασυσχέτιστα κανάλια. Συνεπώς, η τιμή του λόγου γ_{norm} διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ανάλυση του συστήματος.

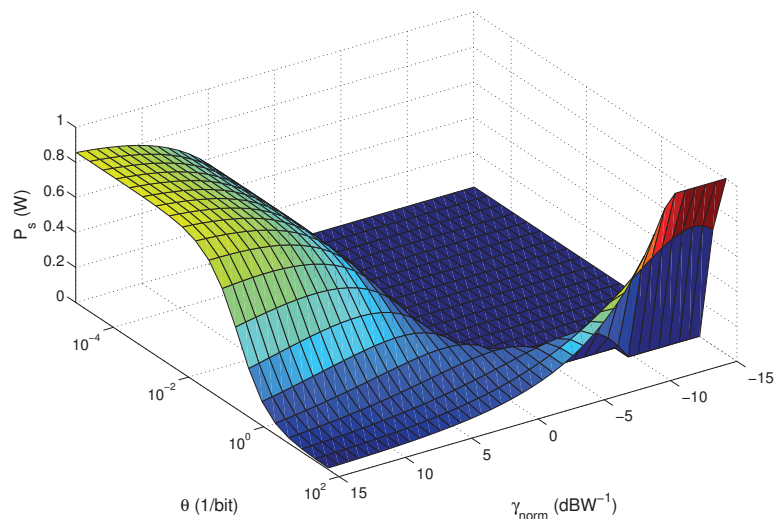
Στη συνέχεια, δεδομένης της βέλτιστης πολιτικής ελέγχου ισχύος της (5.21), η βέλτιστη αποτε-



(α) Για ασυσχέτιστα κανάλια



(β) Για την προσέγγιση συσχέτισης λήψης με $\rho \rightarrow \infty$



(γ) Για την προσέγγιση συσχέτισης εκπομπής με $\rho \rightarrow \infty$

Σχήμα 5.5: Εκπεμπόμενη ισχύς ως προς τον εκθέτη QoS και τον κανονικοποιημένο SINR.

λεσματική χωρητικότητα μπορεί να εκφραστεί, ως εξής:

$$E_{c,norm}^{opt}(\theta, \rho) = -\frac{1}{a(\theta) \ln 2} \ln \left\{ \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \left(1 + \frac{P_s^{opt}(\theta, h_{sp}, h_s, h_{ps}, \rho) h_s}{P_p h_{ps} + N_0 B} \right)^{-a(\theta)} \times \right. \\ \left. \times f_{h_s, h_{sp}, h_{ps}}(h_s, h_{sp}, h_{ps} | \rho) dh_{sp} dh_s dh_{ps} \right\} \quad (5.22)$$

Η τριδιάστατη pdf που παρουσιάζεται στην (5.22), δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση ανάλογα με το σενάριο συσχέτισης που θεωρείται κατά περίπτωση:

$$f_{\vec{h}}(\vec{h} | \rho) = f_{h_s, h_{sp}, h_{ps}}(h_s, h_{sp}, h_{ps} | \rho) = \begin{cases} f_{h_s, h_{sp}}(h_s, h_{sp} | \rho) \cdot f_{h_{ps}}(h_{ps}), & \text{για συσχέτιση λήψης} \\ f_{h_s, h_{ps}}(h_s, h_{ps} | \rho) \cdot f_{h_{sp}}(h_{sp}), & \text{για συσχέτιση εκπομπής} \end{cases} \quad (5.23)$$

Επιπρόσθετα, η ισότητα του περιορισμού μέσης παρεμβολής της (5.18) που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του $\lambda_0(\rho)$ μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

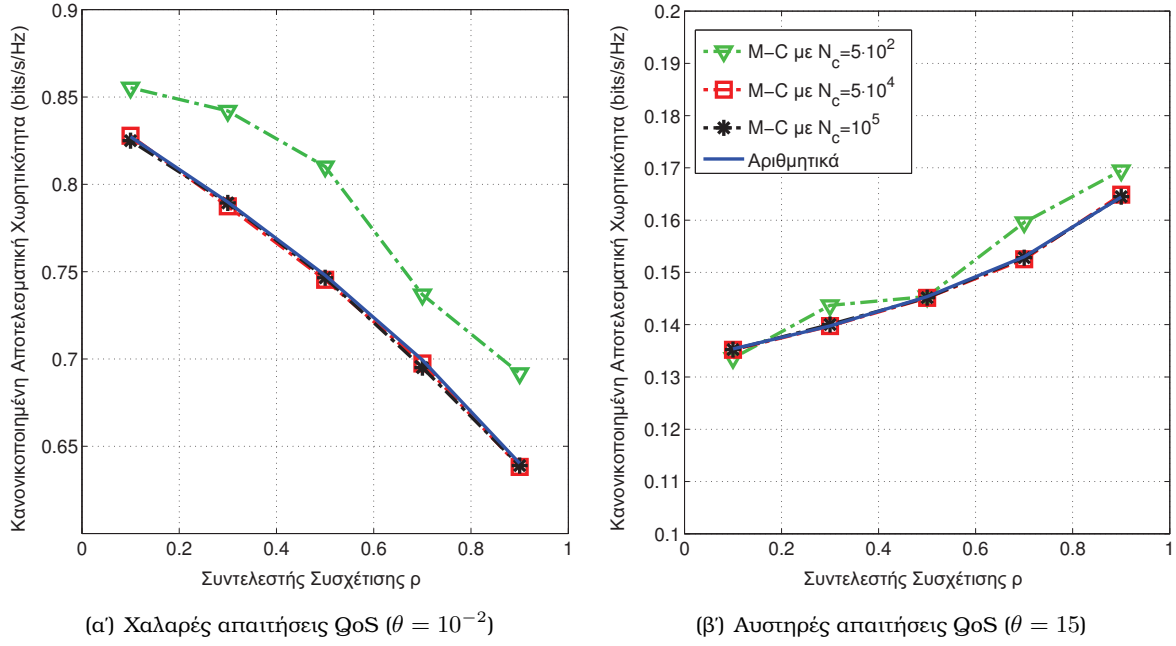
$$\int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty h_{sp} \cdot P_s^{opt}(\theta, h_{sp}, h_s, h_{ps}, \rho) \cdot f_{h_s, h_{sp}, h_{ps}}(h_s, h_{sp}, h_{ps} | \rho) dh_{sp} dh_s dh_{ps} = I_{max} \quad (5.24)$$

όπου η τριδιάστατη pdf εξαρτάται από το θεωρούμενο μοντέλο συσχέτισης σύμφωνα με την (5.23).

5.4.3 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων και Σχολιασμός

Η απόδοση του προτεινόμενου μηχανισμού αξιολογήθηκε μέσω εκτενών προσομοιώσεων για την προσέγγιση συσχέτισης λήψης PU-SU και την προσέγγιση συσχέτισης εκπομπής PU-SU (βλ. Σχήμα 5.4), με χρήση του MatLab και του Mathematica. Στη συγκεκριμένη υποενοότητα παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Αναλυτικότερα, περιγράφονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για διαφορετικές παραμέτρους συστήματος, έτσι ώστε να παρουσιαστούν οι επιδράσεις τους στη βέλτιστη αποτελεσματική χωρητικότητα του SU και στη μέση κατανάλωση ισχύος στον SU_{Tx} . Χωρίς βλάβη της γενικότητας, θεωρείται ότι $N_0 B = 10^{-2}$ W, $T_f B = 1$ και $P_{max} = P_p = 1$ W. Τα αποτελέσματα παράγονται μέσω Monte-Carlo (M-C) προσομοιώσεων για $5 \cdot 10^4$ στιγμιότυπα καναλιών διαλείψεων Nakagami- m . Για σκοπούς επαλήθευσης των αποτελεσμάτων, το Σχήμα 5.6 απεικονίζει την υπολογιζόμενη αποτελεσματική χωρητικότητα, μέσω προσομοιώσεων για διάφορες τιμές αριθμού στιγμιότυπων καναλιών (N_c), καθώς και μέσω αριθμητικών υπολογισμών, θεωρώντας διαφορετικές τιμές για το ρ και το θ . Σημειώνεται ότι το Σχήμα 5.6 παρουσιάζει τα αποτελέσματα για το μοντέλο συσχέτισης λήψης PU-SU, ωστόσο παρόμοια αποτελέσματα παράγονται και για την περίπτωση της συσχέτισης εκπομπής PU-SU. Σε αυτό το σχήμα, θεωρείται $m = 1$ (διαλείψεις Rayleigh) και ότι το όριο μέσης παρεμβολής I_{max} είναι -9 dBW. Όπως παρατηρείται, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για $5 \cdot 10^4$ και 10^5 στιγμιότυπα καναλιών είναι σχεδόν ίδια με τα αριθμητικά αποτελέσματα. Σημειώνεται ότι η συμπεριφορά της κανονικοποιημένης αποτελεσματικής χωρητικότητας αναλύεται παρακάτω.

Επιπρόσθετα, για να αξιολογηθεί η επίδραση της συσχέτισης στην αποτελεσματική χωρητικότητα για συγκεκριμένες απαιτήσεις QoS θ , ορίζεται η μετρική CIF_{EC} (Correlation Impact Factor on



Σχήμα 5.6: Επαλήθευση των αποτελεσμάτων προσομοιώσεων.

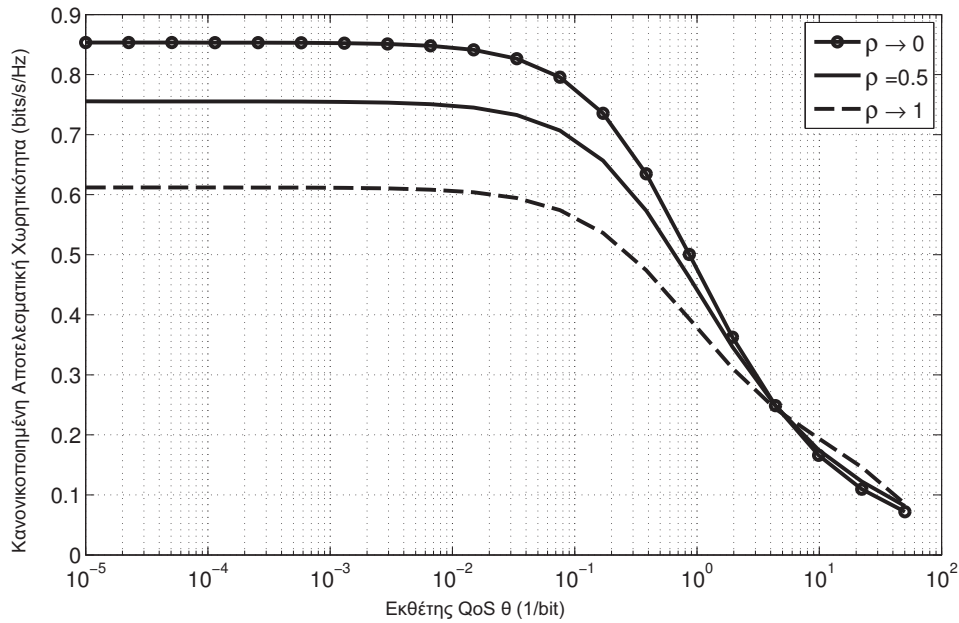
Effective Capacity), η οποία περιγράφεται ως το ποσοστό του κέρδους σε αποτελεσματική χωρητικότητα που επιτυγχάνεται, συγκρίνοντας την αποτελεσματική χωρητικότητα που προκύπτει όταν τα κανάλια θεωρούνται χωρικά συσχετισμένα ($E_{c,norm}^{w/-}$) και την αποτελεσματική χωρητικότητα θεωρώντας ασυσχετίστα κανάλια ($E_{c,norm}^{w/o}$). Η μετρική αυτή μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$CIF_{EC}(\rho, \theta) = \left(\frac{E_{c,norm}^{w/-}(\theta, \rho) - E_{c,norm}^{w/o}(\theta)}{E_{c,norm}^{w/o}(\theta)} \right) \times 100\% \quad (5.25)$$

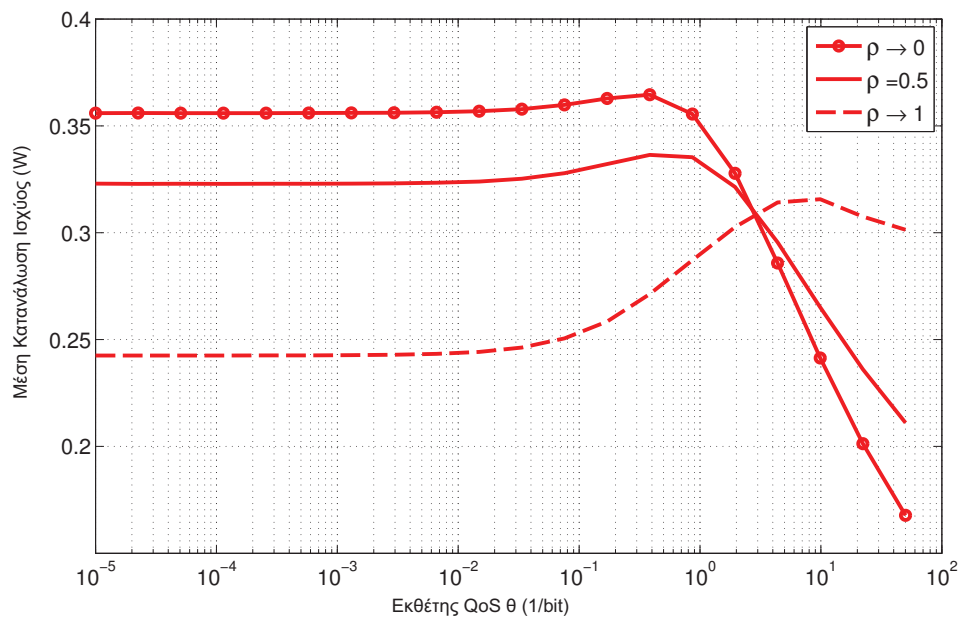
Η μετρική CIF_{EC} λαμβάνει αρνητικές τιμές στην περίπτωση που η συσχέτιση καναλιών συνεπάγει υποβάθμιση στην αποτελεσματική χωρητικότητα, ενώ λαμβάνει θετικές τιμές στην περίπτωση που η συσχέτιση προκαλεί βελτίωση στην αποτελεσματική χωρητικότητα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα δυο μοντέλα συσχέτισης.

Συσχέτιση λήψης PU-SU

Αρχικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για το μοντέλο συσχέτισης λήψης PU-SU, όπου υπενθυμίζεται ότι τα κανάλια h_s και h_{sp} είναι συσχετισμένα (βλ. Σχήμα 5.4(α)). Το Σχήμα 5.7 απεικονίζει την κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα του SU ως προς τον εκθέτη QoS για διαφορετικές τιμές του βαθμού συσχέτισης των καναλιών, ενώ το Σχήμα 5.8 παρουσιάζει την αντίστοιχη μέση κατανάλωση ισχύος μετάδοσης στον SU_{Tx} . Και στα δυο σχήματα θεωρείται $m = 1$ (διαλείψεις Rayleigh) και ότι το όριο μέσης παρεμβολής I_{max} είναι -9 dBW. Μια πρώτη παρατήρηση από το Σχήμα 5.7 είναι ότι η αποτελεσματική χωρητικότητα φθίνει όσο αυξάνονται οι τιμές του εκθέτη QoS, ανεξάρτητα από το βαθμό συσχέτισης, κάτι το οποίο οφείλεται στη γενικότερη συμπεριφορά της συνάρτησης της αποτελεσματικής χωρητικότητας (βλ. Σχήμα 5.3). Πιο συγκεκριμένα, αυτό σημαίνει ότι εάν ένα σύστημα μπορεί να ανεχθεί μεγάλες καθυστερήσεις ($\theta \rightarrow 0$), το



Σχήμα 5.7: Κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα του SU ως προς τον εκθέτη QoS για διαφορετικούς συντελεστές συσχέτισης (συσχέτιση λήψης).



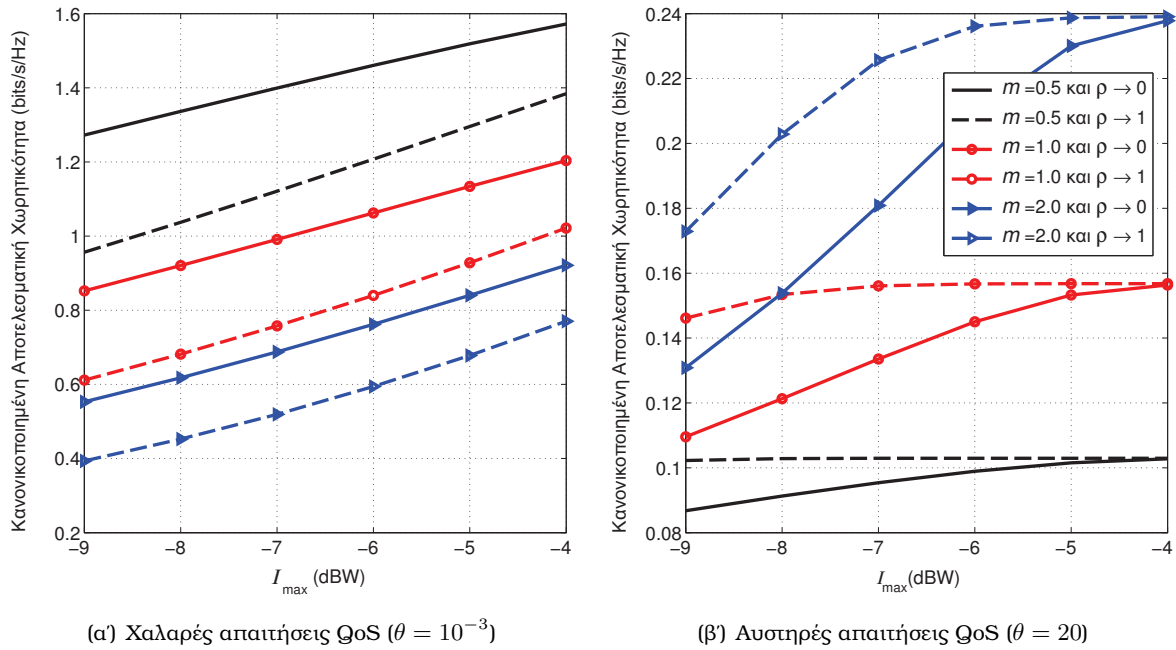
Σχήμα 5.8: Μέση κατανάλωση ισχύος στον SU_{Tx} ως προς τον εκθέτη QoS για διαφορετικούς συντελεστές συσχέτισης (συσχέτιση λήψης).

συγκεκριμένο κανάλι μπορεί να υποστηρίξει μεγαλύτερες τιμές σταθερού ρυθμού αφίξεων, δηλαδή μεγαλύτερη αποτελεσματική χωρητικότητα, κάτι το οποίο δεν είναι εφικτό για αυστηρότερους περιορισμούς καθυστέρησης ($\theta \rightarrow \infty$), ακόμα και αν υιοθετηθεί η βέλτιστη πολιτική ελέγχου ισχύος.

Επιπρόσθετα, από τα Σχήματα 5.7 και 5.8, παρατηρείται ότι η κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα και η μέση κατανάλωση ισχύος επηρεάζονται σημαντικά από τον συντελεστή συσχέτισης, με διαφορετική συμπεριφορά μεταξύ χαλαρών και αυστηρών απαιτήσεων QoS. Αναλυ-

τικότερα, για χαλαρές απαιτήσεις QoS παρατηρείται ότι η αύξηση του συντελεστή συσχέτισης οδηγεί σε απώλειες αποτελεσματικής χωρητικότητας και μείωση της μέσης κατανάλωσης ισχύος. Από την άλλη μεριά, η αντίστροφη συμπεριφορά παρατηρείται και για τις δυο συναρτήσεις όταν πρέπει να ικανοποιηθούν αυστηρές απαιτήσεις QoS. Αυτές οι παρατηρήσεις μπορούν να αιτιολογηθούν από τη σχέση των συσχετισμένων καναλιών (h_s, h_{sp}) στο πρόβλημα βελτιστοποίησης (Π.5.1) και τη βέλτιστη πολιτική ελέγχου ισχύος (5.21). Πιο συγκεκριμένα, υποθέτοντας ότι το κανάλι h_{ps} μεταβάλλεται ανεξάρτητα, η βελτίωση των συνθηκών του καναλιού της δευτερεύουσας ζεύξης (h_s) οδηγεί σε βελτίωση του λόγου γ_{norm} , το οποίο είναι ωφέλιμο για την αποτελεσματική χωρητικότητα. Από την άλλη μεριά, η βελτίωση του καναλιού παρεμβολής (h_{sp}) οδηγεί στην υποβάθμιση της απόδοσης του SU λόγω του περιορισμού παρεμβολής. Επιπλέον, σημειώνεται ότι η αύξηση του βαθμού συσχέτισης μεταξύ των δυο καναλιών, ουσιαστικά αυξάνει την πιθανότητα τα κανάλια να λαμβάνουν παρόμοιες τιμές κέρδους. Όπως προαναφέρθηκε, για μικρές τιμές θ , η βέλτιστη πολιτική ισχύος συγκλίνει σε μια προσέγγιση water-filling, όπου ο SU εκπέμπει με υψηλότερη ισχύ όταν το γ_{norm} παίρνει μεγάλες τιμές, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η αποτελεσματική χωρητικότητα. Ταυτόχρονα όμως, υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα το h_{sp} να παίρνει επίσης μεγάλες τιμές για αυξανόμενες τιμές του ρ , περιορίζοντας την ισχύ μετάδοσης του SU λόγω του περιορισμού παρεμβολής. Το παραπάνω οδηγεί στην υποβάθμιση της αποτελεσματικής χωρητικότητας και της μέσης κατανάλωσης ισχύος. Αντίθετα, για μεγάλες τιμές του θ , η βέλτιστη πολιτική ισχύος συγκλίνει σε μια προσέγγιση channel-inversion, σύμφωνα με την οποία ο SU εκπέμπει με μεγαλύτερη ισχύ όταν το γ_{norm} λαμβάνει μικρές τιμές, έχοντας ταυτόχρονα πιο ελαστικό περιορισμό ισχύος όσο αυξάνεται ο συντελεστής συσχέτισης, λόγω του ότι το h_{sp} έχει μεγαλύτερες πιθανότητες να λάβει επίσης μικρές τιμές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση της μέσης κατανάλωσης ισχύος και της αποτελεσματικής χωρητικότητας. Ωστόσο, η βελτίωση της αποτελεσματικής χωρητικότητας σε απόλυτες τιμές είναι σχετικά μικρή εξαιτίας των μικρών τιμών που λαμβάνει για μεγάλα θ .

Το Σχήμα 5.9 παρουσιάζει την επίδραση του συντελεστή συσχέτισης στην κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα για διάφορες τιμές του ορίου μέσης παρεμβολής και της δριμύτητας διαλείψεων, θεωρώντας χαλαρές και αυστηρές απαιτήσεις QoS (Σχήμα 5.9(α') και Σχήμα 5.9(β') αντίστοιχα). Όπως έχει αναλυθεί προηγουμένως, για αύξηση του ρ , η αποτελεσματική χωρητικότητα μειώνεται δεδομένου μικρού θ , ενώ αυξάνεται δεδομένου μεγάλου θ . Επιπρόσθετα, η αποτελεσματική χωρητικότητα αυξάνεται όσο αυξάνεται το I_{max} , ασχέτως από τον βαθμό συσχέτισης, επειδή ο περιορισμός παρεμβολής γίνεται πιο χαλαρός και συνεπώς ο SU μπορεί να εκπέμπει με υψηλότερη ισχύ. Η επίδραση της συσχέτισης εξασθενεί ελαφρώς για μεγαλύτερες τιμές του I_{max} , αφού ένα από τα συσχετισμένα κανάλια εμφανίζεται στον περιορισμό παρεμβολής, ο οποίος γίνεται λιγότερο αυστηρός. Τέλος, σχετικά με την επίδραση της δριμύτητας των διαλείψεων, παρατηρείται ότι καθώς το m αυξάνεται (λιγότερο ισχυρές πολυδιαδρομικές συνθήκες), η αποτελεσματική χωρητικότητα μειώνεται για χαλαρές απαιτήσεις QoS, ενώ αυξάνεται για αυστηρές απαιτήσεις QoS, ασχέτως από τον συντελεστή συσχέτισης ρ . Αυτές οι παρατηρήσεις μπορούν να αιτιολογηθούν, λαμβάνοντας υπόψη ότι για ασυσχέιστα κανάλια, η αποτελεσματική χωρητικότητα αυξάνεται όσο αυξάνεται η παράμετρος Nakagami του καναλιού h_s , ενώ μειώνεται όσο αυξάνεται η παράμετρος Nakagami του καναλιού h_{sp} . Επομένως, σύμφωνα με την από κοινού pdf της (5.14), όπου εμφανίζεται η κοινή παράμετρος διαλείψεων m , θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι συνθήκες και των δύο καναλιών. Πιο συγκεκριμένα, από το πρόβλημα βελτιστοποίησης (Π.5.1) και τη βέλτιστη πολιτική ελέγχου ισχύος

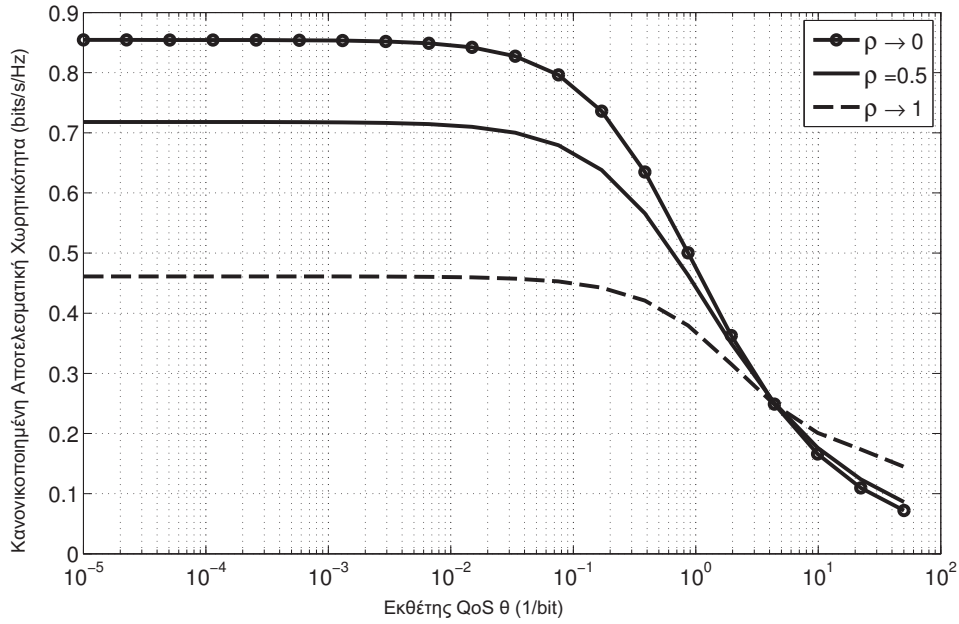


Σχήμα 5.9: Κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα του SU ως προς το I_{max} για διαφορετικούς συντελεστές συσχέτισης και παραμέτρους m (συσχέτιση λήψης).

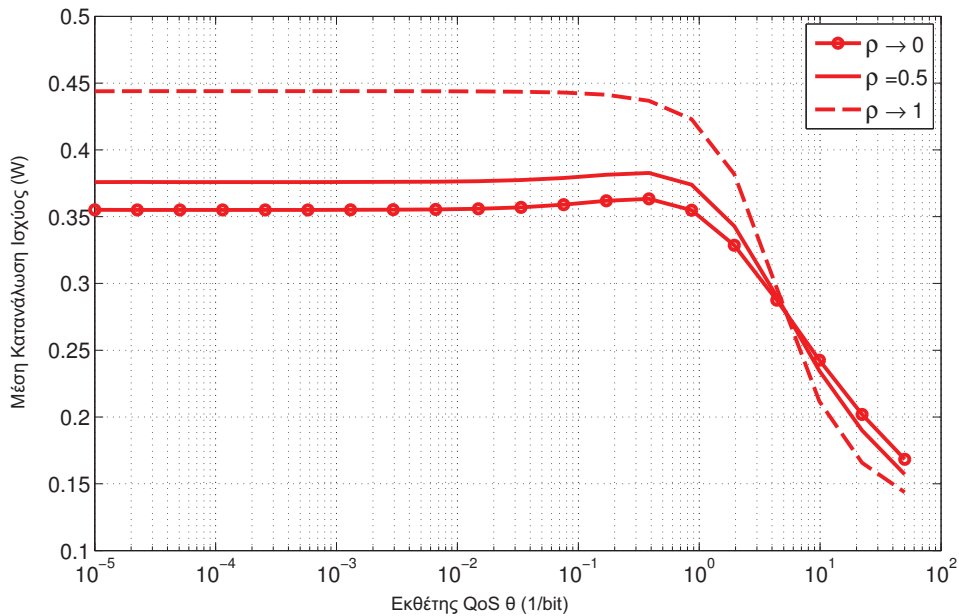
της (5.21), παρατηρείται ότι για μικρές τιμές του θ , η επίδραση του καναλιού h_{sp} είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την επίδραση του καναλιού h_s , οδηγώντας σε φθίνουσα αποτελεσματική χωρητικότητα για μεγαλύτερες τιμές της κοινής παραμέτρου Nakagami. Αντίθετα, η επίδραση του καναλιού h_s είναι ισχυρότερη για μεγάλες τιμές του θ , όταν η ανοχή σε καθυστέρηση είναι αυστηρότερη.

Συσχέτιση εκπομπής PU-SU

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου συσχέτισης εκπομπής PU-SU, σύμφωνα με το οποίο τα κανάλια h_s και h_{ps} είναι συσχετισμένα (βλ. Σχήμα 5.4(β)). Τα Σχήματα 5.10 και 5.11 απεικονίζουν, αντίστοιχα την κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα του SU και τη μέση κατανάλωση ισχύος μετάδοσης στον SU_{Tx} ως προς τον εκθέτη QoS για διαφορετικές τιμές του βαθμού συσχέτισης. Ομοίως με το προηγούμενο μοντέλο, θεωρείται το $m = 1$ και ότι το όριο μέσης παρεμβολής I_{max} είναι -9 dBW. Όπως παρατηρείται από τα Σχήματα 5.10 και 5.11, ο συντελεστής συσχέτισης επηρεάζει σημαντικά την αποτελεσματική χωρητικότητα και τη μέση κατανάλωση ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, φαίνεται ότι για χαλαρές απαιτήσεις QoS, η αύξηση του βαθμού συσχέτισης οδηγεί σε μείωση της αποτελεσματικής χωρητικότητας και σε αύξηση της μέσης κατανάλωσης ισχύος. Η αντίθετη συμπεριφορά παρατηρείται για αυστηρές απαιτήσεις QoS και για τις δυο συναρτήσεις. Οι παρατηρήσεις αυτές μπορούν να αιτιολογηθούν από τη σχέση που εμφανίζουν τα συσχετισμένα κανάλια στη συνάρτηση της αποτελεσματικής χωρητικότητας, όπου και τα δυο κανάλια εμφανίζονται στον λόγο γ_{norm} . Πιο συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται ο βαθμός συσχέτισης, υπάρχει πολύ μεγάλη πιθανότητα το γ_{norm} να πάρει τιμές κοντά στη μονάδα, λόγω του ότι μεγαλώνει η πιθανότητα τα συσχετισμένα κανάλια να πάρουν παρόμοιες τιμές. Ταυτόχρονα όμως, μειώνεται η πιθανότητα το γ_{norm} να λαμβάνει είτε χαμηλότερες είτε υψηλότερες τιμές. Συνεπώς, για μικρές τιμές του θ , όπου η πολιτική ισχύος συγκλίνει σε μια προσέγγιση water-filling, η μέση



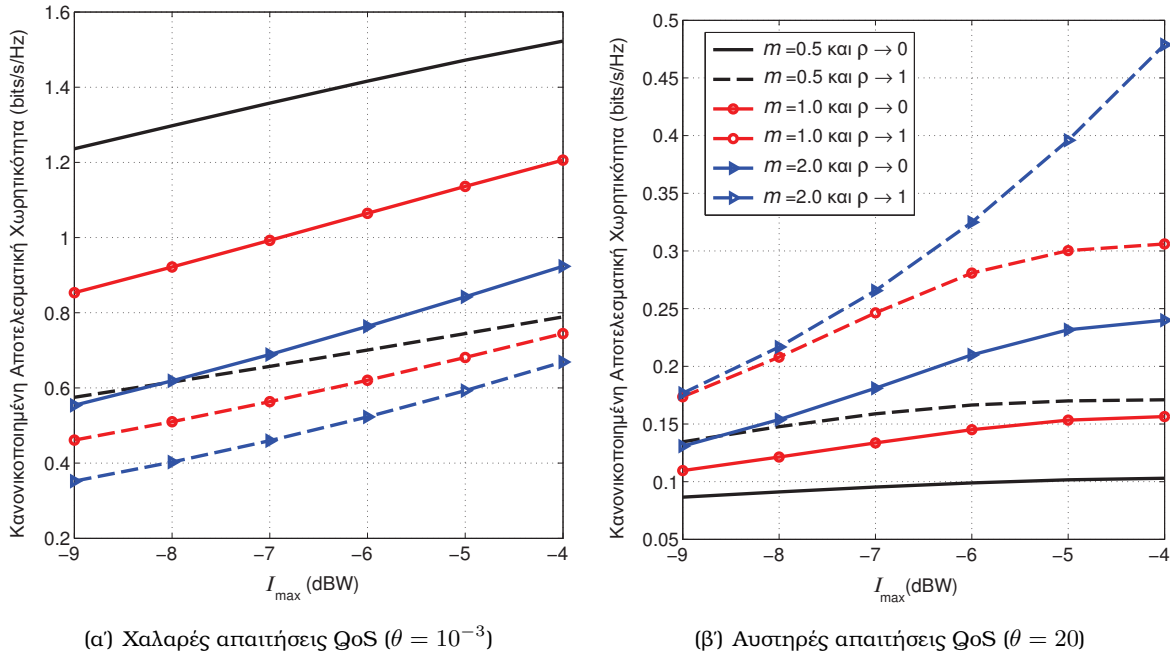
Σχήμα 5.10: Κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα του SU ως προς τον εκθέτη QoS για διαφορετικούς συντελεστές συσχέτισης (συσχέτιση εκπομπής).



Σχήμα 5.11: Μέση κατανάλωση ισχύος στον SU_{Tx} ως προς τον εκθέτη QoS για διαφορετικούς συντελεστές συσχέτισης (συσχέτιση εκπομπής).

κατανάλωση ισχύος αυξάνεται όσο αυξάνεται το ρ . Ωστόσο, εξαιτίας του ότι το γινόμενο της ισχύος και του λόγου γ_{norm} εμφανίζεται στον τύπο της αποτελεσματικής χωρητικότητας, ο μεγαλύτερος βαθμός συσχέτισης οδηγεί τελικά σε μείωση της αποτελεσματικής χωρητικότητας. Αντίθετα, η αντίστροφη συμπεριφορά, αλλά σε μικρότερο βαθμό, παρατηρείται για μεγάλες τιμές του θ , για την αποτελεσματική χωρητικότητα και για τη μέση κατανάλωση ισχύος.

Επιπρόσθετα, το Σχήμα 5.12 παρουσιάζει την επίδραση της συσχέτισης στην αποτελεσματική



Σχήμα 5.12: Κανονικοποιημένη αποτελεσματική χωρητικότητα του SU ως προς το I_{max} για διαφορετικούς συντελεστές συσχέτισης και παραμέτρους m (συσχέτιση εκπομπής).

χωρητικότητα για διάφορες τιμές του ορίου παρεμβολής και της δριμύτητας των διαλείψεων, θεωρώντας χαλαρές και αυστηρές απαιτήσεις QoS (Σχήμα 5.12(α') και Σχήμα 5.12(β'), αντίστοιχα). Η γενικότερη συμπεριφορά της αποτελεσματικής χωρητικότητας είναι παρόμοια με τη συμπεριφορά στο Σχήμα 5.9, και για τις δυο περιπτώσεις απαιτήσεων QoS. Ωστόσο, παρατηρείται ότι η επίδραση της συσχέτισης στο συγκεκριμένο μοντέλο είναι ισχυρότερη συγκριτικά με το μοντέλο συσχέτισης λήψης. Επιπρόσθετα, στη συγκεκριμένη περίπτωση, η επίδραση της συσχέτισης ενισχύεται ελαφρώς όσο αυξάνεται το όριο παρεμβολής, αφού κανένα από τα συσχετισμένα κανάλια δεν εμφανίζεται στον περιορισμό, ο οποίος όμως γίνεται πιο χαλαρός για τον πομπό.

Τέλος, ο Πίνακας 5.1 συγκρίνει τα δυο μοντέλα συσχέτισης σε όρους CIF_{EC} , για διάφορες τιμές του συντελεστή συσχέτισης, θεωρώντας χαλαρές και αυστηρές απαιτήσεις QoS. Όπως φαίνεται, η αποτελεσματική χωρητικότητα επηρεάζεται σημαντικά από τον συντελεστή συσχέτισης και για τα δυο μοντέλα. Αναλυτικότερα, όσο αυξάνεται ο συντελεστής συσχέτισης, μειώνεται η αποτελεσματική χωρητικότητα για χαλαρές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας, ενώ αυξάνεται για αυστηρές απαιτήσεις ποιότητας. Επιπρόσθετα, παρατηρείται ότι οι απόλυτες τιμές της μετρικής CIF_{EC} είναι μεγαλύτερες για το μοντέλο συσχέτισης εκπομπής σε σύγκριση με το μοντέλο συσχέτισης λήψης. Αυτή η παρατήρηση επαληθεύει τη σημαντικότητα της παρεμβολής που προκαλείται από τον PU, ειδικότερα στην περίπτωση όπου το κανάλι παρεμβολής h_{ps} είναι συσχετισμένο με το κανάλι του δευτερεύοντα χρήστη h_s .

Συμπερασματικά, ο προτεινόμενος μηχανισμός ελέγχου ισχύος καταφέρνει να ενσωματώσει την κρίσιμη μετρική της QoS και της χωρικής συσχέτισης των καναλιών διαλείψεων και να σχεδιάσει με ρεαλιστικό τρόπο αποδοτικές ζεύξεις σε underlay γνωστικά συστήματα. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν τη σημαντικότητα των παραπάνω παραμέτρων παρουσιάζοντας την επίδραση τους στην απόδοση του συστήματος, σε όρους αποτελεσματικής χωρητικότητας και μέσης κατανάλωσης ισχύος.

Πίνακας 5.1: Σύγκριση μοντέλων συσχέτισης για $m = 1$ και $I_{\max} = -9$ dBW.

	Χαλαρές απαιτήσεις QoS ($\theta = 10^{-3}$)			Αυστηρές απαιτήσεις QoS ($\theta = 20$)		
	$\rho \rightarrow 0$	$\rho = 0.5$	$\rho \rightarrow 1$	$\rho \rightarrow 0$	$\rho = 0.5$	$\rho \rightarrow 1$
CIF_{EC} συσχέτισης Λήψης PU-SU	0.0%	-11.5%	-28.3%	0.0%	11.7%	33.4%
CIF_{EC} συσχέτισης εκπομπής PU-SU	0.0%	-15.9%	-46.0%	0.0%	13.1%	58.3%

5.5 Προτεινόμενος Μηχανισμός Διαμοιρασμού Φάσματος για Διασφάλιση QoS σε Γνωστικά Δίκτυα

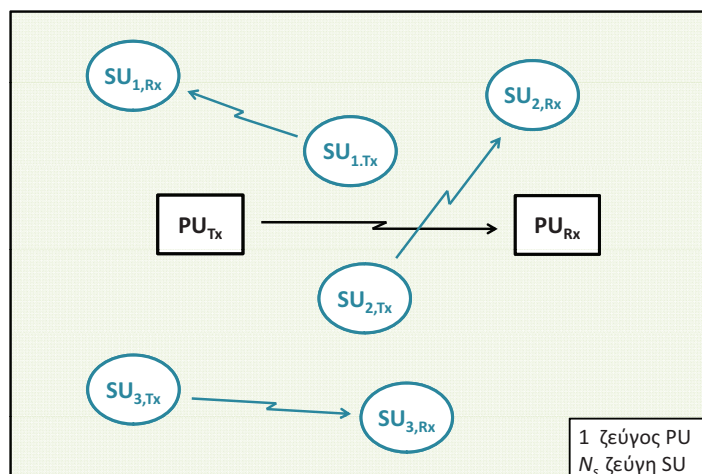
Ένας πιθανός τρόπος υλοποίησης των γνωστικών συστημάτων είναι η interweave προσέγγιση (βλ. Κεφάλαιο 2). Σύμφωνα με αυτή, οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους μόνο όταν (και όπου) οι πρωτεύοντες χρήστες «απουσιάζουν», δηλαδή όταν δεν χρησιμοποιούν το φάσμα τους. Για να λειτουργήσει αυτό, προϋποτίθεται η ορθή ανίχνευση των φασματικών κενών. Ωστόσο, δεδομένης της μεταβαλλόμενης φύσης του χρησιμοποιούμενου (και κατ' επέκταση του διαθέσιμου) φάσματος, καθώς και των απαιτήσεων των χρηστών σε QoS, τα συστήματα CRs εμφανίζουν πολλές προκλήσεις (Akyildiz et al., 2008). Γι' αυτό το λόγο, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη αποδοτικών σχημάτων διαχείρισης του φάσματος (εύρους ζώνης), έτσι ώστε να είναι δυνατός ο διαμοιρασμός του μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών. Στις ερευνητικές εργασίες (Tragos et al., 2013; Masonta et al., 2013) παρουσιάστηκαν πρόσφατες βιβλιογραφικές επισκοπήσεις σχετικά με την ανάθεση φάσματος και τα προβλήματα απόφασης φάσματος στα CRs, μαζί με τις κύριες ερευνητικές προκλήσεις.

Η θεωρία παιγνίων, καθώς και άλλα οικονομικοστραφή εργαλεία έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς για τη μελέτη προβλημάτων διαχείρισης πόρων στα γνωστικά δίκτυα (K. R. Liu & Wang, 2010; Bourdena et al., 2013). Πιο συγκεκριμένα, στην ερευνητική εργασία (Zayen et al., 2012) προτάθηκε ένα μη συνεργατικό παίγνιο ελέγχου ισχύος, το οποίο βελτιστοποιεί τη χωρητικότητα των SUs αλλά και την προστασία των PUs σε ένα underlay γνωστικό σύστημα. Επιπρόσθετα, ένα βέλτιστο μοντέλο διαμοιρασμού, το οποίο βασίζεται στον μηχανισμό Vickrey-Clarke-Groves, παρουσιάστηκε στην (El Ferkouss & Ajib, 2012) για ένα underlay σύστημα. Αυτό το μοντέλο έχει ως στόχο να διαμοιράσει το διαθέσιμο φάσμα μεταξύ των SUs, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης, δεδομένου ενός ελάχιστου ρυθμού μετάδοσης για τους PUs και τους SUs. Στην (Hong & Garcia, 2010), μελετήθηκε το πρόβλημα της τιμολόγησης του φάσματος σε ένα ένα underlay γνωστικό σύστημα με πολλαπλούς SUs και PUs. Αναλυτικότερα, οι συγγραφείς δημιούργησαν μια αγορά φάσματος για τους SUs, η οποία στη συνέχεια μετασχηματίστηκε σε αγορά παρεμβολής, όπου οι PUs χρεώνουν τους SUs για τη χρήση του φάσματος και οι οποίοι ανταγωνίζονται μεταξύ τους για την πρόσβαση. Επιπλέον, το πρόβλημα του διαμοιρασμού φάσματος ανάμεσα σε έναν PU και πολλούς SUs μελετήθηκε στις εργασίες (X. Wang et al., 2010; Niyato & Hossain, 2008), όπου οι προτεινόμενες λύσεις είναι εμπνευσμένες από τη θεωρία δημοπρασιών και τη θεωρία των ολιγοπωλιακών αγορών, αντίστοιχα. Τέλος, η θεωρία των ανισοτήτων μεταβολών (VI), έχει αρχίσει πολύ πρόσφατα να κεντρίζει το ενδιαφέρον των ερευνητών που ασχολούνται με τα γνωστικά δίκτυα (Pang et al., 2010). Πιο συγκεκριμένα, οι συγγραφείς στην (Pang et al., 2010) πρότειναν ένα καταναμημένο

παίγνιο ελέγχου ισχύος, όπου οι SUs ανταγωνίζονται μεταξύ τους, έτσι ώστε να μεγιστοποιήσουν το ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας, δεδομένων περιορισμών ισχύος και παρεμβολής.

Ωστόσο, οι ερευνητικές εργασίες που έχουν προταθεί σχετικά με το διαμοιρασμό φάσματος σε γνωστικά συστήματα, δεν λαμβάνουν υπόψη την παροχή εγγυήσεων QoS. Εντούτοις, δεδομένου ότι οι διαφορετικοί χρήστες έχουν διαφορετικές απαιτήσεις QoS, δηλαδή έχουν διαφορετικά επίπεδα ανοχής σε καθυστέρηση, είναι πολύ σημαντικό να ενσωματωθεί η μετρική παροχής QoS στην ανάλυση σχημάτων διαχείρισης πόρων σε CR. Προς αυτή την κατεύθυνση, η ενότητα αυτή μελετά το πρόβλημα του αποδοτικού διαμοιρασμού φάσματος μεταξύ πολλαπλών SUs με διαφορετικές απαιτήσεις QoS, σε ένα interweave γνωστικό σύστημα. Αναλυτικότερα, προτείνεται ένας καινοτόμος μηχανισμός διαμοιρασμού του αχρησιμοποίητου αδειοδοτημένου φάσματος του πρωτεύοντα χρήστη («φασματικές τρύπες») ανάμεσα στους δευτερεύοντες χρήστες, οι οποίοι λειτουργούν σε ένα περιβάλλον διαλείψεων. Το πρόβλημα διαμοιρασμού φάσματος για διασφάλιση της QoS μεταξύ των SUs διατυπώνεται ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο σύμφωνα με το οποίο ο κάθε SU ανταγωνίζεται με τους υπόλοιπους SUs για τους φασματικούς πόρους, με στόχο τη βελτιστοποίηση της ατομικής συνάρτησης χρησιμότητας του, δεδομένου του συζευγμένου (από κοινού) περιορισμού του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Ως συνάρτηση χρησιμότητας του εκάστοτε SU, θεωρείται η αποτελεσματική χωρητικότητα του. Εξαιτίας της σύζευξης του περιορισμού, το συγκεκριμένο παίγνιο αποτελεί ένα γενικευμένο πρόβλημα ισορροπίας Nash (GNEP), το οποίο είναι δύσκολο να επιλυθεί χρησιμοποιώντας τις κλασικές προσεγγίσεις της θεωρίας παιγνίων. Γι' αυτό το λόγο, προτείνεται μια καινοτόμα λύση η οποία βασίζεται στη θεωρία των ανισοτήτων μεταβολών (βλ. Κεφάλαιο 3). Η μοναδικότητα της λύσης μεταβολών (variational solution) αποδεικνύεται, ενώ προτείνεται ένα καταναμημένος επαναληπτικός αλγόριθμος για την εύρεση της. Ο προτεινόμενος καταναμημένος μηχανισμός αξιολογείται μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων, έτσι ώστε να εξεταστεί ο τρόπος που επηρεάζουν οι διαφορετικές απαιτήσεις QoS των SUs την εκχώρηση του εύρους ζώνης. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τη σημαντικότητα του παράγοντα QoS και καταδεικνύουν ότι το προτεινόμενο σχήμα προσφέρει σημαντική βελτίωση σε σχέση με ένα βασικό σχήμα διαμοιρασμού φάσματος. Επισημαίνεται ότι είναι η πρώτη φορά που χρησιμοποιείται η έννοια της παροχής στατιστικών εγγυήσεων QoS σε όρους καθυστέρησης σε ένα παίγνιο διαμοιρασμού φάσματος μεταξύ πολλαπλών SUs ενός interweave CR, το οποίο επιλύεται χρησιμοποιώντας τη θεωρία VI. Τέλος, σημειώνεται ότι το προτεινόμενο σχήμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση των μελλοντικών γνωστικών συστημάτων, καθώς και για την επίλυση παρόμοιων προβλημάτων σε άλλα σενάρια ασύρματων δικτύων (π.χ. για την εκχώρηση ορθογώνιων συχνοτήτων μεταξύ διαφορετικών χρηστών στην άνω ζεύξη ενός κυψελωτού συστήματος).

Η υπόλοιπη ενότητα οργανώνεται ως εξής: αρχικά, παρουσιάζεται το μοντέλο συστήματος που μελετάται. Έπειτα, αναλύεται η παιγνιοθεωρητική διατύπωση του προβλήματος διαμοιρασμού φάσματος για διασφάλιση QoS και στη συνέχεια παρουσιάζεται η μοντελοποίηση του παιγνίου ως πρόβλημα ανισότητας μεταβολών και ο προτεινόμενος καταναμημένος αλγόριθμος επίλυσης του. Τέλος, περιγράφονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων και τα συμπεράσματα που προκύπτουν.



Σχήμα 5.13: Μοντέλο συστήματος συνύπαρξης SUs με PU.

5.5.1 Μοντέλο Συστήματος

Για το μελετώμενο μοντέλο συστήματος, θεωρούνται N_s ζεύγη δευτερευόντων χρηστών τα οποία αποτελούν ένα γνωστικό δίκτυο που συνυπάρχει με ένα ζεύγος πρωτεύοντα χρήστη, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.13. Οι SUs επικοινωνούν μεταξύ τους εκμεταλλευόμενοι τις φασματικές «τρύπες» της αδειοδοτημένης ζώνης, οι οποίες θεωρείται ότι μπορούν να ανιχνευτούν επιτυχώς (Haykin, 2005). Το συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης που προκύπτει μετά τη διαδικασία ανίχνευσης είναι B_{tot} , ενώ θεωρείται ότι οι SUs δεν προκαλούν παρεμβολή γειτονικού διαύλου (Adjacent Channel Interference - ACI) μεταξύ τους ή στον PU, χρησιμοποιώντας ζώνες ασφαλείας (guard bands), δηλαδή διατηρώντας φασματικές αποστάσεις μεταξύ των εκχωρούμενων φασματικών ζωνών. Για τις ζεύξεις επικοινωνίας θεωρούνται μπλοκ επίπεδα κανάλια διαλείψεων Rayleigh διακριτού χρόνου, ενώ ο κάθε SU έχει γνώση της στιγμιαίας CSI της αντίστοιχης δευτερεύουσας ζεύξης, η οποία μπορεί να αποκτηθεί μέσω πιλοτικών σημάτων (Jovicic & Viswanath, 2009). Επιπρόσθετα, θεωρείται ότι οι δευτερευόντες χρήστες έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις QoS και εκπέμπουν με πανομοιότυπη σταθερή ισχύ.

Στόχος είναι η μεγιστοποίηση της ρυθμοαπόδοσης του εκάστοτε SU για συγκεκριμένες απαιτήσεις QoS, δεδομένου του περιορισμού του συνολικού διαθέσιμου εύρους ζώνης. Γι' αυτό το λόγο, χρησιμοποιείται η έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας, η οποία ορίζεται ως ο μέγιστος σταθερός ρυθμός αφίξεων που μπορεί να υποστηρίξει ένα κανάλι, έτσι ώστε να διασφαλίσει τις απαιτήσεις σε QoS. Πιο συγκεκριμένα, δεδομένου ότι τα πακέτα των ανώτερων στρωμάτων οργανώνονται σε πλαίσια διάρκειας T_f , ο μέγιστος στιγμιαίος ρυθμός αξιοπίστης μετάδοσης δεδομένων κατά τη διάρκεια ενός πλαισίου, δίνεται σε μονάδες bits/πλαίσιο ως εξής:

$$R_i(B_i) = T_f B_i \log_2 \left(1 + \frac{h_{s,i} P_s}{N_0 B_i} \right) \quad (5.26)$$

όπου τα B_i , $h_{s,i}$, P_s και N_0 αντιστοιχούν στο εκχωρούμενο εύρος ζώνης, στο κέρδος ισχύος του καναλιού, στην ισχύ μετάδοσης και στην πυκνότητα ισχύος του θορύβου του i -οστού SU, αντίστοιχα. Συνεπώς, η αποτελεσματική χωρητικότητα του i -οστού SU δίνεται σε μονάδες bits/πλαίσιο από τον ακόλουθο τύπο:

$$E_{c,i}(B_i, \theta_i) = -\frac{1}{\theta_i} \ln \left(\mathcal{E} \left[e^{-\theta_i R_i(B_i)} \right] \right) \quad (5.27)$$

όπου η $\mathcal{E}[\cdot]$ αντιστοιχεί στην συνάρτηση προσδοκώμενης τιμής ως προς το κέρδος ισχύος καναλιού. Επιπρόσθετα, θεωρείται ότι οι συντελεστές του κέρδους των καναλιών είναι αμετάβλητοι κατά τη διάρκεια ενός πλαισίου, ενώ μεταβάλλονται από πλαίσιο σε πλαίσιο. Ο εκθέτης QoS θ_i (σε μονάδες 1/bit), εκφράζει τις απαιτήσεις QoS του i -οστού SU και είναι μια θετική σταθερά, η οποία καταδεικνύει τον εκθετικά φθίνοντα ρυθμό της πιθανότητας παραβίασης της απαίτησης ποιότητας ως προς το όριο για το μήκος της ουράς του buffer ή το όριο της καθυστέρησης (βλ. Ενότητα 5.2). Υπενθυμίζεται ότι, οι μεγαλύτερες τιμές του θ_i καταδεικνύουν αυστηρότερες απαιτήσεις QoS, ενώ οι μικρότερες τιμές του θ_i δηλώνουν πιο ευέλικτες (χαλαρές) απαιτήσεις QoS.

5.5.2 Παιγνιοθεωρητική Μοντελοποίηση Προβλήματος

Δεδομένου ότι η θεωρία παιγνίων αποτελεί κατάλληλο εργαλείο για τη μελέτη συστημάτων πολλαπλών χρηστών, όπου ο καθένας έχει τον δικό του στόχο, το μελετώμενο πρόβλημα μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο διαμοιρασμού φάσματος για διασφάλιση QoS (QoS-driven Spectrum Sharing - QSS) με ένα συζευγμένο περιορισμό, το οποίο συμβολίζεται ως \mathcal{G}_{QSS} και έχει την ακόλουθη κανονική μορφή:

$$\mathcal{G}_{QSS} = \langle \mathcal{N}, \mathbf{Q}, (U_i)_{i=1}^{N_s} \rangle \quad (5.28)$$

όπου το $\mathcal{N} = (1, \dots, N_s)$ είναι το σύνολο των SUs, το \mathbf{Q} είναι το κοινό σύνολο στο οποίο ανήκει το προφίλ στρατηγικών (απαιτούμενα εύρη ζώνης) $\mathbf{B} = (B_i)_{i=1}^{N_s}$ όλων των SUs, με B_i τη στρατηγική του i -οστού SU, και τέλος το U_i είναι η συνάρτηση χρησιμότητας του i -οστού SU, η οποία είναι ίση με την αποτελεσματική χωρητικότητα $E_{c,i}$. Για να αποφευχθεί η ACI, θεωρείται ότι υπάρχουν κανάλια ασφαλείας γύρω από το εκχωρούμενο, στον κάθε SU, εύρος ζώνης B_i , τα οποία αντιστοιχούν σε ποσοστό l επί τοις εκατό του B_i . Ουσιαστικά, η θεώρηση των καναλιών ασφαλείας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του συνολικά διαθέσιμου εύρους ζώνης. Επομένως, προκύπτει το «καθαρό» διαθέσιμο εύρος ζώνης που μπορούν να εκμεταλλευτούν οι SUs, το οποίο δίνεται ως εξής $B'_{tot} = \left(\frac{1}{1+l} \right) \cdot B_{tot}$. Δεδομένου ότι το εφικτό σύνολο του κάθε SU εξαρτάται από τις στρατηγικές των αντιπάλων παικτών $\mathbf{B}_{-i} = (B_1, \dots, B_{i-1}, B_{i+1}, \dots, B_{N_s})$ μέσω του συζευγμένου περιορισμού του συνολικού διαθέσιμου εύρους ζώνης, το παίγνιο \mathcal{G}_{QSS} συνιστά ένα GNEP. Πιο συγκεκριμένα, ο στόχος του κάθε παίκτη, δεδομένων των στρατηγικών των υπόλοιπων παικτών \mathbf{B}_{-i} , είναι ο υπολογισμός του B_i , το οποίο λύνει το ακόλουθο πρόβλημα μεγιστοποίησης:

$$\mathcal{G}_{QSS}: \quad \begin{aligned} & \max_{B_i \in [0, B'_{tot}]} E_{c,i}(B_i, \theta_i) \\ & \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^{N_s} B_i \leq B'_{tot} \end{aligned} \quad \forall i = 1, \dots, N_s \quad (5.29)$$

Το παραπάνω GNEP αποτελεί ειδική κατηγορία των μη συνεργατικών παιγνίων με συζευγμένους περιορισμούς, όπου η εξάρτηση μεταξύ των στρατηγικών των παικτών εμφανίζεται στον κοινό περιορισμό, αλλά όχι στην συνάρτηση χρησιμότητας (Galindo-Serrano et al., 2012). Για λόγους απλότητας, ορίζονται οι παρακάτω συναρτήσεις:

$$g_i(B_i, \theta_i) = e^{-\theta_i R_i(B_i)} \quad (5.30)$$

και

$$h(\mathbf{B}) = \sum_{j=1}^{N_s} B_j - B'_{tot} = B_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_s} B_j - B'_{tot} = h(B_i, \mathbf{B}_{-i}) \quad (5.31)$$

Σημειώνεται ότι $\mathbf{B} = (B_i, \mathbf{B}_{-i})$ για κάθε παίκτη i .

Επειδή η συνάρτηση $\ln(\cdot)$ είναι γνησίως αύξουσα, το πρόβλημα μεγιστοποίησης (5.29) μπορεί να μετασχηματιστεί στο ακόλουθο πρόβλημα ελαχιστοποίησης για κάθε παίκτη, το οποίο επίσης αποτελεί ένα GNEP:

$$\bar{\mathcal{G}}_{QSS}: \quad \begin{array}{ll} \min_{B_i} \mathcal{E} [g_i(B_i, \theta_i)] & \forall i = 1, \dots, N_s \\ \text{s.t. } B_i \in Q_i(\mathbf{B}_{-i}) \end{array} \quad (5.32)$$

όπου $Q_i(\mathbf{B}_{-i}) \triangleq \{B_i \in [0, B'_{tot}]: h(B_i, \mathbf{B}_{-i}) \leq 0\}$ είναι το εφικτό σύνολο για κάθε παίκτη, όταν οι υπόλοιποι παίκτες επιλέξουν \mathbf{B}_{-i} . Επομένως, το εφικτό σύνολο για όλους τους παίκτες δίνεται ως εξής:

$$\mathcal{Q} \triangleq \{\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{N_s}: h(\mathbf{B}) \leq 0, B_i \in [0, B'_{tot}], \forall i = 1, \dots, N_s\} \quad (5.33)$$

Συνεπώς, το παίγνιο $\bar{\mathcal{G}}_{QSS}$ αποτελεί ένα GNEP με έναν από κοινού κυρτό (αφινικό) κοινό περιορισμό (jointly convex shared constraint).

5.5.3 Μοντελοποίηση Προβλήματος Ανισότητας Μεταβολών και Κατανεμημένος Αλγόριθμος Επίλυσης

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3, η επίλυση των GNEPs αποτελεί μια πολύπλοκη και δύσκολη διαδικασία. Ωστόσο, το μελετώμενο πρόβλημα, εξαιτίας του συζευγμένου περιορισμού του, μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα πρόβλημα ανισότητας μεταβολών. Υπενθυμίζεται ότι, η θεωρία των ανισοτήτων μεταβολών αποτελεί ένα γενικό πλαίσιο βελτιστοποίησης που περικλείει την κυρτή βελτιστοποίηση και φέρει άμεση σχέση με την θεωρία παιγνίων. Δεδομένου ενός συνόλου $\mathcal{K} \subseteq \mathbb{R}^n$ και μιας απεικόνισης $\mathbf{F}: \mathcal{K} \rightarrow \mathbb{R}^n$, το πρόβλημα VI, ορίζεται ως $VI(\mathcal{K}, \mathbf{F})$, και στοχεύει στην εύρεση ενός $\mathbf{x}^* \in \mathcal{K}$, το οποίο καλείται λύση του VI, έτσι ώστε

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}^*)^T (\mathbf{x} - \mathbf{x}^*) \geq 0, \quad \forall \mathbf{x} \in \mathcal{K} \quad (5.34)$$

Αναλυτικότερα για τη μελετώμενη περίπτωση, θεωρείται το πρόβλημα $VI(\mathcal{Q}, \mathbf{F})$ της εύρεσης ενός διανύσματος $\mathbf{B}^* \in \mathcal{Q}$ της εκχώρησης εύρους ζώνης στους SUs για το \mathcal{Q} που ορίζεται στην (5.33), με $\mathbf{F}(\mathbf{B}) \triangleq (\nabla_{B_i} g_i(B_i, \theta_i))_{i=1}^{N_s}$. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα αποδεικνύεται η ακόλουθη πρόταση.

Πρόταση 5.2. Το πρόβλημα $VI(\mathcal{Q}, \mathbf{F})$ έχει μοναδική λύση, η οποία είναι και λύση του GNEP $\bar{\mathcal{G}}_{QSS}$. Επομένως, το παίγνιο $\bar{\mathcal{G}}_{QSS}$ έχει μοναδική λύση μεταβολών ή κανονικοποιημένη λύση (variational or

normalized solution).

Η απόδειξη βρίσκεται στο Παράρτημα Β'.

Ωστόσο, το Q δεν έχει καρτεσιανή δομή, επομένως το πρόβλημα VI επαναδιατυπώνεται σε μια κατάλληλη ισοδύναμη μορφή, αυτή του ακόλουθου προβλήματος ισορροπίας Nash (NEP) με τιμολόγηση (Scutari et al., 2012, Λήμμα 4.4). Στόχος είναι η εύρεση του ζεύγους $(\mathbf{B}^*, \lambda^*)$, όπου το \mathbf{B}^* λύνει το ακόλουθο πρόβλημα ελαχιστοποίησης:

$$\begin{aligned} \bar{\mathcal{G}}_{\lambda^*, QSS}: \quad & \min_{B_i} g_i(B_i, \theta_i) + \lambda^* [h(\mathbf{B})] \\ & \text{s.t. } B_i \in [0, B'_{tot}] \quad \forall i = 1, \dots, N_s \end{aligned} \quad (5.35)$$

και επιπρόσθετα

$$0 \leq \lambda^* \perp h(\mathbf{B}^*) \leq 0 \quad (5.36)$$

Η εξίσωση (5.36) αναπαριστά ένα μη γραμμικό πρόβλημα συμπληρωματικότητας NCP(Φ) (βλ. Κεφάλαιο 3) για την εύρεση του λ , δεδομένης της απεικόνισης $\Phi(\lambda): \lambda \in \mathbb{R}_+ \rightarrow -h(\mathbf{B}(\lambda)) \in \mathbb{R}$. Επομένως, το ζεύγος $(\mathbf{B}^*, \lambda^*)$ αναπαριστά τη λύση της ισορροπίας Nash (NE) του $\bar{\mathcal{G}}_{\lambda^*, QSS}$ για δεδομένο λ^* και τη λύση του NCP(Φ), αντιστοίχως. Επιπρόσθετα, το ζεύγος αυτό αντιστοιχεί στη λύση του VI(Q, F) και τον αντίστοιχο πολλαπλασιαστή του κοινού περιορισμού, ο οποίος είναι ουσιαστικά η κοινή τιμή που πρέπει να «πληρώσουν» οι παίκτες για τη χρήση του διαθέσιμου φάσματος.

Τέλος, η μοναδική VI λύση μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο επαναληπτικό αλγόριθμο (επαναληπτικός αλγόριθμος Ευκλείδειας προβολής με μεταβλητά βήματα - Euclidean projection algorithm with variable steps) (Facchinei & Pang, 2003, Αλγόριθμος 12.1.4):

Αλγόριθμος 1: Κατανεμημένος αλγόριθμος υπολογισμού της VI λύσης

Βήμα 1 : Για $n = 0$, επέλεξε $\lambda_0 \geq 0$;

Βήμα 2 : Εάν (ικανοποιείται το κριτήριο τερματισμού για λ_n) τότε σταμάτα ;
αλλιώς συνέχισε ;

Βήμα 3 : Υπολόγισε το $\mathbf{B}^*(\lambda_n)$ ως NE του $\bar{\mathcal{G}}_{\lambda^*, QSS}$, για $\lambda^* = \lambda_n$;

Βήμα 4 : Επέλεξε $\tau_n > 0$; υπολόγισε $\lambda_{n+1} = \max \{ \lambda_n + \tau_n h(\mathbf{B}), 0 \}$;

Βήμα 5 : $n = n + 1$; μετάβαση στο **Βήμα 2**;

Όσον αφορά τη λύση NE του παιγνίου $\bar{\mathcal{G}}_{\lambda^*, QSS}$, αυτή μπορεί να υπολογιστεί μέσω των βέλτιστων αποκρίσεων των παικτών, επιλύοντας την εξίσωση $\partial \{g_i(B_i, \theta_i) + \lambda [h(\mathbf{B})]\} / \partial B_i = 0$ για $i = 1, \dots, N_s$. Η εξίσωση αυτή καταλήγει σε μια υπερβατική εξίσωση, η οποία εξαρτάται μόνο από τη στρατηγική του αντίστοιχου παίκτη. Συνεπώς, η βέλτιστη απόκριση του κάθε παίκτη μπορεί να υπολογιστεί αριθμητικά, οδηγώντας στη λύση NE. Επιπρόσθετα, μπορεί να αποδειχθεί ότι η συγκεκριμένη $\Phi(\lambda)$ αποτελεί μια co-coercive συνάρτηση² του $\lambda \in \mathbb{R}_+$ με σταθερά $c = c_{sm}/N_s$, όπου $c_{sm} = \min \{ \partial^2 g_i(B_i, \theta_i) / \partial B_i^2 \}_{i=1}^{N_s} > 0$. Επομένως, για αυθαίρετο αλλά επαρκώς μικρό $\tau_n \in (0, 2c)$ (Facchinei & Pang, 2003, Θεώρημα 12.1.8), ο προτεινόμενος επαναληπτικός αλγόριθμος συγκλίνει στη μοναδική λύση του προβλήματος VI(Q, F). Ως εκ τούτου, η βέλτιστη εκχώρηση εύρους ζώνης

²Μια συνάρτηση $Y: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ είναι co-coercive σε ένα σύνολο $S \subseteq \mathbb{R}^n$, εάν υπάρχει σταθερά $c > 0$, τέτοια ώστε $(Y(\mathbf{x}_1) - Y(\mathbf{x}_2))^T (\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2) \geq c \|Y(\mathbf{x}_1) - Y(\mathbf{x}_2)\|_2^2 \forall \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 \in S$.

μπορεί να υπολογιστεί για κάθε SU με συγκεκριμένες απαιτήσεις QoS. Όσον αφορά την παράμετρο λ_0 , αυτή μπορεί να επιλεγεί αυθαίρετα, ενώ η κατάλληλη τιμή της παραμέτρου τ_n , η οποία επηρεάζει την ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου, μπορεί να βρεθεί εμπειρικά.

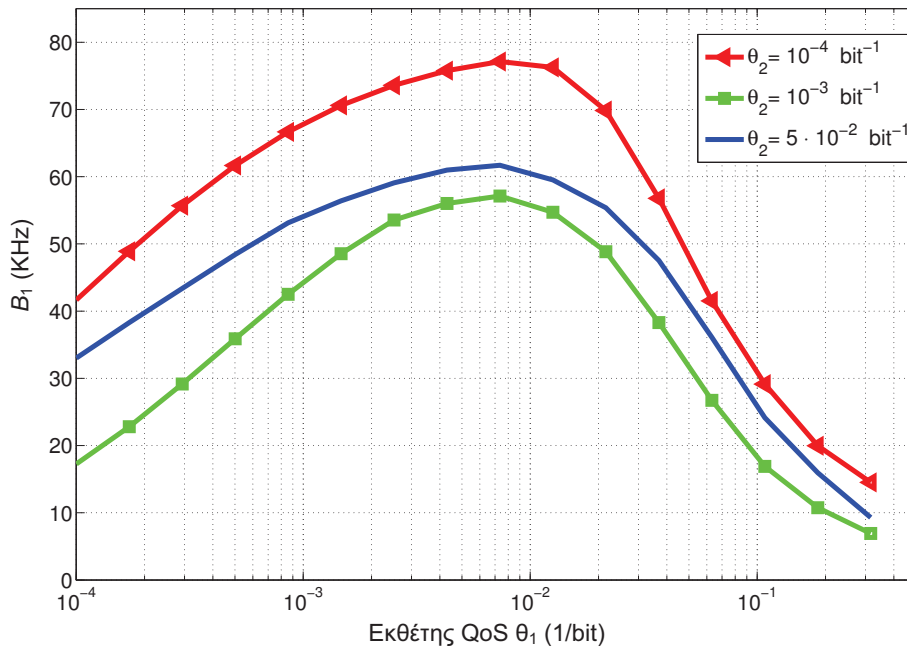
Τέλος, σημειώνεται ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος απαιτεί δυο ενημερώσεις μεταβλητών σε κάθε επανάληψη: τον υπολογισμό της εκχώρησης εύρους ζώνης για την κοινή τιμή λ του προηγούμενου σταδίου και τον υπολογισμό του καινούργιου λ . Και οι δυο αυτοί υπολογισμοί μπορούν να εκτελεστούν πλήρως κατανεμημένα από κάθε SU. Πιο συγκεκριμένα, έπειτα από τον υπολογισμό του B_i , ο κάθε SU υπολογίζει την τιμή του $\partial^2 g_i(B_i, \theta_i) / \partial B_i^2$ και στη συνέχεια εκπέμπει τις δυο παραμέτρους, έτσι ώστε να υπολογίσουν όλοι οι SUs το νέο κοινό λ , κατανεμημένα.

5.5.4 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων και Σχολιασμός

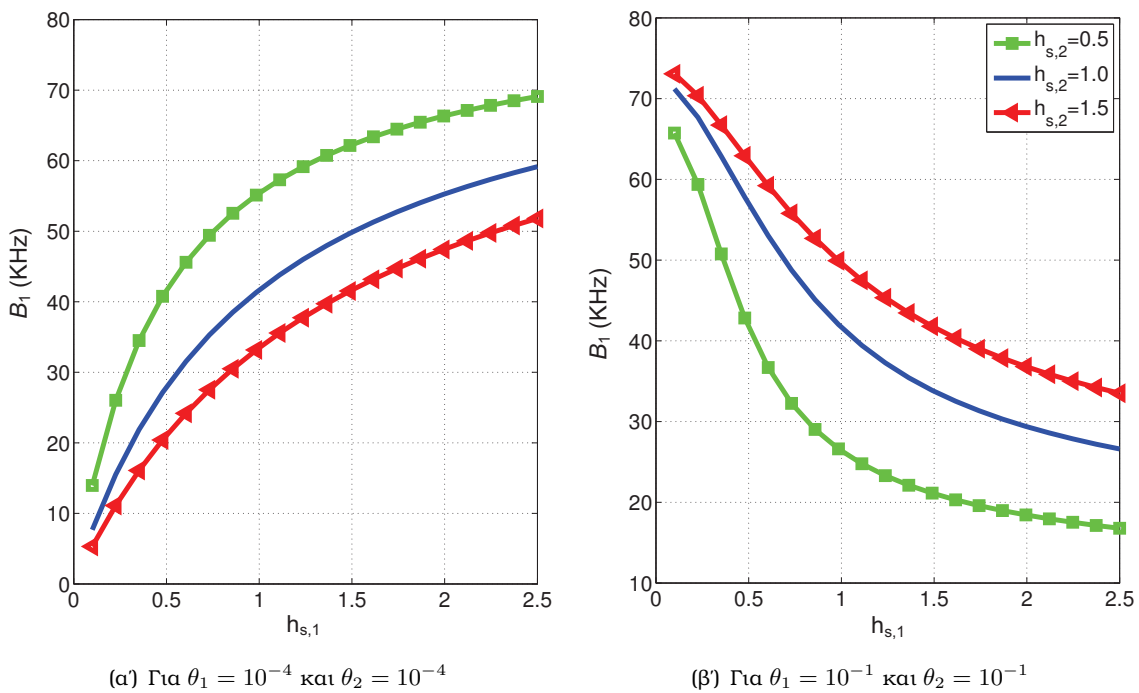
Για να αξιολογηθεί ο προτεινόμενος μηχανισμός, εκτελέστηκαν εκτενείς προσομοιώσεις με χρήση του MatLab και του Mathematica. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων για διαφορετικές απαιτήσεις QoS των SUs, έτσι ώστε να μελετηθεί η επίδραση τους στη βέλτιστη εκχώρηση εύρους ζώνης και στην αντίστοιχη αποτελεσματική χωρητικότητα. Χωρίς βλάβη της γενικότητας, θεωρούνται $P_s = 10$ W, $N_0 = 10^{-4}$ W/Hz, $T_f = 2 \cdot 10^{-3}$ s, $B_{tot} = 100$ KHz και $l = 20\%$. Επομένως, το «καθαρό» διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι $B'_{tot} = 83.33$ KHz. Επιπλέον, όσον αφορά τα ασύρματα κανάλια, θεωρούνται ανεξάρτητα κανάλια διαλείψεων Rayleigh μοναδιαίας μέσης τιμής.

Αρχικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για ένα σενάριο προσομοιώσεων με δυο SUs. Το Σχήμα 5.14 απεικονίζει την «καθαρή» εκχώρηση εύρους ζώνης στον χρήστη SU_1 (δηλαδή το B_1) ως προς τον δικό του εκθέτη QoS θ_1 , για διαφορετικές τιμές του εκθέτη θ_2 του αντίπαλου χρήστη SU_2 . Τα αποτελέσματα έχουν προκύψει ως μέσες τιμές 2000 i.i.d. τυχαίων στιγμιοτύπων καναλιών Rayleigh. Επισημαίνεται ότι το υπόλοιπο του «καθαρού» διαθέσιμου εύρους ζώνης εκχωρείται στον χρήστη SU_2 (δηλαδή αντιστοιχεί στο B_2). Όπως παρατηρείται από το σχήμα, όσο οι απαιτήσεις QoS ενός χρήστη γίνονται αυστηρότερες μέχρι μια συγκεκριμένη τιμή, ο χρήστης αυτός λαμβάνει περισσότερο εύρος ζώνης, όμως από εκεί και μετά το εκχωρούμενο εύρος ζώνης αρχίζει να μειώνεται. Το Σχήμα 5.14 μπορεί να εξηγηθεί λαμβάνοντας υπόψη τη συμπεριφορά της συνάρτησης της αποτελεσματικής χωρητικότητας ενός μεμονωμένου χρήστη $E_c(B, \theta)$. Πιο αναλυτικά, η E_c είναι σχεδόν σταθερή για μικρές τιμές του θ , ενώ αρχίζει να φθίνει όταν το θ αυξηθεί αρκετά, για δεδομένο B (βλ. Σχήμα 5.3). Επιπλέον, οι τιμές του E_c βελτιώνονται όταν αυξάνεται το B για μικρές τιμές του θ , όμως η βελτίωση σταδιακά περιορίζεται όταν το θ λάβει μεγαλύτερες τιμές. Επιπρόσθετα, όπως είναι αναμενόμενο, η εκχώρηση εύρους ζώνης στον έναν χρήστη επηρεάζεται (περιορίζεται) άμεσα από τις απαιτήσεις ποιότητας του αντίπαλου χρήστη. Επομένως, όπως παρατηρείται από το Σχήμα 5.14, όσο οι απαιτήσεις σε QoS του SU_1 γίνονται αυστηρότερες, ο χρήστης αυτός λαμβάνει περισσότερο εύρος ζώνης B_1 , έτσι ώστε να εκπληρώσει τις απαιτήσεις αυτές για δεδομένο θ_2 , όμως σταδιακά όταν το θ_1 αυξηθεί αρκετά, σχεδόν η ίδια τιμή του $E_{c,1}$ μπορεί να αποκτηθεί και για μικρότερες τιμές του B_1 .

Επιπρόσθετα, το Σχήμα 5.15 παρουσιάζει την «καθαρή» εκχώρηση εύρους ζώνης στον χρήστη SU_1 (δηλαδή το B_1) ως προς το κέρδος ισχύος του καναλιού του ίδιου χρήστη $h_{s,1}$ για διαφορετικές τιμές του κέρδους ισχύος καναλιού του αντίπαλου χρήστη $h_{s,2}$. Το σενάριο προσομοιώσεων είναι

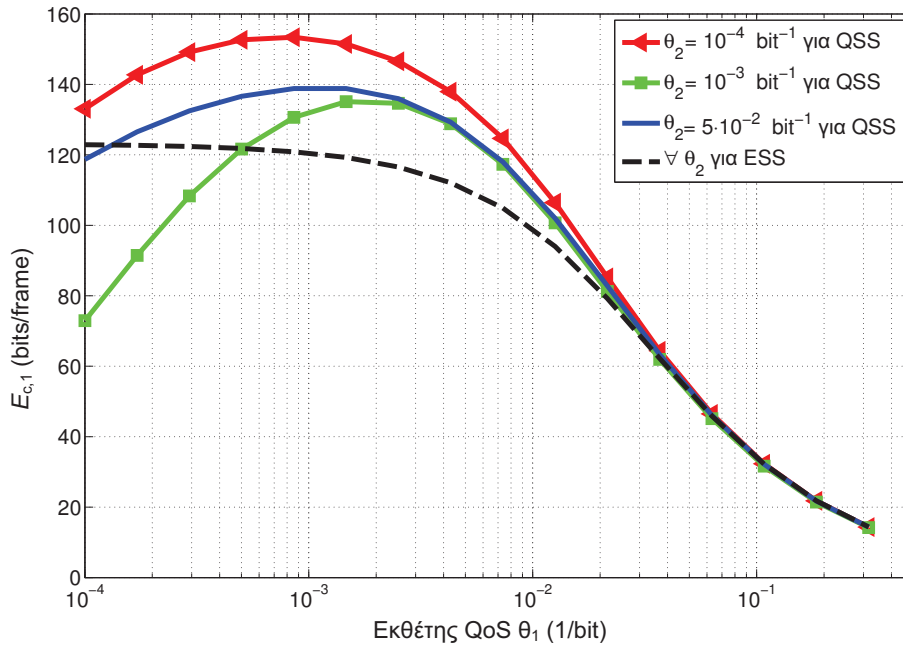


Σχήμα 5.14: Εκχώρηση εύρους ζώνης στον SU_1 ($N_s = 2$) ως προς το θ_1 με $B_{tot} = 100\text{KHz}$ για διαφορετικά θ_2 .



Σχήμα 5.15: Εκχώρηση εύρους ζώνης στον SU_1 ($N_s = 2$) ως προς το $h_{s,1}$ με $B_{tot} = 100\text{KHz}$ για διαφορετικά $h_{s,2}$.

το ίδιο με αυτό του Σχήματος 5.14. Πιο συγκεκριμένα, το Σχήμα 5.15(α) παρουσιάζει το εκχωρούμενο εύρος ζώνης B_1 για χαμηλές απαιτήσεις ποιότητας και για τους δυο χρήστες ($\theta_1 = 10^{-4}$ και $\theta_1 = 10^{-4}$). Όπως παρατηρείται, όσο αυξάνεται το κέρδος του καναλιού, αυξάνεται και το εκχωρούμενο εύρος ζώνης στον SU_1 . Αντίθετα, το Σχήμα 5.15(β) παρουσιάζει το εκχωρούμενο εύρος

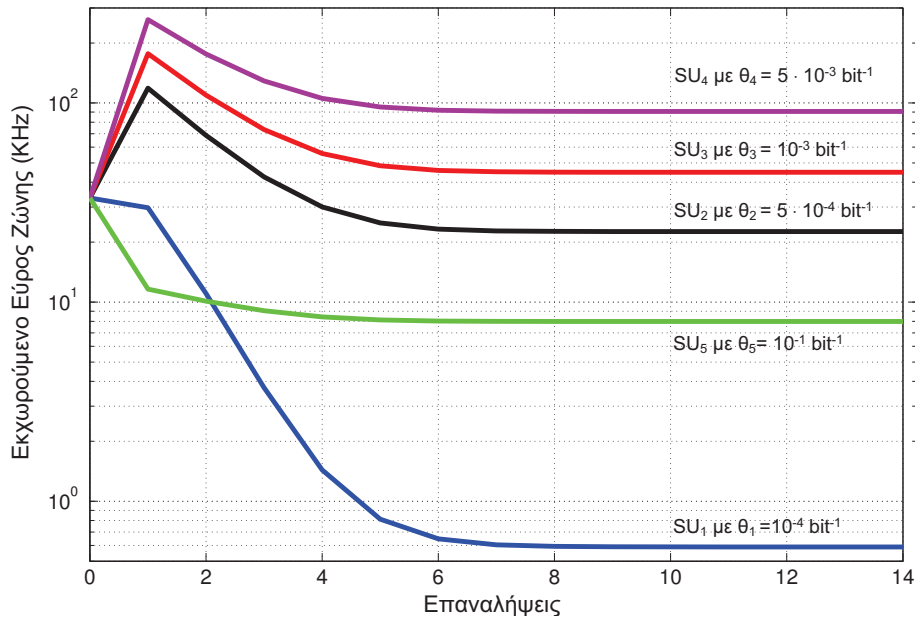


Σχήμα 5.16: Αποτελεσματική χωρητικότητα του SU_1 ($N_s = 2$) ως προς το θ_1 με $B_{tot} = 100\text{kHz}$ για διαφορετικά θ_2 .

ζώνης B_1 για αυστηρές απαιτήσεις ποιότητας και για τους δυο χρήστες ($\theta_1 = 10^{-1}$ και $\theta_1 = 10^{-1}$). Εδώ φαίνεται ότι, όσο αυξάνεται το κέρδος του καναλιού, περισσότερο εύρος ζώνης εκχωρείται στον αντίπαλο χρήστη. Συνεπώς, όταν οι συνθήκες του καναλιού ενός δευτερεύοντα χρήστη βελτιώνονται, αυτός λαμβάνει μεγαλύτερη ποσότητα φάσματος για μικρές τιμές του εκθέτη ποιότητας μέχρι μια συγκεκριμένη τιμή, όμως για μεγάλες τιμές του εκθέτη QoS το εκχωρούμενο εύρος ζώνης αρχίζει να μειώνεται για καλύτερες συνθήκες καναλιού.

Το Σχήμα 5.16 απεικονίζει την αποτελεσματική χωρητικότητα του SU_1 ως προς τον εκθέτη QoS θ_1 , για διαφορετικές τιμές του εκθέτη θ_2 . Τα αποτελέσματα προκύπτουν μέσω Monte-Carlo προσομοιώσεων για κανάλια διαλείψεων Rayleigh 2000 στιγμιοτύπων, θεωρώντας το προηγούμενο σενάριο των δυο χρηστών. Για λόγους σύγκρισης, θεωρείται ως αναφορά ένα βασικό σχήμα διαμοιρασμού φάσματος, το σχήμα ίσου διαμοιρασμού (Equal Spectrum Sharing - ESS), σύμφωνα με το οποίο φάσμα διαμοιράζεται ισόποσα σε όλους τους χρήστες ανεξάρτητα από τις απαιτήσεις τους σε QoS. Η παρατηρούμενη συμπεριφορά της αποτελεσματικής χωρητικότητας είναι άμεσα σχετιζόμενη με τη συμπεριφορά του εκχωρούμενου εύρους ζώνης του Σχήματος 5.14. Όπως φαίνεται, για μικρές τιμές του θ_1 , το $E_{c,1}$ βελτιώνεται όσο οι απαιτήσεις QoS γίνονται αυστηρότερες, επειδή εκχωρείται περισσότερο εύρος ζώνης στο χρήστη SU_1 (βλ. Σχήμα 5.14), όμως για μεγαλύτερες τιμές του θ_1 , το $E_{c,1}$ ακολουθεί την πτωτική συμπεριφορά της συνάρτησης της αποτελεσματικής χωρητικότητας του ενός χρήστη. Επιπρόσθετα, παρατηρείται ότι το προτεινόμενο σχήμα (QSS) εκχωρεί το διαθέσιμο εύρος ζώνης λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις QoS των SUs και προσφέρει σημαντική βελτίωση στις περισσότερες περιπτώσεις σε σύγκριση με τον «επίπεδο» διαμοιρασμό του ESS (βλ. διακεκομμένη καμπύλη).

Τέλος, θεωρείται ένα σενάριο προσομοιώσεων πέντε SUs, όπου ο καθένας έχει διαφορετικούς περιορισμούς QoS. Το Σχήμα 5.17 παρουσιάζει τη σύγκλιση του επαναληπτικού αλγορίθμου και τα



Σχήμα 5.17: Σύγκλιση του επαναληπτικού αλγορίθμου με $N_s = 5$ και $B_{tot} = 200\text{KHz}$ για χρήστες με διαφορετικά θ .

αντίστοιχα αποτελέσματα της «καθαρής» εκχώρησης εύρους ζώνης για τον κάθε SU (δηλαδή τα B_i). Όπως παρατηρείται, ο αλγόριθμος συγκλίνει αρκετά γρήγορα και έχει ως αποτέλεσμα οι χρήστες με τις αυστηρότερες απαιτήσεις QoS, έως ένα κατώφλι, να λαμβάνουν περισσότερο εύρος ζώνης, όπως παρατηρήθηκε και στην περίπτωση του σεναρίου των δυο χρηστών (βλ. Σχήμα 5.14). Από την άλλη μεριά, για μεγαλύτερες απαιτήσεις από το κατώφλι, το εκχωρούμενο εύρος ζώνης μειώνεται.

Συμπερασματικά, ο προτεινόμενος μηχανισμός διαμοιρασμού φάσματος καταφέρει να ενσωματώσει την κρίσιμη μετρική της QoS και να σχεδιάσει ένα αποδοτικό interweave γνωστικό σύστημα πολλαπλών χρηστών. Το πρόβλημα διαμοιρασμού μοντελοποιήθηκε ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο και επιλύθηκε με τη βοήθεια της θεωρίας ανισοτήτων μεταβολών, ενώ τα αποτελέσματα κατέδειξαν τη σημαντικότητα των απαιτήσεων QoS στον διαμοιρασμό του φάσματος και την απόδοση του συστήματος, με το προτεινόμενο σχήμα να προσφέρει σημαντική βελτίωση σε σχέση με ένα βασικό σχήμα διαμοιρασμού.

5.6 Συμπεράσματα

Το κεφάλαιο αυτό ασχολήθηκε με τα προβλήματα διαχείρισης πόρων για διασφάλιση της QoS, δίνοντας έμφαση στα γνωστικά συστήματα, τα οποία έχουν ως στόχο την επίλυση των προβλημάτων συμφόρησης του πεπερασμένου και υποχρησιμοποιούμενου φάσματος συχνοτήτων. Αρχικά, αναλύθηκε η θεωρία των στατιστικών εγγυήσεων QoS και μελετήθηκε η έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας, η οποία αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο σχεδίασης αποδοτικών μηχανισμών που παρέχουν στατιστικές εγγυήσεις QoS, αφού ενσωματώνει την έννοια της QoS στα μοντέλα ασύρματων καναλιών του φυσικού στρώματος. Στη συνέχεια, παρουσιάστηκε το γενικό πρόβλημα της μεγιστοποίησης της αποτελεσματικής χωρητικότητας μαζί με τη σχετική βιβλιογραφία.

Έπειτα, προτάθηκε ένας καταναμημένος μηχανισμός ελέγχου ισχύος για τη διασφάλιση της QoS

σε underlay γνωστικά δίκτυα, όπου τα ασύρματα κανάλια διαλείψεων Nakagami- m θεωρούνται χωρικά συσχετισμένα. Στόχος ήταν ο σχεδιασμός ενός ρεαλιστικού μηχανισμού ελέγχου ισχύος, ο οποίος μεγιστοποιεί την αποτελεσματική χωρητικότητα του SU, δεδομένου ενός περιορισμού μέσης παρεμβολής, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η επικοινωνία του PU. Η προτεινόμενη βέλτιστη πολιτική ελέγχου ισχύος εκφράστηκε σε όρους συσχέτισης των καναλιών διαλείψεων, θεωρώντας δυο διαφορετικά σενάρια συσχέτισης: το μοντέλο συσχέτισης λήψης PU-SU και το μοντέλο συσχέτισης εκπομπής PU-SU. Η απόδοση του προτεινόμενου σχήματος και η επίδραση της συσχέτισης των καναλιών στην αποτελεσματική χωρητικότητα και τη μέση κατανάλωση ισχύος του SU, εξετάστηκε μέσω προσομοιώσεων, για διαφορετικές απαιτήσεις και σενάρια συστήματος. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν τη σημαντικότητα της παραμέτρου QoS και του βαθμού συσχέτισης που εμφανίζουν οι ασύρματες ζεύξεις. Πιο συγκεκριμένα προέκυψε ότι, η αύξηση του συντελεστή συσχέτισης μειώνει την αποτελεσματική χωρητικότητα για χαλαρές απαιτήσεις QoS, ενώ αντίθετα την αυξάνει για αυστηρές απαιτήσεις QoS, και για τα δυο μοντέλα συσχέτισης. Όμοια συμπεριφορά παρατηρήθηκε για τη μέση κατανάλωση ισχύος στην περίπτωση του μοντέλου συσχέτισης λήψης, ενώ η αντίθετη συμπεριφορά παρατηρήθηκε για το μοντέλο συσχέτισης εκπομπής.

Στη συνέχεια, προτάθηκε ένας κατανεμημένος μηχανισμός διαμοιρασμού του αχρησιμοποίητου αδειοδοτημένου φάσματος μεταξύ πολλαπλών SUs σε ένα interweave γνωστικό σύστημα, με στόχο τη διασφάλιση των διαφορετικών απαιτήσεων των χρηστών σε QoS. Αναλυτικότερα, το πρόβλημα του διαμοιρασμού του αχρησιμοποίητου φάσματος μοντελοποιείται ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο με συζευγμένο περιορισμό, όπου ο εκάστοτε SU στοχεύει στη μεγιστοποίηση της ατομικής του αποτελεσματικής χωρητικότητας. Το πρόβλημα αυτό αποτελεί ένα γενικευμένο πρόβλημα ισορροπίας Nash, το οποίο για να επιλυθεί επαναδιατυπώνεται ως ένα πρόβλημα ανισότητας μεταβολών με μοναδική λύση. Στη συνέχεια, προτείνεται ένας κατανεμημένος επαναληπτικός αλγόριθμος για τον υπολογισμό του εκχωρούμενου εύρους ζώνης σε κάθε χρήστη. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν τη σημαντικότητα των απαιτήσεων QoS στο διαμοιρασμό φάσματος, αφού όσο οι απαιτήσεις ενός χρήστη σε QoS γίνονται αυστηρότερες μέχρι ένα κατώφλι, το εκχωρούμενο εύρος ζώνης στον χρήστη αυτόν αυξάνεται, όμως μετά το κατώφλι, το εκχωρούμενο εύρος ζώνης αρχίζει να μειώνεται.

Συνεπώς, οι προτεινόμενοι μηχανισμοί, λόγω της ευελιξίας που προσφέρουν και του κατανεμημένου χαρακτήρα τους, μπορούν να ενσωματωθούν σε μελλοντικά πρότυπα γνωστικών συστημάτων, φέρνοντας την υλοποίηση των συστημάτων αυτών πιο κοντά στην πράξη και επιτρέποντας την αρμονική και αποδοτική τους λειτουργία παρέχοντας παράλληλα στατιστικές εγγυήσεις QoS.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα

Ολοκληρώνοντας την παρούσα Διδακτορική Διατριβή, το συγκεκριμένο κεφάλαιο συνοψίζει τα συμπεράσματα που προέκυψαν, καθώς και τη βασική συνεισφορά της στο ερευνητικό πεδίο που κατατάσσεται. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται ορισμένα ανοιχτά θέματα που υπάρχουν στο ευρύτερο πεδίο της διαχείρισης πόρων των ασύρματων δικτύων επικοινωνιών, τα οποία κρίνεται ενδιαφέρον να αντιμετωπιστούν.

6.1 Σύνοψη Συμπερασμάτων και Συνεισφορά της Διδακτορικής Διατριβής

Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή μελέτησε προβλήματα βελτιστοποίησης χρονοπρογραμματισμού και διαχείρισης πόρων σε ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών με κεντρικό γνώμονα τη διασφάλιση της ποιότητας υπηρεσίας και πρότεινε αποδοτικούς και καινοτόμους μηχανισμούς επίλυσης τους. Η ανάγκη ύπαρξης τέτοιων μηχανισμών προέρχεται από τις αυξανόμενες απαιτήσεις των χρηστών και των αναδυόμενων υπηρεσιών, οι οποίες δεν μπορούν να ικανοποιηθούν βελτιώνοντας μόνο τις τεχνολογίες μετάδοσης στο φυσικό στρώμα. Για να μεγιστοποιηθεί η απόδοση ενός ασύρματου συστήματος νέας γενιάς θα πρέπει το σύστημα να ενσωματώνει τις πλέον εξελιγμένες τεχνολογίες φυσικού στρώματος και παράλληλα να συνδυάζει βέλτιστες διαδικασίες διαχείρισης των διαθέσιμων πόρων του για τις τεχνολογίες αυτές.

Αναλυτικότερα, στο Κεφάλαιο 2 πραγματοποιήθηκε μια επισκόπηση των ασύρματων δικτύων επικοινωνιών, των προβλημάτων διαχείρισης πόρων και της έννοιας της ποιότητας υπηρεσίας, ενώ στο Κεφάλαιο 3 αναλύθηκαν προχωρημένα μαθηματικά εργαλεία βελτιστοποίησης, εφοδιάζοντας τον αναγνώστη με το θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτείται προκειμένου να γίνει κατανοητή η συνεισφορά της Διδακτορικής Διατριβής. Η κύρια ερευνητική συνεισφορά της Διδακτορικής Διατριβής ακολούθησε στα επόμενα κεφάλαια και χωρίστηκε σε δυο βασικά μέρη. Στο πρώτο μέρος, το οποίο αποτελείται από το Κεφάλαιο 4, η Διδακτορική Διατριβή εστίασε στην επίλυση του προβλήματος ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας των ασύρματων τερματικών, προτείνοντας καινοτόμους, ενεργειακά αποδοτικούς μηχανισμούς χρονοπρογραμματισμού μετάδοσης δεδομένων. Το δεύτερο μέρος της Διδακτορικής Διατριβής, το οποίο αποτελείται από το Κεφάλαιο 5, ασχολήθηκε με τα προβλήματα διαχείρισης πόρων για διασφάλιση της ποιότητας υπηρεσίας, δίνοντας έμφαση στα γνωστικά ασύρματα δίκτυα, για τα οποία προτάθηκαν καινοτόμοι μηχανισμοί ελέγχου ισχύος και

διαμοιρασμού φάσματος, που μεγιστοποιούν την αποτελεσματική χωρητικότητα των δευτερευόντων χρηστών. Στη συνέχεια παρουσιάζεται συνοπτικά η κύρια ερευνητική συνεισφορά της Διδακτορικής Διατριβής με τις αντίστοιχες δημοσιεύσεις και συμπεράσματα που προέκυψαν.

Κεφάλαιο 4

Στο Κεφάλαιο 4, η Διδακτορική Διατριβή ασχολήθηκε με προβλήματα ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας των ασύρματων τερματικών. Αρχικά, παρουσιάστηκε μια σύντομη περιγραφή των βασικών αρχών για την κατανάλωση ενέργειας στις ασύρματες επικοινωνίες. Στη συνέχεια, περιγράφηκαν οι ενεργειακά αποδοτικές τεχνικές επικοινωνιών, παρουσιάζοντας μια πλήρη βιβλιογραφική επισκόπηση των μεθόδων που διασφαλίζουν τον περιορισμένο πόρο της ενέργειας των ασύρματων τερματικών, με έμφαση στην τεχνική ομορτυνιστικού προγραμματισμού μετάδοσης. Η τεχνική αυτή εκμεταλλεύεται τις ευκαιρίες, σε όρους ποιότητας καναλιού, και προγραμματίζει τη μετάδοση δεδομένων είτε στο χρόνο με την επιλογή της βέλτιστης χρονικής στιγμής (διαφορισμός χρόνου) είτε μεταξύ των χρηστών με την επιλογή του βέλτιστου χρήστη (διαφορισμός πολλαπλών χρηστών). Όπως επαληθεύεται, η μετάδοση σε ευνοϊκές συνθήκες καναλιού μπορεί να εξοικονομήσει ενέργεια.

Αντίστοιχη Προκύπτουσα Δημοσίευση:

- Marios I. Poulakis, Athanasios D. Panagopoulos, Philip Constantinou, “Advanced energy efficient communication techniques for wireless ad hoc and sensor networks” in “Advances and Applications in Mobile Computing”, InTech, 2012.

Στη συνέχεια, διατυπώθηκε το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας μιας ασύρματης συσκευής ως πρόβλημα χρονικής βελτιστοποίησης, δεδομένων συγκεκριμένων απαιτήσεων QoS. Για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος προτάθηκαν *κατανεμημένοι ενεργειακά αποδοτικοί μηχανισμοί ομορτυνιστικού χρονοπρογραμματισμού μετάδοσης δεδομένων για ασύρματες συσκευές*, οι οποίοι επιτυγχάνουν την επιμήκυνση της αυτονομίας της μπαταρίας τους. Πιο συγκεκριμένα, οι προτεινόμενοι μηχανισμοί εκμεταλλεύονται ομορτυνιστικά τις χρονομεταβαλλόμενες συνθήκες του ασύρματου καναλιού (σε αντίθεση με την κλασική αντιμετώπιση τους ως πηγές αναξιοπιστίας) προγραμματίζοντας με καινοτόμο τρόπο την ασύρματη επικοινωνία, με στόχο την αποδοτικότερη χρησιμοποίηση της μπαταρίας. Οι μηχανισμοί αυτοί χρησιμοποιούν καινοφανώς τη θεωρία βέλτιστης παύσης, έτσι ώστε να βρεθεί η βέλτιστη χρονική στιγμή για μετάδοση δεδομένων ανάλογα με τις συνθήκες του καναλιού. Θεωρώντας δυο διαφορετικές προσεγγίσεις ανάλογα με τους προς επίτευξη στόχους, προτάθηκαν δυο μηχανισμοί χρονοπρογραμματισμού οι οποίοι ακολουθούν δυο βέλτιστους κανόνες παύσης. Οι μηχανισμοί αυτοί αναβάλλουν τη μετάδοση των δεδομένων μιας συσκευής μέχρι να βρεθούν καλές ευκαιρίες καναλιού, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η καταναλισκόμενη ενέργεια μετάδοσης, παρέχοντας ντετερμινιστικές εγγυήσεις QoS, δηλαδή εξασφαλίζοντας συγκεκριμένες απαιτήσεις ισχύος λήψης στο δέκτη, κάτω από συγκεκριμένο περιορισμό χρονικού ορίου αναβολής. Η αξιολόγηση των μηχανισμών έγινε μέσω εκτενών προσομοιώσεων, όπου συγκρίθηκαν με άλλες ευρετικές τεχνικές χρονοπρογραμματισμού. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ενεργειακή απόδοση των προτεινόμενων μοντέλων είναι πολλά υποσχόμενη παρέχοντας σημαντική επέκταση της διάρκειας της μπαταρίας της συσκευής και για τις δυο προσεγγίσεις σε σχέση με τις

υπόλοιπες ευρετικές μεθόδους. Συνεπώς, με αναβολή της ασύρματης επικοινωνίας μέσα στα ανεκτά χρονικά όρια, μπορεί να επιτευχθεί σημαντική επιμήκυνση της διάρκειας της μπαταρίας.

Αντίστοιχη Προκύπτουσα Δημοσίευση :

- Marios I. Poulakis, Athanasios D. Panagopoulos, Philip Constantinou, “Channel-aware opportunistic transmission scheduling for energy-efficient wireless links,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.62, no.1, pp.192-204, Jan. 2013.

Επιπρόσθετα, διατυπώθηκε το πρόβλημα της ενεργειακά αποδοτικής σχεδίασης των σύγχρονων δορυφορικών ζεύξεων, οι οποίες λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10 GHz, κάτω από συνθήκες βροχής και δεδομένων συγκεκριμένων απαιτήσεων QoS. Για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος προτάθηκε ένας *κατανεμημένος, κλιματικά εξαρτώμενος, ενεργειακά αποδοτικός ομορτιστικός χρονοπρογραμματιστής για δορυφορικά τερματικά που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10 GHz υπό συνθήκες βροχής*. Πιο συγκεκριμένα, εφαρμόζοντας τη θεωρία βέλτιστης παύσης, ο προτεινόμενος χρονοπρογραμματιστής αναβάλλει τη μετάδοση των δεδομένων μέχρι την εύρεση ευνοϊκών συνθηκών καναλιού σε όρους εξασθένησης λόγω βροχής, σύμφωνα με ένα βέλτιστο κανόνα παύσης. Ο μηχανισμός αξιολογήθηκε μέσω προσομοιώσεων για διαφορετικές παραμέτρους του συστήματος και τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι ο προτεινόμενος κλιματικά εξαρτώμενος χρονοπρογραμματιστής επιτυγχάνει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας σε σύγκριση με άλλους ευρετικούς μηχανισμούς και συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό ενεργειακά αποδοτικών δορυφορικών συστημάτων. Επιπλέον, η κλιματική σταθερότητα του χρονοπρογραμματιστή επαληθεύτηκε για διαφορετικές κλιματικές περιοχές και σενάρια χρονοπρογραμματισμού.

Αντίστοιχη Προκύπτουσα Δημοσίευση :

- Marios I. Poulakis, Athanasios D. Panagopoulos, “Climatic-dependent energy efficient design of satellite links operating above 10GHz: an optimal stopping approach,” *European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP '14)*, The Hague, NL, Apr. 2014.

Κεφάλαιο 5

Στο Κεφάλαιο 5, η Διδακτορική Διατριβή εστίασε στα προβλήματα διαχείρισης πόρων για διασφάλιση της QoS, δίνοντας έμφαση στα γνωστικά ασύρματα δίκτυα, τα οποία έχουν ως στόχο την αποδοτική χρήση του πεπερασμένου και υποχρησιμοποιούμενου ραδιοφάσματος. Αρχικά, αναλύθηκε η θεωρία των στατιστικών εγγυήσεων QoS και μελετήθηκε η έννοια της αποτελεσματικής χωρητικότητας. Η αποτελεσματική χωρητικότητα αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο σχεδίασης αποδοτικών μηχανισμών που παρέχουν στατιστικές εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας, αφού συσχετίζει το ρυθμό εξυπηρέτησης του ασύρματου καναλιού με την απόδοση ποιότητας υπηρεσιών του δικτύου. Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκε εκτενής βιβλιογραφική επισκόπηση των υπαρχόντων μηχανισμών διαχείρισης πόρων που κάνουν χρήση της αποτελεσματικής χωρητικότητας στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών, καθώς και ειδικότερα στα γνωστικά δίκτυα.

Αντίστοιχη Προκύπτουσα Δημοσίευση :

- Stavroula Vassaki, Marios I. Poulakis, Athanasios D. Panagopoulos, Philip Constantinou, “Resource allocation strategies in cognitive radio networks under QoS constraints” in “E-

volution of Cognitive Networks and Self-Adaptive Communication Systems”, IGI Global, 2013.

Έπειτα, για την underlay προσέγγιση των γνωστικών δικτύων, διατυπώθηκε το πρόβλημα βελτιστοποίησης της αποτελεσματικής χωρητικότητας των δευτερευόντων χρηστών, δεδομένου ενός περιορισμού μέσης παρεμβολής, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η επικοινωνία του πρωτεύοντα χρήστη. Για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος προτάθηκε ένας *κατανεμημένος μηχανισμός ελέγχου ισχύος για τον δευτερεύοντα χρήστη σε underlay γνωστικά δίκτυα*, ο οποίος *μεγιστοποιεί την αποτελεσματική χωρητικότητα του μέσω της κλασικής θεωρίας κυρτής βελτιστοποίησης*, δεδομένων περιορισμών ισχύος και παρεμβολής και λαμβάνοντας παράλληλα ρεαλιστικές υποθέσεις για τα ασύρματα κανάλια. Αναλυτικότερα, τα Nakagami- m κανάλια διαλείψεων των χρηστών θεωρήθηκαν ετεροσυσχετισμένα με στόχο τη σχεδίαση ενός ρεαλιστικού μηχανισμού ελέγχου ισχύος και τη μελέτη των επιπτώσεων της χωρικής συσχέτισης στην προτεινόμενη πολιτική ελέγχου. Δυο διαφορετικά σενάρια συσχέτισης θεωρήθηκαν (συσχέτιση λήψης και συσχέτιση εκπομπής) και εξετάστηκε το πως η παράμετρος της συσχέτισης επηρεάζει την αποτελεσματική χωρητικότητα και τη μέση κατανάλωση ισχύος του δευτερεύοντα χρήστη. Η απόδοση του προτεινόμενου μηχανισμού ελέγχου ισχύος αξιολογήθηκε μέσω προσομοιώσεων, για διαφορετικές απαιτήσεις και σενάρια συστήματος. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, τα οποία διαφοροποιήθηκαν ανάλογα με την ελαστικότητα των απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας και το μοντέλο συσχέτισης, κατέδειξαν την υψηλή σημασία της παραμέτρου QoS και του βαθμού συσχέτισης που εμφανίζουν οι ασύρματες ζεύξεις. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι η αύξηση του συντελεστή συσχέτισης μειώνει την αποτελεσματική χωρητικότητα για χαλαρές απαιτήσεις QoS, ενώ αντίθετα την αυξάνει για αυστηρές απαιτήσεις QoS, και για τα δυο μοντέλα συσχέτισης. Τέλος, όμοια συμπεριφορά προέκυψε για τη μέση κατανάλωση ισχύος, στην περίπτωση του μοντέλου συσχέτισης λήψης, ενώ για το μοντέλο συσχέτισης εκπομπής παρατηρείται η αντίστροφη συμπεριφορά.

Αντίστοιχες Προκύπτουσες Δημοσιεύσεις:

- Stavroula Vassaki, Marios I. Poulakis, Athanasios D. Panagopoulos, Philip Constantinou, “Optimal power allocation under QoS constraints in cognitive radio systems,” International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS '11), Aachen, DE, Nov. 2011.
- Marios I. Poulakis, Stavroula Vassaki, Athanasios D. Panagopoulos, Philip Constantinou, “Effects of spatial correlation on QoS-driven power allocation over Nakagami- m fading channels in cognitive radio systems,” Wiley Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2013.

Τέλος, για την interweave προσέγγιση γνωστικών δικτύων διατυπώθηκε το πρόβλημα του διαμοιρασμού του αχρησιμοποίητου αδειοδοτημένου φάσματος του πρωτεύοντα χρήστη μεταξύ πολλαπλών δευτερευόντων χρηστών. Για την επίλυση του προτάθηκε ένας *κατανεμημένος μηχανισμός διαμοιρασμού του πεπερασμένου διαθέσιμου φάσματος μεταξύ πολλαπλών δευτερευόντων χρηστών σε interweave γνωστικά δίκτυα*, ο οποίος *μεγιστοποιεί την αποτελεσματική χωρητικότητα του κάθε δευτερεύοντα χρήστη που έχει διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας*. Αναλυτικότερα, το μελετώμενο πρόβλημα μοντελοποιήθηκε ως ένα μη-συνεργατικό παίγνιο με ένα συζευγμένο περιορισμό,

που αντιστοιχεί σε ένα γενικευμένο πρόβλημα ισορροπίας Nash. Για να επιλυθεί το συγκεκριμένο πρόβλημα, επαναδιατυπώθηκε καινοφανώς ως ένα πρόβλημα ανισότητας μεταβολών, το οποίο αποδείχθηκε ότι έχει μοναδική λύση. Στη συνέχεια, προτάθηκε ένας κατανεμημένος επαναληπτικός αλγόριθμος για τον υπολογισμό του εκχωρούμενου εύρους ζώνης σε κάθε χρήστη. Ο προτεινόμενος μηχανισμός αξιολογήθηκε μέσω εκτενών προσομοιώσεων και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι προσφέρει σημαντική βελτίωση σε σχέση με ένα βασικό σχήμα διαμοιρασμού φάσματος, το οποίο δεν λαμβάνει υπόψη τις απαιτήσεις QoS των χρηστών. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι όσο οι απαιτήσεις ενός χρήστη σε QoS γίνονται αυστηρότερες μέχρι ένα κατώφλι, το εκχωρούμενο φάσμα στον χρήστη αυτόν αυξάνεται, ενώ μετά το κατώφλι, το εκχωρούμενο φάσμα μειώνεται για αυστηρότερες απαιτήσεις ποιότητας.

Αντίστοιχες Προκύπτουσες Δημοσιεύσεις:

- Marios I. Poulakis, Stavroula Vassaki, Athanasios D. Panagopoulos, Philip Constantinou, "QoS-driven spectrum sharing game in cognitive radio systems," 2nd International Summer School on Cognitive Wireless Communications Highlight on Game Theory, Paris, FR, Jul. 2012.
- Marios I. Poulakis, Stavroula Vassaki, Athanasios D. Panagopoulos, Philip Constantinou, "QoS-driven spectrum sharing game in cognitive radio systems: a variational inequality approach," Wiley Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2014.

6.2 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Η ερευνητική προσπάθεια της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής ήταν εκτενής και διεξοδική με αποτέλεσμα την πρόταση καινοτόμων και αποδοτικών μηχανισμών χρονοπρογραμματισμού και διαχείρισης πόρων για διασφάλιση ποιότητας υπηρεσίας σε ασύρματα συστήματα. Παρ' όλα αυτά, στη συγκεκριμένη ερευνητική ενότητα παραμένουν ανοικτά πεδία έρευνας, μερικά από τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια, ως προτάσεις για μελλοντική έρευνα. Αρχικά, παρουσιάζονται ορισμένα θέματα επέκτασης των προβλημάτων που μελετήθηκαν στην παρούσα Διδακτορική Διατριβή, ενώ στη συνέχεια περιγράφονται κάποια γενικότερα ανοικτά θέματα που εμφανίζονται στα προβλήματα διαχείρισης πόρων των ασύρματων δικτύων.

Όσον αφορά την επέκταση των μελετηθέντων προβλημάτων, προτείνονται τα ακόλουθα:

- Οι προτεινόμενοι ενεργειακά αποδοτικοί μηχανισμοί ομορτυνιστικού χρονοπρογραμματισμού, καθώς και ο προτεινόμενος μηχανισμός ελέγχου ισχύος για underlay γνωστικά δίκτυα μπορούν να επεκταθούν σε συστήματα πολλαπλών χρηστών. Στα συστήματα αυτά είτε θα συνυπολογίζεται η συναθροιζόμενη παρεμβολή (aggregate interference) στην ανάλυση εισάγοντας πρόσθετους περιορισμούς παρεμβολής, είτε θα ενσωματώνονται σχήματα τυχαίας πρόσβασης για την πραγματοποίηση της πρόσβασης των χρηστών. Μια ανάλυση τέτοιου είδους αποτελεί ένα σημαντικό ερευνητικό ζήτημα, το οποίο είναι ενδιαφέρον να μελετηθεί δεδομένων των διαφορετικών απαιτήσεων QoS των χρηστών.
- Όσον αφορά το μηχανισμό διαμοιρασμού του πεπερασμένου διαθέσιμου φάσματος σε interweave γνωστικά δίκτυα, σε μελλοντική ανάλυση μπορεί να θεωρηθεί το από κοινού πρόβλημα

διαμοιρασμού φάσματος και ελέγχου ισχύος. Επιπλέον, κρίνεται ενδιαφέρον να προταθούν αποδοτικοί αλγόριθμοι συνάθροισης φάσματος (spectrum aggregation), αφού τα φασματικά κενά που ανιχνεύονται από τους δευτερεύοντες χρήστες είναι πιθανό να είναι ασυνεχώς κατατημημένα, ειδικότερα σε προβλήματα με πολλαπλούς πρωτεύοντες χρήστες. Επιπρόσθετα, ενδιαφέρουσα προς μελέτη είναι και η αντίστοιχη περίπτωση για συνεργατικά παίγνια, όπου οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να συνεργαστούν μεταξύ τους. Η ενσωμάτωση των παραπάνω προτάσεων στην ανάλυση των μηχανισμών διαμοιρασμού φάσματος που διασφαλίζουν την QoS των χρηστών κρίνεται αρκετά ενδιαφέρουσα.

- Επιπρόσθετα, στην ανάλυση των προτεινόμενων μηχανισμών μπορούν να ενσωματωθούν πρόσθετα χαρακτηριστικά εξασθένησης ασύρματων καναλιών, όπως η σκίαση, η υψηλή κινητικότητα των χρηστών, οι απώλειες λόγω βλάστησης (ειδικότερα για τις δορυφορικές ζεύξεις) κλπ. Η ενσωμάτωση τους στη θεωρητική ανάλυση θα δώσει ακόμα πιο ρεαλιστικές προσεγγίσεις, προσφέροντας υψηλότερες αποδόσεις στο εκάστοτε σύστημα, σε συνθήκες πραγματικού περιβάλλοντος.

Τέλος, κάποια γενικότερα ανοικτά θέματα είναι τα εξής:

- Οι περισσότεροι μηχανισμοί που προτείνονται στη βιβλιογραφία θεωρούν ότι υπάρχει τέλεια γνώση του CSI, με αποτέλεσμα να μην λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της αβεβαιότητας που συναντάται στα ρεαλιστικά σενάρια. Επομένως, ένα βασικό θέμα που πρέπει να μελετηθεί είναι η ενσωμάτωση της ατελούς γνώσης των καναλιών εξασθένησης, καθώς και η μελέτη προδραστικών σχημάτων που θα ελαχιστοποιούν την επίδραση του ατελούς CSI στην απόδοση του συστήματος.
- Δεδομένου ότι τα συστήματα MIMO μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση μιας ασύρματης ζεύξης χωρίς την ανάγκη επιπλέον εύρους ζώνης ή ισχύος, η ενσωμάτωση της συγκεκριμένης τεχνολογίας σε προβλήματα βελτιστοποίησης διαχείρισης πόρων είναι πολύ σημαντική, αλλά και δύσκολη λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητας που εισάγει. Συνεπώς, η μελέτη μηχανισμών διαχείρισης κεραιών και η ενσωμάτωση τους σε υπάρχοντες μηχανισμούς αποτελεί ενδιαφέρουσα πρόκληση.
- Επιπρόσθετα, η υλοποίηση των μηχανισμών διαχείρισης πόρων σε συνθήκες πραγματικού περιβάλλοντος και η πραγματοποίηση πειραματικών καμπανιών, αποτελεί ένα καίριο πεδίο έρευνας, αφού σε πραγματικά περιβάλλοντα εμφανίζονται σημαντικές διαφορές σε σχέση με τα σενάρια προσομοίωσης. Αυτό είναι ευνόητο, λόγω της επίδρασης του επιπλέον overhead που θα προκαλείται από την ανταλλαγή μηνυμάτων, ειδικότερα στην περίπτωση πολλαπλών χρηστών, με αποτέλεσμα η πραγματική απόδοση των μηχανισμών να διαφέρει σε σχέση με την αναμενόμενη απόδοση.
- Τα τελευταία χρόνια, η θεωρία βέλτιστης παύσης έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται στη διαχείριση πόρων των ασύρματων δικτύων, αφού αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για επίλυση προβλημάτων χρονικής βελτιστοποίησης. Συνεπώς, η θεωρία αυτή μπορεί να εφαρμοστεί για την επίλυση άλλων προβλημάτων διαχείρισης πόρων, στα οποία ζητείται η εύρεση της βέλτιστης χρονικής στιγμής για να πραγματοποιηθεί μια ενέργεια μετά από διαδοχικό έλεγχο

καταστάσεων (π.χ. του καναλιού, της παρεμβολής, της δραστηριότητας ενός χρήστη) με στόχο τη βελτιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης. Για παράδειγμα, η θεωρία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση της μέσης ρυθμοαπόδοσης ενός συστήματος ή του λόγου δυο μέσων μεγεθών του συστήματος, όπως είναι η μέση ρυθμοαπόδοση προς τη μέση ενέργεια.

- Τέλος, παρόλο που η θεωρία ανισοτήτων μεταβολών αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για την επίλυση καταναμημένων προβλημάτων διαχείρισης πόρων που εμφανίζουν περιορισμούς, η θεωρία αυτή έχει χρησιμοποιηθεί ελάχιστα για την επίλυση προβλημάτων ασύρματων δικτύων, όπως φαίνεται στη βιβλιογραφία. Συνεπώς, η θεωρία ανισοτήτων μεταβολών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση προβλημάτων, με αλληλεπιδράσεις μεταξύ των χρηστών όπου το σύνολο των στρατηγικών του κάθε παίκτη εξαρτάται από των υπολοίπων, τα οποία δεν μπορούν να επιλυθούν με την κλασική θεωρία παιγνίων.

Συνεπώς, υπάρχουν ακόμα αρκετά ανοιχτά θέματα σε αυτή την ερευνητική περιοχή, τα οποία πρέπει να μελετηθούν προκειμένου να προκύψουν ρεαλιστικοί, αποδοτικοί μηχανισμοί για τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών.

Παράρτημα Α΄

Κατανομές Ασύρματων Καναλιών

Τα ασύρματα κανάλια συνήθως μοντελοποιούνται από συγκεκριμένες στατιστικές κατανομές (Simon & Alouini, 2005; Stüber, 2002; Shankar, 2012). Οι πιο συνηθισμένες κατανομές είναι οι Rayleigh, Rice, Nakagami- m , Lognormal και η Log-lognormal κατανομή, οι οποίες είναι ευρέως χρησιμοποιούμενες. Σημειώνεται ότι οι κατανομές αυτές αφορούν την pdf που ακολουθούν οι συντελεστές καναλιού ή αλλιώς τα πλάτη του καναλιού $g \geq 0$, δηλαδή αναφέρονται στην $f_G(g)$. Ωστόσο, επειδή συχνά χρησιμοποιείται το κέρδος ισχύος του καναλιού $h = |g|^2 \geq 0$, η αντίστοιχη pdf μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$f_H(h) = \frac{f_G(\sqrt{h})}{2\sqrt{h}} \quad (\text{A.1})$$

Για σταθερή εκπεμπόμενη ισχύ B , η κατανομή της λαμβανόμενης ισχύος p_r στο δέκτη ακολουθεί την ίδια κατανομή με το κανάλι, δηλαδή $f_{P_r}(p_r) = f_H(p_r/B)/B$. Επιπρόσθετα, ορισμένες φορές είναι χρήσιμο να υπολογιστεί η κατανομή της εκπεμπόμενης ισχύος p_t του πομπού δεδομένης σταθερής ισχύος λήψης A στο δέκτη. Για την περίπτωση αυτή ισχύει

$$f_{P_t}(p_t) = \frac{A}{p_t^2} \cdot f_H\left(\frac{A}{p_t}\right) \quad (\text{A.2})$$

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι συνήθεις κατανομές καναλιού που χρησιμοποιήθηκαν στην Διδακτορική Διατριβή.

Κατανομή Rayleigh

Η κατανομή Rayleigh χαρακτηρίζει τα κανάλια πολυδιαδρομικών διαλείψεων και θεωρεί ότι δεν υπάρχει καμία διαδρομή LoS μεταξύ πομπού και δέκτη. Οι pdfs για το πλάτος και το κέρδος ισχύος του καναλιού δίνονται αντίστοιχα ως εξής:

$$f_G(g) = \frac{g}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{g^2}{2\sigma^2}\right) \quad \text{και} \quad f_H(h) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{h}{2\sigma^2}\right)$$

όπου το σ προκύπτει από το μέσο κέρδος ισχύος καναλιού $\mathcal{E}[h] = 2\sigma^2$. Συνεπώς, η $f_H(h)$ αντιστοιχεί στην εκθετική κατανομή.

Κατανομή Rice

Η κατανομή Rice χαρακτηρίζει τα κανάλια πολυδιαδρομικών διαλείψεων και θεωρεί ότι υπάρχει διαδρομή LoS μεταξύ πομπού και δέκτη. Οι pdfs για το πλάτος και το κέρδος ισχύος του καναλιού δίνονται αντίστοιχα ως εξής:

$$f_G(g) = \frac{g}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{s^2}{2\sigma^2} - \frac{g^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{sg}{\sigma^2}\right) \quad \text{και} \quad f_H(h) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{s^2}{2\sigma^2} - \frac{h}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{s\sqrt{h}}{\sigma^2}\right)$$

όπου το $I_0(\cdot)$ είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel πρώτου είδους μηδενικής τάξης, το s είναι η παράμετρος μη κεντρικότητας και το σ προέρχεται από το μέσο κέρδος ισχύος καναλιού $\mathcal{E}[h] = s^2 + 2\sigma^2$. Σημειώνεται ότι ο K -παράγοντας της Rice δίνεται ως εξής $K = s^2/(2\sigma^2)$. Συνεπώς, η $f_H(h)$ αντιστοιχεί στη μη-κεντρικοποιημένη χ^2 κατανομή με δυο βαθμούς ελευθερίας.

Κατανομή Nakagami- m

Η κατανομή Nakagami- m χαρακτηρίζει τα κανάλια πολυδιαδρομικών διαλείψεων και μοντελοποιεί το κανάλι ανάλογα με τη δριμύτητα των διαλείψεων. Η κατανομή αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως γενικευμένη περίπτωση των προηγούμενων δυο και οι pdfs για το πλάτος και το κέρδος ισχύος του καναλιού δίνονται αντίστοιχα ως εξής:

$$f_G(g) = \frac{2g^{2m-1} \cdot \exp\left(-\frac{g^2}{\beta}\right)}{\beta^m \Gamma(m)} \quad \text{και} \quad f_H(h) = \frac{h^{m-1} \cdot \exp\left(-\frac{h}{\beta}\right)}{\beta^m \Gamma(m)}$$

όπου η $\Gamma(\cdot)$ είναι η συνάρτηση Γάμμα $\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt$, με $\text{Re}(z) > 0$ (Gradshteyn & Ryzhik, 2007), το $\beta = \mathcal{E}[h]/m > 0$ είναι η παράμετρος κλίμακας (scale parameter) και το $m \geq 0.5$ είναι η παράμετρος μορφοποίησης διαλείψεων (fading-shape parameter), η οποία αντιπροσωπεύει τη δριμύτητα των διαλείψεων μέσω της συνεισφοράς της συνιστώσας οπτικής επαφής σε σχέση με την πολυδιαδρομική συνιστώσα. Πιο συγκεκριμένα, το $m_i = 0.5$ αντιπροσωπεύει κανάλια που εμφανίζουν ισχυρές διαλείψεις όπως οι μονόπλευρες γκαουσιανές διαλείψεις (one-sided Gaussian fading), το $m_i = 1$ αντιστοιχεί σε Rayleigh κανάλια διαλείψεων, το $m_i > 1$ οδηγεί σε προσεγγίσεις Rician και Lognormal καναλιών διαλείψεων και τέλος το $m_i \rightarrow +\infty$ αντιπροσωπεύει τα AWGN κανάλια χωρίς διαλείψεις. Επιπρόσθετα, όπως παρατηρείται, η $f_H(h)$ αντιστοιχεί στην κατανομή Γάμμα.

Διδιάστατη Κατανομή Nakagami- m

Για δυο συσχετισμένες μεταβλητές g_1, g_2 με κοινή παράμετρο μορφοποίησης διαλείψεων m και παραμέτρους κλίμακας $\beta_1, \beta_2 > 0$, οι από κοινού pdfs για το πλάτος και το κέρδος ισχύος του

καναλιού δίνονται αντίστοιχα ως εξής (Song et al., 2009; Holm & Alouini, 2004):

$$f_{G_1, G_2}(g_1, g_2 | \rho) = \frac{4(g_1 g_2)^m \cdot \exp\left(-\frac{g_1^2}{\beta_1(1-\rho)} - \frac{g_2^2}{\beta_2(1-\rho)}\right)}{(\beta_1 \beta_2)^{\frac{m+1}{2}} \Gamma(m)(1-\rho)\rho^{\frac{m-1}{2}}} \cdot I_{m-1}\left(\frac{2\sqrt{\rho}}{1-\rho} \frac{g_1 g_2}{\sqrt{\beta_1 \beta_2}}\right) \quad \text{και}$$

$$f_{H_1, H_2}(h_1, h_2 | \rho) = \frac{(h_1 h_2)^{\frac{m-1}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{h_1}{\beta_1(1-\rho)} - \frac{h_2}{\beta_2(1-\rho)}\right)}{(\beta_1 \beta_2)^{\frac{m+1}{2}} \Gamma(m)(1-\rho)\rho^{\frac{m-1}{2}}} \cdot I_{m-1}\left(\frac{2\sqrt{\rho}}{1-\rho} \sqrt{\frac{h_1 h_2}{\beta_1 \beta_2}}\right)$$

όπου η $I_{m-1}(\cdot)$ είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel πρώτου είδους και $m - 1$ τάξης, τα $\beta_1 = \mathcal{E}[h_1]/m$ και $\beta_2 = \mathcal{E}[h_2]/m$ είναι οι παράμετροι κλίμακας και το $\rho \in (0, 1)$ είναι ο συντελεστής συσχέτισης. Όπως παρατηρείται, η $f_H(h)$ αντιστοιχεί στη διδιάστατη κατανομή Γάμμα.

Κατανομή Lognormal

Η κατανομή Lognormal χαρακτηρίζει τα κανάλια σκίασης τα οποία σε dB ακολουθούν την κανονική κατανομή. Οι pdfs για το πλάτος και το κέρδος ισχύος του καναλιού δίνονται αντίστοιχα ως εξής:

$$f_G(g) = \frac{2\zeta}{g\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(2\zeta \ln(g) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad \text{και} \quad f_H(h) = \frac{\zeta}{h\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(\zeta \ln(h) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]$$

όπου $\zeta = 10/\ln 10$, ενώ τα μ και σ είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του καναλιού σε dB, αντίστοιχα.

Κατανομή Log-lognormal

Η κατανομή Log-lognormal χαρακτηρίζει συνήθως τα κανάλια βροχής, όπου η εξασθένιση λόγω βροχής σε dB ακολουθεί την Lognormal κατανομή. Οι pdfs για το πλάτος και το κέρδος ισχύος του καναλιού δίνονται αντίστοιχα ως εξής:

$$f_G(g) = \frac{-1}{g \ln(g) \sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(\ln(2\xi \ln(g)) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad g \in (0, 1) \quad \text{και}$$

$$f_H(h) = \frac{-1}{h \ln(h) \sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(\ln(\xi \ln(h)) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad h \in (0, 1)$$

όπου $\xi = -10/\ln 10$, ενώ τα $\mu = \ln A_m$ και $\sigma = S_a$ είναι οι στατιστικές παράμετροι του Lognormal καναλιού βροχής.

Παράρτημα Β'

Αποδείξεις Προτάσεων

Β'.1 Αποδείξεις Προτάσεων Κεφαλαίου 4

Β'.1.1 Απόδειξη της Πρότασης 4.1

Η ισοδυναμία των δυο εξισώσεων αποδεικνύεται ξεκινώντας από τη δεύτερη εξίσωση και πραγματοποιώντας τους παρακάτω υπολογισμούς:

$$\begin{aligned}
 A_{N_{\max}}(\lambda^*) = 0 &\Leftrightarrow \mathcal{E}[\min\{PT - \lambda^*T, A_{N_{\max}-1}(\lambda^*)\}] + e_c - \lambda^*\tau = 0 \\
 &\Leftrightarrow T \int_0^{P_{th,1}^*} p dF_P + P_{th,1}^*T - P_{th,1}^*F_P(P_{th,1}^*)T + e_c - \lambda^*\tau - \lambda^*T = 0 \\
 &\stackrel{(4.35)}{\Leftrightarrow} \sum_{k=1}^{N_{\max}} \left(\prod_{i=1}^{k-1} (1 - F_P(P_{th,i}^*)) \int_0^{P_{th,k}^*} p dF_P \right) T + e_c \left\{ \sum_{k=1}^{N_{\max}} \prod_{i=1}^{k-1} (1 - F_P(P_{th,i}^*)) + 1 \right\} - \\
 &\quad - \lambda^* \left\{ \sum_{k=1}^{N_{\max}} \prod_{i=1}^{k-1} (1 - F_P(P_{th,i}^*)) \tau + \tau + T \right\} = 0 \tag{B.1}
 \end{aligned}$$

Επιπλέον, μπορεί να αποδειχθεί ότι

$$\sum_{k=1}^{N_{\max}} \rho_k k = 1 + \sum_{k=1}^{N_{\max}} \prod_{i=1}^{k-1} (1 - F_P(P_{th,i})) \tag{B.2}$$

όπου $\rho_k = \prod_{i=1}^{k-1} (1 - F_P(P_{th,i})) F_P(P_{th,k})$. Συνεπώς, χρησιμοποιώντας την (B.2), η (B.1) μπορεί να μετασχηματιστεί ως εξής:

$$\begin{aligned}
 &\sum_{k=1}^{N_{\max}} \left(\rho_k^* \int_0^{P_{th,k}^*} \frac{p}{F_P(P_{th,k}^*)} dF_P \right) T + \left(\sum_{k=1}^{N_{\max}} \rho_k^* k \right) e_c - \lambda^* \left(\sum_{k=1}^{N_{\max}} \rho_k^* k \tau + T \right) = 0 \\
 &\stackrel{(4.33)}{\Leftrightarrow} \mathcal{E}[P_{N(\lambda^*)}T + N(\lambda^*)e_c] - \lambda^* \mathcal{E}[T_{N(\lambda^*)}] = 0 \Leftrightarrow V(\lambda^*) = 0
 \end{aligned}$$

□

Β'.1.2 Απόδειξη της Πρότασης 4.3

Η συνέχεια και η μονοτονία της $A_0(\lambda) = P_{\max}T - \lambda T$, ως προς λ , είναι προφανής. Συνεπώς, η απόδειξη επικεντρώνεται στα στάδια $j = 1, \dots, N_{\max}$ και χωρίζεται σε δυο μέρη. Αρχικά, μελετάται η συνέχεια της $A_j(\lambda)$ ως προς λ .

Για $j = 1$, ισχύει

$$A_1(\lambda) = \int_0^{P_{\max}} (pT - \lambda T) dF_P + e_c - \lambda\tau = \int_0^{P_{\max}} pT f_P(p) dp + e_c - \lambda T - \lambda\tau \quad (\text{B'.3})$$

Άρα, η $A_1(\lambda)$ είναι συνεχής ως προς λ .

Για κάθε $j = 2, \dots, N_{\max}$, αποδεικνύεται το εξής:

$$A_j(\lambda) = -T \int_0^{\frac{A_{j-1}(\lambda)}{T} + \lambda} F_P(p) dp + T \left(\frac{A_{j-1}(\lambda)}{T} + \lambda \right) + e_c - \lambda\tau - \lambda T \quad (\text{B'.4})$$

Είναι προφανές ότι η συνάρτηση $A_j(\lambda)$ αποτελεί σύνθεση συνεχών συναρτήσεων ως προς λ και συνεπώς η $A_j(\lambda)$ είναι συνεχής ως προς λ για κάθε $j = 0, \dots, N_{\max}$.

Στη συνέχεια, μελετάται η μονοτονία της $A_j(\lambda)$ ως προς λ και ισχύουν τα ακόλουθα.

Για $j = 1$,

$$A_1(\lambda) = \int_0^{P_{\max}} (pT - \lambda T) dF_P + e_c - \lambda\tau \quad (\text{B'.5})$$

άρα η $A_1(\lambda)$ είναι γνησίως φθίνουσα (\searrow) ως προς λ . Επιπλέον, το ίδιο ισχύει και για την

$$\frac{A_1(\lambda)}{T} + \lambda = \int_0^{P_{\max}} p dF_P + \frac{e_c}{T} - \lambda \frac{\tau}{T} \rightarrow \left(\frac{A_1(\lambda)}{T} + \lambda \right) \searrow \quad (\text{B'.6})$$

Για $j = 2$,

$$\begin{aligned} A_2(\lambda) &= \int_0^{\frac{A_1(\lambda)}{T} + \lambda} (pT - \lambda T) dF_P + \int_{\frac{A_1(\lambda)}{T} + \lambda}^{P_{\max}} A_1(\lambda) dF_P + e_c - \lambda\tau \stackrel{(\text{B'.4})}{=} \\ &= -T \int_0^{\frac{A_1(\lambda)}{T} + \lambda} F_P(p) dp + T \left(\frac{A_1(\lambda)}{T} + \lambda \right) + e_c - \lambda\tau - \lambda T \Rightarrow \\ A_2'(\lambda) &= T \left(\frac{A_1(\lambda)}{T} + \lambda \right)' \left[1 - F_P \left(\frac{A_1(\lambda)}{T} + \lambda \right) \right] - \tau - T < 0 \rightarrow A_2(\lambda) \searrow \quad (\text{B'.7}) \end{aligned}$$

$$\text{και} \quad \frac{A_2(\lambda)}{T} + \lambda = - \int_0^{\frac{A_1(\lambda)}{T} + \lambda} F_P(p) dp + \left(\frac{A_1(\lambda)}{T} + \lambda \right) + \frac{e_c}{T} - \lambda \frac{\tau}{T} \Rightarrow$$

$$\left(\frac{A_2(\lambda)}{T} + \lambda\right)' = \left(\frac{A_1(\lambda)}{T} + \lambda\right)' \left[1 - F_P\left(\frac{A_1(\lambda)}{T} + \lambda\right)\right] - \frac{\tau}{T} < 0 \rightarrow \left(\frac{A_2(\lambda)}{T} + \lambda\right) \searrow \quad (\text{B'.8})$$

Συνεπώς, επαγωγικά αποδεικνύεται ότι η $A_j(\lambda)$ είναι γνησίως φθίνουσα ως προς λ για κάθε $j = 0, \dots, N_{\max}$. □

Β'.1.3 Απόδειξη της Εξίσωσης (4.35)

Για να αποδειχθεί η (4.35), ακολουθείται η μέθοδος της οπισθοδρομικής επαγωγής. Αναλυτικότερα, δεδομένου ότι $P_{th, N_{\max}}(\lambda) = P_{\max}$ για $j = N_{\max}$, ισχύουν τα ακόλουθα:

Για $j = N_{\max} - 1$,

$$\begin{aligned} P_{th, N_{\max}-1}(\lambda) &= \lambda + \frac{A_1(\lambda)}{T} = \lambda + \mathcal{E}[\min\{P - \lambda, P_{\max} - \lambda\}] + \frac{e_c}{T} - \frac{\lambda\tau}{T} = \\ &= \int_0^{P_{\max}} p dF_P - \left(\frac{\lambda\tau}{T} - \frac{e_c}{T}\right) \end{aligned} \quad (\text{B'.9})$$

Για $j = N_{\max} - 2$,

$$\begin{aligned} P_{th, N_{\max}-2}(\lambda) &= \lambda + \frac{A_2(\lambda)}{T} = \lambda + \mathcal{E}[\min\{P - \lambda, P_{th, N_{\max}-1}(\lambda) - \lambda\}] + \frac{e_c}{T} - \frac{\lambda\tau}{T} = \\ &= \int_0^{P_{th, N_{\max}-1}(\lambda)} p dF_P + (1 - F_P(P_{th, N_{\max}-1}(\lambda))) \int_0^{P_{\max}} p dF_P - \\ &- \left(\frac{\lambda\tau}{T} - \frac{e_c}{T}\right) [1 + (1 - F_P(P_{th, N_{\max}-1}(\lambda)))] \end{aligned} \quad (\text{B'.10})$$

Για $j = N_{\max} - 3$,

$$\begin{aligned} P_{th, N_{\max}-3}(\lambda) &= \lambda + \frac{A_3(\lambda)}{T} = \lambda + \mathcal{E}[\min\{P - \lambda, P_{th, N_{\max}-2}(\lambda) - \lambda\}] + \frac{e_c}{T} - \frac{\lambda\tau}{T} = \\ &= \int_0^{P_{th, N_{\max}-2}(\lambda)} p dF_P + (1 - F_P(P_{th, N_{\max}-2}(\lambda))) \int_0^{P_{th, N_{\max}-1}(\lambda)} p dF_P + \\ &+ (1 - F_P(P_{th, N_{\max}-2}(\lambda))) (1 - F_P(P_{th, N_{\max}-1}(\lambda))) \int_0^{P_{\max}} p dF_P - \left(\frac{\lambda\tau}{T} - \frac{e_c}{T}\right) \times \\ &\times [1 + (1 - F_P(P_{th, N_{\max}-2}(\lambda))) + (1 - F_P(P_{th, N_{\max}-2}(\lambda))) (1 - F_P(P_{th, N_{\max}-1}(\lambda)))] \end{aligned} \quad (\text{B'.11})$$

Συνεπώς, επαγωγικά αποδεικνύεται ότι τα κατώφλια ισχύος δίνονται από την (4.35) για $j = 1, \dots, N_{\max} - 1$. □

Β.2 Αποδείξεις Προτάσεων Κεφαλαίου 5

Β.2.1 Απόδειξη της Πρότασης 5.1

Εύκολα αποδεικνύεται ότι η συνάρτηση $-R(P_s)$ είναι γνησίως κυρτή ως προς το P_s . Συνεπώς, η συνάρτηση $e^{-\theta R(P_s)}$ είναι γνησίως λογαριθμοκυρτή ως προς το P_s και κατ' επέκταση το ίδιο ισχύει και για την $\mathcal{E}[e^{-\theta R(P_s)}]$ (Boyd & Vandenberghe, 2004). Ως εκ τούτου, η $\ln(\mathcal{E}[e^{-\theta R(P_s)}])$ είναι γνησίως κυρτή και η $-\ln(\mathcal{E}[e^{-\theta R(P_s)}])$ είναι γνησίως κοίλη ως προς το P_s . Επομένως, το (Π.5.1) αποτελεί ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης με διπλά συνεχώς διαφορίσιμη και γνησίως κοίλη αντικειμενική συνάρτηση, στο κυρτό και συμπαγές σύνολο που ανήκει το P_s , δεδομένου ενός γραμμικού περιορισμού ως προς το P_s . Συνεπώς, το πρόβλημα (Π.5.1) έχει μοναδική λύση.

Δεδομένου ότι η συνάρτηση $\ln(\cdot)$ είναι γνησίως αύξουσα, το πρόβλημα μεγιστοποίησης (Π.5.1) μπορεί να μετατραπεί στο ακόλουθο πρόβλημα ελαχιστοποίησης, το οποίο έχει την ίδια μοναδική λύση:

$$\begin{aligned} \min_{P_s} & \left\{ \mathcal{E}_{\tilde{h}|\rho} \left[\left(1 + \frac{P_s h_s}{P_p h_{ps} + N_0 B} \right)^{-a(\theta)} \right] \right\} \\ \text{s.t.} & \quad 0 \leq P_s \leq P_{\max} \\ & \quad \mathcal{E}_{\tilde{h}|\rho} [h_{sp} P_s] \leq I_{\max} \end{aligned} \quad (\text{Π.Β'.1})$$

Για να επιλυθεί το (Π.Β'.1), διατυπώνεται η συνάρτηση Lagrange ως εξής:

$$\mathcal{L}(P_s, \lambda_0) = \mathcal{E}_{\tilde{h}|\rho} \left[\left(1 + \frac{P_s h_s}{P_p h_{ps} + N_0 B} \right)^{-a(\theta)} \right] + \lambda_0 \left(\mathcal{E}_{\tilde{h}|\rho} [h_{sp} P_s] - I_{\max} \right) \quad (\text{Β'.12})$$

Επιπρόσθετα, η βέλτιστη λύση θα πρέπει να ικανοποιεί την ακόλουθη εξίσωση, η οποία παράγεται από την εξίσωση Euler-Lagrange (Zeidler et al., 2004):

$$\left[-a(\theta) \left(\frac{h_s}{P_p h_{ps} + N_0 B} \right) \left(1 + \frac{P_s h_s}{P_p h_{ps} + N_0 B} \right)^{-a(\theta)-1} + \lambda_0 h_{sp} \right] = 0 \quad (\text{Β'.13})$$

Συνεπώς, λύνοντας την (Β'.13) για $0 \leq P_s \leq P_{\max}$ προκύπτει η βέλτιστη πολιτική ελέγχου ισχύος που μεγιστοποιεί την αποτελεσματική χωρητικότητα, η οποία δίνεται ως εξής:

$$P_s^{opt} = \begin{cases} 0, & \text{για } h_{sp} \geq h_1 \\ \left(\frac{a(\theta)}{\lambda_0(\rho) h_{sp}} \right)^{\frac{1}{1+a(\theta)}} \cdot \left(\frac{P_p h_{ps} + N_0 B}{h_s} \right)^{\frac{a(\theta)}{1+a(\theta)}} - \frac{P_p h_{ps} + N_0 B}{h_s}, & \text{για } h_0 < h_{sp} < h_1 \\ P_{\max}, & \text{για } h_{sp} \leq h_0 \end{cases} \quad (\text{Β'.14})$$

όπου το $h_0 = \frac{a(\theta) h_s}{\lambda_0(\rho)(P_p h_{ps} + N_0 B)} \left[\frac{P_{\max} h_s}{P_p h_{ps} + N_0 B} + 1 \right]^{-(\alpha(\theta)+1)}$, το $h_1 = \frac{a(\theta) h_s}{\lambda_0(\rho)(P_p h_{ps} + N_0 B)}$ και το $\lambda_0(\rho)$ υπολογίζεται λύνοντας την εξίσωση που προκύπτει από την ισότητα του περιορισμού (5.18). \square

Β.2.2 Απόδειξη της Πρότασης 5.2

Εύκολα αποδεικνύεται ότι η συνάρτηση $R(B_i)$ είναι κοίλη ως προς το B_i και επομένως η σύνθετη συνάρτηση $g_i(B_i, \theta_i)$ είναι κυρτή ως προς το B_i (Boyd & Vandenberghe, 2004). Συνεπώς, για τα

μη κενά, κλειστά και κυρτά σύνολα $[0, B'_{tot}]$ και $Q_i(\mathbf{B}_{-i})$, τη διπλά συνεχώς διαφορίσιμη και κυρτή συνάρτηση $g_i(B_i, \theta_i)$ ως προς $B_i \in Q_i(\mathbf{B}_{-i})$, την συνεχώς διαφορίσιμη και από κοινού κυρτή (αφινική) συνάρτηση $h(\mathbf{B})$ ως προς το \mathbf{B} και δεδομένου ότι ισχύουν οι συνθήκες κανονικότητας (constraint qualifications) του Abadie για όλα τα στοιχεία σε κάθε σύνολο $Q_i(\mathbf{B}_{-i})$, ισχύουν τα ακόλουθα:

- Το $\bar{\mathbf{B}}$ είναι λύση του GNEP $\bar{\mathcal{G}}_{QSS}$ αν και μόνο αν υπάρχουν πολλαπλασιαστές $\bar{\lambda}_i \in \mathbb{R}$ τέτοιοι ώστε να ικανοποιείται το σύστημα KKT, το οποίο προσιπτει με την εφαρμογή της εξίσωσης Euler-Lagrange (Zeidler et al., 2004):

$$\begin{aligned} \nabla_{B_i} g_i(\bar{B}_i, \theta_i) + \bar{\lambda}_i \nabla_{B_i} h(\bar{\mathbf{B}}) &= 0 \\ 0 \leq \bar{\lambda}_i \perp h(\bar{\mathbf{B}}) &\leq 0^1 \end{aligned} \quad \forall i = 1, \dots, N_s \quad (\text{B'.15})$$

- Το \mathbf{B}^* είναι λύση του προβλήματος VI(\mathbf{Q}, \mathbf{F}) αν και μόνο αν υπάρχει πολλαπλασιαστής $\lambda^* \in \mathbb{R}$ τέτοιος ώστε να ικανοποιείται το ακόλουθο σύστημα KKT:

$$\begin{aligned} \nabla_{B_i} g_i(B_i^*, \theta_i) + \lambda^* \nabla_{B_i} h(\mathbf{B}^*) &= 0 \\ 0 \leq \lambda^* \perp h(\mathbf{B}^*) &\leq 0 \end{aligned} \quad \forall i = 1, \dots, N_s \quad (\text{B'.16})$$

Συγκρίνοντας τα δυο παραπάνω συστήματα KKT, φαίνεται ότι το σύστημα (B'.16) είναι μια ειδική περίπτωση του (B'.15) για $\bar{\lambda}_i = \lambda^*, \forall i = 1, \dots, N_s$. Συνεπώς, η λύση του GNEP είναι ίση με τη λύση του προβλήματος VI αν και μόνο αν οι πολλαπλασιαστές όλων των παικτών του κοινού περιορισμού είναι ίδιοι. Γενικότερα, αυτές οι λύσεις ονομάζονται λύσεις μεταβολών ή κανονικοποιημένες λύσεις (variational or normalized solutions). Συνεπώς, κάθε λύση του προβλήματος VI(\mathbf{Q}, \mathbf{F}) είναι και λύση του GNEP $\bar{\mathcal{G}}_{QSS}$.

Όσον αφορά τη μοναδικότητα της λύσης του VI, αποδεικνύεται ότι ο Jacobian πίνακας της \mathbf{F} $\mathcal{J}_{\mathbf{F}}$ είναι ισχυρά ή ομοιόμορφα θετικά ορισμένος (strongly or uniformly positive definite) για όλα τα $\mathbf{B} \in \mathbf{Q}$, δηλαδή υπάρχει σταθερά $c_{sm} > 0$, τέτοια ώστε

$$\mathbf{y}^T \mathcal{J}_{\mathbf{F}}(\mathbf{B}) \mathbf{y} \geq c_{sm} \|\mathbf{y}\|^2, \quad \forall \mathbf{y} \in \mathbb{R}^{N_s} \text{ για όλα τα } \mathbf{B} \in \mathbf{Q} \quad (\text{B'.17})$$

Λόγω της κυρτότητας του g_i ως προς το B_i , μπορεί να επιλεγεί $c_{sm} = \min\{\partial^2 g_i(B_i, \theta_i) / \partial B_i^2\}_{i=1}^{N_s} > 0$. Συνεπώς, η συνεχής \mathbf{F} είναι ισχυρά μονότονη (strongly monotone) στο κλειστό και κυρτό \mathbf{Q} (Facchinei & Pang, 2003, Πρόταση 2.3.2) και αυτό έχει ως αποτέλεσμα το πρόβλημα VI να έχει μοναδική λύση (βλ. Θεώρημα 3.7), η οποία είναι και λύση του GNEP. □

¹ Για τα $\mathbf{z}, \mathbf{y} \in \mathbb{R}^n$, η $\mathbf{0} \leq \mathbf{z} \perp \mathbf{y} \leq \mathbf{0}$ σημαίνει ότι $\mathbf{z} \geq \mathbf{0}$, $\mathbf{y} \leq \mathbf{0}$ και $\mathbf{z}^T \mathbf{y} = \mathbf{0}$ (ορθογωνιότητα).

Βιβλιογραφία

- Κανελλόπουλος, Ι. (1999). *Σχεδίαση Μικροκυματικών Ζεύξεων*. ΕΠΙΣΕΥ.
- Κανάτας, Α., Κωνσταντίνου, Φ., & Πάντος, Γ. (2008). *Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών*. Παπασωτηρίου.
- Akin, S., & Gursoy, M. C. (2010). Effective capacity analysis of cognitive radio channels for quality of service provisioning. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 9(11), 3354–3364.
- Akin, S., & Gursoy, M. C. (2011). Performance analysis of cognitive radio systems under QoS constraints and channel uncertainty. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 10(9), 2883–2895.
- Aktas, E., & Mitra, U. (2004). Semiblind channel estimation for CDMA systems with parallel data and pilot signals. *IEEE Transactions on Communications*, 52(7), 1102–1112.
- Akyildiz, I. F., Lee, W.-Y., Vuran, M. C., & Mohanty, S. (2008). A survey on spectrum management in cognitive radio networks. *IEEE Communications Magazine*, 46(4), 40–48.
- Bazaraa, M. S., Sherali, H. D., & Shetty, C. (2006). *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Berry, R. A., & Gallager, R. G. (2002). Communication over fading channels with delay constraints. *IEEE Transactions on Information Theory*, 48(5), 1135–1149.
- Bertsekas, D. P. (1999). *Nonlinear Programming*.
- Bhorkar, A., Karandikar, A., & Borkar, V. S. (2006). WLC39-3: Power optimal opportunistic scheduling. In *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '06)* (pp. 1–5). San Francisco, CA.
- Bithas, P. S., & Mathiopoulos, P. T. (2009). Capacity of correlated generalized Gamma fading with dual-branch selection diversity. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58(9), 5258–5663.
- Bolton, W., Xiao, Y., & Guizani, M. (2007). IEEE 802.20: mobile broadband wireless access. *IEEE Wireless Communications*, 14(1), 84–95.
- Bourdena, A., Pallis, E., Kormentzas, G., & Mastorakis, G. (2013). Efficient radio resource management algorithms in opportunistic cognitive radio networks. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*.
- Boyd, S. P., & Vandenberghe, L. (2004). *Convex Optimization*. Cambridge University Press.
- Cardei, M., Cardei, I., & Du, D.-Z. (2005). *Resource Management in Wireless Networking*. Springer.

- Chakraborty, S., Dong, Y., Yau, D. K., & Lui, J. C. (2006). On the effectiveness of movement prediction to reduce energy consumption in wireless communication. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 5(2), 157–169.
- Chang, C.-S. (1994). Stability, queue length, and delay of deterministic and stochastic queueing networks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 39(5), 913–931.
- Chang, C.-S. (2000). *Performance Guarantees in Communication Networks*. Springer.
- Chen, W., Neely, M. J., & Mitra, U. (2008). Energy-efficient transmissions with individual packet delay constraints. *IEEE Transactions on Information Theory*, 54(5), 2090–2109.
- Chen, Y., & Ling, C. (2010). Effect of correlated Nakagami-m fading on the ε -outage channel capacity of the decentralized two-relay network. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 9(12), 3607–3612.
- Chen, Y., Yu, G., Zhang, Z., Chen, H.-H., & Qiu, P. (2008). On cognitive radio networks with opportunistic power control strategies in fading channels. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7(7), 2752–2761.
- Cheng, W., Zhang, X., Zhang, H., & Wang, Q. (2011). On-demand based wireless resources trading for green communications. In *IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS '11)* (pp. 283–288). Shanghai, China.
- Chow, Y. S., Robbins, H., & Siegmund, D. (1971). *Great Expectations: The Theory of Optimal Stopping*. Houghton Mifflin Boston.
- Cordeiro, C., Challapali, K., Birru, D., & Sai Shankar, N. (2005). Ieee 802.22: the first worldwide wireless standard based on cognitive radios. In *1st ieee international symposium on new frontiers in dynamic spectrum access networks (dyspan '05)* (pp. 328–337).
- Cover, T. M., & Thomas, J. A. (2006). *Elements of Information Theory* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Dahlman, E., Parkvall, S., & Skold, J. (2011). *4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*. Academic Press.
- DeGroot, M. H. (2004). *Optimal Statistical Decisions*. John Wiley & Sons.
- Du, Q., & Zhang, X. (2009). QoS-driven power-allocation game over fading multiple-access channels. In *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '09)* (pp. 1–6).
- Du, Q., & Zhang, X. (2011). QoS-aware base-station selections for distributed mimo links in broadband wireless networks. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 29(6), 1123–1138.
- Duong, T. Q., Le, T.-T., & Zepernick, H.-J. (2010). Performance of cognitive radio networks with maximal ratio combining over correlated Rayleigh fading. In *3rd IEEE International Conference on Communications and Electronics (ICCE '10)* (pp. 65–69).
- El Ferkouss, O., & Ajib, W. (2012). Game theory based resource allocation for cognitive radio networks. In *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM '12)* (pp. 1174–1179).
- 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*, 1(3), 329–343.

- Facchinei, F., & Pang, J.-S. (2003). *Finite-Dimensional Variational Inequalities and Complementarity Problems* (Vol. 1 & 2). Springer.
- Fapojuwu, A. O., & Cano-Tinoco, A. (2009). Energy consumption and message delay analysis of QoS enhanced base station controlled dynamic clustering protocol for wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 8(10), 5366–5374.
- Farahani, S. (2008). *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*. Access Online via Elsevier.
- Ferguson, T. S. (2006). *Optimal Stopping and Applications*. Available online: <http://www.math.ucla.edu/~tom/Stopping/Contents.html>.
- Filip, M., & Vilar, E. (1990). Adaptive modulation as a fade countermeasure. An Olympus experiment. *International Journal of Satellite Communications*, 8(1), 31–41.
- Floudas, C. A., & Pardalos, P. M. (2009). *Encyclopedia of Optimization* (2nd ed.). Springer.
- Freeman, P. (1983). The secretary problem and its extensions: A review. *International Statistical Review/Revue Internationale de Statistique*, 51(2), 189–206.
- Fu, A., Modiano, E., & Tsitsiklis, J. N. (2006). Optimal transmission scheduling over a fading channel with energy and deadline constraints. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 5(3), 630–641.
- Fudenberg, D., & Tirole, J. (1991). *Game Theory*. MIT Press.
- Fukuchi, H., & Nakayama, T. (2004). Quantitative evaluation of time diversity as a novel attenuation mitigation technology for future high speed satellite communication. *IEICE Transactions on Communications*, 87(8), 2119–2123.
- Galindo-Serrano, A., Altman, E., & Giupponi, L. (2012). Equilibrium selection in interference management non-cooperative games in femtocell networks. In *6th International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools (VALUETOOLS '12)* (pp. 198–203).
- Garg, V. (2007). *Wireless Communications & Networking*. Morgan Kaufmann.
- Gelfand, I. M., & Fomin, S. V. (2000). *Calculus of Variations*. Courier Dover Publications.
- Gèulpinar, N., Harrison, P., & Rüstem, B. (2011). *Performance Models and Risk Management in Communications Systems* (Vol. 46). Springer.
- Ghasemi, A., & Sousa, E. S. (2007). Fundamental limits of spectrum-sharing in fading environments. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 6(2), 649–658.
- 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., & Chua, S.-G. (1997). Variable-rate variable-power MQAM for fading channels. *IEEE Transactions on Communications*, 45(10), 1218–1230.
- Goldsmith, A. J., & Varaiya, P. P. (1997). Capacity of fading channels with channel side information. *IEEE Transactions on Information Theory*, 43(6), 1986–1992.

- Gomez, G., & Sanchez, R. (2005). *End-to-End Quality of Service over Cellular Networks*. John Wiley & Sons.
- Gradshteyn, I., & Ryzhik, I. (2007). *Table of Integrals, Series, and Products* (7th ed.; A. edited by Jeffrey & D. Zwillinger, Eds.). Academic Press.
- Han, Z., Niyato, D., Saad, W., Basar, T., & Hjørungnes, A. (2012). *Game Theory in Wireless and Communication Networks*. Cambridge University Press.
- Harsini, J. S., & Lahouti, F. (2012). Effective capacity optimization for multiuser diversity systems with adaptive transmission. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 23(6), 567-584.
- Haykin, S. (2005). Cognitive radio: brain-empowered wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23(2), 201-220.
- Holm, H., & Alouini, M.-S. (2004). Sum and difference of two squared correlated Nakagami variates in connection with the McKay distribution. *IEEE Transactions on Communications*, 52(8), 1367-1376.
- Hong, M., & Garcia, A. (2010). Competitive sharing of the spectrum in cognitive radio network: A market equilibrium framework. In *8th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt '10)* (pp. 40-49).
- Hossain, E., Niyato, D., & Han, Z. (2009). *Dynamic Spectrum Access and Management in Cognitive Radio Networks*. Cambridge University Press.
- Huang, S., Liu, X., & Ding, Z. (2008). Short paper: On optimal sensing and transmission strategies for dynamic spectrum access. In *3rd IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN '08)* (pp. 1-5). Chicago, IL.
- Hwang, C.-S., Seong, K., & Cioffi, J. M. (2009). Improving power efficiency of CSMA wireless networks using multi-user diversity-[transaction letters]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 8(7), 3313-3319.
- IST-WINNER II. (2007). *Deliverable 1.1.2 v.1.2, WINNER II Channel Models* (Tech. Rep.). Retrieved from <http://www.ist-winner.org/deliverables.html>
- ITU-R Recommendation P.618-11. (2013). *Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems*.
- ITU-R Recommendation P.837-6. (2012). *Characteristics of precipitation for propagation modeling*.
- Izenman, A. J. (1991). Recent developments in nonparametric density estimation. *Journal of the American Statistical Association*, 86(413), 205-224.
- Jeon, H., Choi, J., Lee, H., & Ha, J. (2010). Channel-aware energy efficient transmission strategies for large wireless sensor networks. *IEEE Signal Processing Letters*, 17(7), 643-646.
- Jovicic, A., & Viswanath, P. (2009). Cognitive radio: An information-theoretic perspective. *IEEE Transactions on Information Theory*, 55(9), 3945-3958.
- Karasawa, Y., & Iwai, H. (2000). Formulation of spatial correlation statistics in nakagami-rice fading environments. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 48(1), 12-18.

- Karl, H., & Willig, A. (2005). *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons.
- Kazimierczuk, M. K. (2008). *RF Power Amplifiers*. John Wiley & Sons.
- Ko, Y.-C., & Alouini, M.-S. (2003). Estimation of nakagami-m fading channel parameters with application to optimized transmitter diversity systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2(2), 250–259.
- Kourogorgas, C., Panagopoulos, A. D., Livieratos, S. N., & Chatzarakis, G. E. (2013). On the outage probability prediction of time diversity scheme in broadband satellite communication systems. *Progress in Electromagnetics Research C*, 44, 175–184.
- Kyriazakos, S. A., & Karetzos, G. (2004). *Practical Radio Resource Management in Wireless Systems*. Artech House.
- Lai, L., & El Gamal, H. (2008). The water-filling game in fading multiple-access channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, 54(5), 2110–2122.
- Lee, B. G., Park, D., & Seo, H. (2009). *Wireless Communications Resource Management*. John Wiley & Sons.
- Lee, J., & Jindal, N. (2009). Energy-efficient scheduling of delay constrained traffic over fading channels. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 8(4), 1866–1875.
- Li, C.-p., & Neely, M. J. (2010). Energy-optimal scheduling with dynamic channel acquisition in wireless downlinks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 9(4), 527–539.
- Liu, K. R., Sadek, A. K., Su, W., & Kwasinski, A. (2009). *Cooperative Communications and Networking*. Cambridge University Press.
- Liu, K. R., & Wang, B. (2010). *Cognitive Radio Networking and Security: A Game-Theoretic View*. Cambridge University Press.
- Liu, X., Chong, E. K. P., & Shroff, N. B. (2001). Opportunistic transmission scheduling with resource-sharing constraints in wireless networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 19(10), 2053–2064.
- 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.
- Maini, A. K., & Agrawal, V. (2011). *Satellite Technology: Principles and Applications*. John Wiley & Sons.
- Makki, B., & Eriksson, T. (2011). On the capacity of Rayleigh-fading correlated spectrum sharing networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2011(83), 1–11.
- Mansour, Y., & Patt-Shamir, B. (2001). Jitter control in QoS networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 9(4), 492–502.
- Mao, L., Xu, S., Fu, T., & Huang, Q. (2012). Game theory based power allocation algorithm in high-speed mobile environment. In *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall '12)* (pp. 1–5).
- Masonta, M. T., Mzyece, M., & Ntlatlapa, N. (2013). Spectrum decision in cognitive radio networks: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(3), 1088–1107.

- Mitola III, J. (1999). Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications. In *IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications (MoMuC '99)* (pp. 3–10). San Diego, CA, USA.
- Molisch, A. F. (2011). *Wireless Communications* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Musavian, L., & Aïssa, S. (2010). Effective capacity of delay-constrained cognitive radio in Nakagami fading channels. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 9(3), 1054–1062.
- Musavian, L., Aïssa, S., & Lambbotharan, S. (2011). Adaptive modulation in spectrum-sharing channels under delay quality-of-service constraints. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60(3), 901–911.
- Nagurney, A. (1999). *Network economics: A variational inequality approach*. Kluwer Academic Publishers (Boston).
- Niyato, D., & Hossain, E. (2008). Competitive spectrum sharing in cognitive radio networks: a dynamic game approach. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7(7), 2651–2660.
- Nuggehalli, P., Srinivasan, V., & Rao, R. R. (2006). Energy efficient transmission scheduling for delay constrained wireless networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 5(3), 531–539.
- Osborne, M. J., & Rubinstein, A. (1994). *A Course in Game Theory*. MIT press.
- Panagopoulos, A. D., Arapoglou, P.-D., & Cottis, P. (2004). Satellite communications at Ku, Ka and V bands: Propagation impairments and mitigation Techniques. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 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.
- Pang, J.-S., Scutari, G., Palomar, D. P., & Facchinei, F. (2010). Design of cognitive radio systems under temperature-interference constraints: A variational inequality approach. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 58(6), 3251–3271.
- Papoulis, A., & Pillai, S. U. (2002). *Probability, Random Variables and Stochastic Processes* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Peng, M., & Wang, W. (2008). An adaptive energy saving mechanism in the wireless packet access network. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC '08)* (pp. 1536–1540). Las Vegas, USA.
- Peskir, G., & Shiryaev, A. (2006). *Optimal Stopping and Free-boundary Problems*. Springer.
- Poulakis, M., Vassaki, S., & Hadjiefthymiades, S. (2009). Proactive radio resource management using optimal stopping theory. In *10th IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks & Workshops (WoWMoM '09)* (pp. 1–6). Kos Island, Greece.
- Priggouris, I., Zervas, E., & Hadjiefthymiades, S. (2006). Location-Based Network Resource Management. In *Handbook of Research on Mobile Multimedia* (pp. 175–197). Idea Group Inc.
- 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.

- Rappaport, T. (2002). *Wireless Communications: Principles and Practice* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Ren, S., & Letaief, K. (2009). Maximizing the effective capacity for wireless cooperative relay networks with QoS guarantees. *IEEE Transactions on Communications*, 57(7), 2148–2159.
- Richharia, M., & Westbrook, L. D. (2010). *Satellite Systems for Personal Applications: Concepts and Technology*. John Wiley & Sons.
- Santi, P. (2012). *Mobility Models for Next Generation Wireless Networks: Ad Hoc, Vehicular and Mesh Networks*. John Wiley & Sons.
- Scutari, G., Palomar, D., Facchinei, F., & Pang, J.-S. (2010). Convex optimization, game theory, and variational inequality theory. *IEEE Signal Processing Magazine*, 27(3), 35–49.
- Scutari, G., Palomar, D. P., Facchinei, F., & Pang, J.-S. (2012). Monotone Games for Cognitive Radio Systems. In *Distributed Decision Making and Control* (pp. 83–112). Springer.
- Shankar, P. M. (2012). *Fading and shadowing in wireless systems*. Springer.
- Shen, X., & Agrawal, S. (2006). Kernel density estimation for an anomaly based intrusion detection system. In *International Conference on Modeling, Simulation & Visualization Methods (MLMTA '06)* (pp. 161–167). Las Vegas, USA.
- Shen, X., & Li, H. (2004). Kernel density estimation for wireless fading channels using slepian semi-wavelets. In *International Conference on Wireless Networks (ICWN '04)* (pp. 411–417). Las Vegas, Nevada, USA.
- Simon, M. K., & Alouini, M.-S. (2005). *Digital Communication over Fading Channels* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Smith, D. R. (1998). *Variational Methods in Optimization*. Courier Dover Publications.
- Song, H., Kwan, R., & Zhang, J. (2009). On statistical characterization of EESM effective SNR over frequency selective channels. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 8(8), 3955–3960.
- Soret, B., Aguayo-Torres, M. C., & Entrambasaguas, J. T. (2010). Capacity with explicit delay guarantees for generic sources over correlated rayleigh channel. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 9(6), 1901–1911.
- Stüber, G. L. (2002). *Principles of Mobile Communication* (2nd ed.). Kluwer Academic Publishers.
- Tanenbaum, A. S., & Wetherall, D. J. (2011). *Computer Networks* (Vol. 5). Prentice Hall.
- Tang, J., & Zhang, X. (2007a). Quality-of-Service driven power and rate adaptation over wireless links. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 6(8), 3058–3068.
- Tang, J., & Zhang, X. (2007b). Cross-layer modeling for quality of service guarantees over wireless links. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 6(12), 4504–4512.
- Tang, J., & Zhang, X. (2008). Cross-layer-model based adaptive resource allocation for statistical QoS guarantees in mobile wireless networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7(6), 2318–2328.
- Tarello, A., Sun, J., Zafer, M., & Modiano, E. (2008). Minimum energy transmission scheduling subject to deadline constraints. *Wireless Networks*, 14(5), 633–645.

- Tragos, E. Z., Zeadally, S., Fragkiadakis, A., & Siris, V. A. (2013). Spectrum assignment in cognitive radio networks: A comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(3), 1108–1135.
- Uysal-Biyikoglu, E., Prabhakar, B., & El Gamal, A. (2002). Energy-efficient packet transmission over a wireless link. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 10(4), 487–499.
- Van Brunt, B. (2004). *The Calculus of Variations* (Vol. 1). Springer.
- Van Phan, C., & Kim, J. G. (2007). An energy-efficient transmission strategy for wireless sensor networks. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC '07)* (pp. 3406–3411). Hong Kong.
- Vassaki, S., Panagopoulos, A. D., & Constantinou, P. (2012). Effective capacity and optimal power allocation for mobile satellite systems and services. *IEEE Communications Letters*, 16(1), 60–63.
- Verdú, S. (2002). Spectral efficiency in the wideband regime. *IEEE Transactions on Information Theory*, 48(6), 1319–1343.
- Wang, B., & Liu, K. R. (2011). Advances in cognitive radio networks: A survey. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 5(1), 5–23.
- Wang, C.-X., Hong, X., Ge, X., Cheng, X., Zhang, G., & Thompson, J. (2010). Cooperative MIMO channel models: a survey. *IEEE Communications Magazine*, 48(2), 80–87.
- Wang, Q., Hempstead, M., & Yang, W. (2006). A realistic power consumption model for wireless sensor network devices. In *IEEE Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON '06)* (Vol. 1, pp. 286–295).
- Wang, Q., Wu, D., & Fan, P. (2012). Effective capacity of a correlated Nakagami-m fading channel. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 12(14), 1225–1238.
- Wang, X., Li, Z., Xu, P., Xu, Y., Gao, X., & Chen, H.-H. (2010). Spectrum sharing in cognitive radio networks | an auction-based approach. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 40(3), 587–596.
- Wu, D., & Negi, R. (2003). Effective capacity: a wireless link model for support of quality of service. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2(4), 630–643.
- Xie, X., & Guo, W. (2011). Fundamental effective capacity limits of cognitive radio in fading environments with imperfect channel information. In *International Conference on Computational Problem-Solving (ICCP '11)* (pp. 232–235).
- Yang, X., & Vaidya, N. H. (2004). A wakeup scheme for sensor networks: achieving balance between energy saving and end-to-end delay. In *10th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS '04)* (pp. 19–26). Toronto, Canada.
- Ye, Z., Abouzeid, A. A., & Ai, J. (2009). Optimal stochastic policies for distributed data aggregation in wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 17(5), 1494–1507.
- Yoon, S.-G., Joo, C., & Bahk, S. (2011). Energy-efficient opportunistic scheduling schemes in wireless networks. *Computer Networks*, 55(9), 2168–2175.
- Yu, R., Zhang, Y., Sun, Z., & Mei, S. (2007). Energy and QoS aware packet forwarding in wireless sensor networks. In *IEEE International Conference on Communications (ICC '07)* (pp. 3277–3282). Glasgow, Scotland, UK.

- Yue, G., Zhou, X., & Wang, X. (2004). Performance comparisons of channel estimation techniques in multipath fading CDMA. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 3(3), 716-724.
- Zander, J., Kim, S.-L., Almgren, M., & Queseth, O. (2001). *Radio Resource Management for Wireless Networks*. Artech House, Inc.
- Zayen, B., Hayar, A., & Noubir, G. (2012). Game theory-based resource management strategy for cognitive radio networks. *Multimedia Tools and Applications*, 1-21.
- Zeidler, E., Hackbusch, W., Schwarz, H. R., & Hunt, B. (2004). *Oxford Users' Guide to Mathematics*. Oxford University Press.
- Zhang, Q., Chen, Q., Yang, F., Shen, X., & Niu, Z. (2007). Cooperative and opportunistic transmission for wireless ad hoc networks. *IEEE Network*, 21(1), 14-20.
- 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. *IEEE Communications Magazine*, 44(1), 100-106.
- Zheng, D., Cao, M., Zhang, J., & Kumar, P. (2008). Channel aware distributed scheduling for exploiting multi-receiver diversity and multiuser diversity in ad-hoc networks: a unified PHY/MAC approach. In *27th IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM '08)* (pp. 1454-1462).
- Zheng, D., Ge, W., & Zhang, J. (2009). Distributed opportunistic scheduling for ad hoc networks with random access: an optimal stopping approach. *IEEE Transactions on Information Theory*, 55(1), 205-222.
- Zheng, R., Hou, J. C., & Sha, L. (2003). Asynchronous wakeup for ad hoc networks. In *4th ACM International Symposium on Mobile ad hoc Networking & Computing (MobiHoc '03)* (pp. 35-45). Annapolis, USA.

Βιογραφικό Σημείωμα του Συγγραφέα



Ο Μάριος Ι. Πουλάκης γεννήθηκε στην Αθήνα το 1983. Είναι απόφοιτος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Η/Υ (ΣΗΜΜΥ) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ) με ειδίκευση στην κατεύθυνση Επικοινωνιών και βαθμό διπλώματος 8.06. Το 2008 απέκτησε μεταπτυχιακό δίπλωμα με θέμα «Διοίκηση & Οικονομική των Τηλεπικοινωνιακών δικτύων» από το Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών. Από τον Οκτώβριο του 2007 είναι επιστημονικός συνεργάτης στο Εργαστήριο Κινητών Ραδιοεπικοινωνιών (ΕΚΡ) του ΕΜΠ και έκτοτε έχει συμμετάσχει σε

διάφορα ερευνητικά ακαδημαϊκά προγράμματα όπως το πρόγραμμα βασικής έρευνας ΠΕΒΕ και το ευρωπαϊκό πρόγραμμα SatNEx III. Παράλληλα, έχει συμμετάσχει σε διάφορα αναπτυξιακά έργα όπως το πρόγραμμα ΠΕΔΙΟΝ24 που αφορά στην ανάπτυξη, εγκατάσταση και διαχείριση δικτύου μέτρησης της έντασης μη ιοντίζουσας Η/Μ ακτινοβολίας από κεραίες κινητής τηλεφωνίας και σε άλλα έργα μετρήσεων Η/Μ ακτινοβολίας και ποιοτικής ανάλυσης 2G-3G τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Επιπρόσθετα, έχει λάβει μέρος στις διαδικασίες των συστημάτων διαχείρισης ποιότητας ISO του ΕΚΡ. Την περίοδο από τον Νοέμβριο του 2008 μέχρι τον Αύγουστο του 2009 εκπλήρωσε τις στρατιωτικές του υποχρεώσεις στο Πολεμικό Ναυτικό.

Στη συνέχεια, από τον Οκτώβριο του 2009 ξεκίνησε την εκπόνηση της διδακτορικής του διατριβής στη ΣΗΜΜΥ του ΕΜΠ, ενώ έχει συμμετάσχει ενεργά στο εργαστηριακό προπτυχιακό μάθημα «Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες» της ΣΗΜΜΥ από το ακαδημαϊκό έτος 2009-2010 μέχρι το ακαδημαϊκό έτος 2012-2013, εκτελώντας επικουρικό διδακτικό έργο. Παράλληλα, από τον Αύγουστο του 2009 μέχρι τον Ιανουάριο του 2011, εργάστηκε ως μηχανικός RF στο γραφείο μη ιοντίζουσών ακτινοβολιών της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ), με αντικείμενο την εξέταση, γνωμάτευση και γνωμοδότηση τεχνικών μελετών ραδιοεκπομπών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων σταθμών κεραιών Η/Μ ακτινοβολίας σταθερής και κινητής τηλεφωνίας, καθώς και ραδιοτηλεοπτικών σταθμών. Τα ερευνητικά του ενδιαφέροντα επικεντρώνονται στις περιοχές των ασύρματων και δορυφορικών δικτύων, καθώς και των γνωστικών δικτύων, με έμφαση στη βελτιστοποίηση του χρονοπρογραμματισμού και της διαχείρισης πόρων για διασφάλιση της ποιότητας υπηρεσιών. Από τον Ιούλιο του 2010 έως τον Ιούνιο του 2013 ήταν υπότροφος του Ειδικού Λογαριασμού Κονδυλίων Έρευνας (ΕΛΚΕ) του ΕΜΠ. Έχει δημοσιεύσει 7 εργασίες σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά, 9 εργασίες σε διεθνή συνέδρια και 2 κεφάλαια σε διεθνή βιβλία. Έχει πολύ καλές γνώσεις σε γλώσσες προγραμματισμού όπως C, Java, JSP, Javascript, SQL, HTML, PHP, MatLab, Mathematica και L^AT_EX. Γνωρίζει πολύ καλά Αγγλικά και είναι μέλος του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος (ΤΕΕ) από το 2007 και της ΙΕΕΕ από το 2011, ενώ τέλος έχει αποτελέσει κριτής σε διάφορα διεθνή επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια των ΙΕΕΕ, EURASIP και Elsevier.

Δημοσιεύσεις του Συγγραφέα

Δημοσιεύσεις σε Επιστημονικά Περιοδικά με Κριτές

- Π.1 Stavroula Vassaki, **Marios I. Poulakis**, Athanasios D. Panagopoulos, Philip Constantinou, “QoS-driven power allocation under peak and average interference constraints in cognitive radio networks,” Springer Wireless Personal Communications, 2014.
- Π.2 **Marios I. Poulakis**, Stavroula Vassaki, Athanasios D. Panagopoulos, Philip Constantinou, “QoS-driven spectrum sharing game in cognitive radio systems: a variational inequality approach,” Wiley Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2014.
- Π.3 **Marios I. Poulakis**, Stavroula Vassaki, Athanasios D. Panagopoulos, Philip Constantinou, “Effects of spatial correlation on QoS-driven power allocation over Nakagami-m fading channels in cognitive radio systems,” Wiley Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2013.
- Π.4 Stavroula Vassaki, **Marios I. Poulakis**, Athanasios D. Panagopoulos, Philip Constantinou, “Power allocation in cognitive satellite terrestrial networks with QoS constraints,” IEEE Communications Letters, vol.17, no.7, pp.1344-1347, Jul. 2013.
- Π.5 N. Celandroni, E. Ferro, A. Gotta, G. Oligeri, C. Roseti, M. Luglio, I. Bisio, M. Cello, F. Davoli, A.D. Panagopoulos, **M. Poulakis**, S. Vassaki, T. de Cola, M.A. Marchitti, Y.-F. Hu, P. Pillai, S. Verma, K. Xu, G. Açar, “A survey of architectures and scenarios in satellite-based wireless sensor networks: system design aspects,” Wiley International Journal of Satellite Communications and Networking, vol.31, iss.1, pp.1-38, Jan./Feb. 2013.
- Π.6 **Marios I. Poulakis**, Athanasios D. Panagopoulos, Philip Constantinou, “Channel-aware opportunistic transmission scheduling for energy-efficient wireless links,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.62, no.1, pp.192-204, Jan. 2013.
- Π.7 M. Koletta, **M. Poulakis**, G. Tsalmas, P. Constantinou, “A software tool for the prediction of the interference produced by high-speed mobile satellite systems to the fixed service,” IOS Space Communications Journal, Special Issue on Satellite Networks for Mobile Services, vol.21, no.1-2, pp.83-98, Dec. 2007.

Δημοσιεύσεις σε Επιστημονικά Συνέδρια με Κριτές

- Σ.1 Stavroula Vassaki, **Marios I. Poulakis**, Athanasios D. Panagopoulos, “Game-theoretic spectrum trading mechanism for cognitive radio networks,” accepted to European Wireless Conference (EW '14), Barcelona, ES, May 2014.
- Σ.2 **Marios I. Poulakis**, Athanasios D. Panagopoulos, “Climatic-dependent energy efficient design of satellite links operating above 10GHz: an optimal stopping approach,” European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP '14), The Hague, NL, Apr. 2014.

- Σ.3 Stavroula Vassaki, **Marios I. Poulakis**, Athanasios D. Panagopoulos, Philip Constantinou, “An auction-based mechanism for spectrum leasing in overlay cognitive radio networks,” IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio (PIMRC '13), London, UK, Sep. 2013.
- Σ.4 **Marios I. Poulakis**, Stavroula Vassaki, Athanasios D. Panagopoulos, “Satellite-based wireless sensor networks: radio communication link design,” European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP '13), Gothenburg, SE, Apr. 2013.
- Σ.5 Stavroula Vassaki, **Marios Poulakis**, Athanasios D. Panagopoulos, Philip Constantinou, “Optimal power allocation under QoS constraints in cognitive radio systems,” International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS '11), Aachen, DE, Nov. 2011.
- Σ.6 **Marios Poulakis**, Stavroula Vassaki, Stathes Hadjiefthymiades, “Proactive radio resource management using optimal stopping theory,” IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM '09), Kos, GR, Jun. 2009.
- Σ.7 M. Koletta, **M. Poulakis**, G. Tsalmis, P. Constantinou, “The effect of mobility on the interference calculations between the mobile satellite service and the fixed service,” International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services (TELSIKS '07), Nis, RS, Sept. 2007.

Δημοσιεύσεις σε Ευρωπαϊκές Ερευνητικές Δράσεις COST

- Σ.8 **Marios I. Poulakis**, Stavroula Vassaki, Athanasios D. Panagopoulos, “A feasibility study of collaborative beamforming in satellite-based wireless sensor networks,” COST Action IC0802, MCM 8, DLR, Oberpfaffenhofen, DE, Nov. 2012.
- Σ.9 **Marios I. Poulakis**, Stavroula Vassaki, Athanasios D. Panagopoulos, Philip Constantinou, “QoS-driven spectrum sharing game in cognitive radio systems,” (*poster*) 2nd International Summer School on Cognitive Wireless Communications Highlight on Game Theory (COST Action IC0902), Paris, FR, Jul. 2012.

Δημοσιεύσεις σε Κεφάλαια Βιβλίων

- K.1 Stavroula Vassaki, **Marios I. Poulakis**, Athanasios D. Panagopoulos, Philip Constantinou, “Resource allocation strategies in cognitive radio networks under QoS constraints” in “Evolution of Cognitive Networks and Self-Adaptive Communication Systems”, IGI Global, 2013.
- K.2 **Marios I. Poulakis**, Athanasios D. Panagopoulos, Philip Constantinou, “Advanced energy efficient communication techniques for wireless ad hoc and sensor networks” in “Advances and Applications in Mobile Computing”, InTech, 2012.