

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ & ΔΙΚΤΥΩΝ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ



Βέλτιστη Ανάθεση Πόρων σε Ασύρματα Πολυκυτταρικά Δίκτυα με
Κατανεμημένους Αλγορίθμους.

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μηλιώτης Βασίλειος
Επιβλέπων: κ. Ι. Κουτσόπουλος

Οκτώβριος 2008



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 6689/1
Ημερ. Εισ.: 19-01-2009
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: Δ
004.6
ΜΗΛ

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ & ΔΙΚΤΥΩΝ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**



**Βέλτιστη Ανάθεση Πόρων σε Ασύρματα Πολυκυτταρικά Δίκτυα με
Κατανεμημένους Αλγορίθμους.**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μηλιώτης Βασίλειος
Επιβλέπων: κ. Ι. Κουτσόπουλος

Οκτώβριος 2008

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Ιορδάνη Κουτσόπουλο για τη στενή καθοδήγησή του στην εκπόνηση της εργασίας αυτής, για την επιμονή και την υπομονή του. Αυτή η χρονική περίοδος ήταν για μένα μία πρωτόγνωρη εκπαιδευτική εμπειρία και μία σημαντική εισαγωγή στον τρόπο αντιμετώπισης επιστημονικών προβλημάτων με μεθοδικότητα, συστηματικότητα και κυρίως δημιουργικότητα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον πολύ καλό φίλο και συνάδελφο Γιώργο Ιωσιφίδη, υποψήφιο Διδάκτορα του τμήματος, για τη συμπαράσταση και τις εύστοχες συμβουλές του καθόλη τη διάρκεια της συμμετοχής μου στο Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών του τμήματος.

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
1 Εισαγωγή	5
1.1 Βασικές Έννοιες των Cognitive Radios.....	5
1.2 Τεχνικές Εξέτασης και Προσπέλασης του Φάσματος.....	8
1.3 Η Αρχιτεκτονική ενός Cognitive Radio.....	8
1.4 Η εξέταση του φάσματος στο IEEE 802.22 Standard.....	9
1.5 Συνεισφορά.....	10
2 Επισκόπηση Βιβλιογραφίας και Ερευνητικά Προβλήματα	13
2.1 Εισαγωγή.....	13
2.2 Κυριότερες Εργασίες	14
2.2.1 Q. Zhao, L. Tong et. Al	14
2.2.2 K. Zhao, B. Krishnamachari, K. Liu	17
2.2.3 V. Poor, H.E. Gamal et. Al	18
2.3 Άλλες Σχετικές Εργασίες	19
2.4 Ερευνητικά Προβλήματα σε Cognitive Radios	20
3 Ευριστικοί Αλγόριθμοι Άμεσης Ανταμοιβής	23
3.1 Εισαγωγή.....	23
3.2 Μοντέλο Συστήματος	24
3.3 Ευριστικοί Αλγόριθμοι	24
3.4 Αποτελέσματα Προσομοίωσης.....	27
4 Ευριστικοί Αλγόριθμοι Αποτίμησης της Κατάστασης των Καναλιών	31
4.1 Εισαγωγή.....	31
4.2 Μοντέλο Συστήματος	32
4.3 Ευριστικοί Αλγόριθμοι	32
4.4 Αλγόριθμος Εκτίμησης των Παραμέτρων των Καναλιών.....	36
4.5 Αποτελέσματα Προσομοίωσης.....	37
5 Συμπεράσματα	45

Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσης εργασίας επικεντρώνεται στην ανάπτυξη αλγορίθμων εξέτασης και πρόσβασης στο ασύρματο μέσο για δίκτυα Cognitive Radios, μίας νέας τεχνολογίας, η οποία προσπαθεί να μετριάσει το αυξανόμενο πρόβλημα του κορεσμού του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας αναπτύσσονται βασικές έννοιες και τεχνολογίες σχετικές με τα Cognitive Radios καθώς και η επικρατούσα αρχιτεκτονική τους, ενώ στο δεύτερο μία βιβλιογραφική επισκόπηση των κυριότερων εργασιών που έχουν δημοσιευθεί, καθώς και τα κυριότερα ερευνητικά προβλήματα που έχουν προκύψει. Στο τρίτο κεφάλαιο προτείνεται μία ομάδα ευριστικών αλγορίθμων άμεσης ανταμοιβής που εξετάζει τις ευκαιρίες μετάδοσης ενός Cognitive Radio χρήστη, παραβλέποντας το πρόβλημα του συγχρονισμού πομπού – δέκτη, τόσο για την περίπτωση που τα στατιστικά χαρακτηριστικά των προς εξέταση και πρόσβαση καναλιών είναι γνωστά, όσο και για την περίπτωση άγνωστου ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος. Για το ίδιο πρόβλημα, στο τέταρτο κεφάλαιο αναπτύσσεται μία ομάδα ευριστικών αλγορίθμων αποτίμησης της ποιότητας των καναλιών, οι οποίοι καθιστούν ένα Cognitive Radio σύστημα ικανό να αποφασίζει εάν θα μεταδώσει μέσω του καναλιού που εξετάζει ή εάν θα περιμένει, έχοντας την εκτίμηση ότι σε σύντομο χρονικό διάστημα θα του δοθεί καλύτερη ευκαιρία μετάδοσης από την παρούσα. Μέσω προσομοιώσεων διερευνείται η συμπεριφορά και η απόδοση των αλγορίθμων ευκαιριακής χρήσης του φάσματος, που προτείνονται στα προαναφερθέντα κεφάλαια.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Βασικές Έννοιες των Cognitive Radios

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα αποτελεί ένα φυσικό πόρο, η χρήση του οποίου αδειοδοτείται ανά τον κόσμο από τις κυβερνήσεις. Η εμπορική χρήση του έχει επιφέρει σημαντικές αλλαγές στον τρόπο που αντιλαμβανόμαστε πλέον την επικοινωνία. Στην εποχή μας οι απαιτήσεις σε τηλεπικοινωνιακές και ασύρματες δικτυακές υπηρεσίες παρουσιάζουν κατακόρυφη αύξηση, λόγω της μεταλλαγής της κοινωνίας μας σε κοινωνία της πληροφορίας, με συνέπεια την υπερεκμετάλλευση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Το γεγονός αυτό επιφέρει σημαντικές δυσκολίες στην εμφάνιση νέων υπηρεσιών, αφού οι ανάγκες τους για χρήση κάποιου τμήματος του φάσματος δύσκολα θα ικανοποιηθούν.

Το περιορισμένο διαθέσιμο φάσμα και η μη αποδοτική χρήση του, κατέστησαν επιτακτική ανάγκη την ανάπτυξη ενός νέου τηλεπικοινωνιακού συστήματος για την ευκαιριακή αξιοποίηση του υπάρχοντος φάσματος. Έτσι η ερευνητική δράση για την επίλυση αυτού του προβλήματος αυξήθηκε σημαντικά. Μετρήσεις, που έγιναν σε πλούσιο σε ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές αστικό περιβάλλον [1], έδειξαν ότι η χρονική και γεωγραφική χρήση του φάσματος κυμαίνεται από 15% έως 85%. Συνεπώς κατά ένα ποσοστό του χώρου και του χρόνου, που ποικίλει, οι αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων παραμένουν αχρησιμοποίητες. Η μεταβλητή χρήση του φάσματος που παρατηρήθηκε, οδήγησε στο συμπέρασμα ότι υπάρχουν “φασματικές οπές” [2], οι οποίες θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν. Ο όρος “φασματική οπή”, χρησιμοποιείται για να περιγράψει μία ζώνη συχνοτήτων, η οποία είναι μισθωμένη από κάποιο χρήστη, αλλά σε κάποιο χρονικό διάστημα και σε συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές δε χρησιμοποιείται από αυτόν.

Οι χρήστες, οι οποίοι μισθώνουν για τη χρήση τμήματος του φάσματος μέσω των υπεύθυνων για την ανάθεση του φάσματος υπηρεσιών, ονομάζονται πρωτεύοντες χρήστες, ενώ αυτοί που προσπαθούν να εκμεταλλευθούν ευκαιριακά τις “φασματικές οπές” αποτελούν τους δευτερεύοντες χρήστες. Η υπηρεσία που είναι υπεύθυνη για τη διαχείριση του φάσματος στις Η.Π.Α. (Federal Communication Commission – F.C.C.), αντιλαμβανόμενη την επερχόμενη συμφόρηση στη χρήση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος άνοιξε το δρόμο για τη χρήση του από δευτερεύοντες χρήστες, με την προϋπόθεση ότι δε θα προκαλούν παρεμβολές στους πρωτεύοντες [3].

Η ιδέα για τη δημιουργία συστημάτων ευκαιριακής χρήσης και πρόσβασης στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, αντιμετωπίζεται ως μία πρωτοποριακή προσέγγιση για τη βελτίωση της χρήσης του πολύτιμου αυτού πόρου, ιδιαίτερα μετά τη διδακτορική διατριβή του J.Mitola III [4], ο οποίος είναι και ο πρώτος που εισήγαγε τον όρο των Γνωστικών Ασύρματων Συσκευών (Cognitive Radios). Στη διατριβή του ορίζει τα Cognitive Radios ως συσκευές οι οποίες μπορούν να αλλάζουν τις παραμέτρους εκπομπής τους, βασιζόμενες στην αλληλεπίδρασή τους με το περιβάλλον στο οποίο λειτουργούν.

Συνεπώς, για να μπορεί ένα Cognitive Radio να εκμεταλλεύεται το φάσμα ευκαιριακά, είναι αναγκαίο να πληροί κάποιες γνωστικές λειτουργίες [5]. Έτσι η τεχνολογία που θα χρησιμοποιεί θα πρέπει να το καθιστά ικανό:

(α) να διακρίνει τα τμήματα του φάσματος τα οποία είναι διαθέσιμα και να ανιχνεύει την παρουσία πρωτευόντων χρηστών, όταν λειτουργεί σε αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων (spectrum sensing)

(β) να επιλέγει το καλύτερο διαθέσιμο κανάλι (spectrum management)

(γ) να συντονίζει την πρόσβασή σε κάποιο κανάλι στην περίπτωση ταυτόχρονης λειτουργίας πολλών Cognitive Radios (spectrum sharing) και

(δ) να εκκενώνει το χρησιμοποιούμενο κανάλι όταν ανιχνεύεται η ύπαρξη πρωτεύοντων χρηστών (spectrum mobility).

Τα βήματα που απαιτούνται για την προσαρμόσιμη λειτουργία ενός Cognitive Radio στα ελεύθερα τμήματα του φάσματος αναφέρονται ως γνωστικός κύκλος (cognitive cycle) [4]. Οι τρεις κύριες λειτουργίες που εκτελούνται στο γνωστικό κύκλο είναι:

(α) Η εξέταση του φάσματος (spectrum sensing), κατά την οποία το Cognitive Radio ελέγχει τις διαθέσιμες ζώνες φάσματος, καταγράφει τα χαρακτηριστικά τους και ανιχνεύει έπειτα τις “φασματικές οπές”.

(β) Η ανάλυση του φάσματος (spectrum analysis), κατά την οποία γίνεται εκτίμηση των χαρακτηριστικών των “φασματικών οπών” από το αποτέλεσμα της εξέτασης τους.

(γ) Η φασματική απόφαση (spectrum decision), στην οποία το Cognitive Radio προσδιορίζει τη ζώνη συχνοτήτων που θα χρησιμοποιήσει, καθώς και το ρυθμό εκπομπής, ανάλογα με τα φασματικά χαρακτηριστικά της καθεμίας και των απαιτήσεων του.

Μόλις αποφασιστεί η προς χρήση ζώνη συχνοτήτων, μπορεί να ξεκινήσει η επικοινωνία. Εντούτοις, δεδομένου ότι το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον αλλάζει με την πάροδο του χρόνου και την αλλαγή του χώρου, το Cognitive Radio θα πρέπει να παρακολουθεί τις αλλαγές αυτές, ώστε αν το χρησιμοποιούμενο κανάλι καταστεί μη διαθέσιμο να μπορεί να ενεργοποιήσει τη λειτουργία μεταπήδησης σε άλλο διαθέσιμο κανάλι. Έτσι θα μπορεί να παρέχεται αδιάκοπη μετάδοση. Οποιαδήποτε αλλαγή κατά τη διάρκεια της μετάδοσης, όπως η εμφάνιση πρωτεύοντος χρήστη, η μετακίνηση του Cognitive radio ή κάποια μεταβολή στην τηλεπικοινωνιακή κίνηση, μπορεί να ενεργοποιήσει τη μεταπήδηση σε άλλο κανάλι.

1.2 Τεχνικές Εξέτασης και Προσπέλασης του Φάσματος

Η αντιμετώπιση του τρόπου εξέτασης και προσπέλασης του φάσματος σε ένα δίκτυο από Cognitive Radios, εξαρτάται κυρίως από την αρχική παραδοχή της αρχιτεκτονικής που θα υλοποιηθεί. Έτσι, σε ένα ιεραρχικά δομημένο δίκτυο, η εξέταση του φάσματος μπορεί να γίνεται κατανεμημένα από κάθε χρήστη ξεχωριστά, τα αποτελέσματα της αναζήτησης του κάθε χρήστη να αποστέλλονται σε ένα συντονιστή του δικτύου και αυτός τελικά να αποφασίζει με ποιόν τρόπο θα γίνει η ανάθεση των ελεύθερων καναλιών.

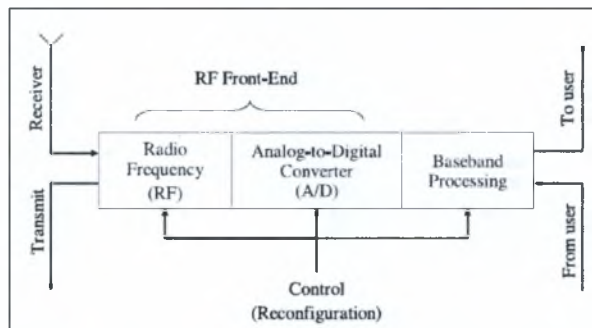
Στην περίπτωση ενός ad hoc δικτύου από Cognitive Radios, η οποία αποτελεί και το αντικείμενο μελέτης της παρούσης εργασίας, κάθε χρήστης λειτουργεί αυτόνομα, δηλαδή βασιζόμενος στα δικά του αποτελέσματα εξέτασης του φάσματος σχηματίζει την απόφαση της προσπέλασης του καναλιού.

Ένα πρόβλημα της καθημερινής ζωής, ανάλογο με αυτό που αντιμετωπίζεται στην περίπτωση ενός αυτόνομου χρήστη Cognitive Radio, αποτελεί το πρόβλημα αναζήτησης κατοικίας προς ενοικίαση. Ένα άτομο, που ψάχνει διαμέρισμα για να νοικιάσει, επισκέπτεται διαδοχικά κάποια σπίτια με σκοπό να βρει το καλύτερο δυνατό που να ικανοποιεί τα προσωπικά του κριτήρια, όπως για παράδειγμα να έχει γρήγορη πρόσβαση σε μαζικά μέσα μεταφοράς, να έχει ήσυχη γειτονιά, να είναι καλοκατασκευασμένο ή να είναι ευρύχωρο. Το πρόβλημα είναι ότι ταυτόχρονα υπάρχουν και άλλα άτομα τα οποία ψάχνουν αντίστοιχα ένα σπίτι για ενοικίαση. Έτσι, μόλις το υπόψη άτομο βρει ένα σπίτι που το ικανοποιεί μπαίνει στο δίλημμα εάν θα συνεχίσει να ψάχνει για κάποιο ακόμη καλύτερο λαμβάνοντας το ρίσκο ότι όταν θα επιστρέψει μπορεί να το βρει κατειλημμένο ή εάν θα εγκατασταθεί εκεί.

1.3 Η Αρχιτεκτονική ενός Cognitive Radio

Η αρχιτεκτονική ενός πομποδέκτη Cognitive Radio [5] διαφοροποιείται από την αρχιτεκτονική ενός κοινού πομποδέκτη ώστε να του δίνει τη δυνατότητα να προσαρμόζεται στο ευμετάβλητο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον. Τα κύρια στοιχεία ενός

CR πομποδέκτη είναι το RF front-end και η μονάδα επεξεργασίας βασικής ζώνης, όπως φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα [5].



Σχήμα 1.1: Η αρχιτεκτονική ενός Cognitive Radio.

Κάθε ένα από τα στοιχεία αυτά αναπροσαρμόζεται μέσω ενός control bus, ώστε να μπορούν να λειτουργούν σε διαφορετικές συχνότητες. Η καινοτομία στους CR πομποδέκτες είναι η δυνατότητα εξέτασης ενός μεγάλου τμήματος του φάσματος. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση κεραιών ευρείας ζώνης, ενισχυτών ισχύος και προσαρμοστικών φίλτρων. Έτσι το RF front-end του CR θα έχει τη δυνατότητα να συντονίζεται σε οποιαδήποτε συχνότητα ενός μεγάλου τμήματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Μία τέτοια αρχιτεκτονική βοηθάει στη συγκέντρωση πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο για την κατάσταση του τμήματος του φάσματος που εξετάζεται, με την προϋπόθεση ότι η ευαισθησία του RF front-end επιτρέπει την ανίχνευση ακόμη και ασθενών μεταδόσεων από πρωτεύοντες χρήστες.

1.4 Η Εξέταση του φάσματος στο IEEE 802.22 Standard

Το 802.22 standard [7] αναφέρεται σε ένα ιεραρχικής δομής Cognitive Radio δίκτυο που θα αποτελείται από σταθμούς βάσης και συσκευές χρηστών, οι οποίες θα λειτουργούν στις συχνότητες που χρησιμοποιούνται στις Η.Π.Α. για τηλεοπτικές μεταδόσεις (54-862 MHz). Το κάθε κανάλι έχει εύρος ζώνης 6 MHz και η ταχύτητα μετάδοσης με χρήση OFDMA διαμόρφωσης θα είναι περίπου 19 Mbit/s σε εμβέλεια

περίπου 30 Km. Για μεγαλύτερες ταχύτητες θα γίνεται χρήση του "Channel Bonding", δηλαδή θα χρησιμοποιούνται περισσότερα του ενός κανάλια για μετάδοση.

Όσον αφορά το στρώμα ελέγχου πρόσβασης στο ασύρματο μέσο (MAC layer), κάθε φορά που μία συσκευή χρήστη ξεκινάει να λειτουργεί θα εξετάζει ποια κανάλια είναι διαθέσιμα και θα συνδέεται σε ένα σταθμό βάσης. Η εξέταση του φάσματος θα γίνεται με δύο τρόπους, με "in-band" και με "out-of-band" εξέταση. Η "in-band" εξέταση αφορά στην εξέταση του καναλιού που χρησιμοποιείται για την επικοινωνία του χρήστη με το σταθμό βάσης, ενώ η "out-of-band" για την εξέταση των υπόλοιπων καναλιών. Δύο διαφορετικά είδη εξέτασης θα χρησιμοποιούνται και στην "in-band" και στην "out-of-band" εξέταση, η γρήγορη (fast sensing) και η ακριβής εξέταση (fine sensing). Η γρήγορη εξέταση θα γίνεται με ταχύτητα της τάξης του 1ms ανά κανάλι, ενώ η ακριβής εξέταση θα διαρκεί περίπου 25ms ανά κανάλι. Η σειρά με την οποία θα εξετάζονται τα κανάλια δεν είναι καθορισμένη.

Στην παρούσα εργασία προτείνονται ευριστικοί αλγόριθμοι εξέτασης του φάσματος, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό της σειράς με την οποία μπορούν να εξετάζονται τα κανάλια σε μία συσκευή που λειτουργεί με το 802.22 standard.

1.5 Συνεισφορά

Η συνεισφορά της παρούσης εργασίας συνίσταται στην ανάπτυξη δύο ομάδων ευριστικών αλγορίθμων, για τη διαδικασία εξέτασης του φάσματος και απόφασης πρόσβασης για ένα ad hoc δίκτυο από Cognitive Radios, στο οποίο κάθε χρήστης λειτουργεί ανεξάρτητα. Τα βασικά βήματα που ακολουθήθηκαν για την ανάπτυξη αυτών των αλγορίθμων είναι αρχικά η μοντελοποίηση του ασύρματου μέσου, η υπόθεση της γνώσης που έχει ο Cognitive Radio χρήστης σχετικά με τα στατιστικά χαρακτηριστικά των καναλιών που εξετάζει, ο τρόπος εξέτασης του φάσματος και τα κριτήρια απόφασης για πρόσβαση.

Στην πρώτη ομάδα αλγορίθμων το φάσμα προσεγγίζεται ως ένα σύνολο από ομάδες καναλιών. Τα κανάλια που ανήκουν σε μία ομάδα παρουσιάζουν ταυτόσημα στατιστικά

χαρακτηριστικά και κάθε κανάλι ξεχωριστά μοντελοποιείται ως μία Markov αλυσίδα δύο καταστάσεων (διαθέσιμο, μη διαθέσιμο). Τα στατιστικά χαρακτηριστικά των καναλιών θεωρούνται γνωστά στο χρήστη στον πρώτο αλγόριθμο που προτείνεται, ενώ στο δεύτερο θεωρούνται άγνωστα. Ένα νέο μέτρο, το *Hit Ratio*, εισάγεται σε αυτή την ομάδα αλγορίθμων για την εκτίμηση της ποιότητας των εξεταζόμενων καναλιών. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η χρήση του μέτρου αυτού επιτυγχάνει απόδοση που πλησιάζει την απόδοση που θα είχαμε στην περίπτωση που τα στατιστικά χαρακτηριστικά των καναλιών ήταν γνωστά στο χρήστη.

Στη δεύτερη ομάδα αλγορίθμων το φάσμα μοντελοποιείται ως ένα σύνολο από κανάλια με διαφορετικά στατιστικά χαρακτηριστικά. Και σε αυτήν την περίπτωση κάθε κανάλι μοντελοποιείται ως μία Markov αλυσίδα δύο καταστάσεων, με τη διαφορά ότι η κατάσταση του καναλιού αναφέρεται στην ποιότητά του και συνεπώς στη δυνατότητα εκπομπής με υψηλό ή χαμηλό ρυθμό. Στους πρώτους τέσσερις αλγορίθμους τα στατιστικά χαρακτηριστικά των καναλιών θεωρούνται γνωστά στο χρήστη, ο οποίος εξετάζει τα κανάλια αφού πρώτα τα έχει ταξινομημένα κατά φθίνουσα σειρά ποιότητας σύμφωνα με ένα κριτήριο κατάταξης και σύγκρισης. Στον πέμπτο και τελευταίο αλγόριθμο της ομάδας αυτής, τα στατιστικά χαρακτηριστικά των καναλιών θεωρούνται άγνωστα. Μία μικρή αρχική χρονική περίοδος αφιερώνεται αποκλειστικά στην εκτίμηση των χαρακτηριστικών των καναλιών και μέσω προσομοιώσεων μελετάται η σχέση μεταξύ χρόνου εκτίμησης και ικανότητας διαβίβασης δεδομένων. Επίσης διερευνάται η πιθανότητα σωστής ταξινόμησης, καθώς και η απόσταση της ταξινόμησης των καναλιών βάσει των εκτιμώμενων χαρακτηριστικών από την πραγματική, συναρτήσει του αρχικού χρόνου εκτίμησης. Με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων διαφαίνεται ποιος από τους πέντε αλγορίθμους παρουσιάζει μεγαλύτερη ικανότητα διαβίβασης δεδομένων και μικρότερη μέση καθυστέρηση προσπέλασης.

Κεφάλαιο 2

Επισκόπηση βιβλιογραφίας

2.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, λόγω του αυξανόμενου συνωστισμού στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, και κατόπιν μελετών [6] που έφεραν στην επιφάνεια το γεγονός ότι τα μισθωμένα κανάλια δε χρησιμοποιούνται πλήρως χρονικά και γεωγραφικά, αυξήθηκε η ερευνητική δραστηριότητα σχετικά με την ευκαιριακή χρήση του φάσματος. Για τη λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος απαιτείται οι συσκευές που θα χρησιμοποιηθούν να έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, ώστε να μπορούν να ανταποκριθούν σε έναν τρόπο λειτουργίας που δε θα προκαλεί παρεμβολές στα πρωτεύοντα δίκτυα, δηλαδή στους επίσημους χρήστες που μισθώνουν για τη χρήση συγκεκριμένων καναλιών.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό που θα πρέπει να πληρείται από τους Cognitive Radio χρήστες είναι η δυνατότητα σάρωσης των καναλιών με σκοπό την αναγνώριση των ευκαιριών μετάδοσης. Αυτή η λειτουργία απαιτεί συγκεκριμένη ευαισθησία των κεραιών λήψης. Κάποιες αρχικές προδιαγραφές έχουν δημοσιευθεί από την ομάδα εκπόνησης του πρωτοκόλλου IEEE 802.22 [7], το οποίο αναφέρεται σε ένα ιεραρχικής δομής δευτερεύον δίκτυο.

Όσον αφορά τα ad hoc δευτερεύοντα δίκτυα, έχουν προταθεί διάφοροι αλγόριθμοι σάρωσης και εκμετάλλευσης του φάσματος, οι οποίοι χωρίζονται σε δύο κύριες ομάδες. Στους αποκεντριοποιημένους, στους οποίους ο χρήστης αναζητά μόνος του ευκαιρίες μετάδοσης και στους συνεργατικούς αλγόριθμους, όπου μία ομάδα χρηστών εξετάζει το φάσμα και ανταλλάσσει πληροφορίες, ώστε κάθε χρήστης να έχει μία πιο πλήρη εικόνα για το φασματικό του περιβάλλον.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των εργασιών αυτών είναι ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιείται το φασματικό περιβάλλον, η υπόθεση για το εάν τα στατιστικά

χαρακτηριστικά των καναλιών είναι γνωστά ή όχι στο χρήστη και η πολιτική σάρωσης και πρόσβασης των καναλιών με σκοπό τη μεγιστοποίηση του όγκου πληροφορίας που μεταδίδεται σε έναν συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα.

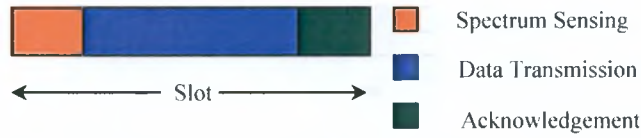
2.2 Κυριότερες εργασίες

2.2.1 Q. Zhao, L. Tong et. al

Με το [8] προτείνεται ένα αποκεντρωμένο MAC πρωτόκολλο για ad hoc Cognitive Radio δίκτυα, το οποίο επιτρέπει στους δευτερεύοντες χρήστες να αναζητούν ανεξάρτητα ευκαιρίες για μετάδοση, χωρίς την ύπαρξη ενός κεντρικού συντονιστή ή ενός συγκεκριμένου καναλιού "πilotου". Το κύριο ζήτημα που αντιμετωπίζεται στη συγκεκριμένη εργασία είναι η χάραξη μίας στρατηγικής ανίχνευσης και πρόσβασης η οποία ενσωματώνει την εξακρίβωση των ευκαιριών μετάδοσης με την εκμετάλλευσή τους.

Το φάσμα αποτελείται από N κανάλια, καθένα με εύρος ζώνης B_i ($i = 1, \dots, N$), τα οποία ανήκουν σε ένα πρωτεύον δίκτυο. Η διαθεσιμότητά τους ακολουθεί μία διαδικασία Markov διακριτού χρόνου, με $M = 2^N$ καταστάσεις. Σε μία χρονική στιγμή t , η κατάσταση του δικτύου περιγράφεται από το διάνυσμα $[S_1(t), \dots, S_N(t)]$, όπου το $S_i(t) \in \{0 \text{ (occupied)}, 1 \text{ (idle)}\}$. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά της διαθεσιμότητας του πρωτεύοντος δικτύου θεωρούνται ότι παραμένουν αμετάβλητα για T χρονικές στιγμές.

Σε κάθε χρονική στιγμή ένας δευτερεύον χρήστης επιλέγει ένα σύνολο από κανάλια L_1 ($L_1 \leq N$) προς εξέταση της διαθεσιμότητάς τους και ένα σύνολο L_2 ($L_2 \leq L_1$) για να προσπελάσει, με αντικειμενικό σκοπό τη μεγιστοποίηση της ικανότητας διαβίβασης δεδομένων (throughput), περιορίζοντας ταυτόχρονα την παρεμβολή στο πρωτεύον δίκτυο. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού εκμεταλλεύεται το ιστορικό εξέτασης των καναλιών καθώς και τη στατιστική συμπεριφορά του φάσματος.



Σχήμα 2.1: Η δομή μίας χρονικής στιγμής (Time slot)

Κάθε χρονική στιγμή έχει τη δομή που φαίνεται στο Σχήμα 2.1. Στην αρχή της κάθε χρονικής στιγμής, ο δευτερεύον χρήστης επιλέγει ένα σύνολο A_1 ($|A_1| \leq L_1$) καναλιών προς εξέταση. Δεδομένου ότι η τρέχουσα κατάσταση του συστήματος είναι j , ο χρήστης παρατηρεί $\Theta_{j,A_1} \in \{0,1\}^{|A_1|}$, το οποίο υποδηλώνει τη διαθεσιμότητα του κάθε καναλιού που εξετάστηκε. Βασιζόμενος σε αυτή την παρατήρηση, επιλέγει ένα υποσύνολο καναλιών $A_2 \subseteq A_1$ ($|A_2| \leq L_2$) για πρόσβαση. Για την επιλογή της ενέργειας αυτής, ο χρήστης λαμβάνει ανταμοιβή r_{j,A_1,A_2} στο τέλος της χρονικής στιγμής.

Στόχος αυτής της προσέγγισης είναι να επιλεγεί μία απόφαση εξέτασης και πρόσβασης $\{A_1, A_2\}$ που να μεγιστοποιεί τη συνολική αναμενόμενη ανταμοιβή που θα συγκεντρωθεί στη διάρκεια T χρονικών στιγμών, όπου τα στατιστικά χαρακτηριστικά της διαθεσιμότητας του φάσματος παραμένουν αμετάβλητα.

Με αυτό τον τρόπο διαμορφώνεται μία Μερικώς Παρατηρήσιμη Markovian Διαδικασία Απόφασης (POMDP), από τη στιγμή που η κατάσταση του φάσματος δεν δύναται να παρατηρηθεί πλήρως εξαιτίας της μερικής παρακολούθησης των καναλιών ή της εμφάνισης λαθών κατά την εξέταση. Οι πιθανότητες μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων του συστήματος $\{p_{i,j}\}$ θεωρούνται γνωστές.

Στην αρχή μίας χρονικής στιγμής t , η γνώση του δευτερεύοντος χρήστη για την εσωτερική κατάσταση του συστήματος, βασισμένη σε όλες τις παρελθούσες αποφάσεις και παρατηρήσεις, συνοψίζεται από ένα διάνυσμα πεποίθησης:

$$\Lambda(t) = [\lambda_1(t), \dots, \lambda_M(t)] \quad (2.1)$$

όπου $\lambda_j(t)$ είναι η υπό συνθήκη πιθανότητα, δεδομένης της ιστορίας απόφασης και παρατήρησης, ότι η κατάσταση του συστήματος είναι j στην αρχή της χρονικής στιγμής t .

Έτσι μία πολιτική π για μία POMDP δίνεται από μία σειρά συναρτήσεων, οι οποίες αντιστοιχίζουν το τρέχον διάνυσμα πεποίθησης $\Lambda(t)$ στην απόφαση εξέτασης και πρόσβασης $\{A_1(t), A_2(t)\}$ που λαμβάνεται την χρονική στιγμή t , όπως φαίνεται στη σχέση (2.2).

$$\pi = [\mu_1, \dots, \mu_T], \text{ όπου } \mu_t : \Lambda(t) \in [0, 1]^{M_t} \rightarrow \{A_1(t), A_2(t)\} \quad (2.2)$$

Γίνεται η παραδοχή ότι η μέγιστη ανοχή συγκρούσεων από το πρωτεύον δίκτυο ισούται με πιθανότητα σύγκρουσης P_c το πολύ ίση με ζ . Συνεπώς, η σχεδιαστική επιδίωξη του Cognitive MAC πρωτοκόλλου συνοψίζεται στη μεγιστοποίηση του πλήθους των bits που μεταδίδονται σε T χρονικές στιγμές υπό τον περιορισμό ότι η πιθανότητα σύγκρουσης φράσσεται κάτω του ζ . Έτσι η βέλτιστη πολιτική π^* δίνεται από τη σχέση:

$$\pi^* = \arg \max_{\pi} E_{\pi} \left[\sum_{t=1}^T r_{j(t), A_1(t), A_2(t)} / \Lambda(1) \right], \text{ s.t. } P_c \leq \zeta \quad (2.3)$$

όπου:

- E_{π} : παριστάνει την υπό συνθήκη προσδοκία, δεδομένου ότι εφαρμόζεται η πολιτική π .
- P_c : η πιθανότητα σύγκρουσης με το πρωτεύον δίκτυο
- $\Lambda(1)$: το αρχικό διάνυσμα πεποίθησης, το οποίο μπορεί να είναι η κατανομή σταθερής κατάστασης των καναλιών.

2.2.2 K. Zhao, B. Krishnamachari, K. Liu

Στο [9] χρησιμοποιείται μία μυωπική πολιτική ανίχνευσης των οπών του φάσματος με σκοπό την επίτευξη της πρόσβασης σε ένα πολυκαναλικό περιβάλλον. Η πολιτική αυτή έχει στόχο τη μεγιστοποίηση της άμεσης ανταμοιβής, παραβλέποντας την επίδραση της τρέχουσας απόφασης στη μελλοντική εξέλιξη του κέρδους του χρήστη. Εφαρμόζοντας μία τέτοια πολιτική αντιμετωπίζεται ένα πρόβλημα διαδοχικής λήψης απόφασης ως ένα στατικό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Η μυωπική πολιτική παρουσιάζει μία απλή αλλά εύρωστη δομή, η οποία περιορίζει την επιλογή καναλιού σε μία διαδικασία χαμηλής πολυπλοκότητας, καθιστώντας περιττή την ακριβή γνώση των πιθανοτήτων μετάβασης των καναλιών

Τα κανάλια μοντελοποιούνται ως ανεξάρτητες και στατιστικά πανομοιότυπες Markov αλυσίδες (μοντέλο Gilbert-Elliot). Με αυτή την αφαιρετική προσέγγιση των καναλιών, οι καταστάσεις των οποίων είναι "καλή"(1) ή "κακή"(0), εκφράζεται το κατά πόσον είναι επιθυμητή ή όχι η πρόσβαση σε ένα κανάλι. Έτσι για τα Cognitive Radios το ότι ένα κανάλι βρίσκεται σε "καλή" κατάσταση υποδηλώνει ότι είναι μη χρησιμοποιούμενο, ενώ αν βρίσκεται σε "κακή", ότι είναι κατειλημμένο. Οι μεταβάσεις μεταξύ αυτών των δύο καταστάσεων ακολουθούν μία Markov αλυσίδα με πιθανότητες μετάβασης $\{p_{ij}\}_{i,j=0,1}$.

Στη συγκεκριμένη εργασία εξετάζεται η εφαρμογή της μυωπικής πολιτικής για $N = 2$ κανάλια. Διακρίνονται δύο περιπτώσεις ανάλογα με το πρόσημο της συσχέτισης των δύο καναλιών. Στην περίπτωση που τα κανάλια είναι θετικά συσχετισμένα, δηλαδή $p_{11} > p_{01}$, η μυωπική απόφαση ενός χρήστη Cognitive Radio είναι να παραμείνει στο ίδιο κανάλι την επόμενη χρονική στιγμή αν στην παρούσα ανιχνεύθηκε να βρίσκεται σε "καλή" κατάσταση. Διαφορετικά ο χρήστης επιστρέφει στο κανάλι που εξέτασε με μεγαλύτερη χρονική διαφορά από την παρούσα στιγμή. Όταν τα κανάλια είναι αρνητικά συσχετισμένα, δηλαδή $p_{11} < p_{01}$, η μυωπική απόφαση είναι να παραμείνει όταν παρατηρήσει ότι το κανάλι βρίσκεται σε "κακή" κατάσταση, διαφορετικά μεταπηδά σε άλλο κανάλι.

Έτσι προκύπτει μία πολιτική η οποία δεν απαιτεί την ενημέρωση ενός διανύσματος πεποιθήσης, όπως στο [6], ούτε την ακριβή γνώση των πιθανοτήτων μετάβασης, αλλά μία εκτίμηση για το πρόσημο της συσχέτισης των καναλιών. Τέλος αποδεικνύεται ότι για $N = 2$ η μυωπική πολιτική είναι βέλτιστη ενώ αφήνεται ως ανοιχτό ζήτημα αν αποδεικνύεται ότι για $N > 2$ παραμένει βέλτιστη.

2.2.3 V. Poor, H.E. Gamal et. Al

Με το [10] αποδεικνύεται η ισοδυναμία του προβλήματος της πρόσβασης των Cognitive Radios με το πρόβλημα του Multi-armed bandit. Το κύριο σενάριο που μελετάται στη συγκεκριμένη εργασία συνίσταται στην περίπτωση που ένας Cognitive Radio χρήστης αναζητά μόνος του τη διαθεσιμότητα κάποιων ελεύθερων καναλιών στο φάσμα, χωρίς να γνωρίζει εκ των προτέρων την πιθανότητα διαθεσιμότητας του κάθε καναλιού. Συνεπώς μία αποδοτική στρατηγική πρόσβασης πρέπει να επιτυγχάνει μία ισορροπία ανάμεσα στην αναζήτηση για ευκαιρίες μετάδοσης και στην εκμετάλλευση των ευκαιριών που έχουν ανιχνευθεί.

Θεωρείται ότι το πρωτεύον δίκτυο αποτελείται από N κανάλια, καθένα με εύρος ζώνης B . Σε κάθε χρονική στιγμή j , το κανάλι i είναι ελεύθερο με πιθανότητα θ_i . Η τυχαία μεταβλητή $Z_i(j)$ παριστάνει τη διαθεσιμότητα των καναλιών ως εξής:

$$Z_i(j) = \begin{cases} 1, & \text{αν το κανάλι } i \text{ είναι διαθέσιμο τη χρον. στιγμή } j \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (2.4)$$

Έτσι δοσμένου του θ_i , η $Z_i(j)$ είναι μία τ.μ. Bernoulli με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$h_{\theta_i}(z_i(j)) = \theta_i \delta(1) + (1 - \theta_i) \delta(0) \quad (2.5)$$

Θεωρείται ότι η τιμή του διανύσματος θ παραμένει σταθερή για T χρονικές στιγμές. Τη χρονική στιγμή j ο Cognitive Radio χρήστης επιλέγει ένα κανάλι $S(j)$ προς εξέταση. Αν το κανάλι βρεθεί διαθέσιμο, δηλαδή $Z_i(j) = 1$, ο χρήστης μπορεί να στείλει B bits μέσω του καναλιού αυτού. Διαφορετικά, θα περιμένει μέχρι την επόμενη χρονική στιγμή και πιθανώς θα επιλέξει κάποιο άλλο κανάλι προς εξέταση. Έτσι το μέγιστο πλήθος bits που μπορούν να σταλούν από το χρήστη κατά τη διάρκεια T χρονικών στιγμών είναι:

$$W = \sum_{j=1}^T BZ_{S(j)}(j) \quad (2.6)$$

Τελικά κάθε απόφαση πρόσβασης που λαμβάνεται από το χρήστη έχει διπλή επίδραση. Η πρώτη είναι το βραχυπρόθεσμο κέρδος από τη μετάδοση δεδομένων αν το επιλεγμένο κανάλι βρεθεί διαθέσιμο. Η δεύτερη συνιστά το μακροπρόθεσμο κέρδος, δηλαδή την ενημέρωση των στατιστικών πληροφοριών για τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του θ . Οι πληροφορίες αυτές ωθούν το χρήστη στη λήψη καλύτερων αποφάσεων σε μελλοντικές χρονικές στιγμές.

Με χρήση της ίδιας προσέγγισης όσον αφορά τη μοντελοποίηση του φάσματος στο [11], αλλά αυτή τη φορά με ύπαρξη πολλών χρηστών, προστίθεται ένα στοιχείο συναγωνισμού στο πρόβλημα. Επομένως για να μπορέσει ένας χρήστης να χρησιμοποιήσει ένα κανάλι, πρέπει να το βρει ελεύθερο και από το πρωτεύον δίκτυο και από τους δευτερεύοντες χρήστες. Έτσι με τη χρήση ενός Carrier Sense Multiple Access/ Collision Avoidance (CSMA-CA) πρωτοκόλλου, εξασφαλίζεται η αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών.

2.3 Άλλες σχετικές εργασίες

Μία εναλλακτική προσέγγιση από αυτή του κυρίου ρεύματος που επικρατεί στο πεδίο ακολουθείται στο [12]. Στην περίπτωση που δεν είναι προκαθορισμένα τα τμήματα του φάσματος για σάρωση και πρόσβαση και τα στατιστικά χαρακτηριστικά των καναλιών

είναι αρχικά άγνωστα, μία πολιτική σάρωσης και πρόσβασης θα οδηγούσε σε σπατάλη χρόνου και ενέργειας. Έτσι προτείνεται η χρήση ενός καναλιού "πilotου" υποστήριξης, το οποίο παρέχει σχετικές πληροφορίες για τα κανάλια στους χρήστες.

Στα [13] και [14] προτείνεται η χρήση θεωρίας παιγνίων σε περιβάλλον όπου υπάρχουν περισσότεροι Cognitive Radio χρήστες. Στην περίπτωση αυτή ένας χρήστης προσαρμόζει τη λειτουργία του ανάλογα με την αντίληψη του για μεταδόσεις από πρωτεύοντες χρήστες, αλλά και σύμφωνα με τις προσαρμογές λειτουργίας και των υπόλοιπων δευτερευόντων χρηστών. Έτσι, αφού το φασματικό περιβάλλον συνεχώς αλλάζει, ο χρήστης περιοδικά προσαρμόζει τη λειτουργία του στις νέες συνθήκες. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται έχουν στόχο να μοιράζονται οι πόροι εξίσου μεταξύ των χρηστών ανάλογα με τις απαιτήσεις τους και να μην μονοπωλούνται από ένα υποσύνολο του δευτερεύοντος δικτύου.

2.4 Ερευνητικά προβλήματα σε Cognitive Radios

Καθώς η ικανότητα προσαρμογής των Cognitive Radios βασίζεται στην παρακολούθηση και τη γνώση της διαθεσιμότητας των ασύρματων καναλιών, ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η λειτουργία της εξέτασης του φάσματος (spectrum sensing). Ένα βασικό πρόβλημα που παρουσιάζεται είναι η δυνατότητα του Cognitive Radio να ανιχνεύει εκπομπές χαμηλής ισχύος από πρωτεύοντες χρήστες. Για αυτόν το λόγο απαιτείται η χρήση κεραιών υψηλής ευαισθησίας καθώς και αποδοτικών μεθόδων εκτίμησης και ανίχνευσης. Σε περιβάλλον που παρουσιάζεται το φαινόμενο της σκίασης του σήματος είναι πιθανόν η λειτουργία κάποιου πρωτεύοντος χρήστη να μην ανιχνευθεί από το Cognitive Radio και να θεωρηθεί το κανάλι διαθέσιμο με αποτέλεσμα η χρήση του να προκαλέσει παρεμβολή. Η συνεργατική εξέταση του φάσματος στην περίπτωση αυτή εμπλουτίζει τη γνώση του χρήστη για το ηλεκτρομαγνητικό του περιβάλλον. Η μετάδοση της πληροφορίας της κατάστασης του φάσματος μπορεί να γίνεται είτε κεντροκοποιημένα από ένα σταθμό βάσης σε ιεραρχικά δομημένα δίκτυα από Cognitive Radios είτε με ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των χρηστών σε ad hoc

δίκτυα. Το πρόβλημα που προκύπτει είναι η επιπλέον επιβάρυνση του φάσματος για την ανταλλαγή των μηνυμάτων μεταξύ των Cognitive Radios που συνεργάζονται.

Ενώ η εξέταση του φάσματος είναι πρόβλημα του φυσικού στρώματος (PHY layer), η διαχείρισή του ανήκει στο στρώμα ελέγχου πρόσβασης στο μέσου (MAC layer). Η ανάλυση των εντοπιζόμενων ευκαιριών μετάδοσης και η απόφαση για πρόσβαση σε ένα κανάλι βοηθούν στην ευέλικτη λειτουργία ενός Cognitive Radio. Οι δύο αυτές λειτουργίες είναι αλληλένδετες με τον τρόπο εξέτασης του φάσματος. Όσο περισσότερο χρόνο διαρκεί η εξέταση του φάσματος, τόσο ποιοτικότερα είναι τα αποτελέσματα της ανάλυσής του και ασφαλέστερη η απόφαση της πρόσβασης. Συνεπώς, δημιουργούνται συνθήκες διαπραγματεύσεως (trade off) ανάμεσα στο χρόνο εξέτασης και στο χρόνο πρόσβασης. Σημαντικό ρόλο στο συγκεκριμένο πρόβλημα παίζει και ο τρόπος εξέτασης, δηλαδή η σειρά με την οποία εξετάζονται τα κανάλια και ο χρόνος που αφιερώνεται στο καθένα. Έτσι το πρόβλημα της διαχείρισης του φάσματος μεταλλάσσεται σε ένα διαστρωματικό πρόβλημα, το οποίο επιχειρούν να λύσουν και οι ευριστικοί αλγόριθμοι που αναπτύσσονται στην παρούσα εργασία.

Η λειτουργία της μεταπήδησης από ένα χρησιμοποιούμενο κανάλι σε ένα άλλο ενεργοποιείται με την εμφάνιση ενός πρωτεύοντος χρήστη. Καθώς χρονικά και γεωγραφικά η διαθεσιμότητα του φάσματος αλλάζει συνεχώς, είναι αναγκαία η ανάπτυξη αλγορίθμων για την λειτουργία της μεταπήδησης που θα εξασφαλίζουν αδιάκοπη μετάδοση στο Cognitive Radio χωρίς υποβάθμιση της ποιότητας της παρεχόμενης υπηρεσίας (QoS).

Σε περιβάλλον λειτουργίας πολλών Cognitive Radio χρηστών, το πρόβλημα που προκύπτει είναι ο διαμοιρασμός του φάσματος. Αυτός μπορεί να επιτευχθεί είτε κεντροποιημένα, όπου η ανάθεση των καναλιών που θα δύναται να χρησιμοποιήσει κάθε χρήστης θα γίνεται από ένα κεντρικό χρήστη, είτε κατανεμημένα, όπου κάθε χρήστης ξεχωριστά θα αποφασίζει σύμφωνα με την πολιτική του ποια κανάλια θα χρησιμοποιήσει. Ο κατανεμημένος διαμοιρασμός του φάσματος μπορεί να γίνει με συνεργατικό τρόπο, όπου οι χρήστες θα επικοινωνούν μεταξύ τους για τη λήψη μίας κοινώς αποδεκτής ανάθεσης. Το πρόβλημα που προκύπτει είναι η επιβάρυνση του δικτύου με επιπλέον μεταδόσεις. Για το λόγο αυτό απαιτείται η χρήση αλγορίθμων που

ελαχιστοποιούν το χρόνο κατάληψης καναλιών για λόγους επικοινωνίας. Τέλος ο κατανεμημένος διαμοιρασμός μπορεί να επιτευχθεί και μη συνεργατικά, αποφεύγοντας έτσι το κόστος της επιπλέον επικοινωνίας. Βέβαια, αν κάθε χρήστης λειτουργεί ωφελμιστικά, μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλή χρησιμοποίηση του φάσματος. Στην περίπτωση αυτή η εφαρμογή αλγορίθμων που οδηγούν στη μεγιστοποίηση της κοινής ωφέλειας μπορεί να επιφέρει δίκαιη χρησιμοποίηση του φάσματος μεταξύ των χρηστών.

Κεφάλαιο 3

Ευριστικοί Αλγόριθμοι Άμεσης Ανταμοιβής

3.1 Εισαγωγή

Στις εργασίες [8],[10],[11] που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο το πρόβλημα της εξέτασης του φάσματος και της πρόσβασης σε κάποιο κανάλι αντιμετωπίζεται ως ένα πρόβλημα απόφασης σε μία μερικώς παρατηρήσιμη τυχαία διαδικασία. Οι μέθοδοι λύσης των προβλημάτων αυτών είναι βασισμένες στον υπολογισμό ενός διανύσματος πεποίθησης, το οποίο αποτελεί μία κατανομή πιθανότητας σχετικά με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται κάθε κανάλι. Η επιλογή της πρόσβασης που λαμβάνει ο χρήστης Cognitive Radio απορρέει από την πεποίθηση που διατηρεί για την κατάσταση του κάθε καναλιού. Η πεποίθηση αυτή υπολογίζεται από το ιστορικό των αποφάσεων που έχει λάβει και από τα αποτελέσματα των παρατηρήσεών του. Εντούτοις στο [15], αποδεικνύεται ότι η προσθήκη της χρήσης της ανταμοιβής που επιφέρει κάθε απόφαση μειώνει την αβεβαιότητα στον υπολογισμό του διανύσματος πεποίθησης.

Στο κεφάλαιο αυτό προτείνουμε δύο ευριστικούς αλγορίθμους για το πρόβλημα της εξέτασης του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος και της πρόσβασης σε αυτό για μετάδοση από ένα χρήστη Cognitive Radio, στα πλαίσια ενός ad hoc δικτύου. Στον πρώτο αλγόριθμο υποθέτουμε ότι ο χρήστης γνωρίζει τα στατιστικά χαρακτηριστικά των καναλιών, ενώ στο δεύτερο καμία πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη. Για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών των καναλιών εισάγουμε ένα νέο μέγεθος, το *Hit Ratio*, βάσει του οποίου καθοδηγείται ο χρήστης στην απόρριψη των μη αποδοτικών καναλιών και στην επιλογή ενός υποσυνόλου καναλιών που παρουσιάζουν υψηλότερη ανταμοιβή σε σχέση με τα υπόλοιπα.

Η συνεισφορά των αλγορίθμων αυτών στην τρέχουσα βιβλιογραφία εκτιμούμε ότι συνίσταται στην εισαγωγή μεθόδων χαμηλής πολυπλοκότητας για την προσέγγιση του

προβλήματος, απαίτηση πολύ σημαντική για την αποδοτική λειτουργία ενός Cognitive Radio στο ευμετάβλητο ασύρματο μέσο. Επίσης προτείνεται ένας απλός, ωστόσο αποδοτικός μηχανισμός για την εκτίμηση των στατιστικών χαρακτηριστικών των καναλιών.

3.2 Μοντέλο Συστήματος

Θεωρούμε ένα χρήστη Cognitive Radio, ο οποίος αναζητά κανάλια για να εκμεταλλευτεί. Το διαθέσιμο φάσμα αποτελείται από N κανάλια. Αυτά τα N κανάλια μοντελοποιούνται ως ανεξάρτητα, αλλά όχι στοχαστικά πανομοιότυπα Gilbert-Elliot [16],[17] κανάλια. Υποθέτουμε ότι υπάρχουν ομάδες καναλιών που παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά όσον αφορά τη διαθεσιμότητά τους, επειδή ανήκουν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων. Τα κανάλια που ανήκουν στην ίδια ομάδα είναι στοχαστικά πανομοιότυπα.

Κάθε κανάλι μπορεί να βρίσκεται είτε σε “καλή” είτε σε “κακή” κατάσταση. Για την περίπτωση των Cognitive Radios, αντιστοιχίζουμε την “καλή” κατάσταση σε διαθέσιμο κανάλι, και την “κακή” σε μη διαθέσιμο. Οι μεταβάσεις μεταξύ των ανωτέρω καταστάσεων κάθε καναλιού διαμορφώνουν μία Markov αλυσίδα με πιθανότητες μετάβασης $\{p_{ij}\}$, $i,j=0,1$. Ο χρόνος διαιρείται σε θυρίδες (time slots). Σε κάθε slot το Cognitive Radio εξετάζει ένα κανάλι. Αν το κανάλι βρεθεί διαθέσιμο τότε μεταδίδει και κερδίζει ανταμοιβή ίση με 1. Αν όχι, περιμένει μέχρι το επόμενο slot.

Για λόγους σύγκρισης περιγράφουμε και υλοποιούμε δύο επιπλέον αλγορίθμους. Ο ένας αναφέρεται σε τυχαία και ο άλλος σε διαδοχική εξέταση των καναλιών.

3.3 Ευριστικοί αλγόριθμοι.

Για να μπορέσουμε να χαρακτηρίσουμε την ποιότητα του κάθε καναλιού εισάγουμε ένα νέο μέγεθος, το *Hit Ratio*, που αν και απλό αποδεικνύεται πολύ χρήσιμο. Αν S_i είναι η κατάσταση του καναλιού i , έχουμε:

$$Hit Ratio_i = \frac{\# \text{ slots με } S_i = \text{"καλή"} \text{ κατάσταση}}{\# \text{ παρατηρήσεων του } i}, \quad i=1, \dots, N \quad (3.1)$$

1. Αρχικά μελετούμε την περίπτωση της **τυχαίας εξέτασης καναλιών (Random Sensing)**. Συγκεκριμένα, στην αρχή κάθε slot το προς εξέταση κανάλι επιλέγεται τυχαία, με ίση πιθανότητα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι η ικανότητα διαβίβασης δεδομένων (throughput) που επιτυγχάνεται με τη χρήση του αλγορίθμου αυτού είναι αρκετά χαμηλή.

2. Στα ίδια συμπεράσματα καταλήγουμε και στην περίπτωση της **διαδοχικής εξέτασης καναλιών (Sequential Sensing)**. Το επίπεδο της ικανότητας διαβίβασης δεδομένων (throughput) δε διαφέρει από τον προηγούμενο αλγόριθμο.

3. Στους δύο προηγούμενους αλγορίθμους είναι προφανές ότι καμία γνώση των πινάκων πιθανοτήτων μετάβασης δεν είναι διαθέσιμη στον Cognitive Radio χρήστη. Για την περίπτωση που οι πιθανότητες μετάβασης θεωρηθούν γνωστές αναπτύσσουμε έναν αλγόριθμο εξέτασης των καναλιών, βασιζόμενο στην πεποίθηση της κατάστασής τους (**Belief Based Sensing**). Ένα διάνυσμα πεποίθησης $\omega(t)$ εκφράζει την εκτίμηση του χρήστη ότι τα κανάλια βρίσκονται σε “καλή” κατάσταση τη χρονική στιγμή t .

Κατά την αρχική χρονική στιγμή, οι αρχικές τιμές των στοιχείων του διανύσματος πεποίθησης είναι ίσες με την κατανομή σταθερής κατάστασης της υποκείμενης Markov αλυσίδας του κάθε καναλιού. Η κατανομή σταθερής κατάστασης ισούται με το αριστερό ιδιοδιάνυσμα του πίνακα πιθανοτήτων μετάβασης που αντιστοιχεί στην κυρίαρχη ιδιοτιμή λ_1 (για την περίπτωση των πινάκων πιθανοτήτων μετάβασης, οι οποίοι είναι στοχαστικοί $\lambda_1 = 1$).

Αναλυτικότερα:

$$\omega_i(0) = \frac{P_{hg,i}}{P_{hg,i} + P_{gb,i}}, i=1, \dots, N \quad (3.2)$$

Στο μοντέλο που υιοθετούμε για την περιγραφή των καναλιών υποθέτουμε ότι υπάρχουν διαφορετικές κλάσεις καναλιών. Μέσω των προσομοιώσεων παρατηρούμε ότι με τη χρήση του Belief Based αλγορίθμου το Cognitive Radio δεν επισκέπτεται ποτέ άλλα κανάλια εκτός από αυτά που παρουσιάζουν υψηλή διαθεσιμότητα.

Το διάνυσμα πεποίθησης ενημερώνεται ως εξής:

$$\omega_i(t+1) = \begin{cases} p_{gg,i} & \text{εάν το κανάλι εξεταστεί και βρεθεί σε "καλή" κατάσταση} \\ p_{hg,i} & \text{εάν το κανάλι εξεταστεί και βρεθεί σε "κακή" κατάσταση} \\ \omega_i(t)p_{gg,i} + (1 - \omega_i(t))p_{hg,i} & \text{εάν το κανάλι δεν εξεταστεί} \end{cases} \quad (3.3)$$

4. Τέλος, προτείνουμε έναν αλγόριθμο βασισμένο στο μέγεθος *Hit Ratio* (**Score Based Sensing**), στον οποίο το Cognitive Radio εξετάζει τα κανάλια με τυχαία σειρά για ένα μικρό τμήμα τ , της χρονικής περιόδου T ($\tau < T$). Κατά τη διάρκεια του χρονικού τμήματος τ , παρατηρεί την εξέλιξη του *Hit Ratio* κάθε καναλιού και βασιζόμενο στα αποτελέσματα της παρατήρησης επιλέγει ένα υποσύνολο των καναλιών που παρουσιάζουν υψηλό *Hit Ratio*. Έπειτα, συνεχίζει να επιλέγει τυχαία τα προς εξέταση κανάλια, αλλά αυτή τη φορά η επιλογή γίνεται μόνο από τα κανάλια του υποσυνόλου που παρουσίασαν υψηλό *Hit Ratio*.

Επισημαίνεται ότι στον αλγόριθμο αυτό καμία γνώση σχετικά με τους πίνακες πιθανοτήτων μετάβασης δεν είναι διαθέσιμη στο Cognitive Radio. Εντούτοις η απόδοσή του δεν είναι σημαντικά υποδεέστερη από αυτήν του προηγούμενου αλγορίθμου, όπου τα στατιστικά χαρακτηριστικά των καναλιών θεωρούνται γνωστά. Αντιθέτως, μέσω των προσομοιώσεων διαφαίνεται ότι η ικανότητα διαβίβασης δεδομένων (throughput) του **Score Based Sensing** αλγορίθμου προσεγγίζει αυτήν του **Belief Based Sensing**.

3.4 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Για να διερευνήσουμε τη συμπεριφορά και την απόδοση των αλγορίθμων της προηγούμενης ενότητας, πραγματοποιούμε προσομοιώσεις για ένα Cognitive Radio, το οποίο ψάχνει ευκαιρίες μετάδοσης ανάμεσα σε 12 κανάλια. Τα κανάλια αυτά είναι χωρισμένα σε 3 κλάσεις, ανάλογα με την ποιότητά τους.

Οι πίνακες των πιθανοτήτων μετάβασης της πρώτης κλάσης είναι:

$$P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.8 \\ 0.1 & 0.9 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Για τη δεύτερη κλάση έχουμε:

$$P_5 = P_6 = P_7 = P_8 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

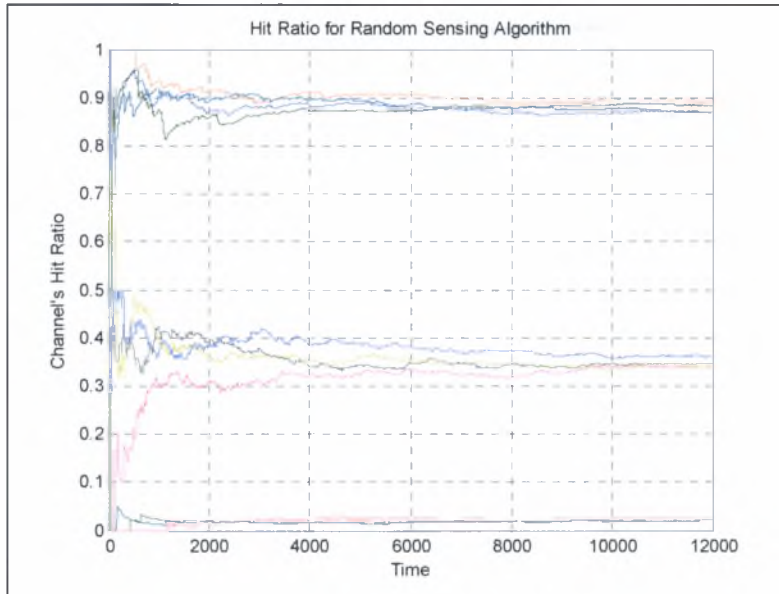
Ομοίως, για την τελευταία κλάση έχουμε:

$$P_9 = P_{10} = P_{11} = P_{12} = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.1 \\ 0.8 & 0.2 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

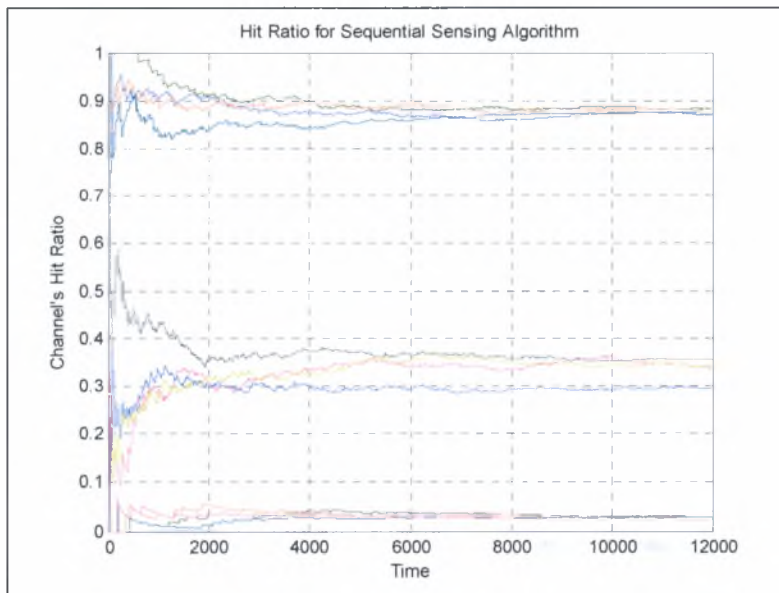
Η προσομοίωση εκτελείται για $T=12000$ slots. Η απόδοση των αλγορίθμων μετράται υπό τις ίδιες καταστάσεις και μεταβάσεις των καναλιών. Για τον Score Based Sensing αλγόριθμο ο χρόνος εκτίμησης, τ , των καναλιών βάσει του *Hit Ratio* είναι ίσος με 1000 slots.

Παρακάτω βλέπουμε στα διαγράμματα 3.1 ως 3.4 τη μεταβολή του *Hit Ratio* με το χρόνο για τους αλγορίθμους της προηγούμενης ενότητας. Στα διαγράμματα 3.1 και 3.2 παρατηρούμε παρόμοια συμπεριφορά στο χρόνο σύγκλισης του *Hit Ratio* για τους Random και Sequential Sensing αλγορίθμους, ενώ στο διάγραμμα 3.3 παρατηρούμε ότι

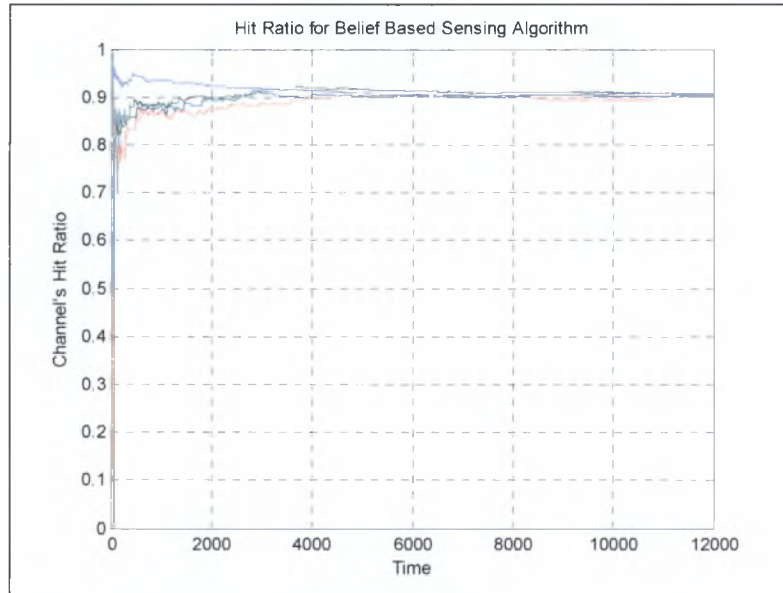
εξετάζονται μόνο τα κανάλια με υψηλή διαθεσιμότητα στον Belief Based Sensing αλγόριθμο και συνεπώς το *Hit Ratio* τους συγκλίνει ταχύτερα από τους δύο προηγούμενους αλγορίθμους.



Σχήμα 3.1: Channel's Hit Ratio vs. Time of the Random Sensing Algorithm.



Σχήμα 3.2: Channel's Hit Ratio vs. Time of the Sequential Sensing Algorithm.

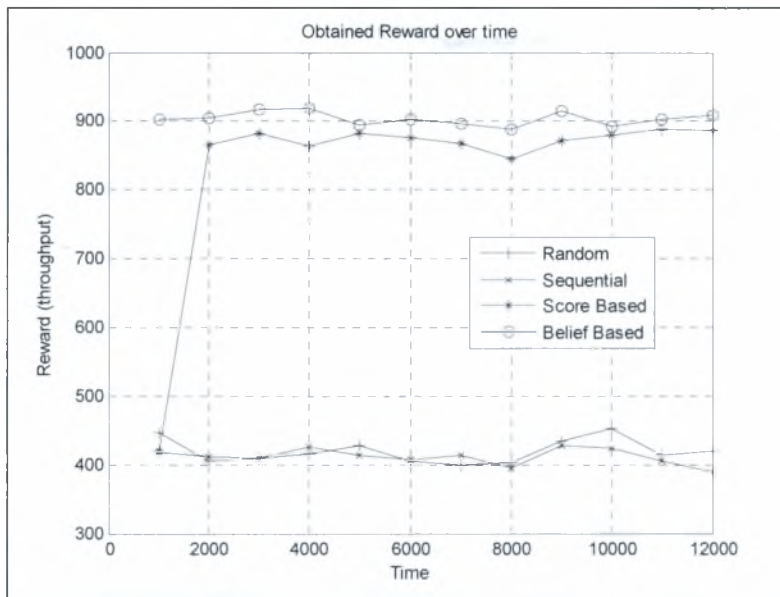


Σχήμα 3.3: Channel's Hit Ratio vs. Time of the Belief Based Algorithm.



Σχήμα 3.4: Channel's Hit Ratio vs. Time of the Score Based Algorithm.

Παρατηρούμε στο Σχήμα 3.4 ότι στον Score Based Sensing αλγόριθμο, μετά το χρονικό διάστημα τ , εξετάζονται μόνο τα κανάλια που παρουσιάζουν υψηλό *Hit Ratio*. Η πολιτική αυτή καθιστά το Cognitive Radio ικανό να λειτουργεί προσεγγίζοντας ικανοποιητικά την απόδοση του Belief Based Sensing αλγορίθμου, δίχως να γνωρίζει τους πίνακες πιθανοτήτων μετάβασης. Το γεγονός αυτό γίνεται πιο ευδιάκριτο στο Σχήμα 3.5, στο οποίο απεικονίζεται η ανταμοιβή συναρτήσει του χρόνου για καθέναν από τους αλγορίθμους της προσομοίωσης.



Σχήμα 3.5: Obtained Reward over Time for all Simulated Algorithms.

Αξιοσημείωτο είναι ότι το *Hit Ratio* κάθε καναλιού προσεγγίζει ικανοποιητικά την κατανομή σταθερής κατάστασης της Markov αλυσίδας που το περιγράφει. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αποδεικνύουν ότι ο Score Based Sensing αλγόριθμος είναι υποδεέστερος του Belief Based Sensing λιγότερο του 10% όσον αφορά την ανταμοιβή που αποκομίζεται για μία χρονική περίοδο T , ενώ οι Random και Sequential Sensing αλγόριθμοι παρουσιάζουν μικρότερη απόδοση της τάξης του 50% του Belief Based αλγορίθμου.

Κεφάλαιο 4

Ευριστικοί Αλγόριθμοι Αποτίμησης της Κατάστασης των Καναλιών

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό προτείνουμε πέντε επιπλέον ευριστικούς αλγορίθμους για το πρόβλημα της εξέτασης του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος και της πρόσβασης σε αυτό για μετάδοση από ένα χρήστη Cognitive Radio, στα πλαίσια ενός ad hoc δικτύου. Στους πρώτους τέσσερις αλγορίθμους τα στατιστικά χαρακτηριστικά των προς εξέταση καναλιών θεωρούνται γνωστά στο Cognitive Radio. Στον τελευταίο αλγόριθμο του κεφαλαίου προτείνουμε μία μέθοδο εκτίμησης των παραμέτρων των Markov αλυσίδων που χαρακτηρίζουν τα κανάλια του συστήματος. Το κοινό χαρακτηριστικό των υπόψη αλγορίθμων είναι ότι η σειρά εξέτασης των καναλιών γίνεται διαδοχικά αφού πρώτα έχουν ταξινομηθεί με ένα κριτήριο ποιότητας.

Για την εκτίμηση της κατανομής σταθερής κατάστασης των καναλιών στον τελευταίο αλγόριθμο που προτείνουμε, χρησιμοποιούμε το μέγεθος του *Hit Ratio*, του προηγούμενου κεφαλαίου, ενώ για τις πιθανότητες μετάβασης εισάγουμε μία μέθοδο συνεχόμενης παρακολούθησης της εξέλιξης ενός καναλιού για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Ο αλγόριθμος που προτείνουμε, μετά το χρόνο προσαρμογής, λειτουργεί το ίδιο αποδοτικά όπως ο βέλτιστος από τους τέσσερις προηγούμενους αλγορίθμους, στους οποίους τα στατιστικά χαρακτηριστικά των καναλιών είναι εκ των προτέρων γνωστά.

Η συνεισφορά των αλγορίθμων αυτών στην τρέχουσα βιβλιογραφία εκτιμούμε ότι συνίσταται στην εισαγωγή μεθόδων χαμηλής πολυπλοκότητας για την προσέγγιση του προβλήματος, απαίτηση πολύ σημαντική για την αποδοτική λειτουργία ενός Cognitive Radio στο ευμετάβλητο ασύρματο μέσο. Επίσης προτείνεται ένας αποδοτικός

αλγόριθμος εκτίμησης, εξέτασης και πρόσβασης, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σχεδίαση Cognitive Radios, τα οποία τη στιγμή της έναρξης της λειτουργίας τους δε θα κατέχουν καμία πληροφορία για τα κανάλια που εξετάζουν.

4.2 Μοντέλο Συστήματος

Θεωρούμε έναν χρήστη Cognitive Radio, ο οποίος αναζητά κανάλια για να μεταδώσει. Το διαθέσιμο φάσμα αποτελείται από N κανάλια. Αυτά τα N κανάλια, όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο, μοντελοποιούνται ως ανεξάρτητα αλλά όχι στοχαστικά πανομοιότυπα Gilbert-Elliot [16],[17] κανάλια.

Κάθε κανάλι μπορεί να βρίσκεται είτε σε “καλή” είτε σε “κακή” κατάσταση. Για την περίπτωση του παρόντος μοντέλου για Cognitive Radios, αντιστοιχίζουμε την “καλή” κατάσταση στη δυνατότητα μετάδοσης με ρυθμό ίσο με r_1 , και την “κακή” στη δυνατότητα μετάδοσης με ρυθμό ίσο με r_2 , $r_1 > r_2$. Οι μεταβάσεις μεταξύ των ανωτέρω καταστάσεων κάθε καναλιού διαμορφώνουν μία Markov αλυσίδα με πιθανότητες μετάβασης $\{p_{ij}\}$, $i,j=1,2$.

Ο χρόνος διαιρείται σε θυρίδες (time slots). Σε κάθε slot το Cognitive Radio εξετάζει ένα κανάλι. Ένα διάνυσμα πεποίθησης $\omega(t)$ εκφράζει την εκτίμηση του χρήστη ότι τα κανάλια βρίσκονται σε “καλή” κατάσταση τη χρονική στιγμή t . Το διάνυσμα πεποίθησης ενημερώνεται σύμφωνα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το εξεταζόμενο κάθε φορά κανάλι, καθώς και σύμφωνα με τις πιθανότητες μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων.

4.3 Ευριστικοί αλγόριθμοι

Στους πρώτους τέσσερις από τους ακόλουθους αλγορίθμους, οι πιθανότητες μετάβασης θεωρούνται γνωστές. Κατά την αρχική χρονική στιγμή, οι αρχικές τιμές των στοιχείων του διανύσματος πεποίθησης είναι ίσες με την κατανομή σταθερής κατάστασης της υποκείμενης Markov αλυσίδας του κάθε καναλιού. Η κατανομή σταθερής κατάστασης

ισούται με το αριστερό ιδιοδιάνυσμα του πίνακα πιθανοτήτων μετάβασης που αντιστοιχεί στην κυρίαρχη ιδιοτιμή λ_1 (για την περίπτωση των πινάκων πιθανοτήτων μετάβασης, οι οποίοι είναι στοχαστικοί $\lambda_1 = 1$). Αναλυτικότερα:

$$\omega_i(0) = \frac{p_{21,i}}{p_{21,i} + p_{12,i}}, i=1, \dots, N \quad (4.1)$$

Το Cognitive Radio ταξινομεί τα κανάλια κατά φθίνουσα βεβαρημένη κατανομή σταθερής κατάστασης (weighted s.s.d), όπου βάρη είναι οι δυνάμενοι ρυθμοί μετάδοσης ανά κατάσταση. Έτσι, η βεβαρημένη κατανομή σταθερής κατάστασης για το κανάλι i , μπορεί να εκφραστεί ως ακολούθως:

$$r_1 \frac{p_{21}^{(i)}}{p_{21}^{(i)} + p_{12}^{(i)}} + r_2 \frac{p_{12}^{(i)}}{p_{21}^{(i)} + p_{12}^{(i)}} = \frac{1}{p_{21}^{(i)} + p_{12}^{(i)}} (r_1 p_{21}^{(i)} + r_2 p_{12}^{(i)}), i=1, \dots, N \quad (4.2)$$

Στην αρχή το Cognitive Radio ξεκινάει τη διαδοχική εξέταση των καναλιών σύμφωνα με την ανωτέρω ταξινόμηση. Κατά τη διάρκεια του χρόνου εξέτασης t_s , σε κάθε time slot ενημερώνεται το διάνυσμα πεποιθήσης. Η ενημέρωση του διανύσματος γίνεται ως εξής:

$$\omega_i(t+1) = \begin{cases} p_{11,i} & \text{αν το κανάλι εξεταστεί και βρεθεί σε "καλή" κατάσταση} \\ p_{21,i} & \text{αν το κανάλι εξεταστεί και βρεθεί σε "κακή" κατάσταση} \\ \omega_i(t)p_{11,i} + (1 - \omega_i(t))p_{21,i} & \text{αν το κανάλι δεν εξεταστεί} \end{cases} \quad (4.3)$$

Στο τέλος κάθε time slot, εξετάζεται μία συνθήκη και λαμβάνεται μία απόφαση $d(t)$. Αν η συνθήκη ισχύει, $d(t)=1$ και το Cognitive Radio μεταδίδει μέσω του τελευταίου καναλιού που εξέτασε για τα επόμενα $t_d - t_s$ time slots. Διαφορετικά, $d(t)=0$ και συνεχίζει στο ακόλουθο slot εξετάζοντας το επόμενο κανάλι. Όπου t_d , ο μέγιστος χρόνος διάρκειας της απόφασης.

1. Διαδοχική Εξέταση (Sequential Sensing - SS).

Το Cognitive Radio σαρώνει τα κανάλια διαδοχικά, σύμφωνα με την ταξινόμηση, εξετάζοντας ένα κανάλι σε κάθε slot. Η απόφαση $d(t)$ εκφράζεται ως ακολούθως:

$$d(t) = \begin{cases} 1, & \text{μετάδωσε στο κανάλι } i \text{ στο επόμενο slot, αν βρέθηκε σε "καλή" κατάσταση} \\ & \text{και } p_{11}^{(t)} > \omega_{i+1}(t+1)p_{11}^{(t+1)} + (1 - \omega_{i+1}(t+1))p_{21}^{(t+1)} \\ 0, & \text{εξέτασε το κανάλι } i+1 \text{ στο επόμενο slot} \end{cases} \quad (4.4)$$

Αν τη στιγμή t έχουμε $d(t) = 1$, η διάρκεια της απόφασης είναι $t_d - t_s$. Μετά από αυτήν τη χρονική περίοδο το Cognitive Radio επιστρέφει σε λειτουργία σάρωσης, εξετάζοντας το επόμενο κανάλι από αυτό που μετέδωσε.

2. Διαδοχική Εξέταση με Επανεκκίνηση (Sequential Sensing with Restart-SSR).

Το Cognitive Radio σαρώνει κι εδώ τα κανάλια διαδοχικά, σύμφωνα με την ταξινόμηση, εξετάζοντας ένα κανάλι σε κάθε slot. Η απόφαση $d(t)$ εκφράζεται ξανά με τη σχέση (4.4).

Αν τη στιγμή t έχουμε $d(t) = 1$, η διάρκεια της απόφασης είναι $t_d - t_s$. Μετά από αυτήν τη χρονική περίοδο το Cognitive Radio επιστρέφει σε λειτουργία σάρωσης, εξετάζοντας αυτήν τη φορά το πρώτο σύμφωνα με την ταξινόμηση κανάλι.

3. Διαδοχική Εξέταση με Πρόσβαση και από "κακό" Κανάλι (Sequential Sensing with Access from Bad Channel also - SSABC).

Το Cognitive Radio σαρώνει τα κανάλια διαδοχικά, σύμφωνα με την ταξινόμηση, εξετάζοντας ένα κανάλι σε κάθε slot. Η απόφαση $d(t)$ εκφράζεται ως ακολούθως:

$$d(t) = \begin{cases} 1, & \text{μετάδωσε στο κανάλι } i \text{ στο επόμενο slot, αν βρέθηκε σε "καλή" κατάσταση} \\ & \text{και } p_{11}^{(i)} > \omega_{i+1}(t+1)p_{11}^{(i+1)} + (1 - \omega_{i+1}(t+1))p_{21}^{(i+1)} \\ & \text{ή αν βρέθηκε σε "κακή" κατάσταση} \\ & \text{και } p_{21}^{(i)} > \omega_{i+1}(t+1)p_{11}^{(i+1)} + (1 - \omega_{i+1}(t+1))p_{21}^{(i+1)} \\ 0, & \text{εξέτασε το κανάλι } i+1 \text{ στο επόμενο slot} \end{cases} \quad (4.5)$$

Αν τη στιγμή t έχουμε $d(t) = 1$, η διάρκεια της απόφασης είναι $t_d - t_s$. Μετά από αυτήν τη χρονική περίοδο το Cognitive Radio επιστρέφει σε λειτουργία σάρωσης, εξετάζοντας το επόμενο κανάλι από αυτό που μετέδωσε.

4. Διαδοχική Εξέταση με Πρόσβαση και από “κακό” Κανάλι με Επανεκκίνηση (Sequential Sensing with Access from Bad Channel Also with Restart- SSABCR).

Το Cognitive Radio σαρώνει κι εδώ τα κανάλια διαδοχικά, σύμφωνα με την ταξινόμηση, εξετάζοντας ένα κανάλι σε κάθε slot. Η απόφαση $d(t)$ εκφράζεται κι εδώ με τη σχέση (4.5).

Αν τη στιγμή t έχουμε $d(t) = 1$, η διάρκεια της απόφασης είναι $t_d - t_s$. Μετά από αυτήν τη χρονική περίοδο το Cognitive Radio επιστρέφει σε λειτουργία σάρωσης, εξετάζοντας αυτήν τη φορά το πρώτο σύμφωνα με την ταξινόμηση κανάλι.

4.4 Αλγόριθμος Εκτίμησης των Παραμέτρων των Καναλιών

Ο πέμπτος αλγόριθμος (**Hit Ratio with Parameter Estimation – HRPE**) που προτείνουμε, επιτρέπει στο Cognitive Radio να λειτουργεί αποδοτικά σε άγνωστο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον, δηλαδή χωρίς να γνωρίζει εκ των προτέρων τα στατιστικά χαρακτηριστικά των καναλιών. Ο αλγόριθμος αυτός είναι ίδιος με τον προαναφερθέντα SSABCR, με τη διαφορά ότι αρχικά, για ένα χρονικά διάστημα t_c (cognition time), γίνεται μία εκτίμηση της κατανομής σταθερής κατάστασης του συστήματος καθώς και των πιθανοτήτων μετάβασης για κάθε κανάλι. Συνεπώς, έχουμε να αντιμετωπίσουμε τη λύση ενός Hidden Markov Model.

Τα κανάλια εξετάζονται διαδοχικά, χωρίς να έχουν ταξινομηθεί. Το Cognitive Radio παραμένει σε κάθε κανάλι για χρόνο ίσο με t_c / N , όπου N , το πλήθος των καναλιών. Η κατανομή σταθερής κατάστασης του κάθε καναλιού ssd_i , προσεγγίζεται από το *Hit Ratio* του καναλιού. Έτσι έχουμε:

$$\overline{ssd}_i = Hit\ Ratio_i = \frac{\# \text{ slots που το } i \text{ βρέθηκε σε "καλή" κατάσταση}}{t_c / N}, i=1, \dots, N \quad (4.6)$$

Οι πιθανότητες μετάβασης του κάθε καναλιού προσεγγίζονται ως εξής:

$$P_{12,i} = \frac{\# \text{ μεταβάσεων από "καλή" σε "κακή" κατάσταση}}{\# \text{ slots που βρέθηκε σε "καλή" κατάσταση}}, i=1, \dots, N \quad (4.7)$$

$$P_{21,i} = \frac{\# \text{ μεταβάσεων από "κακή" σε "καλή" κατάσταση}}{\# \text{ slots που βρέθηκε σε "κακή" κατάσταση}}, i=1, \dots, N \quad (4.8)$$

Συνεπώς με τη βοήθεια των σχέσεων (4.7), (4.8) προκύπτουν οι εκτιμώμενοι πίνακες πιθανοτήτων μετάβασης των καναλιών οι οποίοι είναι:

$$\bar{P}_i = \begin{bmatrix} 1 - \bar{p}_{12,i} & \bar{p}_{12,i} \\ \bar{p}_{21,i} & 1 - \bar{p}_{21,i} \end{bmatrix}, i=1, \dots, N \quad (4.9)$$

Η ταξινόμηση των καναλιών γίνεται κατά φθίνουσα βεβαρημένη εκτιμώμενη κατανομή σταθερής κατάστασης, η οποία για κάθε κανάλι είναι:

$$r_1 \frac{\bar{p}_{21}^{(i)}}{\bar{p}_{21} + \bar{p}_{12}^{(i)}} + r_2 \frac{\bar{p}_{12}^{(i)}}{\bar{p}_{21} + \bar{p}_{12}^{(i)}} = \frac{1}{\bar{p}_{21} + \bar{p}_{12}^{(i)}} \left(r_1 \bar{p}_{21}^{(i)} + r_2 \bar{p}_{12}^{(i)} \right), i=1, \dots, N \quad (4.10)$$

και το διάνυσμα πεποίθησης, το οποίο αρχικά είναι ίσο με την εκτιμώμενη κατανομή σταθερής κατάστασης $\bar{\omega}_i$, ενημερώνεται ως εξής:

$$\bar{\omega}_i(t+1) = \begin{cases} 1 - \bar{p}_{12,i} & \text{αν το κανάλι εξεταστεί και βρεθεί σε "καλή" κατάσταση} \\ \bar{p}_{21,i} & \text{αν το κανάλι εξεταστεί και βρεθεί σε "κακή" κατάσταση} \\ \bar{\omega}_i(t)(1 - \bar{p}_{12,i}) + (1 - \bar{\omega}_i(t))\bar{p}_{21,i} & \text{αν το κανάλι δεν εξεταστεί} \end{cases} \quad (4.11)$$

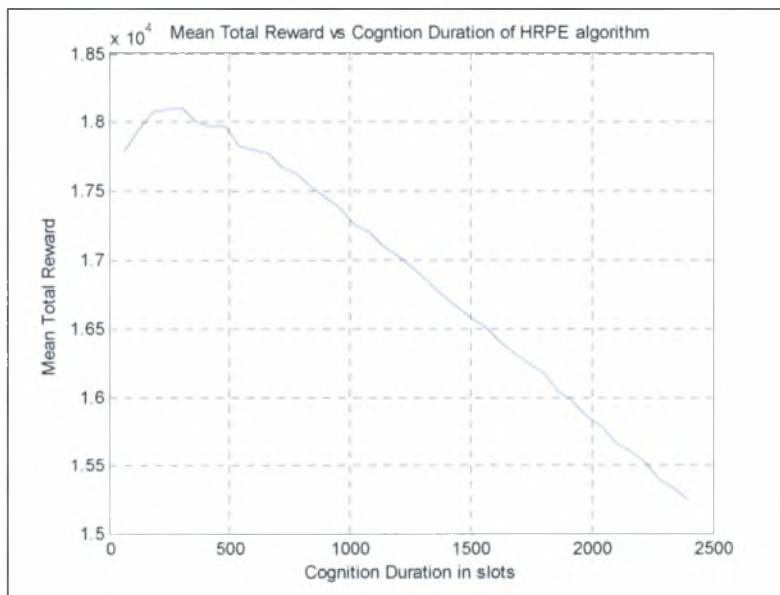
4.5 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Για να διερευνήσουμε τη συμπεριφορά και την απόδοση των αλγορίθμων των δύο προηγούμενων ενότητων, πραγματοποιούμε προσομοιώσεις για ένα Cognitive Radio, το οποίο ψάχνει ευκαιρίες μετάδοσης ανάμεσα σε 12 ανεξάρτητα και όχι στοχαστικά πανομοιότυπα κανάλια.

Οι πίνακες των πιθανοτήτων μετάβασης των καναλιών είναι:

$$P_i = \begin{bmatrix} P_{11}^{(i)} & P_{12}^{(i)} \\ P_{21}^{(i)} & P_{22}^{(i)} \end{bmatrix}, i=1, \dots, 12 \text{ και } P_1 \neq P_2 \neq \dots \neq P_{12} \quad (4.12)$$

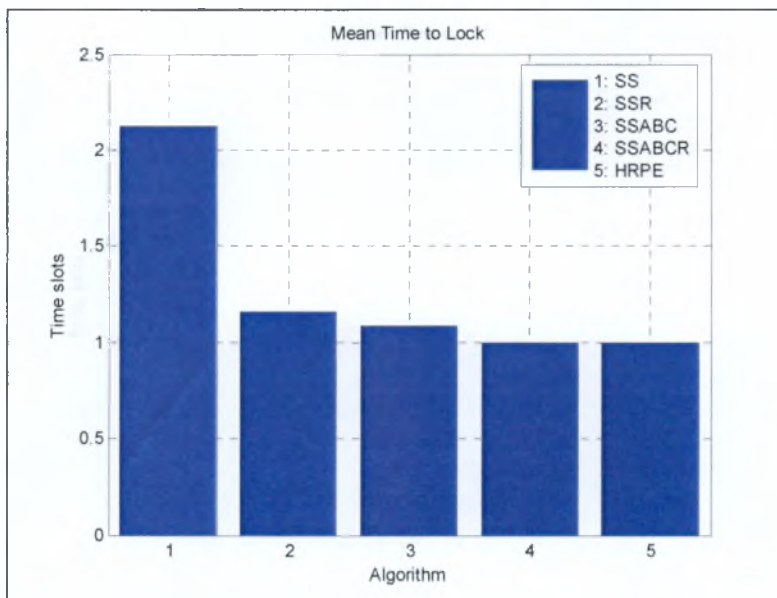
Η προσομοίωση εκτελείται για $T=12000$ slots. Η απόδοση των αλγορίθμων μετράται υπό τις ίδιες καταστάσεις και μεταβάσεις των καναλιών. Για τον Hit Ratio with Parameter Estimation - HRPE αλγόριθμο ο χρόνος εκτίμησης, t_c , των καναλιών έχει τεθεί ίσος με 300 slots. Ο βέλτιστος χρόνος t_c^* προκύπτει από την προσομοίωση του HRPE αλγορίθμου για διαφορετικούς χρόνους εκτίμησης. Για να διερευνήσουμε τη σχέση ανάμεσα σε διαφορετικούς χρόνους εκτίμησης t_c και το συνολικό throughput του HRPE αλγορίθμου, επαναλαμβάνουμε την προσομοίωση 100 φορές για κάθε $t_c = \{60, 120, 180, \dots, 2400\}$ και παρατηρούμε ότι το μέγιστο μέσο throughput επιτυγχάνεται για $t_c^*=300$ slots, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 4.1. Κατά τη διάρκεια του t_c το Cognitive Radio δε μεταδίδει. Η μέγιστη περίοδος διάρκειας μίας απόφασης πρόσβασης έχει τεθεί ίση με $t_d = 50$ slots.



Σχήμα 4.1: Mean Total Reward vs Cognition Duration of HRPE algorithm.

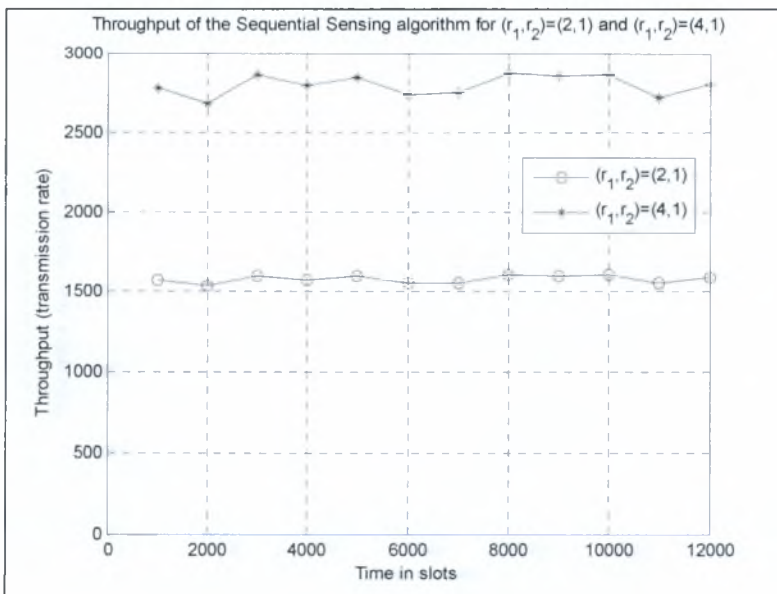
Παρακάτω, στο διάγραμμα 4.2 βλέπουμε το μέσο χρόνο απόφασης (*Mean Time to Lock*) για τους ανωτέρω αλγορίθμους. Για τον HRPE αλγόριθμο ο μέσος χρόνος απόφασης μετράται μετά την πάροδο του χρόνου εκτίμησης t_c . Επίσης ακολουθούν

διαγράμματα όπου μπορούμε να συγκρίνουμε την ικανότητα διαβίβασης δεδομένων (throughput) για διαφορετικά ζευγάρια ρυθμών μετάδοσης (r_1, r_2).

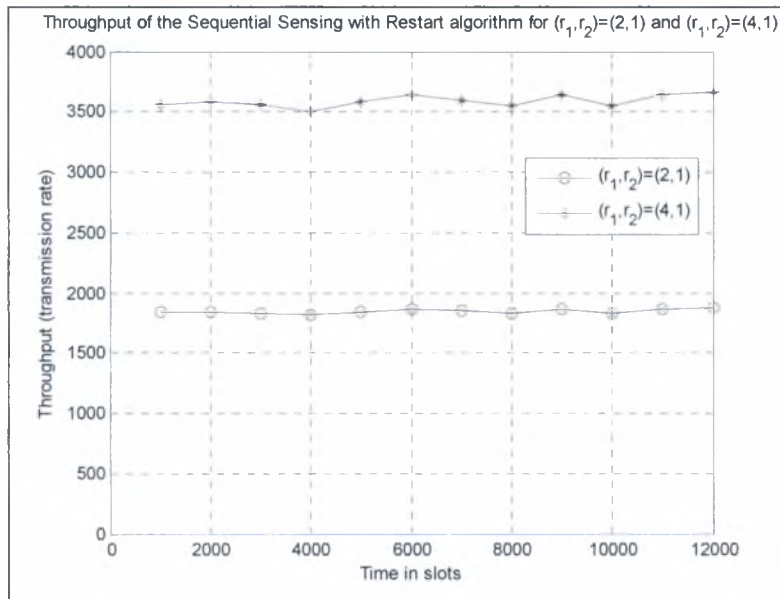


Σχήμα 4.2: Mean Time to Lock for each algorithm.

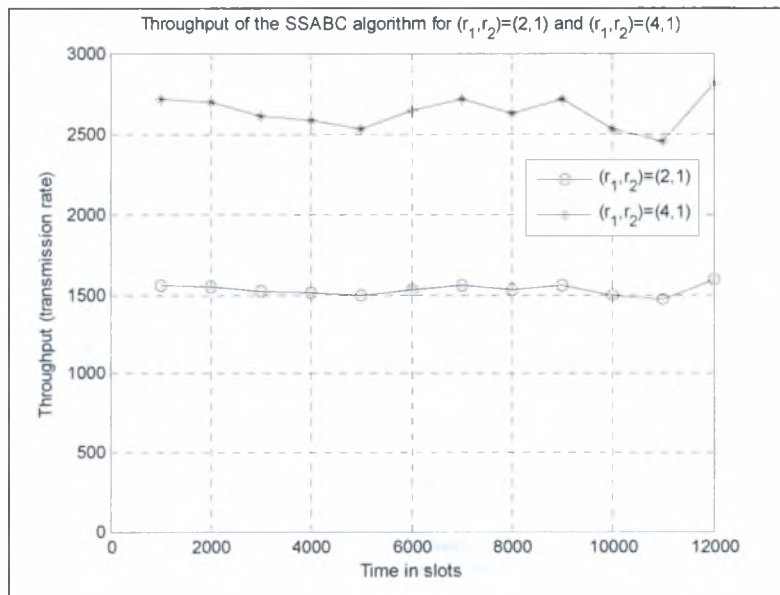
Στα διαγράμματα 4.3 έως 4.6 μπορούμε να δούμε το throughput για τους πρώτους τέσσερις αλγορίθμους για $(r_1, r_2) = (2, 1)$ και $(r_1, r_2) = (4, 1)$.



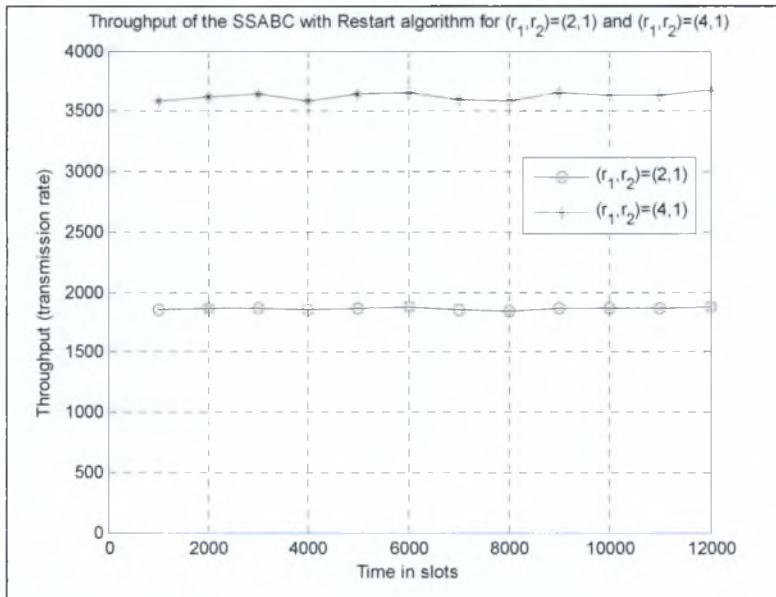
Σχήμα 4.3: Throughput of the Sequential Sensing algorithm.



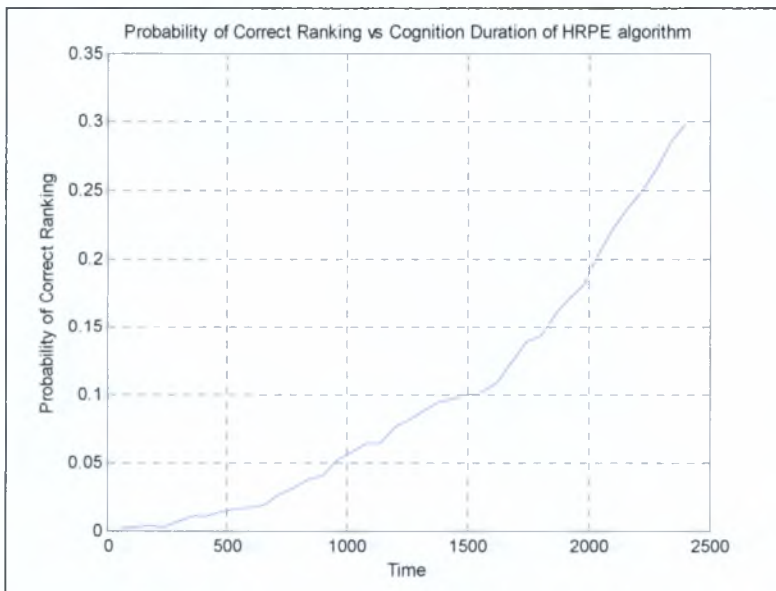
Σχήμα 4.4: Throughput of the Sequential Sensing with Restart algorithm.



Σχήμα 4.5 Throughput of the Sequential Sensing algorithm with Access from Bad Channel also.



Σχήμα 4.6: Throughput of the Sequential Sensing algorithm with Access from Bad Channel also and Restart.



Σχήμα 4.7: Probability of Correct Ranking vs Cognition Duration of the HRPE algorithm.

Στο διάγραμμα 4.7 φαίνεται η πιθανότητα η ταξινόμηση βάσει των εκτιμώμενων χαρακτηριστικών των καναλιών να είναι ταυτόσημη με την πραγματική για διαφορετικούς αρχικούς χρόνους εκτίμησης $t_c = \{60, 120, 180, \dots, 2400\}$. Ένα

ποιοτικότερο μέτρο για την αποτίμηση της ταξινόμησης των καναλιών σύμφωνα με τα εκτιμώμενα χαρακτηριστικά αποτελεί η Kendall-Tau απόσταση της εκτιμώμενης ταξινόμησης από την πραγματική.

Στο διάγραμμα 4.8 φαίνεται η μέση Kendall-tau απόσταση [18] της ταξινόμησης των καναλιών βάσει των εκτιμώμενων χαρακτηριστικών τους για διαφορετικούς αρχικούς χρόνους εκτίμησης $t_c = \{60, 120, 180, \dots, 2400\}$ από την πραγματική ταξινόμηση που προκύπτει βάσει των βεβαρημένων κατανομών σταθερής κατάστασης του κάθε καναλιού. Η Kendall-tau απόσταση αποτελεί ένα μέτρο ασυμφωνίας μεταξύ δύο πλήρων λιστών με το οποίο απαριθμούνται οι υπάρχουσες αντιμεταθέσεις μεταξύ όλων των ζευγών στοιχείων των λιστών. Αναλυτικότερα:

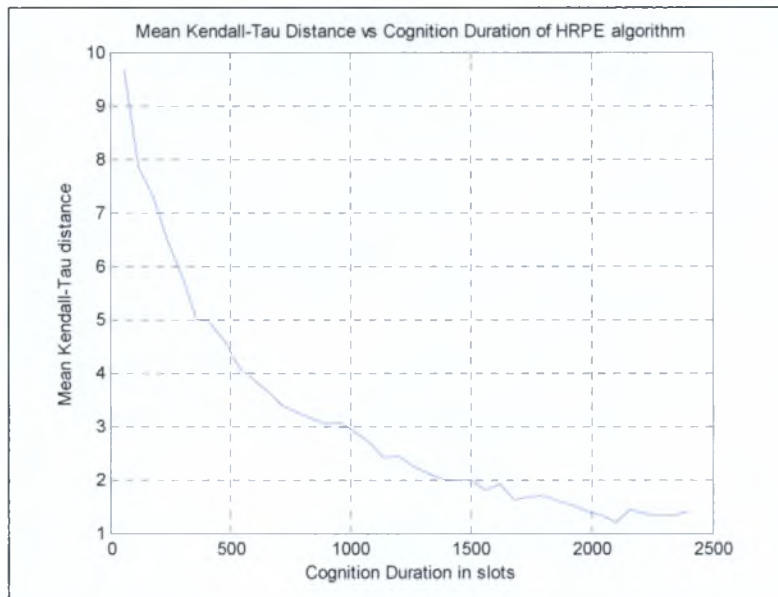
$$K(\tau_1, \tau_2) = |(i, j) : i < j, (\tau_1(i) < \tau_1(j) \wedge \tau_2(i) > \tau_2(j)) \vee (\tau_1(i) > \tau_1(j) \wedge \tau_2(i) < \tau_2(j))| \quad (4.13)$$

Για χάρη παραδείγματος αναφέρουμε την περίπτωση όπου έχουμε τρεις μηχανές αναζήτησης σελίδων στον παγκόσμιο ιστό, οι οποίες για ένα συγκεκριμένο ερώτημα δίνουν ως αποτέλεσμα τρεις ίδιες ιστοσελίδες ταξινομημένες με σειρά φθίνουσας συνάφειας με το ερώτημα που υποβλήθηκε. Θεωρώντας τη μηχανή αναζήτησης A ως μάντι, ο οποίος δίνει πάντοτε τη σωστή ταξινόμηση, προκύπτει η Kendall-tau απόσταση των ταξινομήσεων των μηχανών B και C από την ταξινόμηση της A να είναι:

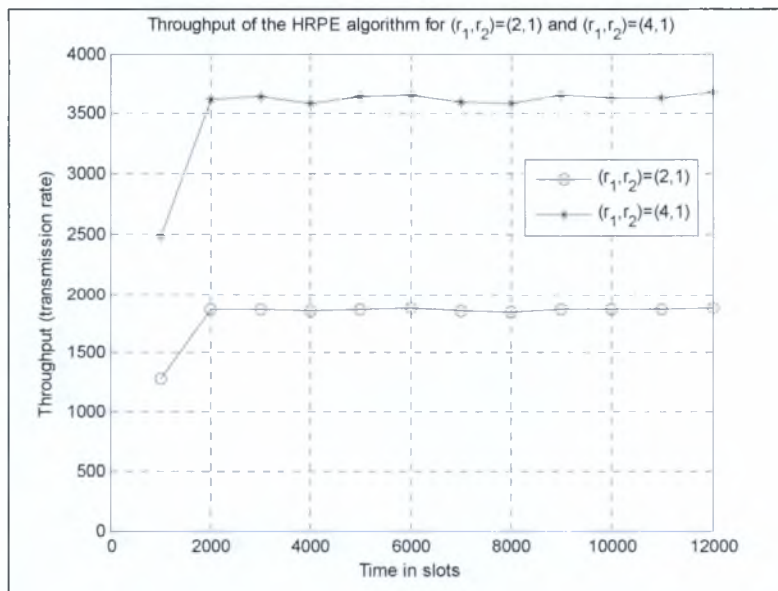
$$K(A, B) = 1, K(A, C) = 3 \quad (4.14)$$

	Rank A	Rank B	Rank C
Site 1	1	1	3
Site 2	2	3	2
Site 3	3	2	1
$K(A, x)$	0	1	3

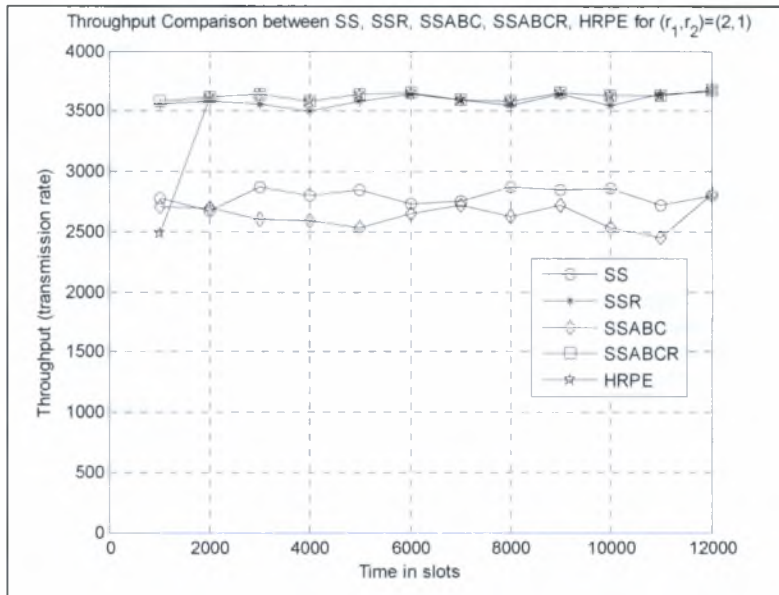
Παρατηρούμε ότι η Kendall-tau απόσταση για χρόνο εκτίμησης $t_c > 300$ slots είναι μικρότερη των 5 λαθών μετάθεσης. Η μέγιστη δυνατή απόσταση ισούται με $N(N-1)/2 = 66$.



Σχήμα 4.8: Kendall-Tau Distance from the real sort of the channels vs Cognition Duration for the HRPE algorithm.



Σχήμα 4.9: Throughput of the Hit Ratio Parameter Estimation Algorithm.



Σχήμα 4.10: Throughput Comparison between all Simulated Algorithms.

Στο διάγραμμα 4.9 μπορούμε να δούμε το throughput του HRPE αλγορίθμου για $(r_1, r_2) = (2,1)$ και $(r_1, r_2) = (4,1)$ και στο διάγραμμα 4.10 βλέπουμε μία σύγκριση, όσον αφορά το throughput, μεταξύ των πέντε αλγορίθμων που παρουσιάστηκαν για $(r_1, r_2) = (2,1)$. Παρατηρούμε ότι ο SSABCR αλγόριθμος είναι ελάχιστα καλύτερος από τον SSR, αλλά ο καλύτερος στο σύνολο. Αξιοσημείωτο είναι ότι μετά την πάροδο του χρόνου εκτίμησης t_c του HRPE αλγορίθμου η απόδοσή του βρίσκεται στα ίδια επίπεδα με του SSABCR.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται νέοι μηχανισμοί, με ελάχιστες υπολογιστικές απαιτήσεις, για την αποδοτική λειτουργία των ad hoc Cognitive Radio δικτύων. Οι μηχανισμοί αυτοί αναφέρονται τόσο σε περιπτώσεις όπου τα στατιστικά χαρακτηριστικά των προς πρόσβαση καναλιών είναι γνωστά στο χρήστη, όσο και στην περίπτωση που ο Cognitive Radio χρήστης καλείται να λειτουργήσει σε ένα άγνωστο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος του τρόπου εξέτασης των καναλιών και της απόφασης πρόσβασης η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε συνίσταται αρχικά στη μοντελοποίηση του ασύρματου μέσου, στην υπόθεση της γνώσης του Cognitive Radio σχετικά με τα χαρακτηριστικά των καναλιών, στη διαδικασία εξέτασης και στην απόφαση πρόσβασης σε κανάλι προς μετάδοση.

Πιο συγκεκριμένα στο κεφάλαιο 3 περιγράφονται δύο αλγόριθμοι εξέτασης των καναλιών. Ο πρώτος αναφέρεται στην περίπτωση που θεωρούνται εκ των προτέρων γνωστά τα χαρακτηριστικά των καναλιών και βάσει ενός διάνυσματος πεποίθησης λαμβάνεται η επιλογή του προς πρόσβαση καναλιού. Το διάνυσμα πεποίθησης ανανεώνεται σε κάθε χρονοθυρίδα ανάλογα με το αποτέλεσμα της παρατήρησης και βάσει των πιθανοτήτων μετάβασης των καταστάσεων των καναλιών. Ο δεύτερος αλγόριθμος, με την εισαγωγή ενός νέου μεγέθους, του *Hit Ratio*, εντοπίζει το υποσύνολο των καναλιών που παρουσιάζουν μεγαλύτερη πιθανότητα να βρίσκονται σε “καλή” κατάσταση σε σύγκριση με τα υπόλοιπα. Ουσιαστικά, με το *Hit Ratio*, έχουμε μία εκτίμηση της κατανομής σταθερής κατάστασης της Markov αλυσίδας που περιγράφει κάθε κανάλι. Προσομοιώσεις των αλγορίθμων δείχνουν ότι ο Score Based αλγόριθμος που βασίζεται στη χρήση του *Hit Ratio* παρουσιάζει απόδοση, που πλησιάζει ικανοποιητικά τον Belief Based αλγόριθμο, ο οποίος βασίζεται στο διάνυσμα πεποίθησης και τα χαρακτηριστικά των καναλιών θεωρούνται γνωστά.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται πέντε αλγόριθμοι στους οποίους η σειρά εξέτασης των καναλιών προκύπτει αφού ταξινομηθούν σύμφωνα με ένα κριτήριο ποιότητας. Οι καταστάσεις των καναλιών στο μοντέλο του κεφαλαίου αντιστοιχίζονται στους δυνάμενους ρυθμούς μετάδοσης από το Cognitive Radio. Στους πρώτους τέσσερις αλγορίθμους, στους οποίους τα στατιστικά χαρακτηριστικά των καναλιών θεωρήθηκαν γνωστά, η ταξινόμηση γίνεται σύμφωνα με τη βεβαρημένη κατανομή σταθερής κατάστασης, ενώ στον πέμπτο, όπου τα χαρακτηριστικά θεωρήθηκαν άγνωστα, η ταξινόμηση γίνεται κατόπιν της εκτίμησης των χαρακτηριστικών αυτών, σύμφωνα με τη βεβαρημένη εκτιμώμενη κατανομή σταθερής κατάστασης. Ως βάρη χρησιμοποιούνται οι δυνάμενοι ρυθμοί μετάδοσης ανά κατάσταση. Η απόφαση για πρόσβαση στο εξεταζόμενο κανάλι εξαρτάται από το εάν το επόμενο προς εξέταση κανάλι είναι πιθανότερο να δώσει στο Cognitive Radio μεγαλύτερη ανταμοιβή. Για την εξέταση της απόφασης στον πέμπτο αλγόριθμο γίνεται χρήση των εκτιμώμενων πιθανοτήτων μετάβασης των Markov αλυσίδων που χαρακτηρίζουν τα κανάλια, οι οποίες εξάγονται κατά τον αρχικό χρόνο που αφιερώνεται μόνο στην εκτίμηση των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τα κανάλια. Προσομοιώσεις των αλγορίθμων δείχνουν ότι ο αλγόριθμος Διαδοχικής Εξέτασης με Πρόσβαση και από “κακό” Κανάλι με Επανεκκίνηση (SSABCR) είναι ο καλύτερος από τους πρώτους τέσσερις. Ο τελευταίος αλγόριθμος, ο HRPE (Hit Ratio Parameter Estimation), μετά το χρόνο εκτίμησης των παραμέτρων των καναλιών, είναι το ίδιο αποδοτικός με τον SSABCR.

Ο τομέας στον οποίον ανήκουν οι μηχανισμοί που αναφέραμε είναι ταχύτατα αναπτυσσόμενος και παρουσιάζει ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον. Τα αποτελέσματα της παρούσης εργασίας μπορούν να χρησιμοποιηθεί στη διαδικασία της εξέτασης και της απόφασης για πρόσβαση (sensing and accessing) σε συσκευές που θα λειτουργούν με το 802.22 standard και συγκεκριμένα στον καθορισμό μιας αποτελεσματικής σειράς εξέτασης των καναλιών τόσο σε γνωστά όσο και σε άγνωστα ηλεκτρομαγνητικά περιβάλλοντα. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάποιο δίκτυο αισθητήρων, όπου δε είναι προκαθορισμένη συχνότητα εκπομπής, αλλά γίνεται δυναμική χρήση του φάσματος, όπως για παράδειγμα σε έναν αισθητήρα που μεταδίδει συνεχώς ένα

μετρούμενο μέγεθος, όπως θερμοκρασία ή υγρασία και κάνει broadcast των μετρήσεών του, χωρίς να τον αφορά ποιος είναι ο δέκτης των εκπεμπόμενων πληροφοριών.

Οι χαμηλές υπολογιστικές απαιτήσεις των αλγορίθμων που προτάθηκαν επιτρέπουν στους Cognitive Radio χρήστες να εξετάζουν τα διαθέσιμα κανάλια και να αποφασίζουν κάθε φορά μέσω ποιού καναλιού θα μεταδώσουν χωρίς να επιβαρύνονται σημαντικά όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας.

Όσον αφορά τη μελλοντική δουλειά, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη της διαδικασίας εξέτασης και πρόσβασης των καναλιών σε περιβάλλον πολλών Cognitive Radios που λειτουργούν συνεργατικά, καθώς και ο καθορισμός ενός τρόπου συγχρονισμού μεταξύ τους ώστε να γίνεται μία συνολικά βέλτιστη ανάθεση των προς πρόσβαση συχνοτήτων, ανάλογα και με τις ποιοτικές απαιτήσεις της υπηρεσίας που εξυπηρετείται, χωρίς να επιβαρύνονται κάποιοι χρήστες με τη συνεχή χρήση ποιοτικά υποδεέστερων καναλιών.

Βιβλιογραφία

- [1] FCC, *Spectrum Policy Task Force Report*, ET Docket No. 02-155, Nov 02, 2002.
- [2] S. Haykin, Cognitive radio: Brain-Empowered Wireless Communications, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 23 (2) (2005) 201–220.
- [3] FCC, *Spectrum Policy Task Force Report*, ET Docket No. 03-322, Dec 03, 2003.
- [4] J. Mitola III, Cognitive radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio, Ph.D Thesis, KTH Royal Institute of Technology, 2000.
- [5] F. Akyildiz, W.-Y. Lee, M. C. Vuran, S. Mohanty. NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey. *Computer Networks*, Volume 50, Issue 13, 15 September 2006, Pages 2127-2159.
- [6] D. Cabric, S.M. Mishra, R.W. Brodersen, “Implementation Issues in Spectrum Sensing for Cognitive Radios”, *IEEE ACSSC*, 2004,
- [7] C. Cordeiro, K. Challapali, and D. Birru, “IEEE 802.22: An Introduction to the First Wireless Standard based on Cognitive Radios, *IEEE Journal of Communications*, 2006.
- [8] Q. Zhao, L. Tong, A. Swami, and Y. Chen, “Decentralized Cognitive MAC for Opportunistic Spectrum Access in Ad Hoc Networks: A POMDP Framework”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2007.
- [9] Q. Zhao, B. Krishnamachari, K. Liu, “On Myopic Sensing for Multi-Channel Opportunistic Access”, *IEEE CogNet*, 2007.
- [10] L. Lai, H.E. Gamal, H. Jiang, and V. Poor, “Cognitive Medium Access: Exploration, Exploitation and Competition”, *arXiv:0710.1385v1*, 2007.
- [11] L. Lai, H.E. Gamal, H. Jiang, and V. Poor, “Optimal Medium Access Protocols for Cognitive Radio Networks”, *arXiv:0802.2703v1*, 2008.
- [12] D. Bourse et. al, “An alternative concept to scanning process for cognitive radio systems: technical and regulatory issues”, *IEEE ISTMWC*, 2007.
- [13] J. Neel, J.H. Reed, R.P. Gilles, “The Role of Game Theory in the Analysis of Software Defined Radio Networks”, *SDR Technical Conference and Product Exposition*, 2002.

- [14] J. Neel, R. Menon, J.H. Reed, A.B. MacKenzie, "Using Game Theory to Analyze Physical Layer Cognitive Radio Algorithms", Quello Center, Michigan State University, May 16-17, 2005.
- [15] M. T. Izadi, and D. Precup, "Using rewards for belief state updates in partially observable Markov decision process", in *proceedings of the European Conference on Machine Learning*, pp. 593-600, Porto, Portugal, 2005.
- [16] E. N. Gilbert, "Capacity of a burst noise channel", *Bell Syst. Tech. J.* 39:1253-1265, September, 1960.
- [17] E. O. Elliot, "Estimates of error rates for codes on burst noise channels", *Bell Syst. Tech. J.* 42: 1977-1997, September, 1963.
- [18] R. Fagin, R. Kumar, and D. Sivikumar, "Comparing top k lists", *Proc. of the ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, 2003.

Spectrum Scanning Algorithms for Cognitive Radio Networks

Vasilis Miliotis

Department of Computer and Communications Engineering
University of Thessaly, Greece
Email: vmiliotis@uth.gr

Jordanis Koutsopoulos

Department of Computer and Communications Engineering
University of Thessaly, Greece
Email: jordan@uth.gr

Abstract—Cognitive Radio (CR) is a promising technology, which aims to improve and enhance the utilization of the spectrum. This technology enables a wireless user to function in both unlicensed and licensed bands without causing any interference to primary users. In order to achieve this functionality a CR needs to sense the spectrum and exploit efficiently the transmission opportunities. In this paper we propose two sets of heuristic Sensing Algorithms for ad hoc Cognitive Radio Networks, where each user tries to exploit “spectrum holes” based only on its own criteria and observations. The first set of algorithms refers to an immediate reward approach, where every time a “spectrum hole” is detected, it is used instantaneously. The second set refers to an immediate versus future reward approach, where the CR may wait to sense the next channel instead of transmitting in the current, if the expected reward by using the next channel is greater than the instant. In our proposed algorithms we examine both cases of known and unknown statistical characteristics of the channels. For the case of unknown channel parameters we introduce an initial estimation time and we investigate through simulations the impact of different cognition periods on the system’s throughput.

I. INTRODUCTION

The limited available spectrum and its inefficient utilization necessitates the development of new telecommunication systems that will be able to exploit opportunistically the existing spectrum. Measurements that have been done in rich in electromagnetic transmissions urban environments [1], have shown that temporal and geographic usage of spectrum ranges from 15% to 85%. The variant use of spectrum that was observed, led to the inference that “spectrum holes” [2], exist there and could be utilized opportunistically by secondary users. The term “spectrum hole” is used in order to describe a band of frequencies, which, while being legitimately assigned to a primary user, is not used by that user temporarily and at various geographic locations. The commission that is in charge of the spectrum management in U.S.A (Federal Communication Commission - F.C.C.), by comprehending the coming congestion on the usage of electromagnetic spectrum, opened the way for the secondary users to exploit the available spectrum without causing interference to the primary users [3].

The idea for the development of systems for opportunistic access to the electromagnetic spectrum is faced as a pioneering approach for the improvement of the usage of this precious resource, particularly after the doctoral dissertation of J. Mitola III [4], who is the first to introduce the term Cognitive Radios.

In his dissertation he defines Cognitive Radios as wireless devices that are able to change their transmission parameters, based on their interaction with the environment in which they function.

Consequently, in order to enable a CR to exploit the spectrum opportunistically, it is necessary that it meets some requirements for certain cognitive functions [5]. The essential steps, required for the adaptive operation of a CR, are known as the “Cognitive Cycle” [4]. The main operations that are executed during a cognitive cycle are (i) the examination of the spectrum (spectrum sensing), in which the CR searches and detects the “spectrum holes”, (ii) the spectrum analysis, in which the characteristics of the detected “spectrum holes” are estimated, and (iii) the spectrum decision, in which the CR determines which frequency band will be used, as well as the transmission rate depending on its requirements and on the characteristics of the chosen band.

As soon as the spectrum decision is made, the CR can start transmitting. Nevertheless, since the electromagnetic environment changes over time and geographic location, the CR needs to monitor these changes, in order to be able to vacate the accessed channel when it becomes unavailable and change over to an other. In this way seamless communication can be achieved. Any change during transmission time such as the appearance of a primary user, the movement of the user or a traffic variation must trigger the CR to adjust its parameters on the new spectral conditions.

II. MOTIVATION

The spectrum sensing and accessing in a Cognitive Radio Network depends mainly on the implemented network architecture. Thus, in a hierarchical structured network, each user could sense the spectrum separately in a distributed way and the sensing outcomes could be sent to a network coordinator who would finally decide how the allocation of the free channels should be done.

In the case of an ad hoc CR Network, which constitutes the subject of the present work, every user functions autonomously, i.e. based on its own observation results decides which is the best channel to access.

Most of the existing works on spectrum exploration and exploitation propose sensing algorithms which burden the CR with computationally demanding functions. The optimality of

some of the proposed algorithms is proved, but their real time implementation on a CR would provoke high power and computational resource consumption.

In this paper we propose two sets of heuristic sensing algorithms with low computational requirements for the function of exploring and exploiting of transmission opportunities by a CR user that operates autonomously in an ad hoc CR Network. The first set of algorithms refers to an immediate reward approach, where every time a transmission opportunity is detected, it is exploited instantly. The second set refers to an immediate versus future reward approach, where a CR user may wait for a better transmission opportunity instead of using the current. The basic steps that we followed for the design of these algorithms comprise the modeling of the wireless medium, the assumption on the a priori knowledge of the CR as regards the statistical characteristics of the examined channels and the decision criteria for access to a specific channel.

III. RELATED WORK

In the past few years, because of the augmenting congestion in the usage of the electromagnetic spectrum and after studies [6], that brought in the surface the fact that licensed channels are not continually and geographically broadly used, the research activity in the field of systems for opportunistic spectrum access was increased considerably.

A basic feature in such systems, that is required for CR users, is the ability of scanning the channels, aiming to detect transmission opportunities. This operation requires particular sensitivity of the reception antennas. Certain initial technical specifications have been published by the IEEE 802.22 Working Group [7], which refers to hierarchical structured secondary networks. The authors in [8] present a decentralized MAC protocol for ad hoc CR networks, where each user maintains a belief vector about the states of the channels. The availability of the channels follows a Markov process. As the monitoring capabilities of the spectrum are limited, the user maps the current belief vector to a sensing and accessing decision, in order to maximize its total throughput. The mapping of the belief vector to a sensing and accessing decision is approached as a Partially Observable Markov Decision Process (POMDP). The work in [9] presents a myopic policy for the detection of “spectrum holes”, modeling the channels as independent and statistically identical Markov processes. This policy aims at the maximization of immediate reward, overlooking the impact of current decision in the future evolution of the users payoff. The optimality of this policy is proved for $N = 2$ channels, while for $N > 2$ it is left as an open issue. In [10] the equivalence of the sensing and accessing problem in CR networks with the multi-armed bandit problem is proved. The tradeoff between exploring and exploiting the channels is studied in order to achieve a balance between seeking for transmission opportunities and exploiting the available channels. The same approach is used in [11], but this time a multi-user CR network is assumed. A form of competition is added now in the problem. Consequently, for

the avoidance of conflicts, a Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (CSMA-CA) protocol is proposed. An alternative approach from that of the main stream that prevails in the field is followed in [12]. In the case of not predetermined portions of the spectrum for sensing and accessing and for unknown statistical characteristics of the channels, a sensing policy would lead to waste of time and power. Thus, the use of a “pilot” channel is proposed, through which relative information on the channels are provided to the users. In [13] and [14] the use of game theory is proposed for a multi-CR system. In this case a user adapts its operation according to his perception for the existence of primary users, but also considering the probable adaptation of operation of other secondary users.

IV. IMMEDIATE REWARD SYSTEMS

In [8], [10], [11] the solution for the sensing and accessing problem is based on the calculation of a belief vector, which depicts the probability distribution of the states of the channels. This vector is calculated taking into consideration the decision history and the results of observations. Nevertheless, in [15] it is proved that the additional use of the induced rewards by the taken decisions decreases the uncertainty in the computation of the belief vector.

In this section we propose two heuristic algorithms for the sensing problem in the context of an ad hoc CR network. In the first algorithm the statistical characteristics of the channels are assumed known a priori to the CR user, while in the second no information is available.

A. System Model

We consider a CR user searching for channels to exploit. The available spectrum consists of N channels. These N channels are modeled as independent but not stochastically identical Gilbert-Elliot [16], [17] channels. We assume the existence of several groups of channels. Only channels that belong to the same group are stochastically identical. Every channel can be either in “good” or in “bad” state. For the case of Cognitive Radios we map the “good” state to an unused channel, and the “bad” state to a used channel. The transitions between the above states of a channel form a Markov chain with transition probabilities $\{p_{ij}\}$, $i, j = 0, 1$. The time is assumed in slots and channel states are updated in every slot. The CR senses one channel per slot. If the channel is found unused, the CR transmits and takes a reward equal to 1. If not, it waits for the next slot.

B. Immediate Reward Algorithms

For the sake of comparison we describe and implement two more algorithms, one for random and one for sequential sensing. Thus, in the following, four algorithms are described for an immediate reward system.

1) *Random Sensing (RS)*: In the random sensing algorithm, at the start of each slot, the next channel to be examined is chosen randomly with equal probability. As expected, through simulations we can see that poor throughput is achieved.

2) *Sequential Sensing (SS)*: In the sequential sensing (SS) algorithm, the channels are examined sequentially according to their frequencies. Again, transmission opportunities are exploited immediately. The throughput of the sequential sensing does not differ from the random sensing.

3) *Belief Based Sensing (BBS)*: In the two preceding algorithms it is obvious that no knowledge of the transition probability matrices is available to the CR user. For the case of known transition probabilities we develop a Belief Based Sensing algorithm. A belief vector $\mathbf{v}(t)$ expresses the belief of the CR user that channels are at “good” state at time t . For the first slot choice, the initial values of the elements of the belief vector are equal to the steady state distribution of the underlying Markov chain of each channel. The steady state distribution is equal to the left-hand eigenvector of the transition probability matrix corresponding to the dominant eigenvalue λ_1 (as the transition probability matrix is stochastic $\lambda_1 = 1$). Analytically,

$$v_i(0) = \frac{p_{bg,i}}{p_{bg,i} + p_{gb,i}}, \quad i = 1, \dots, N \quad (1)$$

At the beginning of each slot the CR decides to visit the channel with the maximum probability of being unused, i.e. the corresponding channel to the maximum element of the belief vector. At the end of slot t , given the sensed channel is a and the observation S_a , the CR updates the belief vector as follows:

$$v_i(t+1) = \begin{cases} p_{gg,i}, & \text{if } a=i \text{ and } S_a=\text{“good”} \\ p_{bg,i}, & \text{if } a=i \text{ and } S_a=\text{“bad”} \\ v_i(t)p_{gg,i} + (1 - v_i(t))p_{bg,i}, & \text{if } a \neq i \end{cases} \quad (2)$$

4) *Score Based Sensing (SBS)*: In the score based sensing algorithm, we enable the CR user to act randomly for a small initial period of time t_c , which is the cognition time. In order to estimate the steady state distribution of the underlying Markov chain of each channel we introduce a simple though useful measure, the *Hit Ratio*, where

$$\text{Hit Ratio}_i = \frac{\# \text{ slots with } S_i=\text{“good”}}{\# \text{ observations of } i}, \quad i = 1, \dots, N \quad (3)$$

Under these observations at the end of t_c , the CR chooses the subset of channels with the higher Hit Ratio and continues to choose randomly, but this time among the subset of channels with the higher *Hit Ratio*. It is underlined that in this algorithm there is no information on the transition probability matrices of the channels, though its performance is not much subordinate than this of the preceding. Through simulations it is observed that its throughput is similar to that of the Belief Based Sensing algorithm.

V. IMMEDIATE VS FUTURE REWARD SYSTEMS

In this section we propose three heuristic algorithms for sensing and accessing, where the CR user does not exploit immediately the transmission opportunities. We introduce a

decision process, which enables the CR to compare the immediate to the future reward and decide if it prefers to wait for a probably greater reward than the instant. In the first two algorithms the channel parameters are assumed known a priori, while in the third no information is available. In the last algorithm we propose an estimation procedure for the parameters of the Markov chains that describe the system’s channels. The parameters estimation of the system belongs to the estimation problems of a Hidden Markov Model (HMM), where no analytical solution exists for the minimization of the distance between the estimated and the real parameters [18]. The common characteristic of the algorithms of this section is that the channels are sensed sequentially after being ranked according to a quality criterion.

A. System Model

We consider a CR user searching for channels to exploit. The available spectrum consists of N channels. These N channels are modeled as independent but not stochastically identical Gilbert-Elliot [16], [17] channels. Every channel can be either in “good” or in “bad” state. For the case of Cognitive Radios we map the “good” state to a transmission rate equal to r_1 , and the “bad” state to a transmission rate equal to r_2 , where $r_1 > r_2$. The transitions between the above states of a channel form a Markov chain with transition probabilities $\{p_{ij}\}$, $i, j = 1, 2$. The time is assumed in slots and channel states are updated in every slot. The CR senses only one channel per slot. A belief vector $\mathbf{v}(t)$ expresses the estimate of the user for the probability that channels are at “good” state in slot t . It is updated according to the transition probabilities of the channels as well as the sensing outcome of the last examined channel.

B. Immediate vs Future Reward Algorithms

1) *Sequential Sensing with Restart (SSR)*: In this algorithm the transition probabilities of the states of the channels are known. The belief of the CR user that the channels are at “good” state is expressed with a belief vector. In the first time slot the initial values of the elements of the belief vector are equal to the steady state distribution (s.s.d) of the Markov process that characterizes each channel according to (1). The CR user ranks the channels by decreasing weighted s.s.d. by rates. Thus, the weighted s.s.d. for channel i can be expressed as follows:

$$r_1 \frac{p_{21,i}}{p_{21,i} + p_{12,i}} + r_2 \frac{p_{12,i}}{p_{21,i} + p_{12,i}} \quad (4)$$

which can be written as:

$$\frac{1}{p_{21,i} + p_{12,i}} (r_1 p_{21,i} + r_2 p_{12,i}) \quad (5)$$

At the beginning the CR starts sensing the channels according to the above ranking. During the sensing time t_s , the belief vector is updated. At the end of each slot a condition is examined and decision $d(t)$ is taken. If the condition stands $d(t)=1$, and the CR transmits through the last examined channel for the next $t_d - t_s$ slots. Otherwise $d(t)=0$ and it

continues sensing the next channel. Where t_d is the maximum decision duration. Given the observation S_i in slot t , the decision $d(t)$ is expressed as follows:

$$d(t) = \begin{cases} 1, & \text{transmit in channel } i \text{ in } t+1 \text{ slot, if } S_i=1 \text{ and} \\ & p_{11}^{(i)} > v_{i+1}(t+1)p_{11}^{(i+1)} + (1 - v_{i+1}(t+1))p_{21}^{(i+1)} \\ 0, & \text{scan channel } i+1 \end{cases} \quad (6)$$

where $S_i=1$ if channel i was found in “good” state and $S_i=2$ if channel i was found in “bad” state.

Every t_d seconds the previous procedure is repeated. During access time the update of the belief vector continues in order to enrich its knowledge of the channels. When the decision duration ends, the CR starts scanning the channels from the beginning according to their initial ranking.

2) *Sequential Sensing with Access from Bad Channel also and Restart (SSABCR)*: This algorithm differs from the previous in that the CR can lock to a channel even if it is found in “bad” state and transmit in lower rate. Now, the decision $d(t)$ is expressed as:

$$d(t) = \begin{cases} 1, & \text{transmit in channel } i \text{ in } t+1 \text{ slot, if } S_i=1 \text{ and} \\ & p_{11}^{(i)} > v_{i+1}(t+1)p_{11}^{(i+1)} + (1 - v_{i+1}(t+1))p_{21}^{(i+1)} \\ & \text{or if } S_i=2 \text{ and} \\ & p_{21}^{(i)} > v_{i+1}(t+1)p_{11}^{(i+1)} + (1 - v_{i+1}(t+1))p_{21}^{(i+1)} \\ 0, & \text{scan channel } i+1 \end{cases} \quad (7)$$

3) *Hit Ratio with Parameter Estimation Algorithm (HRPE)*: To implement the previous algorithm in case of unknown channel parameters we dedicate an initial time t_c for cognition purposes. During this time the CR user estimates the s.s.d. of the Markov chains of the channels as well as their transition probabilities. The channels are examined sequentially according to their frequencies, before being ranked. Every channel is sensed for t_c/N continuous slots, where N is the number of the channels. The s.s.d is estimated by the *HitRatio* according to (3) and the transition probabilities are estimated according to (9), (10).

$$\widehat{ssd}_i = \text{Hit Ratio}_i, \quad i = 1, \dots, N \quad (8)$$

$$\widehat{p}_{12,i} = \frac{\# \text{ transitions of } i \text{ from "good" to "bad"}}{\# \text{ observations of } i \text{ with } S_i=\text{"good"}}, \quad i = 1, \dots, N \quad (9)$$

$$\widehat{p}_{21,i} = \frac{\# \text{ transitions of } i \text{ from "bad" to "good"}}{\# \text{ observations of } i \text{ with } S_i=\text{"bad"}}, \quad i = 1, \dots, N \quad (10)$$

The ranking of the channels here is done by decreasing weighted estimated s.s.d. by rates. For every channel we have:

$$\frac{1}{\widehat{p}_{21,i} + \widehat{p}_{12,i}} (r_1 \widehat{p}_{21,i} + r_2 \widehat{p}_{12,i}) \quad (11)$$

and the belief vector, which initially is equal to the estimated s.s.d, is now updated as follows:

$$\widehat{v}_i(t+1) = \begin{cases} \widehat{p}_{gg,i}, & \text{if } a=i \text{ and } S_a=\text{"good"} \\ \widehat{p}_{bg,i}, & \text{if } a=i \text{ and } S_a=\text{"bad"} \\ \widehat{v}_i(t)\widehat{p}_{gg,i} + (1 - \widehat{v}_i(t))\widehat{p}_{bg,i}, & \text{if } a \neq i \end{cases} \quad (12)$$

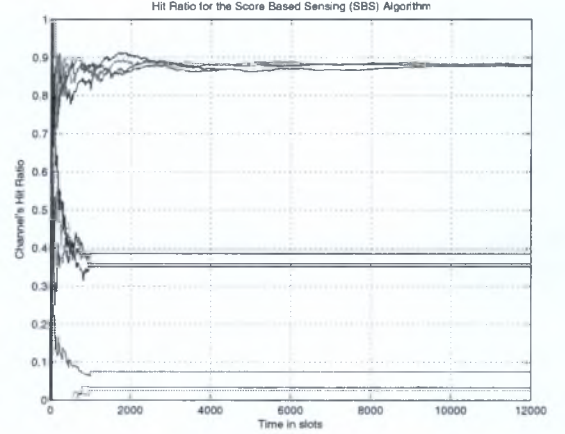


Fig. 1. The s.s.d. estimation with the use of *Hit Ratio* for the SBS algorithm

VI. SIMULATION RESULTS

A. Simulation of Immediate Reward Algorithms

We simulated the immediate reward algorithms over 12 channels, grouped in 3 different classes according to their quality. The simulation is running for $T=12000$ slots and the performance is measured under the same channel states and transitions for all algorithms. For the SBS algorithm we set the initial cognition time to $t_c=1000$ slots. In Fig. 1 we can see the *Hit Ratio* of the channels for the SBS algorithm. We observe that after t_c , only the channels with high *Hit Ratio* are sensed. This policy enables the CR to operate nearly like the BBS algorithm, without knowing the channel parameters at the beginning of the cognition time. This fact becomes clearer in Fig. 2, which depicts the reward over time for all the immediate reward algorithms. Through the simulation we saw that the Score Based algorithm is subordinate from the Belief Based for less than 10% as regards the reward obtained over a period of time T , while Random and Sequential Sensing algorithms have lower rewards in the order of more than 50%.

B. Simulation of Immediate vs Future Reward Algorithms

In our simulations we have assumed 12 stochastic and non statistical identical Markov channels. In order to explore the tradeoff between cognition time and total system throughput for the HRPE algorithm we repeated the simulation for different $t_c=\{60, 120, 180, \dots, 2400\}$ time slots, 100 times for each cognition duration. Every simulation runs for $T=12000$ slots and the maximum decision duration was set equal to $t_d=50$ slots. In Fig. 3 we can see the mean system's throughput for different cognition durations. The maximum mean throughput for a total time of $T=12000$ slots is achieved for cognition time $t_c=300$ slots. In Fig. 4 we see a throughput comparison for all the immediate vs future reward algorithms when the $t_c=300$ slots for the HRPE algorithm. We observe that the SSABCR algorithm is slightly better than the SSR and best in overall performance. The HRPE algorithm has satisfactory

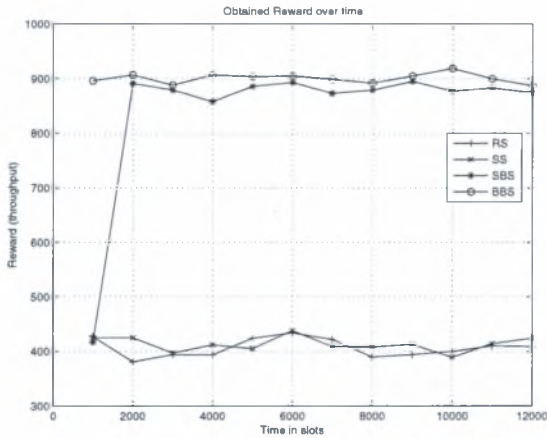


Fig. 2. The reward over time for all the immediate reward algorithms

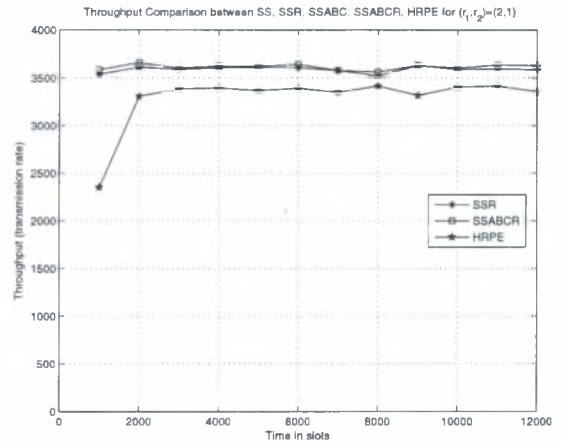


Fig. 4. Throughput comparison for all the immediate vs future reward algorithms

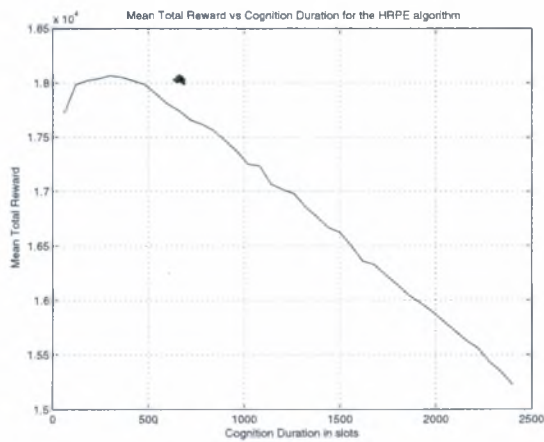


Fig. 3. The mean total reward vs cognition duration for the HRPE algorithm

performance even if the statistical characteristics of the channels are initially unknown.

VII. CONCLUSIONS

We considered the problem of spectrum sensing and accessing in the context of Cognitive Radio networks for both immediate reward and immediate vs future reward systems. The proposed algorithms cover both the cases of known and unknown channel parameters. In the case of unknown channel characteristics we introduced heuristic measures for the estimation of the unknown parameters and we saw that the performance of the corresponding algorithms has not subordinate performance to these with known channel characteristics. A prime feature of the proposed algorithms is that they present low computational requirements and are able for satisfying performance in real-time systems.

REFERENCES

- [1] FCC. "Spectrum Policy", *Task Force Report*, ET Docket No. 02-155, Nov. 02, 2002.
- [2] S. Haykin. "Cognitive Radio: Brain - Empowered Wireless Communications". *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. . no. , pp. . 2005.
- [3] FCC. "Spectrum Policy", *Task Force Report*, ET Docket No. 03-322, Dec 03, 2003.
- [4] J. Mitola . "Cognitive radio: An Integrated Agent Architecture for Software Dened Radio". *Ph.D Thesis*, KTH Royal Institute of Technology, 2000.
- [5] F. Akyildiz, W.-Y. Lee, M. C. Vuran, S. Mohanty, "NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey", *Computer Networks*, vol.50 , no.13 , pp.2127-2159 . 2006.
- [6] D. Cabric, S.M. Mishra, R.W. Brodersen . "Implementation Issues in Spectrum Sensing for Cognitive Radios". *IEEE ACSSC*, 2004.
- [7] C. Cordeiro, K. Challapali, and D. Birru . "IEEE 802.22: An Introduction to the First Wireless Standard based on Cognitive Radios". *IEEE Journal of Communications*, 2006.
- [8] Q. Zhao, L. Tong, A. Swami, and Y. Chen. "Decentralized Cognitive MAC for Opportunistic Spectrum Access in Ad Hoc Networks: A POMDP Framework". *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2007.
- [9] Q. Zhao, B. Krishnamachari, K. Liu, "On Myopic Sensing for Multi-Channel Opportunistic Access", *IEEE CogNet*, 2007.
- [10] L. Lai, H.E. Gamal, H. Jiang, and V. Poor . "Cognitive Medium Access: Exploration, Exploitation and Competition", , 2007.
- [11] L. Lai, H.E. Gamal, H. Jiang, and V. Poor . "Optimal Medium Access Protocols for Cognitive Radio Networks", , 2008.
- [12] D. Bourse et. al . "An alternative concept to scanning process for cognitive radio systems: technical and regulatory issues", *IEEE ISTMWC*, 2007.
- [13] J. Neel, J.H. Reed, R.P. Gilles . "The Role of Game Theory in the Analysis of Software Defined Radio Networks", *SDR Technical Conference and Product Exposition*, 2002.
- [14] J. Neel, R. Menon, J.H. Reed, A.B. MacKenzie . "Using Game Theory to Analyze Physical Layer Cognitive Radio Algorithms", *Quello Center, Michigan State University*, 2005.
- [15] M. T. Izadi, and D. Precup. "Using rewards for belief state updates in partially observable Markov decision process". *In proceedings of the European Conference on Machine Learning*, 2005.
- [16] E. N. Gilbert, "Capacity of a burst noise channel", *Bell Syst. Tech. J.* , Vol. 39, pp. 1253-1265. 1960.
- [17] E. O. Elliot, "Estimates of error rates for codes on burst noise channels", *Bell Syst. Tech. J.*, Vol.42, pp. 1977-1997, 1963.
- [18] L. R. Rabiner . "A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition". *Proc. IEEE*, vol. 77, no. 2, pp. 257-285, 1989.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

