



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

Πρόβλεψη και Αξιοποίηση Ασύρματων Διαύλων

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Αγγελική Β. Κορδαλή

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

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



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



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

Πρόβλεψη και Αξιοποίηση Ασύρματων Διαύλων

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Αγγελική Β. Κορδαλή

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Παναγιώτης Κωττής
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Γεώργιος Φικιώρης
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Συμεών Παπαβασιλείου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Αθανάσιος Παναγόπουλος
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Μιχαήλ Θεολόγου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Γεώργιος Ευθύμογλου
Αν. Καθηγητής Πανεπιστημίου
Πειραιώς

Αθήνα, Οκτώβριος 2015



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ
2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

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

.....
Αγγελική Β. Κορδαλή

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αγγελική Β. Κορδαλή, 2015.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Σκοπός της διατριβής είναι η μελέτη και ανάπτυξη μηχανισμών για τη πρόβλεψη και βέλτιστη διαχείριση ασυρμάτων διαύλων. Η ραγδαία αύξηση των χρηστών, των ασυρμάτων υπηρεσιών αλλά και των απαιτήσεών τους σε εύρος ζώνης, έχει καταστήσει αναγκαία τη βέλτιστη διαχείριση του ραδιοφάσματος. Προς τούτο έχουν προταθεί τα γνωστικά δίκτυα επικοινωνιών, τα οποία, μέσω ετερογενών αρχιτεκτονικών και εξελιγμένων τεχνικών πρόσβασης στο φάσμα, ανοίγουν νέες προοπτικές για την αξιοποίησή του. Τα γνωστικά δίκτυα επικοινωνιών προσφέρουν τη δυνατότητα σε δευτερεύοντες χρήστες να έχουν τη δυνατότητα πρόσβασης είτε σε μη αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων είτε σε ζώνες συχνοτήτων που έχουν αποδοθεί σε πρωτεύουσα βάση σε άλλους (πρωτεύοντες) χρήστες.

Η διδακτορική διατριβή χωρίζεται σε τρία μέρη. Το πρώτο μέρος εστιάζει στην εισαγωγή των βασικών εννοιών που πραγματεύεται η διατριβή και των εργαλείων που χρησιμοποιούνται για την επίλυση των προβλημάτων πρόβλεψης και διαχείρισης ασυρμάτων διαύλων. Αρχικά, πραγματοποιείται ανασκόπηση των γνωστικών επικοινωνιών και εισάγονται οι βασικές έννοιες στην περιοχή της διαχείρισης του φάσματος που αποτελούν ανοικτά ερευνητικά ζητήματα. Στη συνέχεια, περιγράφονται οι διαφοροί τρόποι πρόσβασης στο φάσμα. Στη περίπτωση της ευκαιριακής πρόσβασης στο φάσμα παρουσιάζονται οι εναλλακτικές μέθοδοι πρόβλεψης της κίνησης των πρωτευόντων χρηστών από τους δευτερεύοντες χρήστες. Κατόπιν, εισάγεται η έννοια της αγοράς φάσματος, τα είδη αγοραπωλησίας φάσματος, οι στόχοι βελτιστοποίησης στο πλαίσιο μιας αγοράς φάσματος καθώς και οι διάφορες μορφές αγορών φάσματος. Ακολουθεί σύντομη αναφορά στα δίκτυα 5ης γενεάς και στη χρήση των γνωστικών δικτύων επικοινωνιών σε αυτά. Τέλος, περιγράφονται τα βασικά μαθηματικά εργαλεία που θα χρησιμοποιηθούν στη διατριβή για την αντιμετώπιση των προβλημάτων πρόβλεψης και διαχείρισης ασυρμάτων διαύλων.

Στο δεύτερο μέρος της διατριβής αντιμετωπίζεται το γενικό πρόβλημα της πρόβλεψης ασυρμάτων διαύλων. Οι δευτερεύοντες χρήστες πραγματοποιούν ανίχνευση των καναλιών μέχρι να εντοπιστεί το πρώτο διαθέσιμο κανάλι. Στο πλαίσιο αυτό, ο προσδιορισμός της σειράς ανίχνευσης των καναλιών είναι καθοριστικός για τη βέλτιστη αξιοποίηση των φασματικών ευκαιριών. Το πρόβλημα προσεγγίζεται με χρήση ενισχυτικής μάθησης που βασίζεται σε πληροφορία που λαμβάνεται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας των δευτερευόντων χρηστών και αποσκοπεί στην ορθή ταξινόμηση των καναλιών με βάση (ι) την πιθανό-

τητα να είναι ελεύθερα και (ii) τη μέση χρονική διάρκεια κατά την οποία είναι ελεύθερα. Η απόδοση των προτεινομένων αλγορίθμων, που είναι πλήρως κατανεμημένοι βασιζόμενοι αποκλειστικά σε πληροφορία που συλλέγεται ατομικά από τους δευτερεύοντες χρήστες, εξετάζεται τόσο σε στατικά όσο και σε δυναμικά περιβάλλοντα.

Η βέλτιστη διαχείριση ασυρμάτων διαύλων μέσω της αγοράς φάσματος αντιμετωπίζεται στο τρίτο μέρος της διατριβής. Μετά την εισαγωγή της έννοιας της υβριδικής πρόσβασης στο φάσμα, εξετάζονται εναλλακτικά μοντέλα συστήματος καθώς και διάφορα είδη διαχειριστών φάσματος. Αρχικά, το θέμα της αγοράς φάσματος προσεγγίζεται μέσω της θεωρίας συμβολαίων και προσδιορίζεται ο βέλτιστος σχεδιασμός συμβολαίων εύρους ζώνης-τιμής φάσματος, υπό πλήρη και μη πλήρη πληροφορία ως προς τα χαρακτηριστικά των δευτερευόντων χρηστών. Το πρόβλημα της αγοράς φάσματος σε περιβάλλον όπου υπάρχουν διαφορετικοί διαχειριστές φάσματος με ομοιογενείς δευτερεύοντες χρήστες προσεγγίζεται μέσω της θεωρίας παιγνίων. Διατυπώνεται ένα παίγνιο επιλογής τρόπου πρόσβασης στο φάσμα από τους δευτερεύοντες χρήστες που συνοδεύεται/αξιοποιείται από ένα παίγνιο τιμολόγησης από τους διαχειριστές φάσματος και εξετάζεται η ισορροπία που επιτυγχάνεται.

Λέξεις κλειδιά: Γνωστικά δίκτυα επικοινωνιών, δυναμική πρόσβαση στο φάσμα, ευκαιριακή πρόσβαση στο φάσμα, αποκλειστική πρόσβαση στο φάσμα, υβριδική πρόσβαση στο φάσμα, ανίχνευση φάσματος, ενισχυτική μάθηση, αγορά φάσματος, θεωρία συμβολαίων, θεωρία παιγνίων, πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Abstract

This doctoral thesis deals with the study and development of mechanisms for the prediction and utilization of wireless channels. The enormous increase in the number of spectrum users, the evolution of wireless services and the necessity for better utilization has rendered efficient spectral resources management imperative. Cognitive radio networks have been introduced to address spectrum scarcity by implementing heterogeneous architectures and advanced techniques for spectrum access. Cognitive radio networks allow secondary users to access non-licensed frequency bands or frequency bands already allocated to other users, the so-called primary users.

The thesis is divided into three parts. The first part introduces the basic concepts related to the thesis and the tools employed to solve the problems related to prediction and utilization of wireless channels. In the beginning, the key elements of cognitive radio networks and spectrum management are presented as open research issues. Next, the various kinds of spectrum access are presented. A detailed description of various methods for the prediction of primary users traffic performed by secondary users is given in the framework of opportunistic spectrum access. Then, the general concept of spectrum market is discussed focusing on the different kinds of traded goods, the optimization objectives and the various forms of spectrum markets. 5G networks and the relevant role of cognitive radio networks is briefly presented. Finally, the basic mathematical tools for tackling problems related to the prediction and utilization of spectrum channels are briefly presented.

The second part of the thesis deals with the prediction of wireless channels. The secondary users sense the channels until the first channel available is found. Determining the optimal channel sensing order is crucial for proper exploitation of spectral opportunities. This problem is dealt using reinforcement learning that takes into account information acquired during the normal operation of secondary users. This procedure aims at determining the optimal channel classification based on (i) their probability of being idle and (ii) their average availability duration. The performance of the proposed learning algorithms, which are distributed and based only on own information, is examined both in static and dynamic environments.

The exploitation of wireless channels through spectrum trading is addressed in the third part of the thesis. Enabling hybrid spectrum access of secondary users is investigated. In this framework, various system models as well as types of spectrum operators are examined.

Initially, spectrum trading is approached employing contract theory. Optimal contract design for traded spectrum and price is determined under complete or incomplete information as to the transmission characteristics of the secondary users. The spectrum trading problem in an environment where different kinds of spectrum operators coexist with secondary users is addressed with game theory. A spectrum access selection game governing the secondary users behaviour and a pricing game played by the spectrum operators are formulated. Nash equilibria are sought for these games and their dependence on the system's parameters is investigated.

Keywords: Cognitive Radio Networks, dynamic spectrum access, opportunistic spectrum access, exclusive spectrum access, hybrid spectrum access, spectrum sensing, reinforcement learning, spectrum trading, contract theory, game theory, optimization problem.

Ευχαριστίες

Η διδακτορική διατριβή αποτέλεσε για εμένα έναν ακόμη μαραθώνιο και με διαφορά τον πιο σημαντικό μέχρι τώρα στη ζωή μου. Ήρθε, λοιπόν, η στιγμή να ευχαριστήσω τα άτομα που συντέλεσαν με τον τρόπο τους να καταφέρω να φτάσω σε αυτό το σημείο. Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή Παναγιώτη Κωπτή τον οποίο εκτιμώ τόσο για την επιστημονική του κατάρτιση αλλά και για το ήθος του. Εκτός της εμπιστοσύνης που μου έδειξε όταν με έκανε δεκτή στη θέση της υποψήφιας διδάκτωρ, ήταν συνεχής η υποστήριξή του, επιστημονική αλλά και ψυχολογική, στη διάρκεια της διδακτορικής μου έρευνας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους Καθηγητές κ. Χρήστο Καψάλη, Ιωάννη Κανελλόπουλο, Γεώργιο Φικιώρη, Συμεών Παπαβασιλείου, Αθανάσιο Παναγόπουλο, Μιχαήλ Θεολόγου και Γεώργιο Ευθύμογλου για την τιμή που μου έκαναν να αποδεχθούν να αποτελέσουν μέλη της επιτροπής αξιολόγησης της διδακτορικής διατριβής. Ειδικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Μιχαήλ Θεολόγου για τη φιλοξενία που μου παρείχε στο εργαστήριό του και για το ευχάριστο κλίμα που επικρατούσε σε αυτό.

Δεν θα μπορούσα να μην αναφερθώ στους συναδέλφους τους οποίους συνάντησα αυτά τα χρόνια. Ξεκινώντας το διδακτορικό, ο Μάρκος Αναστασόπουλος, η Διονυσία Πετράκη, η Αγγελική Σαράφη, ο Γεώργιος Τσιρόπουλος, ο Θανάσης Λαζαρόπουλος και η Άννα Βαζιντάρη μου παρείχαν χρήσιμες συμβουλές και καθοδήγηση για τα πρώτα βήματα της έρευνας και τους ευχαριστώ γι' αυτό. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την Τζένη Αδαμοπούλου, τον Κώστα Δεμέστιχα, τον Ιωάννη Λουμιώτη, τον Παύλο Κοσμίδη, το Μιχάλη Μασίκο, τη Χαρά Ρεμούνδου, το Βασίλη Ασθενόπουλο, το Σπύρο Σκευά, τη Θεοδώρα Σταματιάδη και το Λέοντα Σταματάρη για τις ευχάριστες ώρες που περάσαμε μαζί στο εργαστήριο και για τη φιλία τους. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αρτέμη Βουλκίδη για τη συνεργασία που είχαμε και για τη συμπαράστασή του αυτά τα χρόνια καθώς και τη Βούλα Βασσάκη, το Μάριο Πουλάκη και την Τέρψη Βελιβασάκη για την παρέα τους και τη συνεχή ενθάρρυνσή τους.

Η εργασία αυτή δεν θα είχε επιτευχθεί, φυσικά, χωρίς τη βοήθεια και τη στήριξη της οικογένειάς μου και των φίλων μου. Τόσο οι γονείς μου, Βασίλης και Βάσω, στους οποίους αφιερώνω και τη διατριβή, όσο και τα αδέρφια μου, Πέτρος, Δημήτρης και Θεοδώρα, ήταν πάντα δίπλα μου όλα τα χρόνια και με βοήθησαν με τον τρόπο τους στις δύσκολες στιγμές.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω το Σωτήρη Καραχοντζίτη για την αμέριστη κατανόηση και τη συνεχή εμπύχωση στην προσπάθειά μου αυτή.

Σας ευχαριστώ όλους,
Αγγελική Κορδαλή
Οκτώβριος, 2015

Αφιερωμένο στους γονείς μου,
Βασίλη & Βάσω

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	25
2	Γνωστικές Επικοινωνίες και Ευκαιριακή Πρόσβαση στο Φάσμα	29
2.1	Γνωστικά Δίκτυα Επικοινωνιών	29
2.2	Διαχείριση Φάσματος στις Γνωστικές Επικοινωνίες	30
2.3	Μοντέλα πρόσβασης στο φάσμα	32
2.3.1	Μοντέλο δυναμικής αποκλειστικής χρήσης (Dynamic exclusive use model)	32
2.3.2	Μοντέλο Ανοικτής Πρόσβασης (Open sharing model)	33
2.3.3	Μοντέλο ιεραρχικής πρόσβασης (Hierarchical access model)	33
2.4	Ευκαιριακή πρόσβαση στο φάσμα για δευτερεύοντες χρήστες	34
2.4.1	Πρόβλεψη κίνησης πρωτευόντων χρηστών	35
2.4.2	Εκχώρηση φάσματος	36
2.5	Αγορά φάσματος	38
2.5.1	Είδη αγοραπωλησίας στην αγορά φάσματος	39
2.5.2	Στόχοι της αγοράς φάσματος	43
2.5.3	Μορφές αγοράς φάσματος	44
2.5.3.1	Μονοπώλιο	44
2.5.3.2	Ολιγοπώλιο	46
2.6	Αγορά φάσματος και υβριδικά μοντέλα πρόσβασης στο φάσμα	47
2.7	Δίκτυα 5ης γενιάς	48
3	Μαθηματικό υπόβαθρο για τα προβλήματα πρόβλεψης και αξιοποίησης ασύρματων διαύλων	51
3.1	Ενισχυτική μάθηση	51
3.1.1	Τεχνικές ενισχυτικής μάθησης	51
3.1.2	Αλγόριθμος Q-learning	52
3.2	Θεωρία Παιγνίων	54
3.2.1	Βασικοί ορισμοί	54
3.2.2	Σημείο Ισορροπίας Nash	56

3.2.3	Κατηγοροποίηση Παιγνίων	57
3.3	Εξελικτική Θεωρία Παιγνίων	58
3.3.1	Εξελικτικά ευσταθείς στρατηγικές	59
3.3.2	Δυναμική Αντιγράφων	59
3.4	Θεωρία Συμβολαίων	60
3.5	Θεωρία βελτιστοποίησης	64
3.5.1	Μέθοδος πολλαπλασιαστών Lagrange	65
3.5.2	Μέθοδος συνάρτηση ποινής	65
4	Εφαρμογή τεχνικών ενισχυτικής μάθησης για ευκαιριακή πρόσβαση στο φάσμα	67
4.1	Εισαγωγή	67
4.2	Μοντέλο Συστήματος και διαμόρφωση προβλήματος	69
4.2.1	Διαθεσιμότητα καναλιού	70
4.2.2	Διαμόρφωση προβλήματος	71
4.3	Επιλογή καναλιού με βάση την ενισχυτική μάθηση	73
4.3.1	Κανόνας ενημέρωσης	73
4.3.1.1	L-learning	73
4.3.1.2	Time-learning	75
4.3.2	Μέθοδος μάθησης	75
4.3.3	Ανάλυση επίδοσης	76
4.4	Προσομοιώσεις και σχολιασμός αποτελεσμάτων	78
4.4.1	Στατικό περιβάλλον μετάδοσης	78
4.4.2	Δυναμικό περιβάλλον μετάδοσης	80
4.4.3	Εκμετάλλευση φάσματος και ενεργειακή απόδοση	82
4.5	Συμπεράσματα	86
5	Αγορά φάσματος (spectrum trading) για γνωστικά δίκτυα επικοινωνιών με υβριδική πρόσβαση στο φάσμα με χρήση θεωρίας συμβολαίων	87
5.1	Εισαγωγή	87
5.2	Μοντέλο Συστήματος	88
5.2.1	Μοντέλο πρόσβασης δευτερευόντων χρηστών στο φάσμα	88
5.2.2	Το μοντέλο τιμολόγησης	91
5.3	Σχεδιασμός Συμβολαίων	92
5.3.1	Περιορισμοί στο σχεδιασμό	92
5.3.2	Βέλτιστος σχεδιασμός συμβολαίων	93
5.4	Βέλτιστη τιμολόγηση με πλήρη πληροφόρηση	94
5.5	Βέλτιστη τιμολόγηση με μη πλήρη πληροφόρηση	96
5.6	Προσομοιώσεις και αποτελέσματα	99
5.7	Συμπεράσματα	105

6	Αγορά φάσματος (spectrum trading) για γνωστικά δίκτυα επικοινωνιών με υβριδική πρόσβαση στο φάσμα με χρήση θεωρίας παιγνίων	107
6.1	Εισαγωγή	107
6.2	Αγορά φάσματος με ένα διαχειριστή αποκλειστικής και έναν ευκαιριακής πρόσβασης σε φάσμα	108
6.2.1	Μοντέλο συστήματος	108
6.2.2	Παίγνιο αγοράς φάσματος	111
6.2.2.1	Το παίγνιο επιλογής πρόσβασης των SU	111
6.2.2.2	Το παίγνιο κοστολόγησης των παρόχων φάσματος	113
6.3	Αγορά φάσματος με ένα διαχειριστή υβριδικής πρόσβασης σε φάσμα	115
6.3.1	Μοντέλο συστήματος	115
6.3.2	Παίγνιο αγοράς φάσματος	118
6.3.2.1	Το παίγνιο επιλογής πρόσβασης των SU	118
6.3.2.2	Το παίγνιο εύρους ζώνης-τιμής φάσματος του υβριδικού παρόχου	118
6.4	Αριθμητικά αποτελέσματα	120
6.5	Συμπεράσματα	127
7	Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα	129
A	Αποδείξεις Θεωρίας συμβολαίων	131
A.1	Απόδειξη συνθήκης 5.1	131
A.2	Απόδειξη συνθήκης 5.2	131
A.3	Απόδειξη συνθήκης 5.3	132
A.4	Απόδειξη θεωρήματος 5.1	132
A.5	Απόδειξη βέλτιστου σχεδιασμού συμβολαίου μόνο για την υψηλότερη κλάση υπηρεσίας υπό πλήρη πληροφόρηση	133
B	Εύρεση σημείου ισορροπίας στο παίγνιο πρόσβασης στο φάσμα των SUs	135
B.1	Εξέταση καταλληλότητας των ριζών της εξίσωσης των ανταμοιβών	135
Γ	Δημοσιεύσεις	137
	Βιβλιογραφία	139

Κατάλογος σχημάτων

2.1	Πλαίσιο διαχείρισης φάσματος σε γνωστικά δίκτυα.	31
2.2	Ταξινόμηση των μοντέλων πρόσβασης της δυναμικής πρόσβασης στο φάσμα.	32
2.3	Κατανομή καναλιών με πρωτεύοντες και δευτερεύοντες γνωστικούς χρήστες.	34
2.4	Αγορά φάσματος.	40
2.5	Δυναμική πρόσβαση στο φάσμα και αγορά φάσματος.	40
2.6	Προτεινόμενη αρχιτεκτονική για ετερογενή ασύρματα κυψελωτά δίκτυα 5ης γενιάς.	49
3.1	Μοντέλο λειτουργίας ενισχυτικής μάθησης.	52
3.2	Απεικόνιση παιγνίου σε κανονική μορφή (το δίλημμα του φυλακισμένου - prisoner's dilemma).	55
3.3	Παίγνιο σε εκτεταμένη μορφή.	56
4.1	Διαδικασία ανίχνευσης καναλιών και μετάδοσης.	69
4.2	Μοντέλο λειτουργίας PU.	71
4.3	Πιθανότητες επιλογής με εφαρμογή των κανόνων μάθησης L-learning and Time-learning για ευκαιριακή πρόσβαση καναλιού σε τρία στατικά κανάλια.	79
4.4	Πιθανότητες επιλογής με εφαρμογή των κανόνων μάθησης L-learning and Time-learning για ευκαιριακή πρόσβαση καναλιού σε τρία στατικά κανάλια (απεικονίζονται τα αρχικά 20s λειτουργίας).	79
4.5	Πιθανότητες επιλογής με εφαρμογή των κανόνων μάθησης L-learning and Time-learning για ευκαιριακή πρόσβαση καναλιού σε τρία δυναμικά κανάλια.	80
4.6	Πιθανότητες επιλογής (Κανάλι 2) με εφαρμογή του κανόνα μάθησης L-learning για ευκαιριακή πρόσβαση καναλιού με διαφορετικές τιμές της παραμέτρου μάθησης L	82
4.7	Εκμετάλλευση ευκαιριών ως συνάρτηση της μέσης κατάληψης PU όταν 10 κανάλια είναι διαθέσιμα για ευκαιριακή φασματική πρόσβαση.	83
4.8	Το μέτρο T_{sw} ως συνάρτηση της μέσης κατάληψης PU όταν 10 κανάλια είναι διαθέσιμα για ευκαιριακή πρόσβαση στο φάσμα.	84
4.9	Το μέτρο T_{mean} ως συνάρτηση της μέσης κατάληψης PU όταν 10 κανάλια είναι διαθέσιμα για ευκαιριακή πρόσβαση στο φάσμα.	85

4.10	Το μέτρο S_{mean} ως συνάρτηση της μέσης κατάληψης PU όταν 10 κανάλια είναι διαθέσιμα για ευκαιριακή πρόσβαση στο φάσμα.	86
5.1	Μοντέλο συστήματος με ένα PSO που εξυπηρετεί χρήστες PU και SU. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης διαχωρίζεται σε B_{ESA} (προσβάσιμο από SU μέσω συμβολαίων) και B_{OSA} (προσβάσιμο από SU μόνο ευκαιριακά).	89
5.2	Βέλτιστο ποσοστό διαθέσιμου εύρους ζώνης B_{ESA}^* ως συνάρτηση του SNR της υψηλότερης κλάσης υπηρεσίας των SU για διάφορες τιμές R_{PU} και M	101
5.3	Κανονικοποιημένη μέγιστη ανταμοιβή του PSO U_P ως συνάρτηση του SNR της υψηλότερης κλάσης υπηρεσίας των SU για διάφορες τιμές R_{PU} και M	102
5.4	Βέλτιστη τιμή π_{Λ}^* ως συνάρτηση του αριθμού των SU N_{Λ} που ανήκουν στην υψηλότερη κλάση υπηρεσίας SU για διάφορες τιμές SNR_{Λ} και M	103
5.5	Τιμές ανταμοιβής του PSO μέσω των αλγορίθμων SCA/MCA και το κοινωνικό όφελος I και II ως συνάρτηση του πλήθους των PU M	104
6.1	Δίκτυο εξυπηρέτησης δευτερευόντων χρηστών (SU) που περιλαμβάνει ένα διαχειριστή αποκλειστικής (EXOP) και ένα διαχειριστή ευκαιριακής πρόσβασης (OPOP) σε φάσμα όπου εξυπηρετούνται πρωτεύοντες χρήστες (PU) (Μοντέλο I).	109
6.2	Δίκτυο εξυπηρέτησης δευτερευόντων χρηστών (SU) που περιλαμβάνει ένα διαχειριστή υβριδικής (HOP) πρόσβασης σε φάσμα όπου εξυπηρετούνται πρωτεύοντες χρήστες (PU) (Μοντέλο II).	115
6.3	Βέλτιστη τιμή ανά μονάδα εύρους ζώνης όπως καθορίζεται από δύο διαχειριστές φάσματος ως προς το εύρος ζώνης που διατίθεται προς αποκλειστική πρόσβαση.	121
6.4	Βέλτιστη τιμή ανά μονάδα εύρους ζώνης όπως καθορίζεται από δύο διαχειριστές φάσματος ως προς το εύρος ζώνης που διατίθεται προς ευκαιριακή πρόσβαση.	122
6.5	Εξάρτηση της πιθανότητας ισορροπίας των SU για την επιλογή αποκλειστικής πρόσβασης στο φάσμα ως συνάρτηση του N για διαφορετικά σενάρια και τιμές p_{occ}	123
6.6	P_{HESA}^*/P_{HOSA}^* ως συνάρτηση του N για τιμές $p_{occ} = \{0.2, 0.5, 0.8\}$ και $M = \{100, 200\}$	124
6.7	B_{HESA}^*/B_H ως συνάρτηση του M για τιμές $R_{PU} = \{1, 2, 3Mbps\}$ και $SNR_{PU} = \{15, 20dB\}$	125
6.8	P_{HESA}^*/P_{HOSA}^* ως συνάρτηση του M για τιμές $R_{PU} = \{1, 2, 3Mbps\}$ και $SNR_{PU} = \{15, 20dB\}$	126

Κατάλογος πινάκων

4.1	Βασικές Παράμετροι του Συστήματος	72
4.2	Χαρακτηριστικά καναλιών.	80
5.1	Ανταμοιβή PSO στην περίπτωση μη πλήρους πληροφόρησης.	103
6.1	Παράμετροι δικτύου για μοντέλο αγοράς φάσματος που περιλαμβάνει ένα διαχειριστή αποκλειστικής και ένα διαχειριστή ευκαιριακής πρόσβασης σε φάσμα	109
6.2	Παράμετροι δικτύου για μοντέλο αγοράς φάσματος που περιλαμβάνει ένα διαχειριστή υβριδικής πρόσβασης σε φάσμα	116

Κατάλογος Αλγορίθμων

1	Αλγόριθμος ενισχυτικής μάθησης για σειρά ανίχνευσης και επιλογής καναλιού	74
2	Αλγόριθμος αποκλειστικού συμβολαίου (SCA-Single-Contract Algorithm) υπό μη πλήρη πληροφόρηση	99
3	Αλγόριθμος πολλαπλών συμβολαίων (MCA-Multi-Contract Algorithm) υπό μη πλήρη πληροφόρηση	100
4	Επαναληπτικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης για το παίγνιο αγοράς φάσματος που περιλαμβάνει ένα διαχειριστή αποκλειστικής και ένα διαχειριστή ευκαιριακής πρόσβασης σε φάσμα.	114
5	Επαναληπτικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης για το παίγνιο αγοράς φάσματος που περιλαμβάνει ένα διαχειριστή υβριδικής φασματικής πρόσβασης. .	120

Κατάλογος συντμήσεων

BER	Ποσοστό Λανθασμένων Ψηφίων
BS	Σταθμός Βάσης
CCRN	Συνεργατικά Γνωστικά Δίκτυα
CSSA	Συνεργατικής Δευτερεύουσας Πρόσβασης στο φάσμα
ESA	Αποκλειστική Πρόσβαση στο Φάσμα
EXOP	Διαχειριστής αποκλειστικής πρόσβασης στο φάσμα
FB	Ζώνη συχνοτήτων
HOP	Διαχειριστής υβριδικής πρόσβασης στο φάσμα
NE	Ισορροπία Nash
OPOP	Διαχειριστής ευκαιριακής πρόσβασης στο φάσμα
OSA	Ευκαιριακή Πρόσβαση στο Φάσμα
PSOP,PSO	Πρωτεύοντες Διαχειριστές Φάσματος
PU	Πρωτεύων Χρήστης
SLA	Συμφωνία Επιπέδου Υπηρεσίας
SP	Δευτερεύοντες Πάροχοι, Secondary Providers
SSOP	Δευτερεύοντες Διαχειριστές Φάσματος
SU	Δευτερεύοντες Χρήστες

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Ο πολυτιμότερος πόρος στις ασύρματες επικοινωνίες είναι το διαθέσιμο ραδιοφάσμα. Η ραγδαία αύξηση των ασύρματων υπηρεσιών υψηλών απαιτήσεων σε ρυθμούς μετάδοσης εντείνει το πρόβλημα λόγω περιορισμένου διαθέσιμου φάσματος. Ωστόσο, υπάρχουν περιοχές του φάσματος που για σημαντικά χρονικά διαστήματα παραμένουν ανεκμετάλλευτες. Η ύπαρξη αυτών των λευκών περιοχών και η ανάπτυξη νέων ασύρματων υπηρεσιών ενέπνευσε την Υπηρεσία Προχωρημένων Ερευνητικών Προγραμμάτων Άμυνας της Αμερικής (DARPA Defense Advanced Research Projects Agency) να ξεκινήσει το πρόγραμμα XG προκειμένου να ερευνηθούν πολιτικές και ρυθμιστικοί κανόνες που επιτρέπουν τη χρησιμοποίηση των λευκών περιοχών από άλλους, δευτερεύοντες, χρήστες. Ο νέος αυτός τρόπος πρόσβασης στο φάσμα ονομάστηκε ευκαιριακή πρόσβαση στο φάσμα (OSA-Opportunistic Spectrum Access) ή Δυναμική Πρόσβαση στο Φάσμα (DSA- Dynamic Spectrum Access).

Για τη δυναμική ανίχνευση φάσματος και τη δυναμική πρόσβαση στο φάσμα προτάθηκαν τα γνωστικά τερματικά (CR-Cognitive Radios [1]). Τα γνωστικά τερματικά, που βασίζονται σε τεχνικές τερματικών που διαθέτουν λογισμικό (SDR-Software Defined Radio), είναι ικανά να ανιχνεύουν πώς χρησιμοποιείται τοπικά το φάσμα, να εντοπίζουν τις λευκές περιοχές και να προσαρμόζουν τις παραμέτρους εκπομπής ή λειτουργίας τους, όπως η συχνότητα, η ισχύς και ο ρυθμός μετάδοσης με στόχο την αποδοτικότερη και οικονομικότερη χρήση του φάσματος. Υπό αυτή την έννοια, τα γνωστικά δίκτυα αποτελούν δευτερεύοντα δίκτυα που λειτουργούν σε ελεύθερες περιοχές συχνοτήτων ή σε περιοχές συχνοτήτων που έχουν αποδοθεί σε άλλους (πρωτεύοντες χρήστες) φροντίζοντας να μην υπάρχουν παρεμβολές στους πρωτεύοντες χρήστες ή μεταξύ δευτερευόντων χρηστών.

Το εύρος των θεμάτων ερευνητικού ενδιαφέροντος που αφορούν τα γνωστικά δίκτυα είναι ιδιαίτερα μεγάλο και περιλαμβάνει όλες τις πτυχές λειτουργίας τους και ενσωμάτωσής τους στις ήδη υπάρχουσες τηλεπικοινωνιακές υποδομές. Η παρούσα έρευνα επικεντρώνεται στην περιοχή της πρόβλεψης και της αξιοποίησης των ασύρματων διαύλων μέσω των γνωστικών δικτύων.

Στο Κεφάλαιο 2 δίδεται περιγραφή των γνωστικών δικτύων και των βασικών παραμέτρων της δυναμικής πρόσβασης στο φάσμα. Παρουσιάζονται οι διάφοροι τρόποι ενσω-

μάτωσης δευτερευόντων χρηστών σε αδειοδοτημένες και μη ζώνες συχνοτήτων και αναλύονται τα χαρακτηριστικά τους. Στη συνέχεια, αναλύεται η περίπτωση της ευκαιριακής πρόσβασης στο φάσμα και η πρόβλεψη της κίνησης των πρωτευόντων χρηστών που είναι απαραίτητη για τη σωστή εκμετάλλευση των διαθέσιμων πόρων. Εισάγεται η έννοια της αγοράς φάσματος και παρουσιάζονται οι βασικές παράμετροι στη διαμόρφωση ενός προβλήματος αγοράς φάσματος και οι αντιπροσωπευτικές εργασίες σε κάθε κατηγορία. Τέλος, γίνεται μια σύντομη αναφορά στα δίκτυα 5ης γενιάς (5G) που χρήζουν της ανάγκης ενσωμάτωσης των τεχνολογιών των γνωστικών δικτύων.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα κύρια μαθηματικά εργαλεία που μελετήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για την προσέγγιση των προβλημάτων πρόβλεψης και αξιοποίησης ασύρματων διαύλων. Παρουσιάζεται η έννοια της ενισχυτικής μάθησης, συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος Q-learning που αποτελεί το βασικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε στη διαδικασία της πρόβλεψης στα πλαίσια της διδακτορικής έρευνας. Γίνεται επισκόπηση των βασικών εννοιών της θεωρίας παιγνίων και των διαφορετικών κατηγοριών παιγνίων για τη χρησιμοποίησή τους στο πλαίσιο των προβλημάτων αξιοποίησης ασύρματων διαύλων. Επίσης, γίνεται μια σύντομη περιγραφή της θεωρίας συμβολαίων και των βασικών εννοιών της καθώς και μια παρουσίαση του τρόπου επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Στο Κεφάλαιο 4 διατυπώνεται ένα σχήμα βασισμένο σε ενισχυτική μάθηση για τον καθορισμό της σειράς ανίχνευσης καναλιών από δευτερεύοντες χρήστες που δραστηριοποιούνται σε δυναμικά περιβάλλοντα μετάδοσης. Το σχήμα περιλαμβάνει δύο εναλλακτικές προσεγγίσεις μάθησης και συγκρίνεται με δύο σχήματα της σχετικής βιβλιογραφίας ως προς συγκεκριμένα μέτρα επίδοσης που ποσοτικοποιούν τη σωστή αξιοποίηση των διαθέσιμων ζωνών συχνοτήτων και τη βέλτιστη ενεργειακή απόδοση.

Στο Κεφάλαιο 5 αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της αγοράς φάσματος στο πλαίσιο που ένας ιδιοκτήτης φάσματος (Primary Spectrum Owner- PSO) αναθέτει συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων σε ένα πλήθος πρωτευόντων χρηστών (Primary Users- PU) και ταυτόχρονα επιτρέπει σε δευτερεύοντες χρήστες που ανήκουν σε ποικίλες κλάσεις υπηρεσιών να λειτουργούν ευκαιριακά στο μέρος του φάσματος που έχει αποδοθεί για λειτουργία των πρωτευόντων χρηστών. Ταυτόχρονα, ο ιδιοκτήτης φάσματος επιδιώκει την αύξηση του κέρδους του προσφέροντας συμβόλαια αποκλειστικού φάσματος σε ανάλογες τιμές σε ζώνες συχνοτήτων που αποκλείονται από την πρόσβαση των πρωτευόντων χρηστών. Στο πλαίσιο αυτό, στόχος του ιδιοκτήτη φάσματος είναι η μεγιστοποίηση της προσόδου του μέσω του βέλτιστου σχεδιασμού των συμβολαίων λαμβάνοντας υπόψη τις ποικίλες κλάσεις υπηρεσιών, για τις οποίες ο ιδιοκτήτης φάσματος μπορεί να διαθέτει πλήρη ή μερική πληροφόρηση. Στην περίπτωση πλήρους πληροφόρησης αποδεικνύεται πως το πιο επικερδές για τον πρωτεύοντα ιδιοκτήτη φάσματος είναι η προσφορά ενός είδους συμβολαίου και συγκεκριμένα αυτού που προορίζεται για τους χρήστες της υψηλότερης κλάσης υπηρεσιών. Για την περίπτωση της μερικής πληροφόρησης, προτείνονται δύο ευριστικοί αλγόριθμοι για το σχεδια-

σμό των βέλτιστων συμβολαίων που αντιστοιχούν στην προσφορά ενός ή περισσότερων συμβολαίων σε διάφορες κλάσεις υπηρεσιών. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και για τις δύο περιπτώσεις εξετάστηκαν για διαφορετικές κλάσεις υπηρεσιών των δευτερευόντων χρηστών καθώς και για διαφορετικά χαρακτηριστικά μετάδοσης των πρωτευόντων χρηστών. Οι δύο προτεινόμενοι αλγόριθμοι για την περίπτωση της μερικής πληροφόρησης παρουσιάζουν καλή συμπεριφορά και αποδίδουν τιμές κοντά στις βέλτιστες τιμές που λαμβάνονται στην περίπτωση της πλήρους πληροφόρησης. Εξετάζονται επίσης μετρικές συνολικής ωφέλειας.

Στο Κεφάλαιο 6 εξετάζεται η υβριδική πρόσβαση στο φάσμα δευτερευόντων χρηστών σε ένα μοντέλο με διαφορετικού τύπου διαχειριστές φάσματος. Διακρίνονται δύο περιπτώσεις: στην πρώτη περίπτωση υπάρχουν δύο διαχειριστές φάσματος, ένας διαχειριστής αποκλειστικής πρόσβασης που δίνει τη δυνατότητα σε δευτερεύοντες χρήστες να αποκτήσουν αποκλειστική πρόσβαση στο φάσμα, και ένας διαχειριστής ευκαιριακής πρόσβασης στο φάσμα που δίνει τη δυνατότητα ευκαιριακής πρόσβασης στο φάσμα σε δευτερεύοντες χρήστες. Στη δεύτερη περίπτωση, υπάρχει ένας μόνο διαχειριστής φάσματος, ο διαχειριστής υβριδικής πρόσβασης, που δίνει τη δυνατότητα και αποκλειστικής και ευκαιριακής πρόσβασης στο φάσμα σε δευτερεύοντες χρήστες. Ταυτόχρονα, πραγματοποιείται και λειτουργία των πρωτευόντων χρηστών. Για την προσέγγιση και των δύο περιπτώσεων προτείνεται ένα παίγνιο δύο επιπέδων. Στο πρώτο επίπεδο, οι δευτερεύοντες χρήστες επιλέγουν το μοντέλο πρόσβασης που θα ακολουθήσουν (αποκλειστική ή ευκαιριακή πρόσβαση). Στο δεύτερο επίπεδο, στην πρώτη περίπτωση, οι διαχειριστές του φάσματος καθορίζουν τις τιμές τους αποσκοπώντας στη μεγιστοποίηση του κέρδους και υποθέτοντας ότι η συμπεριφορά των δευτερευόντων χρηστών χαρακτηρίζεται από την ισορροπία που επιτυγχάνεται στο πρώτο επίπεδο. Στη δεύτερη περίπτωση, ο υβριδικός διαχειριστής επιλέγει το ποσό του φάσματος που θα κατανεμηθεί για αποκλειστική και για ευκαιριακή πρόσβαση λαμβάνοντας υπόψη την εξασφάλιση της ποιότητας υπηρεσίας που απαιτείται από τους πρωτεύοντες χρήστες. Ταυτόχρονα, καθορίζει και την τιμολογιακή πολιτική που θα ακολουθήσει. Έτσι σχηματίζονται αντίστοιχα τρία προβλήματα βελτιστοποίησης, ένα για κάθε είδος διαχειριστή φάσματος, αποκλειστικής, ευκαιριακής και υβριδικής πρόσβασης. Δύο ευριστικοί αλγόριθμοι προτείνονται για τα προβλήματα βελτιστοποίησης και παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα από την επίλυση των παιγνίων δύο επιπέδων και για τις δύο περιπτώσεις.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 πραγματοποιείται μια σύνοψη των αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων που προέκυψαν στο πλαίσιο της διδακτορικής εργασίας και προτείνονται θέματα για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 2

Γνωστικές Επικοινωνίες και Ευκαιριακή Πρόσβαση στο Φάσμα

Η συνεχής εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών με την ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών έχει οδηγήσει στην αλλαγή του τρόπου επικοινωνίας των ανθρώπων σε όλες τις πτυχές της ζωής. Οι χρήστες των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών αυξάνονται συνεχώς ενώ είναι ραγδαία και η αύξηση των διασυνδεδεμένων τηλεπικοινωνιακών κόμβων. Οι τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες πολλαπλασιάζονται, ενώ πολλές από αυτές απαιτούν πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν αισθητή την ανάγκη νέων ζωνών συχνοτήτων για τη ικανοποίηση της συνεχώς αυξανόμενης ζήτησης. Αυτό, δυστυχώς, δεν είναι εφικτό καθώς οι εκμεταλλεύσιμες ζώνες συχνοτήτων είναι περιορισμένες. Εντούτοις, έρευνα της Ομοσπονδιακής Επιτροπής Επικοινωνιών (FCC-Federal Communications Commission) έχει αποκαλύψει ότι ένας σημαντικός αριθμός των ζωνών συχνοτήτων που έχουν ήδη εκχωρηθεί για διάφορες τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες υποχρησιμοποιείται [2]. Η παρατήρηση αυτή οδήγησε την επιστημονική κοινότητα στην αναζήτηση μεθόδων για την βελτίωση της αξιοποίησης των ζωνών συχνοτήτων μέσω των γνωστικών δικτύων επικοινωνιών.

2.1 Γνωστικά Δίκτυα Επικοινωνιών

Τα γνωστικά δίκτυα επικοινωνιών (Cognitive Radio Networks), γνωστά και ως δίκτυα δυναμικής πρόσβασης (Dynamic Spectrum Access Networks-DSANs) ή δίκτυα επόμενης γενιάς (NeXt Generation (xG) communication networks), αναμένεται να παρέχουν φασματική πρόσβαση σε χρήστες μέσω ετερογενών δικτυακών αρχιτεκτονικών και μέσω τεχνικών δυναμικής πρόσβασης στο φάσμα. Οι χρήστες αυτοί θα δρουν ως δευτερεύοντες χρήστες SU (Secondary Users). Ως προς την εφαρμογή τους διακρίνονται σε δυο κατηγορίες:

- Γνωστικές Ασύρματες επικοινωνίες σε μη αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων

Οι γνωστικές ασύρματες επικοινωνίες εισήχθησαν για την εκμετάλλευση των μη αδειοδοτημένων ζώνων συχνοτήτων, όπως η U-NII ζώνη συχνοτήτων ή η βιομηχανική, επιστημονική και ιατρική ζώνη ραδιοσυχνοτήτων ISM (Industrial-Scientific and Medical). Η ομάδα εργασίας του IEEE 802.15 Task Group 2 [3] για τη συνύπαρξη των τεχνολογιών 802.11 και Bluetooth είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας.

- Γνωστικές Ασύρματες επικοινωνίες σε αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων

Οι γνωστικές ασύρματες επικοινωνίες μπορούν επίσης να εφαρμοστούν και σε αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων. Στην κατηγορία αυτή ανήκει η ομάδα εργασίας IEEE 802.22 [4] για την ανάπτυξη των πρωτοκόλλων για τα ασύρματα δίκτυα τοπικής εμβέλειας (WRAN-Wireless Regional Area Network) που προορίζονται για τα αχρησιμοποίητα κανάλια τηλεόρασης.

2.2 Διαχείριση Φάσματος στις Γνωστικές Επικοινωνίες

Τα γνωστικά δίκτυα παρουσιάζουν ιδιαίτερες προκλήσεις εξαιτίας της συνύπαρξής τους με πρωτεύοντα δίκτυα καθώς και των ποικίλων απαιτήσεων σε ποιότητα υπηρεσίας. Για το λόγο αυτό, απαιτούνται νέες λειτουργίες στη διαχείριση του φάσματος με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά [5]:

- Αποφυγή παρεμβολών

Τα γνωστικά δίκτυα επιβάλλεται να αποφεύγουν οποιαδήποτε παρεμβολή σε πρωτεύοντες χρήστες.

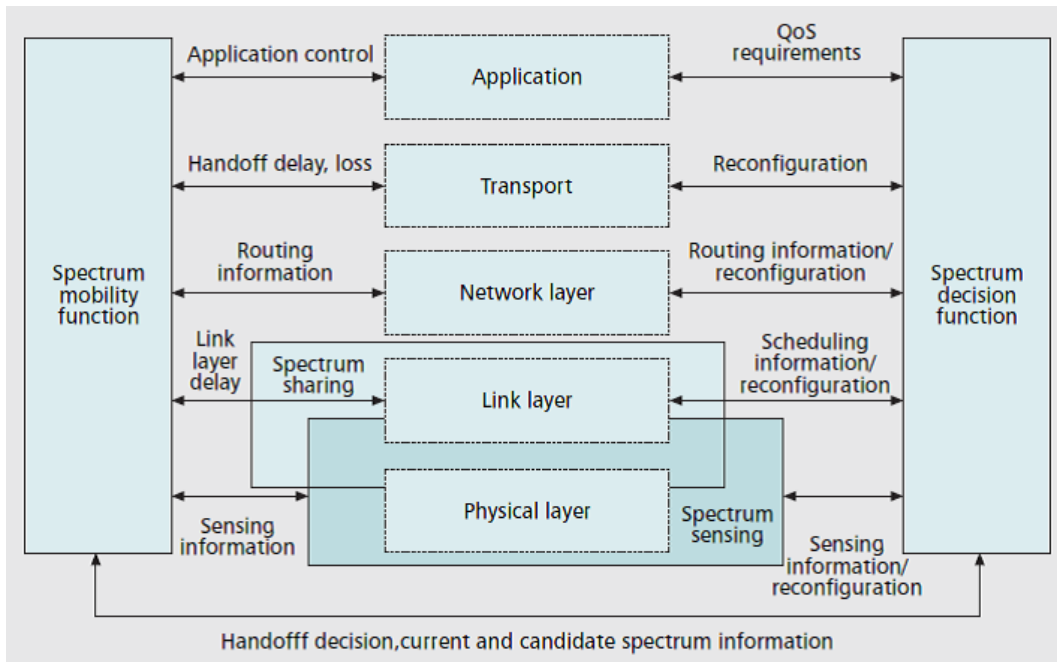
- Επίγνωση ποιότητας υπηρεσίας

Για την επιλογή μιας ζώνης συχνοτήτων, οι γνωστικοί χρήστες πρέπει να υποστηρίζουν επικοινωνία με επίγνωση ποιότητας υπηρεσίας λαμβάνοντας υπόψη τη λειτουργία σε ένα δυναμικό και ετερογενές περιβάλλον.

- Αδιάλειπτη επικοινωνία

Τα γνωστικά δίκτυα πρέπει να παρέχουν αδιάλειπτη επικοινωνία ανεξάρτητα από την εμφάνιση των πρωτευόντων χρηστών.

Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται το πλαίσιο της διαχείρισης φάσματος με γνωστικές επικοινωνίες όπως αναλύεται σε λειτουργίες στα διαφορετικά στρώματα στο μοντέλο αναφοράς OSI. Τέσσερα είναι τα μεγάλα στάδια σε μια διαδικασία διαχείρισης φάσματος που πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά.



Σχήμα 2.1: Πλαίσιο διαχείρισης φάσματος σε γνωστικά δίκτυα.

- Ανίχνευση φάσματος (spectrum sensing)

Ένας γνωστικός χρήστης εκμεταλλεύεται τις ελεύθερες ζώνες συχνοτήτων. Για τον εντοπισμό τους απαιτείται η κατάλληλη ανίχνευση φάσματος με παρατήρηση των διαθέσιμων ζωνών συχνοτήτων και εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς τη χρησιμοποίησή τους.

- Απόφαση πρόσβασης στο φάσμα (spectrum decision)

Βασισμένοι στην ανίχνευση φάσματος, οι γνωστικοί χρήστες αποφασίζουν ως προς την πρόσβασή τους σε κάποια ζώνη συχνοτήτων. Εκτός από τη διαθεσιμότητα ή όχι μιας ζώνης συχνοτήτων, και άλλοι παράγοντες συμβάλλουν στην τελική απόφαση των γνωστικών χρηστών που μπορεί να αποτελούν την πολιτική των χρηστών ή να υπαγορεύονται και από εξωτερικές πολιτικές άλλων χρηστών ή του συστήματος.

- Μέρισμα φάσματος (spectrum sharing)

Καθώς υπάρχουν αρκετοί γνωστικοί χρήστες που επιθυμούν πρόσβαση στο φάσμα, ένα γνωστικό δίκτυο πρέπει να καθορίζει τον τρόπο διαμοιρασμού των διαθέσιμων ζωνών συχνοτήτων για την αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ των γνωστικών χρηστών.

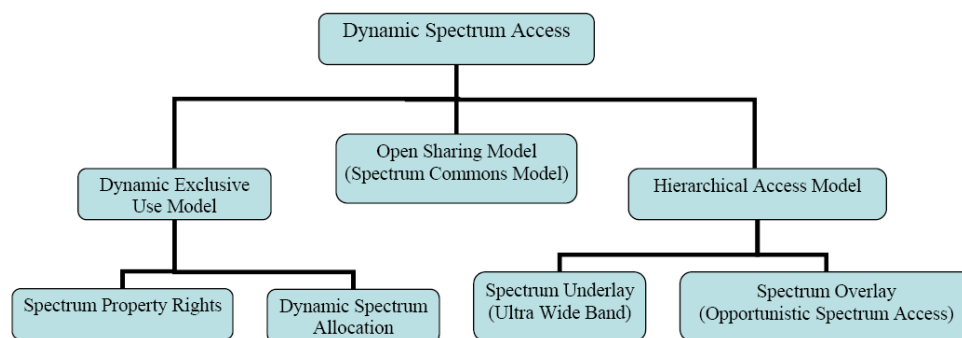
- Κινητικότητα στο φάσμα (spectrum mobility)

Οι γνωστικοί χρήστες θεωρούνται ως επισκέπτες στο φάσμα. Επομένως, αν η ζώνη συχνοτήτων στην οποία λειτουργούν μια χρονική στιγμή επανακαταλαμβάνεται από πρωτεύοντες χρήστες πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα να συνεχιστεί η λειτουργία τους σε κάποια άλλη ζώνη συχνοτήτων.

Οι παραπάνω λειτουργίες αποτελούν μέρος του γνωστικού κύκλου που περιγράφεται στις εργασίες με διαφορετική ορολογία [6], [7]. Η ανίχνευση φάσματος είναι στενά συνδεδεμένη με την έννοια της ανάλυσης φάσματος (spectrum analysis), η οποία καθορίζει τα χαρακτηριστικά των ζωνών συχνοτήτων που έχουν εντοπιστεί ως ευκαιρίες φάσματος μέσω της ανίχνευσης. Η απόφαση πρόσβασης στο φάσμα (spectrum decision) συναντάται, τέλος, και ως εκχώρηση φάσματος (spectrum assignment).

2.3 Μοντέλα πρόσβασης στο φάσμα

Κατά τη δυναμική πρόσβαση στο φάσμα, η συνύπαρξη των πρωτευόντων χρηστών PU (Primary Users) και των δευτερευόντων χρηστών SU μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες προσεγγίσεις όπως είναι το "Μοντέλο Δυναμικής Αποκλειστικής Χρήσης", το "Μοντέλο Ανοικτής Πρόσβασης" και το "Μοντέλο Ιεραρχικής Πρόσβασης" που ορίζονται στο [8]. Διάφορες εκδοχές των μοντέλων αυτών έχουν παρουσιαστεί στη διεθνή βιβλιογραφία για την προσέγγιση προβλημάτων φυσικού στρώματος, επιπέδου ζεύξης ή στρώματος δικτύου [9].



Σχήμα 2.2: Ταξινόμηση των μοντέλων πρόσβασης της δυναμικής πρόσβασης στο φάσμα.

2.3.1 Μοντέλο δυναμικής αποκλειστικής χρήσης (Dynamic exclusive use model)

Το μοντέλο αυτό διατηρεί τη βασική δομή της υφιστάμενης πολιτικής ρύθμισης του φάσματος όπου ζώνες συχνοτήτων αδειοδοτούνται σε υπηρεσίες για αποκλειστική χρήση. Η βασική ιδέα του μοντέλου αυτού είναι η εισαγωγή ευελιξίας με στόχο τη βελτίωση της φασματικής απόδοσης. Σύμφωνα με το μοντέλο αποκλειστικής δυναμικής χρήσης, έχουν προταθεί δύο προσεγγίσεις: Η πρώτη προσέγγιση επιτρέπει στους πρωτεύοντες χρήστες να εμπορεύονται το φάσμα και να επιλέγουν ελεύθερα την τεχνολογία πρόσβασης σε αυτό. Η οικονομία και η αγορά, επομένως, θα διαδραματίσουν ένα σημαντικό ρόλο στην αποδοτικότερη χρησιμοποίηση των ζωνών συχνοτήτων.

Σύμφωνα με τη δεύτερη προσέγγιση της δυναμικής κατανομής φάσματος (dynamic spectrum allocation), στόχος είναι η βελτίωση της αποτελεσματικής χρησιμοποίησης του φάσματος μέσω της δυναμικής εκχώρησης, αξιοποιώντας τα χωρικά και χρονικά στατιστικά χαρακτηριστικά της κίνησης διαφόρων υπηρεσιών. Δηλαδή, σε συγκεκριμένη περιοχή και για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, το φάσμα διατίθεται σε υπηρεσίες για αποκλειστική χρήση. Ο τρόπος αυτός εκχώρησης διαφέρει από την αντίστοιχη τρέχουσα πολιτική καθώς επιτυγχάνει ταχύτερα τις αλλαγές κατανομής συχνοτήτων όπου και όταν απαιτούνται. Ωστόσο, με βάση μόνο το μοντέλο αποκλειστικής χρήσης δεν είναι δυνατό να αντιμετωπιστούν και αξιοποιηθούν τα ελεύθερα φασματικά διαστήματα που προκύπτουν λόγω της ανομοιομόρφης φύσης της ασύρματης τηλεπικοινωνιακής κίνησης.

2.3.2 Μοντέλο Ανοικτής Πρόσβασης (Open sharing model)

Το συγκεκριμένο μοντέλο αναφέρεται και ως μοντέλο κοινού φάσματος και χρησιμοποιεί την ελεύθερη ανταλλαγή φάσματος μεταξύ ομότιμων χρηστών ως βάση για τη διαχείριση μιας φασματικής περιοχής. Οι υποστηρικτές του μοντέλου αυτού τάσσονται υπέρ της χρησιμοποίησής του βασιζόμενοι στην αδιαμφισβήτητη επιτυχία των ασύρματων υπηρεσιών (πχ WiFi) που λειτουργούν στη μη αδειοδοτημένη βιομηχανική, επιστημονική και ιατρική ζώνη ραδιοσυχνοτήτων (ISM-Industrial, Scientific and Medical radio bands). Στο πλαίσιο του συγκεκριμένου μοντέλου διαχείρισης ραδιοφάσματος, για την αντιμετώπιση των τεχνολογικών προκλήσεων έχουν διερευνηθεί τόσο συγκεντρωτικές όσο και κατανεμημένες στρατηγικές κατανομής φάσματος.

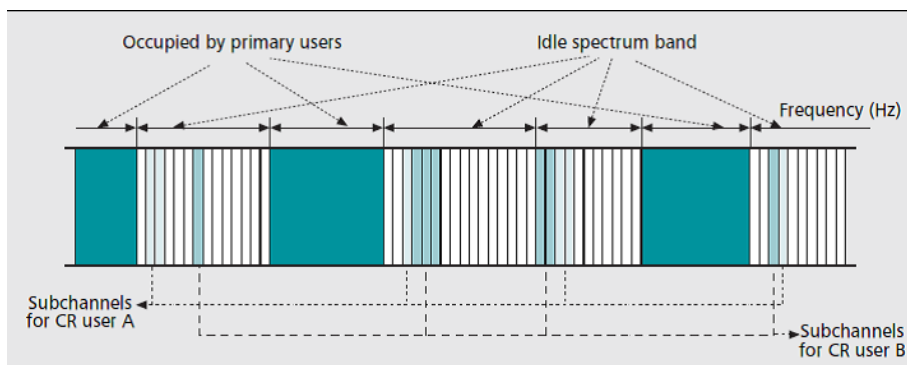
2.3.3 Μοντέλο ιεραρχικής πρόσβασης (Hierarchical access model)

Το μοντέλο αυτό υιοθετεί μια ιεραρχική δομή πρόσβασης με πρωτεύοντες και δευτερεύοντες χρήστες (PU-SU). Η βασική ιδέα είναι η δυνατότητα χρησιμοποίησης αδειοδοτημένου φάσματος και από δευτερεύοντες χρήστες, εφόσον περιορίζονται επαρκώς οι παρεμβολές οι οποίες προκαλούνται στους πρωτεύοντες χρήστες. Έχουν εξεταστεί δύο προσεγγίσεις καταμερισμού του φάσματος μεταξύ πρωτευόντων και δευτερευόντων χρηστών: η τεχνική φασματικής υπόστρωσης (spectrum underlay) και η τεχνική φασματικής επίστρωσης (spectrum overlay).

Η underlay προσέγγιση επιβάλλει αυστηρούς περιορισμούς σχετικά με τη ισχύ εκπομπής των δευτερευόντων χρηστών ώστε να λειτουργούν κάτω από το επίπεδο θορύβου των πρωτευόντων χρηστών. Μέσω της φασματικής εξάπλωσης των σημάτων σε μια ευρύτερη ζώνη ραδιοσυχνοτήτων (UWB), οι δευτερεύοντες χρήστες έχουν τη δυνατότητα να επιτύχουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων υπό εξαιρετικά χαμηλή ισχύ εκπομπής.

Η overlay τεχνική αρχικά επινοήθηκε από το Mitola [1] και έγινε γνωστή υπό τον όρο συγκέντρωση φάσματος (spectrum pooling). Στη συνέχεια, ερευνήθηκε από τον οργανισμό

σμό προηγμένων ερευνητικών έργων του υπουργείου άμυνας των Ηνωμένων Πολιτειών (DARPA) στο πλαίσιο του προγράμματος επόμενης γενιάς (XG) με την ονομασία της ευκαιριακής φασματικής πρόσβασης (opportunistic spectrum access). Η διαφορά από την προηγούμενη προσέγγιση είναι ότι δεν υποβάλλει αναγκαστικά αυστηρούς περιορισμούς στη ισχύ εκπομπής των δευτερευόντων χρηστών αλλά καθορίζει πότε και πού μπορούν να εκπέμψουν. Η προσέγγιση αυτή αποσκοπεί να αξιοποιήσει άμεσα τα χρονικά και χωρικά φασματικά κενά, επιτρέποντας στους δευτερεύοντες χρήστες να αναγνωρίζουν και να αξιοποιούν την περιστασιακή φασματική διαθεσιμότητα σε τοπική βάση, αρκεί η δραστηριότητα αυτή να πραγματοποιείται με μη παρεμβατικό τρόπο. Δηλαδή, η δραστηριότητα που αναπτύσσουν οι δευτερεύοντες χρήστες δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να επηρεάζει την ποιότητα υπηρεσίας των πρωτεύοντων χρηστών. Στο σχήμα 2.3 φαίνεται ένα παράδειγμα μιας δομής καναλιών με πρωτεύοντες χρήστες και γνωστικούς χρήστες που εκμεταλλεύονται τα ελεύθερα κανάλια.



Σχήμα 2.3: Κατανομή καναλιών με πρωτεύοντες και δευτερεύοντες γνωστικούς χρήστες.

Συγκρινόμενο με τα μοντέλα δυναμικής αποκλειστικής χρήσης και ανοικτής ανταλλαγής, το μοντέλο ιεραρχικής πρόσβασης είναι ίσως η πλέον συνηθισμένη προσέγγιση εφαρμογής της δυναμικής εκχώρησης συχνοτήτων, δεδομένης της τρέχουσας πολιτικής διαχείρισης του ραδιοφάσματος και της παράδοσης των ασύρματων συστημάτων. Επιπλέον, οι δύο διαφορετικές τεχνικές ιεραρχικής πρόσβασης έχουν τη δυνατότητα να εφαρμοστούν συνδυαστικά για την περαιτέρω βελτίωση της φασματικής απόδοσης.

2.4 Ευκαιριακή πρόσβαση στο φάσμα για δευτερεύοντες χρήστες

Η εφαρμογή των γνωστικών επικοινωνιών προσφέρει τη δυνατότητα υλοποίησης της Ευκαιριακής Φασματικής Πρόσβασης (OSA- Opportunistic Spectrum Access) με στόχο την αξιοποίηση των υποχρησιμοποιούμενων τμημάτων του φάσματος που έχουν αποδοθεί σε πρωτεύουσα βάση σε αδειοδοτημένους χρήστες (PU) [1]. Οι δευτερεύοντες χρήστες μπο-

ρούν να αποκτήσουν πρόσβαση σε ανενεργά τηλεπικοινωνιακά κανάλια υπό την προϋπόθεση ότι δεν παρεμβάλλουν σε πρωτεύοντες χρήστες σύμφωνα με την overlay εκδοχή του μοντέλου ιεραρχικής πρόσβασης. Στο πλαίσιο αυτό, έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές ανίχνευσης φάσματος για τη λειτουργία των δευτερευόντων χρηστών [10], [11], [12]. Επίσης, μια εκτενής επισκόπηση των τεχνικών και προσεγγίσεων για την επιλογή των καναλιών παρουσιάζεται στο [13]. Ένα από τα σημαντικότερα πεδία έρευνας στο πλαίσιο της ευκαιριακής πρόσβασης στο φάσμα δευτερευόντων χρηστών είναι αυτό της πρόβλεψης της κίνησης των πρωτευόντων χρηστών και της αντίστοιχης προσαρμογής των δευτερευόντων χρηστών με στόχο τη βέλτιστη φασματική αξιοποίηση.

2.4.1 Πρόβλεψη κίνησης πρωτευόντων χρηστών

Η κίνηση των πρωτευόντων χρηστών είναι δυνατόν να ακολουθεί είτε ντετερμινιστικά μοντέλα είτε στοχαστικά, όπως στην περίπτωση της δρομολόγησης πακέτου και δρομολόγησης κυκλώματος, όπου ο χρόνος άφιξης πακέτου ακολουθεί την κατανομή Poisson [6]. Εμπειρικές αναλύσεις δεδομένων πραγματικών δικτύων έχουν καταδείξει ότι το Μαρκοβιανό μοντέλο κίνησης αποτελεί έγκυρη προσέγγιση των πραγματικών συνθηκών κίνησης [14]. Έχουν προταθεί διάφορες προσεγγίσεις βασισμένες σε αναγνώριση προτύπων, σύμφωνα με τις οποίες δεδομένα συλλέγονται κατά τη διάρκεια περιόδων μάθησης και, στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται για την πρόγνωση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης των πρωτευόντων χρηστών [15]. Στο [16], τα κανάλια επικοινωνίας αρχικά κατηγοριοποιούνται βάσει προηγούμενων δεδομένων και, στη συνέχεια, παρακολουθείται η κατάστασή τους. Στο [17], τα κανάλια χαρακτηρίζονται με κριτήριο την πιθανότητα να είναι ανενεργά βάσει στατιστικής επεξεργασίας δεδομένων που έχουν συλλεγεί κατά την περίοδο μάθησης. Και οι δύο εναλλακτικές προσεγγίσεις ([16], [17]), αφορούν στατικά μοντέλα κίνησης.

Γενικά, τα στατικά μοντέλα κίνησης δεν μπορούν να απεικονίσουν το δυναμικό χαρακτήρα των καναλιών επικοινωνίας, κυρίως όταν τα κανάλια αυτά χρησιμοποιούνται από μη αδειοδοτημένους χρήστες όπως είναι οι δευτερεύοντες χρήστες. Η συμπεριφορά της χρησιμοποίησης του καναλιού μεταβάλλεται με το χρόνο λόγω των δυναμικών μεταβολών της τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Ως εκ τούτου, οι δευτερεύοντες χρήστες αναγκάζονται να λειτουργήσουν σε ένα δυναμικά μεταβαλλόμενο περιβάλλον χωρίς πληροφορίες σχετικά με τα μοντέλα κίνησης που ακολουθούν οι πρωτεύοντες χρήστες και οι άλλοι δευτερεύοντες χρήστες (ποσοστό χρησιμοποίησης, συχνότητα αλλαγών κατάστασης, κλπ).

Σε ένα τυπικό πολυκαναλικό σύστημα, η ευκαιριακή φασματική πρόσβαση βασίζεται στην περιοδική ανίχνευση των καναλιών που πραγματοποιείται από τους δευτερεύοντες χρήστες πριν από κάθε μετάδοση. Στα συστήματα που βασίζονται σε χρονοθυρίδες (slotted operation), οι χρονοθυρίδες χωρίζονται σε δύο τμήματα. Στο πρώτο τμήμα, οι δευτερεύοντες χρήστες ανιχνεύουν τα κανάλια ενώ, στο δεύτερο τμήμα, εφόσον το υπό ανίχνευση

κανάλι βρεθεί ελεύθερο, πραγματοποιείται η μετάδοση. Η μεγαλύτερη πρόκληση είναι η εξισορρόπηση της εξερεύνησης του φάσματος και της εκμετάλλευσης του φάσματος διατυπώνοντας κατάλληλες τεχνικές για ανίχνευση και μετάδοση. Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές ανίχνευσης φάσματος, σύμφωνα με τις οποίες ένας δευτερεύων χρήστης ανιχνεύει τα διαθέσιμα κανάλια διαδοχικά ακολουθώντας συγκεκριμένο κανόνα. Στο [18], προτείνεται μια διαισθητική σειρά ανίχνευσης καναλιών με βάση τη διαθεσιμότητα των καναλιών. Διάφορα σχήματα αξιοποίησης του φάσματος εξετάζονται στο [19] που βασίζονται σε δοκιμή καναλιού και σχεδιασμό της μετάδοσης για διαφορετικά σενάρια. Και στις δύο περιπτώσεις ([18], [19]), για τον καθορισμό της σειράς ανίχνευσης, απαιτείται εκ των προτέρων γνώση των χαρακτηριστικών των καναλιών. Στο [20] προτείνεται μια απλή σειρά ανίχνευσης καναλιών ταξινομώντας αυτά σε φθίνουσα σειρά ως προς τους διαθέσιμους ρυθμούς μετάδοσης. Εφαρμόζεται ένας κανόνας διακοπής στην ανίχνευση φάσματος με στόχο τη μεγιστοποίηση της ρυθμαπόδοσης (throughput). Η μεγιστοποίηση της μέσης ρυθμαπόδοσης πολλαπλών δευτερευόντων χρηστών αποτελεί στόχο και της εργασίας [21]. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται συνεργατική ανίχνευση και, στη συνέχεια, πραγματοποιείται αναφορά των αποτελεσμάτων σε κεντρικό σταθμό βάσης (BS- Base Station) που επιτρέπει ευκαιριακή πρόσβαση στο φάσμα για το σχεδιασμό μετάδοσης υπό πλήρη ή ατελή γνώση των χαρακτηριστικών καναλιού.

2.4.2 Εκχώρηση φάσματος

Η εκχώρηση φάσματος επηρεάζει την κανονική λειτουργία του δικτύου, είναι στενά συνδεδεμένη με την ανίχνευση φάσματος και αποτελεί βασική λειτουργία των γνωστικών επικοινωνιών. Η γνωστική εκχώρηση φάσματος διαφοροποιείται από τη συμβατική εκχώρηση φάσματος σε ασύρματα δίκτυα. Στα πρωτεύοντα ασύρματα δίκτυα, το φάσμα είναι χωρισμένο σε κανάλια με σταθερή κεντρική συχνότητα και σταθερό εύρος ζώνης. Κατά τη γνωστική εκχώρηση φάσματος, αντίθετα, προσδιορίζεται τόσο η κεντρική συχνότητα αλλά και το εύρος ζώνης που θα αποδοθεί στο δευτερεύοντα χρήστη ανάλογα με τις απαιτήσεις μετάδοσης. Ταυτόχρονα, η διαθεσιμότητα των ζωνών συχνοτήτων μεταβάλλεται με αποτέλεσμα να χρειάζεται συνεχής προσαρμογή της αντίστοιχης εκχώρησης φάσματος απαιτώντας δυναμική εκχώρηση φάσματος. Ένας βασικός διαχωρισμός στην εκχώρηση φάσματος αποτελεί ο τρόπος με τον οποίο γίνεται διακρίνοντας έτσι την κεντρική και την κατανεμημένη εκχώρηση φάσματος.

- Κεντρική εκχώρηση φάσματος

Η κεντρική εκχώρηση φάσματος προϋποθέτει την ύπαρξη ενός κεντρικού κόμβου που εκτελεί τις ανάλογες πράξεις και λαμβάνει τις αποφάσεις σχετικά με την ανάθεση των καναλιών σε γνωστικούς κόμβους. Ο κεντρικός αυτός κόμβος μπορεί να είναι μια ξεχωριστή οντότητα του δικτύου που αναφέρεται ως εξυπηρετητής φάσματος

και πλειοδότης φάσματος ή ένας κεντρικός σταθμός βάσης που συλλέγει πληροφορίες φάσματος και μετάδοσης από όλους τους δευτερεύοντες χρήστες είτε περιοδικά είτε κατόπιν απαίτησης. Σχήματα που βασίζονται σε κεντρική προσέγγιση έχουν μελετηθεί σε αρκετές εργασίες όπως στις [22–26]. Μια κεντρική προσέγγιση παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα που οφείλονται στη συνολική εικόνα του δικτύου που έχει ένας πλειοδότης φάσματος. Διαθέτοντας τη συνολική εικόνα του δικτύου είναι ευκολότερη η μεγιστοποίηση της συνολικής ρυθμαπόδοσης του δικτύου και της ελαχιστοποίησης της παρεμβολής μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών συμβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο στη βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου. Ο πλειοδότης φάσματος έχει τη δυνατότητα να συνεισφέρει στην επίτευξη δικαιοσύνης είτε ως προς το φάσμα που αποδίδεται είτε ως προς τη ρυθμαπόδοση ελαχιστοποιώντας το πλήθος των άπληστων χρηστών που χρησιμοποιούν πολλές ζώνες συχνοτήτων για την αύξηση της ρυθμαπόδοσής τους προκαλώντας προβλήματα στους υπόλοιπους χρήστες. Η κεντρική εκχώρηση φάσματος μπορεί να αυξάνει τη ρυθμαπόδοση των χρηστών επιλεκτικά και μπορεί επίσης να ενσωματώσει έλεγχο τοπολογίας με χρήση γράφων σύγκρουσης για την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών μεταξύ δευτερευόντων χρηστών. Επιπλέον, ο εξυπηρετητής φάσματος μπορεί να χρησιμοποιεί προτεραιότητες σε συνδέσεις ή σε κόμβους με περιορισμένες διεπαφές για την εξασφάλιση της υψηλής ρυθμαπόδοσης αυτών των συνδέσεων. π.χ. για συνδέσεις κοντά σε πύλες. Από την άλλη πλευρά, ένα μεγάλο μειονέκτημα της κεντρικής εκχώρησης φάσματος είναι πως προκαλεί μεγάλο πλεόνασμα σηματοδοσίας στο δίκτυο λόγω της ανταλλαγής μετρήσεων μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών και του εξυπηρετητή φάσματος. Επίσης, αν ο εξυπηρετητής φάσματος σταματήσει να λειτουργεί για κάποιο λόγο, π.χ. λόγω σφάλματος ισχύος, η εκχώρηση φάσματος δεν θα είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί οδηγώντας κάθε χρήστη να επιλέγει μεμονωμένα ζώνες συχνοτήτων με αποτέλεσμα την ύπαρξη παρεμβολών.

- Κατανεμημένη εκχώρηση φάσματος

Στην κατανεμημένη εκχώρηση φάσματος [27–30] δεν υπάρχει κεντρική οντότητα υπεύθυνη να αποδώσει κανάλια στους δευτερεύοντες χρήστες. Στην περίπτωση αυτή, οι χρήστες λαμβάνουν αποφάσεις είτε μόνοι τους είτε σε συνεργασία με γείτονές τους μέσω ανταλλαγής πληροφορίας και μετρήσεων. Στην κατανεμημένη εκχώρηση φάσματος για παραδοσιακά ασύρματα δίκτυα [31, 32], κάθε κόμβος υπολογίζει μια μετρική, στέλνει την τιμή στους γείτονές του, υπολογίζει το φόρτο κίνησης κάθε καναλιού και μετά κάθε κόμβος επιλέγει το κανάλι με τη λιγότερη κίνηση ή το κανάλι στο οποίο θα προκαλέσει τη λιγότερη παρεμβολή στους γείτονές του. Πολλά είναι τα κριτήρια που μπορούν να τεθούν στην απόφαση εκχώρησης φάσματος. Η κατανεμημένη εκχώρηση φάσματος είναι σε γενικές γραμμές πιο ευέλικτη γιατί μπορεί

να προσαρμοστεί γρήγορα σε πιθανές αλλαγές ή σε διακοπές λειτουργίας του δικτύου γιατί μόνο οι δευτερεύοντες χρήστες της περιοχής που επηρεάζονται χρειάζεται να ανταλλάξουν πληροφορία και να επαναπροσαρμόσουν την εκχώρησή τους. Είναι μια διαδικασία πιο γρήγορη από την κεντρική εκχώρηση όπου χρειάζεται να αναπροσδιοριστεί η συνολική εκχώρηση φάσματος. Επιπλέον, η κατανεμημένη εκχώρηση φάσματος απαιτεί λιγότερη σηματοδότηση επειδή ανταλλάσσεται πληροφορία μεταξύ μόνο γειτονικών κόμβων. Οι αποφάσεις εκχώρησης λαμβάνονται γρηγορότερα αλλά δεν είναι βέλτιστες εξαιτίας την έλλειψης πληροφορίας για το συνολικό δίκτυο. Επίσης, δικαιοσύνη μπορεί να επιτευχθεί τμηματικά ανά υποομάδα του δικτύου και όχι συνολικά. Ένα σημαντικό θέμα επίσης στην κατανεμημένη εκχώρηση φάσματος είναι η αξιοπιστία της πληροφορίας που ανταλλάσσεται. Επειδή η απόφαση εκχώρησης φάσματος βασίζεται στην ανταλλαγή μετρήσεων μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών, η ανακριβής ή στοχευμένα παραποιημένη πληροφορία επηρεάζει σημαντικά το αποτέλεσμα. Κατ' αυτόν τον τρόπο μπορούν κακόβουλοι χρήστες να στείλουν λανθασμένη πληροφορία για ευκαιρίες φάσματος με σκοπό να τις εκμεταλλευτούν αποκλειστικά εκείνοι. Τα κατανεμημένα σχήματα πρέπει να παρέχουν κάποιο κίνητρο στους χρήστες να ανταλλάξουν πληροφορία και η πληροφορία αυτή να είναι ακριβής. Σε γενικές γραμμές η κατανεμημένη εκχώρηση φάσματος είναι επαρκής σε συνθήκες χαμηλής κίνησης δικτύου αλλά σε περιπτώσεις υψηλής κίνησης είναι αναγκαίο ένα κεντρικό σύστημα εκχώρησης φάσματος που θα λάβει καλύτερες συνολικά αποφάσεις έχοντας τη συνολική εικόνα του δικτύου.

2.5 Αγορά φάσματος

Η ένταξη των γνωστικών επικοινωνιών ως επιλογή για την ενίσχυση της αποτελεσματικής διαχείρισης του φάσματος άνοιξε το δρόμο σε μια πλούσια ερευνητική περιοχή, αυτή της αγοράς φάσματος. Τα προβλήματα που αναφέρονται στην αγορά φάσματος είναι ποικίλα όπως και οι αντίστοιχες μέθοδοι προσέγγισής τους. Οι οντότητες που συμμετέχουν στην αγορά φάσματος μπορεί να είναι οι πρωτεύοντες ιδιοκτήτες φάσματος (Primary Spectrum Owners-PSO), οι πρωτεύοντες χρήστες (Primary Users-PU), οι πρωτεύοντες διαχειριστές φάσματος (Primary Spectrum Operators-PSOP), οι δευτερεύοντες χρήστες (Secondary Users-SU), οι δευτερεύοντες διαχειριστές φάσματος (SSOP-Secondary Spectrum Operators) και οι δευτερεύοντες πάροχοι (Secondary Providers-SP). Στο [33] οι συγγραφείς επιχειρούν μια ταξινόμηση των σχετικών προβλημάτων καθώς και τον εντοπισμό των ανοικτών θεμάτων για μελλοντική έρευνα. Στο Σχήμα 2.4 απεικονίζεται το γενικό μοντέλο της αγοράς φάσματος [34].

Στην αγορά φάσματος, η αγοραπωλησία έχει ως αντικείμενο το εύρος ζώνης και μπορεί να γίνει με αντάλλαγμα άλλους πόρους, όπως άλλες ζώνες συχνοτήτων, χρόνος, ισχύς

κ.λ.π, ή χρήματα. Η οντότητα που προσφέρει ευκαιρίες στο φάσμα ονομάζεται πωλητής φάσματος (spectrum seller) και μπορεί να ανήκει σε κάποια από τις κατηγορίες που αναφέρθηκαν προηγουμένως, ενώ η οντότητα που ζητεί και αξιοποιεί τις ευκαιρίες χρήσης του φάσματος ονομάζεται αγοραστής φάσματος (spectrum buyer) και μπορεί επίσης να ανήκει σε οποιαδήποτε από τις προαναφερθείσες κατηγορίες.

Η δυναμική πρόσβαση στο φάσμα περιλαμβάνει διάφορες λειτουργίες όπως ανίχνευση φάσματος στο φυσικό στρώμα και στο στρώμα ζεύξης δεδομένων, ενσωμάτωση γνωστικότητας στο στρώμα ζεύξης δεδομένων, στη δρομολόγηση καθώς και σε πρωτόκολλα υψηλότερων στρωμάτων. Η αγορά φάσματος αποτελεί τον κλάδο που ασχολείται με τα οικονομικά θέματα της δυναμικής πρόσβασης στο φάσμα. Η αγορά φάσματος καθορίζει τη βάση της αγοραπωλησίας των φασματικών πόρων με κυριότερο αντικείμενο ενδιαφέροντος την τιμολόγησή τους. Άλλο, επίσης, ενδιαφέρον στοιχείο της αγοράς φάσματος είναι ο ανταγωνισμός ή η συνεργασία των οντοτήτων που λαμβάνουν μέρος σε αυτή την αγορά [35]. Στο Σχήμα 2.5 απεικονίζεται η συσχέτιση της αγοράς φάσματος με τη δυναμική πρόσβαση στο φάσμα.

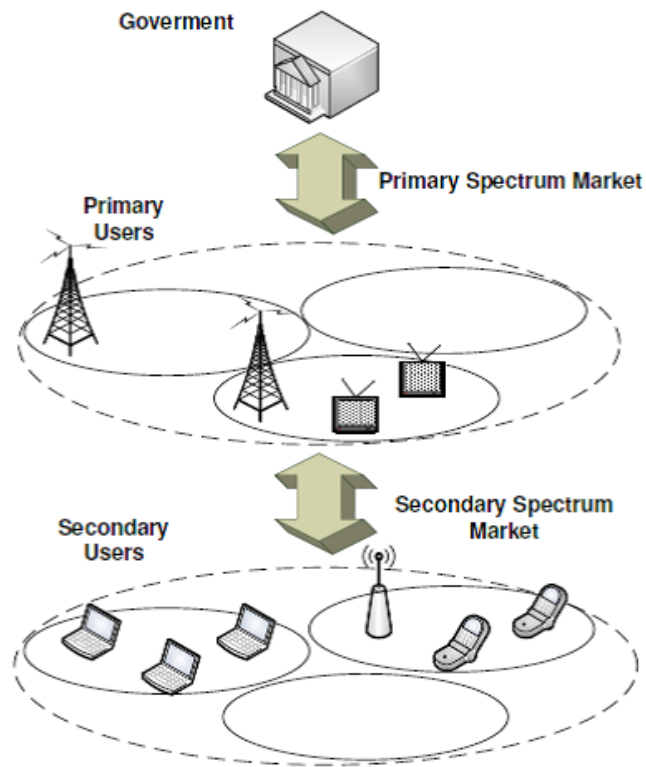
2.5.1 Είδη αγοραπωλησίας στην αγορά φάσματος

Στην αγορά φάσματος, το προσφερόμενο αγαθό από την πλευρά του πωλητή φάσματος οδηγεί σε ευκαιρίες πρόσβασης στο φάσμα. Το αντικείμενο αγοραπωλησίας μπορεί να είναι [33]

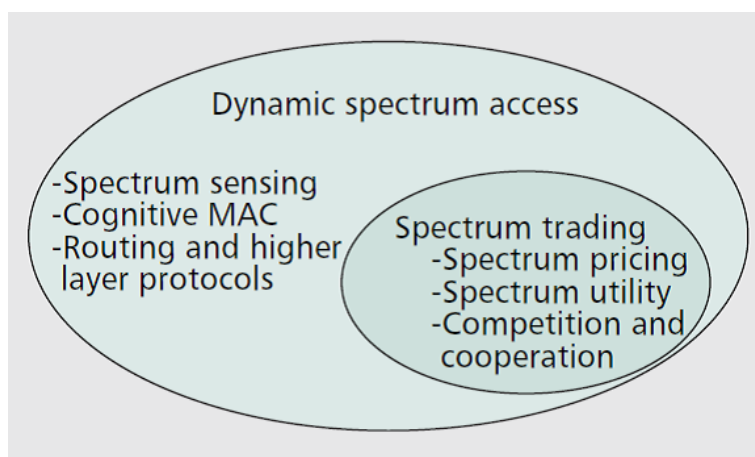
- Εύρος ζώνης (έλεγχος πρόσβασης μέσου βασισμένο σε FDMA)
- Ισχύς
- Χρόνος (TDMA)
- Ρυθμός μετάδοσης ή χωρητικότητα
- Αποδοχή συστήματος
- Συνδυασμός των προηγούμενων πόρων υπό την ευρύτερη έννοια του "καναλιού"

Καίτοι τα περισσότερα μοντέλα που αφορούν την αγορά φάσματος είναι ευέλικτα στο είδος των πόρων που θεωρούν ως ευκαιρίες φάσματος, η επιλογή του είδους που θα αποτελέσει αντικείμενο αγοραπωλησίας επηρεάζει τη διαμόρφωση των συναρτήσεων ανταμοιβών ή κέρδους.

Από την πλευρά του αγοραστή φάσματος, οι ευκαιρίες φάσματος παρέχονται με αντάλλαγμα συνήθως χρήματα. Υπάρχει, ωστόσο, η δυνατότητα το αντάλλαγμα να είναι άλλης μορφής. Υπάρχουν μοντέλα αγοράς φάσματος όπου οι δευτερεύοντες χρήστες προσφέρουν ως αντάλλαγμα τη συνεργασία τους με τον ιδιοκτήτη φάσματος με στόχο την αύξηση



Σχήμα 2.4: Αγορά φάσματος.



Σχήμα 2.5: Δυναμική πρόσβαση στο φάσμα και αγορά φάσματος.

της κάλυψης, της διάρκειας ζωής της μπαταρίας και/ή της ρυθμαπόδοσης του αδειοδοτημένου δικτύου. Τέτοια μοντέλα ανήκουν στην κατηγορία της Συνεργατικής Δευτερεύουσας Πρόσβασης στο φάσμα (Cooperative Secondary Spectrum Access-CSSA) ή αποτελούν τα Συνεργατικά Γνωστικά Δίκτυα (Cooperative Cognitive Radio Networks-CCRN).

Ένας πρωτεύων χρήστης παρέχει ευκαιρίες στο φάσμα σε ένα δευτερεύοντα χρήστη εφόσον ο δεύτερος, ως αντάλλαγμα, λειτουργήσει ως κόμβος αναμετάδοσης για τους πρωτεύοντες κόμβους. Αυτό το σενάριο διαφέρει από τις άλλες προσεγγίσεις αγοράς φάσματος καθώς οδηγεί στη δημιουργία ευκαιριών φάσματος που δεν υπήρχαν. Με την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης των πρωτευόντων χρηστών, μειώνεται η χρησιμοποίηση των πρωτευουσών ζωνών συχνοτήτων με αποτέλεσμα να μένουν, κατά διαστήματα, ελεύθερες προς εκμετάλλευση από τους δευτερεύοντες χρήστες. Η προσέγγιση αυτή έχει μεγάλο όφελος στις περιπτώσεις όπου οι απαιτήσεις των πρωτευόντων χρηστών είναι πολύ υψηλές και δεν αφήνουν περιθώρια για δευτερεύουσα χρήση των καναλιών.

Από τις πρώτες εργασίες προς την κατεύθυνση αυτή είναι αυτή των Simeone κλπ. [36] όπου θεωρείται ένας πρωτεύων χρήστης ως ζεύγος πομπού/δέκτη και ο χρόνος μετάδοσης κβαντίζεται σε χρονοσχισμές, εκάστη των οποίων περιλαμβάνει τρία στάδια. Στο πρώτο στάδιο, ο πομπός επικοινωνεί με το δέκτη του μέσω απευθείας σύνδεσης ενώ την πληροφορία τη λαμβάνουν και δευτερεύοντες χρήστες μέσω ευρυεκπομπής (broadcast). Στο δεύτερο στάδιο, κάποιοι από τους δευτερεύοντες χρήστες λειτουργούν ως αναμεταδότες για τον πρωτεύοντα δέκτη και αποστέλλουν σ' αυτόν την πληροφορία που έλαβαν στο πρώτο στάδιο. Στο τρίτο στάδιο, οι δευτερεύοντες μεταδότες μεταδίδουν στους αντίστοιχους δευτερεύοντες δέκτες τους. Πριν από κάθε χρονοσχισμή μετάδοσης, ο πρωτεύων χρήστης προσπαθεί να μεγιστοποιήσει τη συνάρτηση κέρδους του επιλέγοντας τους δευτερεύοντες χρήστες που θα λειτουργήσουν ως αναμεταδότες καθώς και καθορίζοντας τη χρονική διάρκεια κάθε σταδίου βασισμένος στις πληροφορίες ως προς το τι θα αποφέρει κάθε δευτερεύων χρήστης ανάλογα με τις συνθήκες μετάδοσης κάθε καναλιού. Στη συνέχεια, ο πρωτεύων χρήστης κοινοποιεί τις επιλογές του στους δευτερεύοντες χρήστες και εκείνοι προσπαθούν να βελτιστοποιήσουν τις δικές τους συναρτήσεις ανταμοιβής με δεδομένο ότι η ισχύς μετάδοσης προς τους πρωτεύοντες δέκτες θα είναι ίδια με την ισχύ μετάδοσης που χρησιμοποιούν και για τη δική τους μετάδοση. Αυτός ο περιορισμός προσφέρει και την επιλογή να μη λειτουργήσουν καθόλου ως αναμεταδότες οι δευτερεύοντες χρήστες εφόσον ο χρόνος που τους διατίθεται από τους πρωτεύοντες χρήστες για τη δική τους μετάδοση δεν τους ικανοποιεί. Έτσι, το σχήμα αυτό αποτελεί ένα μη συνεργατικό παίγνιο ελέγχου ισχύος.

Σε παρόμοιο πλαίσιο, οι Zhang κλπ. στο [37] αναδεικνύουν τον προβληματισμό ότι, όταν ένας πρωτεύων χρήστης ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του σε μετάδοση, δεν έχει κίνητρο να παραχωρήσει ευκαιρίες μετάδοσης σε δευτερεύοντες χρήστες. Για την αποφυγή αυτής της κατάστασης, προτείνεται οι δευτερεύοντες χρήστες να παρέχουν και χρήματα ως αντάλ-

λαγμα για τη δυνατότητα πρόσβασης στο φάσμα. Επίσης, προτείνεται και ένα διαφορετικό πρωτόκολλο επιπέδου πρόσβασης στο μέσο (MAC) βασισμένο στο χρόνο (TDMA) και όχι σε έλεγχο ισχύος με την υπόθεση ότι δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί ταυτόχρονη μετάδοση πολλών δευτερευόντων χρηστών σε ένα κανάλι όπως γίνεται στο [36]. Στο [37] η αλληλεπίδραση των δευτερευόντων χρηστών διατυπώνεται μαθηματικά ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο επιλογής. Οι δευτερεύοντες χρήστες επιλέγουν πόσα χρήματα είναι διατεθειμένοι να διαθέσουν για το χρόνο μετάδοσης που τους ανατίθεται λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές που καταβάλλουν οι υπόλοιποι χρήστες.

Σε ορισμένες εργασίες θεωρούνται πολλαπλές ζεύξεις πρωτεύουσες ή δευτερεύουσες. Στο μοντέλο που προτείνεται στο [38] θεωρείται ένα πρωτεύον δίκτυο και ένα αντίστοιχο δευτερεύον, και τα δύο κεντρικά ελεγχόμενα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχουν πολλαπλές ζεύξεις πομπών - δεκτών και προσφέρεται η επιλογή βέλτιστης ζεύξης για αναμετάδοση. Στο μοντέλο αυτό, όμως, δεν υπάρχει ανταγωνισμός μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών λόγω του κεντρικού ελέγχου που αποσκοπεί στη μεγιστοποίηση του συνολικού κέρδους των δευτερευόντων χρηστών και διαμορφώνει τους αντίστοιχους μηχανισμούς πληρωμής. Αντίθετα, στο [39] η λειτουργία των δευτερευόντων χρηστών θεωρείται αυτόνομη μη ελεγχόμενη κεντρικά. Οι χρήστες ανταγωνίζονται μεταξύ τους και η συμπεριφορά τους μελετάται μέσω της χρήσης συνασπιστικών παιγνίων που διαμορφώνουν οι πρωτεύοντες χρήστες με τους δευτερεύοντες χρήστες με τους οποίους τελικά συνεργάζονται με χρήση ή όχι χρηματικών ανταλλαγμάτων.

Στην κατηγορία της συνεργατικής δευτερεύουσας πρόσβασης στο φάσμα ανήκουν οι εργασίες [40] και [41] που χρησιμοποιούν αλγορίθμους μάθησης στο πλαίσιο ενός μηχανισμού διαπραγμάτευσης και δημοπρασίας υπό μη πλήρη πληροφόρηση. Η συνεργατική δευτερεύουσα πρόσβαση στο φάσμα μελετάται υπό διαφορετικές μορφές στη βιβλιογραφία. Στο [42] εξετάζεται η δυνατότητα να λειτουργούν ως αναμεταδότες και οι πρωτεύοντες και οι δευτερεύοντες χρήστες, απαιτώντας συνεργατική συμπεριφορά. Με χρήση της θεωρίας συμβολαίων προσεγγίζεται το πρόβλημα της αγοράς φάσματος όπου δευτερεύοντες χρήστες λειτουργούν ως αναμεταδότες των πρωτεύοντων και ανήκουν σε διαφορετικές κλάσεις υπηρεσίας ανάλογα με την ισχύ μετάδοσής τους [43], [44]. Οι δευτερεύοντες χρήστες λαμβάνουν ως αντάλλαγμα της προσφοράς τους ως αναμεταδότες του πρωτεύοντα πομποδέκτη, χρόνο πρόσβασης στο φάσμα για τη δική τους μετάδοση. Στο [45] μελετάται η βέλτιστη στρατηγική ενός δευτερεύοντος χρήστη που αποφασίζει για το αν θα συμμετέχει μέσω συνεργατικής πρόσβασης στο φάσμα ή μέσω μίσθωσης φάσματος.

Εκτός από την περίπτωση της συνεργατικής δευτερεύουσας πρόσβασης στο φάσμα, υπάρχει και η περίπτωση ένας δευτερεύοντος χρήστη να λειτουργεί ως αναμεταδότης για πρωτεύοντες χρήστες αλλά ταυτόχρονα να μεταδίδει πραγματοποιώντας τη δική του μετάδοση. Η δευτερεύουσα μετάδοση υπόκειται σε περιορισμούς ανεκτής παρεμβολής στους πρωτεύοντες χρήστες και αντιμετωπίζεται με τεχνικές ακύρωσης παρεμβολών [46].

2.5.2 Στόχοι της αγοράς φάσματος

Η αγορά φάσματος που αναπτύσσεται με τη χρήση γνωστικών δικτύων και δευτερεύοντων χρηστών, εξ ορισμού συμβάλλει στην καλύτερη διαχείριση των φασματικών πόρων και των ανεκμετάλλευστων ευκαιριών στο φάσμα. Εντούτοις, πρέπει να προσδιοριστεί ποιος ωφελείται από τη διαδικασία αυτή. Η αυτονόητη απάντηση θα ήταν ότι στόχος της τακτικής αυτής θα είναι το κοινωνικό όφελος (social welfare) που νοείται ως άθροισμα των ανταμοιβών όλων των οντοτήτων που συμμετέχουν στη διαδικασία. Όμως, ο στόχος αυτός από μόνος του προϋποθέτει ότι όλες οι οντότητες έχουν κίνητρο να λάβουν μέρος στην αγορά φάσματος. Για το λόγο αυτό, κατά το σχεδιασμό του συστήματος, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όλες οι συναρτήσεις ανταμοιβής. Τρεις είναι οι κύριες κατηγορίες προβλημάτων με κριτήριο το στόχο βελτιστοποίησης που ακολουθείται.

- Μεγιστοποίηση κοινωνικού οφέλους

Στα προβλήματα αυτά στόχος είναι η μεγιστοποίηση του σωρευτικού κέρδους όλων των οντοτήτων που συμμετέχουν στην αγορά φάσματος, τόσο των ιδιοκτητών φάσματος ή των πρωτευόντων χρηστών όσο και των δευτερευόντων χρηστών. Μεγιστοποιώντας αυτό το μέγεθος, όμως, δεν υπάρχει εγγύηση για τη δίκαιη κατανομή του κέρδους στις οντότητες που συμμετέχουν στις διαδικασίες. Για το λόγο αυτό, εισάγεται το μέτρο της δικαιοσύνης. Η μεγιστοποίηση του κοινωνικού οφέλους υπό συνθήκες δικαιοσύνης μπορεί να είναι ο στόχος μια αγοράς φάσματος για τη βέλτιστη χρησιμοποίηση των φασματικών πόρων από τους ρυθμιστές φάσματος [47], [48], [49].

- Μεγιστοποίηση του οφέλους του ιδιοκτήτη φάσματος

Σε ορισμένες κατηγορίες αγοράς φάσματος, οι πρωτεύοντες ιδιοκτήτες φάσματος πρέπει να έχουν κάποιο κίνητρο για να συμμετάσχουν στη διαδικασία μίσθωσης ζωνών συχνοτήτων σε δευτερεύοντες χρήστες. Το αντάλλαγμα είναι είτε χρηματικό είτε άλλης μορφής, όπως αναφέρθηκε στο εδάφιο 2.5.1. Έτσι, διατυπώνονται οι συναρτήσεις ανταμοιβής των πρωτευόντων ιδιοκτητών φάσματος που αποτελούν τις αντικειμενικές συναρτήσεις στα αντίστοιχα προβλήματα βελτιστοποίησης.

- Μεγιστοποίηση του οφέλους του δευτερεύοντος παρόχου φάσματος

Ένας δευτερεύων πάροχος φάσματος αποτελεί ενδιάμεση οντότητα μεταξύ των πρωτευόντων ιδιοκτητών φάσματος και των δευτερευόντων τελικών χρηστών και θεωρείται μέρος του μοντέλου αγοράς φάσματος. Ο δευτερεύων πάροχος φάσματος μπορεί να είναι και ένας εικονικός διαχειριστής που μισθώνει ζώνες συχνοτήτων σε ένα κυβελωτό δίκτυο πρόσβασης. Μέσω του παρόχου αυτού, ελαχιστοποιούνται οι διαδικασίες διαχείρισης των πρωτευόντων ιδιοκτητών αφού μισθώνουν το φάσμα κατευθείαν στο δευτερεύοντα πάροχο, ο οποίος αναλαμβάνει την απονομή του στους

δευτερεύοντες χρήστες. Επιπλέον, οι πρωτεύοντες πάροχοι μπορούν να επενδύουν στο φάσμα ευκολότερα και να μισθώνουν το πλεονάζον φάσμα τους σε δευτερεύοντες παρόχους. Από την πλευρά του, ο δευτερεύων πάροχος δεν χρειάζεται να συνάψει μακροχρόνια συμβόλαια για τη παροχή φάσματος αλλά να επιλέγει βάσει της ζήτησης των δευτερευόντων χρηστών.

- Μεγιστοποίηση του οφέλους των δευτερευόντων χρηστών

Στην τελευταία περίπτωση, στόχος του μοντέλου αγοράς φάσματος είναι η μεγιστοποίηση της ανταμοιβής των δευτερευόντων χρηστών. Εξετάζεται το όφελός τους από την πρόσβαση στο φάσμα με χρήση μιας συνάρτησης ανταμοιβής που λαμβάνει υπόψη και το αντίστοιχο κόστος και διατυπώνονται αντίστοιχα προβλήματα βελτιστοποίησης. Απαραίτητο για την ορθή διατύπωση του μοντέλου αυτού είναι η εξασφάλιση του κινήτρου των πρωτευόντων ιδιοκτητών φάσματος ή των πρωτευόντων διαχειριστών φάσματος ώστε να συμμετέχουν σε αυτή την αγορά φάσματος.

2.5.3 Μορφές αγοράς φάσματος

Τα συστήματα αγοράς φάσματος εντοπίζονται υπό διαφορετικές μορφές με κυρίαρχες αυτές του μονοπωλίου και του ολιγοπωλίου.

2.5.3.1 Μονοπώλιο

Σε μια μονοπωλιακή αγορά φάσματος, ένας μοναδικός πωλητής φάσματος παρέχει φασματικές ευκαιρίες σε αγοραστές χωρίς κάποιον ανταγωνιστή. Οι συνήθεις αγοραστές σε μονοπωλιακές αγορές είναι δευτερεύοντες χρήστες ή δευτερεύοντες διαχειριστές φάσματος. Στις περιπτώσεις αυτές είναι φανερό ότι ο πωλητής φάσματος βρίσκεται σε πλεονεκτική θέση σε σχέση με αγορές φάσματος που περιλαμβάνουν περισσότερους πωλητές, αφού μπορεί ο ίδιος να καθορίζει τις συνθήκες πώλησης που τον εξυπηρετούν χωρίς να αντιμετωπίζει ανταγωνισμό. Ωστόσο, είναι αρκετές οι πρακτικές περιπτώσεις που μπορεί να υποδεικνύουν την ανάγκη ύπαρξης ενός μονοπωλιακού μοντέλου. Για παράδειγμα, μόνο ένας πρωτεύων διαχειριστής φάσματος ή πρωτεύων πάροχος να είναι σε θέση να διαθέσει πλεονάζον φάσμα σε δευτερεύοντες χρήστες ή μόνο ένας να έχει την κατάλληλη υποδομή για να υποστηρίξει δευτερεύοντα δίκτυα.

Ο συνήθης τρόπος προσέγγισης των προβλημάτων αυτών είναι μέσω της τιμολόγησης. Οι δευτερεύοντες χρήστες αποφασίζουν τη ζήτησή τους σε πόρους και, αντίστοιχα, οι πρωτεύοντες διαχειριστές φάσματος ή πάροχοι προσαρμόζουν την τιμολογιακή τους πολιτική. Μια συνάρτηση ζήτησης μπορεί να περιλαμβάνει το ζητούμενο εύρος ζώνης, συγκεκριμένο ρυθμό μετάδοσης, χρονική διάρκεια μίσθωσης φάσματος και διάφορες άλλες παραμέτρους ανάλογα με το είδος του προβλήματος. Οι δευτερεύοντες χρήστες εμφανίζονται

ως πράκτορες (agents) που λαμβάνουν μέρος σε μια παιγνιοθεωρητική προσέγγιση. Από την άλλη πλευρά, οι πωλητές φάσματος αποσκοπούν στη μεγιστοποίηση του οφέλους τους λαμβάνοντας υπόψη την αντίδραση των δευτερευόντων χρηστών σε αλλαγές της τιμολογιακής πολιτικής. Φυσικά, η θεώρηση αυτή έχει ως προαπαιτούμενο την πλήρη γνώση των χρηστών που συμμετέχουν στη διαδικασία σχετικά με τις συναρτήσεις ζήτησης. Ενδεικτικές εργασίες που αντιμετωπίζουν με εφαρμογή της θεωρίας παιγνίων μοντέλα συστήματος που αφορούν μονοπωλιακές αγορές φάσματος είναι οι [50] [51] [52] [36] [37] [39].

Μια άλλη δημοφιλής προσέγγιση αντιμετώπισης προβλημάτων αγοράς φάσματος σε μονοπώλια είναι οι δημοπρασίες. Στα προβλήματα αυτά δεν θεωρείται πάντα ως προαπαιτούμενο η πλήρης γνώση των συναρτήσεων ζήτησης και των εκάστοτε παραμέτρων. Συνήθως ο νικητής της δημοπρασίας αναδεικνύεται μέσω μιας διαδικασίας βελτιστοποίησης ως προς το ρυθμιστή του μονοπωλίου. Σε ορισμένες εργασίες [48] [53] [54], οι δευτερεύοντες χρήστες χρειάζεται να υποβάλουν μόνο την εκτίμησή τους για την αξία του προς πώληση αγαθού ενώ, σε άλλες [55] [56], οι προσφορές των δευτερευόντων χρηστών προκύπτουν μέσω παιγνίων που διαμορφώνονται μεταξύ τους. Μια μέθοδος αγοράς φάσματος με χρήση της θεωρίας δημοπρασιών παρουσιάζεται και στο [57] για τη μεγιστοποίηση της συνολικής ανταμοιβής των δευτερευόντων χρηστών και του πρωτεύοντα χρήστη.

Στην περίπτωση όπου η πλήρης πληροφόρηση δεν υπάρχει, ένας τρόπος χειρισμού των προβλημάτων αγοράς φάσματος είναι μέσω της θεωρίας συμβολαίων. Στις εργασίες [58] και [43] εισάγεται η έννοια της αγοράς φάσματος με διάκριση του προσφερόμενου αγαθού σε κατηγορίες ως προς την ποιότητα. Οι δευτερεύοντες χρήστες ταξινομούνται σε διακριτές κατηγορίες-κλάσεις με κριτήριο την προτίμησή τους στην αγορά φάσματος υπό δεδομένη ποιότητα υπηρεσίας. Ως πωλητής φάσματος εμφανίζεται ένας σταθμός βάσης ή κάποιο σημείο πρόσβασης που αποσκοπεί στο να καταλήξει στο βέλτιστο σύνολο συμβολαίων υπό τη μορφή ζευγών ποιότητας υπηρεσίας-τιμής. Τα συμβόλαια αυτά θα αντιστοιχούν κατά μονοσήμαντο τρόπο στις κλάσεις των δευτερευόντων χρηστών. Κάθε κλάση αποδέχεται το αντίστοιχο συμβόλαιο-ζεύγος χωρίς να προσδοκά όφελος αν προτιμήσει συμβόλαιο-ζεύγος που προορίζεται για διαφορετική κλάση. Μια προσέγγιση βασισμένη στη θεωρία συμβολαίων παρουσιάζεται στο [59] με το σχεδιασμό κατάλληλων σχημάτων για συνεργατικό διαμοιρασμό φάσματος. Στο [44] εξετάζεται ένας μηχανισμός διαμοιρασμού φάσματος βασισμένος σε θεωρία συμβολαίων όπου οι δευτερεύοντες χρήστες λειτουργούν ως αναμεταδότες για την πρωτεύουσα κίνηση δεδομένων σε αντάλλαγμα για την παροχή χρόνου πρόσβασης σε ελεύθερες/ μη χρησιμοποιούμενες ζώνες συχνοτήτων. Οι δευτερεύοντες χρήστες κατατάσσονται σε κλάσεις υπηρεσίας ανάλογα με την ισχύ εκπομπής τους και εξετάζεται η περίπτωση πλήρους και μη πλήρους πληροφόρησης ως προς την κλάση στην οποία ανήκουν οι παίκτες. Η βραχυπρόθεσμη αγορά φάσματος από δευτερεύοντες χρήστες σε ένα υβριδικό μοντέλο μελετάται στο [60] με τη χρήση στοχαστικής πληροφορίας για το δίκτυο και αποσκοπώντας στη μεγιστοποίηση του αναμενόμενου κέρδους του

πρωτεύοντος διαχειριστή φάσματος. Η μακροπρόθεσμη και η βραχυπρόθεσμη αγορά μεταξύ ενός πρωτεύοντος διαχειριστή φάσματος και πολλών δευτερευόντων χρηστών εξετάζεται στο [61] με χρήση της θεωρίας συμβολαίων και ενός παιγνίου Stackelberg, αντίστοιχα. Στο [62], εξετάζεται ένα πρόβλημα σχεδιασμού συμβολαίων, όπου ένας κάτοχος πρωτεύουσας άδειας αποσκοπεί στην εκμετάλλευση της πλεονάζουσας χωρητικότητας φάσματος μέσω της μίσθωσης ζωνών συχνοτήτων σε δευτερεύοντες χρήστες.

Στο [63], ακολουθείται μια προσέγγιση βελτιστοποίησης, κατά την οποία ο μονοπωλιακός πωλητής φάσματος χρησιμοποιεί δυναμικό προγραμματισμό για να καθορίσει τις πολιτικές που θα τον οδηγήσουν σε μεγιστοποίηση του κέρδους του. Οι πολιτικές αυτές υποδεικνύουν ποιοί δευτερεύοντες χρήστες επιτρέπονται και ποιοί αποκλείονται από το προς πώληση φάσμα λαμβάνοντας υπόψη ότι η τελική τιμή διαμορφώνεται ανάλογα με την κατάληψη των αντίστοιχων καναλιών. Η εναλλαγή στις τιμές επηρεάζει και το ρυθμό άφιξης των δευτερευόντων χρηστών επηρεάζοντας έτσι και την τελική πολιτική που θα επιβληθεί. Μια πλήρως κατανεμημένη προσέγγιση παρουσιάζεται στο [64], όπου δευτερεύοντες χρήστες συμμετέχουν σε ένα μη συνεργατικό παίγνιο για τον προσδιορισμό της ισχύος την οποία θα χρησιμοποιήσει ο καθένας κατά τη μετάδοσή του. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται κατά κατανεμημένο τρόπο από κάθε δευτερεύοντα χρήστη χρησιμοποιώντας μόνο τοπικά διαθέσιμη πληροφορία (κέρδος καναλιού των γειτόνων) χωρίς να χρειάζεται η ανταλλαγή κάποιας πληροφορίας. Αντίστοιχο παράδειγμα είναι και το [65], όπου ο πωλητής φάσματος υπολογίζει ένα υποσύνολο των παραμέτρων που συμμετέχουν στην τιμολόγηση και τις κοινοποιεί στους δευτερεύοντες χρήστες για να υπολογίσουν με τη σειρά τους τις δικές του παραμέτρους.

2.5.3.2 Ολιγοπώλιο

Υπάρχουν περιπτώσεις όπου μια μονοπωλιακή μορφή αγοράς δεν αντιστοιχεί στο υπό εξέταση σύστημα. Σε μια περιοχή μπορεί να υπάρχουν περισσότεροι του ενός ιδιοκτήτες φάσματος που ενδιαφέρονται για τη διάθεση μέρους αυτού σε δευτερεύουσες οντότητες. Φυσικά μια τέτοια περίπτωση ευνοεί τους αγοραστές φάσματος καθώς δημιουργείται ανταγωνισμός και αυξάνεται η ευημερία (welfare) των χρηστών.

Η διαμόρφωση ενός ανταγωνιστικού μοντέλου αγοράς φάσματος εμφανίζει πολλές προκλήσεις. Όταν μειώνεται το κέρδος των ιδιοκτητών φάσματος, αυτοί είναι διατεθειμένοι να μετέλθουν επιθετικές στρατηγικές για να εξαλείψουν τον ανταγωνισμό και να διαμορφώσουν ένα μονοπώλιο με ρυθμιστές τους ίδιους. Αυτό μπορεί να γίνει μέσω της αγοράς περισσότερου φάσματος όχι για την παροχή καλύτερης ποιότητας υπηρεσίας ή για την παροχή νέων υπηρεσιών αλλά για τον αποκλεισμό άλλων από το συγκεκριμένο εύρος ζώνης. Για την αποφυγή τέτοιων καταστάσεων, μια καλά διαμορφωμένη ρυθμιστική τακτική πρέπει προστατεύσει και να ενισχύσει τον ανταγωνισμό, διατηρώντας, όμως, και τα κίνητρα συμμετοχής των ιδιοκτητών φάσματος σε αυτό τον ανταγωνισμό.

Η επίδραση του ανταγωνισμού εξετάζεται στο [66] σε μια συγκριτική μελέτη διαφορετικών μοντέλων χρήσης του φάσματος από δευτερεύοντες χρήστες, συγκεκριμένα μέσω δημοπρασίας, τιμολόγησης και μεσιτείας. Γίνεται ανάλυση της επίδρασης μέγιστων τιμών στις διαφορετικές θεωρήσεις και εξετάζεται ποιιά θεώρηση εξυπηρετεί περισσότερο τις ανάγκες μια ώριμης αγοράς φάσματος. Το συμπέρασμα της ανάλυσης αυτής είναι ότι η καταλληλότερη προσέγγιση στην αντιμετώπιση προβλημάτων αγοράς φάσματος είναι αυτή της τιμολόγησης γιατί, όχι μόνο αποφέρει μεγαλύτερα οφέλη, αλλά τα κέρδη αυτά επιμερίζονται δικαιότερα μεταξύ των οντοτήτων που συμμετέχουν στο συγκεκριμένο μοντέλο. Στο [67] εξετάζονται επιθετικές στρατηγικές υπό δύο διαφορετικές προσεγγίσεις: βραχυχρόνιες επιθετικές στρατηγικές που αποσκοπούν στην προσέλκυση περισσότερων χρηστών και μακροπρόθεσμες επιθετικές στρατηγικές που αντιστοιχούν σε μια διαρκή τιμολογιακή πολιτική που αποφέρει μεγάλα κέρδη. Παρουσιάζεται, επίσης, μια συνεργατική στρατηγική για τους μικρότερους ιδιοκτήτες φάσματος, με στόχο την αποφυγή δημιουργίας μονοπωλίου.

Στο [68], η τιμολογιακή πολιτική του φάσματος αναλύεται μέσω ενός παιγνίου Bertrand σε μια ολιγοπωλιακή αγορά που αποτελείται από πρωτεύοντες παρόχους φάσματος. Η μίσθωση ελεύθερων ζωνών συχνότητας που αρχικά προορίζονταν για πρωτεύοντες χρήστες, εξετάζεται με χρήση ενός παιγνίου δύο επιπέδων στο [69]. Η δυναμική αντιγράφων χρησιμοποιείται για την επιλογή υπηρεσίας στο κατώτερο επίπεδο, ενώ, στο ανώτερο επίπεδο διαμορφώνεται ένα διαφορετικό παίγνιο μίσθωσης φάσματος για τον ανταγωνισμό των πλειοδοτών του φάσματος. Στις παιγνιοθεωρητικές προσεγγίσεις, η συνάρτηση ανταμοιβής των παικτών θεωρείται γνωστή σε όλους τους παίκτες.

Ωστόσο, στην περίπτωση όπου δεν παρέχεται πλήρης πληροφόρηση για την εκτίμηση των πόρων από τους παίκτες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η θεωρία της δημοπρασίας. Παράδειγμα χρήσης δημοπρασίας σε ολιγοπώλιο είναι η εφαρμογή επαναληπτικής δημοπρασίας με Bayesian μη παραμετρική μάθηση για φασματική πρόσβαση γνωστικών δικτύων [70].

2.6 Αγορά φάσματος και υβριδικά μοντέλα πρόσβασης στο φάσμα

Ο συνδυασμός διαφορετικών μοντέλων πρόσβασης, συγκεκριμένα του "Μοντέλου Ιεραρχικής Πρόσβασης" και του "Μοντέλου Δυναμικής Αποκλειστικής Χρήσης" κερδίζει ολοένα και περισσότερο το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας. Συγκεκριμένα, σε μια αγορά φάσματος όπου γνωστικοί χρήστες ανταγωνίζονται για τους φασματικούς πόρους, παρέχεται η δυνατότητα ευκαιριακής πρόσβασης στο φάσμα (OSA) και αποκλειστικής πρόσβασης στο φάσμα (exclusive spectrum access-ESA). Οι δευτερεύοντες χρήστες εφαρμό-

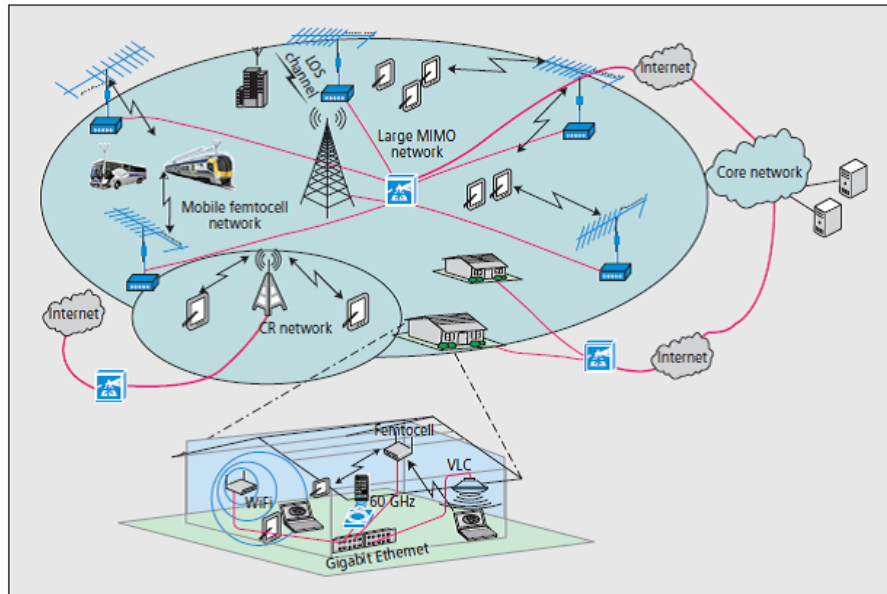
ζουν τεχνικές ανίχνευσης για τον εντοπισμό των ελεύθερων ζωνών συχνοτήτων και την εφαρμογή ευκαιριακής πρόσβασης στο φάσμα. Αντίθετα, στο πλαίσιο της αποκλειστικής πρόσβασης στο φάσμα, οι διαθέσιμες ζώνες συχνοτήτων ανατίθενται αποκλειστικά σε δευτερεύοντες χρήστες με συγκεκριμένο τίμημα. Σε αυτήν την περίπτωση, δεν απαιτείται ανίχνευση του φάσματος.

Μέχρι τώρα, ο αριθμός των δημοσιευμένων εργασιών που πραγματεύονται τη δυνατότητα των δευτερευόντων χρηστών να επιλέγουν το είδος της πρόσβασης είναι περιορισμένος. Στο [71], παρέχεται στους δευτερεύοντες χρήστες η επιλογή της αποκλειστικής μίσθωσης φάσματος ή της δωρεάν χρήσης της ζώνης συχνοτήτων των πρωτεύοντων χρηστών. Η αντίστοιχη ανάλυση βασίζεται στη θεωρία ουρών και, όταν κάποιος δευτερεύων χρήστης έχει μόνο μια επιλογή, οδηγείται σε ένα σημείο ισορροπίας Nash. Η δυναμική συμπεριφορά των χρηστών δικτύου που συμμετέχουν ως δευτερεύοντες ή πρωτεύοντες χρήστες και οι αντίστοιχες τακτικές τιμολόγησης εξετάζονται στο [72] με τη χρήση ενός απλού μοντέλου ουράς M/M/1 και τη βοήθεια των δυναμικών αντιγράφων (replicator dynamics) και τεχνικών βελτιστοποίησης. Ένας συνδυασμός ευκαιριακής και αποκλειστικής πρόσβασης στο φάσμα θεωρείται στο [73], όπου εξετάζεται ο ανταγωνισμός τιμών μεταξύ σταθμών βάσης (Base Stations-BSs), τόσο στην περίπτωση όπου αυτοί συνεργάζονται όσο και στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει συνεργασία οδηγώντας σε ένα παίγνιο Stackelberg. Ένα συνδυαστικό σχήμα τιμολόγησης και εξισορρόπησης φορτίου περιγράφεται στο [74], όπου ορίζεται μια αγορά μονοπωλίου και ολιγοπωλίου με δευτερεύοντες χρήστες να αποκτούν αποκλειστική και ευκαιριακή πρόσβαση στο φάσμα. Οι δευτερεύοντες χρήστες καθορίζουν το ρυθμό άφιξης σε κάθε επιλογή πρόσβασης ανάλογα με την τιμολογιακή πολιτική που ακολουθείται από τους διαχειριστές φάσματος.

2.7 Δίκτυα 5ης γενιάς

Για την αντιμετώπιση της ραγδαίας αύξησης της ζήτησης ευρυζωνικών συνδέσεων υψηλών ταχυτήτων, έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για την εξέλιξη των συστημάτων 3GPP Long-Term Evolution (LTE). Τελευταία, ο κλάδος κινητών επικοινωνιών επικεντρώνεται στην έρευνα για τα κυψελωτά συστήματα 5ης γενιάς (5G) που αναμένεται να χρησιμοποιηθούν για πρώτη φορά το 2020 [75].

Ένα από τα βασικά ζητήματα για τα κυψελωτά δίκτυα 5G είναι η επιτακτική ανάγκη απόκτησης επαρκών φασματικών πόρων (ζώνες συχνοτήτων) για τη λειτουργία τους. Ως εκ τούτου, τα γνωστικά δίκτυα που διαθέτουν τη δυνατότητα επίγνωσης του περιβάλλοντος καθώς και ευελιξία στην προσαρμογή των παραμέτρων μετάδοσης, έχουν ελκύσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας αλλά και της βιομηχανίας και έχουν προταθεί ως η τεχνολογία που θα επιτρέψει τη δυναμική πρόσβαση σε ανεκμετάλλετους φασματικούς πόρους.



Σχήμα 2.6: Προτεινόμενη αρχιτεκτονική για ετερογενή ασύρματα κυψελωτά δίκτυα 5ης γενιάς.

Προκειμένου να επιτευχθούν οι δύσκολες απαιτήσεις σε μεγάλη χωρητικότητα, μαζική συνδεσιμότητα, υψηλή αξιοπιστία και χαμηλή καθυστέρηση στα ασύρματα δίκτυα 5ης γενιάς, τα γνωστικά δίκτυα αναμένεται να παίξουν σημαντικό ρόλο σε δύο πεδία. Πρώτον, δεδομένου ότι η ζώνη συχνοτήτων των δικτύων 5G θα επεκταθεί ακόμα και στο επίπεδο χιλιοστομετρικών κυμάτων (millimeter-wave), οι γνωστικοί ραδιοπομποί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της αξιοποίησης του φάσματος προστατεύοντας, παράλληλα, ένα μεγάλο εύρος συνυπαρχόντων χρηστών σε ένα επίσης μεγάλο εύρος μοντέλων πρόσβασης στις ζώνες συχνοτήτων, όπως το μοντέλο κοινής χρήσης του ραδιοφάσματος, δυναμικής χρηματοδοτικής μίσθωσης φάσματος κ.λπ. Δεύτερον, στα δίκτυα 5G η αναχρησιμοποίηση του φάσματος αναμένεται να είναι ένα από τα χαρακτηριστικά-κλειδιά χρησιμοποιώντας νέες τεχνικές, όπως μαζικό MIMO (massive MIMO) και δίκτυα μεγάλης πυκνότητας (Ultra-dense). Στο πλαίσιο αυτό, τα γνωστικά τερματικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το μετριασμό των προβλημάτων παρεμβολών σε επίπεδο χώρου, συχνότητας και χρόνου με δυναμικό τρόπο [76].

Κεφάλαιο 3

Μαθηματικό υπόβαθρο για τα προβλήματα πρόβλεψης και αξιοποίησης ασύρματων διαύλων

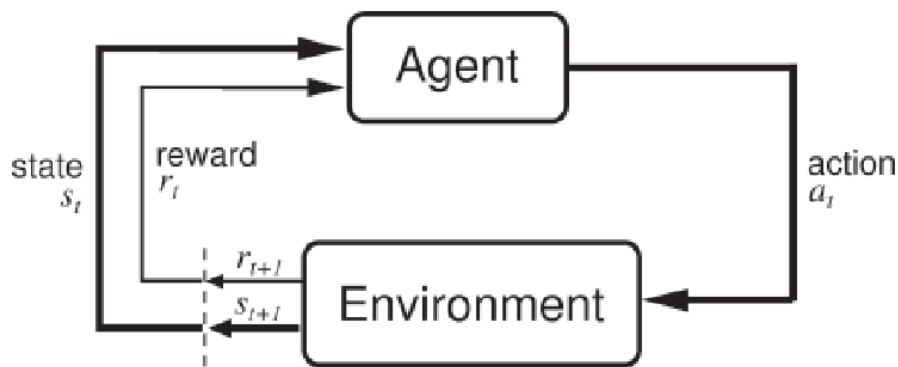
Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των μαθηματικών εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο των προβλημάτων πρόβλεψης και αξιοποίησης ασύρματων διαύλων. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές ενισχυτικής μάθησης, θεωρία παιγνίων και θεωρία βελτιστοποίησης.

3.1 Ενισχυτική μάθηση

Ο όρος ενισχυτική μάθηση (reinforcement learning) αναφέρθηκε για πρώτη φορά στην τεχνητή νοημοσύνη από τον Minski το 1961 και στη θεωρία ελέγχου από τους Waltz και Fu το ίδιο έτος. Οι αρχές της ενισχυτικής μάθησης τοποθετούνται στις πρώτες μέρες ανάπτυξης του κυβερνοχώρου με τις έρευνες στη στατιστική, ψυχολογία, νευροεπιστήμη και επιστήμη των υπολογιστών. Τελευταία, έχει προσελκύσει ραγδαία αυξανόμενο ενδιαφέρον στον τομέα της μηχανικής μάθησης και της τεχνητής νοημοσύνης. Οι προοπτικές που ανοίγονται με τη χρήση της ενισχυτικής μάθησης είναι δελεαστικές. Πρόκειται για ένα τρόπο προγραμματισμού πρακτόρων (agents) με ανταμοιβή ή τιμωρία σε κάθε ενέργειά τους, χωρίς να χρειάζεται να προσδιοριστεί ο τρόπος που πρέπει να επιτευχθεί ο στόχος.

3.1.1 Τεχνικές ενισχυτικής μάθησης

Η βάση της ενισχυτικής μάθησης είναι η μάθηση μέσω της εμπειρίας. Οι οντότητες μάθησης που εμπλέκονται είναι φορείς/πράκτορες λήψης αποφάσεων ενώ το περιβάλλον λειτουργίας χαρακτηρίζεται από ένα διακριτό σύνολο καταστάσεων (states) S . Συνοπτικά, ένας πράκτορας δέχεται ως είσοδο πληροφορία από το περιβάλλον, επιλέγει μια δράση α από ένα σύνολο δράσεων A και λαμβάνει μια ανταμοιβή ενίσχυσης (reinforcement signal/reward) $R(s, \alpha)$, που εξαρτάται από την επιλεγείσα δράση α και από την τρέχουσα κατάσταση s του περιβάλλοντος [77].



Σχήμα 3.1: Μοντέλο λειτουργίας ενισχυτικής μάθησης.

Όταν σε ένα υπό μελέτη πρόβλημα οι δράσεις του χρήστη/πράκτορα, εκτός από την άμεση ανταμοιβή, επηρεάζουν και τις επόμενες καταστάσεις του περιβάλλοντος καθώς και τις μελλοντικές ανταμοιβές, το συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να διατυπωθεί ως πρόβλημα διαδικασίας λήψης αποφάσεων Markov (Markov decision process-MDP). Οι επιλογές ενός πράκτορα έχουν δύο επακόλουθα: (i) αποφέρουν μια ανταμοιβή σύμφωνα με τη συνάρτηση ανταμοιβής $R : \mathbf{S} \times \mathbf{A} \rightarrow \mathfrak{R}$; και (ii) οδηγούν σε νέα κατάσταση $s, s' \in \mathbf{S}$, σύμφωνα με τη συνάρτηση μετάβασης καταστάσεων $T : \mathbf{S} \times \mathbf{A} \rightarrow \Pi(\mathbf{S})$, όπου $\Pi(\mathbf{S})$ είναι η πιθανοτική κατανομή των καταστάσεων \mathbf{S} .

Για την επίλυση των προβλημάτων μάθησης σε περιβάλλοντα MDP, δηλαδή για την εύρεση της βέλτιστης τακτικής που μεγιστοποιεί τις μελλοντικές ανταμοιβές των πρακτόρων, έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι. Οι σχετικές τεχνικές εξαρτώνται από τη θεώρηση του εκάστοτε υπό αντιμετώπιση προβλήματος. Τα διάφορα μοντέλα καθορίζουν (i) τη συνάρτηση ανταμοιβής $R(s, \alpha)$, που προσδιορίζει την ανταμοιβή που λαμβάνει ο πράκτορας επιλέγοντας τη δράση α ενώ βρίσκεται στην κατάσταση s , και (ii) τη συνάρτηση μετάβασης $T(s, a, s')$, δηλαδή την πιθανότητα μετάβασης στην κατάσταση s' όταν ο πράκτορας βρίσκεται στην κατάσταση s και επιλέγει τη δράση α . Οι τεχνικές για τον καθορισμό της βέλτιστης τακτικής χρησιμοποιούν συγκεκριμένα μοντέλα για την περιγραφή των συναρτήσεων ανταμοιβής και μετάβασης, εφόσον τέτοια μοντέλα υπάρχουν. Σε προβλήματα ενισχυτικής μάθησης όπου τέτοια μοντέλα δεν είναι διαθέσιμα, η βέλτιστη τακτική προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας μεθόδους που δεν προϋποθέτουν συγκεκριμένο μοντέλο (model-free). Τέτοια μέθοδος είναι ο αλγόριθμος Q-learning που είναι ένας αλγόριθμος απευθείας (online) μάθησης [78].

3.1.2 Αλγόριθμος Q-learning

Η τιμή Q, $Q_{t+1}(s_t, \alpha_t)$, είναι η ενίσχυση της επιλογής της δράσης α_t όταν ο πράκτορας είναι στην κατάσταση s_t . Βελτιστοποίηση επιτυγχάνεται επιλέγοντας δράσεις που μεγιστο-

ποιούν τη συνολική ενίσχυση. Όταν:

- (i) ο πράκτορας επιλέγει τη δράση α_t στην κατάσταση s_t και
- (ii) λειτουργεί με βέλτιστο τρόπο κατά τις επόμενες χρονικές στιγμές, δηλαδή επιλέγει δράσεις που μεγιστοποιούν την ενίσχυση στην επόμενη κατάσταση όπως αυτή λαμβάνεται τη χρονική στιγμή t , δηλαδή την $Q_t(s_{t+1}, \alpha_{t+1})$, η αναμενόμενη ενίσχυση εκφράζεται υπό τη μορφή

$$Q_{t+1}(s_t, \alpha_t) = [1 - l_t(s_t, \alpha_t)]Q_t(s_t, \alpha_t) + l_t(s_t, \alpha_t)[R_t(s_t, \alpha_t) + \gamma \cdot Q_t(s_{t+1}, \alpha_{t+1})], \quad (3.1)$$

όπου s_{t+1} και α_{t+1} αντιστοιχούν στην κατάσταση και τη δράση που ακολουθείται στην επόμενη χρονική στιγμή, $l_t(s_t, \alpha_t)$ είναι η παράμετρος μάθησης, $R_t(s_t, \alpha_t)$ είναι η ανταμοιβή που λαμβάνεται επιλέγοντας τη δράση α_t όταν ο πράκτορας βρίσκεται στην κατάσταση s_t και γ είναι ο συντελεστής απομείωσης που χρησιμοποιείται και αφορά τη συνεισφορά των μελλοντικών ενισχύσεων ($0 \leq \gamma \leq 1$). Οι αλγόριθμοι ενισχυτικής μάθησης (R-L) αποτελούνται από δύο βασικά μέρη [79]:

- (i) τον κανόνα ενημέρωσης (updating rule) που καθορίζει πώς ένας πράκτορας λαμβάνει υπόψη τη συσσωρευμένη εμπειρία του για την ενημέρωση των τιμών Q,
- (ii) την πολιτική μάθησης που, χρησιμοποιώντας τις τιμές Q, καθορίζει την επιλογή της επόμενης δράσης.

Ο κανόνας ενημέρωσης που περιγράφεται στην (3.1) αποτελεί μια εκδοχή off-policy του αλγορίθμου Q-learning. Αυτό σημαίνει ότι ο πράκτορας θα επιτύχει να μάθει την ενίσχυση της βέλτιστης τακτικής ανεξάρτητα από τις δράσεις που θα επιλέξει. Η διαδικασία ενημέρωσης λαμβάνει υπόψη τις μελλοντικές δράσεις και ο αλγόριθμος ενσωματώνει τη βέλτιστη επιλογή δράσεων μέσω της αναδρομικής εφαρμογής της (3.1) οδηγώντας στη βέλτιστη τακτική.

Κατά την έναρξη της διαδικασίας μάθησης, η παράμετρος μάθησης πρέπει να τίθεται σε υψηλές τιμές ώστε η νέα πληροφορία και η αντίστοιχη ενίσχυση να συνεισφέρουν στο σχηματισμό των τιμών Q περισσότερο από την ήδη γνωστή ενίσχυση. Ωστόσο, μετά από ικανό αριθμό επαναλήψεων, η παράμετρος μάθησης πρέπει να μειώνεται ώστε να μειώνεται αντίστοιχα η επίδραση τυχαίων περιστατικών στην αντίληψη του περιβάλλοντος που έχει διαμορφωθεί μέχρι εκείνη τη στιγμή. Αν $l_t(s_t, \alpha_t) = 1$, ο πράκτορας λαμβάνει υπόψη μόνο την τρέχουσα πληροφορία και αγνοεί τις παρελθούσες τιμές Q. Η παράμετρος γ ποσοτικοποιεί τη συνεισφορά των προβλεπόμενων μελλοντικών ενισχύσεων στις τρέχουσες αποφάσεις.

Ο αλγόριθμος Q-learning είναι ο δημοφιλέστερος model-free αλγόριθμος μάθησης για δύο λόγους. Καταρχήν, είναι σχετικά εύκολος στην υλοποίηση σε σύγκριση με άλλους αλγόριθμους μάθησης, και δεύτερον, συγκλίνει στη βέλτιστη τακτική ανεξάρτητα από την ακολουθία των επιλεγμένων δράσεων. Έντονη εξερεύνηση οδηγεί σε υψηλούς χρόνους σύγκλισης. Καίτοι συγκλίνει σε βέλτιστη κατάσταση, την κατάσταση που αποφέρει το μέγιστο όφελος, ο αλγόριθμος Q-learning παρουσιάζει χαμηλές επιδόσεις όταν είτε ο αριθμός των πιθανών καταστάσεων ή των διαθέσιμων δράσεων είναι υψηλός [80].

3.2 Θεωρία Παιγνίων

Η θεωρία παιγνίων παρέχει μια κοινή βάση για τη διατύπωση, ανάλυση και κατανόηση δύσκολων στρατηγικών σεναρίων. Γενικά, η θεωρία παιγνίων ερευνά αντικρουόμενες καταστάσεις όπου εμπλέκονται διαφορετικές οντότητες που λαμβάνουν αποφάσεις. Ένα παίγνιο αφορά ένα πεπερασμένο (συνήθως) αριθμό παικτών που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους βάσει συγκεκριμένων κανόνων. Οι παίκτες αυτοί μπορεί να είναι μεμονωμένες οντότητες, ομάδες, εταιρείες, οργανισμοί κ.λ.π. Η αλληλεπίδρασή τους έχει αντίκτυπο στο σύνολο των παικτών, δηλαδή όλοι οι παίκτες αλληλεξαρτώνται [81].

Ιστορικά, η θεωρία παιγνίων διατυπώθηκε για πρώτη φορά το 1928. Ο John von Neumann αναλύοντας επιτραπέζια παιχνίδια ανακάλυψε την πρακτική διάσταση αυτής της προσέγγισης για την ανάλυση οικονομικών παιγνίων. Στο βιβλίο που ολοκλήρωσε μαζί με τον Oskar Morgenstern [82] εφάρμοσε τη μαθηματική θεωρία σε οικονομικά ζητήματα. Αυτό θεωρείται και η απαρχή της θεωρίας παιγνίων όπως είναι γνωστή σήμερα.

3.2.1 Βασικοί ορισμοί

Ένα παίγνιο απεικονίζεται συνήθως ως μια τριάδα της μορφής $\mathbf{G} = (\mathbf{N}, \mathbf{S}, \mathbf{U})$, όπου \mathbf{N} είναι το σύνολο των παικτών $\mathbf{N} = \{n_1, \dots, n_N\}$, $\mathbf{S} = \{S_1, \dots, S_N\}$ το σύνολο των διαθέσιμων στρατηγικών κάθε παίκτη και \mathbf{U} το διάνυσμα που περιέχει τις ανταμοιβές των παικτών. Ένα παίγνιο είναι πεπερασμένο όταν ο αριθμός τόσο των παικτών όσο και των στρατηγικών είναι πεπερασμένος. Τα παίγνια όπου όλοι οι παίκτες είναι ταυτόσημοι και, παράλληλα, διαθέτουν και το ίδιο σύνολο στρατηγικών \mathbf{S} ονομάζονται συμμετρικά παίγνια. Στα συμμετρικά παίγνια, οι ανταμοιβές εξαρτώνται αποκλειστικά από τις στρατηγικές που επιλέγονται και όχι από το ποιοί παίκτες τις επιλέγουν.

Ως προς την απεικόνισή τους τα παίγνια μπορούν να διακριθούν επίσης σε δύο κατηγορίες.

- Παίγνια σε κανονική μορφή

Ένα παίγνιο σε κανονική μορφή αποτελείται από:

1. Ένα πεπερασμένο αριθμό παικτών.
2. Ένα σύνολο στρατηγικών για κάθε παίκτη.
3. Μια συνάρτηση ανταμοιβής που αποδίδει συγκεκριμένες ανταμοιβές σε κάθε παίκτη αντίστοιχα με τη στρατηγική που ακολουθεί σε συνδυασμό και με τη στρατηγική των άλλων παικτών.

Τα παίγνια σε κανονική μορφή (στρατηγική μορφή) διατυπώνουν σενάρια όπου ένας ή περισσότεροι παίκτες πρέπει να πάρουν άμεσα και ταυτόχρονα μια απόφαση. Η κανονική μορφή αποτελεί συνοπτική μορφή παιγνίου, αποτελούμενη μόνο από την επιλογή των στρατηγικών των παικτών και είναι περισσότερο εύχρηστη για μαθηματική ανάλυση. Το γεγονός ότι όλοι οι παίκτες λαμβάνουν τις αποφάσεις ταυτόχρονα δεν οφείλεται σε χρονικό περιορισμό αλλά σε περιορισμό ως προς τη διαθέσιμη πληροφορία.

Όταν το πλήθος των παικτών περιορίζεται σε δύο και το σύνολο των στρατηγικών κάθε παίκτη περιορίζεται επίσης σε δύο στρατηγικές, η συνάρτηση ανταμοιβής μπορεί να απεικονιστεί μέσω αντίστοιχου πίνακα ανταμοιβών. Στο Σχ. 3.2 απεικονίζεται ένα παράδειγμα παιγνίου σε κανονική μορφή, συγκεκριμένα του παιγνίου του διλήμματος του φυλακισμένου.

	<i>C</i>	<i>D</i>
<i>C</i>	-1, -1	-4, 0
<i>D</i>	0, -4	-3, -3

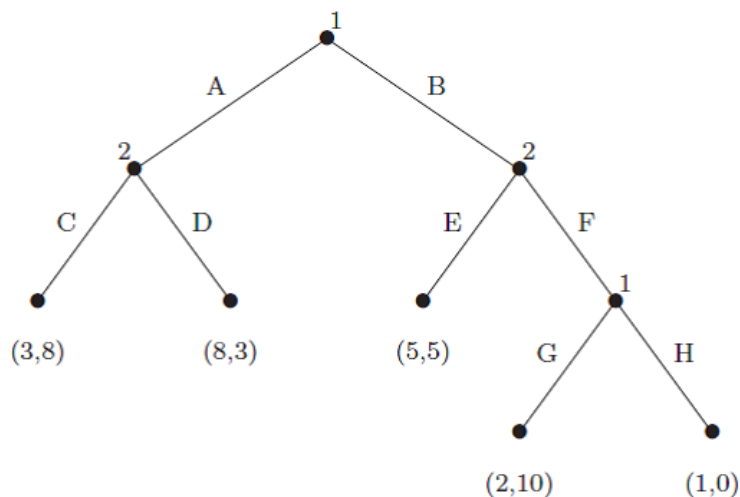
Σχήμα 3.2: Απεικόνιση παιγνίου σε κανονική μορφή (το δίλημμα του φυλακισμένου - *prisoner's dilemma*).

Στο Σχ. 3.2 απεικονίζεται το παίγνιο που είναι γνωστό ως το δίλημμα του φυλακισμένου. Οι παίκτες-φυλακισμένοι είναι δύο και οι επιλογές τους είναι να συνεργαστούν με τις αρχές (C-cooperate) και να ομολογήσουν τη συμμετοχή τους σε ένα έγκλημα που έχουν διαπράξει από κοινού ή να μη συνεργαστούν και να αρνηθούν τη συμμετοχή τους (D-defect). Τα περιεχόμενα του πίνακα αποτελούνται από το αποτέλεσμα στην ανταμοιβή του κάθε παίκτη για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς στρατηγικών. Για παράδειγμα, όταν και οι δύο διαλέγουν να συνεργαστούν (C) λαμβάνουν

την ανταμοιβή -1 ενώ όταν ο ένας συνεργάζεται (C) και ο άλλος δεν συνεργάζεται, λαμβάνουν -4 και 0 αντίστοιχα.

- Απεικόνιση παιγνίου σε εκτεταμένη μορφή

Σε αντίθεση με τα παίγνια σε κανονική μορφή, οι κανόνες που διέπουν ένα παίγνιο σε εκτεταμένη μορφή διαμορφώνονται καθώς οι παίκτες εκτελούν τις κινήσεις τους διαδοχικά. Το παίγνιο αυτό περιγράφεται μέσω δένδρου, όπου οι κόμβοι αναφέρονται στις πιθανές καταστάσεις του παιγνίου. Ο αρχικός κόμβος αντιπροσωπεύει την αρχή του παιγνίου. Κάθε κόμβος που έχει μόνο μία ακμή συνδεδεμένη σε αυτόν αποτελεί τελικό κόμβο και αντιπροσωπεύει το τέλος του παιγνίου (και του αντίστοιχου στρατηγικού προφίλ). Όλοι οι άλλοι κόμβοι αποτελούν καταστάσεις στις οποίες ο παίκτης καλείται να επιλέξει μια κίνηση. Κάθε ακμή αποτελεί μια διαθέσιμη δράση ενός παίκτη. Οι τελικοί κόμβοι αποκαλύπτουν και την αθροιστική ανταμοιβή μιας ακολουθίας δράσεων (και ενός στρατηγικού προφίλ). Ένα παράδειγμα παιγνίου σε εκτεταμένη μορφή απεικονίζεται στο Σχ. 3.3.



Σχήμα 3.3: Παιγνιο σε εκτεταμένη μορφή.

3.2.2 Σημείο Ισοροπίας Nash

Μια βασική έννοια της θεωρίας παιγνίων είναι αυτή της ισοροπίας. Πρόκειται για το προφίλ στρατηγικής $s^* = \{s_1^*, \dots, s_N^*\}$ που αποτελείται από τις στρατηγικές που μεγιστοποιούν τις ατομικές ανταμοιβές όλων των παικτών. Το σημείο ισοροπίας κυρίαρχων στρατηγικών είναι ένα προφίλ στρατηγικής που αποτελείται από τις κυρίαρχες στρατηγικές όλων των παικτών. Επειδή στην πλειοψηφία τους τα παίγνια δεν έχουν σημείο ισοροπίας κυρίαρχων στρατηγικών, χρησιμοποιείται το σημείο ισοροπίας Nash (Nash Equilibrium-NE). Πρόκειται για το προφίλ στρατηγικής όπου κανένας παίκτης δεν έχει κίνητρο να αλ-

λάξει τη στρατηγική του εφόσον οι υπόλοιποι παίκτες δεν επιλέξουν να αλλάξουν τη δική τους. Ένα NE σημείο είναι συμμετρικό όταν όλοι οι παίκτες ακολουθούν την ίδια στρατηγική. Ο John Nash το 1950 διατύπωσε τη θεωρία ότι κάθε παίγνιο με πεπερασμένο πλήθος παικτών και στατηγικών έχει τουλάχιστον ένα σημείο ισορροπίας Nash [83].

Βέλτιστη απόκριση (best response) είναι η στρατηγική που παράγει το καλύτερο αποτέλεσμα για κάποιον παίκτη δεδομένου ότι οι υπόλοιποι παίκτες βρίσκονται σε συγκεκριμένη κατάσταση. Η έννοια της βέλτιστης απόκρισης χρησιμοποιείται για την εύρεση του σημείου ισορροπίας Nash σε παίγνια κανονικής μορφής χρησιμοποιώντας τον πίνακα ανταμοιβών.

Οι παίκτες μπορούν να ακολουθούν αμιγείς ή μικτές στρατηγικές. Οι μικτές στρατηγικές αποτελούν συνδυασμούς μεμονωμένων διαθέσιμων δράσεων. Ένα παίγνιο με πεπερασμένο πλήθος αμιγών στρατηγικών μπορεί να διαθέτει μη πεπερασμένο αριθμό μικτών στρατηγικών. Ως εκ τούτου, ένα NE σημείο μπορεί να χαρακτηριστεί ως αμιγές ή μικτό NE σημείο αντίστοιχα με το είδος των κυρίαρχων στρατηγικών. Κάθε πεπερασμένο συμμετρικό παίγνιο διαθέτει ένα συμμετρικό NE μικτής στρατηγικής [84].

3.2.3 Κατηγοροποίηση Παιγνίων

Τα παίγνια μπορούν να διακριθούν σε διάφορες κατηγορίες με βάση τα χαρακτηριστικά τους και τη φύση των προβλημάτων για τα οποία έχουν διατυπωθεί. Οι βασικοί διαχωρισμοί που μπορούν να γίνουν βάσει αυτών των χαρακτηριστικών είναι οι εξής [85]:

- Στατικά/δυναμικά παίγνια

Η βασική διαφορά των δύο αυτών κατηγοριών είναι ότι, στα δυναμικά παίγνια, οι παίκτες μπορούν να εξάγουν πληροφορία από την εφαρμογή προηγούμενων στρατηγικών και να την λάβουν υπόψη τους προκειμένου να προσαρμόσουν τις τρέχουσες ή τις μελλοντικές κινήσεις τους. Αντίθετα, στα στατικά παίγνια, οι παίκτες έχουν συγκεκριμένη γνώση η οποία δεν μεταβάλλεται.

- Στοχαστικά/μη στοχαστικά παίγνια

Ένα από τα βασικά συστατικά των στοχαστικών παιγνίων είναι η ύπαρξη καταστάσεων του παιγνίου που εξελίσσονται (συνήθως στο χρόνο και ακολουθώντας συγκεκριμένο στοχαστικό κανόνα). Ειδική κατηγορία των παιγνίων αυτών αποτελούν τα επαναλαμβανόμενα παίγνια, στα οποία το ίδιο στατικό παίγνιο επαναλαμβάνεται.

- Συνεργατικά/μη συνεργατικά παίγνια

Η βασική διαφορά ανάμεσα στις δύο αυτές κατηγορίες είναι ότι στα μη συνεργατικά παίγνια οι στόχοι και οι στρατηγικές κάθε παίκτη μπορούν να διαχωριστούν, κάτι το οποίο δεν είναι πάντα εφικτό στα συνεργατικά παίγνια. Εντούτοις, πρέπει να επισημανθεί ότι συνεργασία μεταξύ παικτών μπορεί να υπάρξει και στην περίπτωση μη

συνεργατικών παιγνίων καθιστώντας δύσκολο το διαχωρισμό μεταξύ των δύο αυτών κατηγοριών.

- Παιγνία πλήρους/μη πλήρους πληροφόρησης

Στα παιγνία πλήρους πληροφόρησης, θεωρείται ότι τα χαρακτηριστικά του παιγνίου (όπως για παράδειγμα οι διαθέσιμες στρατηγικές κάθε παίκτη καθώς και οι συναρτήσεις χρησιμότητάς τους) είναι γνωστά σε όλους τους παίκτες. Από την άλλη πλευρά, στα παιγνία μη πλήρους πληροφόρησης, οι παίκτες διαθέτουν μόνο μερική πληροφόρηση για το παίγνιο.

- Παιγνία πλήρους/ελλιπούς πληροφόρησης

Η βασική διαφορά ανάμεσα στις δύο αυτές κατηγορίες είναι η γνώση του ιστορικού ενός παιγνίου. Συγκεκριμένα, όταν όλοι οι παίκτες γνωρίζουν τέλεια το παρελθόν του παιγνίου, προκύπτουν παιγνία πλήρους πληροφόρησης. Στην αντίθετη περίπτωση, προκύπτουν παιγνία ελλιπούς πληροφόρησης. Στο σημείο αυτό, πρέπει να επισημανθεί ότι η ορολογία που χρησιμοποιείται στη θεωρία παιγνίων διαφέρει από αυτήν που χρησιμοποιείται συνήθως στις τηλεπικοινωνίες. Συγκεκριμένα, ενώ ο όρος «ελλιπής» στις τηλεπικοινωνίες αναφέρεται στην περίπτωση που ένα μέγεθος δεν είναι πλήρως γνωστό (π.χ. στην περίπτωση της ελλιπούς γνώσης καναλιού), στην θεωρία παιγνίων ο όρος αυτός αναφέρεται αποκλειστικά στην έλλειψη γνώσης του ιστορικού του παιγνίου. Επομένως, τα τηλεπικοινωνιακά προβλήματα στα οποία κάποια μεγέθη δεν είναι γνωστά και χρησιμοποιούνται εκτιμήσεις τους, ανήκουν στην κατηγορία των παιγνίων μη πλήρους πληροφόρησης και όχι ελλιπούς πληροφόρησης.

- Παιγνία μηδενικού αθροίσματος/μη μηδενικού αθροίσματος

Τα παιγνία στα οποία το άθροισμα των ανταμοιβών/οφελών των παικτών είναι μηδενικό ή σταθερό αναφέρονται ως παιγνία μηδενικού ή σταθερού αθροίσματος. Η βασική ιδέα σε αυτά τα παιγνία είναι ότι όταν ένας παίκτης ωφελείται κάποιος άλλος παίκτης πρέπει οπωσδήποτε να ζημιωθεί.

3.3 Εξελικτική Θεωρία Παιγνίων

Η εξελικτική θεωρία παιγνίων (Evolutionary Game Theory-EGT) αναπτύχθηκε ως ένα μαθηματικό πλαίσιο για να μελετήσει τις αλληλεπιδράσεις ανάμεσα σε βιολογικές οντότητες που θεωρούνται πως δρουν ως λογικοί πράκτορες. Χρησιμοποιήθηκε επίσης για να περιγράψει μαθηματικά τη συμπεριφορά ανθρώπινων οντοτήτων στην κοινωνία καθώς και οντοτήτων στο περιβάλλον αγοράς.

Σε ένα συμβατικό παίγνιο ο στόχος ενός λογικού παίκτη είναι η επιλογή μιας στρατηγικής που μεγιστοποιεί το κέρδος του. Αντίθετα, στο πλαίσιο της εξελικτικής θεωρίας παι-

γνίων, το παίγνιο διεξάγεται κατά επαναλαμβανόμενο τρόπο από παίκτες που επιλέγονται τυχαία από ένα μεγάλο πληθυσμό. Γενικά, μια εξελικτική διαδικασία συνδυάζει δύο σημαντικούς μηχανισμούς, το μηχανισμό μετάλλαξης (mutation mechanism) ο οποίος οδηγεί στον τυχαίο σχηματισμό ποικιλιών, δηλαδή στο σχηματισμό μιας κατηγορίας παικτών με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, και το μηχανισμό επιλογής (selection mechanism) ο οποίος ευνοεί τη δημιουργία συγκεκριμένων ποικιλιών έναντι άλλων. Η μετάλλαξη συνδέεται με την έννοια των εξελικτικά ευσταθών στρατηγικών (Evolutionary Stable Strategies-ESS) που αποτελούν εξέλιξη της ισορροπίας Nash. Ο μηχανισμός επιλογής συνδέεται με τη δυναμική αντιγράφων σύμφωνα με την οποία ένας υποπληθυσμός αυξάνεται ή μειώνεται όταν επιλέγει στρατηγικές που είναι καλύτερες ή χειρότερες από το μέσο όρο, αντίστοιχα [86], [87].

3.3.1 Εξελικτικά ευσταθείς στρατηγικές

Οι εξελικτικά ευσταθείς στρατηγικές αποτελούν την κομβική έννοια στην εξελικτική θεωρία παιγνίων. Ένας πληθυσμός που ακολουθεί εξελικτικά ευσταθή στρατηγική επικρατεί των υπολοίπων. Συγκεκριμένα, έστω ότι ο αρχικός πληθυσμός επιλέγει μια αμιγή ή μικτή στρατηγική x και ότι ένα μικρό κλάσμα του πληθυσμού ϵ , $\epsilon \in (0, 1)$, επιλέγει μια διαφορετική αμιγή ή μικτή στρατηγική y (στρατηγική μετάλλαξης). Συνεπώς, οι πιθανότητες ο πληθυσμός να επιλέξει τη στρατηγική x και τη στρατηγική y είναι $1 - \epsilon$ και ϵ αντίστοιχα. Η ανταμοιβή του παιγνίου αυτού είναι το ίδιο με αυτό ενός παιγνίου στο οποίο ο παίκτης επιλέγει τη μικτή στρατηγική $w = \epsilon \cdot y + (1 - \epsilon) \cdot x$. Τα κέρδη των στρατηγικών x και y , δεδομένου ότι ο υπόλοιπος πληθυσμός επιλέγει τη στρατηγική w , ορίζονται ως $u(x, w)$ και $u(y, w)$, αντίστοιχα.

Μια στρατηγική x ονομάζεται εξελικτικά ευσταθής αν, για κάθε στρατηγική $y \neq x$, υπάρχει $\bar{\epsilon} \in (0, 1)$ τέτοιο ώστε η ανισότητα

$$u[x, \epsilon \cdot y + (1 - \epsilon) \cdot x] > u[y, \epsilon \cdot y + (1 - \epsilon) \cdot x]. \quad (3.2)$$

να ισχύει για κάθε $\epsilon \in (0, \bar{\epsilon})$.

3.3.2 Δυναμική Αντιγράφων

Η δυναμική αντιγράφων (Replicator Dynamics) [88] προσδιορίζει πώς εξελίσσονται στο χρόνο τα τμήματα του πληθυσμού που ακολουθούν διαφορετικές αμιγείς στρατηγικές. Σε αντίθεση με την εξελικτική ευστάθεια, στη δυναμική αντιγράφων οι παίκτες προγραμματίζονται να επιλέγουν μόνο αμιγείς στρατηγικές. Για τον ορισμό της δυναμικής αντιγράφων, θεωρείται ένας μεγάλος αλλά πεπερασμένος πληθυσμός παικτών που όλοι επιλέγουν την αμιγή στρατηγική $s \in \mathbf{S}$ όπου \mathbf{S} είναι το σύνολο των στρατηγικών. Αν $n_s(t)$ είναι ο αριθμός των πρακτόρων που επιλέγουν τη στρατηγική s τη χρονική στιγμή t , ο συνολικός αριθμός

πρακτόρων σε ένα πληθυσμό μπορεί να θεωρηθεί ως το άθροισμα

$$N(t) = \sum_{s \in \mathbf{S}} n_s(t). \quad (3.3)$$

Κατ' αυτό τον τρόπο, η αναλογία των πρακτόρων που χρησιμοποιούν συγκεκριμένη αμιγή στρατηγική είναι

$$x_s(t) = \frac{n_s(t)}{N(t)}. \quad (3.4)$$

Συνεπώς, η κατάσταση του πληθυσμού μπορεί να οριστεί από τη μορφή του διανύσματος

$$\mathbf{x}(t) = [x_1(t), \dots, x_{|S|}(t)]^T. \quad (3.5)$$

Έστω ότι το όφελος ενός πράκτορα που χρησιμοποιεί τη στρατηγική s , δεδομένης της κατάστασης του πληθυσμού \mathbf{x} , είναι $u(s, \mathbf{x})$. Επομένως, το μέσο όφελος του πληθυσμού είναι ίσο με

$$\bar{u}(\mathbf{x}) = \sum_{s \in \mathbf{S}} x_s \cdot u(s, \mathbf{x}). \quad (3.6)$$

Όπως είναι αναμενόμενο, ο ρυθμός αναπαραγωγής κάθε πράκτορα, δηλαδή ο ρυθμός με τον οποίο κάθε πράκτορας αλλάζει στρατηγική, εξαρτάται από το αναμενόμενο όφελός του, δηλαδή όσο μεγαλύτερο είναι το αναμενόμενο όφελος εφόσον ακολουθηθεί μια στρατηγική, τόσο ταχύτερη θα είναι η μετάβαση σε αυτήν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το πλήθος της ομάδας πρακτόρων που έχουν μεγαλύτερο όφελος να μεγαλώνει με την πάροδο του χρόνου. Επομένως, το δυναμικό της αναλογίας του πληθυσμού μπορεί να εκφραστεί υπό τη μορφή

$$\dot{x}_s = x_s \cdot (u(s, \mathbf{x}) - \bar{u}(\mathbf{x})). \quad (3.7)$$

όπου \dot{x}_s η χρονική παράγωγος της κατάστασης του πληθυσμού x_s . Η εξελικτική ισορροπία καθορίζεται από τη σχέση

$$\dot{x}_s = 0. \quad (3.8)$$

Η 3.8 ουσιαστικά σημαίνει ότι η αναλογία του πληθυσμού που επιλέγει διαφορετικές στρατηγικές παραμένει σταθερή. Εκτός, όμως από την εύρεση της εξελικτικής ισορροπίας, είναι σημαντικό να καθοριστεί η σταθερότητά της. Οι δύο βασικές προσεγγίσεις που αποδεικνύουν τη σταθερότητα της εξελικτικής ισορροπίας βασίζονται στη συνάρτηση Lyapunov και στις ιδιοτιμές του αντίστοιχου γραμμικού συστήματος.

3.4 Θεωρία Συμβολαίων

Όπως και με τις άλλες σημαντικές έννοιες στα οικονομικά, η έννοια της θεωρίας συμβολαίων εισήχθη από τον Adam Smith στο έργο του ο Πλούτος των Εθνών [89] με το οποίο εξέ-

τασε τη σχέση μεταξύ των ιδιοκτητών γης και των αγροτών υπό το πρίσμα συμβολαίων. Για παράδειγμα, επισήμανε τα στρεβλά κίνητρα που παρέχονται μέσω των συλλογικών συμβολαίων που ήταν πολύ διαδεδομένα στην Ευρώπη του 18ου αιώνα. Ωστόσο, τα ζητήματα των κινήτρων και η θεωρία των συμβολαίων αγνοήθηκαν σε μεγάλο βαθμό από τους οικονομολόγους, μέχρι το τέλος του 20ου αιώνα. Μέχρι τότε, στο επίκεντρο της οικονομικής θεωρίας ήταν η λειτουργία των αγορών και η εξ αυτής διαμόρφωση των τιμών. Στα τέλη της δεκαετίας του 1970, με τη μεθοδολογική επανάσταση της θεωρίας παιγνίων, δόθηκε μεγαλύτερη έμφαση στις στρατηγικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ ενός μικρού αριθμού παικτών σε ένα περιβάλλον όπου τα θέματα πληροφορίας έχουν σημαντικό ρόλο.

Η θεωρία συμβολαίων είναι γνωστή και ως θεωρία των κινήτρων, της πληροφορίας και των οικονομικών θεσμών [90]. Γενικά, η θεωρία συμβολαίων μελετά την αλληλεπίδραση μεταξύ οικονομικών πρακτόρων και/ή θεσμών που οδηγεί στη σύναψη συμβολαίων τα οποία δημιουργούν υποχρεώσεις υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Οι έννοιες της διαλογής, του ηθικού κινδύνου, της σηματοδοσίας κ.α. τροφοδοτούν το θεωρητικό υπόβαθρο για τη σύναψη ενός συμβολαίου. Η πολυπλοκότητα ενός συμβολαίου, καθώς και η ποικιλία προσεγγίσεων στη θεωρία συμβολαίων, οφείλεται σε δύο συντελεστές: (i) στη διαθέσιμη πληροφορία σε διαφορετικές χρονικές στιγμές και (ii) στη διαδικασία της αγοραπωλησίας, δηλαδή στον τρόπο με το οποίο αλληλεπιδρούν οι πράκτορες και εφαρμόζονται οι κανόνες του συμβολαίου. Οι συντελεστές αυτοί καθορίζουν άλλους σημαντικούς παράγοντες, όπως η πληρότητα ενός συμβολαίου κ.α.

Οι βασικές έννοιες στη θεωρία συμβολαίων είναι οι εξής [91]:

- Κατάσταση φύσης και κατάσταση ενδεχομένων

Κατάσταση φύσης είναι κάθε πιθανό γεγονός που επηρεάζει την ανταμοιβή μιας οντότητας. Ο χώρος των καταστάσεων είναι το σύνολο όλων των μελλοντικών ενδεχομένων. Επομένως, ένα αγαθό ή μια ενέργεια σε μια κατάσταση ενδεχομένων αναπροσδιορίζεται σε κάθε διαφορετική κατάσταση φύσης.

- Ασύμμετρη πληροφορία

Η έννοια αυτή περιγράφει την περίπτωση όπου ένας πράκτορας έχει περισσότερη ή καλύτερη πληροφορία από κάποιον άλλο. Αυτό παρέχει πλεονέκτημα στην καλύτερα πληροφορημένη οντότητα, οδηγώντας σε ένα πρόβλημα δυσμενούς επιλογής για τη μη πληροφορημένη οντότητα.

- Δυσμενής επιλογή

Προκύπτει όταν οι αποφάσεις μιας πληροφορημένης οντότητας εξαρτώνται από την πληροφορία που κατέχει κατά τρόπο που επηρεάζει δυσμενώς τους συμμετέχοντες στην αγοραπωλησία που δεν είναι πληροφορημένοι αντίστοιχα.

- Ηθικός κίνδυνος

Η έννοια αυτή περιγράφεται με την περίπτωση όπου ένας εργοδότης δεν μπορεί να ελέγξει τι κάνει ένας εργαζόμενος, πόσο σκληρά εργάζεται για παράδειγμα. Οι πράξεις του εργαζόμενου είναι άγνωστες προς τον εργοδότη, ενώ ο εργαζόμενος μπορεί να έχει κίνητρο να συμπεριφερθεί με μη προβλεπόμενο τρόπο επηρεάζοντας αρνητικά την απληροφόρητη οντότητα μέσω εγωιστικών πράξεων.

- Η αρχή της αποκάλυψης

Για τον προσδιορισμό βέλτιστων συμβολαίων υπό ασύμμετρη πληροφορία, πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν ότι για κάθε είδος πληροφορίας, την οποία μπορεί να διαθέτει η πληροφορημένη πλευρά, αντιστοιχεί ένα μόνο συμβόλαιο. Επίσης, πρέπει να εξασφαλίζεται πως κάθε εμπλεκόμενος τύπος πράκτορα έχει το κίνητρο να επιλέξει το συμβόλαιο που προορίζεται για αυτόν.

- Ατελές συμβόλαιο

Δεν είναι σαφής ο ορισμός των ατελών συμβολαίων. Κατά βάση, αντιπροσωπεύουν ένα περιορισμό στο σύνολο των υλοποιήσιμων συμβολαίων σε ένα δεδομένο μοντέλο. Συγκεκριμένα μοντέλα υλοποίησης, ο ηθικός κίνδυνος και η δυσμενής επιλογή παρέχουν τον οδηγό για τη σκιαγράφηση του συνόλου των υλοποιήσιμων συμβολαίων που ορίζονται ως ατελή συμβόλαια.

- Ex-ante και Ex-post

Η ύπαρξη μιας κατάστασης θ καθορίζει ένα αποτέλεσμα βάσει του οποίου συνάπτεται ένα συμβόλαιο. Ωστόσο, οι συμβαλλόμενοι μπορεί να προβούν σε είτε μεμονωμένες είτε ομαδικές, εκ των προτέρων και εκ των υστέρων σε σχέση με την κατάσταση θ , αντίστοιχα ex-ante και ex-post δράσεις. Οι ex-ante δράσεις μπορούν να αποτελούν μη συνεργατικές κινήσεις με στόχο τη μεγιστοποίηση της αναμενόμενης ανταμοιβής ενώ οι ex-post δράσεις μπορούν να αποτελούν μέρος μιας διαδικασίας επαναδιαπραγμάτευσης.

- Επαναδιαπραγμάτευση

Αν υπάρχουν περιπτώσεις ή απρόβλεπτες καταστάσεις που δεν μπορούν να περιγραφούν ή είναι ασύμφορο να προβλεφθούν αναλυτικά σε ένα συμβόλαιο, μπορεί να χρειαστεί να γίνει επαναδιαπραγμάτευση. Αυτή πραγματοποιείται όταν υπάρχει το περιθώριο αύξησης των ανταμοιβών των εμπλεκόμενων μερών με αλλαγές στο αρχικό συμβόλαιο.

- Ρυθμίσεις

Πρόκειται για την εφαρμογή της μεθοδολογίας εντολέα και εντολοδόχου για τον καθορισμό της σχέσης μεταξύ ρυθμιστών και ρυθμιζόμενων οντοτήτων. Όταν εμφανίζεται το θέμα της ασύμμετρης πληροφορίας, οι ρυθμιστές θα προσπαθήσουν να διαμορφώσουν το βέλτιστο συμβόλαιο που θα αποτρέψει ανεπιθύμητα αποτελέσματα στο κοινωνικό όφελος, συνήθως εφαρμόζοντας μηχανισμούς αποκλεισμού μονοπωλιακών πρακτικών.

- Σηματοδοσία

Η έννοια αυτή είναι πολύ κοντά στην έννοια της ασύμμετρης πληροφορίας. Ανισότητες στην πρόσβαση πληροφορίας ανάμεσα στις οντότητες οδηγεί σε όχι βέλτιστα αποτελέσματα. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί επιβάλλοντας σε κάποιον πράκτορα να αποστέλλει σήματα με την αντίστοιχη πληροφορία στους υπόλοιπους έτσι ώστε να επιτευχθεί ισότιμη πληροφόρηση όλων. Φυσικά, στη διαδικασία αυτή υπεισέρχεται ένα αντίστοιχο κόστος σηματοδοσίας.

- Οι τεχνικές αγοραπωλησιών

Στο πλαίσιο της θεωρίας συμβολαίων, οι τεχνικές αγοραπωλησιών αφορούν τις δράσεις των παικτών που καθορίζουν αν και πώς θα διαμορφωθεί η μεταξύ τους σχέση (συμβόλαιο). Συγκεκριμένα, πώς θα γίνει η ανταλλαγή των αγαθών, υπηρεσιών, χρημάτων, κ.λ.π. ανάμεσα στους εμπλεκόμενους.

Θεωρώντας το πρόβλημα ενός πωλητή και ενός αγοραστή ως το βασικό μοντέλο αγοραπωλησίας μπορεί να διατυπωθεί ένα μοντέλο δυσμενούς επιλογής. Ο αγοραστής είναι ο εντολέας και ο πωλητής ο εντολοδόχος στον οποίο έχει ανατεθεί η παραγωγή ενός αγαθού ή μιας υπηρεσίας. Ο εντολοδόχος-πράκτορας έχει πρόσβαση σε πληροφορία σχετικά με την τεχνολογία που θα χρησιμοποιηθεί και μπορεί να εισαχθεί με μια παράμετρο τεχνολογίας θ γνωστή μόνο στον πωλητή. Η παράμετρος αυτή ανήκει σε ένα χώρο Θ που αποτελεί κοινή πληροφορία.

Ο αγοραστής λαμβάνει καθαρή ανταμοιβή $S(\theta, q) - t(\theta)$ όταν αγοράζει q μονάδες αγαθού στην τιμή $t(\theta)$. Ο πωλητής λαμβάνει καθαρή ανταμοιβή $t(\theta) - C(\theta, q)$ από την πώληση του αντίστοιχου αγαθού. Οι συναρτήσεις θεωρούνται κοίλες ως προς την παράμετρο q . Η παράμετρος θ επηρεάζει τις συναρτήσεις ανταμοιβής τόσο του αγοραστή όσο και του πωλητή και μπορεί να αντιπροσωπεύει την ποιότητα του προσφερόμενου αγαθού.

Ένα σύνολο συμβολαίων υλοποιήσιμων ως προς τα κίνητρα (incentive feasible) επιβάλλεται να ικανοποιεί τον περιορισμό κινήτρου

$$t(\theta) - C(\theta, q(\theta)) \geq t(\hat{\theta}) - C(\theta, q(\hat{\theta})) \quad \forall (\theta, \hat{\theta}) \in \Theta^2. \quad (3.9)$$

Επίσης, για να γίνει αποδεκτό ένα συμβόλαιο πρέπει να ικανοποιεί τον περιορισμό συμμε-

τοχής

$$t(\hat{\theta}) - C(\theta, q(\hat{\theta})) \geq 0 \quad \forall \theta \in \Theta. \quad (3.10)$$

που εξασφαλίζει ότι ένας πράκτορας, ανεξαρτήτως τύπου, θα λάβει ως ελάχιστη ανταμοιβή το κόστος συμμετοχής του.

Εφόσον τα σύμβολα ικανοποιούν τους περιορισμούς κινήτρου και συμμετοχής και άρα είναι υλοποιήσιμα, η ανάλυση συνεχίζεται με στόχο το σχεδιασμό βέλτιστων συμβολαίων. Ένα σύμβολο είναι βέλτιστο από την πλευρά μιας οντότητας που συμμετέχει στο σύστημα όταν το κέρδος ή η ανταμοιβή που λαμβάνει η οντότητα αυτή με δεδομένη πληροφορία μεγιστοποιείται.

3.5 Θεωρία βελτιστοποίησης

Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης περιλαμβάνει τη μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης υπό συγκεκριμένους περιορισμούς. Η γενική μορφή ενός προβλήματος βελτιστοποίησης είναι η εξής

$$\min_{\mathbf{x} \in \Omega} f(\mathbf{x}) \quad (3.11)$$

υπό τους περιορισμούς

$$g_i(\mathbf{x}) \leq 0, \text{ για } i = 1, \dots, p \quad (3.12)$$

$$h_j(\mathbf{x}) = 0, \text{ για } j = 1, \dots, m. \quad (3.13)$$

όπου \mathbf{x} είναι το διάνυσμα ως προς το οποίο γίνεται η βελτιστοποίηση, οι τιμές του οποίου ανήκουν στο σύνολο Ω , $f(\mathbf{x})$ είναι η αντικειμενική συνάρτηση και $g_i(\mathbf{x})$ και $h_j(\mathbf{x})$ είναι οι συναρτήσεις που εμπλέκονται στους περιορισμούς ανισότητας και ισότητας του προβλήματος βελτιστοποίησης, αντίστοιχα. Στόχος ενός προβλήματος βελτιστοποίησης είναι ο προσδιορισμός της βέλτιστης τιμής του διανύσματος \mathbf{x} που ταυτόχρονα ικανοποιεί τους περιορισμούς.

Μια συνάρτηση $f(\mathbf{x})$ είναι κυρτή όταν είναι διαφορίσιμη και ικανοποιείται μία από τις ακόλουθες συνθήκες πρώτου ή δευτέρου βαθμού [92]:

$$\text{Συνθήκη α' βαθμού: } f(\mathbf{y}) \geq f(\mathbf{x}) + \nabla f(\mathbf{x})^T \cdot (\mathbf{y} - \mathbf{x}) \quad (3.14)$$

$$\text{Συνθήκη β' βαθμού: } \nabla^2 f(\mathbf{x}) \geq 0, \text{ για } \mathbf{x}, \mathbf{y} \in \Omega \quad (3.15)$$

Ως $\nabla^2 f(\mathbf{x})$ συμβολίζεται ο Hessian πίνακας της $f(\mathbf{x})$ που πρέπει να είναι θετικά ημιορισμένος.

Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης αποτελεί γραμμικό πρόβλημα, όταν η αντικειμενική συνάρτηση και οι συναρτήσεις των περιορισμών είναι γραμμικές συναρτήσεις του \mathbf{x} . Όταν

κάποια από τις προαναφερθείσες συναρτήσεις είναι μη γραμμική, το πρόβλημα αποτελεί μη γραμμικό πρόβλημα. Επιπλέον, ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι κυρτό όταν η αντικειμενική συνάρτηση είναι κυρτή, οι περιορισμοί ανισότητας αφορούν κυρτές συναρτήσεις ενώ οι περιορισμοί ισότητας αντιστοιχούν σε αφινικές (affine) συναρτήσεις. Ένα κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει πολλές ιδιότητες που διευκολύνουν την επίλυσή του, με σημαντικότερη την ιδιότητα που δηλώνει ότι μια τοπικά βέλτιστη λύση αποτελεί ταυτόχρονα την ολικά βέλτιστη λύση του προβλήματος.

3.5.1 Μέθοδος πολλαπλασιαστών Lagrange

Μια από τις σημαντικότερες μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της λύσης σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς είναι η μέθοδος Lagrange [93]. Η συνάρτηση Lagrange του προβλήματος βελτιστοποίησης (3.11)-(3.13) ορίζεται μέσω της σχέσης

$$L(\mathbf{x}, \lambda, \mu) = f(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^p \lambda_i \cdot g_i(\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^m \mu_j \cdot h_j(\mathbf{x}) \quad (3.16)$$

όπου λ και μ είναι οι πολλαπλασιαστές Lagrange των συναρτήσεων των περιορισμών.

Αν υπάρχει διάνυσμα \mathbf{x}^* που επιλύει το πρόβλημα βελτιστοποίησης που έχει οριστεί, τότε υπάρχουν βαθμωτά διανύσματα πολλαπλασιαστών λ^* και μ^* που ικανοποιούν τις συνθήκες Karush-Kuhn-Tucker (KKT) [94]

$$\partial L(\mathbf{x}^*, \lambda^*, \mu^*) / \partial (\mathbf{x}^*) = 0, \quad (3.17\alpha)$$

$$g_i(\mathbf{x}^*) \leq 0, \quad (3.17\beta)$$

$$h_j(\mathbf{x}^*) = 0, \quad (3.17\gamma)$$

$$\lambda_i^* \geq 0, \quad (3.17\delta)$$

$$\lambda_i^* \cdot (g_i(\mathbf{x}^*)) = 0. \quad (3.17\epsilon)$$

όπου $i = 1, \dots, p$ και $j = 1, \dots, m$.

3.5.2 Μέθοδος συνάρτηση ποινής

Η μέθοδος συνάρτησης ποινής χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης με περιορισμούς. Η συνάρτηση ποινής για το πρόβλημα που ορίζεται από τις (3.11)-(3.13) είναι η [93], [95]

$$\mathcal{P}(\mathbf{x}, \rho, \beta) = f(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^p \rho_i \cdot g_i(\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^m \beta_j \cdot h_j(\mathbf{x}), \quad (3.18)$$

όπου ρ_i και β_j είναι οι μεταβλητές ποινής που ορίζονται μέσω των σχέσεων

$$\beta_j \gg 0, i = 1, \dots, p, \quad (3.19)$$

και

$$\rho_i = \begin{cases} 0 & \text{αν } g_i \leq 0 \\ \gg 0 & \text{αν } g_i > 0, j = 1, \dots, m \end{cases} \quad (3.20)$$

Με την εισαγωγή της συνάρτησης ποινής το αρχικό πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς μετατρέπεται στο ακόλουθο πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς

$$\min_{(\mathbf{x}, \rho, \beta)} \mathcal{P}(\mathbf{x}, \rho, \beta), i = 1, \dots, p, j = 1, \dots, m. \quad (3.21)$$

Ανάλογα με την περίπτωση το πρόβλημα αυτό μπορεί να λυθεί με διάφορες μεθόδους.

Κεφάλαιο 4

Εφαρμογή τεχνικών ενισχυτικής μάθησης για ευκαιριακή πρόσβαση στο φάσμα

4.1 Εισαγωγή

Όπως έχει διατυπωθεί στο Εδάφιο 2.1, η ευκαιριακή πρόσβαση στο φάσμα βασίζεται σε περιοδική ανίχνευση των καναλιών που πραγματοποιείται από τους δευτερεύοντες χρήστες πριν από κάθε μετάδοση. Στην κατεύθυνση μείωσης της εξάρτησης των δευτερευόντων χρηστών για την επικοινωνία τους από μια κεντρική οντότητα ελέγχου ή από άλλους χρήστες, μελετάται ένα σύστημα επιλογής καναλιού που είναι καταναμημένο και αυτόνομο ως προς την ανίχνευση και τη μετάδοση. Οι δευτερεύοντες χρήστες επεξεργάζονται πληροφορίες που συλλέγουν αποκλειστικά από τη δραστηριότητα ανίχνευσης που ακολουθούν και από τις επιτυχημένες μεταδόσεις τους για να σχηματίσουν ένα αυτόνομο, μη-συνεργατικό σύστημα που δεν απαιτεί διαρκή παρακολούθηση ή συνεχή ανίχνευση του περιβάλλοντος. Σε τέτοιου τύπου συστήματα δεν απαιτείται να υπάρχει κάποια ειδική περίοδος μάθησης εφόσον οι δευτερεύοντες χρήστες μαθαίνουν το περιβάλλον από την επεξεργασία των πληροφοριών που συλλέγουν κατά τις επιτυχείς μεταδόσεις τους.

Το προτεινόμενο σύστημα επιλογής καναλιού δεν ακολουθεί τον αυστηρό ορισμό χρονοθυρίδας, σύμφωνα με το οποίο η λειτουργία των χρηστών κβαντίζεται σε χρονοθυρίδες που αποτελούνται από περιόδους ανίχνευσης και περιόδους μετάδοσης σταθερής διάρκειας. Αντιθέτως, εκτελούνται διαδοχικά από τους δευτερεύοντες χρήστες λειτουργίες ανίχνευσης και μετάδοσης μεταβλητής διάρκειας. Το περιβάλλον μετάδοσης αποτελείται από ένα αριθμό διαύλων επικοινωνίας που έχουν αρχικά διατεθεί για τη λειτουργία ισάριθμων πρωτεύοντων χρηστών. Κατά τη διάρκεια ανίχνευσης, οι δευτερεύοντες χρήστες θέτουν τα κανάλια επικοινωνίας σε μια σειρά ανίχνευσης βασισμένοι στην πληροφορία ανταμοιβής που έχουν συλλέξει από παρελθούσες μεταδόσεις. Μόλις ανιχνευτεί ελεύθερο κανάλι, οι δευτερεύοντες χρήστες ξεκινούν τη μετάδοση σε αυτό μέχρι να πραγματοποιηθεί σύγκρουση με κάποιο πρωτεύοντα ή άλλο δευτερεύοντα χρήστη. Η διάρκεια της επιτυχούς

μετάδοσης θεωρείται ως αναλογικό μέτρο της ανταμοιβής και ενισχύει τη γνώση του δευτερεύοντα χρήστη ως προς το περιβάλλον μετάδοσης. Δρώντας ανεξάρτητα, οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να διαμορφώσουν τη δική τους αντίληψη για το περιβάλλον, η οποία βελτιώνεται με την πάροδο του χρόνου και πλησιάζει περισσότερο την πραγματική κατάσταση. Ένα περιβάλλον που χαρακτηρίζεται από δυναμικές συμπεριφορές χρηστών απαιτεί μια συνεχή διαδικασία μάθησης.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου προβλήματος συνάδουν με τα χαρακτηριστικά των προβλημάτων ενισχητικής μάθησης (RL) [77] όπως έχουν περιγραφεί στο εδάφιο 3.1, όπου ενεργοί παράγοντες λήψης αποφάσεων αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον τους, προσπαθώντας να επιτύχουν ένα συγκεκριμένο στόχο, παρά τις αβέβαιες συνθήκες στις οποίες δρουν. Σύμφωνα με την RL, οι δευτερεύοντες χρήστες ενεργούν ως πράκτορες των οποίων οι δραστηριότητες επηρεάζουν τις μελλοντικές καταστάσεις του περιβάλλοντος και, κατά συνέπεια, τις επιλογές και τις φασματικές ευκαιρίες που τους παρέχονται στο μέλλον. Επομένως, σε κάθε περίπτωση, οι καθυστερημένες συνέπειες των επιλογών του παρελθόντος επηρεάζουν τις τρέχουσες επιλογές των δευτερευόντων χρηστών και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη μέσω κατάλληλης ανίχνευσης και μετάδοσης.

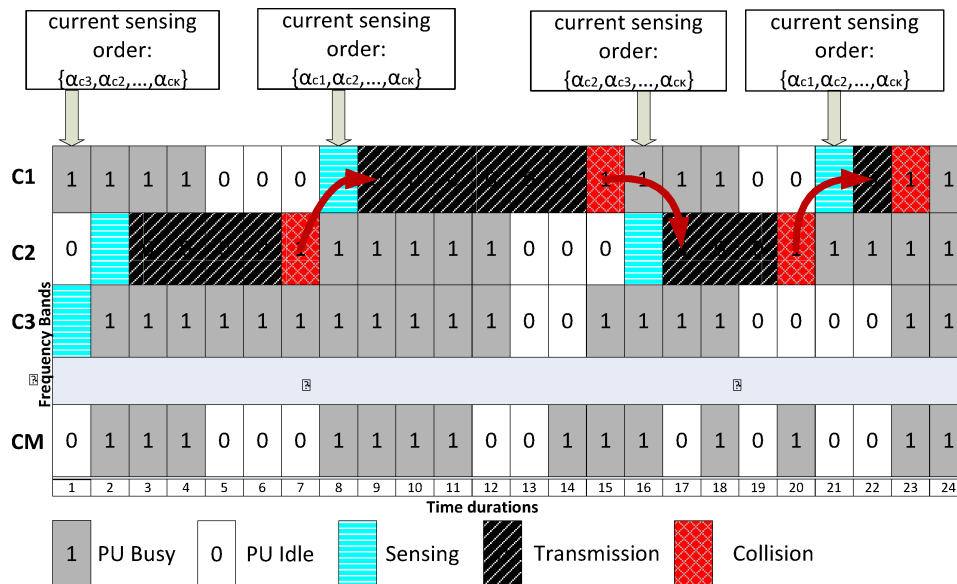
Το προτεινόμενο σχήμα αποτελεί μια αντιδραστική (reactive) προσέγγιση στο πρόβλημα επιλογής καναλιού. Μπορεί να λειτουργήσει τόσο με ντετερμινιστικά όσο και με στοχαστικά μοντέλα κίνησης των άλλων χρηστών και άρα μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορα μοντέλα κίνησης των πρωτευόντων χρηστών. Επίσης, είναι προσαρμόσιμο σε ποικίλες συνθήκες κίνησης, όπως αυτές διαμορφώνονται μέσω των αλλαγών στα μοντέλα των πρωτευόντων χρηστών ή μέσω της εισόδου κι άλλων δευτερευόντων χρηστών. Δεν επιχειρείται πρόβλεψη ή εκτίμηση του χρόνου αδράνειας των καναλιών. Για τον προσδιορισμό της διαθεσιμότητας των καναλιών χρησιμοποιείται η διάρκεια των αντίστοιχων κενών περιόδων τους, στοιχείο που αποκτάται από τη διαδικασία μάθησης του δευτερεύοντα χρήστη. Η πληροφορία που λαμβάνεται τυγχάνει επεξεργασίας στη διαδικασία επιλογής καναλιού εφαρμόζοντας δύο εναλλακτικούς κανόνες ενημέρωσης για τη βέλτιστη αξιοποίηση των διαθέσιμων καναλιών.

Οι δύο εναλλακτικές επιλογές που εφαρμόζονται συγκρίνονται (i) με ένα σύστημα επιλογής καναλιού που βασίζεται σε εκ των προτέρων γνωστές πιθανότητες διαθεσιμότητας των καναλιών και (ii) με ένα τυχαίο σύστημα επιλογής καναλιών. Οι προσομοιώσεις δείχνουν ότι το προτεινόμενο σύστημα επιτυγχάνει να θέσει τις προτεραιότητες στην επιλογή καναλιών σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά τους και υπερτερεί ως προς και τα δύο συγκρινόμενα συστήματα ως προς τη χρησιμοποίηση των καναλιών και την ενεργειακή απόδοση.

4.2 Μοντέλο Συστήματος και διαμόρφωση προβλήματος

Στην ακόλουθη ανάλυση, ο δευτερεύων χρήστης θεωρείται ως ζεύγος πομπού/ δέκτη. Επίσης, ο δευτερεύων χρήστης διαθέτει ένα απλό σύστημα μετάδοσης (single transceiver) και, ως εκ τούτου, δεν μπορεί να πραγματοποιεί ταυτόχρονα ανίχνευση φάσματος και μετάδοση. Πρόκειται για συνηθισμένη θεώρηση σε καταναμημένα συστήματα, όπου δεν υπάρχει κοινό κανάλι ελέγχου για το συντονισμό των χρηστών. Επίσης, θεωρείται ότι όταν περισσότεροι από ένας χρήστες (πρωτεύοντες ή δευτερεύοντες) επιχειρούν πρόσβαση στο φάσμα, πραγματοποιείται σύγκρουση.

Σε αντίθεση με προσεγγίσεις σύμφωνα με τις οποίες οι δευτερεύοντες χρήστες ανιχνεύουν όλα τα κανάλια στην αρχή μιας μετάδοσης, σύμφωνα με το προτεινόμενο μοντέλο, κάθε δευτερεύων χρήστης ταξινομεί τα κανάλια σε μια τυχαία σειρά ανίχνευσης η οποία εξελίσσεται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Κάθε δευτερεύων χρήστης πραγματοποιεί ανίχνευση ακολουθώντας την τρέχουσα σειρά ανίχνευσης μέχρι να ανιχνευθεί το πρώτο διαθέσιμο κανάλι. Αμέσως εκκινεί μετάδοση σε αυτό, διακόπτοντας την ανίχνευση των υπόλοιπων καναλιών. Με την ολοκλήρωση της μετάδοσης ή όταν ανιχνευθεί σύγκρουση, ο δευτερεύων χρήστης καταγράφει τη διάρκεια μετάδοσης και μεταβάλλει αντίστοιχα τη σειρά ανίχνευσης για την επόμενη μετάδοση. Η προαναφερθείσα διαδικασία απεικονίζεται στην Εικ.4.1.



Σχήμα 4.1: Διαδικασία ανίχνευσης καναλιών και μετάδοσης.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι τόσο η ανίχνευση όσο και η εναλλαγή μεταξύ των καναλιών προκαλεί καθυστέρηση, η σειρά ανίχνευσης καναλιών που καθορίζεται από τον δευτερεύοντα χρήστη έχει μεγάλη σημασία. Ο στόχος ενός δευτερεύοντα χρήστη είναι να εντοπίσει

και να αποκτήσει πρόσβαση στο κανάλι που έχει την υψηλότερη πιθανότητα να ικανοποιήσει τις ανάγκες επικοινωνίας του και τις προδιαγραφές ποιότητας υπηρεσίας (Quality-of-Service-QoS). Συγκεκριμένα, οι δευτερεύοντες χρήστες αποσκοπούν στην επιλογή καναλιών τα οποία, εκτός του να είναι διαθέσιμα σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, θα παραμείνουν διαθέσιμα για όσο χρονικό διάστημα απαιτείται. Η σειρά επιλογής καναλιών ενημερώνεται κάθε φορά που κάποιος δευτερεύων χρήστης προσπαθεί να πραγματοποιήσει μετάδοση. Δεδομένου ότι η ανάγκη μετάδοσης των δευτερευόντων χρηστών είναι συνεχής, κάθε φορά που στο κανάλι που καταλαμβάνει εκείνη την ώρα ανιχνεύεται σύγκρουση, ενεργοποιείται ο μηχανισμός επιλογής καναλιού, έτσι ώστε ο δευτερεύων χρήστης να στραφεί στο αμέσως επόμενο ελεύθερο κανάλι. Έτσι, δεν υπάρχει κατάσταση αδράνειας κατά τη λειτουργία των δευτερευόντων χρηστών. Λαμβάνοντας υπόψη τη συνεχή ανανέωση της πληροφορίας των καναλιών, ο στόχος του συστήματος είναι να καταστήσει τους δευτερεύοντες χρήστες ικανούς να προσδιορίζουν τη βέλτιστη σειρά ανίχνευσης με κριτήριο την πιθανότητα πρόσβασης σε κανάλι που θα προσφέρει μεγάλη σε διάρκεια διαθεσιμότητα.

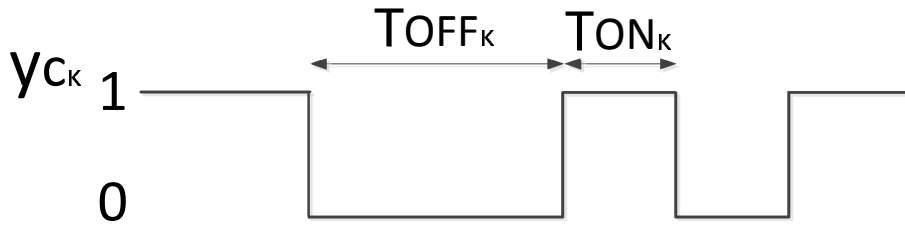
4.2.1 Διαθεσιμότητα καναλιού

Το προς απόδοση φάσμα αποτελείται από πολλαπλά κανάλια που ανήκουν σε αδειοδοτημένους πρωτεύοντες χρήστες. Τα κανάλια αυτά έχουν το ίδιο εύρος ζώνης και χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένο ποσοστό εσφαλμένων πακέτων (Packet Error Ratio-PER) που εξαρτάται από τις απώλειες ελευθέρου χώρου, τη σκίαση, τις διαλείψεις και άλλους παράγοντες που επηρεάζουν την ασύρματη μετάδοση. Λόγω της διαλείπουσας χρησιμοποίησης του καναλιού από τους πρωτεύοντες χρήστες, ένας αριθμός καναλιών είναι διαθέσιμος για ευκαιριακή φασματική πρόσβαση.

Στο πλαίσιο του προτεινόμενου σχήματος, οι δευτερεύοντες χρήστες γνωρίζουν το συνολικό αριθμό των καναλιών που είναι δυνητικά διαθέσιμα για ευκαιριακή πρόσβαση. Συγκεκριμένα, ένα σύνολο M καναλιών με εύρος ζώνης B , συγκεκριμένα $\mathbf{C} = \{c_1, c_2, \dots, c_M\}$, που έχουν αρχικά αποδοθεί σε M πρωτεύοντες χρήστες, αποτελεί το αντικείμενο ανίχνευσης και μετάδοσης. Η αντίστοιχη κατάσταση των καναλιών ορίζεται μέσω της δυαδικής μεταβλητής

$$y_{c_k} = \begin{cases} 0 & \text{channel } c_k \text{ είναι διαθέσιμο τη χρονική στιγμή } t \\ 1 & \text{channel } c_k \text{ είναι κατειλημμένο την χρονική στιγμή } t. \end{cases} \quad (4.1)$$

Η δραστηριότητα των πρωτευόντων χρηστών στο κανάλι c_k χαρακτηρίζεται από ενεργές περιόδους (ON_k) και αδρανείς περιόδους (OFF_k) όπως απεικονίζεται στο Σχ. 4.2. Οι διάρκειες των περιόδων αυτών, T_{ON_k} και T_{OFF_k} αντίστοιχα, είναι τυχαίες μεταβλητές που μπορεί να ακολουθούν διάφορες κατανομές πυκνότητας πιθανότητας.



Σχήμα 4.2: Μοντέλο λειτουργίας PU.

Ανεξάρτητα από το μοντέλο καναλιού που ακολουθείται και υποθέτοντας ότι οι μέσες διάρκειες ON και OFF ενός καναλιού c_k είναι μ_{c_k} και λ_{c_k} , αντίστοιχα, η μέση πιθανότητα κατάληψης του καναλιού είναι

$$MCO_{c_k} = \mu_{c_k} / (\mu_{c_k} + \lambda_{c_k}) \quad (4.2)$$

Κάθε κανάλι ανιχνεύεται για συγκεκριμένη χρονική διάρκεια T_s που θεωρείται αρκετά μεγάλη για να δώσει ακριβές αποτέλεσμα ανίχνευσης. Η T_s περιλαμβάνει και την καθυστέρηση μεταγωγής. Καθώς τα θέματα φυσικού στρώματος είναι εκτός του ενδιαφέροντος του προτεινόμενου σχήματος, θεωρείται ότι πραγματοποιείται τέλεια ανίχνευση. Ως εκ τούτου, με την ολοκλήρωση της διαδικασίας ανίχνευσης, οι δευτερεύοντες χρήστες διαθέτουν ακριβή ένδειξη αν κάποιο κανάλι είναι κατειλημμένο ή ελεύθερο.

Σε κάθε περίπτωση, ο στόχος του δευτερεύοντα χρήστη είναι να βελτιστοποιηθεί η σειρά ανίχνευσης / επιλογής καναλιού προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η πιθανότητα εύρεσης ελεύθερου καναλιού το ταχύτερο δυνατό. Οι δευτερεύοντες χρήστες αποσκοπούν στο να ελαχιστοποιήσουν το χρόνο ανίχνευσης και ταυτόχρονα να επωφεληθούν από μακροχρόνιες περιόδους αδράνειας στα κανάλια. Είναι αναγκαίο να ληφθεί υπόψη η συχνότητα με την οποία αλλάζει η κατάσταση των καναλιών και η διάρκεια για την οποία ένα κανάλι παραμένει στην ίδια κατάσταση, είτε ON είτε OFF . Κατά συνέπεια, τα δύο χαρακτηριστικά καναλιού που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη διάρκεια της φάσης αίσθησης είναι η πιθανότητα κατάληψης και η μέση διάρκεια αδράνειας.

4.2.2 Διαμόρφωση προβλήματος

Το πρόβλημα ενισχυτικής μάθησης, που αντιμετωπίζεται από το προτεινόμενο σχήμα, διαμορφώνεται με βάση την πλειάδα $\langle \mathbf{S}, \mathbf{A}, T, R \rangle$. Το σύνολο $\mathbf{S} = (y_{c_1}, y_{c_2}, \dots, y_{c_M})$ είναι το σύνολο των πιθανών καταστάσεων (ελεύθερο, κατειλημμένο) των M διαθέσιμων καναλιών. Το σύνολο $\mathbf{A} = (a_{c_1}, a_{c_2}, \dots, a_{c_M})$ είναι το σύνολο των πιθανών δράσεων τις οποίες μπορούν να επιλέξουν οι δευτερεύοντες χρήστες. Μια δράση αντιστοιχείται στο κανάλι που επιλέγεται από ένα δευτερεύοντα χρήστη σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, δηλ. $a_{c_k} = 1$ σημαίνει ότι επιλέγεται για ανίχνευση και πιθανή μετάδοση το κανάλι c_k , άλλως $a_{c_k} = 0$. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι δευτερεύοντες χρήστες διαθέτουν μόνο ένα πομπο-

δέκτη. Ως εκ τούτου, δεν επιτρέπονται παράλληλες μεταδόσεις και ο δευτερεύων χρήστης μπορεί κάθε φορά να χειρίζεται μόνο ένα κανάλι, είτε για ανίχνευση είτε για μετάδοση, δηλαδή

$$\sum_{i=1}^M a_{c_i} = 1. \quad (4.3)$$

Η συνάρτηση μετάβασης, $T(s, \alpha, s')$, που καθορίζει τις μεταβάσεις από μια κατάσταση σε μια άλλη, εξαρτάται τόσο από τις δράσεις των πρακτόρων όσο και από τις πιθανότητες μετάβασης των καταστάσεων του καναλιού. Σε στατικό περιβάλλον, η επιλογή $a_{c_k} = 1$ ερμηνεύεται ως μια αλλαγή από μια κατάσταση s σε μια κατάσταση s' , όπου $y_{c_k} = 1$. Όπως και η συνάρτηση μετάβασης, έτσι και η συνάρτηση ανταμοιβής R δεν μπορεί να οριστεί αναλυτικά σε μη στατικό περιβάλλον. Σε αυτή την περίπτωση, για την αντιμετώπιση του προβλήματος επιλογής καναλιού από δευτερεύοντες χρήστες στην παρούσα προσέγγιση χρησιμοποιείται μια προσέγγιση που εφαρμόζει τον αλγόριθμο μάθησης Q (Q-learning) και δεν βασίζεται σε συγκεκριμένο μοντέλο κίνησης. Όλες οι παράμετροι που εμπλέκονται στο συγκεκριμένο σύστημα συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Βασικές Παράμετροι του Συστήματος

Επεξήγηση Παραμέτρων	
c_k	υποψήφιο κανάλι για ευκαιριακή πρόσβαση
μ_{c_k}	μέση ON περίοδος του καναλιού c_k
λ_{c_k}	μέση OFF περίοδος του καναλιού c_k
MCO_{c_k}	μέση κατάληψη του καναλιού c_k
t_s	σταθερή διάρκεια ανίχνευσης
$Q_t(a_{c_k})$	τιμή Q για την επιλογή του καναλιού c_k τη χρονική στιγμή t
$R_t(a_{c_k})$	ανταμοιβή από την επιλογή του καναλιού c_k τη χρονική στιγμή t
π_{c_k}	αριθμός δοκιμών για πρόσβαση στο κανάλι c_k
L	παράμετρος μάθησης στον αλγόριθμο R-L
$Temp$	παράμετρος θερμοκρασίας στον αλγόριθμο R-L
$P(a_{c_k})$	πιθανότητα πρώτης προτίμησης του καναλιού c_k
$P^*(a_{c_k})$	θεωρητική πιθανότητα πρώτης προτίμησης του καναλιού c_k
N	πλήθος περιστάσεων
N_{sen}	πλήθος περιστάσεων ανίχνευσης
N_{tr}	πλήθος περιστάσεων μετάδοσης
N_{sw}	πλήθος περιστάσεων μεταγωγής
N_{opp}	πλήθος περιστάσεων με ευκαιρίες μετάδοσης
S	πλήθος χρονοθυρίδων
T_R	πλήθος επιτυχημένων μεταδόσεων
E_{exp}	μέτρο εκμετάλλευσης καναλιού
T_{sw}	μέτρο αποτελεσματικότητας μεταγωγής καναλιού
T_{mean}	μέση διάρκεια μετάδοσης
S_{mean}	μέση διάρκεια ανίχνευσης

4.3 Επιλογή καναλιού με βάση την ενισχυτική μάθηση

Στο τμήμα αυτό θα γίνει η ανάλυση του προτεινόμενου σχήματος ενισχυτικής μάθησης για ευκαιριακή φασματική πρόσβαση σε δυναμικά περιβάλλοντα. Το σχήμα καθορίζει τη σειρά ανίχνευσης των καναλιών από ένα δευτερεύοντα χρήστη με βάση την εικόνα που έχει για την τρέχουσα κατάσταση των καναλιών.

Ο χρόνος μοιράζεται σε περιόδους ανίχνευσης και μετάδοσης μεταβλητής διάρκειας. Κατά τη διάρκεια της ανίχνευσης, οι δευτερεύοντες χρήστες ταξινομούν τα κανάλια σύμφωνα με την τρέχουσα σειρά ανίχνευσης. Ένα κανάλι αποκτά σειρά προτεραιότητας για ανίχνευση ανάλογα με τις τιμές Q των δράσεων που αντιστοιχούν στην επιλογή του, $\{a_{c_1}, a_{c_2}, \dots, a_{c_M}\} \rightarrow \mathcal{R}$. Η πολιτική μάθησης του προτεινόμενου σχήματος συνιστά την κατάλληλη αντιστοίχιση των τιμών Q σε προτεραιότητες ανίχνευσης καναλιού. Το πρώτο κανάλι στη σειρά ανίχνευσης που ανιχνεύεται ελεύθερο επιλέγεται για μετάδοση. Κατ' αυτό τον τρόπο, εκκινεί μια περίοδος μετάδοσης. Αρχικά, όλα τα κανάλια χαρακτηρίζονται από ίσες τιμές Q και η σειρά ανίχνευσης είναι τυχαία. Ενώσω, όμως, η διαδικασία μάθησης εξελίσσεται, η σειρά ανίχνευσης αντανακλά τη διαφοροποίηση της κίνησης των καναλιών δίνοντας προτεραιότητα στα κανάλια με (i) υψηλή πιθανότητα να είναι ελεύθερα και (ii) μεγάλη προβλεπόμενη διάρκεια διαθεσιμότητας. Η διάρκεια μετάδοσης σε ένα κανάλι αποτελεί την ανταμοιβή/ ενίσχυση της επιλογής ενός δευτερεύοντα χρήστη για ανίχνευση και μετάδοση και λαμβάνεται υπόψη για την ενημέρωση των αντίστοιχων τιμών Q στο πλαίσιο της διαδικασίας μάθησης. Η προαναφερθείσα μέθοδος ανίχνευσης και επιλογής καναλιού ενισχυτικής μάθησης συνοψίζεται στον Αλγόριθμο 1.

Στη συνέχεια, εξετάζονται οι κανόνες ενημέρωσης και η μέθοδος μάθησης.

4.3.1 Κανόνες ενημέρωσης

Η ανταμοιβή $R_t(s, a_{c_k})$ ορίζεται ίση με τη διάρκεια μετάδοσης σε ένα κανάλι c_k . Στο πλαίσιο του προτεινόμενου σχήματος ενισχυτικής μάθησης εξετάζονται δύο κανόνες ενημέρωσης:

4.3.1.1 L-learning

Όταν ολοκληρώνεται μια επιτυχής μετάδοση σε ένα κανάλι c_k , η τιμή Q του καναλιού ενημερώνεται εφαρμόζοντας την αναδρομική σχέση

$$Q_{t+1}(a_{c_k}) = (1 - L)Q_t(a_{c_k}) + L \cdot R_t(a_{c_k}), \quad (4.4)$$

που αποτελεί τροποποιημένη εκδοχή του μοντέλου μάθησης Q που περιγράφεται μέσω της (3.1). Στην (4.4) $R_t(a_{c_k})$ είναι η ανταμοιβή και L είναι η παράμετρος μάθησης που πο-

Αλγόριθμος 1: Αλγόριθμος ενισχυτικής μάθησης για σειρά ανίχνευσης και επιλογής καναλιού

(1) Αρχικοποίηση:

Αρχικοποίησε $Q_1(a_{c_k}) = 1, k = 1 \dots M$

(2) Υπολόγισε τις πιθανότητες επιλογής σύμφωνα με τη μέθοδο μάθησης:

$$P(a_{c_k}) = \frac{\exp(Q(a_{c_k})/Temp)}{\sum_{j=1}^M \exp(Q(a_{c_j})/Temp)}, k = 1 \dots M$$

(3) Ενημέρωσε τη σειρά ανίχνευσης καναλιών:

Βάσει των $P(a_{c_k})$, θέσε τη σειρά ανίχνευσης i για κάθε κανάλι $c_k, i, k = 1 \dots M$

(4) Ανίχνευση:

for $i = 1, \dots, M$ **do**

 Ανίχνευσε το κανάλι c_k που αντιστοιχεί στη σειρά i

if $y_{c_k} = 0$ **then**

 το κανάλι c_k επιλέγεται για μετάδοση;

 πήγαινε στο βήμα **(5)** ;

end

if $i = M$ **then**

 πήγαινε στο βήμα **(3)** ;

end

end

(5) Μετάδοση:

Μετάδιδε στο κανάλι c_k μέχρι να ανιχνευθεί σύγκρουση

Υπολόγισε τις ανταμοιβές $r_t(a_{c_k})$

(6) Μάθηση:

Ενημέρωσε τις τιμές Q ακολουθώντας τον κανόνα ενημέρωσης f που δίνεται στην (4.4) ή (??):

$$Q_{t+1}(a_{c_k}) = f(Q_t(a_{c_k}), R_t(a_{c_k}))$$

Επέστρεψε στο βήμα (2)

σοτικοποιεί την αντισταθμιστική σχέση μεταξύ της σημασίας που αποδίδεται στην πλέον πρόσφατη πληροφορία και της σημασίας που αποδίδεται στη συσσωρευμένη εμπειρία. Καθώς η αναμενόμενη ανταμοιβή εξαρτάται μόνο από την επιλεγμένη δράση και όχι από την τρέχουσα κατάσταση, δηλ. $Q_t(s, a_{c_k}) \equiv Q_t(a_{c_k})$, το s παραλείπεται από το συμβολισμό του Q . Η παράμετρος γ που εμφανίζεται στην (3.1) ορίζεται ίση με 0 καθώς για την ενημέρωση των τιμών Q δεν λαμβάνονται υπόψη μελλοντικές ανταμοιβές.

4.3.1.2 Time-learning

Αποτελεί διαφοροποιημένο κανόνα ενημέρωσης ενισχυτικής μάθησης, σύμφωνα με το οποίο οι δευτερεύοντες χρήστες καταγράφουν το πλήθος των δοκιμών για πρόσβαση σε ένα κανάλι, c_k . Αυτό το πλήθος, έστω π_{c_k} , καθορίζει τον αντίστοιχο ρυθμό μάθησης

$$L = (\pi_{c_k})^{-1}. \quad (4.5)$$

Ακολουθώντας αυτόν τον κανόνα ενημέρωσης, η τροποποιημένη εξίσωση μάθησης Q γράφεται υπό τη μορφή:

$$Q_{t+1}(a_{c_k}) = (1 - (\pi_{c_k})^{-1})Q_t(a_{c_k}) + (\pi_{c_k})^{-1} \cdot R_t(a_{c_k}).$$

Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή, ο ρυθμός μάθησης μειώνεται καθώς αυξάνει ο χρόνος. Όσο περισσότερες φορές επιχειρείται πρόσβαση σε ένα κανάλι τόσο περισσότερη πληροφορία συλλέγεται και τόσο ακριβέστερη είναι η εκτιμώμενη τιμή Q . Ως εκ τούτου, η συμβολή της νέας πληροφορίας εξαρτάται από το πόσο καλά εδραιωμένη είναι η τρέχουσα εκτίμηση για την κατάσταση των καναλιών. Κατά συνέπεια, οι τυχαίες διακυμάνσεις σε ένα κανάλι δεν πρέπει να επηρεάζουν την ακρίβεια της ήδη συσσωρευμένης εμπειρίας.

4.3.2 Μέθοδος μάθησης

Στην αρχή της περιόδου ανίχνευσης, το προτεινόμενο σχήμα εφαρμόζει τη στρατηγική Boltzmann για την εφαρμογή της μεθόδου μάθησης και τον αντίστοιχο καθορισμό της σειράς ανίχνευσης καναλιών. Κάθε δράση a_{c_k} λαμβάνει προτεραιότητα βάσει της σχέσης

$$P(a_{c_k}) = \frac{\exp\{Q(a_{c_k})/Temp\}}{\sum_{j=1}^M \exp\{Q(a_{c_j})/Temp\}}, \forall c_k \in \mathbf{C}. \quad (4.6)$$

$P(a_{c_k})$ είναι η πιθανότητα ένα κανάλι c_k να επιλέγεται πρώτο στη σειρά ανίχνευσης. Στην (4.6) υπεισέρχονται δύο παράμετροι, η τιμή Q κάθε δράσης, $Q(a_{c_k})$, και η παράμετρος θερμοκρασίας, $Temp$, που προσφέρει τη δυνατότητα ελεγχόμενης τυχαιότητας στη διαδικασία επιλογής [80]. Υψηλές τιμές $Temp$ οδηγούν σε ομοιόμορφη πιθανότητα επιλογής καναλιού επιδρώντας εξομαλυντικά στη διαδικασία επιλογής. Χαμηλές τιμές $Temp$

εντείνουν τις διαφοροποιήσεις που χαρακτηρίζουν τις πιθανότητες επιλογής. Υψηλές τιμές $Temp$ ευνοούν την εξερεύνηση, μειώνοντας τη σημασία των διακυμάνσεων στις τιμές Q , ενώ χαμηλές τιμές $Temp$ ευνοούν την εκμετάλλευση, αποδίδοντας υψηλότερη προτεραιότητα στα κανάλια που παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές Q . Πρέπει, επίσης, να αναφερθεί ότι η εξερεύνηση ευνοείται από τον πιθανολογικό προσδιορισμό της σειράς ανίχνευσης και όχι μέσω της ντετερμινιστικής ταξινόμησης των καναλιών με βάση τις τιμές $P(a_{c_k})$.

4.3.3 Ανάλυση επίδοσης

Όπως αναφέρεται στο εδάφιο 4.2.1, τα κανάλια που έχουν παραχωρηθεί στους πρωτεύοντες χρήστες χαρακτηρίζονται από τις διάρκειες των περιόδων ON και OFF του εκάστοτε χρησιμοποιούμενου μοντέλου κίνησης. Θεωρείται ότι τα T_{ON_k} και T_{OFF_k} ακολουθούν την εκθετική κατανομή. Ως εκ τούτου,

$$f_{T_{ON_k}}(t) = (1/\mu_{c_k}) \cdot e^{-t/\mu_{c_k}}. \quad (4.7)$$

$$f_{T_{OFF_k}}(t) = (1/\lambda_{c_k}) \cdot e^{-t/\lambda_{c_k}}. \quad (4.8)$$

όπου

$$E[T_{ON_k}] = \mu_{c_k} \quad (4.9)$$

και

$$E[T_{OFF_k}] = \lambda_{c_k} \quad (4.10)$$

Στην περίπτωση όπου οι δευτερεύοντες χρήστες γνωρίζουν τη μέση διάρκεια OFF , δηλαδή την τιμή λ_{c_k} , αναμένονται να προσδιορίζουν τα M κανάλια του συνόλου \mathbf{C} με βάση τις ακόλουθες προτεραιότητες

$$P^*(a_{c_k}) = \frac{\exp(\lambda_{c_k})}{\sum_{j=1}^M \exp(\lambda_{c_k})}, \forall c_k \in \mathbf{C}. \quad (4.11)$$

Το προτεινόμενο σχήμα ενισχυτικής μάθησης ενημερώνει τις τιμές Q με βάση τη μέση διάρκεια OFF των καναλιών. Με την πάροδο του χρόνου, οι τιμές $Q(a_{c_k})$ συγκλίνουν στις τιμές λ_{c_k} . Έτσι, οι πιθανότητες που προκύπτουν από τις τιμές Q και εισάγονται στην (4.6) αναμένεται να συγκλίνουν σε εκείνες που προκύπτουν από την (4.11). Στη συνέχεια, καθώς οι τελευταίες πιθανότητες είναι αυτές που θα χρησιμοποιούσαν οι δευτερεύοντες χρήστες αν είχαν πλήρη επίγνωση του περιβάλλοντος μετάδοσης, θα αναφέρονται ως θεωρητικές πιθανότητες και θα θεωρούνται ως η βέλτιστη κατανομή επιλογής.

Ένας δευτερεύων χρήστης μπορεί να βρίσκεται σε μία από τρεις πιθανές καταστάσεις, συγκεκριμένα σε κατάσταση ανίχνευσης, μετάδοσης ή σε διαδικασία μεταγωγής καναλιού. Για να εκμεταλλευτεί τις φασματικές ευκαιρίες στο μέγιστο βαθμό, ο χρόνος που δαπανά ο δευτερεύων χρήστης για την ανίχνευση των καναλιών και για τη μεταγωγή πρέπει να ελαχι-

στοποποιηθεί. Θεωρείται ότι ο χρόνος κβαντίζεται σε χρονικές στιγμές που μπορούν να χαρακτηριστούν αντίστοιχα ως περιστάσεις ανίχνευσης, μετάδοσης ή μεταγωγής. Μια συνεχής μετάδοση ενός δευτερεύοντα χρήστη αποτελείται από αρκετές συνεχόμενες περιστάσεις μετάδοσης. Θεωρώντας ότι ένας δευτερεύων χρήστης δραστηριοποιείται στη διάρκεια N περιστάσεων, οι οποίες διακρίνονται σε N_{sen} , N_{tr} και N_{sw} περιστάσεις που αντιστοιχούν σε λειτουργίες ανίχνευσης, μετάδοσης και μεταγωγής, ισχύει

$$N_{sen} + N_{tr} + N_{sw} = N. \quad (4.12)$$

Μια περίπτωση συνιστά ευκαιρία μετάδοσης εφόσον κατά τη διάρκειά της υπάρχει τουλάχιστον ένα ελεύθερο κανάλι. Ορίζεται αντίστοιχα ως N_{opp} το πλήθος των περιστάσεων που οδηγούν σε ευκαιρίες μετάδοσης.

Δεδομένου ότι ένας δευτερεύων χρήστης μπορεί να ανιχνεύσει μόνο ένα κανάλι κάθε φορά, για να αξιολογηθεί η απόδοση του προτεινόμενου συστήματος, εισάγεται το μέτρο εκμετάλλευσης ενός καναλιού, δηλαδή

$$E_{exp} = N_{tr}/N_{opp}. \quad (4.13)$$

Καθώς η ανίχνευση και η μεταγωγή καναλιών επάγουν δύο είδη κόστους, το κόστος μη αξιοποιούμενων ευκαιριών και το κόστος που σχετίζεται με την επιβάρυνση ανταλλαγής πληροφορίας, πρέπει να οριστούν αντίστοιχα μέτρα για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας του αλγόριθμου επιλογής καναλιού. Επιπλέον, η μεταγωγή μεταξύ των καναλιών απαιτεί κατανάλωση ενέργειας. Μια τέτοια εναλλαγή γίνεται στο τέλος κάθε μετάδοσης, καθώς και κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ανίχνευσης διαφορετικών καναλιών σύμφωνα με την τρέχουσα σειρά ανίχνευσης. Δύο μέτρα επίδοσης ορίζονται για το συνδυασμό των στόχων των δευτερευόντων χρηστών για υψηλή εκμετάλλευση καναλιού και αποτελεσματική ανίχνευση και μεταγωγή, δηλαδή

$$T_{sw} = N_{tr}/N_{sw}, \quad (4.14)$$

και

$$T_{mean} = N_{tr}/S, \quad (4.15)$$

όπου S είναι το πλήθος των χρονοθυρίδων όπως αυτές ορίζονται στο πλαίσιο της λειτουργίας χρονοθυρίδας. Καθώς σε κάθε ανίχνευση καναλιού γίνεται μεταγωγή καναλιών, το μέτρο T_{sw} ποσοτικοποιεί την ενεργειακή αποδοτικότητα των συστημάτων ανίχνευσης καναλιών. Από την άλλη πλευρά, το μέτρο T_{mean} είναι η μέση διάρκεια μετάδοσης εντός μιας χρονοθυρίδας για ένα σύστημα που βασίζεται σε χρονοθυρίδα και θα χρησιμοποιηθεί για

τη σύγκριση διαφορετικών συστημάτων υπό κοινή βάση αναφοράς. Τέλος, το μέτρο

$$S_{mean} = N_{sen}/T_R, \quad (4.16)$$

όπου T_R είναι το πλήθος επιτυχημένων μεταδόσεων, μετρά τη μέση διάρκεια ανίχνευσης.

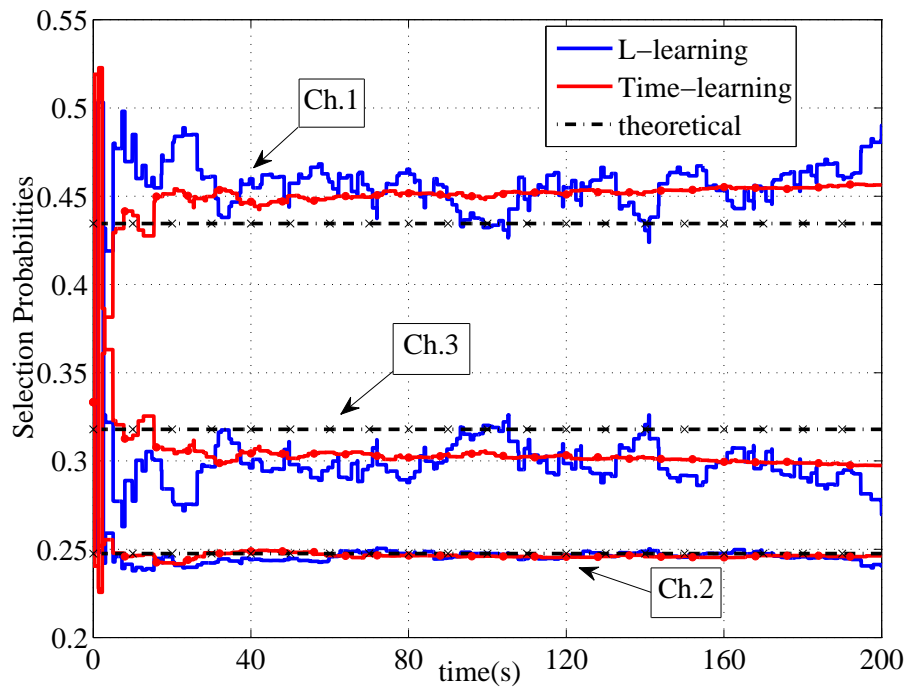
4.4 Προσομοιώσεις και σχολιασμός αποτελεσμάτων

Η επίδοση του προτεινόμενου σχήματος ενισχυτικής μάθησης για την επιλογή καναλιού εξετάζεται μέσω προσομοιώσεων που αφορούν και τις δύο προτεινόμενες μεθόδους ενημέρωσης, συγκεκριμένα της L-learning και της Time-learning, υπό διαφορετικά σενάρια λειτουργίας.

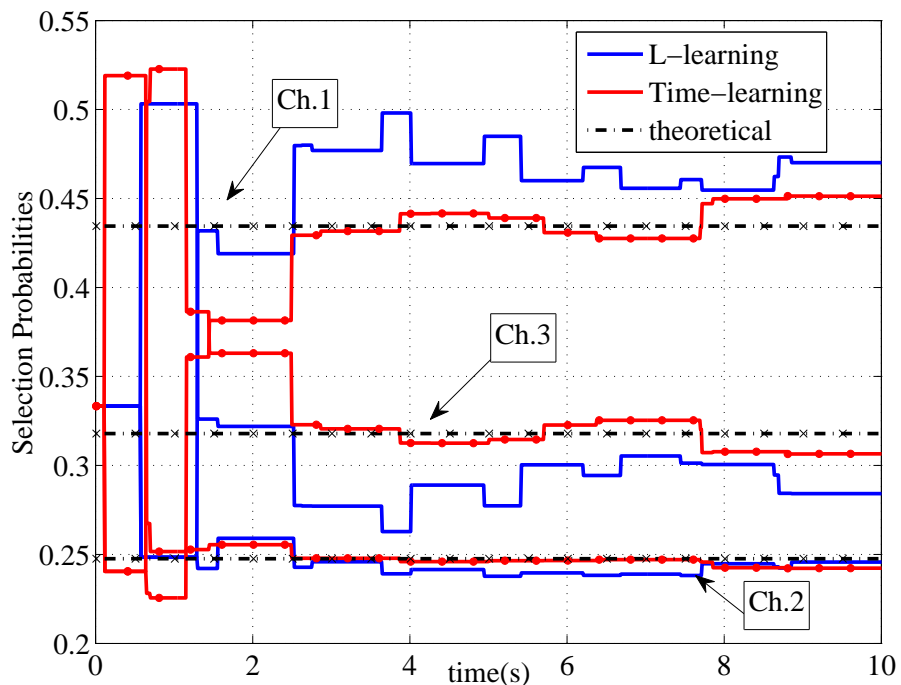
4.4.1 Στατικό περιβάλλον μετάδοσης

Αρχικά, η επίδοση ενός δευτερεύοντα χρήστη κατά την εφαρμογή των δύο επιλογών του προτεινόμενου σχήματος ενισχυτικής μάθησης εξετάστηκε σε ένα περιβάλλον που αποτελείται από τρία κανάλια, CH1, CH2, CH3. Τα κανάλια χαρακτηρίζονται από ON και OFF περιόδους όπως εξηγήθηκε στο Εδάφιο 4.3.3 έχουν την ίδια μέση διάρκεια ON και μέση OFF διάρκεια $2s, 0.2s, 1s$, αντίστοιχα. Η παράμετρος μάθησης κατά την εφαρμογή του κανόνα L-Learning ορίζεται ως $L = 0.2$, η παράμετρος $Temp$ τίθεται ίση με 0.1 και ο χρόνος ανίχνευσης ορίζεται ως $T_s = 2.5ms$, που αποτελεί το βέλτιστο χρόνο ανίχνευσης για την τεχνική ανίχνευσης ενέργειας σύμφωνα με το [96]. Τα Σχ.4.3 και 4.4 απεικονίζουν την εξέλιξη των προτεραιοτήτων ανίχνευσης καναλιών (πιθανότητες επιλογής), που βασίζονται στην πολιτική μάθησης που περιγράφεται από την (4.6) και συγκρίνονται με τις θεωρητικές πιθανότητες που προέρχονται από την (4.11).

Και οι δύο αλγόριθμοι μάθησης που προτείνονται επιτυγχάνουν να θέσουν σωστά τις προτεραιότητες επιλογής των τριών καναλιών σύμφωνα με τις αντίστοιχες μέσες OFF περιόδους. Όταν χρησιμοποιείται ο κανόνας L-learning, οι πιθανότητες επιλογής εμφανίζουν σοβαρές διακυμάνσεις, ειδικά στην αρχή της προσομοίωσης λόγω της σταθερής παραμέτρου μάθησης. Η εφαρμογή του κανόνα Time-learning, από την άλλη πλευρά, οδηγεί σε σταθερή συμπεριφορά με την παρέλευση του χρόνου, αφού η παράμετρος μάθησης μειώνεται σταδιακά. Τα Σχ.4.3 και 4.4 παρουσιάζουν απόκλιση των πιθανοτήτων επιλογής καναλιών από τις θεωρητικές πιθανότητες επιλογής. Αυτό είναι αναμενόμενο, δεδομένου ότι, και με τους δύο κανόνες μάθησης, οι ανταμοιβές που λαμβάνονται από τους δευτερεύοντες χρήστες μετά την ολοκλήρωση των επιτυχών μεταδόσεων σε κάθε κανάλι είναι πάντα μικρότερες από την πραγματική μέση OFF διάρκεια, επειδή η καταγεγραμμένη OFF περίοδος είναι μικρότερη λόγω του χρόνου που δαπανάται στην ανίχνευση.



Σχήμα 4.3: Πιθανότητες επιλογής με εφαρμογή των κανόνων μάθησης L-learning and Time-learning για ευκαιριακή πρόσβαση καναλιού σε τρία στατικά κανάλια.



Σχήμα 4.4: Πιθανότητες επιλογής με εφαρμογή των κανόνων μάθησης L-learning and Time-learning για ευκαιριακή πρόσβαση καναλιού σε τρία στατικά κανάλια (απεικονίζονται τα αρχικά 20s λειτουργίας).

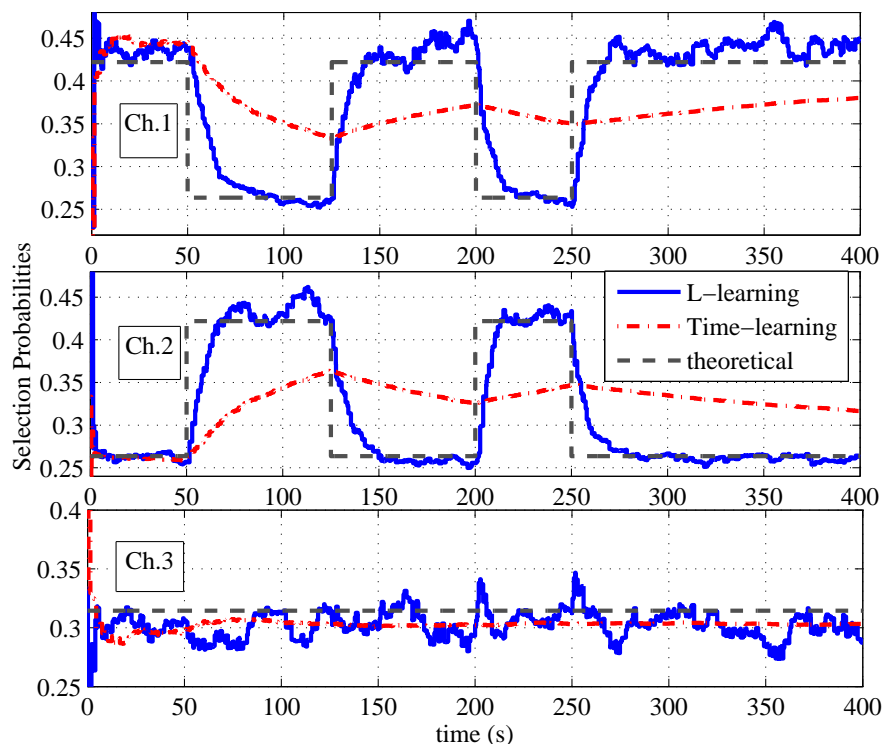
4.4.2 Δυναμικό περιβάλλον μετάδοσης

Για να εξεταστεί το σενάριο δυναμικού περιβάλλοντος μετάδοσης, θεωρείται ότι τα χαρακτηριστικά του διαύλου, δηλαδή οι μέσες *OFF* διάρκειες, αλλάζουν με το χρόνο σύμφωνα με τον Πίνακα 1. Οι αλλαγές των μέσων *OFF* διαρκειών συμβαίνουν σε 50, 125, 200 και 250s από την αρχή της προσομοίωσης. Η παράμετρος μάθησης, όταν χρησιμοποιείται ο κανόνας L-learning τίθεται και πάλι ίση με $L = 0.2$.

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά καναλιών.

No. Channel	Μέση OFF περίοδος (s)				
	0-50s	50-125s	125-200s	200-250s	250-400s
Channel 1	1	0.2	1	0.2	1
Channel 2	0.2	1	0.2	1	0.2
Channel 3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Το Σχ.4.5 απεικονίζει την εξέλιξη των πιθανοτήτων επιλογής των καναλιών με το χρόνο, όταν εφαρμόζονται οι δύο προτεινόμενοι κανόνες μάθησης. Αυτές οι πιθανότητες επιλογής συγκρίνονται με τις θεωρητικές που λαμβάνονται από την (4.11).



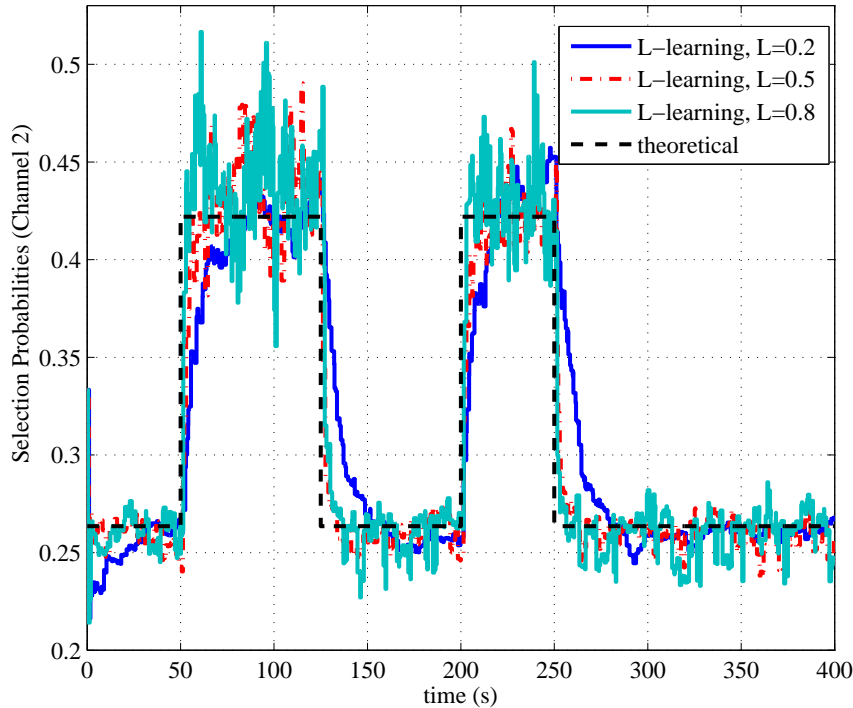
Σχήμα 4.5: Πιθανότητες επιλογής με εφαρμογή των κανόνων μάθησης L-learning and Time-learning για ευκαιριακή πρόσβαση καναλιού σε τρία δυναμικά κανάλια.

Από το Σχ.4.5 φαίνεται αμέσως ότι η επιλογή L-learning στο προτεινόμενο σχήμα ενισχυτικής μάθησης προσαρμόζεται πολύ ταχέως στις μεταβολές των χαρακτηριστικών του

καναλιού που συμβαίνουν σε 50, 125, 200 και 250s. Η σχετική καθυστέρηση της προσαρμογής είναι αμελητέα καθώς μία μόνο επιτυχημένη μετάδοση σε κάθε κανάλι είναι επαρκής για να αντιληφθεί ένα δευτερεύων χρήστης την αλλαγή στα χαρακτηριστικά του καναλιού. Η σταθερή παράμετρος μάθησης που χρησιμοποιεί ο κανόνας L-learning επιτρέπει σε ένα δευτερεύοντα χρήστη να αλλάζει τις τιμές Q σύμφωνα με την τελευταία καταγεγραμμένη ανταμοιβή. Ωστόσο, η μείωση της παραμέτρου μάθησης με το χρόνο, όταν για την επιλογή του καναλιού εφαρμόζεται ο κανόνας Time-learning, αποτρέπει το δευτερεύοντα χρήστη να προσαρμοστεί ταχέως στις αλλαγές των καναλιών. Αλλαγές που συμβαίνουν νωρίς στη λειτουργία του δευτερεύοντα χρήστη μπορούν να ανιχνευθούν ευκολότερα καθώς η συσσωρευμένη εμπειρία μέχρι εκείνο το σημείο είναι περιορισμένη. Ωστόσο, όσο αργότερα συμβαίνει μια αλλαγή, τόσο αργότερα μπορεί ο δευτερεύων χρήστης να προσαρμόσει τις αντίστοιχες πιθανότητες επιλογής. Η παράμετρος μάθησης είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το πλήθος των προσπαθειών πρόσβασης σε ένα κανάλι. Ως εκ τούτου, μειώνεται με το χρόνο. Όπως παρατηρείται από το Σχ. 4.5, ο αλγόριθμος Time-learning προσπαθεί να προσαρμόσει τις πιθανότητες επιλογής τόσο του πρώτου όσο και του δεύτερου καναλιού μετά την αλλαγή που συμβαίνει στα 50s. Ωστόσο, οι πιθανότητες αποτυγχάνουν να συγκλίνουν προς τις νέες τιμές αφού ο χρόνος σύγκλισης είναι αρκετά μεγαλύτερος από το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ των αλλαγών.

Όπως προκύπτει από το Σχ.4.5, η σταθερή παράμετρος μάθησης καθιστά τον κανόνα L-learning κατάλληλο για δυναμικά περιβάλλοντα όπου λειτουργούν PUs που ακολουθούν δυναμικά μοντέλα κίνησης. Η διαθεσιμότητα των καναλιών μπορεί να αλλάζει λόγω της εμφάνισης και άλλων ευκαιριακών χρηστών που εμφανίζουν άγνωστη συμπεριφορά ως προς τα χαρακτηριστικά μετάδοσης. Ωστόσο, η ευαισθησία του στις αλλαγές καθιστά τον κανόνα L-learning ευάλωτο σε τυχαίες ανταμοιβές, προκαλώντας διακυμάνσεις στις πιθανότητες επιλογής γύρω από τις θεωρητικές τιμές. Αντίθετα, όταν εφαρμόζεται ο κανόνας Time-learning, οι πιθανότητες επιλογής εμφανίζουν μια ομαλότερη σύγκλιση στις θεωρητικές τιμές, αλλά αποτυγχάνουν να αναγνωρίσουν και να προσαρμοστούν στις συχνές αλλαγές των χαρακτηριστικών των καναλιών.

Η επίδραση της παραμέτρου μάθησης στην εφαρμογή του κανόνα L-learning εξετάζεται στο ίδιο δυναμικό περιβάλλον μετάδοσης. Κατά την εφαρμογή του κανόνα L-learning χρησιμοποιήθηκαν τρεις τιμές, συγκεκριμένα, $L = 0.2, 0.5$ και 0.8 . Οι αντίστοιχες πιθανότητες επιλογής για το Κανάλι 2 απεικονίζονται στο Σχ. 4.6 από όπου φαίνεται ότι οι υψηλότερες τιμές της παραμέτρου μάθησης L οδηγούν σε ταχύτερη προσαρμογή στις αλλαγές στα χαρακτηριστικά του καναλιού. Ωστόσο, παρατηρούνται έντονες διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια των περιόδων σταθερότητας στα χαρακτηριστικά των καναλιών. Η τιμή $L = 0.2$ θεωρείται ότι συνδυάζει τα πλεονεκτήματα τόσο της προσαρμοστικότητας όσο και της σταθερότητας γύρω από τις θεωρητικές πιθανότητες σε σύγκριση με τις άλλες τιμές του L . Για το λόγο αυτό, θα χρησιμοποιηθεί για το υπόλοιπο των προσομοιώσεων. Αντίστοιχα, η τιμή



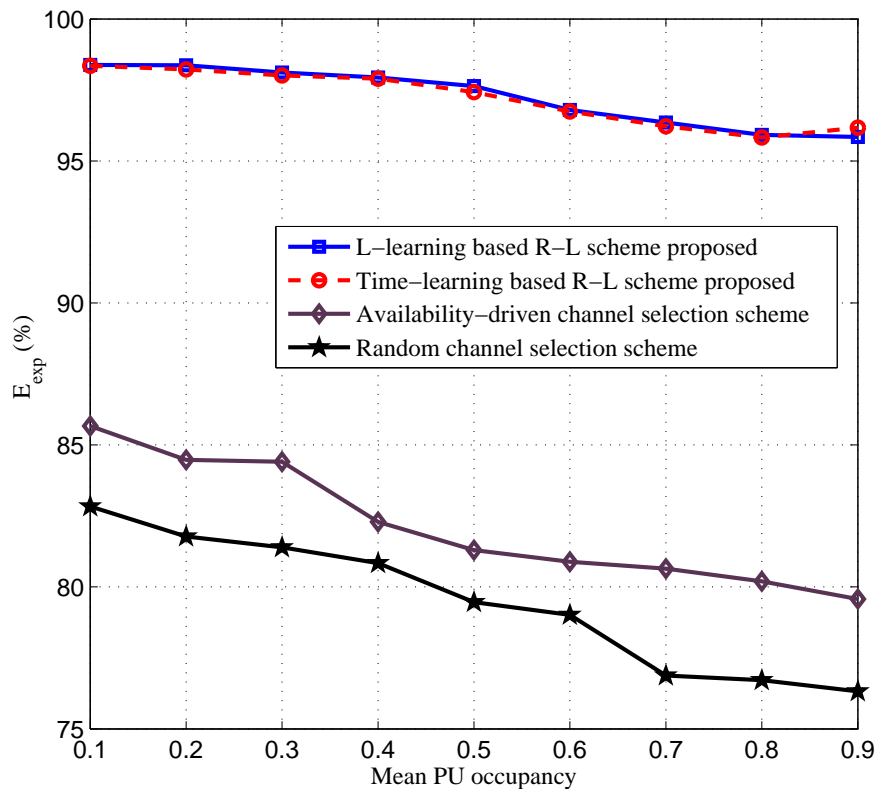
Σχήμα 4.6: Πιθανότητες επιλογής (Κανάλι 2) με εφαρμογή του κανόνα μάθησης L-learning για ευκαιριακή πρόσβαση καναλιού με διαφορετικές τιμές της παραμέτρου μάθησης L .

$Temp = 0.1$ που χρησιμοποιείται για τη στρατηγική Boltzmann προωθεί την εξερεύνηση μέσω πιθανοτικής επιλογής των καναλιών που λαμβάνει υπόψη τα διαφορετικά χαρακτηριστικά τους. Υψηλότερες τιμές της Temp είναι εκτός ενδιαφέροντος για το συγκεκριμένο σχήμα, δεδομένου ότι θα οδηγούσε σε τυχαία επιλογή των καναλιών και, επομένως, στην άγνοια της διαδικασίας μάθησης.

4.4.3 Εκμετάλλευση φάσματος και ενεργειακή απόδοση

Η απόδοση των δύο προτεινόμενων σχημάτων ενισχυτικής μάθησης για επιλογή καναλιού εξετάζεται σε ένα περιβάλλον όπου 10 κανάλια είναι διαθέσιμα για ευκαιριακή πρόσβαση. Η μέση χρησιμοποίηση των πρωτευόντων χρηστών, που αντικατοπτρίζει την κατάληψη των καναλιών από τους πρωτεύοντες χρήστες, θεωρείται σταθερή. Εντούτοις, οι μεμονωμένες τιμές χρησιμοποίησης των πρωτευόντων χρηστών ανά κανάλι διαφέρουν μεταξύ του. Η μέση διάρκεια των *OFF* περιόδων κυμαίνεται στο εύρος 0.1s μέχρι 1s και τόσο οι *OFF* όσο και οι *ON* διάρκειες ακολουθούν την εκθετική κατανομή. Οι κανόνες μάθησης L-learning και Time-learning αποτελούν τις δύο εναλλακτικές επιλογές που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο του προτεινόμενου σχήματος ενισχυτικής μάθησης και συγκρίνονται με: (i) ένα σχήμα επιλογής καναλιών που βασίζεται σε τυχαία επιλογή και (ii) το σχήμα επιλογής καναλιού που προτείνεται στο [18], και εφεξής θα αναφέρεται ως σχήμα επιλογής καναλιών με βάση τη διαθεσιμότητα. Σύμφωνα με το σχήμα τυχαίας επιλογής καναλιών, τα

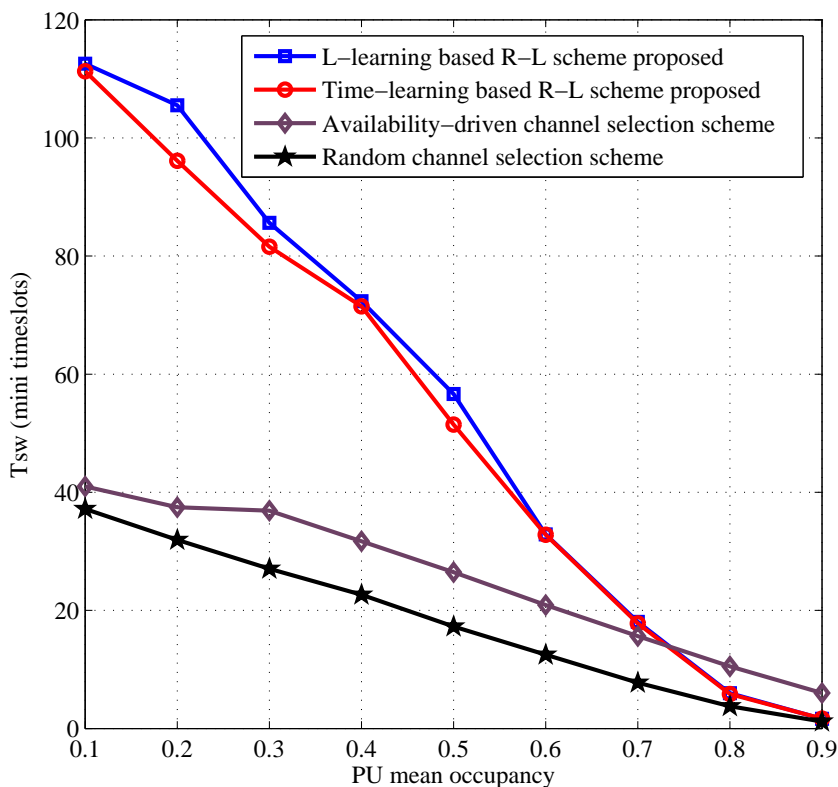
κανάλια διατάσσονται σε μία τυχαία σειρά ανίχνευσης και οι δευτερεύοντες χρήστες μεταδίδουν στο πρώτο ελεύθερο κανάλι που ανιχνεύουν. Από την άλλη πλευρά, το [18] προτείνει μια διαισθητική σειρά ανίχνευσης τακτοποιώντας τα κανάλια σε φθίνουσα σειρά ως προς την πιθανότητα διαθεσιμότητάς τους (αύξουσα σειρά ως προς την πιθανότητα κατάληψης). Αυτές οι πιθανότητες θεωρούνται γνωστές εκ των προτέρων από το συγκεκριμένο σχήμα. Τόσο το σχήμα τυχαίας επιλογής καναλιών όσο και το σχήμα επιλογής καναλιού με βάση τη διαθεσιμότητα οργανώνονται σε χρονοθυρίδες διάρκειας $T = 125ms$. Η παράμετρος μάθησης όταν χρησιμοποιείται L-learning έχει ληφθεί ίση με $L = 0.2$ και η διάρκεια ανίχνευσης ίση με $T_s = 2.5ms$. Η διάρκεια της μίνι χρονοθυρίδας που είναι η βάση του χρόνου που χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις για τα μέτρα επίδοσης που προτάθηκαν στο εδάφιο 4.3.3 έχει επίσης οριστεί ίση με το T_s . Οι προσομοιώσεις έγιναν θεωρώντας ένα δευτερεύοντα χρήστη που επιχειρεί ευκαιριακή φασματική πρόσβαση σε περιβάλλον 10 καναλιών κατειλημμένων από διάφορους πρωτεύοντες χρήστες. Οι προσομοιώσεις διαρκούν επί 45000 μίνι χρονοθυρίδες, ενώ τα χαρακτηριστικά των καναλιών αλλάζουν δύο φορές, συγκεκριμένα, μετά την παρέλευση 15000 και 30000 μίνι χρονοθυρίδων. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ως προς τα μέτρα επίδοσης που εισήχθησαν στο εδάφιο 4.3.3 απεικονίζονται στα σχήματα 4.7 - 4.10.



Σχήμα 4.7: Εκμετάλλευση ευκαιριών ως συνάρτηση της μέσης κατάληψης PU όταν 10 κανάλια είναι διαθέσιμα για ευκαιριακή φασματική πρόσβαση.

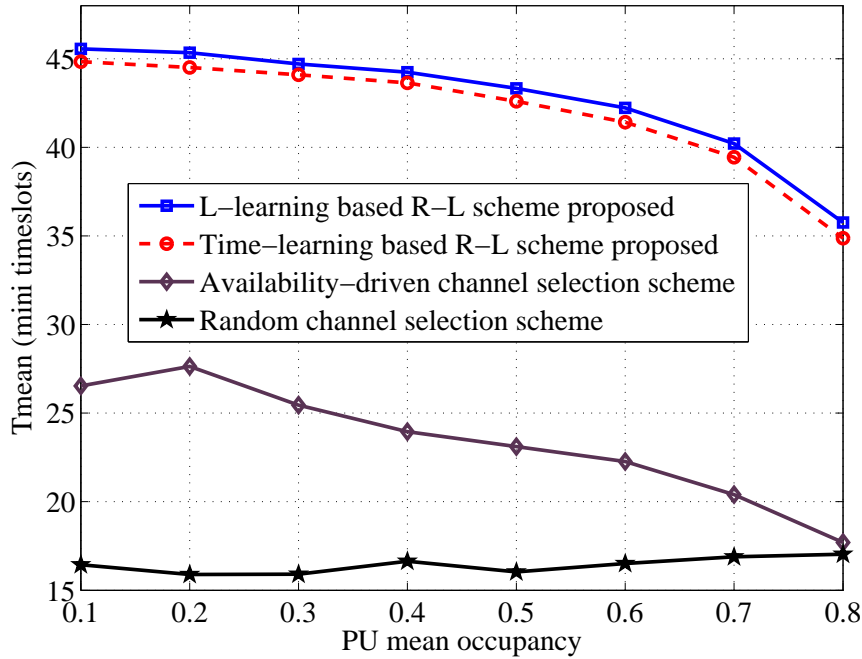
Στο Σχ. 4.7 απεικονίζεται η εκμετάλλευση των δυνατοτήτων μετάδοσης, όπως ορίζεται

από την (4.13), για τις δύο επιλογές του προτεινόμενου σχήματος ενισχυτικής μάθησης, το σχήμα τυχαίας ανίχνευσης (RCSS-Random Channel Sensing Scheme) και το σχήμα επιλογής καναλιών με βάση τη διαθεσιμότητα (ADCSS-Availability-Driven Channel Selection Scheme). Είναι φανερό ότι τόσο το σχήμα Time-learning όσο και το σχήμα L-learning παρουσιάζουν υψηλότερες επιδόσεις σε σύγκριση με το RCSS και το ADCSS. Και τα δύο προτεινόμενα σχήματα επιτυγχάνουν μεγαλύτερη εκμετάλλευση των ευκαιριών μετάδοσης σε σύγκριση με το ADCSS, καίτοι δεν προϋποθέτουν εκ των προτέρων γνώση των πιθανοτήτων κατάληψης των καναλιών όπως το ADCSS. Αυτό οφείλεται στο ότι και οι δύο επιλογές ενισχυτικής μάθησης καθορίζουν τη σειρά ανίχνευσης καναλιών με βάση τις εκτιμώμενες *OFF* περιόδους και όχι αποκλειστικά με βάση τη μέση κατάληψη των καναλιών όπως το ADCSS. Και οι δύο προτεινόμενες επιλογές παρουσιάζουν βελτίωση έως 20% σε σύγκριση με το RCSS και έως 16% σε σύγκριση με το ADCSS. Η επιλογή του κανόνα μάθησης L-learning προσφέρει μια ελαφρώς καλύτερη εκμετάλλευση από την επιλογή του κανόνα Time-learning. Όπως επαληθεύεται και από το Σχ. 4.5, η υπεροχή της L-learning είναι μεγαλύτερη όταν τα χαρακτηριστικά του καναλιού αλλάζουν συχνότερα.



Σχήμα 4.8: Το μέτρο T_{sw} ως συνάρτηση της μέσης κατάληψης PU όταν 10 κανάλια είναι διαθέσιμα για ευκαιριακή πρόσβαση στο φάσμα.

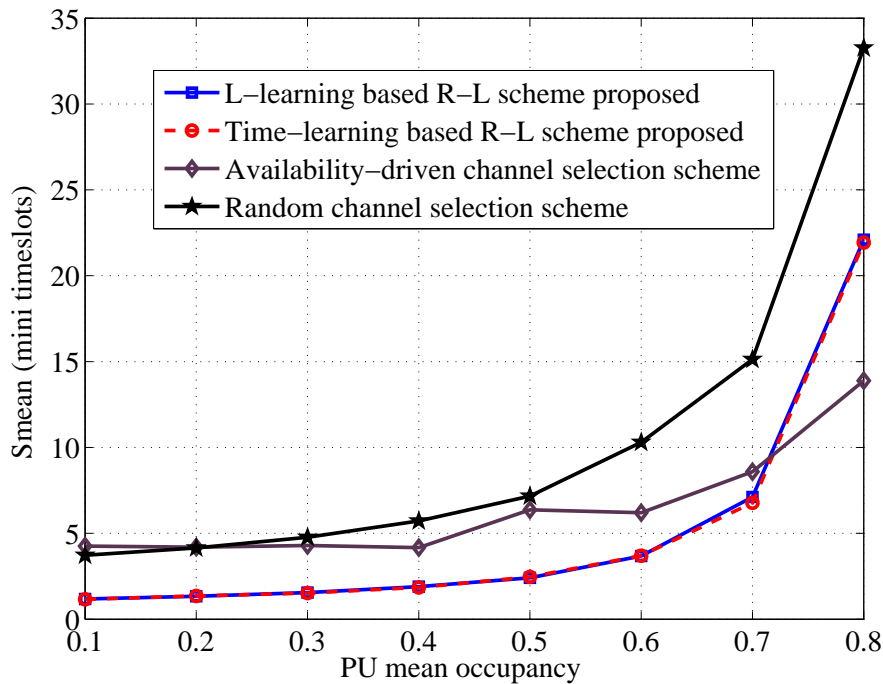
Από το Σχ.4.8 παρατηρείται ότι, και για τις δύο επιλογές μάθησης που εξετάζονται στο πλαίσιο του προτεινόμενου σχήματος ενισχυτικής μάθησης, το μέτρο T_{sw} είναι σημαντικά υψηλότερο από ότι είναι στα σχήματα ADCSS και RCSS, ιδίως για χαμηλές τιμές κατάληψης



Σχήμα 4.9: Το μέτρο T_{mean} ως συνάρτηση της μέσης κατάληψης PU όταν 10 κανάλια είναι διαθέσιμα για ευκαιριακή πρόσβαση στο φάσμα.

PU. Όπως εξηγείται στην Ενότητα 4.3.3, η βελτίωση αυτή σχετίζεται με την καθυστέρηση στην προσαρμογή και την ενεργειακή απόδοση του σχήματος επιλογής καναλιού. Ενδεικτικά, όταν η μέση PU χωρητικότητα είναι 0.4, το σύστημα που βασίζεται στην L-μάθηση εκτελεί κατά μέσο όρο αδιάλειπτη μετάδοση για 73 μίνι χρονοθυρίδες για κάθε μεταγωγή καναλιού, το σχήμα Time-learning για 71, το ADCSS για 32 και το RCSS για 23 μίνι χρονοθυρίδες. Όσο αυξάνεται η μέση κατάληψη των καναλιών από πρωτεύοντες χρήστες, η συμπεριφορά του μέτρου T_{sw} του σχήματος ενισχυτικής μάθησης πλησιάζει αυτή των υπό σύγκριση σχημάτων. Πρέπει να αναφερθεί, ωστόσο, ότι περιβάλλοντα υψηλής κατάληψης από πρωτεύοντες χρήστες δεν θεωρούνται πρόσφορα για ευκαιριακή φασματική πρόσβαση.

Στο Σχ. 4.9, το μέτρο T_{mean} απεικονίζεται για τα τέσσερα υπό σύγκριση σχήματα ανίχνευσης. Και τα δύο σχήματα ενισχυτικής μάθησης επιτυγχάνουν μεγαλύτερη μέση διάρκεια μετάδοσης από τα συγκρινόμενα σχήματα ADCSS και RCSS. Τέλος, όπως παρατηρείται στο Σχ. 4.10 όπου απεικονίζεται το μέτρο S_{mean} , η εφαρμογή των δύο σχημάτων ενισχυτικής μάθησης επιφέρει μείωση του μέσου χρόνου ανίχνευσης σε σύγκριση με το ADCSS και το RCSS. Όταν αυξάνεται η μέση χωρητικότητα PU, το σχήμα ADCSS παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά ως προς τη διάρκεια ανίχνευσης. Εντούτοις, όπως έχει ήδη αναφερθεί, περιβάλλοντα με υψηλή PU χωρητικότητα είναι εκτός ενδιαφέροντος για εφαρμογές γνωστικών επικοινωνιών.



Σχήμα 4.10: Το μέτρο S_{mean} ως συνάρτηση της μέσης κατάληψης PU όταν 10 κανάλια είναι διαθέσιμα για ευκαιριακή πρόσβαση στο φάσμα.

4.5 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε ένα σύστημα βασισμένο σε ενισχυτική μάθηση (RL) για τον καθορισμό της σειράς ανίχνευσης καναλιών από δευτερεύοντες χρήστες που δραστηριοποιούνται σε δυναμικά περιβάλλοντα μετάδοσης. Το προτεινόμενο σύστημα εφαρμόζει δύο προσεγγίσεις μάθησης, που βασίζονται στους κανόνες μάθησης L-learning και Time-learning, αντίστοιχα. Και οι δύο εκδοχές καθιστούν το δευτερεύοντα χρήστη ικανό να μάθει τη χρησιμοποίηση των καναλιών και τη μέση διάρκεια των ανενεργών περιόδων τους χωρίς επικοινωνία με μια κεντρική οντότητα ή με άλλους δευτερεύοντες χρήστες. Οι προσομοιώσεις καταδεικνύουν ότι και οι δύο εκδοχές επιτυγχάνουν να διατάξουν τα κανάλια σε σειρά ανίχνευσης με σωστή προτεραιότητα ως προς τη μέση διάρκεια της αντίστοιχης *OFF* περιόδου κάθε καναλιού. Η εκδοχή του σχήματος που χρησιμοποιεί L-learning προσαρμόζεται ταχύτερα στις αλλαγές των χαρακτηριστικών των καναλιών, ενώ το σχήμα που χρησιμοποιεί Time-learning, αν και προσαρμόζεται αργότερα, εμφανίζει μικρότερες διακυμάνσεις στις πιθανότητες επιλογής καναλιών. Και τα δύο συστήματα επιλογής καναλιού RL παρουσιάζουν βελτίωση στην αξιοποίηση των ευκαιριών φάσματος σε σύγκριση τόσο με τον αλγόριθμο ADCSS όσο και με τον αλγόριθμο τυχαίας επιλογής καναλιών και παρέχουν τη δυνατότητα στους δευτερεύοντες χρήστες να επιτύχουν μεγαλύτερη μέση διάρκεια μετάδοσης και μικρότερη μέση διάρκεια ανίχνευσης.

Κεφάλαιο 5

Αγορά φάσματος (spectrum trading) για γνωστικά δίκτυα επικοινωνιών με υβριδική πρόσβαση στο φάσμα με χρήση θεωρίας συμβολαίων

5.1 Εισαγωγή

Τελευταία τάση στο χώρο των τηλεπικοινωνιών και της αγοράς φάσματος αποτελεί η δυνατότητα υβριδικής πρόσβασης στο φάσμα από δευτερεύοντες χρήστες (Secondary Users-SU). Συγκεκριμένα, εκτός από ευκαιριακή φασματική πρόσβαση (Opportunistic Spectrum Access- OSA) οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να αποκτήσουν και αποκλειστική πρόσβαση (Exclusive Spectrum Access- ESA) σε ζώνες συχνοτήτων (frequency bands- FB) που διατίθενται για αποκλειστική χρήση.

Ακολουθώντας την τάση αυτή των συνδυαστικών μοντέλων, στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται ένα σχήμα αγοράς φάσματος, όπου ένας ιδιοκτήτης φάσματος (PSO-Primary Spectrum Owner) προσφέρει αποκλειστική πρόσβαση στο φάσμα σε πρωτεύοντες χρήστες βάσει προκαθορισμένων συμφωνιών ως προς το επίπεδο υπηρεσίας (SLAs- Service Level Agreements) ενώ, ταυτόχρονα, μπορεί να εκμεταλλεύεται ένα μέρος του διαθέσιμου φάσματος παρέχοντας συμβόλαια σε δευτερεύοντες χρήστες της μορφής ζευγών φάσματος-τιμής. Στο πλαίσιο αυτό, μέσω κατάλληλου σχεδιασμού των συμβολαίων, επιτρέπεται σε δευτερεύοντες χρήστες να χρησιμοποιήσουν ζώνες συχνοτήτων που αποκλείονται από τη λειτουργία των πρωτευόντων χρηστών.

Ο βέλτιστος σχεδιασμός συμβολαίων, δηλαδή ο σχεδιασμός μέσω του οποίου μεγιστοποιείται το κέρδος του ιδιοκτήτη φάσματος, εξετάζεται από τη διατριβή διακρίνοντας δύο περιπτώσεις: πλήρους και μη πλήρους πληροφόρησης ως προς τα χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις μετάδοσης των δευτερευόντων χρηστών. Για την περίπτωση της μη πλήρους πληροφόρησης προτείνονται δύο ευριστικοί αλγόριθμοι, συγκεκριμένα ο αλγόριθμος αποκλειστικού συμβολαίου και ο αλγόριθμος πολλαπλών συμβολαίων, και μελετάται η επίδοσή τους σε σύγκριση με τα βέλτιστα αποτελέσματα που προκύπτουν όταν είναι διαθέ-

σιμη πλήρης πληροφόρηση.

Η δομή του Κεφαλαίου 5 έχει ως εξής. Στο Εδάφιο 5.2 παρουσιάζονται το μοντέλο του συστήματος και οι συναρτήσεις ανταμοιβής του ιδιοκτήτη φάσματος και των δευτερευόντων χρηστών. Στο Εδάφιο 5.3 γίνεται ανάλυση του σχεδιασμού συμβολαίων. Ο προτεινόμενος βέλτιστος σχεδιασμός συμβολαίων για την περίπτωση της πλήρους πληροφόρησης παρουσιάζεται στο Εδάφιο 5.4. Στο Εδάφιο 5.5 εξετάζεται η περίπτωση μη πλήρους πληροφόρησης και προτείνονται οι δύο ευριστικοί αλγόριθμοι. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις περιπτώσεις πλήρους και μη πλήρους πληροφόρησης παρουσιάζονται στο Εδάφιο 5.6. Τέλος, το Εδάφιο 5.7 συνοψίζει το Κεφάλαιο.

5.2 Μοντέλο Συστήματος

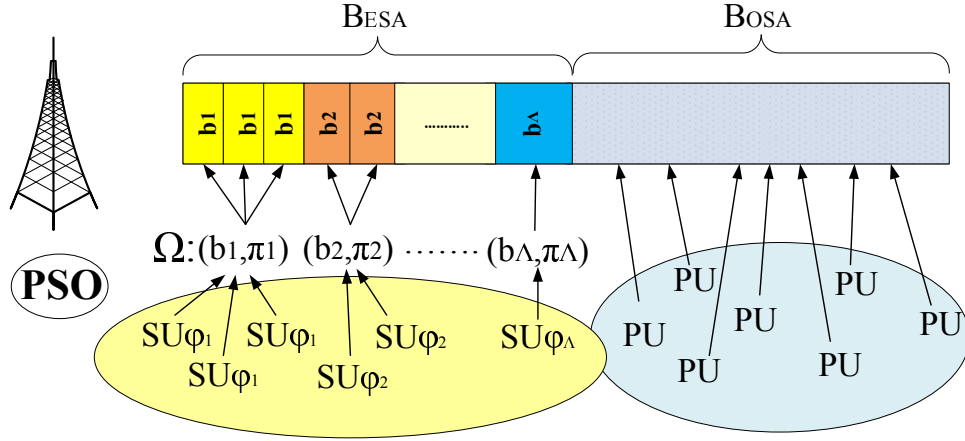
Στο υπό εξέταση μοντέλο θεωρείται ένας ιδιοκτήτης φάσματος με διαθέσιμο εύρος ζώνης B που εξυπηρετεί συγκεκριμένο πλήθος από όμοιους πρωτεύοντες χρήστες. Η παροχή υπηρεσίας γίνεται με προκαθορισμένα SLA κοινά για όλους τους πρωτεύοντες χρήστες. Τα κοινά SLA προσδιορίζουν τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης και το ποσοστό λανθασμένων ψηφίων (BER-bit-error-ratio) που εγγυάται ο ιδιοκτήτης φάσματος στους πρωτεύοντες χρήστες καθώς και την πιθανότητα κατάληψης των ζωνών συχνοτήτων από τους πρωτεύοντες χρήστες. Στην ίδια γεωγραφική περιοχή παρέχεται η δυνατότητα και σε δευτερεύοντες χρήστες να αποκτήσουν πρόσβαση στο φάσμα. Ανάλογα με το είδος της πρόσβασης που προσφέρεται στους δευτερεύοντες χρήστες, το συνολικά διαθέσιμο εύρος ζώνης B διαχωρίζεται σε δύο τμήματα, συγκεκριμένα στα τμήματα B_{OSA} και B_{ESA} . Στο B_{OSA} παρέχεται η δυνατότητα σε δευτερεύοντες χρήστες να δραστηριοποιούνται ευκαιριακά σε ζώνες συχνοτήτων που διατίθενται σε πρωτεύοντες χρήστες αλλά είναι ελεύθερες για κάποιο χρονικό διάστημα. Στο B_{ESA} , η χρήση του οποίου από τους πρωτεύοντες χρήστες αποκλείεται, επιτρέπεται σε δευτερεύοντες χρήστες να έχουν αποκλειστική πρόσβαση με βάση το είδος του συμβολαίου στο οποίο έχουν συμφωνήσει με τον ιδιοκτήτη φάσματος.

Έχοντας ορίσει ως συμβόλαιο $\omega_n = \{b_n, \pi_n\}$ το ζεύγος διαθέσιμου εύρους ζώνης b_n και της αντίστοιχης τιμής π_n , το μοντέλο του υπό εξέταση συστήματος απεικονίζεται στο Σχ.5.1.

5.2.1 Μοντέλο πρόσβασης δευτερευόντων χρηστών στο φάσμα

Στο πλαίσιο που εξετάζεται, θεωρείται ότι οι δευτερεύοντες χρήστες υπόκεινται σε διαφορετικές συνθήκες μετάδοσης. Ακολουθώντας το μοντέλο που παρουσιάζεται στο [68] και στο [97], ο ρυθμός μετάδοσης που απολαμβάνει ένας SU_n όταν αποκτά πρόσβαση σε εύρος ζώνης X είναι ίσος με

$$R_n(X) = X \cdot \phi_n, \quad n = 1, \dots, N, \quad (5.1)$$



Σχήμα 5.1: Μοντέλο συστήματος με ένα PSO που εξυπηρετεί χρήστες PU και SU. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης διαχωρίζεται σε B_{ESA} (προσβάσιμο από SU μέσω συμβολαίων) και B_{OSA} (προσβάσιμο από SU μόνο ευκαιριακά).

όπου

$$\phi_n = \log(1 + K_n \cdot SNR_n) \quad (5.2)$$

είναι η φασματική απόδοση που χαρακτηρίζει τον SU_n και

$$K_n = 1.5/\ln(0.2/BER_n^{tar}), \quad (5.3)$$

είναι η ποιότητα υπηρεσίας (QoS-Quality of Service) που χαρακτηρίζει τον SU_n και προσδιορίζεται από το αντίστοιχο επιθυμητό BER, BER_n^{tar} [68], [97]. Στη σχέση (5.2), το SNR_n , δηλαδή ο λόγος σήματος προς θόρυβο στην είσοδο του αποκωδικοποιητή του δευτερεύοντος χρήστη SU_n , εξαρτάται από τις αντίστοιχες συνθήκες μετάδοσης και από την ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου του δέκτη του SU_n .

Στη συνέχεια, γίνεται η υπόθεση ότι τόσο οι πρωτεύοντες όσο και οι δευτερεύοντες χρήστες χαρακτηρίζονται από το ίδιο επιθυμητό BER, έστω BER_{SU}^{tar} και BER_{PU}^{tar} αντίστοιχα. Επίσης, θεωρείται ότι οι διάφορες κλάσεις υπηρεσίας που προσφέρονται προς τους πρωτεύοντες και δευτερεύοντες χρήστες καθορίζονται από τους αντίστοιχους απαιτούμενους ελάχιστους ρυθμούς μετάδοσης. Στο πλαίσιο αυτό, ορίζονται Λ κλάσεις υπηρεσίας για τους N δευτερεύοντες χρήστες που αντιστοιχούν σε ισάριθμους ελάχιστους ρυθμούς μετάδοσης, $R_{i,min}, i = 1, 2, \dots, \Lambda$. Καθένας από τους N δευτερεύοντες χρήστες ανήκει σε μια από τις διαθέσιμες Λ κλάσεις υπηρεσίας. Ενδεικτικά, αν ο SU_i ανήκει στην κλάση υπηρεσίας i , ο παρεχόμενος σε αυτόν ρυθμός μετάδοσης από τον ιδιοκτήτη φάσματος πρέπει να υπερβαίνει το $R_{i,min}$, δηλαδή $R_i \geq R_{i,min}$. Υποθέτοντας ότι όλοι οι δευτερεύοντες χρήστες που ανήκουν στην ίδια κλάση υπηρεσίας συμφωνούν στο ίδιο συμβόλαιο, και άρα λαμβάνουν το ίδιο μερίδιο φάσματος, οι Λ κλάσεις υπηρεσίας, που χαρακτηρίζονται από τον αντίστοιχο απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσης, μπορούν να προσδιοριστούν από την αντίστοιχη φασματική απόδοση. Λαμβάνοντας υπόψη την παρατήρηση αυτή, οι Λ κλάσεις υπηρεσίας

μπορούν αντίστοιχα να οριστούν με βάση την απαιτούμενη φασματική απόδοση. Προκύπτει, συνεπώς, το σύνολο κλάσεων υπηρεσίας $\Phi = \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_\Lambda\}$ με $\phi_1 < \phi_2 < \dots < \phi_\Lambda$. Σε κάθε κλάση υπηρεσίας ϕ_λ , $\lambda \in \{1, \dots, \Lambda\}$, περιλαμβάνονται N_λ δευτερεύοντες χρήστες, όπου $\sum_{\lambda=1}^{\Lambda} N_\lambda = N$.

Καθώς οι M πρωτεύοντες χρήστες υποτίθενται όμοιοι μεταξύ τους, ανήκουν όλοι στη μοναδική κλάση υπηρεσίας που χαρακτηρίζεται από τη φασματική απόδοση

$$\phi_{PU} = \log(1 + K_{PU} \cdot SNR_{PU}), \quad (5.4)$$

όπου $K_{PU} = 1.5/\ln(0.2/BER_{PU}^{tar})$ και SNR_{PU} είναι το SNR στην είσοδο του αποκωδικοποιητή κάθε πρωτεύοντα χρήστη που εξαρτάται από τις συνθήκες μετάδοσης και την ισοδύναμη θερμοκρασία του θορύβου του δέκτη του πρωτεύοντος χρήστη.

Όπως έχει ήδη περιγραφεί, οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να αποκτήσουν πρόσβαση στο φάσμα κατά δύο τρόπους, με ευκαιριακή πρόσβαση στο B_{OSA} και με αποκλειστική πρόσβαση στο B_{ESA} . Θεωρώντας ότι κάποιος δευτερεύων χρήστης, έστω SU_i , συνάπτει ένα συμβόλαιο $\omega_i = \{b_i, \pi_i\}$, $i = 1, 2, \dots, N$, με τον ιδιοκτήτη του φάσματος, το συνολικό εύρος ζώνης B διαχωρίζεται σε δύο τμήματα, συγκεκριμένα σε

$$B_{ESA} = \sum_{i=1}^N b_i, \quad (5.5)$$

και

$$B_{OSA} = B - \sum_{i=1}^N b_i. \quad (5.6)$$

Επομένως, το συνολικό εύρος ζώνης που διατίθεται σε κάποιο δευτερεύοντα χρήστη SU_n είναι

$$B_n = b_n + (B - \sum_{i=1}^N b_i) \cdot (1 - p_{occ})/N, \quad (5.7)$$

όπου p_{occ} είναι η πιθανότητα το B_{OSA} να είναι κατειλημμένο από πρωτεύοντες χρήστες, αποκλείοντας έτσι τις συγκεκριμένες FB από ευκαιριακή πρόσβαση. Λαμβάνοντας υπόψη την (5.7), το κόστος του SU_n είναι

$$C_n(B_n) = \pi_n + \pi_{OSA} \cdot ((B - \sum_{i=1}^N b_i) \cdot (1 - p_{occ})/N), \quad (5.8)$$

όπου π_n είναι η τιμή με την οποία κοστολογείται η αποκλειστική πρόσβαση στο b_n και π_{OSA} είναι το κόστος των δευτερευόντων χρηστών ανά μονάδα φάσματος ευκαιριακής πρόσβασης λόγω της απαιτούμενης ανίχνευσης φάσματος. Συνδυάζοντας τις σχέσεις (5.1),(5.7) και

(5.8), η καθαρή ανταμοιβή του δευτερεύοντος χρήστη SU_n είναι

$$U_n(B_n) = R_n(B_n) - C_n(B_n) = U_n^{ESA}(B_n) + U_n^{OSA}(B_n), \quad (5.9)$$

όπου

$$U_n^{ESA}(B_n) = R_n(b_n) - \pi_n = b_n \cdot \phi_n - \pi_n, \quad (5.10)$$

είναι η καθαρή ανταμοιβή του SU_n από την πρόσβαση ESA σε εύρος ζώνης b_n και

$$U_n^{OSA}(B_n) = (B - \sum_{i=1}^N b_i) \cdot (1 - p_{occ}) \cdot [\phi_n - \pi_{OSA}] / N, \quad (5.11)$$

είναι η καθαρή ανταμοιβή του SU_n από την πρόσβαση OSA στο B_{OSA} . Συμπερασματικά, ένας δευτερεύων χρήστης SU_n μπορεί να έχει πρόσβαση σε συνολικό εύρος ζώνης B_n , το οποίο αποτελείται από το εύρος ζώνης b_n στο οποίο έχει αποκλειστική πρόσβαση και από το εύρος ζώνης B_{OSA} στο οποίο έχει ευκαιριακή πρόσβαση. Η καθαρή ανταμοιβή που προκύπτει από την αποκλειστική χρήση στο εύρος ζώνης b_n μέσω σύναψης συμβολαίου είναι $U_n^{ESA}(B_n)$ ενώ μέσω της ευκαιριακής πρόσβασης η καθαρή ανταμοιβή είναι $U_n^{OSA}(B_n)$.

5.2.2 Το μοντέλο τιμολόγησης

Ο ιδιοκτήτης φάσματος εξασφαλίζει πρόσβαση στο φάσμα σε M πρωτεύοντες χρήστες με εγγυημένο ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης, έστω R_{PU} . Ταυτόχρονα, ο ιδιοκτήτης φάσματος παρέχει αποκλειστικά μερίδια φάσματος b_i , $i = 1, \dots, N$, σε N δευτερεύοντες χρήστες μέσω αντίστοιχων συμβολαίων $\omega_i = \{b_i, \pi_i\}$. Το συνολικό όφελος του ιδιοκτήτη φάσματος από την παροχή αποκλειστικής πρόσβασης στους N δευτερεύοντες χρήστες, οι οποίοι ανήκουν σε Λ κλάσεις υπηρεσίας που ανήκουν στο σύνολο συμβολαίων $\Omega = \{(b_\lambda, \pi_\lambda), \forall \lambda \in \{1, \dots, \Lambda\}\}$, είναι ίσο με

$$R_P(\Omega) = \sum_{n=1}^N \pi_n = \sum_{\lambda=1}^{\Lambda} N_\lambda \cdot \pi_\lambda. \quad (5.12)$$

Από την άλλη πλευρά, ο αποκλεισμός των πρωτεύοντων χρηστών από το φάσμα B_{ESA} μπορεί να χειροτερεύσει το ρυθμό μετάδοσής τους. Στην περίπτωση όπου ο ιδιοκτήτης φάσματος δεν παρέχει στους πρωτεύοντες χρήστες το συμφωνημένο ρυθμό μετάδοσης R_{PU} , είναι υποχρεωμένος να τους αποζημιώσει για την υποβάθμιση της υπηρεσίας τους. Το αντίστοιχο κόστος του ιδιοκτήτη φάσματος, που εξαρτάται από την έκταση της υποβάθμισης υπηρεσίας, αποδίδεται από τη σχέση

$$C_P(\Omega) = M \cdot [D(\Omega)]^2, \quad (5.13)$$

όπου

$$D(\Omega) = R_{PU} - \phi_{PU} \cdot (B - \sum_{i=1}^N b_i)/M, \quad (5.14)$$

είναι η μείωση του ρυθμού μετάδοσης των πρωτευόντων χρηστών όταν ο ιδιοκτήτης φάσματος επιτρέπει σε N δευτερεύοντες χρήστες να έχουν αποκλειστική πρόσβαση σε εύρος ζώνης B_{ESA} με βάση το σύνολο συμβολαίων Ω .

Λαμβάνοντας υπόψη τις (5.12), (5.13) και (5.14), το καθαρό όφελος του ιδιοκτήτη φάσματος προκύπτει

$$\begin{aligned} U_P(\Omega) &= R_P(\Omega) - C_P(\Omega) = \\ &= \sum_{\lambda=1}^{\Lambda} N_{\lambda} \cdot \pi_{\lambda} - M \cdot [R_{PU} - \phi_{PU} \cdot (B - \sum_{\lambda=1}^{\Lambda} N_{\lambda} \cdot b_{\lambda})/M]^2. \end{aligned} \quad (5.15)$$

όπου

$$R_{PU} - \phi_{PU} \cdot (B - \sum_{\lambda=1}^{\Lambda} N_{\lambda} \cdot b_{\lambda})/M \geq 0. \quad (5.16)$$

5.3 Σχεδιασμός Συμβολαίων

5.3.1 Περιορισμοί στο σχεδιασμό

Στο πρόβλημα σχεδιασμού συμβολαίων που βασίζεται στο μοντέλο τιμολόγησης που παρουσιάστηκε στο Εδάφιο 5.2.2, ο ιδιοκτήτης φάσματος σχεδιάζει ένα σύνολο συμβολαίων και οι δευτερεύοντες χρήστες λειτουργούν ως πράκτορες που συνάπτουν συμβόλαια κατάλληλα για τη λειτουργία τους. Στόχος του ιδιοκτήτη φάσματος είναι η μεγιστοποίηση του $U_P(\Omega)$ προσφέροντας τα βέλτιστα συμβόλαια $\omega_{\lambda}^* = \{b_{\lambda}^*, \pi_{\lambda}^*\}$, $\lambda = 1, \dots, \Lambda$, σε κάθε κλάση υπηρεσίας. Το σύνολο των βέλτιστων συμβολαίων $\Omega^* = \{(b_{\lambda}^*, \pi_{\lambda}^*), \forall \lambda \in \{1, \dots, \Lambda\}\}$ πρέπει να ικανοποιεί τους περιορισμούς εφικτότητας όπως αυτοί ορίζονται από τη θεωρία συμβολαίων. Οι περιορισμοί αυτοί είναι:

- *Περιορισμός Συμμετοχής (PC-Participation Constraint):*

Ένα σύνολο συμβολαίων Ω ικανοποιεί τον περιορισμό συμμετοχής εφόσον, με την αποδοχή των αντίστοιχων συμβολαίων, όλοι οι πράκτορες λαμβάνουν μη αρνητική ανταμοιβή.

Για να ικανοποιείται ο περιορισμός συμμετοχής για όλες τις κλάσεις υπηρεσίας, τα αντίστοιχα συμβόλαια πρέπει να παρέχουν την εγγύηση ότι

$$U_{\lambda}^{ESA} = b_{\lambda} \cdot \phi_{\lambda} - \pi_{\lambda} \geq 0, \forall \lambda \in \{1, \dots, \Lambda\}. \quad (5.17)$$

- *Περιορισμός Κινήτρου (IC-Incentive Constraint):*

Ένα σύνολο συμβολαίων Ω ικανοποιεί τον περιορισμό κινήτρου όταν ένας πράκτορας δεν μπορεί να λάβει μεγαλύτερη ανταμοιβή αν συνάψει συμβόλαιο διαφορετικό από αυτό που έχει σχεδιαστεί για την κλάση υπηρεσίας στην οποία ανήκει.

Για κάποιο πράκτορα που ανήκει στην κλάση υπηρεσίας ϕ_λ , το σύνολο Ω ικανοποιεί τη συνθήκη κινήτρου εφόσον

$$b_\lambda \cdot \phi_\lambda - \pi_\lambda \geq b_j \cdot \phi_\lambda - \pi_j, \forall \lambda, j \in \{1, \dots, \Lambda\}. \quad (5.18)$$

- *Περιορισμός Υλοποιήσιμου Κινήτρου (IFC-Incentive Feasibility Constraint):*

Ένα σύνολο συμβολαίων Ω ικανοποιεί τον περιορισμό υλοποιήσιμου κινήτρου εφόσον ικανοποιεί τους περιορισμούς συμμετοχής και κινήτρου, δηλαδή ικανοποιεί ταυτόχρονα τις (5.17) και (5.18).

Εφαρμόζοντας τους προαναφερθέντες περιορισμούς, προσδιορίζονται οι αναγκαίες και ικανές συνθήκες για το σχεδιασμό ενός εφικτού συνόλου συμβολαίων $\Omega = \{(b_\lambda, \pi_\lambda), \forall \lambda \in \{1, \dots, \Lambda\}\}$, που προορίζεται για δευτερεύοντες χρήστες που ανήκουν σε ένα σύνολο κλάσεων υπηρεσίας $\Phi = \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_\Lambda\}, \phi_1 < \phi_2 < \dots < \phi_\Lambda$, ως εξής:

Συνθήκη 5.1. $b_i > b_j$ αν και μόνο αν $\pi_i > \pi_j$ και $b_i = b_j$ αν και μόνο αν $\pi_i = \pi_j$.

Συνθήκη 5.2. Αν $\phi_i > \phi_j$ τότε $b_i \geq b_j$.

Συνθήκη 5.3. Οι τιμές π_λ ικανοποιούν τις σχέσεις:

$$\pi_{\lambda-1} + (b_\lambda - b_{\lambda-1}) \cdot \phi_{\lambda-1} \leq \pi_\lambda \leq \pi_{\lambda-1} + (b_\lambda - b_{\lambda-1}) \cdot \phi_\lambda. \quad (5.19)$$

Οι συνθήκες (5.17), (5.18) και (5.19) αποτελούν τις αναγκαίες και ικανές συνθήκες για το σχεδιασμό εφικτών συμβολαίων στο Ω . Η απόδειξή τους γίνεται στο Παράρτημα Α.

5.3.2 Βέλτιστος σχεδιασμός συμβολαίων

Ο βέλτιστος σχεδιασμός συμβολαίων για το υπό εξέταση συνδυαστικό πρόβλημα κατανομής εύρους ζώνης και τιμολόγησης είναι αυτός που αποφέρει τη μέγιστη ανταμοιβή για τον ιδιοκτήτη φάσματος. Λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που αναφέρθηκαν στο Εδάφιο 5.3, το πρόβλημα μεγιστοποίησης της ανταμοιβής του ιδιοκτήτη φάσματος διαμορφώνεται ως εξής:

$$\max_{(b_\lambda, \pi_\lambda)} \{U_P(\Omega)\} \quad (5.20)$$

υπό τους περιορισμούς

$$\phi_{PU} \cdot (B - \sum_{\lambda=1}^{\Lambda} N_\lambda \cdot b_\lambda) / M - R_{PU} \leq 0, \quad (5.21)$$

$$\pi_\lambda - b_\lambda \cdot \phi_\lambda \leq 0, \quad (5.22)$$

$$b_j \cdot \phi_\lambda - \pi_j \leq b_\lambda \cdot \phi_\lambda - \pi_\lambda, \quad (5.23)$$

$$b_\lambda \geq 0, \quad (5.24)$$

$$\pi_\lambda \geq 0, \quad (5.25)$$

$$\forall \lambda, j \in \{1, \dots, \Lambda\}.$$

Θεώρημα 5.1. Στο σύνολο εφικτών συμβολαίων $\Omega = \{(b_\lambda, \pi_\lambda), \forall \lambda \in \{1, \dots, \Lambda\}\}$, όταν τα μερίδια φάσματος b_1, b_2, \dots, b_n που αποδίδονται στις αντίστοιχες κλάσεις υπηρεσίας είναι σταθερά, οι βέλτιστες τιμές $\{\pi_1^*, \pi_2^*, \dots, \pi_\Lambda^*\}$ προσδιορίζονται από τις εξισώσεις (βλέπε Παράρτημα Α)

$$\pi_1^* = \phi_1 \cdot b_1. \quad (5.26)$$

$$\begin{aligned} \pi_\lambda^* &= \pi_{\lambda-1}^* + \phi_\lambda \cdot (b_\lambda - b_{\lambda-1}) = \\ &= \phi_1 \cdot b_1 + \sum_{i=2}^{\lambda} \phi_i \cdot (b_i - b_{i-1}). \end{aligned} \quad (5.27)$$

Στα επόμενα εδάφια αντιμετωπίζεται το συγκεκριμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης για διαφορετικά επίπεδα πληροφόρησης ως προς τις κλάσεις υπηρεσίας στις οποίες ανήκουν οι δευτερεύοντες χρήστες.

5.4 Βέλτιστη τιμολόγηση με πλήρη πληροφόρηση

Στην περίπτωση αυτή, ο ιδιοκτήτης φάσματος γνωρίζει την κλάση υπηρεσίας στην οποία ανήκει κάθε δευτερεύων χρήστης. Τότε, αναμένεται ότι τα συμβόλαια που προσφέρονται από τον ιδιοκτήτη φάσματος ικανοποιούν τον περιορισμό συμμετοχής (5.17) με ισότητα. Συνεπώς, η τιμή π_λ στην (5.15) αντικαθίσταται από $b_\lambda \cdot \phi_\lambda$, τροποποιώντας αντίστοιχα και την αντικειμενική συνάρτηση (5.20).

Όπως αποδεικνύεται στο Παράρτημα Α, ο βέλτιστος σχεδιασμός συμβολαίων όταν είναι διαθέσιμη πλήρης πληροφόρηση οδηγεί στην προσφορά συμβολαίου $\Omega_\Lambda^* = (b_\Lambda^*, \pi_\Lambda^*)$

μόνο στην υψηλότερη κλάση υπηρεσίας ενώ δεν συμφέρει η προσφορά συμβολαίων για τις υπόλοιπες $\Lambda - 1$ κλάσεις υπηρεσίας. Ως εκ τούτου, όλο το εύρος ζώνης που προορίζεται για αποκλειστική εκμετάλλευση από δευτερεύοντες χρήστες, δηλαδή το B_{ESA} , αποδίδεται μόνο στους δευτερεύοντες χρήστες που περιλαμβάνονται στην υψηλότερη κλάση υπηρεσίας ϕ_Λ , δηλαδή

$$\sum_{\lambda=1}^{\Lambda} N_\lambda \cdot \pi_\lambda = N_\Lambda \cdot b_\Lambda \cdot \phi_\Lambda = B_{ESA} \cdot \phi_\Lambda. \quad (5.28)$$

Δηλαδή, το αρχικό πρόβλημα βελτιστοποίησης μετατρέπεται στο πρόβλημα βελτιστοποίησης μιας μεταβλητής $B_{ESA} = N_\Lambda \cdot b_\Lambda$ που περιγράφεται από την (5.28). Συγκεκριμένα, προκύπτει το πρόβλημα βελτιστοποίησης

$$\max_{B_{ESA}} \{B_{ESA} \cdot \phi_\Lambda - M \cdot [R_{PU} - \phi_{PU} \cdot (B - B_{ESA})/M]^2\} \quad (5.29)$$

υπό τον περιορισμό

$$\phi_{PU} \cdot (B - B_{ESA})/M - R_{PU} \leq 0. \quad (5.30)$$

Το τελικό πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι κυρτό ως προς B_{ESA} αφού η αντικειμενική συνάρτηση που εμφανίζεται στην (5.29) είναι κοίλη και ο περιορισμός (5.30) είναι κυρτή συνάρτηση. Η συνάρτηση Lagrange του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι

$$\begin{aligned} L(B_{ESA}, \mu) &= B_{ESA} \cdot \phi_\Lambda - M \cdot [R_{PU} - \phi_{PU} \cdot (B - B_{ESA})/M]^2 \\ &\quad - \mu \cdot [\phi_{PU} \cdot (B - B_{ESA})/M - R_{PU}]. \end{aligned} \quad (5.31)$$

όπου μ είναι ο πολλαπλασιαστής Lagrange του περιορισμού (5.30) ($\mu \geq 0$). Το συμπληρωματικό πρόβλημα του προβλήματος βελτιστοποίησης των (5.29)-(5.30) είναι

$$\max_{\mu} L(B_{ESA}, \mu) \quad (5.32)$$

υπό τον περιορισμό

$$\mu \geq 0. \quad (5.33)$$

που δίνει ως λύση ένα άνω όριο για το αρχικό πρόβλημα. Εφόσον το συμπληρωματικό πρόβλημα είναι κυρτό, υπάρχει μοναδικό βέλτιστο ζεύγος (B_{ESA}^*, μ^*) που ικανοποιεί τις συνθήκες Karush-Kuhn-Tucker (KKT) [92]

$$\partial L(B_{ESA}^*, \mu^*) / \partial (B_{ESA}^*) = 0. \quad (5.34\alpha)$$

$$\phi_{PU} \cdot (B - B_{ESA}^*)/M - R_{PU} \leq 0. \quad (5.34\beta)$$

$$\mu^* \geq 0. \quad (5.34\gamma)$$

$$\mu^* \cdot [\phi_{PU} \cdot (B - B_{ESA}^*)/M - R_{PU}] = 0. \quad (5.34\delta)$$

Με κατάλληλη επεξεργασία της (5.34α), προκύπτει το βέλτιστο προς εκμετάλλευση εύρος ζώνης από τους δευτερεύοντες χρήστες

$$B_{ESA}^* = B - (M \cdot R_{PU} - 0.5 \cdot M \cdot \phi_{\Lambda} / \phi_{PU} - 0.5 \cdot \mu^*) / \phi_{PU}. \quad (5.35)$$

Αντικαθιστώντας την (5.35) στην (5.34δ), προκύπτει

$$\mu^* \cdot (\phi_{\Lambda} / \phi_{PU} + \mu^* / M) = 0. \quad (5.36)$$

Επομένως, και επειδή η τιμή του μ^* δεν μπορεί να είναι αρνητική, η μόνη αποδεκτή τιμή για το μ^* είναι η μηδενική τιμή, δηλαδή $\mu^* = 0$.

Συμπερασματικά, υπό πλήρη πληροφόρηση σχετικά με την κλάση υπηρεσίας στην οποία ανήκει κάθε δευτερεύων χρήστης, ο ιδιοκτήτης φάσματος προσφέρει ένα μόνο συμβόλαιο εύρους ζώνης-τιμής, το βέλτιστο συμβόλαιο $(b_{\Lambda}^*, \pi_{\Lambda}^*)$, που προορίζεται μόνο για τους δευτερεύοντες χρήστες που ανήκουν στην υψηλότερη κλάση υπηρεσίας. Συγκεκριμένα, προσφέρεται το συμβόλαιο $\Omega_{\Lambda}^* = (b_{\Lambda}^*, \pi_{\Lambda}^*)$ όπου

$$b_{\Lambda}^* = B_{ESA}^* / N_{\Lambda}, \quad (5.37)$$

$$\pi_{\Lambda}^* = b_{\Lambda}^* \cdot \phi_{\Lambda}, \quad (5.38)$$

με

$$B_{ESA}^* = B - M \cdot (R_{PU} - 0.5 \cdot \phi_{\Lambda} / \phi_{PU}) / \phi_{PU}. \quad (5.39)$$

Η μέγιστη ανταμοιβή του ιδιοκτήτη φάσματος όταν προσφέρει το βέλτιστο συμβόλαιο $\Omega_{\Lambda}^* = (b_{\Lambda}^*, \pi_{\Lambda}^*)$ μόνο σε χρήστες που ανήκουν στην υψηλότερη κλάση υπηρεσίας προσδιορίζεται αντικαθιστώντας την (5.39) στην αντικειμενική συνάρτηση που υπεισέρχεται στην (5.29).

5.5 Βέλτιστη τιμολόγηση με μη πλήρη πληροφόρηση

Σε πρακτικά γνωστικά δίκτυα, αναμένεται να μην είναι διαθέσιμη πλήρης πληροφόρηση. Στην περίπτωση αυτή, στην προσπάθειά του να σχεδιάσει βέλτιστα συμβόλαια, ο ιδιοκτήτης φάσματος δεν γνωρίζει σε ποια κλάση υπηρεσίας ανήκει κάθε δευτερεύων χρήστης. Οι μόνες διαθέσιμες πληροφορίες είναι (i) το σύνολο των κλάσεων υπηρεσίας, $\Phi = \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_{\Lambda}\}$, και (ii) οι πιθανότητες οι δευτερεύοντες χρήστες να ανήκουν σε κάθε κλάση

υπηρεσίας, συγκεκριμένα οι πιθανότητες p_λ , $\lambda = 1, 2, \dots, \Lambda$, με $\sum_{\lambda=1}^{\Lambda} p_\lambda = 1$. Τότε, το πρόβλημα μεγιστοποίησης της ανταμοιβής του ιδιοκτήτη φάσματος μετατρέπεται σε πρόβλημα μεγιστοποίησης της προσδοκώμενης ανταμοιβής για συγκεκριμένες κλάσεις υπηρεσίας δευτερευόντων χρηστών. Αν $P\{N_1, N_2, \dots, N_\Lambda\}$ είναι η συνδυαστική πιθανότητα ώστε ακριβώς $N_1, N_2, \dots, N_\Lambda$ δευτερεύοντες χρήστες να ανήκουν στις αντίστοιχες κλάσεις υπηρεσίας, με $\sum_{\lambda=1}^{\Lambda} N_\lambda = N$, η προσδοκώμενη ανταμοιβή του ιδιοκτήτη φάσματος είναι ίση προς

$$U_P = \sum_{N_1=0}^N \sum_{N_2=0}^{N-N_1} \dots \sum_{N_{\Lambda-1}=0}^{N-\sum_{\lambda=1}^{\Lambda-2} N_\lambda} P\{N_1, N_2, \dots, N_\Lambda\} \cdot \left\{ \sum_{\lambda=1}^{\Lambda-1} N_\lambda \cdot \pi_\lambda^* + (N - \sum_{\lambda=1}^{\Lambda-1} N_\lambda) \cdot \pi_\Lambda^* - M \cdot [R_{PU} - K_{PU} \cdot (B - \sum_{\lambda=1}^{\Lambda-1} N_\lambda \cdot b_\lambda - (N - \sum_{\lambda=1}^{\Lambda-1} N_\lambda) \cdot b_\Lambda) / M]^2 \right\}. \quad (5.40)$$

Αναπτύσσοντας την προαναφερθείσα συνδυαστική πιθανότητα υπό τη μορφή

$$P\{N_1, N_2, \dots, N_\Lambda\} = \frac{N!}{N_1! N_2! \dots N_{\Lambda-1}! (N - \sum_{\lambda=1}^{\Lambda-1} N_\lambda)!} \cdot p_1^{N_1} \cdot p_2^{N_2} \dots p_\Lambda^{(N - \sum_{\lambda=1}^{\Lambda-1} N_\lambda)}. \quad (5.41)$$

και αντικαθιστώντας την τιμή π_λ^* από την (5.27) στην αντικειμενική συνάρτηση της (5.20), το πρόβλημα βελτιστοποίησης υπό μη πλήρη πληροφόρηση διαμορφώνεται ως

$$\max_{b_\lambda} \sum_{N_1=0}^N \sum_{N_2=0}^{N-N_1} \dots \sum_{N_{\Lambda-1}=0}^{N-\sum_{\lambda=1}^{\Lambda-2} N_\lambda} \frac{N!}{N_1! N_2! \dots N_{\Lambda-1}! (N - \sum_{\lambda=1}^{\Lambda-1} N_\lambda)!} \cdot p_1^{N_1} \cdot p_2^{N_2} \dots p_\Lambda^{(N - \sum_{\lambda=1}^{\Lambda-1} N_\lambda)} \cdot \left\{ \sum_{\lambda=1}^{\Lambda-1} N_\lambda \cdot [\phi_1 \cdot b_1 + \sum_{i=2}^{\lambda} \phi_i \cdot (b_i - b_{i-1})] + (N - \sum_{\lambda=1}^{\Lambda-1} N_\lambda) \cdot [\phi_1 \cdot b_1 + \sum_{i=2}^{\Lambda} \phi_i \cdot (b_i - b_{i-1})] - M \cdot [R_{PU} - K_{PU} \cdot (B - \sum_{\lambda=1}^{\Lambda-1} N_\lambda \cdot b_\lambda - (N - \sum_{\lambda=1}^{\Lambda-1} N_\lambda) \cdot b_\Lambda) / M]^2 \right\}. \quad (5.42)$$

υπό τους περιορισμούς

$$\phi_{PU} \cdot (B - \sum_{\lambda=1}^{\Lambda} N_\lambda \cdot b_\lambda) / M - R_{PU} \leq 0, \quad (5.43)$$

$$\pi_\lambda - b_\lambda \cdot \phi_\lambda \leq 0, \quad (5.44)$$

$$b_j \cdot \phi_\lambda - \pi_j \leq b_\lambda \cdot \phi_\lambda - \pi_\lambda, \quad (5.45)$$

$$b_\lambda \geq 0, \quad (5.46)$$

$$\pi_\lambda \geq 0, \quad (5.47)$$

$$\forall \lambda, j \in \{1, \dots, \Lambda\}.$$

Το πρόβλημα αυτό δεν μπορεί να λυθεί με αναλυτικό τρόπο. Για τον προσδιορισμό του συνόλου βέλτιστων συμβολαίων $\Omega^* = \{(b_\lambda^*, \pi_\lambda^*), \forall \lambda \in \Lambda\}$, ακολουθείται η ευριστική προσέγγιση που αναλύεται στη συνέχεια.

Αρχικά, εξετάζεται μόνο το πρόβλημα τιμολόγησης υπό μη πλήρη πληροφόρηση όπου ο ιδιοκτήτης φάσματος προσφέρει μόνο ένα τύπο συμβολαίων. Εφόσον, στην περίπτωση αυτή, είναι γνωστή μόνο η πιθανότητα των δευτερευόντων χρηστών να ανήκουν σε κάποια κλάση υπηρεσίας, προκειμένου να μεγιστοποιήσει την προσδοκώμενη ανταμοιβή που προσδιορίζεται από την (5.42), ο ιδιοκτήτης φάσματος πρέπει να επιλέξει την κλάση υπηρεσίας για την οποία θα προορίζεται το μοναδικό συμβόλαιο. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

Βήμα 1: Θεωρούνται Λ περιπτώσεις σχεδιασμού συμβολαίων, που αντιστοιχούν στην προσφορά ενός τύπου συμβολαίου που προορίζεται αποκλειστικά για χρήστες που ανήκουν στην κλάση υπηρεσίας $\phi_i, i = 1, 2, \dots, \Lambda$. Έτσι, σε καθεμία από τις Λ περιπτώσεις σχεδιασμού συμβολαίων, σχεδιάζεται ένα μοναδικό συμβόλαιο $\omega_i = (b_i, \pi_i)$ με $\pi_i = \phi_i \cdot b_i, i = 1, 2, \dots, \Lambda$. Αυτός ο τύπος συμβολαίου θα γίνει αποδεκτός από τους δευτερεύοντες χρήστες που ανήκουν στις κλάσεις υπηρεσίας ϕ_λ με $\lambda \geq i$ γιατί αυτές οι κλάσεις υπηρεσίας αποδίδουν θετική ανταμοιβή στους χρήστες τους και ικανοποιείται ο περιορισμός συμμετοχής, $U_\lambda^{ESA} = \phi_\lambda \cdot b_i - \pi_i \geq \phi_i \cdot b_i - \pi_i = 0$ ($\phi_\lambda \geq \phi_i$ για $\lambda \geq i$). Έτσι, προσδιορίζονται Λ υποπροβλήματα που είναι ευκολότερα να λυθούν σε σύγκριση με το γενικό πρόβλημα βελτιστοποίησης όπως διατυπώνεται μέσω της (5.42). Λύνοντας τα Λ αυτά υποπροβλήματα, προσδιορίζονται Λ αντίστοιχοι βέλτιστοι τύποι συμβολαίων, συγκεκριμένα τα συμβόλαια $\omega_i^* = (b_i^*, \pi_i^*), i = 1, \dots, \Lambda$, όπου $\pi_i^* = b_i^* \cdot \phi_i$. Οι αντίστοιχες βέλτιστες ανταμοιβές του ιδιοκτήτη φάσματος $U_{P,i}^*, i = 1, \dots, \Lambda$, υπολογίζονται αντικαθιστώντας τα (b_i^*, π_i^*) στην αντικειμενική συνάρτηση της (5.40).

Βήμα 2: Μεταξύ των Λ βέλτιστων συμβολαίων που προσδιορίστηκαν στο Βήμα 1, επιλέγεται εκείνο που αποφέρει τη μέγιστη προσδοκώμενη ανταμοιβή $U_{P,i}^*$, έστω το συμβόλαιο $\omega_{\lambda_T}^*$. Τότε, η κλάση υπηρεσίας ϕ_{λ_T} αποτελεί την κλάση κατωφλίου, με βάση την οποία όλες οι κλάσεις υπηρεσίας $\phi_\lambda, \lambda \geq \lambda_T$, θα συνάψουν το συγκεκριμένο συμβόλαιο, αφού θα λάβουν μη αρνητική ανταμοιβή.

Ο αλγόριθμος αποκλειστικού συμβολαίου (SCA-single-contract algorithm) περιγράφεται συμβολικά ως Αλγόριθμος 2.

Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο SCA, οι δευτερεύοντες χρήστες που ανήκουν σε κλάσεις υπηρεσίας υψηλότερες της κλάσης κατωφλίου λ_T λαμβάνουν θετική ανταμοιβή. Αυτό αντανακλάται ως απώλεια ανταμοιβής του ιδιοκτήτη φάσματος εξαιτίας της έλλειψης πλήρους πληροφόρησης ως προς σε ποια κλάση υπηρεσίας ανήκει κάθε δευτερεύων χρήστης. Για τη μείωση της απώλειας της ανταμοιβής, προτείνεται ο αλγόριθμος πολλαπλών συμβολαίων (MCA-Multi-Contract Algorithm), σύμφωνα με τον οποίο ο ιδιοκτήτης φάσματος προσφέρει περισσότερα από ένα συμβόλαια στους δευτερεύοντες χρήστες. Στην περίπτωση αυτή

Αλγόριθμος 2: Αλγόριθμος αποκλειστικού συμβολαίου (SCA-Single-Contract Algorithm) υπό μη πλήρη πληροφόρηση

(1) Έναρξη του αλγορίθμου:

SU που ανήκουν σε Λ κλάσεις υπηρεσίας με πιθανότητες $p_\lambda, \forall \lambda \in \{1, \dots, \Lambda\}$ ζητούν αποκλειστική φασματική πρόσβαση

(2) Λύση των Λ απλουστευμένων υποπροβλημάτων:

Προσδιορισμός του βέλτιστου συμβολαίου για καθένα από τα Λ υποπροβλήματα:

for $i = 1, \dots, \Lambda$ **do**

 Για κάθε κλάση υπηρεσίας λ για την οποία ισχύει $i \leq \lambda \leq \Lambda$ προσφέρεται το συμβόλαιο

$\omega_i = (b_i, \phi_i \cdot b_i)$.

for $b_i = [0, B]$ **do**

 | Προσδιορίζεται η προσδοκώμενη ανταμοιβή $U_{P,i}$ εφαρμόζοντας την (5.42)

end

 Προσδιορίζεται η βέλτιστη τιμή b_i^* και επομένως και το συμβόλαιο $\omega_i^* = (b_i^*, \pi_i^*)$ που μεγιστοποιεί την προσδοκώμενη ανταμοιβή του PSO $U_{P,i}^*$.

end

(3) Προσδιορισμός του βέλτιστου αποκλειστικού συμβολαίου που θα προσφερθεί στους SU:

Από τους τύπους των συμβολαίων που προσδιορίζονται στο Βήμα (2), επιλέγεται το βέλτιστο συμβόλαιο $\omega_{\lambda_T}^*$ ως αυτό που αποφέρει την υψηλότερη προσδοκώμενη ανταμοιβή U_{P,λ_T}^* .

πρέπει να αντιμετωπιστούν δύο σημαντικά ζητήματα: i) σε πόσες κλάσεις υπηρεσίας θα προσφερθούν συμβόλαια και ii) πώς θα κατανεμηθεί το διαθέσιμο εύρος ζώνης για ESA σε αυτές τις κλάσεις.

Έχοντας προσδιορίσει μέσω του SCA την κλάση κατωφλίου λ_T καθώς και το αντίστοιχο βέλτιστο αποκλειστικό συμβόλαιο $\omega_{\lambda_T}^* = (b_{\lambda_T}^*, \pi_{\lambda_T}^*)$, με στόχο τη μεγιστοποίηση της προσδοκώμενης ανταμοιβής του ιδιοκτήτη φάσματος προσδιορίζεται ένα νέο σύνολο συμβολαίων $\Omega^* = \{(b_\lambda^*, \pi_\lambda^*), \forall \lambda \in \{\lambda_T, \lambda_T + 1, \dots, \Lambda\}\}$. Για τον προσδιορισμό αυτού του συνόλου συμβολαίων, πρέπει να επιτευχθεί βέλτιστη κατανομή εύρους ζώνης στις κλάσεις υπηρεσίας που υποστηρίζονται. Κάθε υποστηριζόμενη κλάση υπηρεσίας θα λάβει συγκεκριμένο συμβόλαιο όπως αυτό καθορίζεται από τον Αλγόριθμο 3. Ο αλγόριθμος MCA ικανοποιεί τις αναγκαίες και ικανές συνθήκες (5.17)-(5.19).

5.6 Προσομοιώσεις και αποτελέσματα

Στο εδάφιο αυτό παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα του σχεδιασμού συμβολαίων που προτάθηκε στα προηγούμενα εδάφια τόσο υπό πλήρη όσο και υπό μη πλήρη πληροφόρηση ως προς το σε ποια κλάση υπηρεσίας ανήκουν οι δευτερεύοντες χρήστες. Αρχικά εξετάζεται η περίπτωση πλήρους πληροφόρησης εκ μέρους του ιδιοκτήτη φάσματος που διαχειρίζεται συνολικό εύρος ζώνης $B = 100MHz$ και έχει συνάψει SLA με M σε πλήθος πρωτεύοντες χρήστες με συμφωνημένα μεγέθη $SNR_{PU} = 15dB$, $p_{occ} = 0.8$ και $BER_{PU}^{tar} = 10^{-4}$. Επιπλέον, παρέχεται η δυνατότητα σε N δευτερεύοντες χρήστες που ανήκουν σε Λ κλάσεις υπηρεσίας $\Phi = \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_\Lambda\}$ να αποκτήσουν πρόσβαση σε τμήμα

Αλγόριθμος 3: Αλγόριθμος πολλαπλών συμβολαίων (MCA-Multi-Contract Algorithm) υπό μη πλήρη πληροφόρηση

(1) Έναρξη του αλγορίθμου:

Προσδιορισμός της κλάσης υπηρεσίας κατωφλίου λ_T και του βέλτιστου τύπου συμβολαίου $\omega_{\lambda_T}^* = (b_{\lambda_T}^*, \pi_{\lambda_T}^*)$ εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο SCA.

(2) Βελτιστοποίηση του σχεδιασμού συμβολαίου:

```

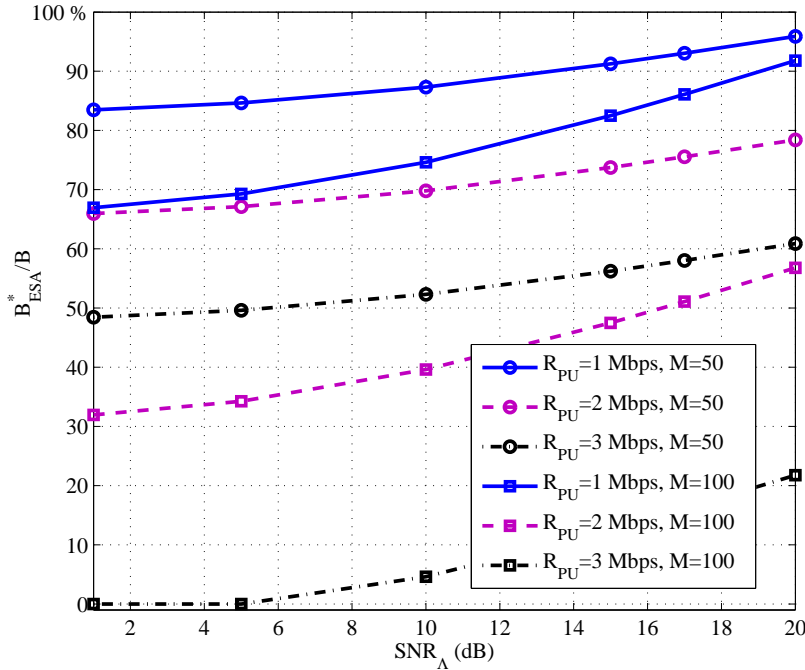
for  $i = \lambda_T + 1, \dots, \Lambda$  do
    Για κάθε κλάση  $\phi_\lambda$  για την οποία ισχύει  $i \leq \lambda \leq \Lambda$ , προσφέρεται το συμβόλαιο  $\omega_i = (b_i, \pi_i)$  με
     $\pi_i = \pi_{i-1}^* + \phi_i \cdot (b_i - b_{i-1}^*)$ .
    for  $b_i \in [0, B]$  do
        | Προσδιορισμός της προσδοκώμενης ανταμοιβής  $U_{P,i}$  με εφαρμογή της (5.42).
    end
    Προσδιορισμός του μεριδίου φάσματος  $b_i^*$  που μεγιστοποιεί την προσδοκώμενη ανταμοιβή
    του PSO  $U_{P,i}^*$ .
    if  $b_i^* < b_{i-1}^*$  then
        | Αντικατάσταση  $b_i^* = b_{i-1}^*$  ώστε να ικανοποιείται η Συνθήκη 5.2.
    end
    Ορισμός  $\omega_i^* = (b_i^*, \pi_i^*)$  ως το βελτιστοποιημένο συμβόλαιο της κλάσης  $i$ .
end

```

του διαθέσιμου εύρους ζώνης μέσω αντίστοιχων συμβολαίων.

Στο Σχήμα 5.2 απεικονίζεται το βέλτιστο ποσοστό εύρους ζώνης που αποδίδεται σε δευτερεύοντες χρήστες για αποκλειστική χρήση συναρτήσει του SNR της υψηλότερης κλάσης υπηρεσίας ϕ_Λ όπως προσδιορίζεται από την (5.2). Εξετάστηκαν διάφορες τιμές για το M (50, 100) και το R_{PU} (1, 2, 3Mbps), ενώ το BER_{SU}^{tar} ορίστηκε στην τιμή 10^{-4} . Από το Σχήμα 5.2 φαίνεται ότι το βέλτιστο εύρος ζώνης που αποδίδεται σε δευτερεύοντες χρήστες για αποκλειστική χρήση αυξάνεται με την αύξηση του υψηλότερου επιπέδου QoS, συγκεκριμένα του ϕ_Λ . Υψηλότερες κλάσεις υπηρεσίας δευτερευόντων χρηστών επιτρέπουν την απόδοση μεγαλύτερου τμήματος του διαθέσιμου φάσματος στους δευτερεύοντες χρήστες για αποκλειστική χρήση, δηλαδή μεγαλύτερο B_{ESA} . Αυτό συμβαίνει επειδή η επιλογή αυτή προσφέρει μεγαλύτερη φασματική απόδοση και συνεπώς αυξημένη ανταμοιβή του ιδιοκτήτη φάσματος που μπορεί να υπερκεράσει το κόστος που επιφέρει ο αποκλεισμός των πρωτευόντων χρηστών από το B_{ESA} . Επίσης, από το Σχήμα 5.2 επιβεβαιώνεται ότι μεγάλες τιμές είτε του M είτε του R_{PU} οδηγούν σε μείωση του B_{ESA} επειδή το αντίστοιχο κόστος που επιφέρει η παραβίαση των SLA των πρωτευόντων χρηστών είναι μεγάλο. Επιπλέον, παρατηρείται ότι στην περίπτωση όπου η υψηλότερη κλάση υπηρεσίας των δευτερευόντων χρηστών χαρακτηρίζεται από χαμηλές τιμές SNR ($SNR < 6dB$), το B_{ESA}^* μπορεί να λάβει μηδενική τιμή, όπως στην περίπτωση όπου $R_{PU} = 3Mbps$ και $M = 100$ στο Σχήμα 5.2. Στις περιπτώσεις αυτές, αυτό σημαίνει ότι ο ιδιοκτήτης φάσματος δεν έχει κανένα όφελος προσφέροντας ESA και, επομένως, δεν έχει κίνητρο να προσφέρει οποιοδήποτε συμβόλαιο στους δευτερεύοντες χρήστες.

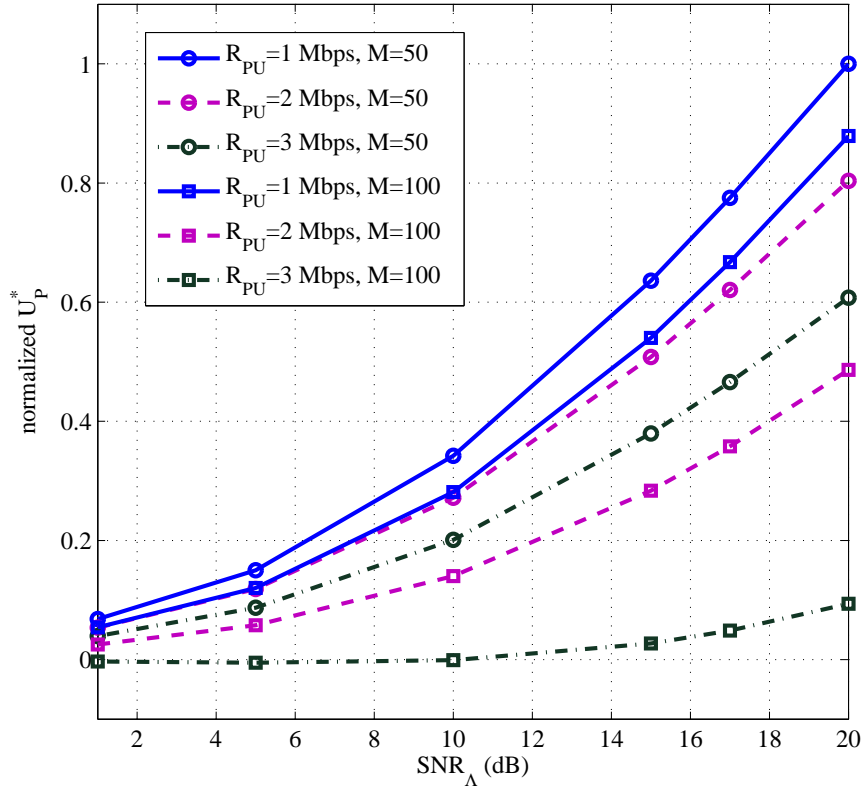
Στο Σχήμα 5.3 απεικονίζεται η βέλτιστη ανταμοιβή του ιδιοκτήτη φάσματος ως συνάρ-



Σχήμα 5.2: Βέλτιστο ποσοστό διαθέσιμου εύρους ζώνης B_{ESA}^* ως συνάρτηση του SNR_{Λ} της υψηλότερης κλάσης υπηρεσίας των SU για διάφορες τιμές R_{PU} και M .

τηση του SNR της υψηλότερης κλάσης των δευτερευόντων χρηστών όταν ο ιδιοκτήτης φάσματος διαθέτει στους δευτερεύοντες χρήστες το εύρος ζώνης B_{ESA}^* που προκύπτει από την (5.39). Παρατηρείται ότι η βέλτιστη ανταμοιβή του ιδιοκτήτη φάσματος αυξάνεται με την αύξηση του μέγιστου επιπέδου QoS που ζητείται από τους δευτερεύοντες χρήστες. Αυτό συμβαίνει επειδή προσφέρεται συμβόλαιο μόνο στους δευτερεύοντες χρήστες που ανήκουν στην υψηλότερη κλάση και, επομένως, μπορεί να ζητηθεί υψηλότερη τιμή για το προσφερόμενο εύρος ζώνης. Επίσης, από το Σχήμα 5.2 προκύπτει ότι το βέλτιστο εύρος ζώνης B_{ESA}^* είναι και αυτό μεγαλύτερο. Αντιθέτως, το όφελος του ιδιοκτήτη φάσματος μειώνεται με την αύξηση είτε του M είτε του R_{PU} επειδή μια αύξηση σε κάποιο από τα μεγέθη αυτά αυξάνει το κόστος της παραβίασης των συμφωνηθέντων SLA με τους πρωτεύοντες χρήστες. Όπως παρατηρήθηκε και από το Σχήμα 5.2, το κέρδος του ιδιοκτήτη φάσματος είναι αρνητικό για πολύ χαμηλές τιμές SNR_{Λ} . Στην περίπτωση αυτή, δεν προσφέρεται κανένα συμβόλαιο στους δευτερεύοντες.

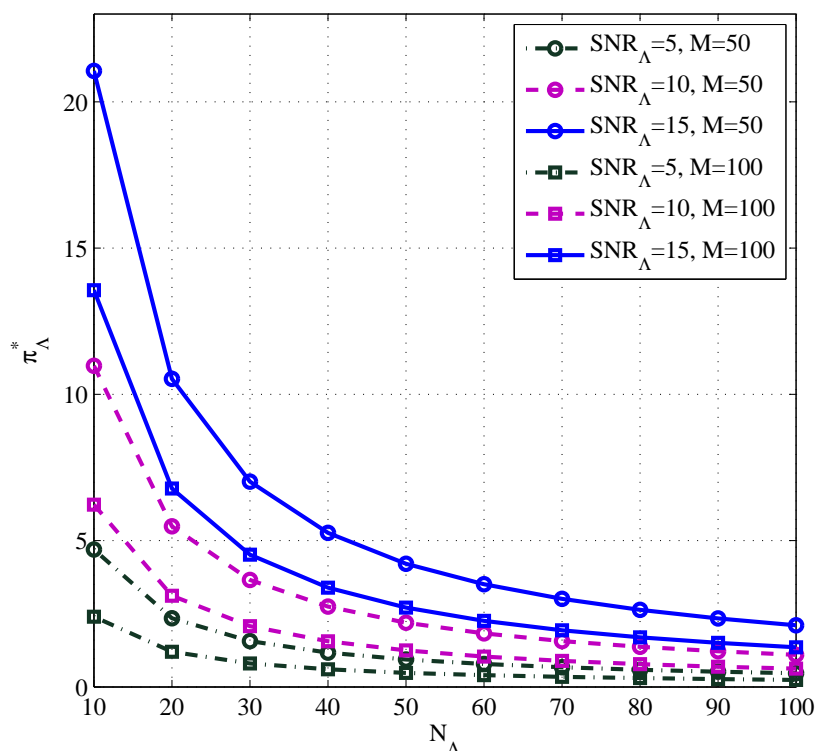
Στο Σχήμα 5.4 απεικονίζεται η βέλτιστη τιμή συμβολαίου π_{Λ}^* όταν είναι διαθέσιμη πλήρης πληροφορία ως προς τον αριθμό των δευτερευόντων χρηστών που ανήκουν στην κλάση ϕ_{Λ} , δηλαδή είναι γνωστή η τιμή N_{Λ} . Παρατηρείται ότι η βέλτιστη τιμή μειώνεται με την τιμή N_{Λ} καθώς το διαθέσιμο εύρος ζώνης B_{ESA}^* πρέπει να καταναμηθεί σε περισσότερα τμήματα. Επίσης, η βέλτιστη τιμή αυξάνεται με το SNR_{Λ} , και ως εκ τούτου με το ϕ_{Λ} , αφού τόσο το εύρος ζώνης B_{ESA}^* όσο και η ανταμοιβή των δευτερευόντων χρηστών αυξάνεται όταν αυξάνεται το ϕ_{Λ} . Αντιθέτως, η τιμή π_{Λ}^* μειώνεται με το πλήθος των πρωτεύοντων χρη-



Σχήμα 5.3: Κανονικοποιημένη μέγιστη ανταμοιβή του PSO U_P ως συνάρτηση του SNR της υψηλότερης κλάσης υπηρεσίας των SU για διάφορες τιμές R_{PU} και M .

στών επειδή, τότε, περιορίζεται το εύρος ζώνης που μπορεί να διατεθεί για αποκλειστική χρήση δευτερευόντων χρηστών.

Στη συνέχεια, εξετάζεται η περίπτωση της μη πλήρους πληροφόρησης του ιδιοκτήτη φάσματος. Οι δευτερεύοντες χρήστες θεωρείται ότι ανήκουν σε πέντε κλάσεις υπηρεσίας $\Phi = \{\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4, \phi_5\} = \{1.57, 2, 79, 3.44, 4.07, 4.37\}$ που απαιτούν αντίστοιχα SNR λήψης $\mathbf{SNR} = \{10, 15, 17, 19, 20dB\}$. Ο ιδιοκτήτης φάσματος γνωρίζει μόνο τις πιθανότητες με τις οποίες οι δευτερεύοντες χρήστες ανήκουν στις διαθέσιμες κλάσεις υπηρεσίας, συγκεκριμένα το σύνολο $\mathbf{P} = \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5\}$. Οι ανταμοιβές του ιδιοκτήτη φάσματος από την εφαρμογή των αλγορίθμων SCA και MCA αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.1 για τρεις περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση (Περίπτωση I), οι δευτερεύοντες χρήστες ανήκουν με την ίδια πιθανότητα στις δύο χαμηλότερες κλάσεις υπηρεσίας, ενώ στη δεύτερη περίπτωση (Περίπτωση II), στις δύο υψηλότερες. Στην τρίτη περίπτωση (Περίπτωση III), οι δευτερεύοντες χρήστες ανήκουν με την ίδια πιθανότητα σε όλες τις διαθέσιμες κλάσεις υπηρεσίας. Εξετάζονται οι περιπτώσεις λειτουργίας με $B = 100MHz$, $M = 30, 50$, $R_{PU} = 1Mbps, 3Mbps$. Για λόγους σύγκρισης, μαζί με τα αποτελέσματα των τριών περιπτώσεων, παρουσιάζονται τα αντίστοιχα βέλτιστα αποτελέσματα, δηλαδή τα αποτελέσματα που λαμβάνονται όταν είναι διαθέσιμη πλήρης πληροφόρηση ως προς το σε ποια κλάση υπηρεσίας



Σχήμα 5.4: Βέλτιστη τιμή π_{Λ}^* ως συνάρτηση του αριθμού των SU N_{Λ} που ανήκουν στην υψηλότερη κλάση υπηρεσίας SU για διάφορες τιμές SNR_{Λ} και M .

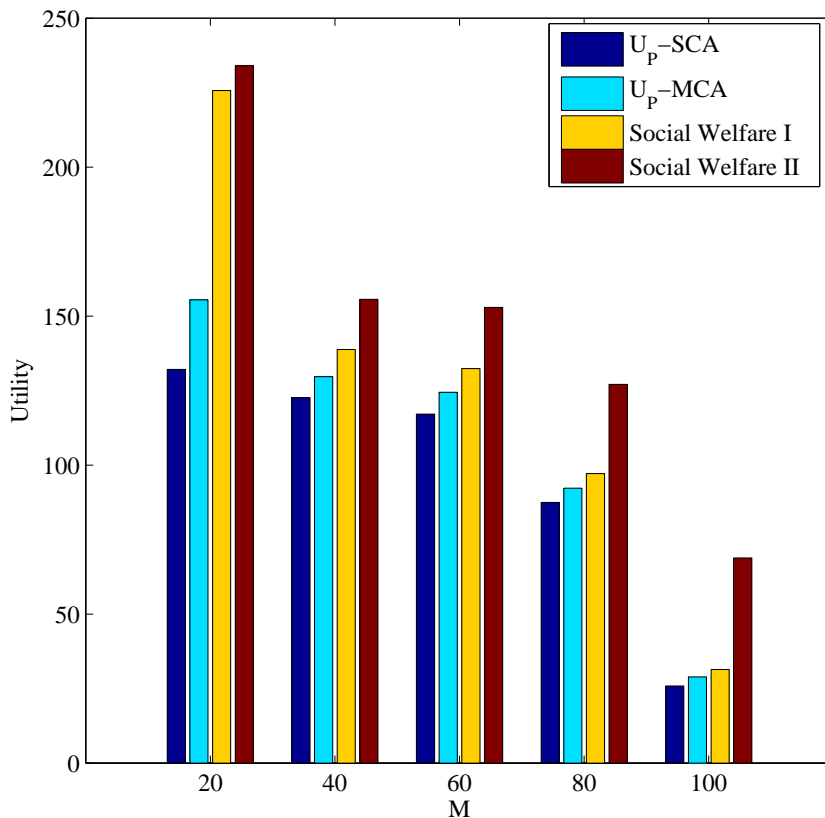
ανήκει κάθε δευτερεύων χρήστης.

Πίνακας 5.1: Ανταμοιβή PSO στην περίπτωση μη πλήρους πληροφόρησης.

U_P	$P=[0.5,0.5,0,0,0]$		$P=[0,0,0,0.5,0.5]$		$P=[0.2,0.2,0.2,0.2,0.2]$	
	M=30					
	$R_{PU} = 1Mbps$	$R_{PU} = 3Mbps$	$R_{PU} = 1Mbps$	$R_{PU} = 3Mbps$	$R_{PU} = 1Mbps$	$R_{PU} = 3Mbps$
SCA	141.4233821	109.4285003	376.9324002	289.5141986	153.8166827	130.3734704
MCA	141.4233821	109.4285003	392.1642633	301.6996891	174.3244702	159.3241809
Βέλτιστο	256.9311668	198.3021991	409.0427342	317.1562839	409.0427342	317.1562839
U_P	$P=[0.5,0.5,0,0,0]$		$P=[0,0,0,0.5,0.5]$		$P=[0.2,0.2,0.2,0.2,0.2]$	
	M=50					
	$R_{PU} = 1Mbps$	$R_{PU} = 3Mbps$	$R_{PU} = 1Mbps$	$R_{PU} = 3Mbps$	$R_{PU} = 1Mbps$	$R_{PU} = 3Mbps$
SCA	132.2998568	78.01635358	357.046619	218.5900982	182.77946	126.1146747
MCA	132.2998568	78.01635358	375.892183	227.7292162	217.5203125	142.9035775
Βέλτιστο	242.1622829	144.4473368	390.1404726	236.9963888	390.1404726	236.9963888

Όπως αναμένεται και έχει ήδη επισημανθεί, η ανταμοιβή του ιδιοκτήτη φάσματος μειώνεται όταν αυξάνεται είτε το M είτε το R_{PU} . Προσφέροντας πολλαπλά συμβόλαια, ο αλγόριθμος MCA προσφέρει τη δυνατότητα στον ιδιοκτήτη φάσματος να λάβει μεγαλύτερη ανταμοιβή σε σύγκριση με τον αλγόριθμο SCA οπότε προσφέρεται μόνο ένα συμβόλαιο. Ωστόσο, στην Περίπτωση Ι, το κέρδος του ιδιοκτήτη φάσματος είναι ίδιο για τους δύο αλγόριθμους SCA και MCA αφού, και στην περίπτωση αυτή, το βέλτιστο συμβόλαιο και για τις δύο κλάσεις υπηρεσίας είναι το ίδιο και ο MCA δεν μπορεί να προσδώσει κάποιο πρό-

σθετο όφελος. Στην Περίπτωση II, τόσο ο SCA όσο και ο MCA συγκλίνουν στις βέλτιστες τιμές ανταμοιβής του ιδιοκτήτη φάσματος. Αυτό αναμένεται σε καταστάσεις λειτουργίας όπου η πιθανότητα οι δευτερεύοντες χρήστες να ανήκουν στην υψηλότερη κλάση υπηρεσίας είναι υψηλή. Στην Περίπτωση III, που αναφέρεται στην ομοιόμορφη κατανομή των δευτερευόντων χρηστών σε όλες τις κλάσεις υπηρεσίας, η προσδοκώμενη ανταμοιβή του ιδιοκτήτη φάσματος απέχει από τη βέλτιστη, αφού είναι ιδιαίτερα ριψοκίνδυνο για τον ιδιοκτήτη φάσματος να σχεδιάσει συμβόλαια μόνο για την υψηλότερη κλάση υπηρεσίας, όπως επιβάλλει ο βέλτιστος σχεδιασμός συμβολαίων στην περίπτωση της πλήρους πληροφόρησης.



Σχήμα 5.5: Τιμές ανταμοιβής του PSO μέσω των αλγορίθμων SCA/MCA και το κοινωνικό όφελος I και II ως συνάρτηση του πλήθους των PU M .

Τέλος, στο Σχήμα 5.5, απεικονίζεται η σωρευτική προσδοκώμενη ανταμοιβή όλων των εμπλεκόμενων οντοτήτων για διαφορετικές τιμές M . Θεωρείται η Περίπτωση III ($\mathbf{P} = (0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2)$), όπου οι κλάσεις υπηρεσίας χαρακτηρίζονται αντίστοιχα από $\mathbf{SNR} = \{10, 15, 17, 19, 20dB\}$, $R_{PU} = 3Mbps$, $N = 100$ και $p_{occ} = 0.8$. Η ανταμοιβή του ιδιοκτήτη φάσματος, U_P , είναι η προσδοκώμενη ανταμοιβή με την εφαρμογή των αλγορίθμων SCA και MCA. Η ανταμοιβή των δευτερευόντων χρηστών εφαρμόζοντας ESA και OSA προσδιορίζονται από τις (5.10) και (5.11), αντίστοιχα. Ως κοινωνικό όφελος I (Social Welfare I- SW-I) ορίζεται η ανταμοιβή όλων των εμπλεκόμενων οντοτήτων μέσω της αποκλειστικής

πρόσβασης ESA και αποτελείται από την ανταμοιβή του ιδιοκτήτη φάσματος που λαμβάνεται μέσω του σχεδιασμού συμβολαίων τύπου MCA και από την ανταμοιβή των δευτερευόντων χρηστών που λαμβάνεται μέσω ESA. Το κοινωνικό όφελος II (Social Welfare II-SW-II) προκύπτει με πρόσθεση στο SW-I της ανταμοιβής των δευτερευόντων χρηστών που λαμβάνεται μέσω της ευκαιριακής πρόσβασης OSA.

Από το Σχήμα 5.5 προκύπτει ότι η σωρευτική ανταμοιβή όλων των εμπλεκόμενων οντοτήτων μειώνεται με το M . Καθώς η ανταμοιβή του ιδιοκτήτη φάσματος είναι ισχυρά συσχετισμένη με την ανταμοιβή που λαμβάνουν οι δευτερεύοντες χρήστες, η προαναφερθείσα μείωση είναι αναμενόμενη επειδή, όταν αυξάνεται το πλήθος των πρωτευόντων χρηστών, μικρότερο εύρος ζώνης μπορεί να διατεθεί μέσω συμβολαίων στους δευτερεύοντες χρήστες για αποκλειστική χρήση. Από το Σχήμα 5.5 παρατηρείται ότι η διαφορά μεταξύ των ανταμοιβών όπως προσδιορίζονται μέσω MCA και SCA μειώνεται με το M αφού η αύξηση του πλήθους των πρωτευόντων χρηστών μειώνει την ευελιξία σχεδιασμού βέλτιστων συμβολαίων. Επομένως, ο αλγόριθμος MCA δεν μπορεί να προσφέρει συμβόλαια που μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την ανταμοιβή του ιδιοκτήτη φάσματος. Επίσης, η διαφορά μεταξύ του κοινωνικού οφέλους I και της ανταμοιβής του ιδιοκτήτη φάσματος που λαμβάνεται μέσω MCA, αντιπροσωπεύει την ανταμοιβή U_{SU}^{ESA} που μειώνεται και αυτή με το M . Οι λόγοι είναι δύο: (i) το εύρος ζώνης που μπορεί να διατεθεί μέσω συμβολαίων μειώνεται με το M και, (ii) η μείωση της ευελιξίας στο σχεδιασμό συμβολαίων οδηγεί τον ιδιοκτήτη φάσματος να σχεδιάσει συμβόλαια που απευθύνονται στις υψηλότερες κλάσεις υπηρεσίας με στόχο τη μεγιστοποίηση της δικής του ανταμοιβής με ταυτόχρονη μείωση της ανταμοιβής των δευτερευόντων χρηστών.

Τέλος, η διαφορά μεταξύ SW-II και SW-I αυξάνεται με το M λόγω της αυξανόμενης ανταμοιβής U_{SU}^{OSA} αφού, όταν μειώνεται το B_{ESA} εξαιτίας του αυξανόμενου πλήθους πρωτευόντων χρηστών, περισσότερο εύρος ζώνης καθίσταται διαθέσιμο για ευκαιριακή πρόσβαση.

5.7 Συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο αυτό προτάθηκε βέλτιστος σχεδιασμός συμβολαίων για αποκλειστική πρόσβαση δευτερευόντων χρηστών σε τμήμα του φάσματος που κατέχει ιδιοκτήτης φάσματος που εξυπηρετεί συγκεκριμένο αριθμό πρωτευόντων χρηστών υπό προκαθορισμένα SLA σε συγκεκριμένο εύρος ζώνης. Εξετάζονται οι περιπτώσεις πλήρους και μη πλήρους πληροφόρησης του ιδιοκτήτη φάσματος σχετικά με τις κλάσεις υπηρεσίας στις οποίες ανήκουν οι δευτερεύοντες χρήστες. Στην περίπτωση πλήρους πληροφόρησης, προκύπτουν αναλυτικές σχέσεις για το βέλτιστο σχεδιασμό συμβολαίων, ενώ, στην περίπτωση μη πλήρους πληροφόρησης, προτείνονται δύο ευριστικοί αλγόριθμοι, συγκεκριμένα οι αλγόριθμοι SCA και MCA. Παρουσιάζονται αποτελέσματα προσομοιώσεων ως προς διαφορετικές παραμέτρους του συστήματος. Οι δύο αλγόριθμοι SCA και MCA οδηγούν σε ανταμοιβές του

ιδιοκτήτη φάσματος που είναι συγκρίσιμες με τις βέλτιστες τιμές που προκύπτουν στην περίπτωση πλήρους πληροφόρησης. Εξετάζονται, επίσης, μέτρα κοινωνικού οφέλους που ορίζονται ως σωρευτικές ανταμοιβές των εμπλεκόμενων οντοτήτων.

Κεφάλαιο 6

Αγορά φάσματος (spectrum trading) για γνωστικά δίκτυα επικοινωνιών με υβριδική πρόσβαση στο φάσμα με χρήση θεωρίας παιγνίων

6.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο 6 μελετάται η συνδυαστική συμπεριφορά ανεξάρτητων δευτερευόντων χρηστών και διαχειριστών φάσματος που μπορούν να μισθώνουν φάσμα τόσο σε πρωτεύοντες χρήστες όσο και σε δευτερεύοντες χρήστες. Η πρόσβαση των δευτερευόντων χρηστών στο φάσμα είναι δυνατή εφαρμόζοντας είτε αποκλειστική πρόσβαση στο φάσμα (Exclusive Spectrum Access-ESA) είτε ευκαιριακή πρόσβαση στο φάσμα (Opportunistic Spectrum Access-OSA).

Παρουσιάζονται τρία είδη διαχειριστών φάσματος με κριτήριο τις δυνατότητες πρόσβασης στο φάσμα που παρέχουν σε δευτερεύοντες χρήστες: (i) ο διαχειριστής αποκλειστικής πρόσβασης στο φάσμα (Exclusive Operator-EXOP) που παρέχει αποκλειστική πρόσβαση στο φάσμα (ii) ο διαχειριστής ευκαιριακής πρόσβασης στο φάσμα (Opportunistic Operator-OPOP) που παρέχει ευκαιριακή πρόσβαση, εφόσον οι δευτερεύοντες χρήστες δεν επηρεάζουν τη λειτουργία των πρωτευόντων χρηστών και (iii) ο διαχειριστής υβριδικής πρόσβασης στο φάσμα (Hybrid Operator -HOP) που παρέχει και τις δύο δυνατότητες πρόσβασης. Εξετάζονται δύο μοντέλα με βάση το ποιοι διαχειριστές αναλαμβάνουν να παρέχουν πρόσβαση σε δευτερεύοντες χρήστες. Στο Μοντέλο I εξετάζεται η συνύπαρξη ενός διαχειριστή αποκλειστικής και ενός διαχειριστή ευκαιριακής πρόσβασης στο φάσμα για την εξυπηρέτηση πρωτευόντων και δευτερευόντων χρηστών. Στο Μοντέλο II ένας μοναδικός διαχειριστής υβριδικής πρόσβασης εξυπηρετεί ένα σύνολο από πρωτεύοντες και δευτερεύοντες χρήστες.

Στο γενικό αυτό πλαίσιο, και για τα δύο μοντέλα προτείνεται ένα παίγνιο δύο επιπέδων. Στο πρώτο επίπεδο, οι δευτερεύοντες χρήστες επιλέγουν το μοντέλο πρόσβασης που θα ακολουθήσουν (αποκλειστική ή ευκαιριακή πρόσβαση). Σε αντιδιαστολή με άλλες εργα-

σίες, η ανταμοιβή ενός δευτερεύοντος χρήστη, που ανταγωνίζεται άλλους χρήστες για πρόσβαση στο φάσμα είτε αποκλειστική είτε ευκαιριακή, προσδιορίζεται λαμβάνοντας υπόψη ότι η αντίστοιχη φασματική περιοχή μοιράζεται σε πολλά τμήματα. Ως εκ τούτου, η ανταμοιβή ενός χρήστη εξαρτάται από το τμήμα του φάσματος που παρέχεται στους δευτερεύοντες χρήστες προς εκμετάλλευση και από τις αντίστοιχες τιμές μίσθωσής του. Επίσης, εκτός του ανταγωνισμού μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών για τις διαθέσιμες φασματικές ζώνες (Frequency Bands-FBs) που λαμβάνεται υπόψη στο [72], η παρούσα προσέγγιση λαμβάνει υπόψη και τη δραστηριότητα των πρωτευόντων χρηστών. Αποδεικνύεται ότι το παίγνιο πρόσβασης στο φάσμα, που καθορίζει τη συμπεριφορά των δευτερευόντων χρηστών, έχει μοναδικό σημείο ισορροπίας Nash.

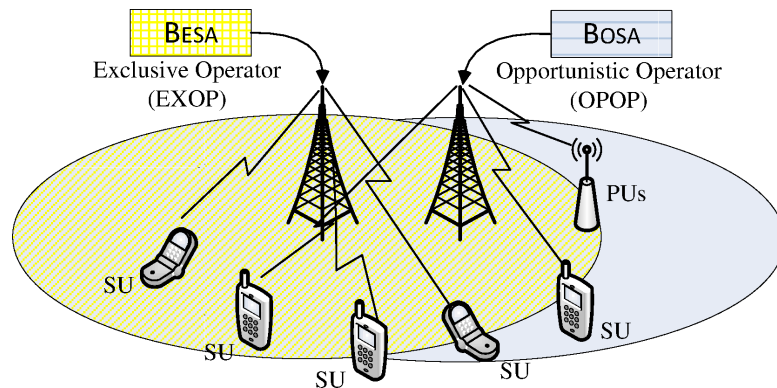
Στο δεύτερο επίπεδο, και ακολουθώντας το Μοντέλο I, οι διαχειριστές του φάσματος καθορίζουν τις τιμές τους αποσκοπώντας στη μεγιστοποίηση του κέρδους και υποθέτοντας ότι η συμπεριφορά των δευτερευόντων χρηστών καθορίζεται από την ισορροπία που επιτυγχάνεται στο πρώτο επίπεδο. Οι βέλτιστες τιμές των διαχειριστών του φάσματος προκύπτουν εφαρμόζοντας μια ταχείας σύγκλισης επαναληπτική διαδικασία. Ακολουθώντας το Μοντέλο II, εκτός από τη βέλτιστη τιμή πρέπει να προσδιοριστεί και η κατανομή του διαθέσιμου εύρους ζώνης σε αποκλειστική και ευκαιριακή πρόσβαση. Για την επίλυση του προβλήματος προσδιορισμού βέλτιστης κατανομής εύρους ζώνης και τιμολόγησης που έχει διαμορφωθεί, προτείνεται ένας επίσης επαναληπτικός αλγόριθμος που κάνει χρήση της τεχνικής των ποινών. Τέλος, παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή του παιγνίου και στα δύο μοντέλα.

6.2 Αγορά φάσματος με ένα διαχειριστή αποκλειστικής και έναν ευκαιριακής πρόσβασης σε φάσμα

6.2.1 Μοντέλο συστήματος

Το υπό εξέταση μοντέλο συστήματος απεικονίζεται στο Σχ. 6.1 και περιλαμβάνει δύο διαχειριστές φάσματος. Ο διαχειριστής φάσματος για ευκαιριακή πρόσβαση στο φάσμα διαχειρίζεται ένα σύνολο από ζώνες συχνοτήτων συνολικού φάσματος B_{OSA} που, αρχικά, έχει αποδοθεί σε πρωτεύοντες χρήστες. Ο ευκαιριακός διαχειριστής φάσματος επιτρέπει και σε δευτερεύοντες χρήστες να αποκτήσουν ευκαιριακή πρόσβαση στο B_{OSA} , υπό την προϋπόθεση ότι δεν επηρεάζεται η λειτουργία των πρωτευόντων χρηστών. Ο δεύτερος διαχειριστής φάσματος είναι διαχειριστής αποκλειστικής πρόσβασης σε φάσμα και μισθώνει τις ζώνες συχνοτήτων του που καταλαμβάνουν συνολικό εύρος ζώνης ίσο με B_{ESA} σε δευτερεύοντες χρήστες για αποκλειστική χρήση. Οι δύο διαχειριστές φάσματος καθορίζουν τιμές ανά μονάδα εύρους ζώνης, P_{OSA} και P_{ESA} αντίστοιχα, που οι δευτερεύοντες

χρήστες καλούνται να πληρώσουν για να αποκτήσουν πρόσβαση στις αντίστοιχες ζώνες συχνοτήτων.



Σχήμα 6.1: Δίκτυο εξυπηρέτησης δευτερευόντων χρηστών (SU) που περιλαμβάνει ένα διαχειριστή αποκλειστικής (EXOP) και ένα διαχειριστή ευκαιριακής πρόσβασης (OPOP) σε φάσμα όπου εξυπηρετούνται πρωτεύοντες χρήστες (PU) (Μοντέλο I).

Όλες οι παράμετροι του δικτύου περιλαμβάνονται στον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1: Παράμετροι δικτύου για μοντέλο αγοράς φάσματος που περιλαμβάνει ένα διαχειριστή αποκλειστικής και ένα διαχειριστή ευκαιριακής πρόσβασης σε φάσμα

Παράμετροι δικτύου	
r	Παράμετρος ανταμοιβής των SU ανά μονάδα εύρους ζώνης
p_{occ}	Πιθανότητα κατάληψης των PU στο OSA
N	Πλήθος SU
N_{ESA}	Πλήθος SU που επιλέγουν ESA (Μοντέλο I)
N_{OSA}	Πλήθος SU που επιλέγουν OSA (Μοντέλο I)
B_{ESA}	Εύρος ζώνης διαθέσιμο για ESA (Μοντέλο I)
B_{OSA}	Εύρος ζώνης διαθέσιμο για OSA (Μοντέλο I)
P_{ESA}	Τιμή ανά μονάδα εύρους ζώνης ESA (Μοντέλο I)
P_{OSA}	Τιμή ανά μονάδα εύρους ζώνης OSA (Μοντέλο I)
C_{ESA}	Κόστος SU για ESA (Μοντέλο I)
C_{OSA}	Κόστος SU για OSA (Μοντέλο I)
K_{EXOP}	Κόστος EXOP ανά μονάδα εύρους ζώνης
K_{OPOP}	Κόστος OPOP ανά SU που επιλέγει OSA
R_{EXOP}	Κέρδος EXOP
R_{OPOP}	Κέρδος OPOP

Οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να αποκτήσουν πρόσβαση στις ζώνες συχνοτήτων εφαρμόζοντας είτε ESA είτε OSA. Υποτίθεται ότι N δευτερεύοντες χρήστες λειτουργούν ταυτόχρονα στην ίδια γεωγραφική περιοχή και χωρίζονται σε δύο ομάδες, αντίστοιχα με την επιλογή πρόσβασης. Υποτίθεται, επίσης, ότι N_{OSA} και $N_{ESA} = N - N_{OSA}$ είναι ο αριθμός των δευτερευόντων χρηστών που επιλέγουν OSA και ESA, αντίστοιχα. Όλοι οι χρήστες

που επιλέγουν τον ίδιο τρόπο πρόσβασης λαμβάνουν ίσο μερίδιο εύρους ζώνης από τον αντίστοιχο διαχειριστή φάσματος. Δηλαδή, ένας δευτερεύων χρήστης έχει στη διάθεσή του εύρος ζώνης ίσο με B_{ESA}/N_{ESA} , αν επιλέξει ESA, και $B_{OSA} \cdot (1 - p_{occ})/N_{OSA}$, αν επιλέξει OSA, όπου p_{occ} είναι η πιθανότητα το B_{OSA} να είναι κατειλημμένο από PU.

Θεωρώντας λειτουργία σταθερού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων (constant-bit-rate-CBR), η συνάρτηση ανταμοιβής των δευτερευόντων χρηστών, $u(b)$, θεωρείται γραμμική συνάρτηση του εύρους ζώνης b , δηλαδή

$$u(b) = r \cdot b \quad (6.1)$$

όπου r είναι μια σταθερή παράμετρος.

Η συνάρτηση καθαρού κέρδους προκύπτει αφαιρώντας από την ανταμοιβή της (6.1) το κόστος πρόσβασης των δευτερευόντων χρηστών στο αντίστοιχο φάσμα. Οι συναρτήσεις προσδοκώμενου καθαρού κέρδους ανά χρήστη που αντιστοιχούν στις δύο επιλογές πρόσβασης είναι αντίστοιχα

$$U_{ESA} = r \cdot B_{ESA}/N_{ESA} - C_{ESA}, \quad (6.2)$$

$$U_{OSA} = r \cdot B_{OSA} \cdot (1 - p_{occ})/N_{OSA} - C_{OSA}. \quad (6.3)$$

Ορίζοντας ως P_{ESA} και P_{OSA} το κόστος ανά μονάδα εύρους ζώνης για πρόσβαση ESA και OSA αντίστοιχα, τα κόστη C_{ESA} και C_{OSA} είναι ίσα προς

$$C_{ESA} = P_{ESA} \cdot B_{ESA}, \quad (6.4)$$

$$C_{OSA} = P_{OSA} \cdot B_{OSA}. \quad (6.5)$$

Εύκολα διαπιστώνεται ότι το κόστος των δευτερευόντων χρηστών, είτε C_{ESA} είτε C_{OSA} , δεν εξαρτάται από τον αριθμό των δευτερευόντων χρηστών που επιλέγουν ESA ή OSA. Ο αριθμός αυτός των δευτερευόντων χρηστών επηρεάζει μόνο το καθαρό κέρδος ανά χρήστη μειώνοντας το πραγματικό φασματικό μερίδιο που αντιστοιχεί σε κάθε δευτερεύοντα χρήστη.

Από την πλευρά των διαχειριστών φάσματος, το προσδοκώμενο όφελος από τη λειτουργία των δευτερευόντων χρηστών εξαρτάται από το είδος των πρόσβασης που τους παρέχουν. Οι συναρτήσεις κέρδους προκύπτουν μετά την αφαίρεση του κόστους των διαχειριστών στην παροχή πρόσβασης στους δευτερεύοντες χρήστες από τις αντίστοιχες τιμές χρέωσης.

Το κόστος του διαχειριστή αποκλειστικής πρόσβασης είναι ανάλογο του φάσματος αποκλειστικής διάθεσης B_{ESA} και αντανάκλα την απώλεια εσόδων λόγω μη διάθεσης του συγκεκριμένου φάσματος σε πρωτεύοντες χρήστες. Ως προς το διαχειριστή ευκαιριακής

πρόσβασης, το κόστος του είναι ανάλογο του πλήθους των δευτερευόντων χρηστών που εξυπηρετεί κάθε φορά και ισοδυναμεί με το κόστος της αναγκαίας σηματοδοσίας για την αποφυγή παρεμβολής τους στους πρωτεύοντες χρήστες. Ως εκ τούτου, οι αντίστοιχες συναρτήσεις κέρδους διαμορφώνονται ως εξής

$$R_{EXOP} = C_{ESA} \cdot N_{ESA} - K_{EXOP} \cdot B_{ESA}, \quad (6.6)$$

$$R_{OPOP} = C_{OSA} \cdot N_{OSA} - K_{OPOP} \cdot N_{OSA}. \quad (6.7)$$

όπου K_{EXOP} είναι το κόστος ανά μονάδα εύρους ζώνης που μισθώνεται από το διαχειριστή αποκλειστικής πρόσβασης για αποκλειστική χρήση και K_{OPOP} είναι το κόστος του διαχειριστή ευκαιριακής πρόσβασης ανά δευτερεύοντα χρήστη που αποκτά ευκαιριακή πρόσβαση στο B_{OSA} .

Οι συναρτήσεις ανταμοιβής των δευτερευόντων χρηστών εξαρτώνται από τα μεγέθη B_{ESA} , B_{OSA} , P_{ESA} και P_{OSA} που καθορίζονται από τους διαχειριστές φάσματος. Επίσης, και τα κέρδη των διαχειριστών φάσματος εξαρτώνται από την επιλογή των δευτερευόντων χρηστών. Η αλληλένδετη σχέση μεταξύ των συναρτήσεων ανταμοιβής των δευτερευόντων χρηστών και των κερδών των διαχειριστών φάσματος εξετάζεται μέσω ενός παιγνίου πρόσβασης στο φάσμα και τιμολόγησης δύο επιπέδων.

6.2.2 Παιγνιο αγοράς φάσματος

Στο εδάφιο 6.2.2, εξετάζεται η δυναμική του παιγνίου αγοράς φάσματος δύο επιπέδων και προσδιορίζονται τα σημεία ισορροπίας κάθε παιγνίου. Στο πρώτο επίπεδο, οι δευτερεύοντες χρήστες αποφασίζουν αν θα επιλέξουν ESA ή OSA ενώ, στο δεύτερο επίπεδο, με βάση της ισορροπία των δευτερευόντων χρηστών στο πρώτο επίπεδο, οι διαχειριστές φάσματος αποφασίζουν την τιμολογική τους στρατηγική.

6.2.2.1 Το παίγνιο επιλογής πρόσβασης των SU

Το μοντέλο συστήματος που περιγράφεται στην Ενότητα 6.2.1 εισάγει ένα παίγνιο N -παικτών, συγκεκριμένα ένα παίγνιο N -SU, που παίζεται από τους δευτερεύοντες χρήστες που επιλέγουν ανάμεσα από δύο επιλογές πρόσβασης. Αυτό το N -SU παίγνιο αποτελεί ένα συμμετρικό παίγνιο με N όμοιους παίκτες που έχουν το ίδιο σύνολο στρατηγικών, $\mathbf{S} = \{\text{επιλογή } ESA, \text{επιλογή } OSA\}$. Κάθε παίκτης, δηλαδή, καλείται να επιλέξει μεταξύ της πρόσβασης ESA και της πρόσβασης OSA. Οι ανταμοιβές που λαμβάνουν οι δευτερεύοντες χρήστες ακολουθώντας μία εκ των δύο στρατηγικών αυτών προσδιορίζονται μέσω των συναρτήσεων (6.2) και (6.3). Το παίγνιο αυτό μπορεί να έχει τρία σημεία ισορροπίας Nash: δύο σημεία ισορροπίας αμιγούς στρατηγικής και ένα μικτής. Τα σημεία ισορροπίας αμιγούς στρατηγικής μπορούν να επιτευχθούν μόνο όταν η λειτουργία των παικτών συντονί-

ζεται από κάποια κεντρική οντότητα, οπότε δεν αφορούν την προτεινόμενη εφαρμογή. Θεωρώντας, λοιπόν, αυτόνομη λειτουργία των δευτερευόντων χρηστών και μη συντονιζόμενη από κάποια κεντρική οντότητα, πρέπει να διερευνηθεί η ύπαρξη ενός σημείου ισορροπίας μικτής στρατηγικής. Το προφίλ στρατηγικής των χρηστών συμβολίζεται ως (x_{ESA}, x_{OSA}) , όπου x_{ESA} και x_{OSA} είναι οι πιθανότητες κάποιος δευτερεύων χρήστης να επιλέξει ESA ή OSA, αντίστοιχα. Δεδομένου ότι οι δευτερεύοντες χρήστες είναι όμοιοι και οι δύο στρατηγικές είναι συμπληρωματικές, δηλαδή

$$x_{OSA} = (1 - x_{ESA}), \quad (6.8)$$

$N \cdot x_{ESA}$ από τους N δευτερεύοντες χρήστες επιλέγουν ESA και $N \cdot (1 - x_{ESA})$ επιλέγουν OSA. Επειδή το παίγνιο είναι συμμετρικό, το πιθανό σημείο ισορροπίας μικτής στρατηγικής προσδιορίζεται θεωρώντας ότι, στην κατάσταση ισορροπίας, οι δευτερεύοντες χρήστες είναι αδιάφοροι ως προς το ποιο τρόπο πρόσβασης θα επιλέξουν (indifference principle). Ως εκ τούτου, για τον προσδιορισμό του σημείου ισορροπίας, εφαρμόζεται η μέθοδος της εξίσωσης των ανταμοιβών που λαμβάνουν οι δευτερεύοντες χρήστες είτε επιλέξουν ESA είτε OSA [81]. Λαμβάνοντας υπόψη τις συναρτήσεις (6.2) και (6.3), η εξίσωση ανταμοιβών

$$\frac{r \cdot B_{ESA}}{N \cdot x_{ESA}} - C_{ESA} = \frac{r \cdot B_{OSA}(1 - p_{occ})}{N \cdot x_{OSA}} - C_{OSA} \quad (6.9)$$

οδηγεί στην εξίσωση

$$\alpha \cdot x_{ESA}^2 + (\beta - \alpha) \cdot x_{ESA} - r \cdot B_{ESA} = 0, \quad (6.10)$$

ως προς την προσδιοριστέα πιθανότητα x_{ESA} επιλογής ESA από κάποιο δευτερεύοντα χρήστη σε κατάσταση ισορροπίας. Στην (6.10)

$$\alpha = N \cdot (C_{ESA} - C_{OSA}) \quad (6.11)$$

$$\beta = r \cdot (B_{OSA} \cdot (1 - p_{occ}) + B_{ESA}). \quad (6.12)$$

Η εξίσωση (6.10) έχει δύο λύσεις

$$x_{ESA_1} = (\alpha + \beta + \sqrt{(\alpha + \beta)^2 - 4 \cdot r \cdot B_{ESA} \cdot \alpha}) / (2 \cdot \alpha), \quad (6.13)$$

$$x_{ESA_2} = (\alpha + \beta - \sqrt{(\alpha + \beta)^2 - 4 \cdot r \cdot B_{ESA} \cdot \alpha}) / (2 \cdot \alpha), \quad (6.14)$$

Όπως αποδεικνύεται στο Παράρτημα Β.1, η αποδεκτή πιθανότητα ισορροπίας Nash του N -SU παιγνίου επιλογής πρόσβασης, η οποία αποτελεί ισορροπία μικτής στρατηγικής, είναι η $x_{ESA}^* = x_{ESA_2}$.

Μπορεί να αποδειχτεί ότι δεν υπάρχει στρατηγική $x \neq x_{ESA}^*$ ακολουθώντας την οποία

ένας δευτερεύων χρήστης μπορεί να λάβει μεγαλύτερη ανταμοιβή από αυτή που προκύπτει ακολουθώντας την x_{ESA}^* . Ως εκ τούτου, το x_{ESA}^* είναι το μοναδικό σημείο ισορροπίας μικτής στρατηγικής Nash του συμμετρικού N -SU παιγνίου [84].

6.2.2.2 Το παίγνιο κοστολόγησης των παρόχων φάσματος

Οι δύο διαχειριστές φάσματος EXOP και OPOP επιτρέπουν στους δευτερεύοντες χρήστες να χρησιμοποιούν το αντίστοιχο εύρος ζώνης με συγκεκριμένο αντίτιμο. Οι αντίστοιχες ανταμοιβές τους, όπως προκύπτει από τις (6.6) και (6.7), εξαρτώνται από την αντίδραση των δευτερευόντων χρηστών στις παραμέτρους του δικτύου που προσδιορίζουν το κόστος της πρόσβασης. Όταν οι δευτερεύοντες χρήστες βρίσκονται σε κατάσταση ισορροπίας, δηλαδή τους είναι αδιάφορο ποιο τρόπο (ESA ή OSA) πρόσβασης στο φάσμα θα επιλέξουν, οι διαχειριστές φάσματος λαμβάνουν τις ακόλουθες ανταμοιβές

$$R_{EXOP}^* = P_{ESA} \cdot B_{ESA} \cdot N \cdot x_{ESA}^* - K_{EXOP} \cdot B_{ESA}, \quad (6.15)$$

$$R_{OPOP}^* = P_{OSA} \cdot B_{OSA} \cdot N \cdot (1 - x_{ESA}^*) - K_{OPOP} \cdot N \cdot (1 - x_{ESA}^*). \quad (6.16)$$

Βασιζόμενοι στις (6.15) και (6.16), οι διαχειριστές αποκλειστικής και ευκαιριακής πρόσβασης καθορίζουν τις τιμές διάθεσης του αντίστοιχου φάσματος αποσκοπώντας στη μεγιστοποίηση των απολαβών τους.

Επομένως, το πρόβλημα βελτιστοποίησης του διαχειριστή αποκλειστικής πρόσβασης ορίζεται ως

$$\max_{(x_{ESA}^*, P_{ESA})} R_{EXOP}(x_{ESA}^*, P_{ESA}) \quad (6.17)$$

και το πρόβλημα βελτιστοποίησης για το διαχειριστή ευκαιριακής φασματικής πρόσβασης ορίζεται ως

$$\max_{(x_{ESA}^*, P_{OSA})} R_{OPOP}(x_{ESA}^*, P_{OSA}) \quad (6.18)$$

όπου $x_{ESA}^* = x_{ESA_2}$ όπως καθορίστηκε στην (6.14). Η βελτιστοποίηση γίνεται ως προς P_{ESA} και P_{OSA} των οποίων είναι συνάρτηση το x_{ESA}^* . Χρησιμοποιώντας την (6.14) στις αντικειμενικές συναρτήσεις (6.17) και (6.18), τα ανωτέρω δύο προβλήματα βελτιστοποίησης περιγράφονται από τις (6.19) και (6.20).

$$\max_{(P_{ESA})} P_{ESA} \cdot B_{ESA} \cdot N \cdot \frac{\alpha + \beta - \sqrt{(\alpha + \beta)^2 - 4 \cdot r \cdot B_{ESA} \cdot \alpha}}{2 \cdot \alpha} - K_{EXOP} \cdot B_{ESA}, \quad (6.19)$$

και

$$\max_{(P_{OSA})} (P_{OSA} \cdot B_{OSA} \cdot N - K_{OPOP}) \cdot N \cdot \left(1 - \frac{\alpha + \beta - \sqrt{(\alpha + \beta)^2 - 4 \cdot r \cdot B_{ESA} \cdot \alpha}}{2 \cdot \alpha}\right). \quad (6.20)$$

Οι λύσεις των δύο προβλημάτων βελτιστοποίησης είναι οι βέλτιστες αποκρίσεις κάθε διαχειριστή στην τιμή του ανταγωνιζόμενου διαχειριστή

$$P_{ESA}^* = \arg \max_{P_{ESA}} R_{EXOP}^*, \quad (6.21)$$

$$P_{OSA}^* = \arg \max_{P_{OSA}} R_{OPOP}^*. \quad (6.22)$$

Οι τιμές (P_{ESA}^*, P_{OSA}^*) που ικανοποιούν και τα δύο προβλήματα βελτιστοποίησης αποτελούν τις τιμές ισορροπίας του παιγνίου τιμολόγησης από τις οποίες κανένας παίκτης-διαχειριστής δεν έχει όφελος να αποκλίνει.

Το συνδυασμένο πρόβλημα μεγιστοποίησης που τυπώνεται μέσω των (6.21) και (6.22) μπορεί να λυθεί μόνο αριθμητικά. Στο πλαίσιο αυτό, ακολουθείται μια επαναληπτική διαδικασία που βασίζεται στον προσδιορισμό των τιμών P_{ESA} και P_{OSA} που μηδενίζουν τις παραγώγους των (6.15) και (6.16) επαναληπτικά, μέχρι να υπάρξει σύγκλιση στις βέλτιστες τιμές P_{ESA}^* and P_{OSA}^* που μεγιστοποιούν και τις δύο απολαβές. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται από το Αλγόριθμο 4.

Αλγόριθμος 4: Επαναληπτικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης για το παίγνιο αγοράς φάσματος που περιλαμβάνει ένα διαχειριστή αποκλειστικής και ένα διαχειριστή ευκαιριακής πρόσβασης σε φάσμα.

(1) Έναρξη του αλγορίθμου:

Ορισμός κατωφλίου σύγκλισης $\epsilon = 10^{-5}$, αρχικών σημείων (P_{ESA_0}, P_{OSA_0}) και $\kappa = 1$.

(2) Επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης του EXOP

Προσδιορισμός της τιμής P_{ESA}^* ως βέλτιστης λύσης στο πρόβλημα που ορίζεται από την (6.19).

Αντικατάσταση $P_{ESA_\kappa} = P_{ESA}^*$

(2) Επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης του OPOP

Προσδιορισμός της τιμής P_{OSA}^* ως βέλτιστης λύσης στο πρόβλημα που ορίζεται από την (6.20).

Αντικατάσταση $P_{OSA_\kappa} = P_{OSA}^*$

(3) Έλεγχος τερματισμού:

if $\|P_{ESA_\kappa} - P_{ESA_{\kappa-1}}\| < \epsilon$ **και** $\|P_{OSA_\kappa} - P_{OSA_{\kappa-1}}\| < \epsilon$ **then**
| Τέλος αλγορίθμου.

end

else

| αντικατάσταση $\kappa = \kappa + 1$ και επιστροφή στο βήμα **(2)**.

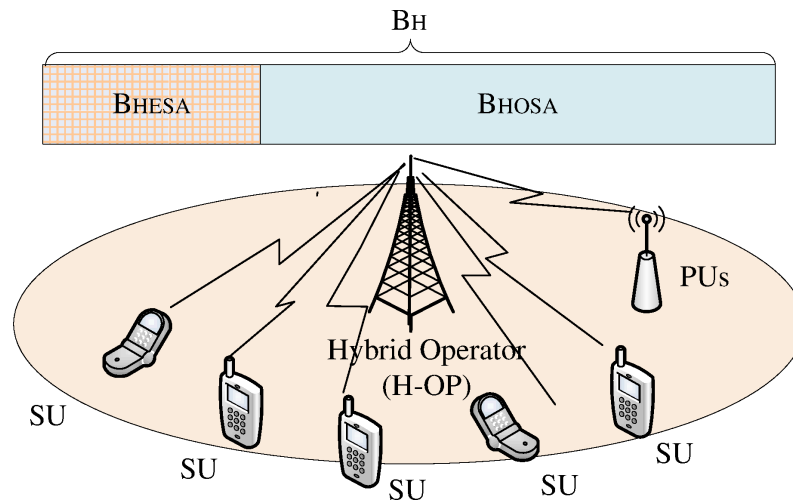
end

6.3 Αγορά φάσματος με ένα διαχειριστή υβριδικής πρόσβασης σε φάσμα

6.3.1 Μοντέλο συστήματος

Στο εδάφιο 6.3.1 εξετάζεται η περίπτωση αγοράς φάσματος όπου ένας διαχειριστής φάσματος έχει τη δυνατότητα να προσφέρει φασματική πρόσβαση σε δευτερεύοντες χρήστες με δύο τρόπους, είτε με αποκλειστικό τρόπο μέσω ESA είτε με ευκαιριακό τρόπο μέσω OSA. Ο διαχειριστής αυτός ονομάζεται διαχειριστής υβριδικής πρόσβασης στο φάσμα. Ο συγκεκριμένος διαχειριστής έχει στη διάθεσή του φάσμα εύρους ζώνης B_H και, αρχικά, εξυπηρετεί M πρωτεύοντες χρήστες. Ταυτόχρονα, μισθώνει ένα τμήμα του B_H σε δευτερεύοντες χρήστες, έστω B_{HESA} , τιμολογώντας με P_{HESA} τη μονάδα εύρους ζώνης. Οι δευτερεύοντες χρήστες έχουν αποκλειστική χρήση του B_{HESA} ενώ η λειτουργία των πρωτευόντων χρηστών περιορίζεται στο $B_{HOSA} = B - B_{HESA}$. Οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να αποκτήσουν πρόσβαση και στο τμήμα φάσματος B_{HOSA} αλλά μόνο ευκαιριακά υπό την προϋπόθεση να μην επηρεάζουν τη λειτουργία των πρωτευόντων χρηστών.

Το μοντέλο του υπό εξέταση συστήματος απεικονίζεται στο Σχήμα 6.2, όπου ένας διαχειριστής υβριδικής πρόσβασης σε φάσμα εξυπηρετεί πρωτεύοντες αλλά και δευτερεύοντες χρήστες.



Σχήμα 6.2: Δίκτυο εξυπηρέτησης δευτερευόντων χρηστών (SU) που περιλαμβάνει ένα διαχειριστή υβριδικής (HOP) πρόσβασης σε φάσμα όπου εξυπηρετούνται πρωτεύοντες χρήστες (PU) (Μοντέλο II).

Όλες οι παράμετροι του υπό μελέτη δικτύου περιλαμβάνονται στον Πίνακα 6.2.

Πίνακας 6.2: Παράμετροι δικτύου για μοντέλο αγοράς φάσματος που περιλαμβάνει ένα διαχειριστή υβριδικής πρόσβασης σε φάσμα

Παράμετροι δικτύου	
r	Παράμετρος ανταμοιβής των SU ανά μονάδα εύρους ζώνης
p_{occ}	Πιθανότητα κατάληψης από PU
N	Πλήθος SU
M	Πλήθος PU
N_{HESA}	Πλήθος SU που επιλέγουν ESA (Μοντέλο II)
N_{HOSA}	Πλήθος SU που επιλέγουν OSA (Μοντέλο II)
B_{HESA}	Εύρος ζώνης διαθέσιμο για ESA (Μοντέλο II)
B_{HOSA}	Εύρος ζώνης διαθέσιμο για OSA (Μοντέλο II)
P_{HESA}	Τιμή ανά μονάδα εύρους ζώνης για ESA (Μοντέλο II)
C_{HESA}	Κόστος SU για ESA (Μοντέλο II)
C_{HOSA}	Κόστος SU για OSA (Μοντέλο II)
R_{HOP}	Κέρδος HOP

Όπως και με το Μοντέλο I, αν θεωρηθεί ότι N_{HESA} και N_{HOSA} δευτερεύοντες χρήστες επιλέγουν αποκλειστική ή ευκαιριακή πρόσβαση στο φάσμα αντίστοιχα, οι αντίστοιχες ανταμοιβές των δευτερευόντων χρηστών είναι

$$U_{HESA} = r \cdot B_{HESA} / N_{HESA} - C_{HESA}, \quad (6.23)$$

$$U_{HOSA} = r \cdot B_{HOSA} \cdot (1 - p_{occ}) / N_{HOSA} - C_{HOSA}, \quad (6.24)$$

όπου C_{HESA} και C_{HOSA} είναι το κόστος των δευτερευόντων χρηστών για αποκλειστική και ευκαιριακή πρόσβαση στο φάσμα, αντίστοιχα. Θέτοντας P_{HESA} την τιμή ανά μονάδα εύρους ζώνης αποκλειστικής πρόσβασης που καθορίζει ο διαχειριστής υβριδικής πρόσβασης, το κόστος των δευτερευόντων χρηστών για αποκλειστική πρόσβαση είναι

$$C_{HESA} = P_{HESA} \cdot B_{HESA}, \quad (6.25)$$

Στην (6.24), το κόστος των δευτερευόντων χρηστών για ευκαιριακή πρόσβαση C_{HOSA} είναι σταθερό και ισοδυναμεί με το κόστος ανίχνευσης φάσματος. Θεωρείται ότι ο διαχειριστής υβριδικής πρόσβασης δεν χρεώνει τους δευτερεύοντες χρήστες για την ευκαιριακή πρόσβαση, εφόσον πραγματοποιούν οι ίδιοι την ανίχνευση φάσματος και δεν παρεμβάλλουν στους πρωτεύοντες χρήστες. Η θεώρηση αυτή βρίσκεται σε αντίθεση με αυτήν που διέπει ένα διαχειριστή ευκαιριακής πρόσβασης, ο οποίος μεσολαβεί ως συντονιστής και, επομένως, χρεώνει τους δευτερεύοντες χρήστες.

Εκτός από την παροχή αποκλειστικής πρόσβασης σε δευτερεύοντες χρήστες με κόστος C_{HESA} , ο διαχειριστής υβριδικής πρόσβασης παρέχει πρόσβαση στο φάσμα σε M πρωτεύοντες χρήστες με εγγυημένο ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης R_{PU} . Ο ρυθμός μετάδοσης που απολαμβάνουν οι πρωτεύοντες χρήστες συνδέεται με το διαθέσιμο εύρος ζώνης b μέσω

της σχέσης

$$R(b) = b \cdot \phi_{PU}, \quad (6.26)$$

όπου ϕ_{PU} αποτελεί μέτρο που προσδιορίζει την κλάση υπηρεσίας των πρωτεύοντων χρηστών. Σύμφωνα με τους Niyato et al. [68] και Goldsmith [97] και θεωρώντας όμοιους πρωτεύοντες χρήστες που ανήκουν στην ίδια κλάση υπηρεσίας, το μέτρο φασματικής απόδοσης ϕ_{PU} ορίζεται μέσω της σχέσης

$$\phi_{PU} = \log(1 + K_{PU} \cdot SNR_{PU}), \quad (6.27)$$

όπου

$$K_{PU} = 1.5/\ln(0.2/BER_{PU}^{tar}) \quad (6.28)$$

είναι η ποιότητα υπηρεσίας που χαρακτηρίζει τους πρωτεύοντες χρήστες και SNR_{PU} ο σηματοθορυβικός λόγος (SNR) στην είσοδο του αποκωδικοποιητή των πρωτεύοντων χρηστών. Το SNR_{PU} εξαρτάται από τις αντίστοιχες συνθήκες μετάδοσης και την ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου του δέκτη ενός πρωτεύοντος χρήστη.

Το συνολικό κέρδος του διαχειριστή υβριδικής πρόσβασης εξαρτάται από την τιμή που χρεώνει την αποκλειστική πρόσβαση των δευτερευόντων χρηστών στο φάσμα. Σε αντίθεση με το διαχειριστή ευκαιριακής πρόσβασης, ο διαχειριστή υβριδικής πρόσβασης δεν μεσολαβεί ως συντονιστής στην ευκαιριακή πρόσβαση των δευτερευόντων χρηστών. Επομένως, δεν υφίσταται κόστος από την ευκαιριακή πρόσβαση στο φάσμα των δευτερευόντων χρηστών.

Το κόστος του διαχειριστή υβριδικής πρόσβασης, που ορίζεται ως C_{HOP} , αποτελεί την αποζημίωση που πρέπει να δοθεί στους πρωτεύοντες χρήστες για να αντισταθμίσει την ενδεχόμενη υποβάθμιση υπηρεσίας. Το κόστος αυτό σχετίζεται με τη χειροτέρευση του ρυθμού μετάδοσης που αντιλαμβάνονται οι πρωτεύοντες χρήστες επειδή ο διαχειριστής υβριδικής πρόσβασης επιτρέπει σε N_{HESA} δευτερεύοντες χρήστες να έχουν πρόσβαση στο εύρος ζώνης B_{HESA} , περιορίζοντας έτσι τη λειτουργία των πρωτεύοντων χρηστών στο εύρος ζώνης $B_{HOSA} = B_H - B_{HESA}$. Επομένως, μπορεί να τεθεί

$$C_{HOP} = M \cdot [D]^2, \quad (6.29)$$

όπου

$$D = R_{PU} - \phi_{PU} \cdot (B_H - B_{HESA})/M. \quad (6.30)$$

το μέτρο της προαναφερθείσας χειροτέρευσης του ρυθμού μετάδοσης. Λαμβάνοντας υπόψη τις (6.29) και (6.30), το καθαρό κέρδος του διαχειριστή υβριδικής πρόσβασης είναι

$$R_{HOP} = C_{HESA} \cdot N_{HESA} - M \cdot [R_{PU} - \phi_{PU} \cdot (B_H - B_{HESA})/M]^2, \quad (6.31)$$

όπου

$$C_{HESA} = P_{HESA} \cdot B_{HESA}. \quad (6.32)$$

Όπως έγινε και με το Μοντέλο I, στο εδάφιο 6.3.2 διατυπώνεται το παίγνιο πρόσβασης στο φάσμα και τιμολόγησης δύο επιπέδων για το Μοντέλο II.

6.3.2 Παίγνιο αγοράς φάσματος

Το παίγνιο αγοράς φάσματος στην περίπτωση του Μοντέλου II διαφέρει από αυτό του Μοντέλου I στο δεύτερο επίπεδο, το οποίο δεν αποτελεί πλέον ένα παίγνιο τιμολόγησης μόνο. Ο διαχειριστής υβριδικής πρόσβασης πρέπει να καθορίσει πώς θα κατανομηθεί το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε ESA και OSA με βάση το είδος πρόσβασης που θα παρέχει σε δευτερεύοντες χρήστες. Το συνολικό εύρος ζώνης B_H διαμοιράζεται σε B_{HESA} και B_{HOSA} ενώ ο διαχειριστής υβριδικής πρόσβασης θέτει την τιμή αποκλειστικής πρόσβασης των δευτερευόντων χρηστών στο φάσμα B_{HESA} ως C_{HESA} . Θέτοντας

$$z = B_{HOSA}/B_H, \quad (6.33)$$

διαμορφώνονται τα δύο επίπεδα του παιγνίου αγοράς φάσματος για το Μοντέλο II τα οποία αναλύονται στη συνέχεια.

6.3.2.1 Το παίγνιο επιλογής πρόσβασης των SU

Στο Μοντέλο II, το παίγνιο επιλογής πρόσβασης στο οποίο συμμετέχουν οι δευτερεύοντες χρήστες είναι όμοιο με αυτό του Μοντέλου I, επειδή οι ανταμοιβές τους με βάση τις (6.23) και (6.24) είναι παρόμοιες με τις αντίστοιχες του Μοντέλου I. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση των ανταμοιβών και εξετάζοντας την καταλληλότητα των δύο λύσεων, αποδεικνύεται ότι

$$x_{HESA}^* = \frac{\alpha' + \beta' - \sqrt{(\alpha' + \beta')^2 - 4 \cdot r \cdot (1 - z) \cdot B_H \cdot \alpha'}}{2 \cdot \alpha'}, \quad (6.34)$$

είναι η πιθανότητα ισορροπίας Nash του N -SU παιγνίου επιλογής πρόσβασης του Μοντέλου II, όπου

$$\alpha' = N \cdot (C_{HESA} - C_{HOSA}) \quad (6.35)$$

$$\beta' = r \cdot B_H \cdot (1 - z \cdot p_{occ}). \quad (6.36)$$

6.3.2.2 Το παίγνιο εύρους ζώνης-τιμής φάσματος του υβριδικού παρόχου

Λαμβάνοντας υπόψη το παίγνιο επιλογής πρόσβασης των δευτερευόντων χρηστών του πρώτου επιπέδου, το κέρδος του διαχειριστή υβριδικής πρόσβασης είναι ίσο προς

$$R_{HOP}(z, C_{HESA}) = C_{HESA} \cdot N \cdot x_{HESA}^* - M \cdot [R_{PU} - \phi_{PU} \cdot (z \cdot B_H/M)^2], \quad (6.37)$$

όπου

$$C_{HESA} = P_{HESA} \cdot (1 - z) \cdot B_H. \quad (6.38)$$

Ο διαχειριστής υβριδικής πρόσβασης στο φάσμα αποσκοπεί στη μεγιστοποίηση του οφέλους του υπό τον περιορισμό ότι η ανταμοιβή των δευτερευόντων χρηστών είναι και αυτή μεγαλύτερη από ένα κατώτατο επίπεδο U_{min} . Αφού, στην κατάσταση ισορροπίας, οι ανταμοιβές των δευτερευόντων χρηστών όπως ορίζονται μέσω των (6.23) και (6.24), είναι ίσες, οποιαδήποτε από αυτές μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως περιορισμός στο ανωτέρω πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Επομένως, το υπό μελέτη πρόβλημα βελτιστοποίησης διατυπώνεται ως εξής

$$\max_{(z, C_{HESA})} R_{HOP}(z, C_{HESA}) \quad (6.39)$$

υπό τους περιορισμούς

$$C_{HESA} - r \cdot (1 - z) \cdot B_H / (N \cdot x_{HESA}^*) - U_{min} \leq 0, \quad (6.40)$$

$$z - 1 \leq 0, \quad (6.41)$$

$$-z \leq 0, \quad (6.42)$$

Πρόκειται για πρόβλημα βελτιστοποίησης μη κυρτό και με περιορισμούς. Για το λόγο αυτό, για την επίλυσή του χρησιμοποιείται η ευριστική μέθοδος της συνάρτησης ποινών [93] που εισάγει τη συνάρτηση ποινής

$$\mathcal{P}(z, C_{HESA}, \rho) = -R_{HOP}(z, C_{HESA}) + \rho_1 \cdot [g_1]^2 + \rho_2 \cdot [g_2]^2 + \rho_3 \cdot [g_3]^2. \quad (6.43)$$

όπου

$$g_1 = C_{HESA} - r \cdot (1 - z) \cdot B_H / (N \cdot x_{HESA}^*). \quad (6.44\alpha)$$

$$g_2 = z - 1. \quad (6.44\beta)$$

$$g_3 = -z. \quad (6.44\gamma)$$

Οι ποινές ορίζονται ως

$$\rho_i = \begin{cases} 0 & \text{if } g_i \leq 0 \\ \gg 0 & \text{if } g_i > 0 \end{cases} \quad (6.45)$$

Τότε, το αρχικό πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς μετατρέπεται στο ακόλουθο πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς

$$\min_{(z, C_{HESA})} \mathcal{P}(z, C_{HESA}, \rho_i), i = 1, 2, 3. \quad (6.46)$$

Επειδή υψηλές τιμές ρ μπορεί να προκαλέσουν αστάθεια, το πρόβλημα δεν μπορεί να λυθεί με αναλυτικό τρόπο. Για το λόγο αυτό, εφαρμόζεται μια τεχνική διαδοχικής ελαχιστοποίησης που αυξάνει σταδιακά τις ποινές [95]. Η τεχνική αυτή περιγράφεται στον Αλγόριθμο 5.

Αλγόριθμος 5: Επαναληπτικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης για το παίγνιο αγοράς φάσματος που περιλαμβάνει ένα διαχειριστή υβριδικής φασματικής πρόσβασης.

(1) Έναρξη του αλγορίθμου:

Ορισμός κατωφλίων σύγκλισης $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 10^{-5}$, των αρχικών σημείων (z_0, C_{HESA_0}) , $\rho_{1_0} = 1$, $\rho_{2_0} = 1$, $\rho_{3_0} = 1$ και $\kappa = 1$.

(2) Επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς

Προσδιορισμός των $(z_\kappa, C_{HESA_\kappa})^*$ που ελαχιστοποιούν την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης $\mathcal{P}(z_\kappa, C_{HESA_\kappa}, \rho_{1_\kappa}, \rho_{2_\kappa}, \rho_{3_\kappa})$ που ορίζεται μέσω της (6.46).

(3) Έλεγχος τερματισμού:

if $\|z_\kappa - z_{\kappa-1}\| < \epsilon_1$ **και** $\|C_{HESA_\kappa} - C_{HESA_{\kappa-1}}\| < \epsilon_2$ **then**
| Τέλος αλγορίθμου.

end

else

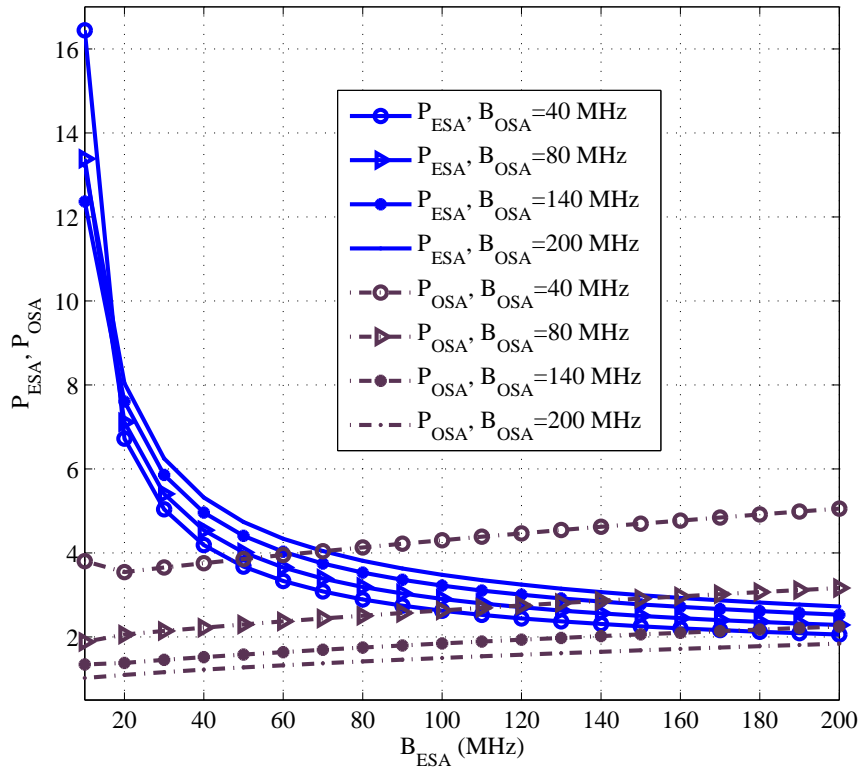
| αντικατάσταση $\kappa = \kappa + 1$, $\rho_{i_\kappa} = \rho_{i_{\kappa-1}} * 10$ και επιστροφή στο βήμα **(2)**.

end

6.4 Αριθμητικά αποτελέσματα

Στο εδάφιο αυτό, παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα από την επίλυση του παιγνίου δύο επιπέδων. Αρχικά εξετάζεται το Μοντέλο I. Οι παράμετροι του υπό εξέταση δικτύου καθορίζονται ως εξής: $K_{EXOP} = K_{OPOP} = 100$, $r = 100$ και $N = 100$. Η πιθανότητα κατάληψης των PU p_{occ} θεωρείται ίση με 0.8. Εφαρμόζοντας το προτεινόμενο πλαίσιο βελτιστοποίησης δύο επιπέδων, οι δύο διαχειριστές φάσματος καθορίζουν τις P_{ESA}^* και P_{OSA}^* που βελτιστοποιούν τις απολαβές τους υπό συγκεκριμένες συνθήκες δικτύου. Αυτές οι βέλτιστες τιμές P_{ESA}^* και P_{OSA}^* που μεγιστοποιούν τις (6.21) και (6.22) εξετάστηκαν για διαφορετικούς συνδυασμούς B_{ESA} και B_{OSA} . Οι διαχειριστές φάσματος θεωρούνται γνώστες του εύρους ζώνης και των τιμών ανά μονάδα εύρους ζώνης για κάθε περίπτωση. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης για κάθε συνδυασμό B_{ESA} και B_{OSA} είναι απλό στη λύση του και συγκλίνει σε βέλτιστες τιμές μετά από λίγες επαναλήψεις. Οι βέλτιστες τιμές P_{ESA}^* και P_{OSA}^* απεικονίζονται στο Σχ. 6.3 συναρτήσει του B_{ESA} .

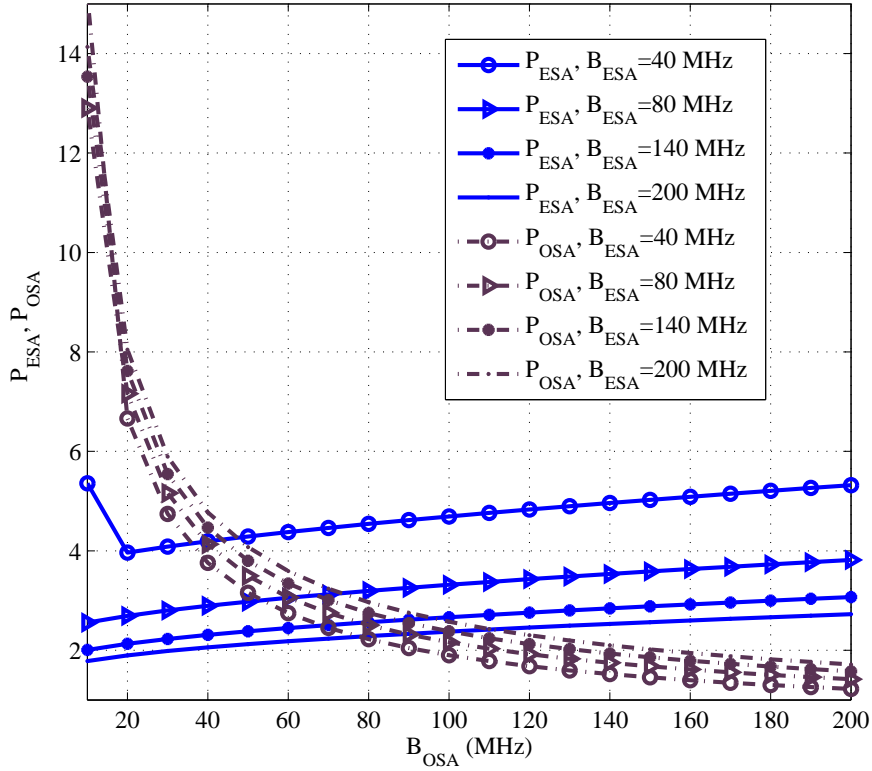
Είναι εύκολα παρατηρήσιμο ότι το P_{ESA}^* μειώνεται με το B_{ESA} . Για χαμηλές τιμές B_{ESA} ,



Σχήμα 6.3: Βέλτιστη τιμή ανά μονάδα εύρους ζώνης όπως καθορίζεται από δύο διαχειριστές φάσματος ως προς το εύρος ζώνης που διατίθεται προς αποκλειστική πρόσβαση.

η διαφορά μεταξύ P_{ESA}^* και P_{OSA}^* είναι υψηλή και μειώνεται με το B_{ESA} . Συγκεκριμένα, το P_{ESA}^* είναι υψηλότερο από το P_{OSA}^* για ένα εύρος τιμών B_{ESA} που εξαρτάται από την τιμή του B_{OSA} . Για $B_{OSA} = 80 MHz$, η καμπύλη του P_{ESA}^* τέμνει την καμπύλη του P_{OSA}^* περίπου στο σημείο $B_{ESA} = 110 MHz$. Αυτό σημαίνει ότι όταν το διαθέσιμο εύρος ζώνης για ESA είναι υψηλότερο των $110 MHz$, η ευκαιριακή πρόσβαση χρεώνεται περισσότερο στο σημείο ισορροπίας Nash του παίγνιου επιλογής πρόσβασης. Αν ο EXOP θέσει υψηλότερη τιμή, θα προκύψει νέο σημείο ισορροπίας όπου λιγότεροι δευτερεύοντες χρήστες θα επιλέγουν ESA και, ως εκ τούτου, οι απολαβές του EXOP θα μειωθούν. Η τιμή P_{OSA}^* χαρακτηρίζεται από την αντίθετη τάση. Υψηλότερες τιμές B_{ESA} επιτρέπουν στον OPOP να θέσει υψηλότερες τιμές.

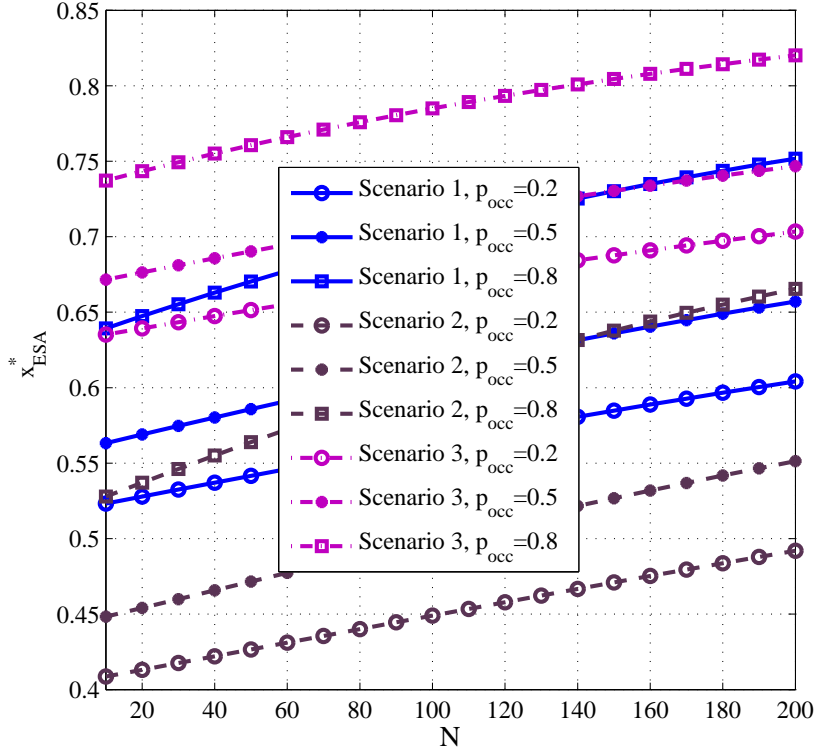
Στο Σχ. 6.4 παρουσιάζονται οι καμπύλες των P_{ESA}^* και P_{OSA}^* που μεγιστοποιούν τις απολαβές των διαχειριστών φάσματος συναρτήσει του B_{OSA} . Όταν αυξάνεται το διαθέσιμο εύρος ζώνης για ευκαιριακή πρόσβαση, ο διαχειριστής αποκλειστικής πρόσβασης θέτει υψηλότερες τιμές ενώ ο διαχειριστής ευκαιριακής πρόσβασης τις μειώνει. Λαμβάνοντας υπόψη την (6.5), χαμηλές τιμές του εύρους ζώνης B_{OSA} οδηγούν σε χαμηλό κόστος ευκαιριακής πρόσβασης για τους δευτερεύοντες χρήστες και χαμηλές απολαβές για το διαχειριστή ευκαιριακής πρόσβασης. Ως εκ τούτου, ο διαχειριστής ευκαιριακής πρόσβασης θέτει υψηλές τιμές P_{OSA} που πρέπει να μειωθούν με την αύξηση του B_{OSA} για να διατηρηθεί το κόστος



Σχήμα 6.4: Βέλτιστη τιμή ανά μονάδα εύρους ζώνης όπως καθορίζεται από δύο διαχειριστές φάσματος ως προς το εύρος ζώνης που διατίθεται προς ευκαιριακή πρόσβαση.

των δευτερευόντων χρηστών σε ένα αποδεκτό επίπεδο. Ταυτόχρονα, η τιμή P_{ESA} αυξάνεται για να διατηρηθούν οι ανταμοιβές των δευτερευόντων χρηστών σε κατάσταση ισορροπίας ανεξάρτητα από την επιλογή τρόπου πρόσβασης στο φάσμα. Όπως παρατηρήθηκε ήδη κατά την εξέταση της εξάρτησης των τιμών P_{ESA}^* και P_{OSA}^* από το εύρος ζώνης B_{ESA} , υπάρχει ένα κατώφλιο B_{OSA} , μέχρι το οποίο η τιμή P_{OSA} είναι μεγαλύτερη από την P_{ESA} . Αυτό το κατώφλιο αυξάνεται με την αύξηση του B_{ESA} . Ενδεικτικά, όταν $B_{ESA} = 200MHz$, η τιμή P_{OSA} γίνεται μικρότερη από την τιμή P_{ESA} για εύρος ζώνης $B_{OSA} > 110MHz$.

Για τη διερεύνηση της επίδρασης του αριθμού των δευτερευόντων χρηστών N στην ισορροπία του παιγνίου επιλογής τρόπου πρόσβασης στο φάσμα ορίζονται τρία σενάρια ως προς το συνδυασμό διαθέσιμου εύρους ζώνης των διαχειριστών αποκλειστικής και ευκαιριακής πρόσβασης στο φάσμα (Σενάριο 1: $B_{ESA} = 100, B_{OSA} = 100$, Σενάριο 2: $B_{ESA} = 50, B_{OSA} = 200$ και Σενάριο 3: $B_{ESA} = 200, B_{OSA} = 50$). Η πιθανότητα επιλογής ESA στο σημείο ισορροπίας, δηλαδή η x_{ESA}^* , απεικονίζεται στο Σχήμα 6.5 ως συνάρτηση του N για διάφορες τιμές πιθανότητας κατάληψης πρωτευόντων χρηστών p_{occ} . Παρατηρείται ότι η πιθανότητα x_{ESA}^* είναι αύξουσα συνάρτηση του N . Μπορεί, επίσης, να παρατηρηθεί ότι για υψηλότερες τιμές της πιθανότητας p_{occ} , η x_{ESA}^* λαμβάνει υψηλότερες τιμές σε όλα τα σενάρια. Η προτίμηση των δευτερευόντων χρηστών για αποκλειστική πρόσβαση αυξάνεται όταν το εύρος ζώνης μοιράζεται σε περισσότερους χρήστες και όταν το εύρος ζώνης που

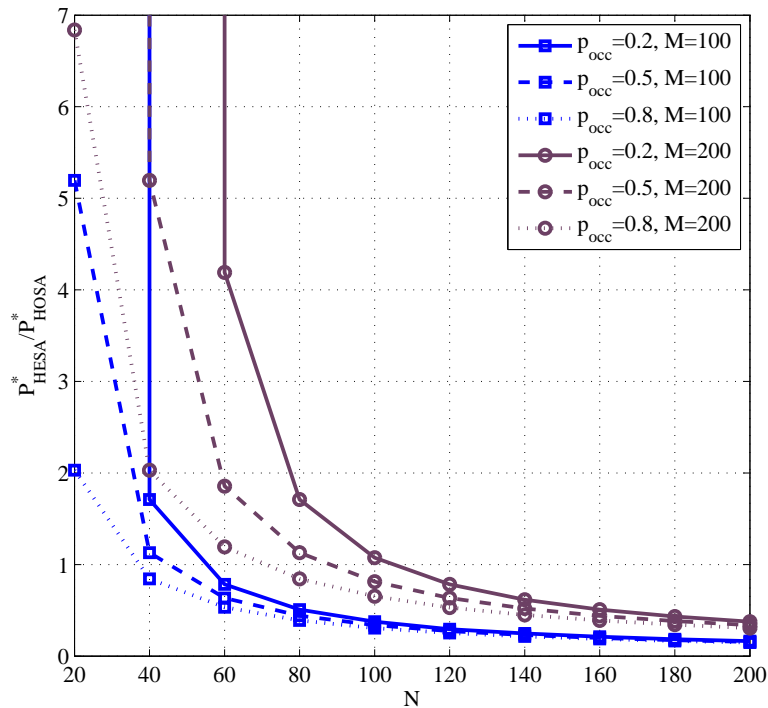


Σχήμα 6.5: Εξάρτηση της πιθανότητας ισορροπίας των SU για την επιλογή αποκλειστικής πρόσβασης στο φάσμα ως συνάρτηση του N για διαφορετικά σενάρια και τιμές p_{occ} .

διατίθεται ευκαιριακά εμφανίζει μεγάλη πιθανότητα να είναι κατειλημμένο από πρωτεύοντες χρήστες. Αντίθετα, η προτίμηση για αποκλειστική πρόσβαση μειώνεται με τη μείωση του διαθέσιμου εύρους ζώνης B_{ESA} σε σχέση με το B_{OSA} . Μικρότερο εύρος ζώνης για αποκλειστική πρόσβαση οδηγεί σε σημείο ισορροπίας όπου η πλειοψηφία των δευτερευόντων χρηστών επιλέγει την ευκαιριακή πρόσβαση στο φάσμα, π.χ. στο Σενάριο 2 για $p_{occ} = 0.2$ και $p_{occ} = 0.5$ για κάποιες τιμές του N . Αξίζει, ωστόσο, να σημειωθεί, ότι στις περισσότερες περιπτώσεις, όταν οι διαχειριστές αποκλειστικής και ευκαιριακής πρόσβασης στο φάσμα τιμολογούν με τις τιμές ισορροπίας, η πιθανότητα ισορροπίας των δευτερευόντων χρηστών x_{ESA}^* υπερβαίνει την τιμή 0.5, γεγονός που φανερώνει την προτίμηση των δευτερευόντων χρηστών για αποκλειστική πρόσβαση.

Στο Μοντέλο II, μέσω του παιγνίου δύο επιπέδων, ο διαχειριστής υβριδικής πρόσβασης προσδιορίζει την κατανομή του διαθέσιμου εύρους ζώνης σε αποκλειστική και ευκαιριακή πρόσβαση, δηλαδή σε B_{HESA}^* και B_{HOSA}^* , αντίστοιχα, καθώς και την τιμή ανά μονάδα εύρους ζώνης για την αποκλειστική πρόσβαση P_{HESA}^* . Το κόστος για την πρόσβαση στο B_{HOSA}^* είναι σταθερό. Οι παράμετροι του συστήματος λαμβάνονται ίσες με $B_H = 100MHz$, $r = 100$, $C_{HOSA} = 100$ και οι παράμετροι των πρωτεύοντων χρηστών ορίζονται ως $SNR_{PU} = 15dB$, $R_{PU} = 2Mbps$ και $BER_{PU}^{tar} = 10^{-4}$. Εφαρμόζοντας τον Αλγόριθμο 5 με $U_{min} = 0$, προσδιορίζονται οι βέλτιστες τιμές P_{HESA}^* και B_{HESA}^* υπό συ-

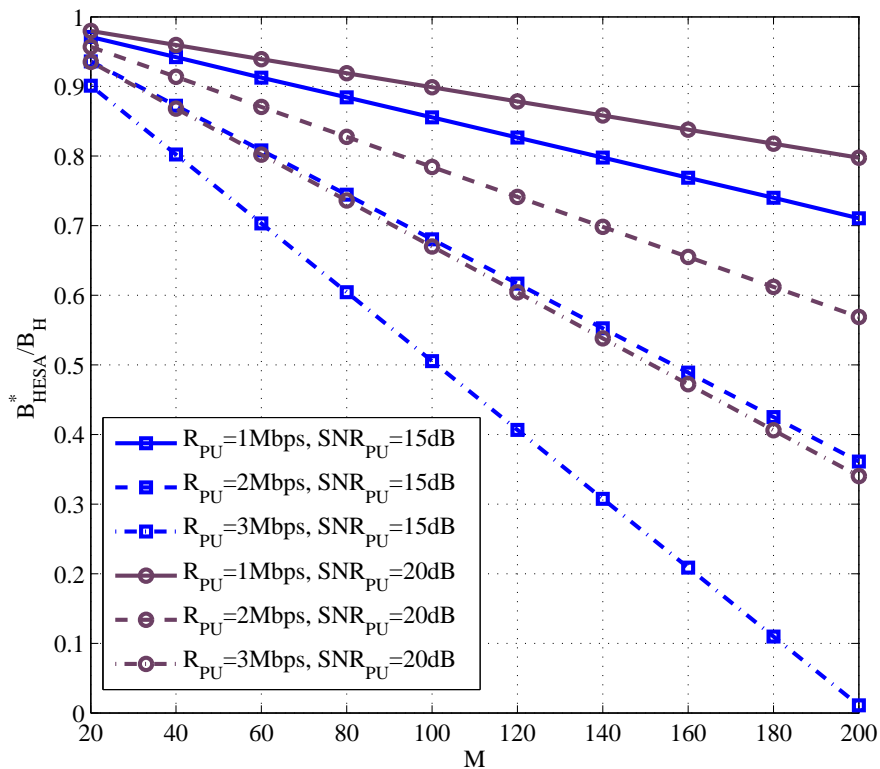
γκεκριμένες συνθήκες του δικτύου. Στο Σχήμα 6.6, απεικονίζεται η βέλτιστη τιμή του διαχειριστή φάσματος ανά μονάδα εύρους ζώνης για αποκλειστική πρόσβαση στο φάσμα ως συνάρτηση του αριθμού των δευτερευόντων χρηστών N , κανονικοποιημένη με την αντίστοιχη τιμή ανά μονάδα εύρους ζώνης για ευκαιριακή πρόσβαση για διαφορετικές τιμές της πιθανότητας κατάληψης του ευκαιριακού εύρους από πρωτεύοντες χρήστες p_{occ} και για διαφορετικούς αριθμούς πρωτευόντων χρηστών M . Ως P_{HOSA}^* θεωρείται το κόστος των δευτερευόντων χρηστών ανά μονάδα εύρους ζώνης ευκαιριακής πρόσβασης. Υπολογίζεται ως $P_{HOSA}^* = C_{HOSA}/B_{HOSA}^*$ και χρησιμοποιείται για λόγους σύγκρισης.



Σχήμα 6.6: P_{HESA}^*/P_{HOSA}^* ως συνάρτηση του N για τιμές $p_{occ} = \{0.2, 0.5, 0.8\}$ και $M = \{100, 200\}$.

Από το Σχήμα 6.6 προκύπτει ότι η αναλογία P_{HESA}^*/P_{HOSA}^* μειώνεται με την αύξηση του N . Αυτό συμβαίνει κυρίως επειδή περισσότεροι δευτερεύοντες χρήστες μοιράζονται συγκεκριμένο εύρος ζώνης. Έτσι, ο διαχειριστής υβριδικής πρόσβασης πρέπει να μειώσει την τιμή P_{HESA}^* για να ανταποκριθεί στον περιορισμό ελάχιστης ανταμοιβής των δευτερευόντων χρηστών. Επιπλέον, ο διαχειριστής υβριδικής πρόσβασης εισπράττει τιμές πρόσβασης από περισσότερους χρήστες και έχει τη δυνατότητα να μειώσει τη χρέωση της αποκλειστικής πρόσβασης στο φάσμα χωρίς να μειωθεί το κέρδος του. Αντίθετη είναι η εξάρτηση από τον αριθμό των πρωτευόντων χρηστών M . Η αύξηση του M από 100 σε 200 οδηγεί σε υψηλότερο λόγο P_{HESA}^*/P_{HOSA}^* . Περισσότεροι πρωτεύοντες χρήστες αφήνουν μικρότερο τμήμα εύρους ζώνης για αποκλειστική χρήση ανά χρήστη εξαιτίας της αυξημένης ανάγκης για πρόσβαση στο φάσμα από πρωτεύοντες χρήστες. Προκειμένου να αυξήσει το κέρδος του, ο διαχειριστής υβριδικής πρόσβασης πρέπει να αυξήσει την τιμή για το εύ-

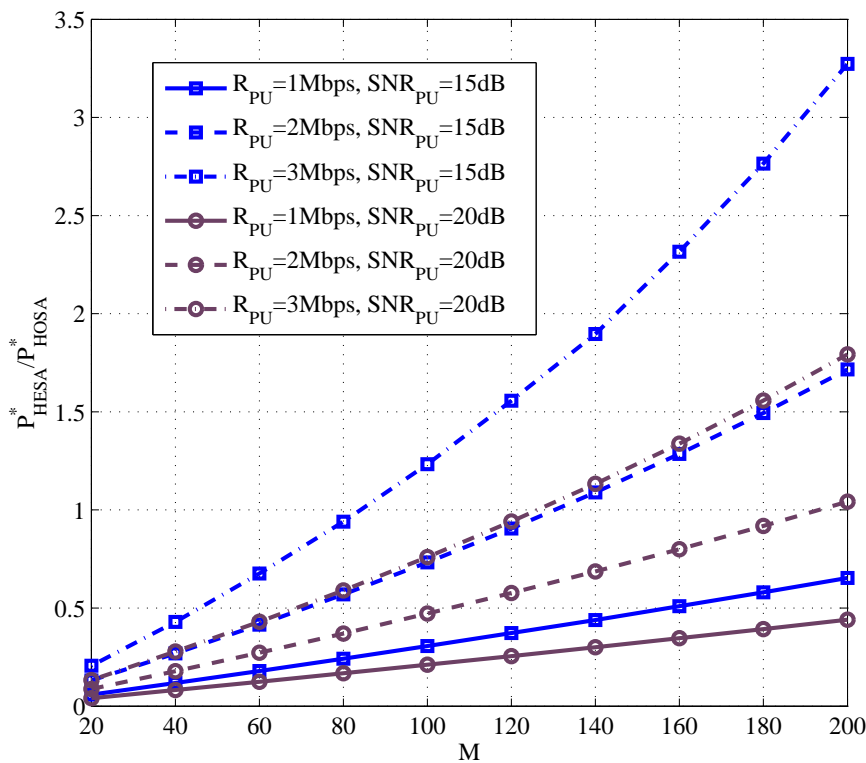
ρος ζώνης B_{HESA}^* . Μπορεί, επίσης, να παρατηρηθεί ότι υψηλότερες τιμές p_{occ} οδηγούν σε χαμηλότερες τιμές για αποκλειστική πρόσβαση. Όταν είναι πολύ πιθανό το B_{HOSA} να είναι κατειλημμένο από πρωτεύοντες χρήστες, αυξάνεται η πιθανότητα των δευτερευόντων χρηστών να επιλέξουν αποκλειστική πρόσβαση και ο διαχειριστής υβριδικής πρόσβασης μπορεί να μειώσει την τιμή αποκλειστικής πρόσβασης στο φάσμα αφού περισσότεροι χρήστες θα συνεισφέρουν στην αύξηση του οφέλους του. Τέλος, είναι ενδιαφέρον να παρατηρηθεί ότι σε περιπτώσεις δικτύων με χαμηλή πιθανότητα κατάληψης p_{occ} , συγκεκριμένα όταν $p_{occ} = 0.2$, υπάρχει τιμή κατωφλίου στον αριθμό των δευτερευόντων χρηστών, $N = 60$ όταν $M = 200$ και $N = 40$ όταν $M = 100$, κάτω από την οποία η τιμή για αποκλειστική πρόσβαση στο φάσμα των δευτερευόντων χρηστών λαμβάνει πολύ υψηλές τιμές. Αυτό συμβαίνει γιατί για αυτές τις τιμές του N , η πιθανότητα ένας δευτερεύων χρήστης να επιλέξει αποκλειστική πρόσβαση τείνει στο 0.



Σχήμα 6.7: B_{HESA}^*/B_H ως συνάρτηση του M για τιμές $R_{PU} = \{1, 2, 3Mbps\}$ και $SNR_{PU} = \{15, 20dB\}$.

Στα Σχήματα 6.7 και 6.8, απεικονίζονται το βέλτιστο εύρος ζώνης B_{HESA}^* ως ποσοστό του συνολικά διαθέσιμου εύρους ζώνης B_H και η αντίστοιχη βέλτιστη αναλογία τιμής ανά μονάδα εύρους ζώνης για αποκλειστική και ευκαιριακή πρόσβαση P_{HESA}^*/P_{HOSA}^* ως συνάρτηση του αριθμού των πρωτευόντων χρηστών M . Από το Σχήμα 6.7 παρατηρείται ότι το εύρος ζώνης που διατίθεται για αποκλειστική πρόσβαση μειώνεται με την αύξηση του M επειδή ο διαχειριστής υβριδικής πρόσβασης πρέπει να παρέχει περισσότερο εύρος ζώ-

νης προκειμένου να ικανοποιεί τις απαιτήσεις μετάδοσης των πρωτευόντων χρηστών. Ταυτόχρονα, υψηλότερο SNR των πρωτευόντων χρηστών επιτρέπει υψηλότερες τιμές B_{HESA}^* αφού οι πρωτεύοντες χρήστες μπορούν να επιτύχουν ευκολότερα τον απαιτούμενο ρυθμό μετάδοσής τους. Αντίθετη είναι η επίδραση στο B_{HESA}^* όταν αυξάνεται η τιμή ελάχιστου ρυθμού μετάδοσης των πρωτευόντων χρηστών. Η αυξημένη απαίτηση των πρωτευόντων χρηστών σε ρυθμούς μετάδοσης αυξάνει το κόστος του διαχειριστή υβριδικής πρόσβασης για την παραχώρηση εύρους ζώνης σε δευτερεύοντες χρήστες, με αποτέλεσμα το B_{HESA}^* να μειώνεται.



Σχήμα 6.8: P_{HESA}^*/P_{HOSA}^* ς συνάρτηση του M για τιμές $R_{PU} = \{1, 2, 3Mbps\}$ και $SNR_{PU} = \{15, 20dB\}$.

Αντίθετη είναι η επίδραση του M στην αναλογία τιμών P_{HESA}^*/P_{HOSA}^* , όπως φαίνεται από το Σχήμα 6.8. Περισσότεροι πρωτεύοντες χρήστες οδηγούν σε υψηλότερες τιμές ανά μονάδα εύρους ζώνης για αποκλειστική πρόσβαση στο φάσμα των δευτερευόντων χρηστών σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές για ευκαιριακή πρόσβαση. Αυτό συμβαίνει προκειμένου να αντισταθμιστεί η μείωση του μεριδίου φάσματος B_{HESA}^* . Επισημαίνεται, επίσης, ότι υψηλότερες τιμές SNR των πρωτευόντων χρηστών οδηγούν σε χαμηλότερες τιμές για αποκλειστική πρόσβαση των δευτερευόντων χρηστών αφού, τότε, μειώνεται η ανάγκη των πρωτευόντων χρηστών για εύρος ζώνης. Ωστόσο, όταν αυξάνεται ο απαιτούμενος ρυθμός μετάδοσης των πρωτευόντων χρηστών, παρατηρείται αύξηση στο λόγο P_{HESA}^*/P_{HOSA}^* .

6.5 Συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο 6 ερευνήθηκε η αγορά φάσματος που περιλαμβάνει διαφορετικούς τύπους διαχειριστών φάσματος που παρέχουν τη δυνατότητα σε μη συντονιζόμενους από κάποια κεντρική οντότητα δευτερεύοντες χρήστες να αποκτήσουν είτε αποκλειστική είτε ευκαιριακή πρόσβαση στο φάσμα. Διατυπώθηκε ένα παίγνιο επιλογής πρόσβασης και τιμολόγησης δύο επιπέδων για δύο διαφορετικά μοντέλα συστήματος. Στο Μοντέλο I, παρουσιάζεται αγορά φάσματος με δύο διαχειριστές, ένα διαχειριστή αποκλειστικής πρόσβασης στο φάσμα και ένα διαχειριστή ευκαιριακής πρόσβασης στο φάσμα. Αποδεικνύεται ότι το παίγνιο των δευτερευόντων χρηστών στο πρώτο επίπεδο έχει ένα μοναδικό σημείο ισορροπίας Nash, στο οποίο οι ανταμοιβές των δευτερευόντων χρηστών από την αποκλειστική και την ευκαιριακή πρόσβαση είναι ίδιες. Στο δεύτερο επίπεδο, οι δύο διαχειριστές καθορίζουν τις βέλτιστες τιμές που μεγιστοποιούν τα οφέλη τους όταν οι δευτερεύοντες χρήστες λειτουργούν στο σημείο ισορροπίας. Στο Μοντέλο II, θεωρείται ένας διαχειριστής υβριδικής πρόσβασης που μπορεί να παρέχει είτε αποκλειστική είτε ευκαιριακή πρόσβαση στο φάσμα σε δευτερεύοντες χρήστες. Το παίγνιο επιλογής πρόσβασης των δευτερευόντων χρηστών έχει πάλι ένα μοναδικό σημείο ισορροπίας Nash. Στο δεύτερο επίπεδο ορίζεται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης εύρους ζώνης-τιμής φάσματος το οποίο επιλύεται με τη βοήθεια της συνάρτησης ποινών. Για τα δύο μοντέλα προτείνονται δύο αλγόριθμοι. Παρουσιάστηκαν, τέλος, αριθμητικά αποτελέσματα προς διερεύνηση (i) της σχέσης των βέλτιστων τιμών με το διαθέσιμο εύρος ζώνης για αποκλειστική και για ευκαιριακή πρόσβαση στο Μοντέλο I, (ii) του σημείου ισορροπίας του παιγνίου πρόσβασης στο φάσμα στο Μοντέλο I και (iii) των βέλτιστων τιμών εύρους ζώνης και τιμών σε σχέση με τον αριθμό των δευτερευόντων και πρωτευόντων χρηστών καθώς και των παραμέτρων του συστήματος.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματοποιήθηκε μια μελέτη και ανάπτυξη μηχανισμών για την πρόβλεψη και βέλτιστη διαχείριση ασύρματων διαύλων. Παρουσιάστηκαν οι βασικοί παράγοντες στα προβλήματα των γνωστικών επικοινωνιών που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο της πρόβλεψης και αξιοποίησης ασύρματων διαύλων. Μελετήθηκαν οι διαφορετικοί τρόποι πρόσβασης στο φάσμα δευτερευόντων χρηστών και δόθηκε μια εκτενής περιγραφή των θεμάτων που απασχολούν την αγορά φάσματος.

Στο πλαίσιο της πρόβλεψης των ασύρματων διαύλων που είναι διαθέσιμοι για μετάδοση αναπτύχθηκε ένα σχήμα βασισμένο σε ενισχυτική μάθηση. Το σχήμα χρησιμοποιεί δύο εναλλακτικές μεθόδους μάθησης για τη σειρά ανίχνευσης των καναλιών με σκοπό το γρήγορο εντοπισμό διαθέσιμου καναλιού για μετάδοση και τη βέλτιστη αξιοποίηση των ευκαιριών του φάσματος. Οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να δρουν αυτόνομα και δεν εξαρτάται η λειτουργία τους από την επικοινωνία με άλλους δευτερεύοντες χρήστες ή με μια κεντρική οντότητα.

Στο πλαίσιο της αξιοποίησης ασύρματων διαύλων παρουσιάζονται περιπτώσεις αγοράς φάσματος με διαφορετικούς τύπους διαχειριστών φάσματος. Εφαρμόζοντας τη θεωρία συμβολαίων, προτάθηκε ένας βέλτιστος σχεδιασμός συμβολαίων για αποκλειστική πρόσβαση δευτερευόντων χρηστών σε τμήμα του εύρους ζώνης που κατέχει ένας ιδιοκτήτης φάσματος. Ο συγκεκριμένος ιδιοκτήτης φάσματος εξυπηρετεί συγκεκριμένο πλήθος πρωτευόντων χρηστών υπό προκαθορισμένα SLA σε συγκεκριμένο εύρος ζώνης. Οι δευτερεύοντες χρήστες έχουν την επιλογή να αποκτήσουν είτε ευκαιριακή πρόσβαση στο εύρος ζώνης των πρωτευόντων χρηστών είτε αποκλειστική πρόσβαση σε εύρος ζώνης που τους ανατίθεται μέσω συμβολαίων που ορίζονται από τον ιδιοκτήτη φάσματος. Το συγκεκριμένο πρόβλημα εξετάστηκε υπό συνθήκες πλήρους και μη πλήρους πληροφόρησης ως προς τα χαρακτηριστικά των δευτερευόντων χρηστών και ορίστηκε ο βέλτιστος σχεδιασμός συμβολαίων σε κάθε περίπτωση. Μελετήθηκαν επίσης δύο διαφορετικά μοντέλα αγοράς φάσματος με τη χρήση της θεωρίας παιγνίων σε περιβάλλον που περιλαμβάνει διαφορετικούς τύπους διαχειριστών φάσματος. Οι διαχειριστές φάσματος παρέχουν τη δυνατότητα σε μη συντονιζόμενους από κάποια κεντρική οντότητα δευτερεύοντες χρήστες να αποκτή-

σουν ευκαιριακή αλλά και αποκλειστική πρόσβαση στο φάσμα. Για τα δύο διαφορετικά μοντέλα διατυπώθηκε ένα αντίστοιχο παίγνιο δύο επιπέδων: (i) ένα παίγνιο επιλογής πρόσβασης των δευτερευόντων χρηστών και (ii) ένα παίγνιο εύρους ζώνης-τιμής κόστους των διαχειριστών φάσματος. Οι ισορροπίες και στα δύο μοντέλα εξετάστηκαν για διαφορετικές παραμέτρους του συστήματος.

Τόσο το θέμα της πρόβλεψης όσο και της αξιοποίησης ασύρματων διαύλων είναι θέματα που θα συνεχίσουν να απασχολούν την επιστημονική κοινότητα. Ενδιαφέρον θέμα επέκτασης της διδακτορικής διατριβής αποτελεί η εφαρμογή αλγορίθμων μάθησης σε περισσότερους χρήστες και η εξέταση της συσχέτισής τους. Η ανάγκη για αυτόνομα συστήματα οδηγεί στην αναζήτηση κατανεμημένων αλγορίθμων μάθησης και πρόβλεψης των καταστάσεων του περιβάλλοντος. Ως προς την αγορά φάσματος, το εύρος των ανοιχτών θεμάτων είναι μεγάλο. Στόχος είναι ο εντοπισμός των κατάλληλων μοντέλων που μπορούν να αποτελέσουν ρεαλιστικά μοντέλα αγοράς φάσματος πάνω στα οποία θα βασιστεί η λειτουργία των γνωστικών δικτύων επικοινωνιών. Τέλος, ανοιχτό είναι ακόμα το θέμα της εφαρμογής των γνωστικών επικοινωνιών στα δίκτυα 5ης γενιάς.

Παράρτημα Α

Αποδείξεις Θεωρίας συμβολαίων

A.1 Απόδειξη συνθήκης 5.1

Πρέπει να αποδειχθεί ότι

$$b_i > b_j \Rightarrow \pi_i > \pi_j \text{ and } \pi_i > \pi_j \Rightarrow b_i > b_j.$$

Ένα εφικτό συμβόλαιο ικανοποιεί τους περιορισμούς εφικτότητας. Επομένως, αν $b_i > b_j$, από την (5.18) προκύπτει:

$$\begin{aligned} b_j \cdot \phi_j - \pi_j &\geq b_i \cdot \phi_j - \pi_i \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \pi_i - \pi_j &\geq \phi_j \cdot (b_i - b_j) \stackrel{b_i > b_j, \phi_j > 0}{\Leftrightarrow} \\ \Leftrightarrow \pi_i - \pi_j &> 0 \Leftrightarrow \pi_i > \pi_j. \end{aligned}$$

Επίσης, αν $\pi_i > \pi_j$:

$$\begin{aligned} b_i \cdot \phi_i - \pi_i &\geq b_j \cdot \phi_i - \pi_j \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \phi_i \cdot (b_i - b_j) &\geq \pi_i - \pi_j \stackrel{\pi_i > \pi_j, \phi_i > 0}{\Leftrightarrow} \\ \Leftrightarrow b_i - b_j &> 0 \Leftrightarrow b_i > b_j. \end{aligned}$$

Είναι εύκολο να επιβεβαιωθεί ότι οι ισότητες ισχύουν όταν ισχύει και ισότητα στα αντίστοιχα μερίδια εύρους ζώνης.

A.2 Απόδειξη συνθήκης 5.2

Λόγω του περιορισμού κινήτρου της (5.18) προκύπτει:

$$\begin{aligned} b_i \cdot \phi_i - \pi_i &\geq b_j \cdot \phi_i - \pi_j \\ b_j \cdot \phi_j - \pi_j &\geq b_i \cdot \phi_j - \pi_i. \end{aligned}$$

Ωστόσο, από την (5.27)

$$\pi_i^* - \pi_{i-1}^* = \phi_i \cdot (b_i - b_{i-1}).$$

Επομένως,

$$\pi'_i - \pi_i^* \leq \pi'_{i-1} - \pi_{i-1}^*,$$

που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι $\pi'_{i-1} > \pi_{i-1}^*$.

Εφαρμόζοντας την (5.27) επαναληπτικά προκύπτει $\pi'_1 > \pi_1^*$.

Εφαρμόζοντας την (5.26):

$$\pi'_1 > \phi_1 \cdot b_1 \Leftrightarrow \phi_1 \cdot b_1 - \pi'_1 < 0,$$

που παραβιάζει την (5.17). Επομένως, το $\{\pi_1^*, \pi_2^*, \dots, \pi_\Lambda^*\}$, είναι το βέλτιστο σύνολο τιμών.

A.5 Απόδειξη βέλτιστου σχεδιασμού συμβολαίου μόνο για την υψηλότερη κλάση υπηρεσίας υπό πλήρη πληροφόρηση

Όταν προσφέρεται μόνο ένα συμβόλαιο στην κλάση υπηρεσίας Λ , η ανταμοιβή του PSO είναι

$$U_P^\Lambda = N_\Lambda \cdot b_\Lambda \cdot \phi_\Lambda - M \cdot [R_{PU} - K_{PU} \cdot (B - N_\Lambda \cdot b_\Lambda)/M]^2.$$

Όταν προσφέρονται περισσότερα συμβόλαια, το U_P δίνεται από τη σχέση

$$U_P = \sum_{\lambda=1}^{\Lambda} N_\lambda \cdot b_\lambda \cdot \phi_\lambda - M \cdot [R_{PU} - K_{PU} \cdot (B - \sum_{\lambda=1}^{\Lambda} N_\lambda \cdot b_\lambda)/M]^2.$$

Επομένως, πρέπει να αποδειχθεί ότι $U_P^\Lambda \geq U_P$. Επειδή το συνολικό εύρος ζώνης που προσφέρεται στους δευτερεύοντες χρήστες και στις δύο περιπτώσεις πρέπει να είναι ίδιο, πρέπει

$$B_{ESA} = \sum_{\lambda=1}^{\Lambda} N_\lambda \cdot b_\lambda = N_\Lambda \cdot b_\Lambda.$$

Επομένως,

$$N_\Lambda \cdot b_\Lambda \cdot \phi_\Lambda = B_{ESA} \cdot \phi_\Lambda.$$

Έτσι,

$$N_\Lambda \cdot b_\Lambda \cdot \phi_\Lambda \geq \sum_{\lambda=1}^{\Lambda} N_\lambda \cdot b_\lambda \cdot \phi_\lambda,$$

αφού $\phi_\Lambda \geq \phi_\lambda, \forall \lambda \in \{1, \dots, \Lambda\}$. Η τελευταία σχέση οδηγεί στο $U_P^\Lambda \geq U_P$.

Παράρτημα Β

Εύρεση σημείου ισορροπίας στο παίγνιο πρόσβασης στο φάσμα των SUs

Β.1 Εξέταση καταλληλότητας των ριζών της εξίσωσης των ανταμοιβών

Ένα σημείο ισορροπίας Nash μικτής στρατηγικής υπάρχει εφόσον κάποια από τις ρίζες της (6.10), συγκεκριμένα κάποιο από τα x_{ESA_1} και x_{ESA_2} , ικανοποιεί τους περιορισμούς

$$0 \leq x_{ESA_i} \leq 1, i = 1, 2. \quad (\text{B.1})$$

Στο πλαίσιο αυτό θεωρούνται δύο περιπτώσεις ως προς το πρόσημο της μεταβλητής $\alpha = N \cdot (C_{ESA} - C_{OSA})$

(i) $\alpha < 0$

Στην περίπτωση αυτή, $x_{ESA_1} \cdot x_{ESA_2} = r \cdot B_{ESA} / \alpha < 0$. Επομένως, $x_{ESA_1} < 0$. Τότε, μένει να εξεταστεί αν

$$0 \leq x_{ESA_2} \leq 1. \quad (\text{B.2})$$

Με αλγεβρικές πράξεις, μπορεί να δειχτεί πως η (B.2) ισχύει πάντα.

(ii) $\alpha > 0$

Στη περίπτωση αυτή, $x_{ESA_1} \cdot x_{ESA_2} > 0$ και εφόσον $x_{ESA_1} + x_{ESA_2} = (\alpha + \beta) / \alpha$, και οι δύο οι ρίζες της (6.10) είναι θετικές.

Πρέπει να εξεταστεί ποια από τις δύο ρίζες υπερβαίνει τη μονάδα. Με αλγεβρικές πράξεις μπορεί να δειχτεί ότι, η $x_{ESA_2} \leq 1$ και η $x_{ESA_1} > 1$ ισχύουν πάντα.

Ως συμπέρασμα, μεταξύ των δύο ριζών της εξίσωσης των ανταμοιβών, μόνο η x_{ESA_2} ικανοποιεί την (B.1), επομένως αποτελεί την πιθανότητα ισορροπίας Nash στο μικτής στρατηγικής παίγνιο επιλογής πρόσβασης N -SU.

Παράρτημα Γ

Δημοσιεύσεις

Διεθνή Επιστημονικά Περιοδικά με κριτές

1. A. Kordali and P. Cottis, "A reinforcement-learning based cognitive scheme for opportunistic spectrum access," *Wireless Personal Communications*, pp. 1–19, 2015.
2. A. Kordali and P. Cottis, "A Contract-Based Spectrum Trading Scheme for Cognitive Radio Networks Enabling Hybrid Access," *IEEE Access*, vol.3, pp.1531-1540, 2015.
3. A. Kordali and P. Cottis, "On Spectrum Trading for Cognitive Radio Networks with Hybrid Access: A Game-theoretic Approach," submitted in *IEEE Transactions on Wireless Communications*.

Επιστημονικά Συνέδρια με κριτές

1. A. Kordali and P. Cottis, "A Two-Stage spectrum access selection and pricing game for cognitive radio networks," *European Wireless 2015 (EW2015)*, Budapest, Hungary, May 2015.
2. A. Kordali and P. Cottis, "Cognitive channel selection for opportunistic spectrum access: A reinforcement-learning approach," *19th Panhellenic Conference on Informatics (PCI 2015)*, Athens, Greece, October 2015.

Δημοσιεύσεις σε Ευρωπαϊκές Ερευνητικές Δράσεις COST

1. A. Kordali and P. Cottis, "Reinforcement-learning algorithm for cognitive users operating as independent agents in uncertain environments," (poster) *3rd International Summer School on Cognitive Wireless Communications (COST Action IC0902)*, London, UK, Jul. 2013.

Βιβλιογραφία

- [1] J. Mitola and G. M. Jr., "Cognitive radio: making software radios more personal," *IEEE Personal Communications*, vol. 6, no. 4, pp. 13–18, Aug. 1999.
- [2] F. C. Commission, "Spectrum policy task force," *Washington, DC, USA, Tech. Rep., ET Docket No.02-155*, Nov. 2002.
- [3] "IEEE 802.15 wpan task group 2 (tg2)," *IEEE Standards Association*, <http://www.ieee802.org/15/pub/TG2.html>, May 2004.
- [4] "IEEE 802.22 working group on wireless regional area networks enabling rural broadband wireless access," *Available at: http://ieee802.org/22*.
- [5] I. Akyildiz, W.-Y. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty, "A survey on spectrum management in cognitive radio networks," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 46, no. 4, pp. 40–48, Apr. 2008.
- [6] S. Haykin, "Cognitive radio: brain-empowered wireless communications," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 2, pp. 201–220, Feb. 2005.
- [7] K.-C. Chen, Y.-J. Peng, N. Prasad, Y.-C. Liang, and S. Sun, "Cognitive radio network architecture: Part i – general structure," in *Proceedings of the 2Nd International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication*, ser. ICUIMC '08. New York, NY, USA: ACM, 2008, pp. 114–119. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1352793.1352817>
- [8] Q. Zhao and B. Sadler, "A survey of dynamic spectrum access," *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol. 24, no. 3, pp. 79–89, May 2007.
- [9] Z. H. E.Hossain, D. Niyato, *Dynamic Spectrum Access and Management in Cognitive Radio Networks*. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [10] I. F. Akyildiz, W.-Y. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty, "Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey," *Science Direct, Computer Networks*, vol. 50, pp. 2127–2159, 2006.

- [11] T. Yucek and H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, vol. 11, no. 1, pp. 116–130, First 2009.
- [12] A. Ghasemi and E. Sousa, "Spectrum sensing in cognitive radio networks: requirements, challenges and design trade-offs," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 46, no. 4, pp. 32–39, Apr. 2008.
- [13] E. Tragos, S. Zeadally, A. Fragkiadakis, and V. Siris, "Spectrum assignment in cognitive radio networks: A comprehensive survey," *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, vol. 15, no. 3, pp. 1108–1135, Third 2013.
- [14] S. Geirhofer, L. Tong, and B. Sadler, "Cognitive radios for dynamic spectrum access - dynamic spectrum access in the time domain: Modeling and exploiting white space," *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, no. 5, pp. 66–72, May 2007.
- [15] X. Li and S. A. (Reza) Zekavat, "Cognitive radio based spectrum sharing: Evaluating channel availability via traffic pattern prediction," *Communications and Networks, Journal of*, vol. 11, no. 2, pp. 104–114, Apr. 2009.
- [16] B. Canberk, I. Akyildiz, and S. Oktug, "Primary user activity modeling using first-difference filter clustering and correlation in cognitive radio networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 19, no. 1, pp. 170–183, Feb. 2011.
- [17] G. Yuan, R. Grammenos, Y. Yang, and W. Wang, "Performance analysis of selective opportunistic spectrum access with traffic prediction," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 4, pp. 1949–1959, May 2010.
- [18] H. Jiang, L. Lai, R. Fan, and H. Poor, "Optimal selection of channel sensing order in cognitive radio," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 1, pp. 297–307, Jan. 2009.
- [19] N. Chang and M. Liu, "Optimal channel probing and transmission scheduling for opportunistic spectrum access," *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, vol. 17, no. 6, pp. 1805–1818, Dec. 2009.
- [20] H. T. Cheng and W. Zhuang, "Simple channel sensing order in cognitive radio networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 29, no. 4, pp. 676–688, Apr. 2011.
- [21] C.-H. Liu, J. Tran, P. Pawelczak, and D. Cabric, "Traffic-aware channel sensing order in dynamic spectrum access networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 11, pp. 2312–2323, Nov. 2013.

- [22] G. Alnwaimi, K. Arshad, and K. Moessner, "Dynamic spectrum allocation algorithm with interference management in co-existing networks," *Communications Letters, IEEE*, vol. 15, no. 9, pp. 932–934, Sep. 2011.
- [23] A. T. Hoang and Y.-C. Liang, "Maximizing spectrum utilization of cognitive radio networks using channel allocation and power control," in *Vehicular Technology Conference, 2006. VTC-2006 Fall. 2006 IEEE 64th*, Sep. 2006, pp. 1–5.
- [24] A. T. Hoang, Y.-C. Liang, and M. Islam, "Maximizing throughput of cognitive radio networks with limited primary users' cooperation," in *Communications, 2007. ICC '07. IEEE International Conference on*, Jun. 2007, pp. 5177–5182.
- [25] S.-S. Byun, I. Balasingham, and X. Liang, "Dynamic spectrum allocation in wireless cognitive sensor networks: Improving fairness and energy efficiency," in *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC 2008-Fall. IEEE 68th*, Sep. 2008, pp. 1–5.
- [26] M. Anastasopoulos, A. Panagopoulos, and P. Cottis, "A distributed routing protocol for qos provisioning in wireless mesh networks," *Wireless Communications and Mobile Computing (Wiley Interscience)*, vol. 8, no. 10, pp. 1233–1245, Dec. 2008.
- [27] X. Li and S. A. R. Zekavat, "Distributed channel assignment in cognitive radio networks," in *Proceedings of the 2009 International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing: Connecting the World Wirelessly*, ser. IWCMC '09. New York, NY, USA: ACM, 2009, pp. 989–993. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1582379.1582596>
- [28] A. Plummer and S. Biswas, "Distributed spectrum assignment for cognitive networks with heterogeneous spectrum opportunities," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 11, no. 9, pp. 1239–1253, 2011. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1002/wcm.923>
- [29] L. Yu, C. Liu, and W. Hu, "Spectrum allocation algorithm in cognitive ad-hoc networks with high energy efficiency," in *Green Circuits and Systems (ICGCS), 2010 International Conference on*, Jun. 2010, pp. 349–354.
- [30] L. Ding, T. Melodia, S. Batalama, J. Matyjas, and M. Medley, "Cross-layer routing and dynamic spectrum allocation in cognitive radio ad hoc networks," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 59, no. 4, pp. 1969–1979, May 2010.
- [31] M. Shin, S. Lee, and Y. Kim, "Distributed channel assignment for multi-radio wireless networks," in *Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS), 2006 IEEE International Conference on*, Oct 2006, pp. 417–426.

- [32] M. Gong, S. Midkiff, and S. Mao, "Design principles for distributed channel assignment in wireless ad hoc networks," in *Communications, 2005. ICC 2005. 2005 IEEE International Conference on*, vol. 5, May 2005, pp. 3401–3406 Vol. 5.
- [33] M. Lopez-Martínez, J. Alcaraz, J. Vales-Alonso, and J. Garcia-Haro, "Automated spectrum trading mechanisms: understanding the big picture," *Wireless Networks*, vol. 21, no. 2, pp. 685–708, 2015.
- [34] J. Jia, Q. Zhang, Q. Zhang, and M. Liu, "Revenue generation for truthful spectrum auction in dynamic spectrum access," in *Proceedings of the Tenth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, ser. MobiHoc '09. New York, NY, USA: ACM, 2009, pp. 3–12. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1530748.1530751>
- [35] D. Niyato and E. Hossain, "Spectrum trading in cognitive radio networks: A market-equilibrium-based approach," *Wireless Communications, IEEE*, vol. 15, no. 6, pp. 71–80, Dec. 2008.
- [36] O. Simeone, I. Stanojev, S. Savazzi, Y. Bar-Ness, U. Spagnolini, and R. Pickholtz, "Spectrum leasing to cooperating secondary ad hoc networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 26, no. 1, pp. 203–213, Jan. 2008.
- [37] J. Zhang and Q. Zhang, "Stackelberg game for utility-based cooperative cognitive radio networks," in *Proceedings of the Tenth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, ser. MobiHoc '09. New York, NY, USA: ACM, 2009, pp. 23–32. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1530748.1530753>
- [38] D. Li, Y. Xu, X. Wang, and M. Guizani, "Coalitional game theoretic approach for secondary spectrum access in cooperative cognitive radio networks," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 10, no. 3, pp. 844–856, Mar. 2011.
- [39] Y. Yi, J. Zhang, Q. Zhang, T. Jiang, and J. Zhang, "Cooperative communication-aware spectrum leasing in cognitive radio networks," in *New Frontiers in Dynamic Spectrum, 2010 IEEE Symposium on*, Apr. 2010, pp. 1–11.
- [40] Y. Yan, J. Huang, and J. Wang, "Dynamic bargaining for relay-based cooperative spectrum sharing," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 31, no. 8, pp. 1480–1493, Aug. 2013.
- [41] X. Feng, G. Sun, X. Gan, F. Yang, X. Tian, X. Wang, and M. Guizani, "Cooperative spectrum sharing in cognitive radio networks: A distributed matching approach," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 62, no. 8, pp. 2651–2664, Aug 2014.

- [42] T. Tran and H. Kong, "Exploitation of diversity in cooperative spectrum sharing with the four-way relaying of transmission," *Wireless Personal Communications*, vol. 77, no. 4, pp. 2959–2980, 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/s11277-014-1679-1>
- [43] L. Duan, L. Gao, and J. Huang, "Contract-based cooperative spectrum sharing," in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), 2011 IEEE Symposium on*, May 2011, pp. 399–407.
- [44] L. G. Lingjie Duan and J. Huang, "Cooperative spectrum sharing: A contract-based approach," *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, vol. 13, no. 1, pp. 174–187, Jan. 2014.
- [45] C. Shao, H. Roh, and W. Lee, "Aspiration level-based strategy dynamics on the coexistence of spectrum cooperation and leasing," *Communications Letters, IEEE*, vol. 18, no. 1, pp. 70–73, Jan. 2014.
- [46] Y. Han, S. H. Ting, and A. Pandharipande, "Cooperative spectrum sharing protocol with secondary user selection," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 9, no. 9, pp. 2914–2923, Sep. 2010.
- [47] Y. Zhao, S. Mao, J. O. Neel, and J. Reed, "Performance evaluation of cognitive radios: Metrics, utility functions, and methodology," *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 4, pp. 642–659, Apr. 2009.
- [48] A. Gopinathan and Z. Li, "Strategyproof auctions for balancing social welfare and fairness in secondary spectrum markets," in *INFOCOM, 2011 Proceedings IEEE*, Apr. 2011, pp. 3020–3028.
- [49] G. Zhang, K. Yang, J. Song, and Y. Li, "Fair and efficient spectrum splitting for unlicensed secondary users in cooperative cognitive radio networks," *Wireless Personal Communications*, vol. 71, no. 1, pp. 299–316, 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/s11277-012-0816-y>
- [50] S. Jayaweera and T. Li, "Dynamic spectrum leasing in cognitive radio networks via primary-secondary user power control games," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 6, pp. 3300–3310, Jun. 2009.
- [51] S. Jayaweera, G. Vazquez-Vilar, and C. Mosquera, "Dynamic spectrum leasing: A new paradigm for spectrum sharing in cognitive radio networks," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 59, no. 5, pp. 2328–2339, Jun 2010.

- [52] G. Vazquez-Vilar, C. Mosquera, and S. Jayaweera, "Primary user enters the game: Performance of dynamic spectrum leasing in cognitive radio networks," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 9, no. 12, pp. 1–5, Dec. 2010.
- [53] Z. L. Yuefei Zhu, Baochun Li, "Truthful spectrum auction design for secondary networks," in *2012 Proceedings IEEE INFOCOM*, 2012.
- [54] J. Jia, Q. Zhang, Q. Zhang, and M. Liu, "Revenue generation for truthful spectrum auction in dynamic spectrum access," in *Proceedings of the Tenth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, ser. MobiHoc '09. New York, NY, USA: ACM, 2009, pp. 3–12. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1530748.1530751>
- [55] J. Huang, R. Berry, and M. Honig, "Auction-based spectrum sharing," *Mobile Networks and Applications*, vol. 11, no. 3, pp. 405–408, 2006. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/s11036-006-5192-y>
- [56] J. Huang, Z. Han, M. Chiang, and H. Poor, "Auction-based resource allocation for cooperative communications," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 26, no. 7, pp. 1226–1237, Sep. 2008.
- [57] M. Tehrani and M. Uysal, "Auction based spectrum trading for cognitive radio networks," *Communications Letters, IEEE*, vol. 17, no. 6, pp. 1168–1171, Jun. 2013.
- [58] L. Gao, X. Wang, Y. Xu, and Q. Zhang, "Spectrum trading in cognitive radio networks: A contract-theoretic modeling approach," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 29, no. 4, pp. 843–855, Apr. 2011.
- [59] D. M. Kalathil and R. Jain, "Spectrum sharing through contracts for cognitive radios," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 12, no. 10, pp. 1999–2011, 2013.
- [60] L. Gao, J. Huang, Y.-J. Chen, and B. Shou, "An integrated contract and auction design for secondary spectrum trading," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 31, no. 3, pp. 581–592, Mar. 2013.
- [61] J. Yin, G. Sun, and X. Wang, "Spectrum trading in cognitive radio network: A two-stage market based on contract and stackelberg game," in *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2013 IEEE*, Apr. 2013, pp. 1679–1684.
- [62] S.-P. Sheng and M. Liu, "Profit incentive in trading nonexclusive access on a secondary spectrum market through contract design," *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, vol. 22, no. 4, pp. 1190–1203, Aug. 2014.

- [63] H. Mutlu, M. Alanyali, and D. Starobinski, "Spot pricing of secondary spectrum usage in wireless cellular networks," in *INFOCOM 2008. The 27th Conference on Computer Communications. IEEE*, Apr. 2008.
- [64] F. Wang, M. Krunz, and S. Cui, "Price-based spectrum management in cognitive radio networks," *Selected Topics in Signal Processing, IEEE Journal of*, vol. 2, no. 1, pp. 74–87, Feb. 2008.
- [65] L. Yang, H. Kim, J. Zhang, M. Chiang, and C. W. Tan, "Pricing-based spectrum access control in cognitive radio networks with random access," in *INFOCOM, 2011 Proceedings IEEE*, Apr. 2011, pp. 2228–2236.
- [66] H. Yoon, J. Hwang, and M. B. Weiss, "An analytic research on secondary-spectrum trading mechanisms based on technical and market changes," *Computer Networks*, vol. 56, no. 1, pp. 3 – 19, 2012. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128611001848>
- [67] Y. Tan, S. Sengupta, and K. Subbalakshmi, "Competitive spectrum trading in dynamic spectrum access markets: A price war," in *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010), 2010 IEEE*, Dec. 2010, pp. 1–5.
- [68] D. Niyato and E. Hossain, "Competitive pricing for spectrum sharing in cognitive radio networks: Dynamic game, inefficiency of nash equilibrium, and collusion," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 26, no. 1, pp. 192–202, Jan. 2008.
- [69] K. Zhu, D. Niyato, P. Wang, and Z. Han, "Dynamic spectrum leasing and service selection in spectrum secondary market of cognitive radio networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 3, pp. 1136–1145, Mar. 2012.
- [70] Z. Han, R. Zheng, and H. Poor, "Repeated auctions with bayesian nonparametric learning for spectrum access in cognitive radio networks," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 10, no. 3, pp. 890–900, Mar. 2011.
- [71] K. Jagannathan, I. Menache, E. Modiano, and G. Zussman, "Non-cooperative spectrum access; the dedicated vs. free spectrum choice," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 30, no. 11, pp. 2251–2261, Dec. 2012.
- [72] J. Elias, F. Martignon, L. Chen, and E. Altman, "Joint operator pricing and network selection game in cognitive radio networks: Equilibrium, system dynamics and price of anarchy," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 9, pp. 4576–4589, 2013.

- [73] C. Do, N. Tran, Z. Han, L. Le, S. Lee, and C. Hong, "Optimal pricing for duopoly in cognitive radio networks: Cooperate or not cooperate?" *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 5, pp. 2574–2587, 2014.
- [74] N. Tran, L. B. Le, S. Ren, Z. Han, and C. S. Hong, "Joint pricing and load balancing for cognitive spectrum access: Non-cooperation versus cooperation," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 33, no. 5, pp. 972–985, May 2015.
- [75] C.-X. Wang, F. Haider, X. Gao, X.-H. You, Y. Yang, D. Yuan, H. Aggoune, H. Haas, S. Fletcher, and E. Hepsaydir, "Cellular architecture and key technologies for 5g wireless communication networks," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 52, no. 2, pp. 122–130, Feb. 2014.
- [76] J. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. Hanly, A. Lozano, A. Soong, and J. Zhang, "What will 5g be?" *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 32, no. 6, pp. 1065–1082, Jun. 2014.
- [77] R. Sutton and A. Barto, *Reinforcement Learning*. Cambridge, MA: The MIT Press, 1998.
- [78] C. Watkins and P. Dayan, "Technical note: Q-learning," *Machine Learning*, vol. 8, no. 3-4, pp. 279–292, 1992.
- [79] S. Singh, T. Jaakkola, M. L. Littman, and C. Szepesvári, "Convergence results for single-step on-policy reinforcement-learning algorithms," in *MACHINE LEARNING*, 1998, pp. 287–308.
- [80] L. P. Kaelbling, M. L. Littman, and A. W. Moore, "Reinforcement learning: a survey," *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 4, pp. 237–285, 1996.
- [81] Osborne, M. J., and A. Rubinstein, *A Course in Game Theory*. Cambridge, USA: The MIT Press, 1994.
- [82] J. von Neumann and O. Morgenstern, *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton, New Jersey, USA: Princeton University Press, 1944.
- [83] J. F. Nash, "Equilibrium points in n-person games," in *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1950.
- [84] J. Nash, "Non-cooperative games," *The Annals of Mathematics, 2nd Ser.*, vol. 54(2), pp. 286–295, Sep. 1951.
- [85] R. Gibbons, *A Primer in Game Theory*. Prentice Hall, 1992.
- [86] M. Nowak, *Evolutionary Dynamics: Exploring the Equations of Life*. Harvard University Press, 2006.

- [87] J. Weibull, *Evolutionary Game Theory*. MIT Press, 1996.
- [88] P. Taylor and L. Jonker, “evolutionary stable strategies and game dynamics,” *Mathematical Biosciences*, vol. 16, pp. 455–484, 1978.
- [89] A. S. 1776, *The Wealth of Nations*. New York: Prometheus Books, 1991.
- [90] B. Patrick and D. Matthias, *Contract Theory*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2004.
- [91] J. E. Vidaurre, “Literature review on contract theory and regulation,” *ECO 5906-Advanced Individual Study*, Apr. 2006.
- [92] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*. New York: Cambridge University Press, 2004.
- [93] D. P. Bertsekas, *Constrained Optimization and Lagrange Multiplier Methods*. Belmont, USA: Athena Scientific, 1982.
- [94] C. M. S. Mokhtar S. Bazaraa, Hanif D. Sherali, *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms (3rd ed.)*. John Wiley & Sons, 2006.
- [95] S. Dong, “Methods for constrained optimization,” *Massachusetts Institute of Technology*, 2006.
- [96] Y.-C. Liang, Y. Zeng, E. Peh, and A. T. Hoang, “Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 4, pp. 1326–1337, Apr. 2008.
- [97] A. Goldsmith and S.-G. Chua, “Variable-rate variable-power mqam for fading channels,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 45, no. 10, pp. 1218–1230, Oct. 1997.

Βιογραφικό

Η Αγγελική Κορδαλή γεννήθηκε στην Αθήνα στις 5 Μαρτίου του 1985. Το Φεβρουάριο του 2008 απέκτησε το δίπλωμα του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού & Μηχανικού Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με βαθμό διπλώματος 8.78. Η διπλωματική της εργασία είχε τίτλο "Μελέτη του δικτύου TETRA και ανάπτυξη δικτυακής εφαρμογής αναζήτησης σε βάση δεδομένων" με επιβλέποντα τον κ. Διονύσιο-Δημήτριο Κουτσούρη, Καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το 2011 έλαβε το Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης «Τεχνο-οικονομικά Συστήματα» από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΣΗΜΜΥ) και το Πανεπιστήμιο Πειραιώς (Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας) με κατεύθυνση Διοίκηση Τεχνολογικών Συστημάτων και βαθμό Διπλώματος 8.50. Τον Οκτώβριο του 2008 έγινε δεκτή ως Υποψήφια Διδάκτωρ της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Από τον Οκτώβριο 2008 έως τον Οκτώβριο 2010 διετέλεσε Υπότροφος του Ιδρύματος Κρατικών Υποτροφιών (Ι.Κ.Υ.) ενώ η διδακτορική της έρευνα συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) - Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: "Ηράκλειτος II. Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου". Κύρια ερευνητικά ενδιαφέροντα της αποτελούν τα γνωστικά δίκτυα επικοινωνιών και η εφαρμογή τους σε θέματα πρόβλεψης και αξιοποίησης ασύρματων διαύλων με τη χρήση θεωρίας παιγνίων, θεωρίας συμβολαίων και θεωρίας βελτιστοποίησης.

Υπήρξε ενεργό μέλος της ομάδας Ασύρματων και Δορυφορικών επικοινωνιών του Εργαστηρίου Ασύρματου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων. Συμμετείχε στην επίβλεψη τριών διπλωματικών εργασιών, ενώ συμμετείχε ως βοηθός στο Εργαστήριο Κινητών Ραδιοεπικοινωνιών για τη διδασκαλία του εργαστηριακού μέρους του μαθήματος "Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες". Από το Φεβρουάριο του 2014 έως σήμερα εργάζεται στη NOKIA Networks. Είναι, επίσης, μέλος του Τεχνικού Επιμελητηρίου της Ελλάδος από τον Ιούνιο του 2008.

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



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ
2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ