

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

“Πρωτόκολλα Πρόσβασης Μέσου Βασισμένα σε Ευκαιριακές
Μεταδόσεις για Ευφυή Ασύρματα Δίκτυα Πολλαπλών Καναλιών”



Γεώργιος Βλαχαντώνης

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Καθηγητής Μιχαήλ Πατεράκης (Επιβλέπων)

Καθηγητής Αθανάσιος Λιάβας

Αναπλ. Καθηγητής Πολυχρόνης Κουτσάκης

Χανιά, Κρήτη
2015

Περίληψη

Καθώς οι απαιτήσεις από τις ασύρματες εφαρμογές συνεχώς αυξάνονται, νέες πρακτικές καλύτερης αξιοποίησης του ράδιο-φάσματος προτείνονται. Τα ευφυή ασύρματα δίκτυα (Cognitive Radio Networks) είναι μια τέτοια ιδέα που στοχεύει στην καλύτερη αξιοποίηση φασμάτων που απαιτούν άδεια για την χρήση τους. Η ιδέα είναι οι δευτερεύοντες (χωρίς άδεια) χρήστες να συνυπάρχουν με τους πρωτεύοντες με τέτοιο τρόπο ώστε να μην τους παρεμβάλουν αλλά και κατά το δυνατό ούτε να παρεμβάλλονται μεταξύ τους. Ο κατάλληλος σχεδιασμός λοιπόν του δευτερεύοντος δικτύου παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην αποδοτική υλοποίηση των ευφυών ασύρματων δικτύων. Διάφορα πρωτόκολλα Ελέγχου Πρόσβασης στο Μέσο έχουν προταθεί για τους δευτερεύοντες χρήστες ενός Cognitive Radio Network. Στη δική μας μελέτη θεωρούμε ένα σενάριο επικοινωνίας με πολλά κανάλια μετάδοσης πάνω στα οποία οι πρωτεύοντες χρήστες μεταδίδουν την πληροφορία τους, και ένα κανάλι ελέγχου πάνω στο οποίο οι δευτερεύοντες χρήστες ανταλλάσσουν σήματα ελέγχου. Όλα τα κανάλια θεωρούνται συγχρονισμένα και χωρισμένα σε σχισμές (slots). Οι δευτερεύοντες χρήστες συνεργάζονται και ανταλλάσσουν πληροφορία μέσα από το κανάλι ελέγχου για να βρουν ποιά κανάλια μετάδοσης είναι διαθέσιμα σε κάθε slot. Στη συνέχεια αποφασίζουν κατανομημένα ποιοι από αυτούς θα μεταδώσουν μέσα από έναν μηχανισμό επίλυσης σύγκρουσης. Σχεδιάζουμε και προσομοιώνουμε το μοντέλο του συστήματος μέσα από διαφορετικές προσεγγίσεις. Η πρώτη προσέγγιση περιλαμβάνει ένα στατικό μοντέλο (ως προς την διάρκεια της περιόδου κατά την οποία ανταλλάσσουν σήματα ελέγχου οι δευτερεύοντες χρήστες), και στην συνέχεια δοκιμάζουμε δύο δυναμικά μοντέλα (τα οποία αναφέρονται ως Full Success και Channel Success). Προσομοιώνουμε τα προτεινόμενα μοντέλα με διάφορους συνδυασμούς τιμών των παραμέτρων του συστήματος, τα συγκρίνουμε και τα αξιολογούμε με βάση την απόδοσή τους (δηλαδή το επιτυγχανόμενο throughput). Τέλος προτείνεται ένας μηχανισμός που επιτρέπει στους χρήστες να λειτουργούν χωρίς κεντρικό έλεγχο. Μέσα από προτεινόμενους ελέγχους οι ίδιοι οι χρήστες παίρνουν αποφάσεις και προσαρμόζουν την συμπεριφορά τους ανάλογα με τις επικρατούσες στο σύστημα συνθήκες.

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου, κ. Μιχάλη Πατεράκη, που ήταν και ο επιβλέπων της παρούσας διπλωματικής, για την εποικοδομητική συνεργασία που είχαμε σε επίπεδο διπλωματικής, για τον χρόνο που αφιέρωσε για να με βοηθήσει και τις συμβουλές που μου έδωσε, και κυρίως για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου. Ευχαριστώ επίσης τον καθηγητή, κ. Αθανάσιο Λιάβα και τον αναπληρωτή καθηγητή, κ. Πολυχρόνη Κουτσάκη, που δέχτηκαν να αξιολογήσουν τη διπλωματική μου διατριβή. Ευχαριστώ επίσης όλους τους φίλους μου στα Χανιά για τα αξέχαστα χρόνια που περάσαμε και την βοήθεια τους σε διάφορα θέματα αυτά τα χρόνια. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, που με στηρίζει στις επιλογές μου και βρίσκεται πάντα δίπλα μου, προσφέροντάς μου την ασφάλεια και τη δύναμη να πραγματοποιώ τους στόχους μου. Επομένως η συγκεκριμένη δουλειά είναι αφιερωμένη σε αυτούς, για όσα μου έχουν προσφέρει.

Περιεχόμενα

Κατάλογος Σχημάτων	viii
Κεφάλαιο 1.....	1
<i>Εισαγωγή.....</i>	<i>1</i>
<i>1.1 Συνεισφορά</i>	<i>1</i>
<i>1.2 Δομή Διπλωματικής Εργασίας</i>	<i>2</i>
Κεφάλαιο 2.....	3
<i>Cognitive Radios</i>	<i>3</i>
<i>2.1 Ορισμός</i>	<i>4</i>
2.1.1 Software Defined Radios (SDR).....	4
<i>2.2 Λειτουργίες</i>	<i>5</i>
2.2.1 Spectrum Sensing.....	5
2.2.2 Spectrum Decision	6
2.2.3 Spectrum Sharing	7
2.2.4 Spectrum Mobility.....	8
<i>2.3 Μοντέλα</i>	<i>8</i>
2.3.1 Μοντέλο Interweave.....	9
2.3.2 Μοντέλο Overlay.....	10
2.3.3 Μοντέλο Underlay	10
2.3.4 Σύγκριση και διαφορές των μοντέλων	11
<i>2.4 Πρωτόκολλα MAC</i>	<i>12</i>
Κεφάλαιο 3.....	15
<i>Μοντέλο Συστήματος</i>	<i>15</i>
<i>3.1 Διαμόρφωση συστήματος</i>	<i>15</i>
3.1.1 Κανάλια	17
3.1.2 Χρήστες	17
<i>3.2 Μηχανισμός sensing.....</i>	<i>18</i>
<i>3.3 Μηχανισμός διαπραγμάτευσης</i>	<i>19</i>

Κεφάλαιο 4.....	21
<i>Σχεδίαση και Υλοποίηση Αρχιτεκτονικής Συστήματος.....</i>	<i>21</i>
<i>4.1 Ο μηχανισμός της στοίβας</i>	<i>21</i>
<i>4.2 Στατικό μοντέλο</i>	<i>23</i>
<i>4.3 Δυναμικά μοντέλα</i>	<i>28</i>
4.3.1 Full success.....	28
4.3.2 Channel Success	33
<i>4.4 Σύγκριση</i>	<i>37</i>
<i>4.5 Μηχανισμός Αποκεντροποίησης.....</i>	<i>40</i>
4.5.1 Τελικά αποτελέσματα	45
Κεφάλαιο 5.....	53
<i>Επίλογος.....</i>	<i>53</i>
<i>5.1 Ανακεφαλαίωση και συνεισφορά</i>	<i>53</i>
<i>5.2 Ιδέες για Μελλοντική Εργασία.....</i>	<i>54</i>
Βιβλιογραφία	55

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: λευκά κενά	3
Σχήμα 2: Μοντέλα (a) interweave, (b) overlay, (c) underlay.....	9
Σχήμα 3: Κανάλια επικοινωνίας και κανάλι ελέγχου.....	16
Σχήμα 4: Η κατάσταση του i-οστού καναλιού	17
Σχήμα 5: Αλυσίδα Markov για τα κανάλια που έγιναν sense	18
Σχήμα 6: Παράδειγμα μετάδοσης ενός SU σε ένα κανάλι i	20
Σχήμα 7: Μετατροπή στοίβας στο χρόνο (παράδειγμα 1).....	22
Σχήμα 8: Μετατροπή στοίβας στον χρόνο (παράδειγμα 2)	22
Σχήμα 9: Μετατροπή στοίβας στον χρόνο (παράδειγμα 3)	22
Σχήμα 10: Στατικό μοντέλο με χρονικά άνω όρια 0.1 και 0.2 του slot (παράδειγμα 1).....	24
Σχήμα 11: Στατικό μοντέλο με χρονικά άνω όρια 0.1 και 0.2 του slot (παράδειγμα 2).....	25
Σχήμα 12: Μεταβολή του sense σε σχέση με τους χρήστες.....	26
Σχήμα 13: Στατικό μοντέλο με χρονικά άνω όρια 0.1 και 0.2 του slot (παράδειγμα 3).....	27
Σχήμα 14: Δυναμικό μοντέλο FS με χρονικό άνω όριο και χωρίς (παράδειγμα 1).....	30
Σχήμα 15: Δυναμικό μοντέλο FS με χρονικό άνω όριο και χωρίς (παράδειγμα 2).....	31
Σχήμα 16: Δυναμικό μοντέλο FS με χρονικό άνω όριο και χωρίς (παράδειγμα 3).....	32
Σχήμα 17: Δυναμικό μοντέλο CS με χρονικό άνω όριο και χωρίς (παράδειγμα 1)	34
Σχήμα 18: Δυναμικό μοντέλο CS με χρονικό άνω όριο και χωρίς (παράδειγμα 2)	35
Σχήμα 19: Δυναμικό μοντέλο CS με χρονικό άνω όριο και χωρίς (παράδειγμα 3)	36
Σχήμα 20: Σύγκριση στατικό, δυναμικό FS και δυναμικό CS (παράδειγμα 1)	37
Σχήμα 21: Σύγκριση στατικό, δυναμικό FS και δυναμικό CS (παράδειγμα 2)	38
Σχήμα 22: Σύγκριση στατικό, δυναμικό FS και δυναμικό CS (παράδειγμα 3)	39
Σχήμα 23: Μεταβολή της πιθανότητας p στον χρόνο για μεγάλο βήμα (πολλοί χρήστες)	41
Σχήμα 24: Μεταβολή της πιθανότητας p στον χρόνο για μικρό βήμα (πολλοί χρήστες).....	42
Σχήμα 25: Μεταβολή της πιθανότητας p στον χρόνο.....	44
Σχήμα 26: Μεταβολή της πιθανότητας p στον χρόνο με προσθήκη νέων χρηστών	44
Σχήμα 27: decentralized δυναμικά μοντέλα CS με όριο και χωρίς (παράδειγμα 1)	45

Σχήμα 28: decentralized δυναμικά μοντέλα CS με όριο και χωρίς (παράδειγμα 2)	46
Σχήμα 29: centralized vs decentralized (παράδειγμα 1)	47
Σχήμα 30: centralized vs decentralized (παράδειγμα 2)	48
Σχήμα 31: centralized vs decentralized (παράδειγμα 3)	49
Σχήμα 32: centralized vs decentralized (παράδειγμα 4)	50

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η μη πλήρης αξιοποίηση του ράδιο-φάσματος στα παραδοσιακά συστήματα ασύρματης επικοινωνίας και η αυξανόμενη ζήτηση φάσματος από τις ανερχόμενες ασύρματες εφαρμογές οδηγούν στην ανάπτυξη νέων πολιτικών φασματικής κατανομής για τις ασύρματες επικοινωνίες. Ιδιαίτερη προσοχή έχουν λάβει τα ευφυή ασύρματα δίκτυα καθώς έχουν αναδειχθεί ως μια ελπιδοφόρα προσέγγιση για την υλοποίηση αποδοτικής επαναχρησιμοποίησης των φασμάτων που απαιτούν άδεια για την χρήση τους. Η ιδέα είναι οι δευτερεύοντες (χωρίς άδεια) χρήστες να συνυπάρχουν με τους πρωτεύοντες με τέτοιο τρόπο ώστε να μην τους παρεμβάλουν αλλά κατά το δυνατό ούτε να παρεμβάλλονται μεταξύ τους. Ο κατάλληλος σχεδιασμός λοιπόν του δευτερεύοντος δικτύου παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην αποδοτική υλοποίηση των ευφυών ασύρματων δικτύων. Διάφορα πρωτόκολλα Ελέγχου Πρόσβασης στο Μέσο έχουν προταθεί για τους δευτερεύοντες χρήστες ενός CRN (Cognitive Radio Network). Στις περισσότερες προτεινόμενες στην βιβλιογραφία υλοποιήσεις ευφυών ασύρματων δικτύων, από την αρχή της λειτουργίας τους μια πληθώρα πληροφοριών θεωρείται δεδομένη και γνωστή στους χρήστες του δικτύου. Συνήθως θεωρείται ότι όλοι οι χρήστες επικοινωνούν με έναν κεντρικό σταθμό βάσης και άρα ο μηχανισμός λειτουργίας του δικτύου είναι κεντρικοποιημένος.

1.1 Συνεισφορά

Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μοντελοποίηση και μελέτη ενός ευφυούς ασύρματου δικτύου που θα λειτουργεί χωρίς κεντρικό έλεγχο. Θα μπορούν δηλαδή οι χρήστες να παίρνουν αποφάσεις και να αλλάζουν την συμπεριφορά τους μέσα στο σύστημα ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν εκεί την εκάστοτε στιγμή. Στόχος είναι αυτό να γίνει με ίδια ή και καλύτερα αποτελέσματα στο συνολικό throughput του συστήματος σε σχέση με τα προηγούμενα μοντέλα.

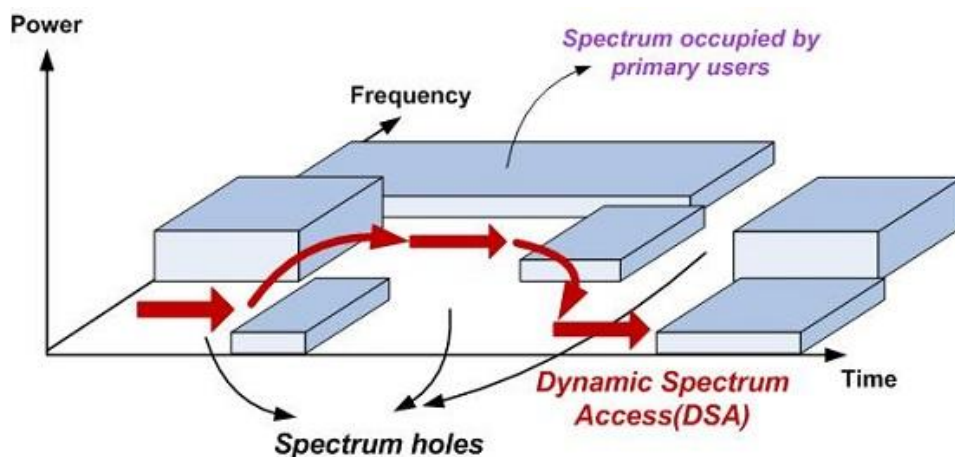
1.2 Δομή Διπλωματικής Εργασίας

Σε αυτήν την ενότητα, ολοκληρώνοντας το πρώτο κεφάλαιο, θα παρουσιάσουμε τον τρόπο με τον οποίο έχει δομηθεί η διπλωματική εργασία και θα αναφέρουμε περιληπτικά το περιεχόμενο των κεφαλαίων που ακολουθούν. Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η σχετική έρευνα την οποία πραγματοποιήσαμε ώστε να κατανοήσουμε την τεχνολογία Cognitive και τις βασικές λειτουργίες της. Γίνεται μια εισαγωγή στα ευφυή ασύρματα δίκτυα (Cognitive Radio Networks) δίνοντας έναν γενικό ορισμό και παρουσιάζοντας βασικές λειτουργίες διαχείρισης του φάσματος, τα κύρια μοντέλα και μερικά ενδιαφέροντα πρωτόκολλα ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (MAC protocols) για ευφυή ασύρματα δίκτυα. Μέσα από αυτά τα πρωτόκολλα πήραμε ιδέες και στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζουμε το μοντέλο του δικού μας συστήματος. Το κεφάλαιο 4 αφορά την υλοποίηση του μοντέλου που διαμορφώθηκε από εμάς, την προσομοίωση του καθώς και τα αποτελέσματα που μας έδωσε. Η διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με τον επίλογο στο κεφάλαιο 5.

Κεφάλαιο 2

Cognitive Radios

Τον Νοέμβριο του 2008 η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC) αποφάσισε ότι τα αχρησιμοποίητα τμήματα του ράδιο-φάσματος, γνωστά ως λευκά κενά (white spaces), διατίθενται για δημόσια χρήση. Συσκευές λευκών κενών (white space device) υποχρεούνται να περιλαμβάνουν τεχνολογίες για την αποφυγή παρεμβολών, όπως φασματική ανίχνευση. Τα ευφυή ασύρματα δίκτυα είναι μια μορφή ασύρματης επικοινωνίας η οποία λειτουργεί με αυτόν τον τρόπο και αναλύουμε παρακάτω. Στην αρχή δίνουμε τον ορισμό των CRNs (Cognitive Radio Networks) στην παράγραφο 2.1, στη συνέχεια στην παράγραφο 2.2 παρουσιάζουμε τις βασικές λειτουργίες διαχείρισης του φάσματος ενός CRN, στην παράγραφο 2.3 συζητάμε τα κύρια μοντέλα των Cognitive Radios, και τέλος στην παράγραφο 2.4 παρουσιάζουμε μερικά ενδιαφέροντα MAC πρωτόκολλα που έχουν μελετηθεί στην βιβλιογραφία.



Σχήμα 1: λευκά κενά

2.1 Ορισμός

Έχουν υπάρξει πολλοί κατά καιρούς ορισμοί για τα ευφυή ασύρματα δίκτυα λόγω των δυνητικά πολλών δυνατοτήτων που έχουν. Ένας πιο γενικός ορισμός είναι ο ακόλουθος.

Τα ευφυή ασύρματα δίκτυα είναι μια μορφή ασύρματης επικοινωνίας στην οποία ένας πομποδέκτης μπορεί έξυπνα να εντοπίσει ποια κανάλια επικοινωνίας χρησιμοποιούνται σε διάφορες χρονικές στιγμές και ποια όχι, και αμέσως να “εκμεταλλευτεί” τα διαθέσιμα ενώ θα αποφύγει τα κατειλημμένα. Αυτό βελτιστοποιεί τη χρήση των διαθέσιμων ραδιοσυχνοτήτων φάσματος ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα τις παρεμβολές σε άλλους χρήστες [1].

Για να γίνει όμως αυτό εφικτό χρειάζονται αρκετά εργαλεία από την ψηφιακή επεξεργασία σήματος, το software και το hardware αλλά και μια πλατφόρμα στην οποία θα βασιστεί η υλοποίηση του Cognitive Radio και είναι γνωστή ως Software-Defined-Radio (SDR).

2.1.1 Software Defined Radios (SDR)

Τα SDR είναι Radios (συσκευές που ασύρματα μεταδίδουν ή λαμβάνουν σήματα στο ραδιοφωνικό-συχνοτικό (RF) μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος) στα οποία κάποιες ή όλες οι λειτουργίες του φυσικού επιπέδου (physical layer) είναι λογισμικά ορισμένες.

Οι παραδοσιακές συσκευές υλικού περιορίζουν την Cross-Layer λειτουργικότητα και μπορούν μόνο να τροποποιηθούν μέσω φυσικής παρέμβασης. Αυτό οδηγεί σε υψηλότερο κόστος παραγωγής και σε ελάχιστη ευελιξία στην υποστήριξη πολλαπλών προτύπων κυματομορφών. Αντιθέτως η τεχνολογία των Software Defined Radios παρέχει μια αποδοτική και σχετικά φτηνή λύση σε αυτό το πρόβλημα, επιτρέποντας πολυμορφικές, πολύ-συχνοτικές και πολύ-λειτουργικές ασύρματες συσκευές οι οποίες μπορούν να αναβαθμιστούν χρησιμοποιώντας λογισμικές αναβαθμίσεις.

Τα SDR ορίζουν μια συλλογή τεχνολογιών υλικού και λογισμικού όπου μερικές ή όλες οι λειτουργίες χειρισμού (που αναφέρονται και ως επεξεργασία φυσικού επιπέδου) εφαρμόζονται μέσω τροποποιήσιμου λογισμικού ή firmware που λειτουργεί σε τεχνολογίες προγραμματιζόμενης επεξεργασίας. Αυτές οι συσκευές περιλαμβάνουν τις προγραμματιζόμενες διατάξεις θυρών (FPGA), επεξεργαστές ψηφιακού σήματος (DSP), επεξεργαστές γενικού σκοπού (GPP), προγραμματιζόμενο σύστημα επί ψηφίδας (Programmable System on Chip) ή άλλους προγραμματιζόμενους επεξεργαστές ειδικά για εφαρμογές. Η χρήση των τεχνολογιών αυτών επιτρέπει νέες ασύρματες δυνατότητες και τις ικανότητες να προστίθενται αυτές στα υπάρχοντα συστήματα radio χωρίς να απαιτείται νέο υλικό. [2]

2.2 Λειτουργίες

Ένα ευφυές ασύρματο δίκτυο έχει νέες δυνατότητες διαχείρισης του φάσματος (spectrum management) όπως: spectrum sensing, spectrum decision, spectrum sharing και spectrum mobility. Το spectrum sensing αναφέρεται στην διαδικασία με την οποία ένας secondary user (SU) πρέπει να παρακολουθεί τις διαθέσιμες μπάντες συχνοτήτων και να ανιχνεύει τα λευκά κενά (white spaces). Ακολουθεί η διαδικασία spectrum decision όπου οι SUs πρέπει να επιλέξουν κατάλληλη μπάντα συχνοτήτων, αναλόγως την δραστηριότητα των primary user (PU), έτσι ώστε να εκμεταλλευτούν το φάσμα για όσο το δυνατόν περισσότερο χρόνο. Το spectrum sharing δίνει την δυνατότητα να μοιραστεί το φάσμα ισότιμα μεταξύ των SUs και να μειωθούν όσο δυνατόν περισσότερο οι παρεμβολές στους PUs. Τέλος η δυνατότητα των SUs να μεταφέρονται σε κάποιο άλλο διαθέσιμο τμήμα του φάσματος κατά την μετάδοσή τους (λόγω ανίχνευσης PU) είναι το spectrum mobility.

2.2.1 Spectrum Sensing

Η πιο ευρέως γνωστή τεχνική για ανίχνευση PU είναι η ανίχνευση πομπού (transmitter detection). Τρία σχήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ανίχνευση πομπού: προσαρμοσμένο φίλτρο (matched filter), ανίχνευση ενέργειας (energy detection) και ανίχνευση κυκλοστασιμότητας (cyclostationary detection).

2.2.1.1 Χρήση Προσαρμοσμένου φίλτρου (Matched Filter)

Βελτιστοποιεί την ανίχνευση μεγιστοποιώντας το λαμβανόμενο SNR. Δεδομένου ότι έχει a priori γνώση του σήματος του πρωτεύοντος χρήστη, η σύμφωνη ανίχνευση εξασφαλίζει ότι μόνο $O(\frac{1}{SNR})$ δείγματα χρειάζονται για αποτελεσματική ανίχνευση. Έτσι η ανίχνευση γίνεται γρηγορότερη ώστε τα slots στα οποία ο PU παραμένει ανενεργός, να μπορούν χωρίς καθυστερήσεις να χρησιμοποιηθούν από SUs. Από την άλλη πλευρά, η γνώση του εκπεμπόμενου σήματος από τον PU μπορεί να μην είναι πάντα διαθέσιμη. Τέλος, σε περίπτωση όπου υπάρχουν πολλοί PUs, ο πομποδέκτης των SU θα πρέπει να έχει ένα αφιερωμένο προσαρμοσμένο φίλτρο για κάθε έναν από αυτούς.

2.2.1.2 Ανίχνευση Ενέργειας (Energy Detection)

Για να αντιμετωπίσουμε το παραπάνω πρόβλημα, μη σύμφωνη ανίχνευση μπορεί να γίνει μέσω ανιχνευτή ενέργειας. Η βασική ιδέα είναι να συγκρίνουμε την ενέργεια του λαμβανόμενου σήματος με ένα κατώφλι για να προσδιορίσουμε την

παρουσία σήματος από τον PU. Μη σύμφωνη ανίχνευση μπορεί επίσης να υλοποιηθεί παίρνοντας τον μέσο όρο του Fast Fourier Transform του σήματος πάνω σε bins συχνότητας και συγκρίνοντας το με ένα κατώφλι. Μια μη σύμφωνη ανίχνευση χρειάζεται μεγαλύτερο αριθμό δειγμάτων, $O(\frac{1}{\text{SNR}^2})$, για να μας δώσει την ίδια επίδοση με την σύμφωνη ανίχνευση. Το κατώφλι δεν είναι απόλυτα αξιόπιστο καθώς είναι ευαίσθητο σε διάφορα επίπεδα θορύβου. In-band παρεμβολή μπορεί να δώσει λανθασμένα αποτελέσματα ακόμη και αν χρησιμοποιούμε κατώφλι που προσαρμόζεται δυναμικά στο χρόνο. Επίσης η αποτυχία του ανιχνευτή να αναγνωρίζει τις παρεμβολές αποκλείει την χρήση προσαρμοστικής επεξεργασίας σήματος για ακύρωση παρεμβολής.

2.2.1.3 Ανίχνευση Κυκλοστασιμότητας (Cyclostationary Detection)

Ψηφιακά διαμορφωμένα σήματα όπως BPSK, QPSK, AM, OFDM, συνήθως παρουσιάζουν κυκλοστασιμότητα, δηλαδή οι στατιστικές τους παράμετροι μεταβάλλονται περιοδικά με τον χρόνο, το οποίο προσπαθούμε να εκμεταλλευτούμε εδώ. Εφόσον διαφορετικού τύπου σήματα έχουν διαφορετικές μη μηδενικές κυκλικές συχνότητες, μπορούν να αναγνωριστούν από την υπογραφή τους. Ωστόσο, τα σήματα θορύβου δεν έχουν κυκλοστάσιμα χαρακτηριστικά. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι είναι ανθεκτική απέναντι στο θόρυβο και σε διακυμάνσεις του καναλιού. Χρειάζεται όμως υψηλό ρυθμό δειγματοληψίας.

2.2.2 Spectrum Decision

Αυτή η λειτουργία είναι στενά συνδεδεμένη με τα χαρακτηριστικά του καναλιού και την δραστηριότητα των PU. Συνήθως αποτελείται από δύο βήματα. Στην αρχή κάθε μπάντα χαρακτηρίζεται βάση στατιστικών πληροφοριών των PU και τοπικών παρατηρήσεων των SU, και στην συνέχεια επιλέγεται η καταλληλότερη μπάντα βάση αυτών των χαρακτηριστικών. Οι ακόλουθες είναι οι κύριες λειτουργίες που χρειάζονται για φασματική απόφαση (spectrum decision):

2.2.2.1 Spectrum characterization

Βάση των παρατηρήσεων οι SUs προσδιορίζουν όχι μόνο τα χαρακτηριστικά του διαθέσιμου φάσματος αλλά και την δραστηριότητα των PU.

2.2.2.2 Spectrum selection

Οι SUs βρίσκουν την καλύτερη μπάντα συχνοτήτων ώστε να ικανοποιεί τις end-to-end QoS απαιτήσεις των χρηστών. Βάση αυτών αλλά και των χαρακτηριστικών του φάσματος, το ρυθμό πληροφορίας, τον αποδεκτό ρυθμό σφαλμάτων, τις καθυστερήσεις και το εύρος φάσματος και σύμφωνα με έναν κανόνα απόφασης (spectrum selection rule) επιλέγονται οι κατάλληλες μπάντες.

2.2.3 Spectrum Sharing

Spectrum sharing για ευφυή ασύρματα δίκτυα είναι η λειτουργία με την οποία οι SUs μπορούν και μοιράζονται τις φασματικές μπάντες με τους PUs. Ωστόσο να σημειώσουμε ότι οι SUs πρέπει να μην παρεμβάλουν τους PUs πάνω από κάποιο όριο το οποίο συνήθως ορίζεται. Για να μπορέσει λοιπόν κάποιος SU να μπει και να μοιραστεί το κανάλι ή το πότε μπορεί να το κάνει, εξαρτάται από τον τύπο του καναλιού. Υπάρχουν τριών ειδών κανάλια και τα αντίστοιχα MAC πρωτόκολλα πρόσβασης: Random Access MAC Protocols, Time Slotted MAC Protocols και συνδυασμός αυτών.

2.2.3.1 Random Access MAC Protocols

Σε αυτά τα πρωτόκολλα δεν χρειαζόμαστε συγχρονισμό στον χρόνο και είναι γενικά βασισμένα στην αρχή CSMA/CA. Οι εκτιμήσεις από το sense είναι στενά συνδεδεμένες με την μετάδοση πακέτων. Τυπικά ένας SU κάνει sense ένα ορισμένο μέρος του φάσματος την δεδομένη χρονική στιγμή και αν το βρει διαθέσιμο μεταδίδει σε αυτό (με μια πιθανότητα που ορίζετε στο πρωτόκολλο).

2.2.3.2 Time Slotted MAC Protocols

Αυτά τα πρωτόκολλα απαιτούν συγχρονισμό όλου του δικτύου, και ο χρόνος είναι χωρισμένος σε slots τόσο για το κανάλι ελέγχου (control channel) όσο και για τα κανάλια επικοινωνίας.

2.2.3.3 Hybrid Protocols

Εδώ συνήθως υπάρχουν απαίτηση συγχρονισμού και slots στο κανάλι ελέγχου, ενώ η μετάδοση των δεδομένων έχει χαρακτηριστικά τυχαίας πρόσβασης σε ασύγχρονο κανάλι.

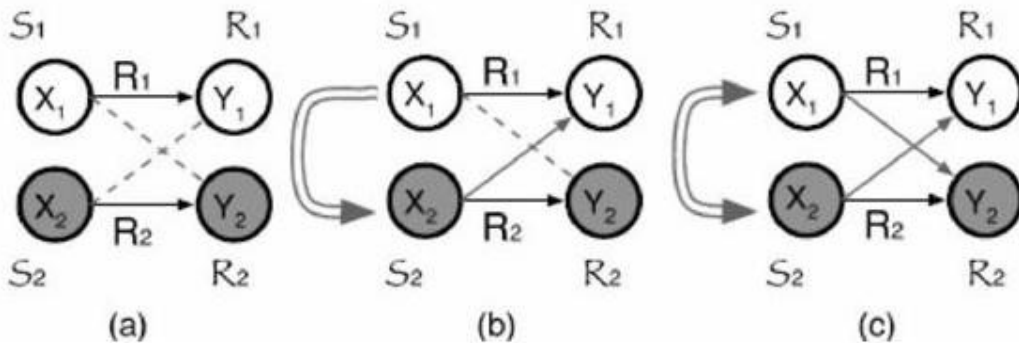
2.2.4 Spectrum Mobility

Όταν ένας SU μεταδίδει σε ένα μέρος του φάσματος και αυτό καταληφθεί από έναν PU τότε η επικοινωνία που είχε ο SU πρέπει να συνεχιστεί σε άλλο διαθέσιμο κενό. Με αυτήν την ιδέα ορίζεται το spectrum mobility. Στα ευφυή ασύρματα δίκτυα υπάρχει ένας νέος τύπος handoff κατά τον οποίο οι δευτερεύοντες χρήστες μεταφέρουν τις συνδέσεις τους σε μία αξιοποιήσιμη φασματική μπάντα.

2.3 Μοντέλα

Από τη στιγμή της εμφάνισης του, ο ορισμός του ευφυούς δικτύου έχει εξελιχθεί μέσα στα χρόνια. Κατά συνέπεια σήμερα υπάρχουν διάφορα μοντέλα ευφυούς δικτύου. Τα κύρια μοντέλα (Σχήμα 2) που έχουν προταθεί όσον αφορά το διαμερισμό του φάσματος, τις πληροφορίες που έχει το ευφύες δίκτυο και τους περιορισμούς αποστολής χωρίζονται σε:

- a) Μοντέλα ευκαιριακής επικοινωνίας (interweave)
- b) Μοντέλα γνωστής παρεμβολής (overlay)
- c) Μοντέλα αποφυγής παρεμβολής (underlay)



Σχήμα 2: Μοντέλα (a) *interweave*, (b) *overlay*, (c) *underlay*

2.3.1 Μοντέλο Interweave

Το *interweave* παράδειγμα είναι βασισμένο στην ιδέα της ευκαιριακής μετάδοσης και αποτέλεσε το αρχικό κίνητρο για την δημιουργία των ευφυών δικτύων. Η ιδέα γεννήθηκε μέσα από μελέτες που διεξήχθησαν από την Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC) και την βιομηχανία, οι οποίες έδειξαν ότι σημαντικό μέρος του φάσματος είναι αχρησιμοποίητο τον περισσότερο χρόνο. Με άλλα λόγια, υπάρχουν προσωρινά κενά στο χρόνο και στις συχνότητες, γνωστά ως φασματικές τρύπες, που δεν είναι σε συνεχή χρήση τόσο σε αδειοδοτημένες όσο και σε μη αδειοδοτημένες μπάντες.

Αυτά τα κενά αλλάζουν με το χρόνο και τη γεωγραφική θέση, και μπορούν να γίνουν αντικείμενο εκμετάλλευσης από ευφυείς χρήστες για τις μεταδόσεις τους. Έτσι η αξιοποίηση του φάσματος βελτιώνεται από τις ευκαιριακές επαναχρησιμοποιήσεις συχνοτήτων μέσω των φασματικών τρυπών. Η τεχνική του *interweave* χρειάζεται γνώση πληροφοριών λειτουργίας των Primary User (PU) στο φάσμα. Μπορεί επίσης να θεωρηθεί ότι όλοι οι χρήστες σε μια δεδομένη μπάντα είναι ευφυείς, όμως οι ήδη υπάρχοντες χρήστες μετατρέπονται σε PUs, και οι νέοι χρήστες μετατρέπονται σε Secondary Users (SUs) που δεν θα πρέπει να παρεμβάλλονται στις μεταδόσεις που λαμβάνουν χώρα μεταξύ των ήδη υπαρχόντων PUs.

Συνοψίζοντας, ένα *interweave* ευφύες δίκτυο είναι ένα έξυπνο ασύρματο δίκτυο επικοινωνίας που περιοδικά παρακολουθεί το ράδιο-φάσμα, ανιχνεύει έξυπνα τα λευκά φασματικά κενά και στην συνέχεια επικοινωνεί ευκαιριακά μέσω των φασματικών τρυπών με την ελάχιστη παρεμβολή στους ενεργούς πρωτεύοντες χρήστες.

2.3.2 Μοντέλο Overlay

Η προϋπόθεση που κάνει δυνατή τη χρήση overlay συστημάτων είναι ο ευφυής πομπός να έχει γνώση του μηνύματος του PU και της κωδικής του λέξης. Η κωδική λέξη μπορεί να αποκτηθεί, για παράδειγμα, αν ο PU ακολουθεί ένα ομοιόμορφο πρότυπο για επικοινωνίες βασισμένο σε δημόσιες κωδικές λέξεις. Εναλλακτικά, οι PUs μπορούν να εκπέμπουν την κωδική τους λέξη περιοδικά. Ένα μήνυμα ενός PU μπορεί να αποκτηθεί αποκωδικοποιώντας το μήνυμα στον ευφυή δέκτη.

Παρόλα αυτά, το μοντέλο overlay υποθέτει ότι το μη ευφυές μήνυμα είναι γνωστό στον ευφυή πομπό όταν ο PU ξεκινά την μετάδοσή του. Αν και αυτό είναι δύσκολο στην πράξη για αρχικές μεταδόσεις, η υπόθεση είναι βάσιμη για αναμεταδόσεις μηνυμάτων όπου ο SU λαμβάνει σωστά την πρώτη μετάδοση και την αποκωδικοποιεί, ενώ ο προοριζόμενος δέκτης δεν μπορεί να αποκωδικοποιήσει την αρχική μετάδοση λόγω παρεμβολής ή εξασθένησης.

Σημειώνεται ότι το παράδειγμα του overlay μπορεί να εφαρμοσθεί σε αδειοδοτημένες και μη αδειοδοτημένες μπάντες επικοινωνιών. Σε αδειοδοτημένες μπάντες, οι SUs θα έχουν το δικαίωμα να μοιράζονται την μπάντα με τους αδειοδοτημένους χρήστες με την προϋπόθεση να μην τους παρεμβάλουν. Σε μη αδειοδοτημένες μπάντες, οι SUs θα πετυχαίνουν μεγαλύτερη αξιοποίηση του φάσματος χρησιμοποιώντας γνώση μηνυμάτων και κωδικών λέξεων με σκοπό να μειώσουν την παρεμβολή.

2.3.3 Μοντέλο Underlay

Το underlay παράδειγμα περιλαμβάνει τεχνικές οι οποίες επιτρέπουν επικοινωνία από το ευφυές δίκτυο υποθέτοντας ότι αυτό έχει γνώση της παρεμβολής που προκαλείται από τους πομπούς του στους δέκτες των PUs. Σε αυτήν την περίπτωση, το ευφυές δίκτυο (Secondary User), δεν πρέπει να παρεμβάλει στη μετάδοση του ήδη υπάρχοντος χρήστη (συχνά PU). Ειδικότερα, το παράδειγμα underlay ορίζει ότι ταυτόχρονη ύπαρξη ευφυών και μη μεταδόσεων μπορεί να συμβεί μόνο αν η παρεμβολή που παράγεται από τις ευφυές συσκευές στους μη ευφυείς χρήστες είναι κάτω από ένα αποδεκτό κατώφλι. Ο περιορισμός παρεμβολής για τους PUs, μπορεί να εκπληρωθεί χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραίες με σκοπό να οδηγηθούν τα ευφυή σήματα μακριά από τους μη ευφυείς δέκτες ή χρησιμοποιώντας τεχνικές διευρυμένου φάσματος.

Η παρεμβολή που προκαλείται από έναν ευφυή πομπό σε ένα ευφυή δέκτη μπορεί να υπολογισθεί προσεγγιστικά, αν ο ευφυής πομπός είναι σε θέση να ακούει μια μετάδοση από την θέση του ευφυούς δέκτη. Εναλλακτικά, ο ευφυής πομπός μπορεί να είναι πολύ συντηρητικός σχετικά με την ισχύ εξόδου που χρησιμοποιεί ώστε να διασφαλίσει ότι το σήμα του παραμένει κάτω από το οριζόμενο κατώφλι παρεμβολής. Στην περίπτωση αυτή, εφόσον ο περιορισμός παρεμβολής στα underlay συστήματα είναι τυπικά αρκετά περιοριστικός, αυτό περιορίζει τον SU σε μεταδόσεις μικρής εμβέλειας.

Ενώ τα underlay παραδείγματα είναι πιο κοινά σε αδειοδοτημένα φάσματα, η αντίστοιχη τεχνική μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε μη αδειοδοτημένες μπάντες με σκοπό να παρέχει διαφορετικές κλάσεις παροχής υπηρεσίας (QoS) σε διαφορετικούς χρήστες.

2.3.4 Σύγκριση και διαφορές των μοντέλων

Ενώ το overlay και το underlay μοντέλο επιτρέπουν ταυτόχρονη ύπαρξη ευφυών και μη επικοινωνιών, ο κεντρικός σκοπός του interweave είναι η αποφυγή ταυτόχρονων μεταδόσεων με πρωτεύοντες ή ήδη υπάρχοντες χρήστες. Τονίζουμε επίσης ότι, οι διάφορες προσεγγίσεις απαιτούν γνώση διαφορετικών ειδών και ποσότητας πληροφοριών. Στο Σχήμα 2 διακρίνονται οι παρεμβολές που δημιουργούνται στο κάθε σενάριο. Στο (a) Interweave δεν υπάρχουν παρεμβολές, στο (b) Overlay παρεμβάλλει μόνο ο SU στη μετάδοση του PU, ενώ στο (c) Underlay παρεμβάλλει ο ένας τον άλλον. Στον πίνακα 2.1 συνοψίζονται οι διαφορές μεταξύ των τριών μοντέλων.

Interweave	Overlay	Underlay
Οι SUs γνωρίζουν τις φασματικές τρύπες στο χώρο, τον χρόνο ή την συχνότητα και τις χρονικές στιγμές που ο PU δεν τις χρησιμοποιεί.	Οι SUs γνωρίζουν το gain του καναλιού, την κωδική λέξη και το μήνυμα των PU.	Οι SUs γνωρίζουν την ισχύ του καναλιού των PU.
Οι SUs μεταδίδουν ταυτόχρονα με τον PU μόνο στην περίπτωση λανθασμένης ανίχνευσης φασματικής τρύπας	Οι SUs μπορούν να μεταδώσουν ταυτόχρονα με τους PUs. Η παρεμβολή στους PUs μπορεί να αντισταθμιστεί χρησιμοποιώντας μέρος της ενέργειας των ευφυών χρηστών (SUs) για relay των μη ευφυών μηνυμάτων	Οι SUs μπορούν να μεταδώσουν ταυτόχρονα με τους PUs αρκεί η παρεμβολή που προκαλούν να παραμένει κάτω από ένα αποδεκτό όριο
Οι SUs μπορούν να εκπέμπουν σε οποιαδήποτε ισχύ	Οι SUs μπορούν να εκπέμπουν σε οποιαδήποτε ισχύ, η παρεμβολή στους PUs μπορεί να αντισταθμιστεί με relaying των μηνυμάτων των PU.	Η εκπεμπόμενη ενέργεια του PU περιορίζεται από τον περιορισμό παρεμβολής

Πίνακας 2.1: Σύγκριση μεταξύ Interweave, Overlay και Underlay

Ενώ το interweave, το overlay και το underlay είναι τρεις ξεχωριστές προσεγγίσεις στα ευφυή δίκτυα, υβριδικοί σχεδιασμοί αυτών μπορούν επίσης να δημιουργηθούν οι οποίοι συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των διαφορετικών προσεγγίσεων.

2.4 Πρωτόκολλα MAC

Τα πρωτόκολλα MAC (Medium Access Control) δηλαδή ελέγχου πρόσβασης στο μέσο, όπως λέει και το όνομα τους αντιμετωπίζουν το πρόβλημα που προκύπτει σε αρχιτεκτονικές κοινόχρηστου μέσου μετάδοσης αναφορικά με τους κανόνες μερισμού του μέσου. Δηλαδή καλούνται να δώσουν την απάντηση στο ερώτημα ποιος θα εκπέμψει κάθε φορά. Τα πρωτόκολλα MAC για ευφυή ασύρματα δίκτυα επιτρέπουν στους SUs να ανιχνεύουν και να χρησιμοποιούν τα διαθέσιμα κενά στο φάσμα με έναν τρόπο που δεν θα παρεμβάλουν-ενοχλούν τους PUs. Άρα η σχεδίαση και η υλοποίηση του πρωτοκόλλου είναι πολύ σημαντική για την σωστή λειτουργία του δευτερεύοντος δικτύου. Έχουν προταθεί πολλά πρωτόκολλα MAC για ευφυή ασύρματα δίκτυα το καθένα με διαφορετικές συνθήκες, ιδέες και υποθέσεις.

Στο [3] το προτεινόμενο πρωτόκολλο υποθέτει πως υπάρχει πάντα ένα control κανάλι που είναι αξιόπιστο και διαθέσιμο. Σε αυτό το κανάλι οι δευτερεύον χρήστες ανταλλάσσουν τα σήματα ελέγχου για να ξεκινήσουν μια σύνδεση. Τα σήματα ελέγχου είναι 4 και χωρίζονται σε 2 ζευγάρια. Το πρώτο ζευγάρι περιλαμβάνει τα σήματα Ready-to-Send/Clear-to-Send (RTS/CTS) όπου σκοπός των σημάτων αυτών είναι να αποτρέψουν συγκρούσεις μεταξύ των secondary users. Το δεύτερο ζευγάρι περιλαμβάνει τα σήματα Channel-State-Transmitter/Channel-State-Receiver (CST/CSR) όπου σκοπός των σημάτων αυτών είναι να αποφευχθούν συγκρούσεις μεταξύ secondary και primary users. Μεταξύ των χρηστών δεν υπάρχει καθολικός συγχρονισμός και τα κανάλια (ακόμη και το control) δεν είναι slotted. Όταν ένας δευτερεύον χρήστης θέλει να επικοινωνήσει με έναν άλλο δευτερεύοντα χρήστη (προορισμό), πρώτα στέλνει ένα RTS πακέτο περιλαμβάνοντας μια λίστα με τα κανάλια που μπορεί να κάνει sense. Αν δεν υπάρξει σύγκρουση ο χρήστης στον προορισμό ελέγχει ποια από τα κανάλια στη λίστα είναι διαθέσιμα και στέλνει ένα CTS πακέτο. Οι γειτονικοί δευτερεύοντες χρήστες ακούνε την ανταλλαγή των πακέτων και ανανεώνουν τις λίστες τους με τα διαθέσιμα κανάλια. Στη συνέχεια αφού δέσμευσαν το κανάλι ελέγχου οι δύο χρήστες διαπραγματεύονται μέσω των δύο λιστών με τα διαθέσιμα κανάλια ποιο είναι κοινό και στους δύο για να γίνει η επικοινωνία. Αν υπάρξει σύγκρουση στο αρχικό πακέτο ελέγχου (RTS) τότε υπάρχει μια διαδικασία επίλυσης συγκρούσεων μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών που συγκρούστηκαν.

Στο [4] το κανάλι ελέγχου ανήκει σε διαφορετική μπάντα συχνοτήτων απ' ότι τα κανάλια επικοινωνίας και οι δευτερεύοντες χρήστες βρίσκουν το κανάλι ελέγχου κατά την φάση της αρχικοποίησης. Υπάρχουν κάποιες προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούνται για το κανάλι ελέγχου, όπως μεγάλη ασφάλεια και μικρές ή και καθόλου παρεμβολές στους πρωτεύοντες χρήστες αυτού του καναλιού. Μια τέτοια μπάντα είναι το GSM. Η μπάντα με τα δεδομένα μπορεί να είναι οποιαδήποτε. Τα σήματα ελέγχου είναι τρία: Request-to-Send (RTS), Clear-to-Send

(CTS) και Acknowledgment (ACK). Για μια επιτυχημένη επικοινωνία δύο δευτερευόντων χρηστών η ακολουθία των πακέτων είναι η ακόλουθη: RTS-CTS-DATA-ACK. Τα κανάλια δεν είναι slotted. Οι δευτερεύοντες χρήστες πρέπει να είναι συγχρονισμένοι. Επαναλαμβάνουν μια διαδικασία sense and transmit αρκετά συχνά η οποία πρέπει να γίνεται συγχρονισμένα από όλους τους κόμβους. Αυτή η διαδικασία γίνεται και στις δύο μπάντες συχνοτήτων. Όταν μια επικοινωνία λαμβάνει μέρος υπάρχει η περίπτωση να σταματήσει λόγω κάποιου scan (διαδικασία sense and transmit) που γίνεται εκείνη την ώρα. Τα Data πακέτα έχουν μεταβλητό μέγεθος. Σε περίπτωση συγκρούσεων υπάρχει διαδικασία επίλυσής της.

Στο [5] υπάρχει ένα προκαθορισμένο κανάλι ελέγχου (control channel) για την ανταλλαγή σημάτων ελέγχου μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών το οποίο είναι συγχρονισμένο με τα κανάλια επικοινωνίας. Έχει επίσης slots ίδιου μεγέθους με τα slots των υπόλοιπων καναλιών αλλά χωρισμένα σε δύο φάσεις, αναφοράς και διαπραγμάτευσης. Η φάση της αναφοράς είναι περαιτέρω διαιρεμένη σε n mini slots (όσα και τα κανάλια). Οι δευτερεύοντες χρήστες έχουν δύο πομποδέκτες έναν για το κανάλι ελέγχου και έναν για τα κανάλια μετάδοσης. Με τον δεύτερο κάνουν sense τα κανάλια και με μια στρατηγική συνεργασίας αποκτούν γνώση για σχεδόν όλα (εάν ο αριθμός των secondary χρηστών είναι τουλάχιστον τριπλάσιος του αριθμός των καναλιών). Ο κάθε δευτερεύον χρήστης κάνει sense ένα από τα n διαθέσιμα κανάλια με πιθανότητα $1/n$. Στην αρχή κάθε slot ένας δευτερεύον χρήστης κάνει sense ένα από τα n κανάλια, έστω το i . Όταν διαπιστώσει ότι το i κανάλι είναι αδρανές τότε χρησιμοποιεί τον πομποδέκτη του καναλιού ελέγχου για να στείλει ένα beacon στη διάρκεια του i -οστού mini slot. Έτσι αν καθένα από τα n κανάλια έγινε sense από τουλάχιστον έναν δευτερεύοντα χρήστη, όλοι οι δευτερεύοντες χρήστες αποκτούν αυτήν την πληροφορία στο τέλος της φάσης αναφοράς. Στην φάση της διαπραγμάτευσης όσοι δευτερεύοντες χρήστες έχουν πακέτο προς μετάδοση, στέλνουν τα σήματα RTS/CTS με μια πιθανότητα p . Έτσι μπαίνουν σε μια διαδικασία ανταγωνισμού μεταξύ τους για το ποιος θα μεταδώσει στο επόμενο διαθέσιμο slot.

Στο [6], σε αντίθεση με τα άλλα πρωτόκολλα που είδαμε μέχρι τώρα, δεν υπάρχει ένα κοινό κανάλι ελέγχου (control channel) για όλους τους δευτερεύοντες χρήστες. Τα σήματα ελέγχου στέλνονται σε ένα από τα διαθέσιμα κανάλια. Οι δευτερεύον χρήστες έχουν δύο πομποδέκτες. Έναν αποκλειστικά για να ακούει τα σήματα ελέγχου και έναν για να στέλνει και να δέχεται δεδομένα. Η επικοινωνία γίνεται με τρόπο συνεργασίας, δηλαδή ο κάθε χρήστης (κόμβος) επικοινωνεί μόνο με τους γείτονες του και τα δεδομένα φτάνουν στον προορισμό με προώθηση από τον έναν κόμβο στον άλλο. Απαιτείται συγχρονισμός μεταξύ όλων των κόμβων. Στην αρχή όταν δεν υπάρχουν καθόλου δευτερεύοντες χρήστες ή όταν ένας νέος χρήστης θέλει να κάνει ένα νέο υπό-δίκτυο ανεξάρτητο από τους ήδη υπάρχοντες χρήστες υπάρχει μια κατάσταση αρχικοποίησης. Ο πρώτος κόμβος διαιρεί τον χρόνο σε N ίσα slots διάρκειας T_c . N είναι ο μέγιστος αριθμός των καναλιών σε κάθε κόμβο (όχι απαραίτητα διαθέσιμων). Το κάθε slot αντιστοιχεί σε ένα κανάλι. Στην αρχή κάθε slot στέλνεται από τον αρχικό κόμβο ένα beacon σε όλα τα διαθέσιμα κανάλια του. Οι κόμβοι που ακολουθούν διαλέγουν ένα κανάλι και περιμένουν για το ανάλογο beacon έτσι ώστε να συγχρονιστούν. Μετά το πέρας της κατάστασης αρχικοποίησης όλοι οι κόμβοι είναι συγχρονισμένοι και κάθε κόμβος έχει τις πληροφορίες που αφορούν τους γείτονές του και τα διαθέσιμα σε αυτούς κανάλια. Όταν ένας κόμβος θέλει να επικοινωνήσει με έναν γειτονικό του διαλέγει ένα από τα κοινά τους κανάλια και περιμένει την αρχή του συγκεκριμένου slot που αντιστοιχεί σε αυτό το κανάλι για να στείλει τα

σήματα ελέγχου. Όταν ανταλλάξουν τα σήματα αυτά μπορούν να ξεκινήσουν την ανταλλαγή των δεδομένων η οποία δεν προϋποθέτει συγχρονισμό.

Βλέπουμε ότι στα περισσότερα πρωτόκολλα υπάρχει ένα control channel, συγχρονισμός μεταξύ των χρηστών, συνεργασία μεταξύ των Secondary Users στο sensing και σε όλα υπάρχουν πολλοί SUs και PUs.

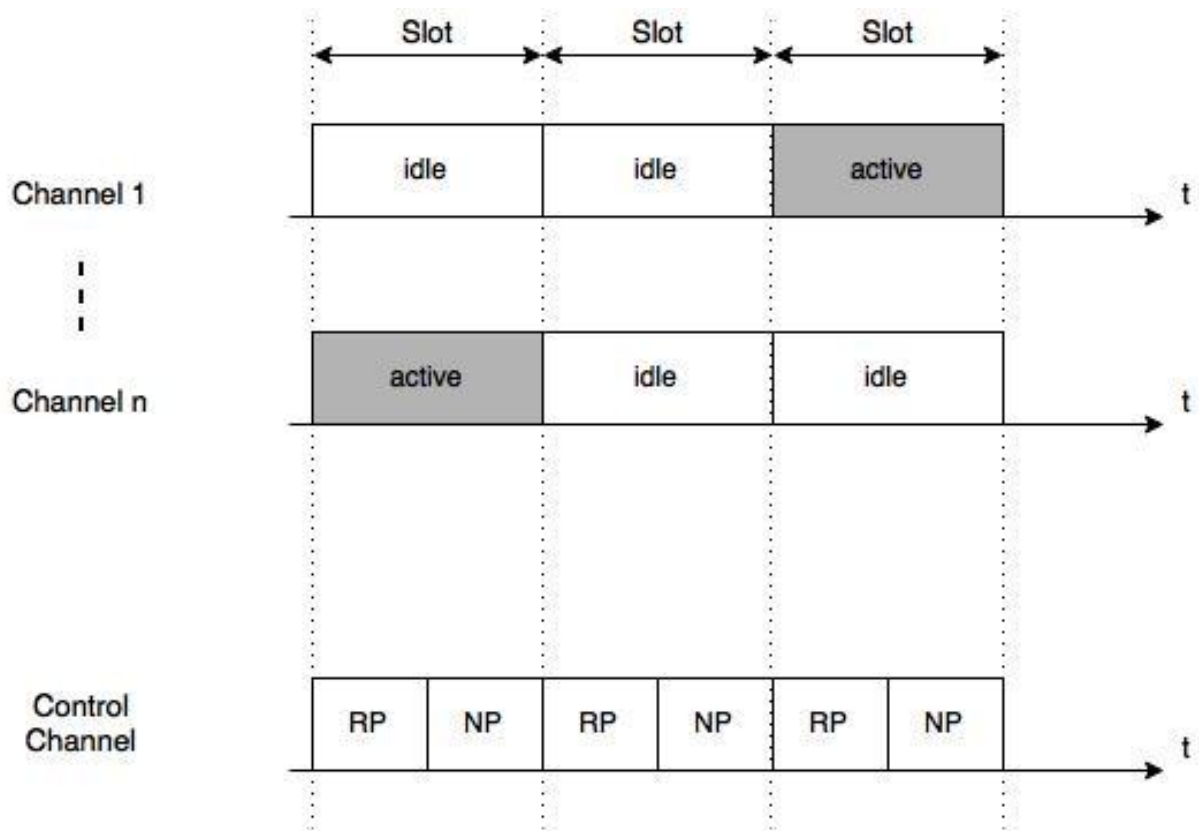
Κεφάλαιο 3

Μοντέλο Συστήματος

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζουμε το μοντέλο του συστήματος που θα μελετήσουμε, πως αυτό διαμορφώνεται, τι είδους κανάλια και χρήστες έχει, και τους μηχανισμούς sensing και επίλυσης σύγκρουσης, ώστε να μπορέσει ένας SU (Secondary User) να μεταδώσει επιτυχώς δίχως παρεμβολές στους PUs (Primary Users).

3.1 Διαμόρφωση συστήματος

Υποθέτουμε ένα time slotted CRN με u SUs οι οποίοι προσπαθούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους ευκαιριακά (χωρίς παρεμβολές στους PUs), στα κανάλια που είναι αφιερωμένα στους PUs. Οι SUs είναι συγχρονισμένοι σε time-slots μεταξύ τους αλλά και με τους PUs. Οι PUs ξεκινούν τις μεταδόσεις τους στην αρχή κάθε slot και μόνο εκεί, όταν έχουν πακέτα προς μετάδοση. Άρα για να βρουν οι SUs τις ευκαιρίες να μεταδώσουν και να μην προκαλούν παρεμβολές στους PUs κάνουν sense τα κανάλια στην αρχή κάθε slot με έναν μηχανισμό που παρουσιάζεται αναλυτικά παρακάτω. Υποθέτουμε ότι οι SUs έχουν πάντα πακέτα προς αποστολή άρα ξεκινούν τις μεταδόσεις τους αμέσως μόλις βρουν ευκαιρία. Για να μην προσπαθούν όλοι ταυτόχρονα σε κάθε slot να μεταδώσουν όμως, υπάρχει μια πιθανότητα p , που ορίζει για κάθε έναν SU ανεξάρτητα αν θα δοκιμάσει να μεταδώσει σε κάποιο slot, και αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε κάθε slot. Αν τα διαθέσιμα κανάλια είναι λιγότερα από τους SUs που θα δοκιμάσουν να στείλουν τότε δεν υπάρχει κανάλι για όλους και πρέπει με έναν μηχανισμό επίλυσης σύγκρουσης να προκύψουν οι χρήστες που θα μεταδώσουν τελικά. Στην παράγραφο 3.1.1 παρουσιάζονται πιο αναλυτικά τα κανάλια επικοινωνίας και το κανάλι ελέγχου και στην 3.2.2 οι χρήστες του συστήματος. Το Σχήμα 3 μας δείχνει την βασική δομή του συστήματος με τα κανάλια επικοινωνίας και το κανάλι ελέγχου που το κάθε slot του χωρίζεται σε δύο φάσεις αναφοράς (Reporting Phase) και διαπραγμάτευσης (Negotiation Phase).



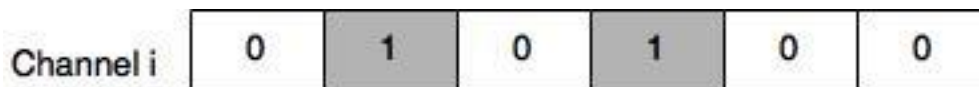
Σχήμα 3: Κανάλια επικοινωνίας και κανάλι ελέγχου

3.1.1 Κανάλια

Υπάρχουν δύο ειδών κανάλια. Τα κανάλια μετάδοσης όπου εκεί γίνεται η μετάδοση των πακέτων πληροφορίας των PU, και όταν υπάρχει διαθέσιμο κενό και των SU. Το κανάλι ελέγχου (control channel) όπου εκεί οι SU ανταλλάσσουν πληροφορίες σχετικά με τα διαθέσιμα κανάλια επικοινωνίας, αλλά και επιλέγουν ποιος θα μεταδώσει σε αυτά τα διαθέσιμα κενά μέσα από έναν μηχανισμό επίλυσης σύγκρουσης.

Όλα τα κανάλια είναι χωρισμένα σε σχισμές (slotted) και υπάρχει συγχρονισμός μεταξύ των καναλιών επικοινωνίας αλλά και του control channel. Στο control channel το κάθε slot είναι χωρισμένο σε δύο φάσεις, αναφοράς και διαπραγμάτευσης. Η φάση της αναφοράς είναι περαιτέρω διαιρεμένη σε n mini slots (όσα και τα κανάλια). Στην φάση της αναφοράς γίνεται το sense των καναλιών επικοινωνίας με έναν μηχανισμό που παρουσιάζουμε αναλυτικά στην παράγραφο 3.2. Στην φάση της διαπραγμάτευσης οι SUs μέσω μιας διαδικασίας ανταγωνισμού αποφασίζουν ποιος ή ποιοι από αυτούς θα μεταδώσουν, οι λεπτομέρειες παρουσιάζονται στην παράγραφο 3.3.

Το κάθε κανάλι επικοινωνίας αναπαριστάται από μια ακολουθία 0 και 1 όπου το 0 σημαίνει ότι δεν υπάρχει μετάδοση PU σε αυτό το slot ενώ το 1 ότι υπάρχει (Σχήμα 4). Οι SUs μπορούν να χρησιμοποιήσουν το κανάλι στα slots με 0 ώστε να μεταδώσουν χωρίς παρεμβολές στους PUs.



Σχήμα 4: Η κατάσταση του i -οστού καναλιού

3.1.2 Χρήστες

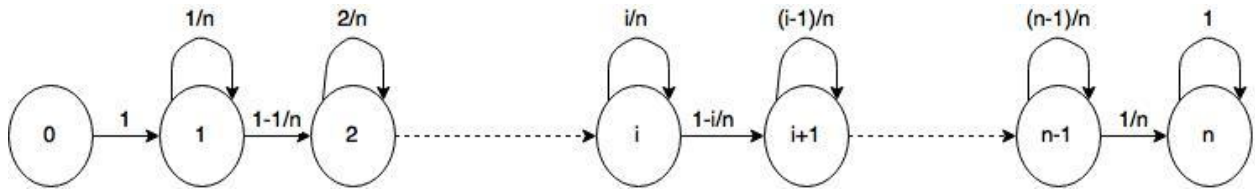
Μπορούν να υπάρχουν πολλοί PUs και πολλοί SUs. Υποθέτουμε ότι οι PUs μεταδίδουν βάση μιας Bernoulli κατανομής. Άρα σε κάθε slot στα κανάλια επικοινωνίας ή θα μεταδίδει ένας PU ή το slot θα είναι διαθέσιμο για κάποιον από τους SUs να το εκμεταλλευτεί.

Ο κάθε SU είναι εξοπλισμένος με δύο πομποδέκτες. Ο πρώτος είναι αφιερωμένος για να λειτουργεί πάνω στο control channel. Οι SUs χρησιμοποιούν αυτόν τον πομποδέκτη για να αποκτούν την πληροφορία για τα διαθέσιμα κανάλια και για να διαπραγματευτούν στην συνέχεια με τους υπόλοιπους SUs για το ποιος θα μεταδώσει. Ο δεύτερος πομποδέκτης αποτελείται από το SDR (Software Defined Radio) και λειτουργεί πάνω στα κανάλια επικοινωνίας κάνοντας sense και ανταλλάσσοντας πακέτα/σήματα. Για ευκολία θα αποκαλούμε τον πρώτο control transceiver και τον δεύτερο SDR.

3.2 Μηχανισμός sensing

Σε ένα MAC πρωτόκολλο για ευφυή ασύρματα δίκτυα χρειάζεται ένας μηχανισμός με τον οποίο οι Secondary Users θα κάνουν sense το κανάλι, ή τα κανάλια αν αυτά είναι πολλά, ώστε να αποκτήσουν γνώση για το αν υπάρχουν Primary Users που μεταδίδουν την δεδομένη χρονική στιγμή. Στο [5] προτείνεται ένας μηχανισμός sense όπου οι SUs συνεργάζονται μεταξύ τους για να αποκτήσουν γνώση για όλα τα κανάλια. Η λογική είναι η ακόλουθη. Στην αρχή κάθε slot οι SUs μέσω του SDR transceiver κάνουν sense ένα από τα n κανάλια ο καθένας, έστω το i ($1 \leq i \leq n$). Αν ο κάθε SU δει ότι το i -οστό κανάλι που έλεγξε είναι ελεύθερο τότε χρησιμοποιεί τον control transceiver για να στείλει ένα beacon στην διάρκεια του i -οστού mini slot στην φάση της αναφοράς στο control channel. Αλλιώς δεν στέλνει τίποτα. Κάθε mini slot στην φάση αναφοράς διαρκεί αρκετά ώστε να καθοριστεί αν το κανάλι είναι ελεύθερο ή όχι. Αν κάθε ένα από τα n κανάλια έγινε sense από τουλάχιστον έναν SU τότε όλοι οι SUs παίρνουν την πληροφορία για ολόκληρο το διαθέσιμο φάσμα.

Κάθε SU επιλέγει να κάνει sense ένα από τα n κανάλια με πιθανότητα $1/n$. Υποθέτουμε ότι υπάρχουν u Secondary Users και καθένας από αυτούς επιλέγει ένα κανάλι ανεξάρτητα και ομοιόμορφα. Αν συμβολίσουμε με S τον αριθμό των διαφορετικών καναλιών που οι SUs μπορούν να κάνουν sense τότε χρησιμοποιούμε μια αλυσίδα Markov για να υπολογίσουμε την συνάρτηση μάζας πιθανότητας του S , συμβολίζοντάς την με $\Pr\{S = s\}$, δηλαδή η πιθανότητα ο αριθμός των καναλιών που έγιναν sensed από τους SUs να είναι s . Η πιθανότητα ότι ένα δεδομένο κανάλι έγινε sensed από έναν SU είναι $1/n$. Έτσι μπορούμε να απεικονίσουμε την διαδικασία sensing των καναλιών σαν μια αλυσίδα Markov (Σχήμα 5), όπου η μεταβλητή μέσα στον κύκλο συμβολίζει τον αριθμό των καναλιών που έγιναν sensed από τους SUs.



Σχήμα 5: Αλυσίδα Markov για τα κανάλια που έγιναν sense

Από τις αναλύσεις που γίνονται και παρακάτω σε αυτή τη διπλωματική βλέπουμε ότι αυτός ο μηχανισμός sensing λειτουργεί πιο αποδοτικά όταν οι SUs είναι αρκετά περισσότεροι από τα κανάλια, που είναι η τυπική περίπτωση σε ρεαλιστικές εφαρμογές. Πιο συγκεκριμένα, όταν οι SUs είναι τουλάχιστον τριπλάσιοι από τα κανάλια έχουμε υψηλά ποσοστά των καναλιών που έχουν γίνει sensed τα οποία ξεπερνούν το 80% του διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων. Σε αυτή τη διπλωματική εργασία υιοθετούμε αυτόν τον μηχανισμό για το sensing των καναλιών.

Έχουμε υποθέσει ιδανικά ότι στο sensing δεν υπάρχει πιθανότητα λάθους από τους χρήστες, άρα όσα κανάλια ελεγχτούν θα βρεθούν ελεύθερα ή κατειλημμένα με πιθανότητα 1. Με αυτήν την υπόθεση δεν υπάρχει και ενδεχόμενο να συγκρουστούν οι PUs με τους SUs.

3.3 Μηχανισμός διαπραγμάτευσης

Εφόσον η φάση της αναφοράς έχει τελειώσει και το sensing των καναλιών έχει ολοκληρωθεί, περνάμε στην φάση διαπραγμάτευσης όπου οι χρήστες πρέπει με κάποιον τρόπο να επιλέξουν ποιος ή ποιοι θα μεταδώσουν στα κανάλια επικοινωνίας, αν υπάρχουν κάποια από αυτά διαθέσιμα. Στο [5] προτείνεται ένα p-persistent CSMA σχήμα όπου όσοι SUs έχουν πακέτο να στείλουν, στέλνουν τα σήματα RTS/CTS με μια πιθανότητα p. Έτσι μπαίνουν σε μια διαδικασία ανταγωνισμού μεταξύ τους για το ποιος θα μεταδώσει στο επόμενο διαθέσιμο slot.

Αν ο αριθμός των SU που έχουν πακέτο για να στείλουν είναι u τότε το κανάλι μένει αδρανές αν όλοι οι διαθέσιμοι χρήστες αποφασίσουν να μην μεταδώσουν. Η πιθανότητα αυτή εκφράζεται ως:

$$P_{\text{idle}} = (1 - p)^u$$

Επιτυχή μετάδοση έχουμε όταν ακριβώς ένας χρήστης δοκιμάσει να μπει στην διαδικασία της διαμάχης για κάποιο κανάλι και η αντίστοιχη πιθανότητα εκφράζεται ως:

$$P_{\text{succ}} = up(1 - p)^{u-1}$$

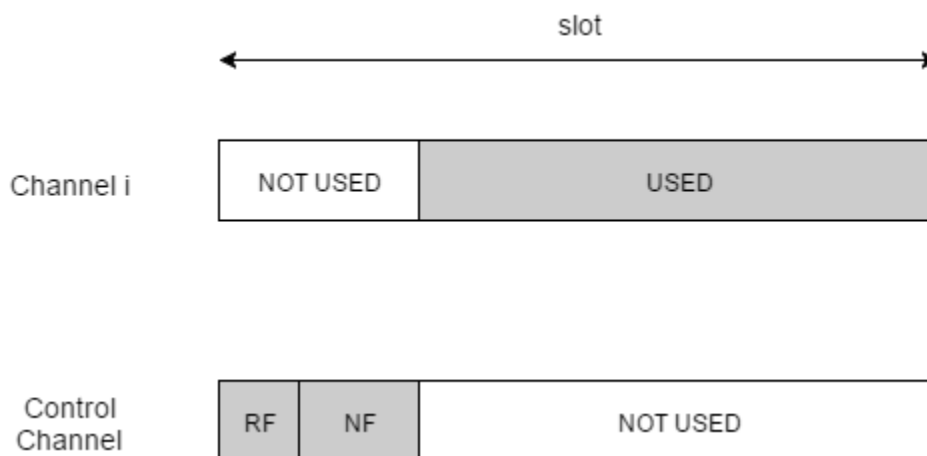
Τέλος σύγκρουση υπάρχει όταν παραπάνω από ένας χρήστες δοκιμάσουν για κάποιο κανάλι και η αντίστοιχη πιθανότητα είναι:

$$P_{\text{coll}} = 1 - P_{\text{idle}} - P_{\text{succ}}$$

Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε όλη τη διάρκεια της φάσης διαπραγμάτευσης και όσοι χρήστες κατάφεραν να βγουν από αυτήν με κάποια επιτυχία μεταδίδουν στο επόμενο slot. Βλέπουμε όμως ότι αν οι διαθέσιμοι χρήστες είναι πολλοί, ή η πιθανότητα p για να μπει κάποιος από αυτούς σε ανταγωνισμό για κάποιο κανάλι δεν είναι καλά ρυθμισμένη, αλλά και σε συνδυασμό των δύο παραπάνω περιπτώσεων, τότε μπορεί να έχουμε συνεχώς συγκρούσεις. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα μπορεί να δοθεί υιοθετώντας έναν αποδοτικό, κατανεμημένο αλγόριθμο επίλυσης της αρχικής σύγκρουσης. Ένας τέτοιος αλγόριθμος είναι του δυαδικού

δέντρου, κι εμείς θα τον υιοθετήσουμε με την μορφή της στοίβας. Ο αλγόριθμος παρουσιάζεται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο (4.1).

Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι στο σχήμα στο [5] οι χρήστες κάνουν στην αρχή κάθε slot sense τα κανάλια, βρίσκουν τα διαθέσιμα και μετά διαπραγματεύονται για το ποιος ή ποιοι θα μεταδώσουν, αλλά μεταδίδουν στην αρχή του επόμενου slot. Στο επόμενο slot όμως τα διαθέσιμα κανάλια είναι πολύ πιθανό να είναι διαφορετικά από αυτά στο προηγούμενο slot. Εμείς γι αυτό το λόγο δεν αφήνουμε την φάση διαπραγμάτευσης να εξελιχθεί σε όλο το slot, αλλά στην αρχή με ένα στατικό μοντέλο και στην συνέχεια με δυναμικό τρόπο, αλλά και με συνδυασμό των δύο, την διακόπτουμε και η μετάδοση ξεκινάει αμέσως μετά στο ίδιο slot με αποτέλεσμα όμως ένα ποσοστό του slot να πάει χαμένο (Σχήμα 6). Με αυτόν τον τρόπο όμως αποφεύγουμε τυχόν συγκρούσεις στο επόμενο slot με τους PUs που είναι μία βασική προϋπόθεση για ένα λειτουργικό CRN.



Σχήμα 6: Παράδειγμα μετάδοσης ενός SU σε ένα κανάλι i

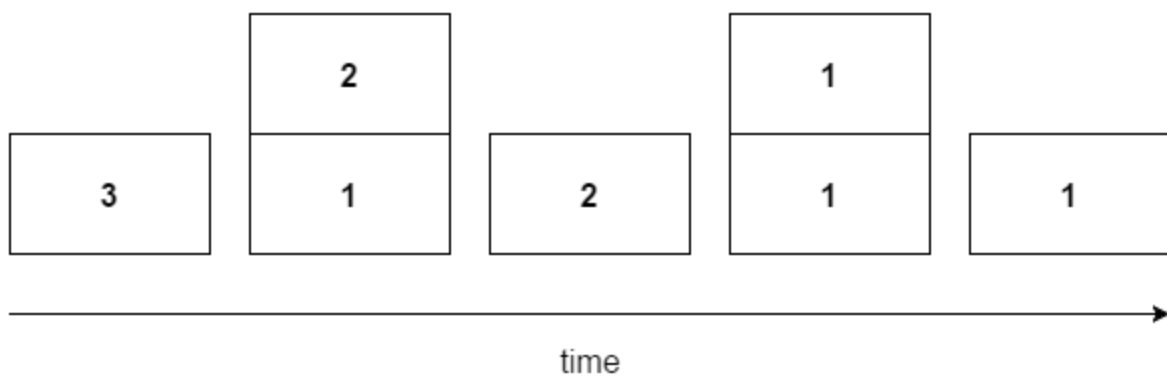
Κεφάλαιο 4

Σχεδίαση και Υλοποίηση Αρχιτεκτονικής Συστήματος

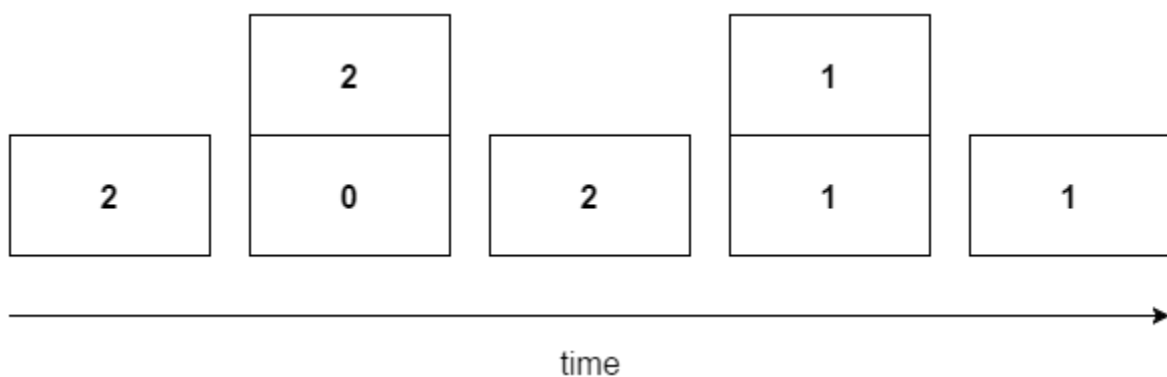
Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλύσουμε και θα προσομοιώσουμε το σύστημα που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3 καθώς και θα αξιολογήσουμε και συζητήσουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Στην παράγραφο 4.1 παρουσιάζουμε τον αλγόριθμο επίλυσης συγκρούσεων με την χρήση στοίβας, στην παράγραφο 4.2 εισάγουμε το αρχικό στατικό μοντέλο, στην παράγραφο 4.3 εισάγουμε δύο δυναμικά μοντέλα, τα οποία συγκρίνουμε μεταξύ τους αλλά και με το στατικό μοντέλο στην παράγραφο 4.4, και τέλος στην παράγραφο 4.5 παρουσιάζουμε έναν αναδρομικό μηχανισμό αποκεντροποίησης του συστήματος.

4.1 Ο μηχανισμός της στοίβας

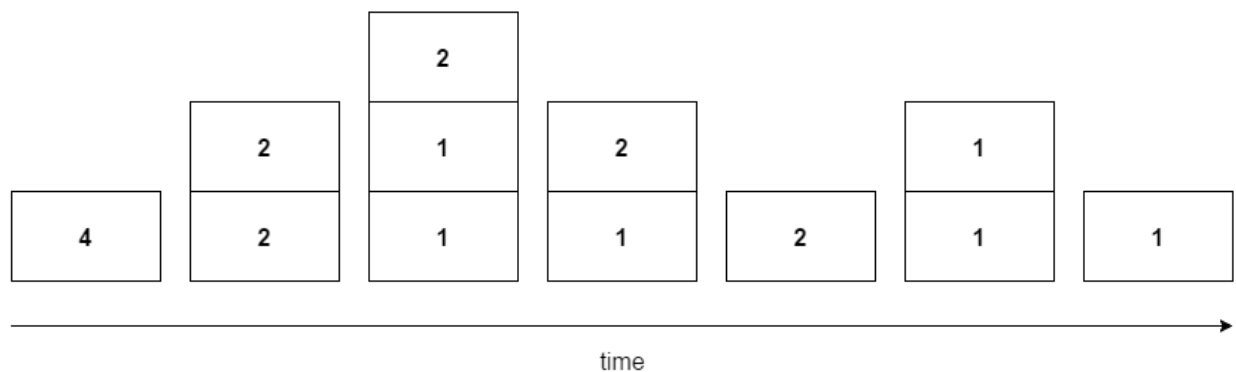
Όπως αναφέραμε στην παράγραφο 3.3 στην φάση της διαπραγμάτευσης εισάγουμε έναν μηχανισμό επίλυσης σύγκρουσης του δυαδικού δέντρου με την μορφή της στοίβας. Τα κελιά της στοίβας γεμίζουν με αριθμούς από κάτω προς τα πάνω και το μέγεθός της αλλάζει δυναμικά. Οι αριθμοί στα κελιά αντικατοπτρίζουν τους χρήστες στο αντίστοιχο επίπεδο της στοίβας. Η λογική είναι η ακόλουθη: Όταν έχουμε μια σύγκρουση όσοι χρήστες συγκρούστηκαν ρίχνουν ένα δίκαιο νόμισμα και όσοι βγουν νικητές μένουν στο ίδιο κελί ενώ όσοι χάσουν ανεβαίνουν μία θέση πάνω στην στοίβα δημιουργώντας νέο κελί. Αν υπήρχαν ήδη κελιά από πάνω όλα ολισθαίνουν μία θέση προς τα πάνω. Το κελί που είναι στον πάτο είναι αυτό που ελέγχεται κάθε φορά. Αν οι χρήστες σε αυτό το κελί είναι δύο ή περισσότεροι έχουμε σύγκρουση. Όταν υπάρχει ένας χρήστης έχουμε επιτυχία και αυτός βγαίνει από τη στοίβα, το κελί που αυτός καταλάμβανε (αναγράφοντας 1) διαγράφεται και ταυτόχρονα τα από πάνω κελιά ολισθαίνουν μία θέση προς τα κάτω. Το ίδιο συμβαίνει και όταν δεν υπάρχει κανένας χρήστης σε κάποιο κελί (ένδειξη 0). Η όλη διαδικασία τελειώνει όταν αδειάσει πλήρως η στοίβα, άρα έχει επιλυθεί πλήρως η αρχική σύγκρουση. Τρία ενδεικτικά παραδείγματα φαίνονται στα Σχήμα 7, Σχήμα 8 και Σχήμα 9.



Σχήμα 7: Μετατροπή στοίβας στο χρόνο (παράδειγμα 1)



Σχήμα 8: Μετατροπή στοίβας στον χρόνο (παράδειγμα 2)



Σχήμα 9: Μετατροπή στοίβας στον χρόνο (παράδειγμα 3)

Η φάση της αναφοράς (Reporting Phase) είναι χωρισμένη σε n (όσα και τα κανάλια) mini slots το καθένα διάρκειας $T_{ms} = 9\mu s$ (από το [5]). Μετά την εισαγωγή της στοίβας στην φάση της διαπραγμάτευσης (Negotiate Phase), χωρίσαμε σε mini slots ίδιου μεγέθους και αυτήν την φάση. Ο αριθμός τους εξαρτάται από το μέγεθος της αρχικής σύγκρουσης ή από το πότε εμείς θέλουμε να σταματήσει η φάση διαπραγμάτευσης και να ξεκινήσει η μετάδοση (στατικό μοντέλο) καθώς και από την διάρκεια του slot T_s που αλλάζουμε στα διάφορα παραδείγματα της προσομοίωσης. Ο χρόνος του mini slot είναι αρκετός ώστε να γίνεται ο έλεγχος στο τελευταίο κελί της στοίβας και να παίρνονται οι ανάλογες αποφάσεις με βάση αυτά που είπαμε παραπάνω.

4.2 Στατικό μοντέλο

Η αρχική και πιο απλή προσέγγιση που κάναμε ήταν ένα στατικό μοντέλο. Η λογική είναι απλή. Στην αρχικοποίηση του συστήματος ένα άνω χρονικό όριο για τα σήματα ελέγχου εισάγεται, έτσι ώστε μόλις το φτάσουμε, να σταματάει η φάση της διαπραγμάτευσης στο control channel και να ξεκινάει η μετάδοση στα κανάλια επικοινωνίας. Δοκιμάσαμε δύο τιμές για το παραπάνω άνω όριο. Το 10% και το 20% του slot. Οι τιμές των μεταβλητών στον πίνακα που ακολουθεί δεν αλλάζουν στο σύνολο των πειραμάτων.

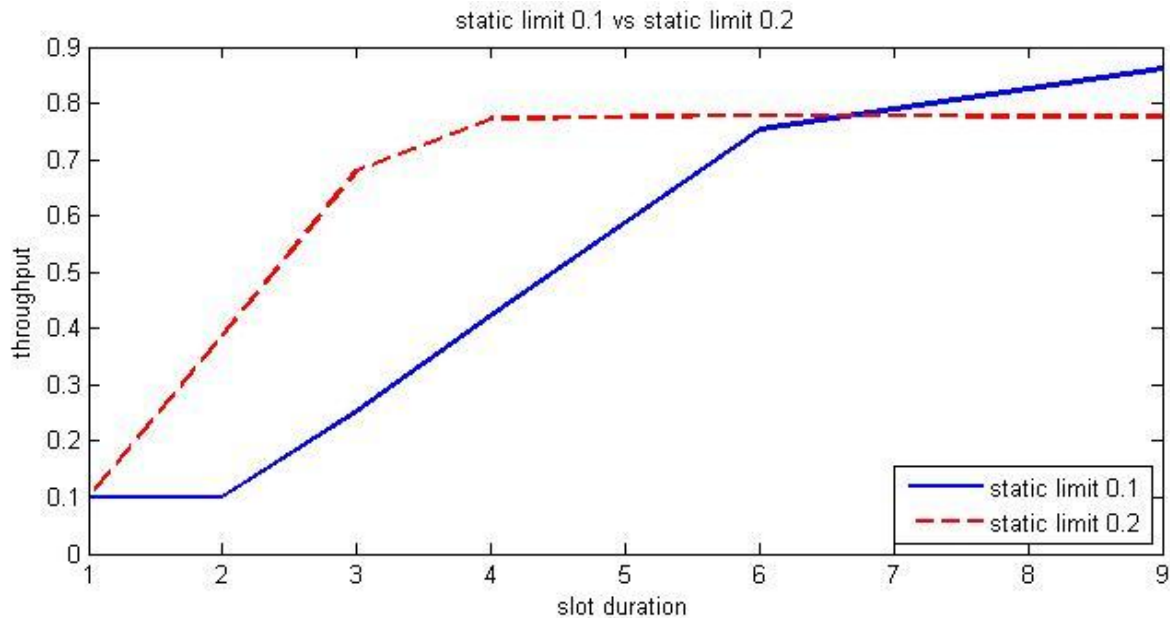
μεταβλητή	τιμή
PU utilization	0.1
T_{ms} (mini slot duration)	9 μs
Διάρκεια προσομοίωσης	30 min

Η χρησιμοποίηση των καναλιών από τους PUs υποτίθεται 10%. Έχουμε δώσει μικρή πιθανότητα στους PUs να μεταδίδουν σε ένα συγκεκριμένο slot γιατί θέλουμε να εξετάσουμε πως οι SUs εκμεταλλεύονται τα διαθέσιμα κενά στις μεταδόσεις των PUs όταν οι τελευταίοι είναι ελαφρά φορτωμένοι. Η διάρκεια του mini slot είναι 9 μs (από το [5]). Ο χρόνος της προσομοίωσης είναι παραπάνω από αρκετός ώστε τα αποτελέσματα να έχουν σταθεροποιηθεί (η λειτουργία του συστήματος να έχει φτάσει σε μόνιμη κατάσταση).

Ακολουθούν τρεις σειρές πειραμάτων όπου στην κάθε μια ελέγχεται πως μια μεταβλητή επηρεάζει το συνολικό throughput. Το throughput το εκφράζουμε σαν το κλάσμα του χρόνου των καναλιών που αξιοποιήθηκε. Οι PUs μεταδίδουν στο κάθε slot από την αρχή του, ενώ οι SUs αναλόγως του υποτιθέμενου χρονικού άνω ορίου αξιοποιούν το 90% ή το 80% της διάρκειας του κάθε slot στο οποίο μεταδίδουν. Όλα τα παραπάνω έχουν ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό του throughput.

1. Επίδραση της μεταβλητής T_s (slot duration) (μονάδα μέτρησης ms)

inputs	value
Number of channels	20
Number of SUs	100
p (SU probability to sent)	0.3

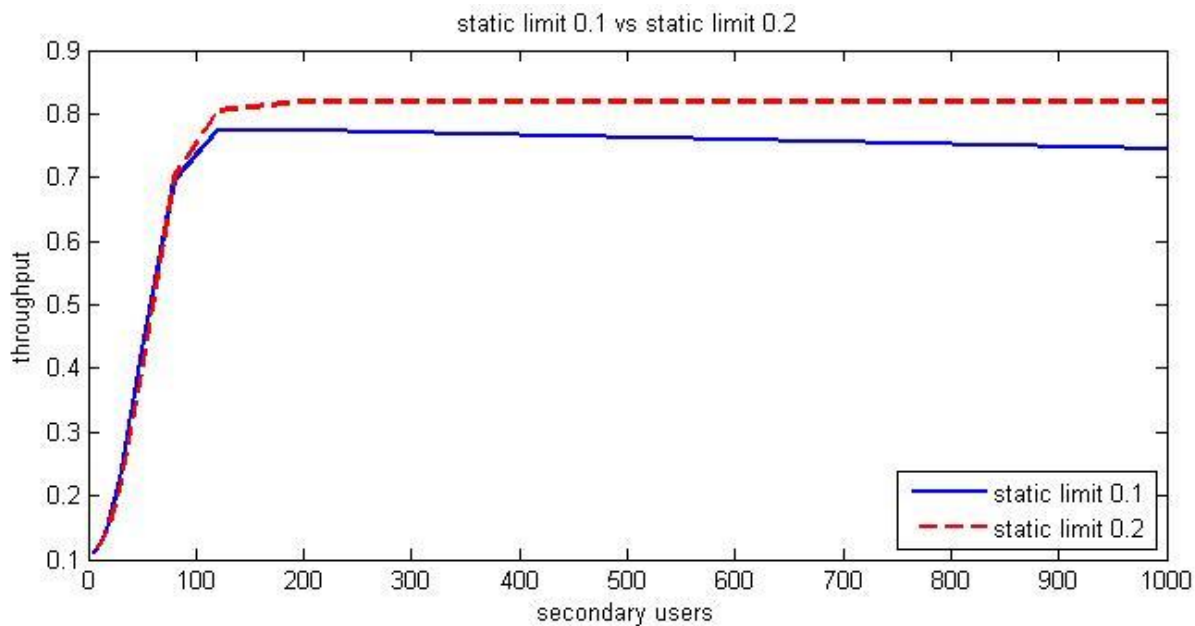


Σχήμα 10: Στατικό μοντέλο με χρονικά άνω όρια 0.1 και 0.2 του slot (παράδειγμα 1)

Από το γράφημα στο Σχήμα 10 συμπεραίνουμε τα εξής. Όσο μεγαλύτερο είναι το slot duration τόσο ψηλότερο throughput επιτυγχάνεται. Αυτό ισχύει και στις δύο περιπτώσεις, είτε με χρονικό άνω όριο το 10% του slot είτε με 20%. Οι δύο παραπάνω εκδοχές δίνουν ίδιο throughput για slot duration περίπου 7ms. Για μικρότερο slot duration είναι καλύτερο το μοντέλο με χρονικό άνω όριο 20% ενώ για μεγαλύτερο slot duration είναι καλύτερο αυτό με χρονικό άνω όριο 10%. Αυτό εξηγείτε εύκολα, γιατί όταν έχουμε μεγάλη διάρκεια slot τότε το 10% αυτού αρκεί για να επιλύσουμε πλήρως την αρχική σύγκρουση. Έτσι εκμεταλλευόμαστε στην συνέχεια το υπόλοιπο 90% του slot για μετάδοση, κάτι που δεν γίνεται στην δεύτερη περίπτωση. Το ποσοστό των καναλιών που γίνονται sensed σε αυτές τις περιπτώσεις και ειδικά για slot duration μεγαλύτερο ή και ίσο με 2 ms είναι στο 94%.

2. Επίδραση του αριθμού των SUs

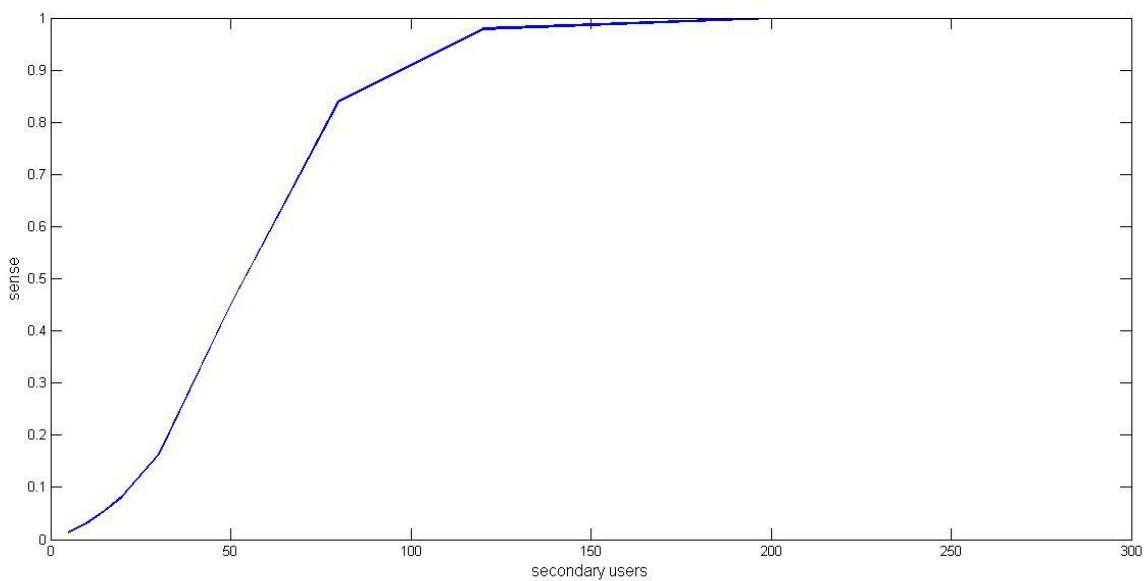
Inputs	value
Number of channels	20
Slot duration	6 ms
p (SU probability to sent)	0.3



Σχήμα 11: Στατικό μοντέλο με χρονικά άνω όρια 0.1 και 0.2 του slot (παράδειγμα 2)

Από το γράφημα στο Σχήμα 11 συμπεραίνουμε ότι οι δύο εκδοχές έχουν για λίγους χρήστες (μέχρι 80) μικρή διαφορά στο επιτυγχανόμενο throughput, και πιο συγκεκριμένα από 0,5% έως 3,5% καλύτερο το στατικό μοντέλο με χρονικό άνω όριο το 10% του slot. Για περισσότερους από 80 χρήστες όμως, η δεύτερη εκδοχή είναι καλύτερη και όσο αυξάνει ο αριθμός των χρηστών μεγαλώνει και η διαφορά στο επιτυγχανόμενο throughput. Αυτό είναι λογικό γιατί όταν υπάρχουν πολλοί χρήστες δεν προλαβαίνουν μέσα στο 10% του slot να διαπραγματευτούν κατάλληλα ώστε στην συνέχεια να βγουν αρκετοί από αυτούς και να μεταδώσουν, αλλά απαιτείται περισσότερος χρόνος διαπραγμάτευσης, που τους τον δίνει η δεύτερη εκδοχή με το χρονικό άνω όριο το 20% του slot. Στους 1000 χρήστες τα επιτυγχανόμενα throughputs των δύο εκδοχών είναι 75,5% και 82%, αντίστοιχα.

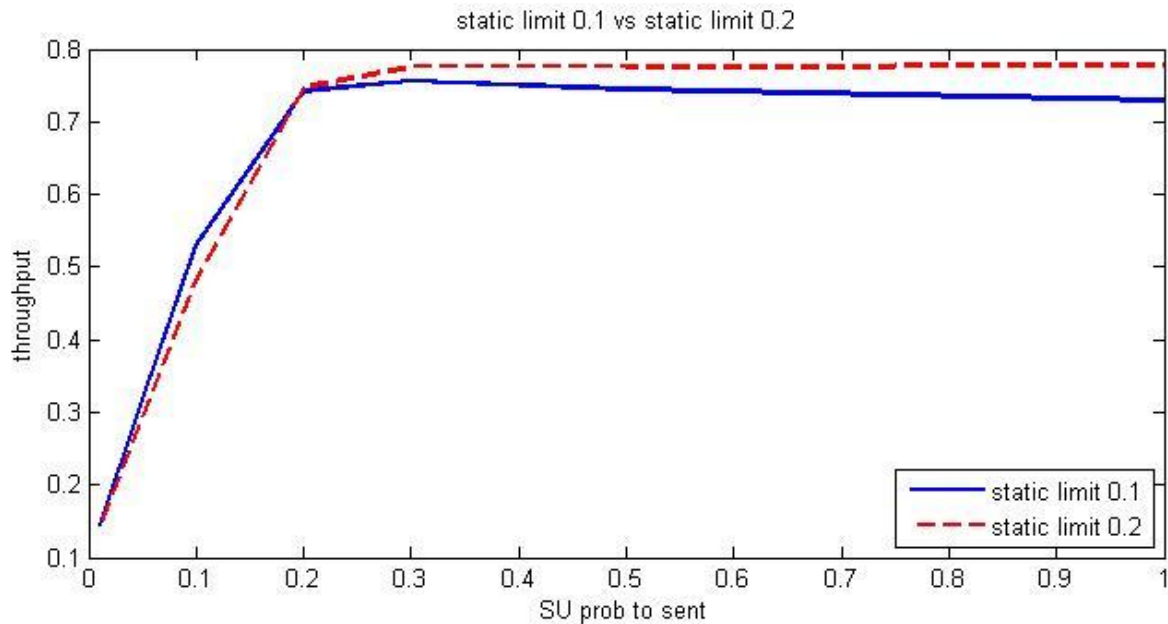
Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι 82% είναι το άνω όριο στο throughput που μπορεί να επιτύχει το στατικό μοντέλο με χρονικό άνω όριο το 20% του slot. Αυτό γιατί το throughput των PU είναι 10%. Άρα το 72% που είναι το throughput των SUs προκύπτει από το 90% του διαθέσιμου στους SUs χρόνου των καναλιών αν αξιοποιηθεί ολόκληρος από τους SUs. Οι SUs αξιοποιούν το 80% του κάθε slot κατά την μετάδοσή τους άρα $0.8 \times 0.9 = 0.72$. Βέβαια για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να υπάρχει απόλυτο sensing των διαθέσιμων καναλιών αλλά και οι επιτυχίες στην φάση της διαπραγμάτευσης να είναι τουλάχιστον ίσες με τα διαθέσιμα κανάλια. Στο Σχήμα 12 φαίνεται πως μεταβάλλεται το κλάσμα των καναλιών που γίνονται sensed ανάλογα με τον αριθμό των SUs που βρίσκονται στο σύστημα.



Σχήμα 12: Μεταβολή του sense σε σχέση με τους χρήστες

3. Επίδραση της πιθανότητας p σύμφωνα με την οποία ένας SU μπαίνει στην διεκδίκηση καναλιού

inputs	value
Number of channels	20
Slot duration	6 ms
Number of SUs	100



Σχήμα 13: Στατικό μοντέλο με χρονικά άνω όρια 0.1 και 0.2 του slot (παράδειγμα 3)

Από το γράφημα στο Σχήμα 13 συμπεραίνουμε ότι για πιθανότητα p μικρότερη από 0.2 η πρώτη εκδοχή με χρονικό άνω όριο το 10% του slot είναι καλύτερη ενώ για πιθανότητα p μεγαλύτερη από 0.2 είναι καλύτερη η δεύτερη εκδοχή με χρονικό άνω όριο το 20%. Αυτό είναι λογικό γιατί όσο πιο μεγάλη η πιθανότητα να μπει στην διαδικασία της διεκδίκησης καναλιού κάποιος δευτερεύον χρήστης, τόσο πιο μεγάλης πολλαπλότητας σύγκρουση θα έχουμε, άρα θα χρειαστούμε και περισσότερο χρόνο για να την επιλύσουμε. Το sensing των καναλιών σε αυτά τα πειράματα είναι περίπου στο 94%, και αυτός είναι και ο λόγος που το συνολικό throughput δεν ξεπερνάει το 80%.

Εδώ να τονίσουμε κάποιες σημαντικές λεπτομέρειες. Στο στατικό μοντέλο η χρονική στιγμή που σταματάνε τα σήματα ελέγχου και ξεκινάει η μετάδοση πακέτων πληροφορίας είναι σταθερή και δεν αλλάζει σε όλη τη διάρκεια των πειραμάτων. Έτσι αν μια σύγκρουση επιλυθεί πολύ γρήγορα και έχουμε τους χρήστες έτοιμους για να μεταδώσουν, αυτοί θα περιμένουν μέχρι την παραπάνω προκαθορισμένη χρονική στιγμή. Έχουμε λοιπόν ένα ποσοστό του slot που πάει χαμένο σε τέτοιες περιπτώσεις. Έχουμε όμως και την περίπτωση όπου μια σύγκρουση δεν πρόλαβε να επιλυθεί στο διάστημα που ήταν διαθέσιμο και απαιτούσε περισσότερο χρόνο. Αλλά πόσο περισσότερο χρόνο είναι η πρώτη σκέψη που έρχεται στο μυαλό. Γι αυτούς τους λόγους λοιπόν σκεφτήκαμε να εισάγουμε έναν δυναμικό τρόπο για τον τερματισμό των σημάτων ελέγχου και την έναρξη της φάσης μετάδοσης πληροφορίας. Υπάρχουν δύο δυναμικά μοντέλα που σκεφτήκαμε τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

4.3 Δυναμικά μοντέλα

Η λογική στα δυναμικά μοντέλα είναι να λήγει η φάση της διαπραγμάτευσης στο κανάλι ελέγχου, και να ξεκινάει η μετάδοση στα κανάλια επικοινωνίας, μόλις συμβεί κάποιο γεγονός στο σύστημα. Το πρώτο δυναμικό μοντέλο το ονομάσαμε full success, γιατί σε αυτό η μετάδοση ξεκινάει μόλις επιλυθεί πλήρως η σύγκρουση. Άρα εδώ το γεγονός είναι η πλήρης επίλυση της αρχικής σύγκρουσης. Το δεύτερο μοντέλο το ονομάσαμε channel success, γιατί η μετάδοση ξεκινάει μόλις έχουμε τόσες επιτυχίες από την επίλυση της σύγκρουσης, όσα και τα διαθέσιμα κανάλια σε αυτό το slot. Εδώ το ζητούμενο γεγονός είναι να βρεθούν τόσοι χρήστες να μεταδώσουν (μέσα από την επίλυση της αρχικής σύγκρουσης) όσα και τα διαθέσιμα κανάλια.

4.3.1 Full success

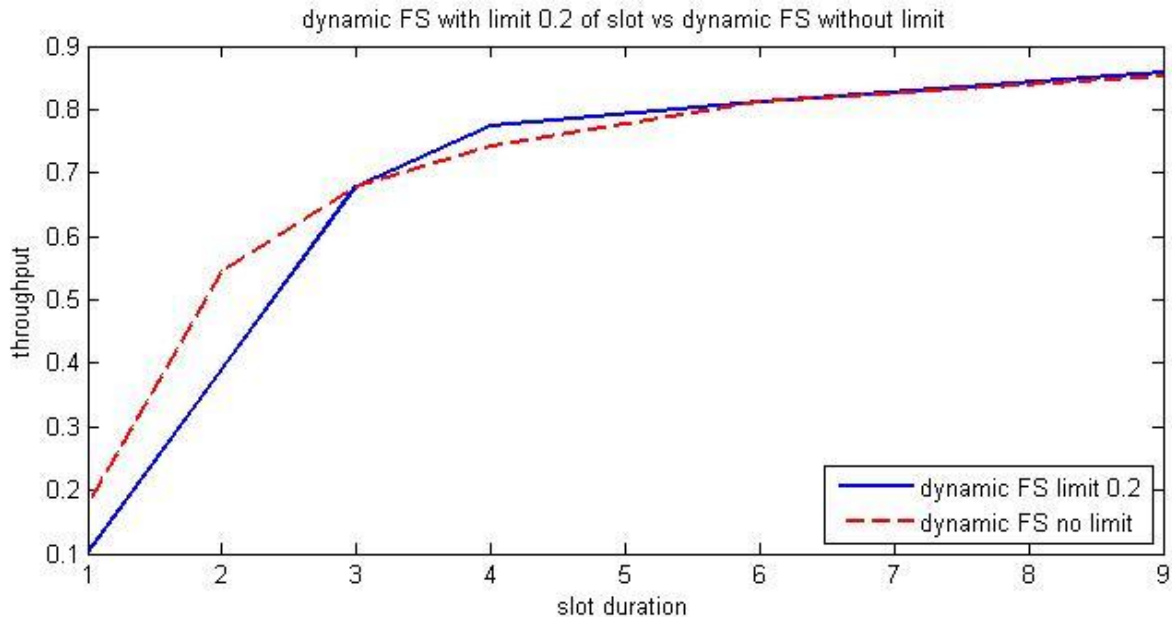
Η αρχική προσέγγιση για δυναμικό τερματισμό σε κάθε slot της φάσης διαπραγμάτευσης (η φάση της αναφοράς έχει προκαθορισμένη διάρκεια ανάλογα με τον αριθμό των καναλιών) ήταν να λήγει μόλις επιλυθεί πλήρως η σύγκρουση. Αυτό είναι εφικτό μέσα από την φάση διαπραγμάτευσης και την στοίβα, αφού εκεί φαίνεται το μέγεθος της και τότε αυτή αδειάζει, άρα έχει επιλυθεί πλήρως η αρχική σύγκρουση. Στο επόμενο mini-slot της φάσης διαπραγμάτευσης, μετά την επίλυση της σύγκρουσης, στέλνεται σε όλους τους δευτερεύοντες χρήστες του συστήματος ένα σήμα-φάρος (beacon) για να τους ενημερώσει σχετικά με τον τερματισμό της φάσης διαπραγμάτευσης και την έναρξη της φάσης μετάδοσης πακέτων πληροφορίας στα κανάλια επικοινωνίας. Όπως στο στατικό μοντέλο έτσι και εδώ, αν οι χρήστες που κατάφεραν να βγουν με επιτυχία από την επίλυση της σύγκρουσης είναι περισσότεροι από τα διαθέσιμα κανάλια, θα μεταδώσουν αυτοί που βγήκαν πρώτοι (μέχρι να καλυφθεί ο αριθμός των καναλιών). Οι υπόλοιποι δεν μεταδίδουν ούτε αποκτούν κάποια προτεραιότητα για το επόμενο slot (το τελευταίο κατατίθεται ως ιδέα για μελλοντική εργασία).

Από τα πρώτα αποτελέσματα καταλάβαμε ότι να αφήνει κανείς τελείως ανοιχτό το χρονικό όριο για τον τερματισμό της φάσης διαπραγμάτευσης δεν είναι αποδοτικό σε αρκετές περιπτώσεις. Έτσι εκτός από το δυναμικό μοντέλο που μόλις παρουσιάσαμε δοκιμάσαμε και έναν συνδυασμό δυναμικού μοντέλου με κάποιο άνω χρονικό όριο στην φάση διαπραγμάτευσης όπως συνέβαινε στο στατικό μοντέλο. Μόνο που αυτή τη φορά αν επιλυθεί η σύγκρουση πριν από το όριο αυτό η φάση μετάδοσης δεν θα περιμένει μέχρι το χρονικό όριο, αλλά θα ξεκινήσει αμέσως. Ακολουθούν τρεις σειρές πειραμάτων όπου στην κάθε μια ελέγχεται η επίδραση μιας μεταβλητής στο συνολικό throughput. Τα δύο μοντέλα που συγκρίνονται είναι το δυναμικό FS (Full Success) χωρίς όριο και το δυναμικό FS (Full Success) με χρονικό άνω όριο το 20%* της διάρκειας του slot για τα σήματα ελέγχου.

* Επιλέχτηκε το 20% αντί του 10% γιατί έδινε καλύτερα αποτελέσματα.

1. Επίδραση της διάρκειας του slot T_s (slot duration) (μονάδα μέτρησης ms)

inputs	value
Number of channels	20
Number of SUs	100
p (SU probability to sent)	0.3

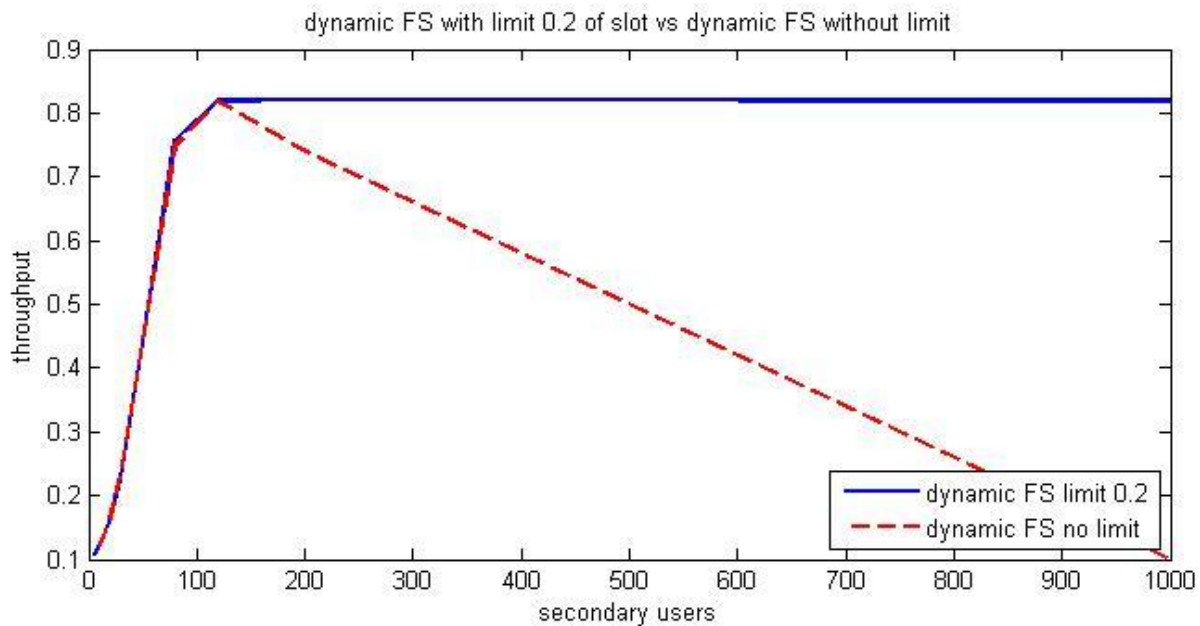


Σχήμα 14: Δυναμικό μοντέλο FS με χρονικό άνω όριο και χωρίς (παράδειγμα 1)

Από το γράφημα στο Σχήμα 14 συμπεραίνουμε ότι για slot duration μικρότερο από 3 ms το δυναμικό μοντέλο χωρίς όριο είναι αρκετά καλύτερο. Αυτό συμβαίνει γιατί για τόσο μικρό slot duration η σύγκρουση δεν προλάβει να επιλυθεί ούτε κατά ένα μικρό ποσοστό της μέσα στο χρονικό άνω όριο του slot (20% της διάρκειας του slot). Έτσι δεν προέκυπταν αρκετοί δευτερεύοντες χρήστες για να μεταδώσουν. Αντίθετα, με ελεύθερο όριο η σύγκρουση επιλυόταν πλήρως, αλλά είχε “καταναλώσει” μεγάλο ποσοστό του slot για να το επιτύχει, κι έτσι για τη μετάδοση περίσσευε μικρό ποσοστό του slot, γι αυτό και το σχετικά χαμηλό throughput. Για slot duration από 3 ms έως 6 ms το δυναμικό μοντέλο με όριο υπερτερεί. Αυτό συμβαίνει γιατί η πλήρης επίλυση της σύγκρουσης καθυστερεί και μειώνει τον χρόνο της μετάδοσης σε ποσοστό μικρότερο από 80% του slot. Αντίθετα στο μοντέλο με το χρονικό άνω όριο, η μετάδοση καταλαμβάνει το 80% του slot. Για slot duration μεγαλύτερο από 6 ms τα δύο μοντέλα είναι σχεδόν ισοδύναμα με το επιτυγχανόμενο throughput να φτάνει το 85,5%, δηλαδή 3,5% καλύτερο από το επιτυγχανόμενο μέγιστο throughput του στατικού μοντέλου με 20% χρονικό άνω όριο όπως είδαμε προηγουμένως.

2. Επίδραση του αριθμού των SUs

Inputs	value
Number of channels	20
Slot duration	6 ms
p (SU probability to sent)	0.3

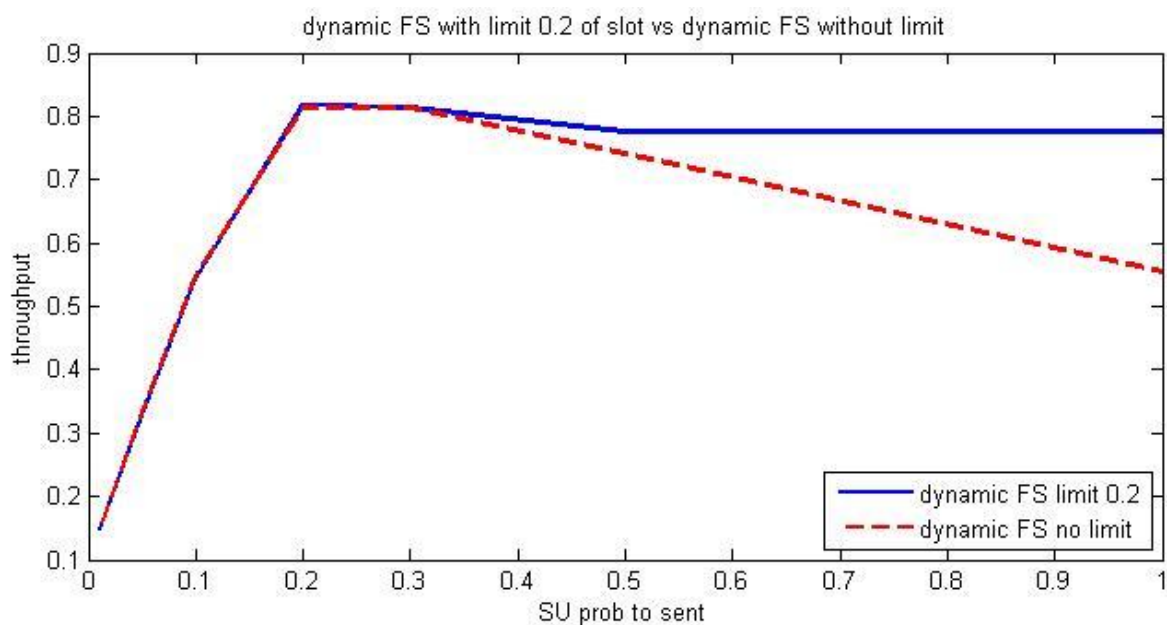


Σχήμα 15: Δυναμικό μοντέλο FS με χρονικό άνω όριο και χωρίς (παράδειγμα 2)

Από το γράφημα στο Σχήμα 15 μπορούμε να βγάλουμε σημαντικά συμπεράσματα. Βλέπουμε ότι τα δύο δυναμικά σχήματα είναι ισοδύναμα μέχρι τους 120 χρήστες ενώ για περισσότερους χρήστες έχουμε μια σταθερή πτώση του throughput για το σχήμα χωρίς άνω όριο. Το σχήμα με το χρονικό άνω όριο επιτυγχάνει μια σταθερή τιμή throughput στο 82%. Ο λόγος της παραπάνω μείωσης στο throughput είναι ότι αφήνοντας ελεύθερο το χρονικό όριο για να επιλυθεί πλήρως η σύγκρουση δεν είναι σε αρκετές περιπτώσεις έξυπνη ιδέα. Αυτό γιατί αν η αρχική σύγκρουση περιλαμβάνει περισσότερους χρήστες απ' ό,τι τα κανάλια, η πλήρης επίλυσή της είναι χάσιμο χρόνου, και οδηγεί σε μικρότερο throughput. Σε αυτό το παράδειγμα η επίλυση της σύγκρουσης φτάνει τελικά να είναι τόσο μεγάλης διάρκειας που δεν προλαβαίνει να επιλυθεί πριν το τέλος του slot. Για τον λόγο αυτόν, το χρονικό άνω όριο σε αυτό το δυναμικό σχήμα είναι πολύ σημαντικό ώστε να αποφεύγουμε τέτοιες περιπτώσεις. Μια άλλη λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι το δυναμικό μοντέλο CS (Channel Success) που θα δούμε στην παράγραφο 4.3.2.

- Επίδραση της πιθανότητας p σύμφωνα με την οποία ένας SU μπαίνει στην διεκδίκηση καναλιού

inputs	value
Number of channels	20
Slot duration	6 ms
Number of SUs	100



Σχήμα 16: Δυναμικό μοντέλο FS με χρονικό άνω όριο και χωρίς (παράδειγμα 3)

Από το γράφημα στο Σχήμα 16 βλέπουμε ότι τα δύο σχήματα είναι ισοδύναμα για p μικρότερο από 0.3, και για p μεγαλύτερο, το δυναμικό σχήμα χωρίς όριο έχει μια συνεχή πτώση στο throughput. Ο λόγος είναι ο ίδιος όπως και πριν. Εδώ έχουμε μεγάλης πολλαπλότητας συγκρούσεις λόγω της μεγάλης πιθανότητας να μπει ένας δευτερεύον χρήστης στην διεκδίκηση καναλιού. Στο τέλος, για $p=1$ η κάθε σύγκρουση περιλαμβάνει 100 χρήστες αφού όλοι μπαίνουν στην διεκδίκηση καναλιού. Ο λόγος όμως που και το σχήμα με το χρονικό άνω όριο έχει μια μικρή σχετικά πτώση στο throughput είναι ότι δεν προλαβαίνει μέσα στο 20% της διάρκειας του slot να βγάλει αρκετούς χρήστες για μετάδοση λόγω της μεγάλης πολλαπλότητας της σύγκρουσης.

4.3.2 Channel Success

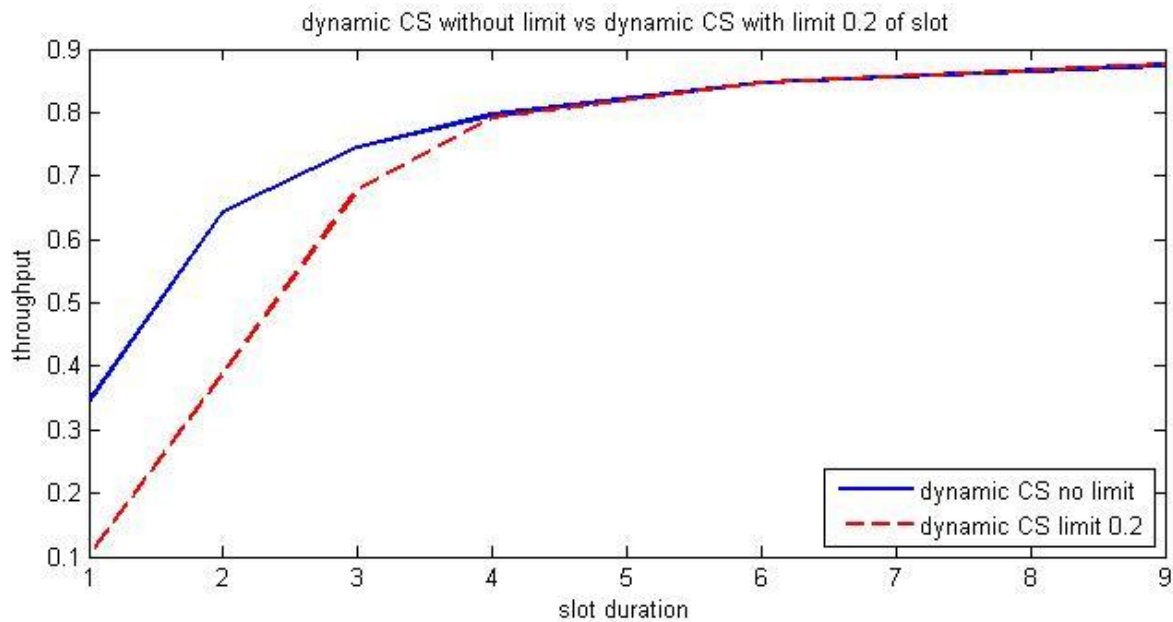
Όπως αναφέραμε και παραπάνω το δυναμικό μοντέλο FS χάνει πολύ σε απόδοση όταν συμβεί μια μεγάλης πολλαπλότητας αρχική σύγκρουση που απαιτεί πολύ χρόνο για την πλήρη επίλυσή της. Άρα η ιδέα ήταν να μην επιλύουμε πλήρως την αρχική σύγκρουση, αλλά να φτάνουμε τον αριθμό των διαθέσιμων καναλιών και να σταματάμε εκεί την επίλυση της. Αυτό είναι εφικτό μέσα από την φάση διαπραγμάτευσης και το σχήμα της στοίβας, αφού σε αυτήν φαίνεται σε κάθε mini-slot αν είχαμε επιτυχία. Έτσι κρατώντας τις επιτυχίες από κάθε mini-slot σε ένα μετρητή και βάζοντας όριο όσα και τα διαθέσιμα κανάλια (αριθμό που θα έχουμε από την φάση της αναφοράς), μπορούμε με ακρίβεια να σταματήσουμε την επίλυση της σύγκρουσης στο επιθυμητό σημείο. Στο επόμενο mini-slot της φάσης διαπραγμάτευσης, στέλνεται σε όλους τους δευτερεύοντες χρήστες του συστήματος ένα σήμα beacon για να τους ενημερώσει σχετικά με τον τερματισμό της φάσης διαπραγμάτευσης και την έναρξη της φάσης μετάδοσης πακέτων πληροφορίας στα κανάλια επικοινωνίας. Σε αντίθεση με το στατικό μοντέλο αλλά και με το δυναμικό FS, εδώ οι χρήστες που κατάφεραν να βγουν με επιτυχία από την επίλυση της σύγκρουσης είναι ακριβώς τόσοι όσα και τα διαθέσιμα κανάλια.

Ακολουθούν τρεις σειρές πειραμάτων όπου στην κάθε μια ελέγχεται η επίδραση μιας μεταβλητής στο συνολικό throughput. Τα δύο μοντέλα που συγκρίνονται είναι το δυναμικό CS (Channel Success) χωρίς όριο και το δυναμικό CS (Channel Success) με χρονικό άνω όριο το $20\% \cdot$ της διάρκειας του slot για σήματα ελέγχου.

* Επιλέχτηκε το 20% αντί του 10% γιατί έδινε καλύτερα αποτελέσματα.

1. Επίδραση της διάρκειας του slot T_s (slot duration) (μονάδα μέτρησης ms)

inputs	value
Number of channels	20
Number of SUs	100
p (SU probability to sent)	0.3

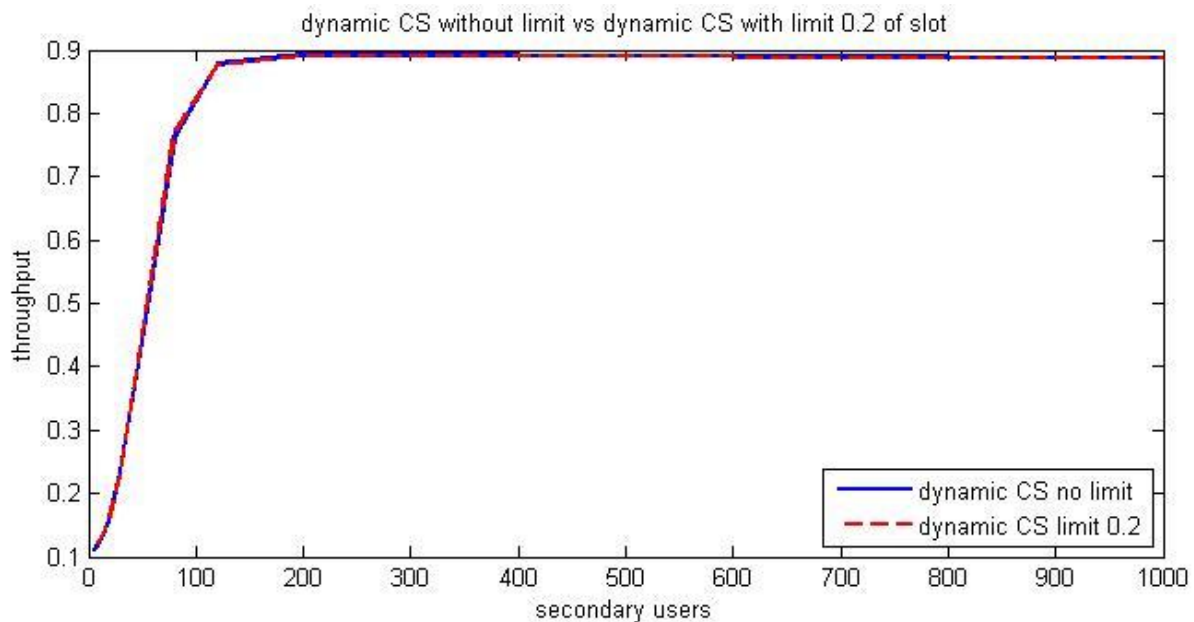


Σχήμα 17: Δυναμικό μοντέλο CS με χρονικό άνω όριο και χωρίς (παράδειγμα 1)

Από το γράφημα στο Σχήμα 17 συμπεραίνουμε ότι για slot duration μικρότερο από 4 ms το δυναμικό μοντέλο CS χωρίς χρονικό άνω όριο είναι κατά πολύ καλύτερο από αυτό με χρονικό άνω όριο το 20% του slot. Αυτό είναι απόλυτα λογικό, γιατί για τόσο μικρό slot duration η σύγκρουση δεν προλάβει να επιλυθεί ούτε κατά ένα μικρό ποσοστό της μέσα στο όριο του 20% του slot. Έτσι δεν προέκυπταν αρκετοί χρήστες να μεταδώσουν. Αντίθετα, με ελεύθερο χρονικό άνω όριο η σύγκρουση προλαβαίνει να επιλυθεί ως το σημείο που θέλουμε (χρήστες = κανάλια). Αλλά όσο μικρότερο είναι το slot duration τόσο πιο μεγάλο ποσοστό του slot απαιτεί η διαδικασία της επίλυσης, και τόσο λιγότερο ποσοστό του slot αξιοποιείται για την μετάδοση πληροφορίας. Τα δύο σχήματα είναι ισοδύναμα για slot duration μεγαλύτερο ή ίσο των 4ms.

2. Επίδραση του αριθμού των SUs

inputs	value
Number of channels	20
Slot duration	6 ms
p (SU probability to sent)	0.3

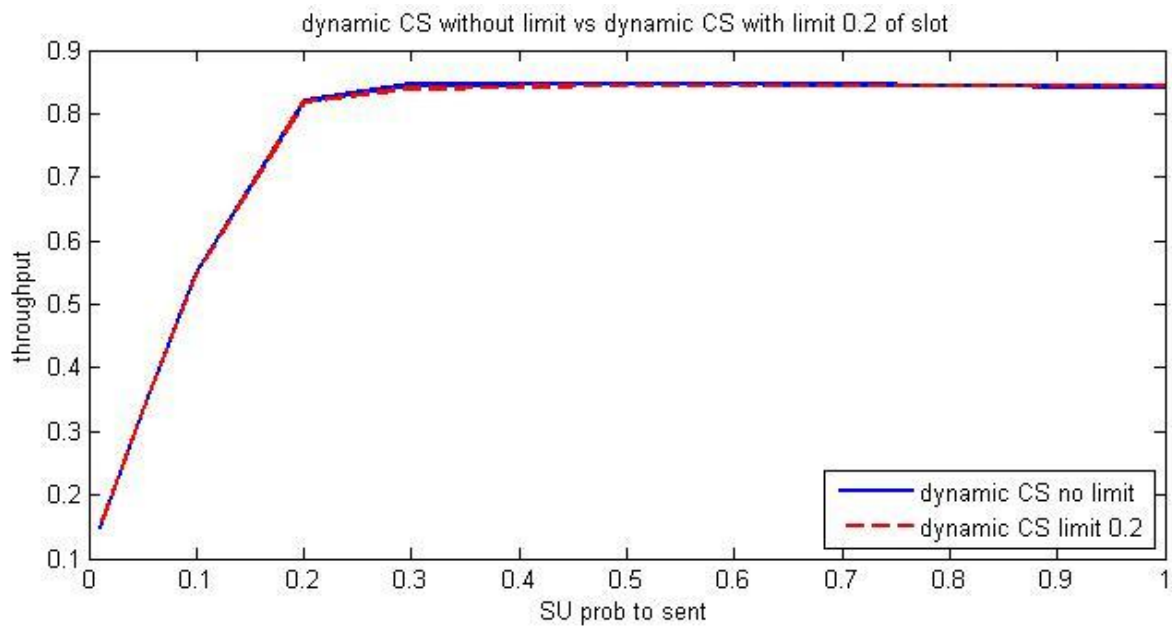


Σχήμα 18: Δυναμικό μοντέλο CS με χρονικό άνω όριο και χωρίς (παράδειγμα 2)

Από το γράφημα στο Σχήμα 18 συμπεραίνουμε ότι τα δύο σχήματα είναι ισοδύναμα για οποιονδήποτε αριθμό χρηστών στο σύστημα. Αυτό συμβαίνει γιατί η επίλυση της σύγκρουσης μέχρι τον επιθυμητό αριθμό χρηστών επιτυγχάνεται πάντα στο 20% της διάρκειας του slot. Το throughput για περισσότερους από 200 χρήστες είναι εδώ 89%, κάτι που σημαίνει ότι η μετάδοση πληροφορίας των δευτερευόντων χρηστών λαμβάνει χώρα περίπου στο 88% της διάρκειας του slot. Άρα, η φάση αναφοράς μαζί με την φάση της διαπραγμάτευσης δαπανούν περίπου το 12% της διάρκειας του slot.

3. Επίδραση της πιθανότητας p σύμφωνα με την οποία ένας SU μπαίνει στην διεκδίκηση καναλιού

inputs	value
Number of channels	20
Slot duration	6 ms
Number of SUs	100



Σχήμα 19: Δυναμικό μοντέλο CS με χρονικό άνω όριο και χωρίς (παράδειγμα 3)

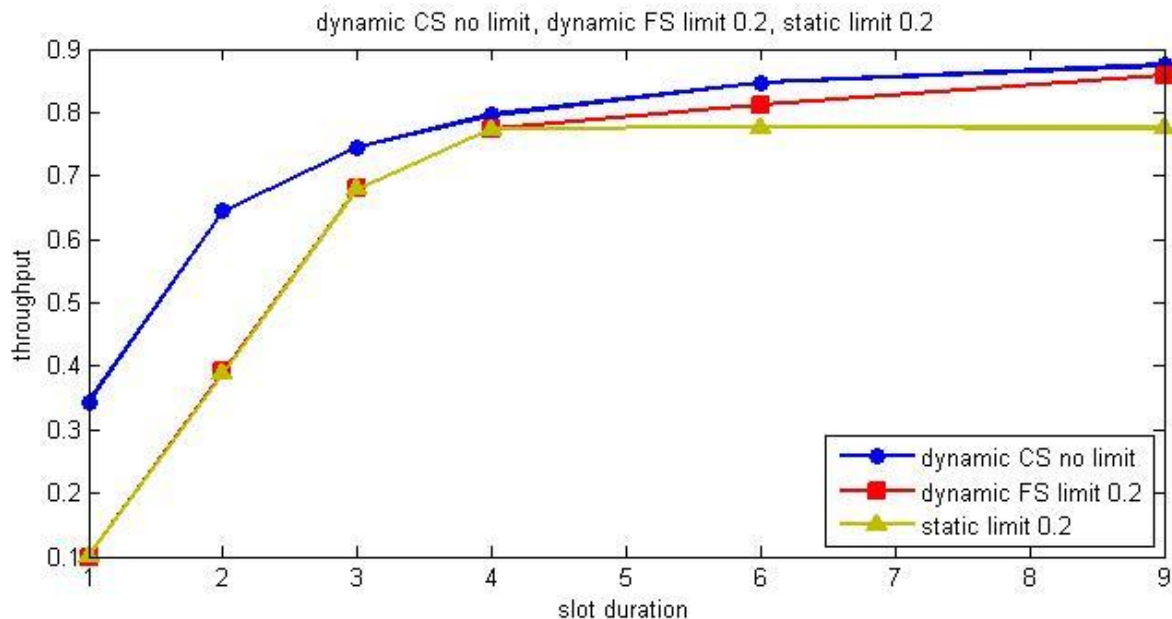
Από το γράφημα στο Σχήμα 19 συμπεραίνουμε ότι τα δύο σχήματα είναι και πάλι ισοδύναμα για όλες τις τιμές της μεταβλητής p . Όπως και πριν, αυτό συμβαίνει γιατί η επίλυση της σύγκρουσης ως τον επιθυμητό αριθμό χρηστών γίνεται πάντα μέσα στο 20% της διάρκειας του slot.

4.4 Σύγκριση

Τα σχήματα που έχουμε δει έως τώρα είναι τα 2 στατικά με χρονικά άνω όρια 10% και 20% της διάρκειας του slot, τα δύο δυναμικά σχήματα full success με χρονικό άνω όριο το 20% και χωρίς χρονικό άνω όριο, και τα δύο δυναμικά channel success με χρονικό άνω όριο (20%) και χωρίς. Παρακάτω συγκρίνουμε το στατικό 20%, με το δυναμικό FS 20%, και με το δυναμικό CS χωρίς όριο. Επιλέξαμε αυτά τα τρία γιατί ήταν το καθένα καλύτερο στην δικιά του σειρά πειραμάτων.

1. Επίδραση της διάρκειας του slot T_s (slot duration) (μονάδα μέτρησης ms)

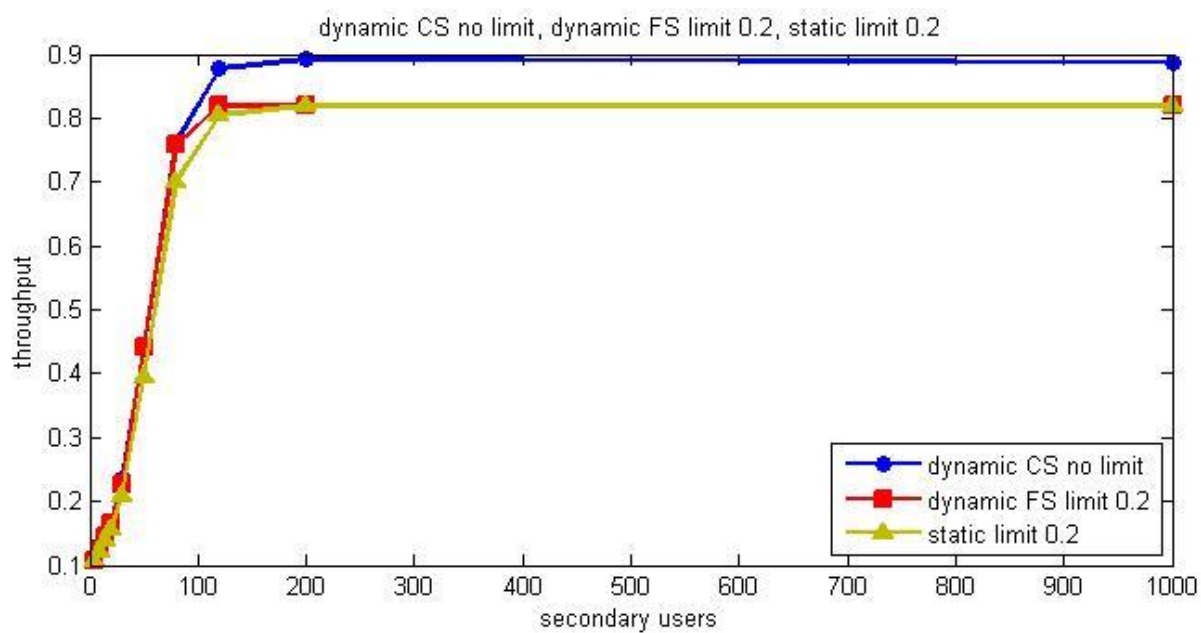
inputs	value
Number of channels	20
Number of SUs	100
p (SU probability to sent)	0.3



Σχήμα 20: Σύγκριση στατικό, δυναμικό FS και δυναμικό CS (παράδειγμα 1)

2. Επίδραση του αριθμού των SUs

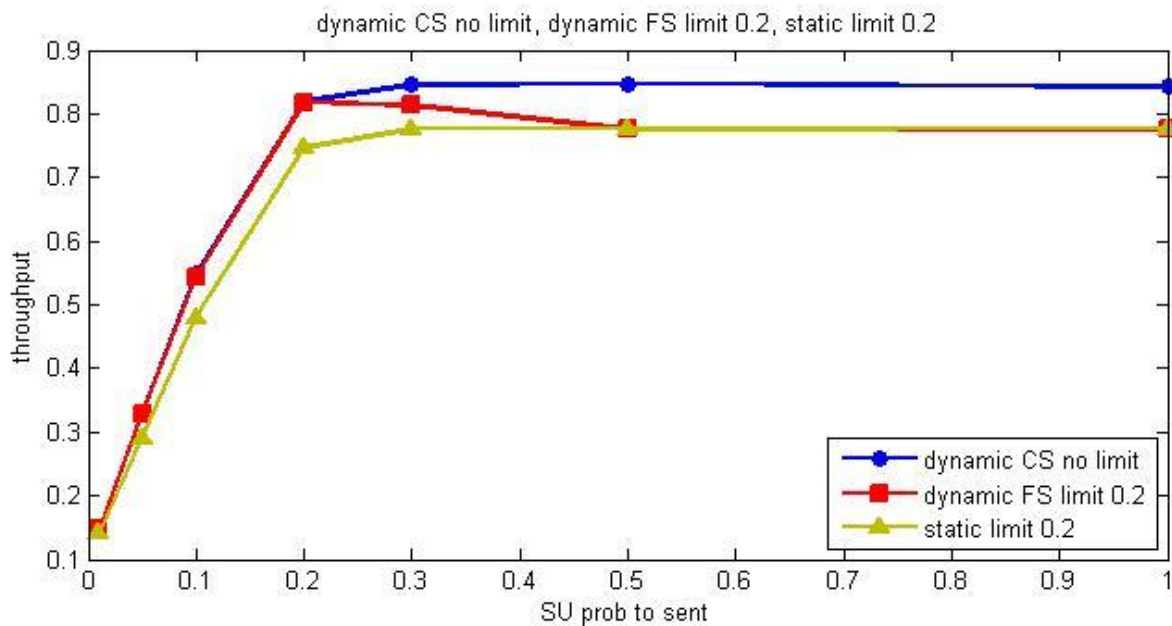
inputs	value
Number of channels	20
Slot duration	6 ms
p (SU probability to sent)	0.3



Σχήμα 21: Σύγκριση στατικό, δυναμικό FS και δυναμικό CS (παράδειγμα 2)

3. Επίδραση της πιθανότητας p σύμφωνα με την οποία ένας SU μπαίνει στην διεκδίκηση καναλιού

inputs	value
Number of channels	20
Slot duration	6 ms
Number of SUs	100



Σχήμα 22: Σύγκριση στατικό, δυναμικό FS και δυναμικό CS (παράδειγμα 3)

Αυτό που συμπεραίνουμε από τις τρεις παραπάνω συγκρίσεις είναι ότι το δυναμικό μοντέλο channel success είναι σε κάθε περίπτωση καλύτερο από τα άλλα δύο, και μόνο σε μερικές περιπτώσεις τα άλλα σχήματα το ισοφαρίζουν σε throughput, αλλά ποτέ δεν το ξεπερνούν. Το στατικό μοντέλο είναι το λιγότερο αποδοτικό από τα τρία όπως αναμενόταν.

4.5 Μηχανισμός Αποκεντροποίησης

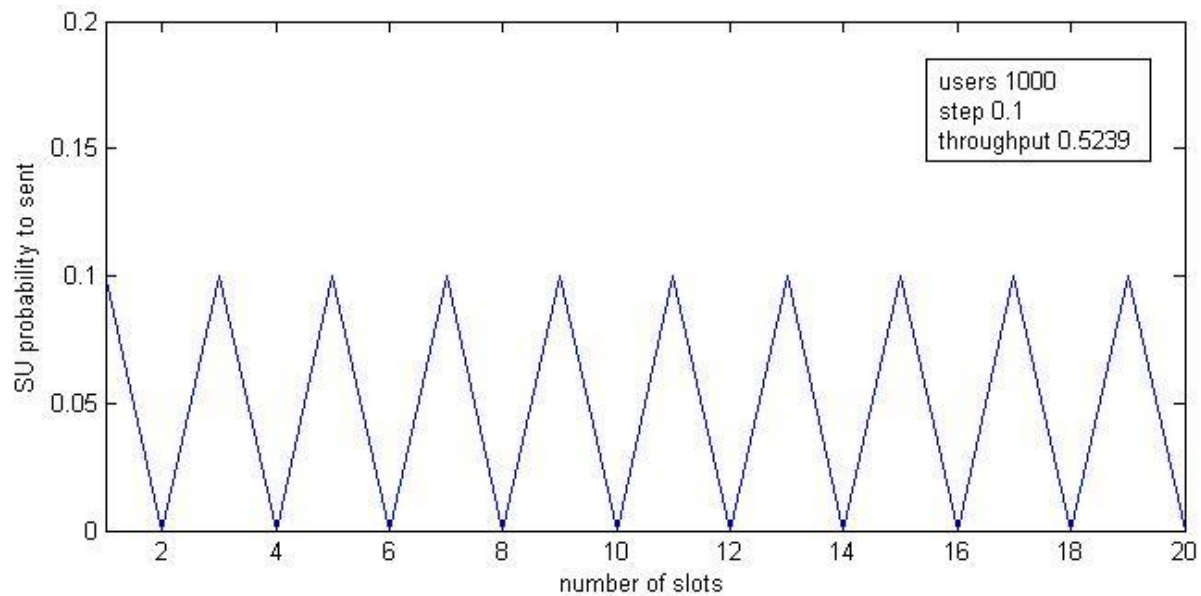
Ως τώρα το σύστημα λειτουργούσε έχοντας έναν κεντρικό έλεγχο που καθόριζε στην αρχή της προσομοίωσης τις τιμές των μεταβλητών, μέσα σε αυτές και την πιθανότητα p με την οποία οι SUs μπαίνουν στην διεκδίκηση κάποιου καναλιού προς μετάδοση. Σε αυτήν την θεματική ενότητα εισάγουμε έναν μηχανισμό που επιτρέπει στους δευτερεύοντες χρήστες (SUs) να αλλάζουν στον χρόνο την πιθανότητα p , με την οποία μπαίνουν στην διεκδίκηση καναλιού για μετάδοση. Η σκέψη ήταν ότι σε πραγματικές συνθήκες και ξεκινώντας το σύστημα θα έπαιρνε μερικές αρχικές τιμές στις μεταβλητές, αλλά αν δεν λειτουργούσε αποδοτικά, έπρεπε να υπάρχει από κάπου κεντρικός έλεγχος και να αλλάζει τις τιμές των μεταβλητών όπως είναι το p . Θα ήταν όμως προτιμότερο αντί για κεντρικό έλεγχο, οι ίδιοι οι SUs να μπορούσαν να αλλάζουν αυτήν την τιμή προς όφελος της λειτουργίας του συστήματος.

Οι SUs όταν βρίσκονται στο σύστημα έχουν γνώση μέσω του control channel για τον αριθμό των καναλιών καθώς και τον αριθμό των διαθέσιμων εξ' αυτών σε κάθε slot (το γνωρίζουν μέσω του sensing στην φάση αναφοράς), όπως επίσης και για το πόσοι χρήστες συγκρούστηκαν αλλά και πόσοι προέκυψαν τελικά από τη σύγκρουση για να μεταδώσουν (το γνωρίζουν μέσω της φάσης αναφοράς και της διαδικασίας επίλυσης της σύγκρουσης). Αυτό που δεν γνωρίζουν είναι ο συνολικός αριθμός SUs στο σύστημα.

Ο μηχανισμός που προσθέσαμε ελέγχει σε κάθε slot τον αριθμό των χρηστών που συγκρούστηκαν, έστω K , και τον συγκρίνει με τον αριθμό των καναλιών n . Αναλόγως την διαφορά των δύο αριθμών μειώνει, αυξάνει ή κρατάει σταθερή την πιθανότητα p . Οι δύο παράμετροι που έπρεπε να καθοριστούν μετά από εξέταση ήταν με τι βήμα (έστω λ) θα άλλαζε ο αλγόριθμος την πιθανότητα p σε κάθε slot και ποιές θα ήταν οι συνθήκες (τα όρια της διαφοράς $K-n$) για να γίνει η ενέργεια μεταβολής της ίδιας πιθανότητας.

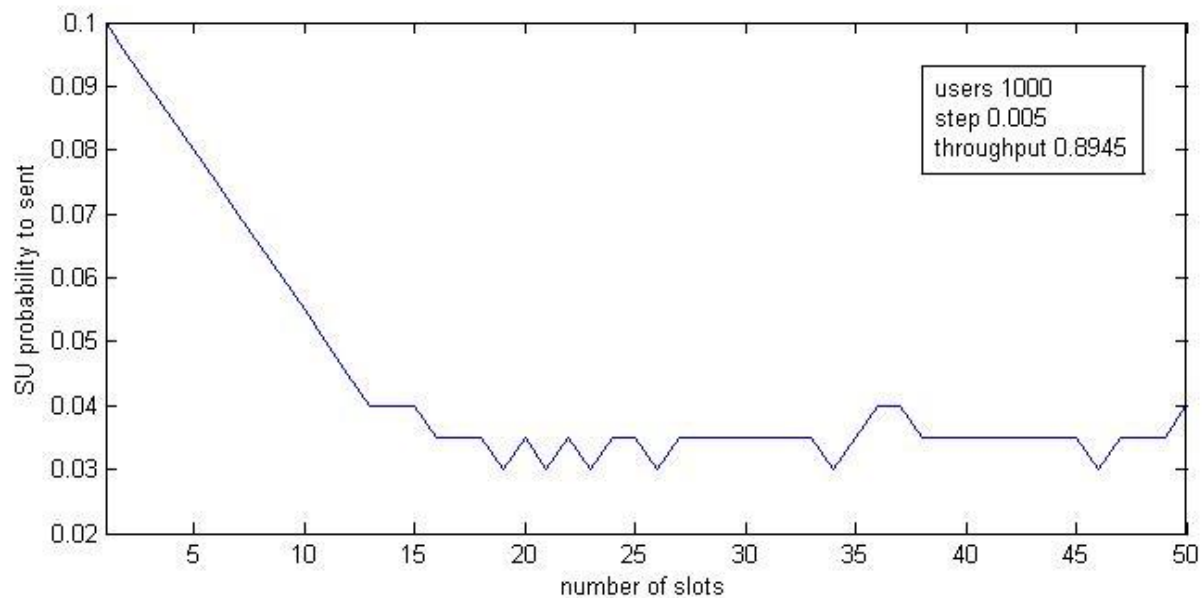
Εδώ να σημειώσουμε ότι η αρχική τιμή της πιθανότητας p σύμφωνα με την οποία ένας χρήστης διεκδικεί κανάλι (μπαίνει στην σύγκρουση) δεν αλλάζει την τελική τιμή στην οποία θα συγκλίνει αυτή στο τέλος. Για πρακτικούς λόγους εμείς την ξεκινάμε στο $p=0,1$.

Η πρώτη παράμετρος, δηλαδή το βήμα που θα άλλαζε σε κάθε slot τη μεταβλητή p , δοκιμάστηκε στην αρχή να είναι σχετικά μεγάλο για μια πιο επιθετική προσέγγιση η οποία όμως όπως βλέπουμε στο Σχήμα 23 δεν ήταν επιτυχημένη. Αυτό γιατί για μεγάλο αριθμό χρηστών, πχ 1000, ένα μεγάλο βήμα όπως το 0.1 επηρεάζει 100 από αυτούς και στο ένα slot έχουμε πολύ παραπάνω χρήστες από τα κανάλια (80 περισσότερους), και στο επόμενο με την μείωση κατά 0.1 δεν έχουμε κανέναν.



Σχήμα 23: Μεταβολή της πιθανότητας p στον χρόνο για μεγάλο βήμα (πολλοί χρήστες)

Στη συνέχεια δοκιμάστηκε μικρότερο βήμα το οποίο οδήγησε σε καλύτερα αποτελέσματα, και τελικά μετά από αρκετά πειράματα φτάσαμε να επιλέξουμε πολύ μικρό βήμα ίσο με 0,005 (Σχήμα 24). Βλέπουμε μεταξύ των 2 περιπτώσεων μια μεγάλη διαφορά στο επιτυγχανόμενο throughput ίση με 37%. Μια έξυπνη ιδέα θα ήταν οι SUs να αλλάζουν το βήμα ανάλογα με το πόσοι χρήστες υπάρχουν στο σύστημα κάθε χρονική στιγμή, αλλά αυτή δεν είναι υλοποιήσιμη γιατί δεν μπορούν οι ίδιοι οι χρήστες να έχουν αυτήν την πληροφορία.



Σχήμα 24: Μεταβολή της πιθανότητας p στον χρόνο για μικρό βήμα (πολλοί χρήστες)

Όσον αφορά την δεύτερη παράμετρο, δηλαδή με ποιες συνθήκες θα αλλάζει τιμή η πιθανότητα p στην αρχή σκεφτήκαμε ότι θα ήταν σωστό να υπάρχουν κατά μέσο όρο τόσοι συγκρουόμενοι χρήστες όσα και τα διαθέσιμα κανάλια. Έτσι δοκιμάσαμε:

- Αν $K - n = 0 \rightarrow$ κράτησε το p σταθερό
- Αν $K - n > 0 \rightarrow$ μείωσε το p κατά λ
- Αν $K - n < 0 \rightarrow$ αύξησε το p κατά λ

Τα αποτελέσματα όμως δεν ήταν τα αναμενόμενα. Αξίζει να αναφέρουμε ότι υπήρχε μια μείωση στο throughput μεγαλύτερη του 10%, σε σχέση με τα αντίστοιχα παραδείγματα χωρίς τον μηχανισμό αυτόν. Έτσι δοκιμάσαμε νέα όρια με μεγαλύτερη ελαστικότητα:

- Αν $K - n = 0$ έως 5 \rightarrow κράτησε το p σταθερό
- Αν $K - n > 5 \rightarrow$ μείωσε το p κατά λ
- Αν $K - n < 0 \rightarrow$ αύξησε το p κατά λ

Εδώ υπήρξε μια αισθητή βελτίωση του throughput, οπότε καταλάβαμε ότι είμαστε σε καλό δρόμο και μετά από επιπλέον δοκιμές τελικά καταλήξαμε στα παρακάτω όρια:

Αν $K - n = 10$ έως $20 \rightarrow$ κράτησε το p σταθερό

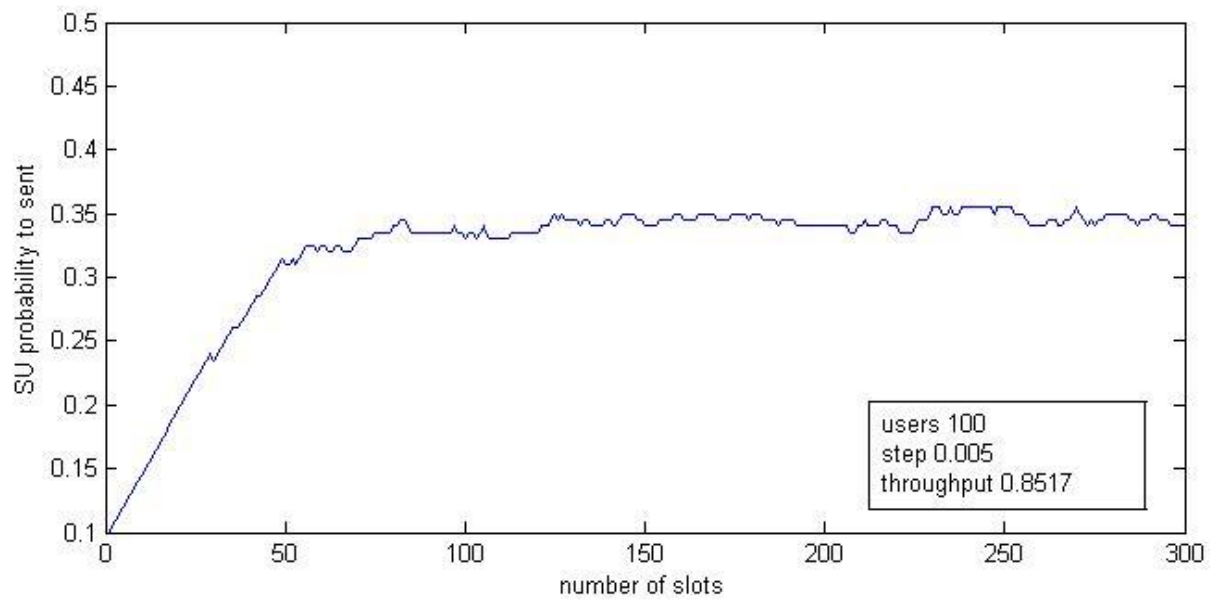
Αν $K - n > 20 \rightarrow$ μείωσε το p κατά λ

Αν $K - n < 10 \rightarrow$ αύξησε το p κατά λ

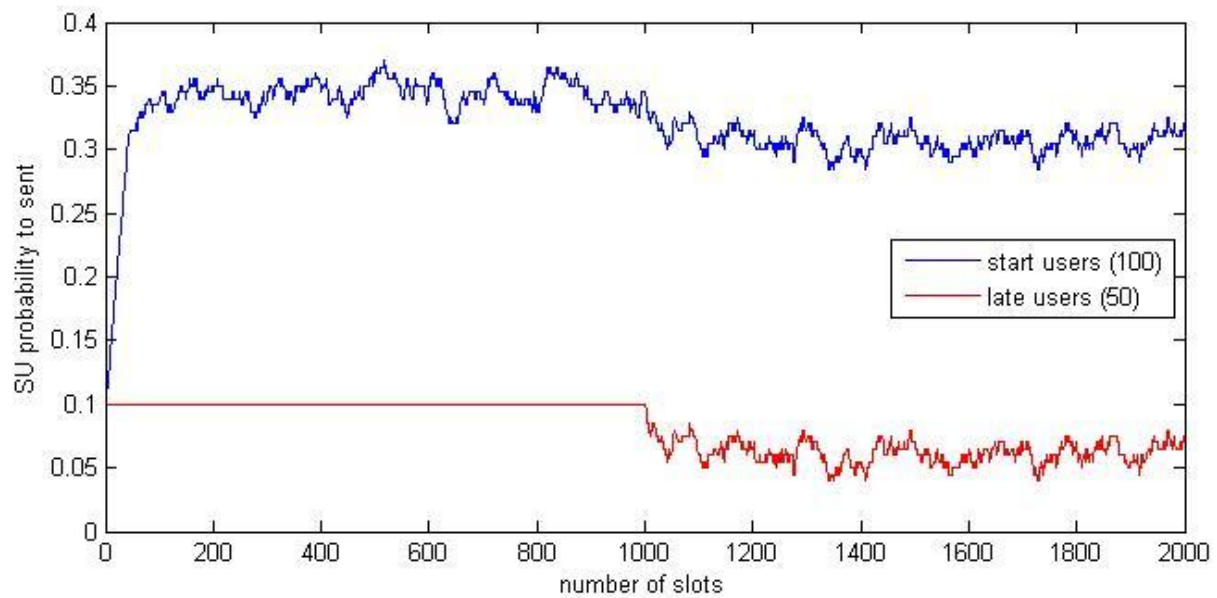
Εδώ το επιτυγχανόμενο throughput ήταν το ίδιο όπως και στις περιπτώσεις πριν εισαχθεί ο μηχανισμός αποκεντροποίησης. Ο λόγος που τα όρια αυτά οδηγούν σε καλύτερα αποτελέσματα, είναι ότι σχεδόν πάντα έχουμε παραπάνω χρήστες απ' ό,τι τα κανάλια κι έτσι δεν αφήνουμε ποτέ κανάλι ανεκμετάλλευτο. Δεν έχουμε πολλούς χρήστες να περισσεύουν αλλά ακριβώς όσους χρειάζονται. Να αναφέρουμε εδώ ότι για ακόμη μεγαλύτερα όρια το επιτυγχανόμενο throughput δεν αυξάνεται περαιτέρω αλλά μειώνεται.

Όλα αυτά όμως δοκιμάστηκαν στο καλύτερο, μετά από πολλά πειράματα, μοντέλο που είχαμε (δυναμικό Channel Success). Αν το μοντέλο ήταν διαφορετικό πχ, το δυναμικό Full Success, τότε είναι πιθανό ότι τα όρια που θα απαιτούνταν να ήταν διαφορετικά. Αυτό γιατί το FS επιλύει πλήρως τη σύγκρουση και μετά ξεκινάει η μετάδοση, άρα μια επίλυση σύγκρουσης 20 τάξεις μεγαλύτερης πολλαπλότητας (από το ιδανικό που κάνει το CS) θα καθυστερούσε αρκετά.

Ακολουθούν δύο γραφικές παραστάσεις που δείχνουν πως μεταβάλλεται η πιθανότητα p με τον χρόνο μετά την εισαγωγή του παραπάνω μηχανισμού στο σύστημα. Στο πρώτο παράδειγμα, (Σχήμα 25) βλέπουμε πως η πιθανότητα p συγκλίνει στο 0,34. Στο δεύτερο παράδειγμα (Σχήμα 26) μετά από 1000 slots μπαίνουν στο σύστημα επιπλέον 50 SUs. Παρατηρούμε την μείωση της πιθανότητας p και σε αυτούς αλλά και στους ήδη υπάρχοντες στο σύστημα χρήστες, και τελικά πως αυτή συγκλίνει για τους νέους χρήστες στο 0,06 και για τους ήδη υπάρχοντες χρήστες στο 0,31. Αυτό συμβαίνει γιατί κάθε νέος στο σύστημα χρήστης έχει αρχική τιμή της πιθανότητας p στο 0,1 και δεν γνωρίζει την πιθανότητα που έχουν οι ήδη υπάρχοντες στο σύστημα χρήστες.



Σχήμα 25: Μεταβολή της πιθανότητας p στον χρόνο



Σχήμα 26: Μεταβολή της πιθανότητας p στον χρόνο με προσθήκη νέων χρηστών

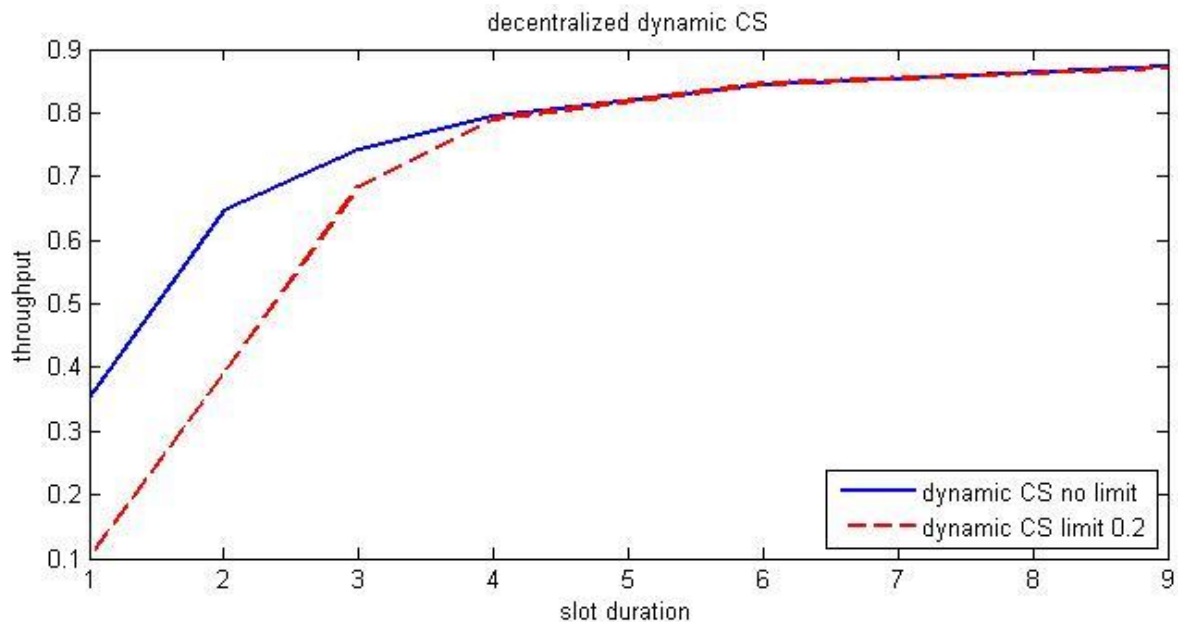
4.5.1 Τελικά αποτελέσματα

Εφόσον η εισαγωγή του μηχανισμού αποκεντροποίησης στο σύστημα ολοκληρώθηκε συγκρίνουμε ξανά τα σχήματα δυναμικό channel success με άνω χρονικό όριο 20% της διάρκειας του slot και δυναμικό channel success χωρίς άνω χρονικό όριο που ήταν τα δύο καλύτερα με βάση τα έως τώρα αποτελέσματα που είχαμε. Στην συνέχεια συγκρίνουμε το καλύτερο σχήμα πριν την εισαγωγή του μηχανισμού αποκεντροποίησης και το καλύτερο σχήμα μετά την εισαγωγή του μηχανισμού.

- Σύγκριση μεταξύ decentralized dynamic CS με όριο (20%) και χωρίς όριο.

1. Επίδραση της διάρκειας του slot T_s (slot duration) (μονάδα μέτρησης ms)

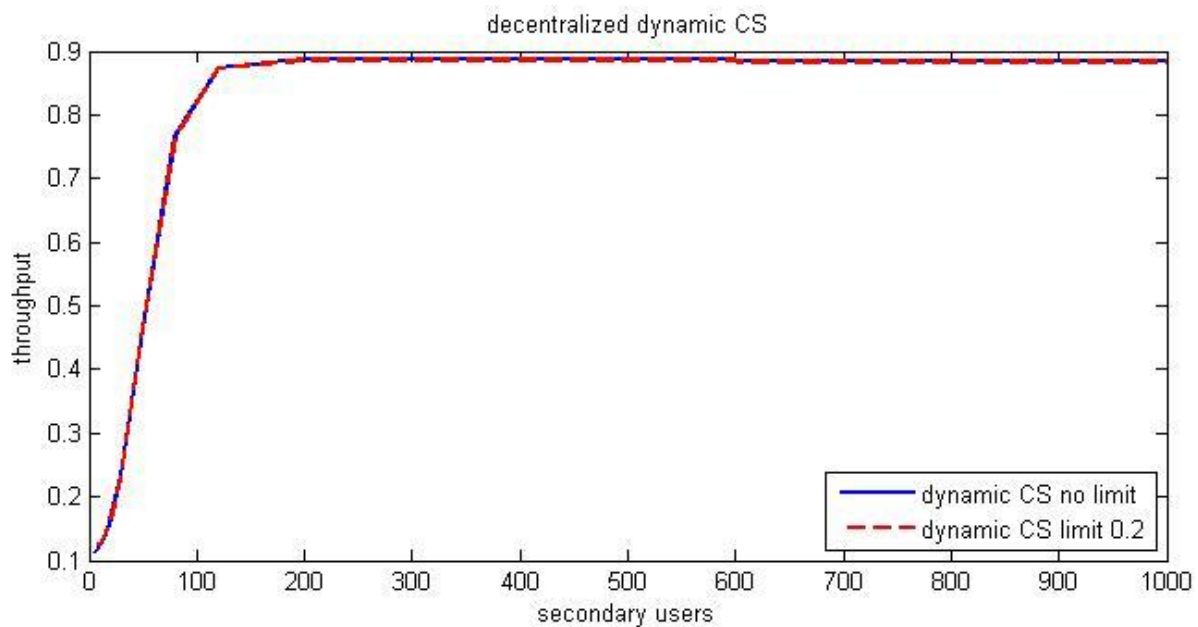
inputs	value
Number of channels	20
Number of SUs	100



Σχήμα 27: decentralized δυναμικά μοντέλα CS με όριο και χωρίς (παράδειγμα 1)

2. Επίδραση του αριθμού των SUs

inputs	value
Number of channels	20
Slot duration	6 ms



Σχήμα 28: *decentralized* δυναμικά μοντέλα CS με όριο και χωρίς (παράδειγμα 2)

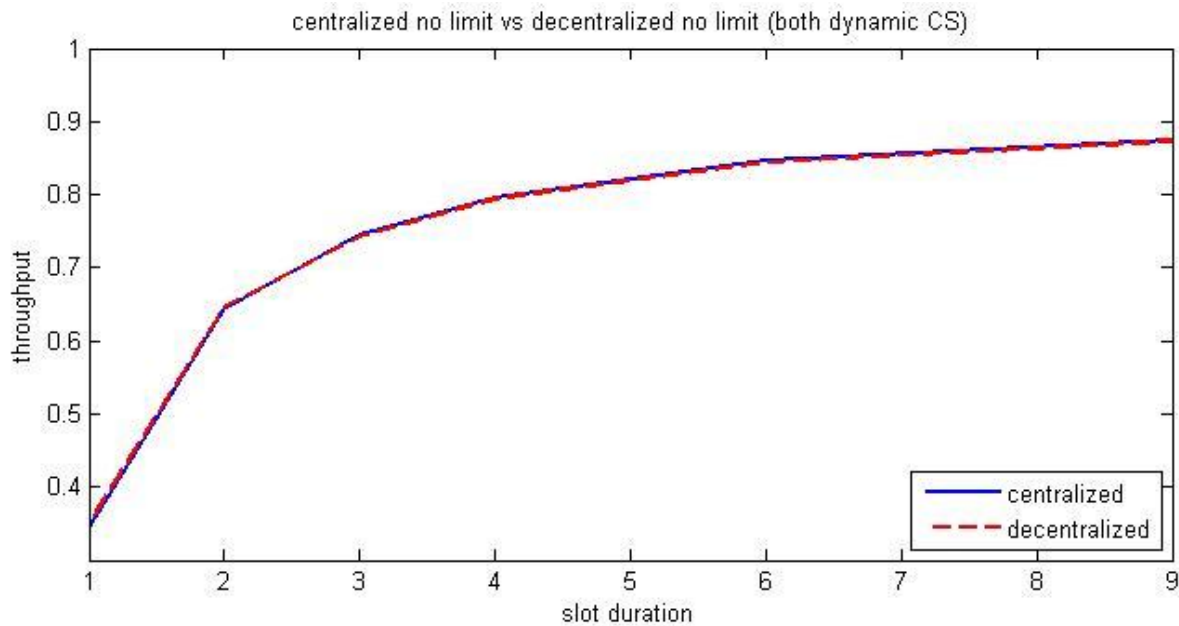
Παρατηρούμε ότι και μετά την αποκεντροποίηση του συστήματος το καλύτερο σχήμα είναι το δυναμικό CS (channel success) χωρίς άνω χρονικό όριο αφού είναι για κάθε πιθανή τιμή των δύο παραδειγμάτων καλύτερο ή εφάμιλλο με το αντίστοιχο σχήμα με το άνω χρονικό όριο του 20%. Τρίτη επίδραση δεν εξετάζεται εδώ γιατί η πιθανότητα p δεν ελέγχεται πλέον από έναν κεντρικό χρήστη αλλά την αλλάζουν οι ίδιοι οι χρήστες στην διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος.

- Σύγκριση δυναμικών μοντέλων CS χωρίς άνω χρονικό όριο πριν και μετά την εισαγωγή του μηχανισμού αποκεντροποίησης.

1. Επίδραση της διάρκειας του slot T_s (slot duration) (μονάδα μέτρησης ms)

inputs	value
Number of channels	20
Number of SUs	100
p (SU probability to sent)*	0.3

*μόνο για το μοντέλο με κεντρικό έλεγχο



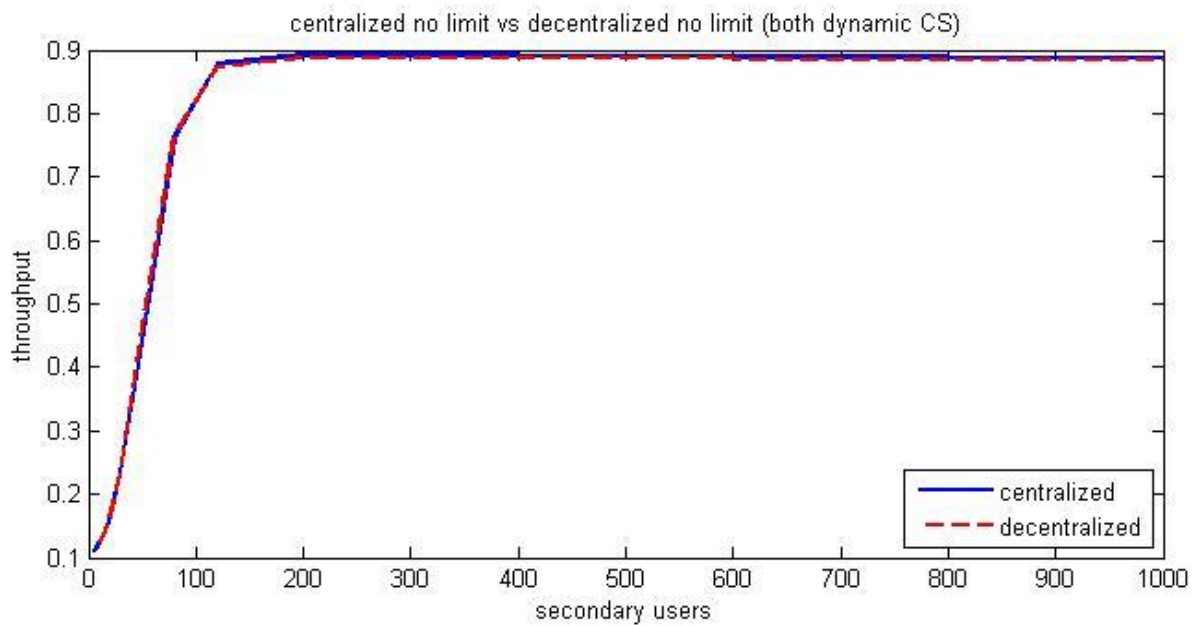
Σχήμα 29: centralized vs decentralized (παράδειγμα 1)

Παρατηρούμε από την γραφική παράσταση στο Σχήμα 29 ότι τα δύο σχήματα επιτυγχάνουν τα ίδια αποτελέσματα για κάθε εξεταζόμενη τιμή της διάρκειας του slot.

2. Επίδραση του αριθμού των SUs

inputs	value
Number of channels	20
Slot duration	6 ms
p (SU probability to sent)*	0.3

*μόνο για το μοντέλο με κεντρικό έλεγχο



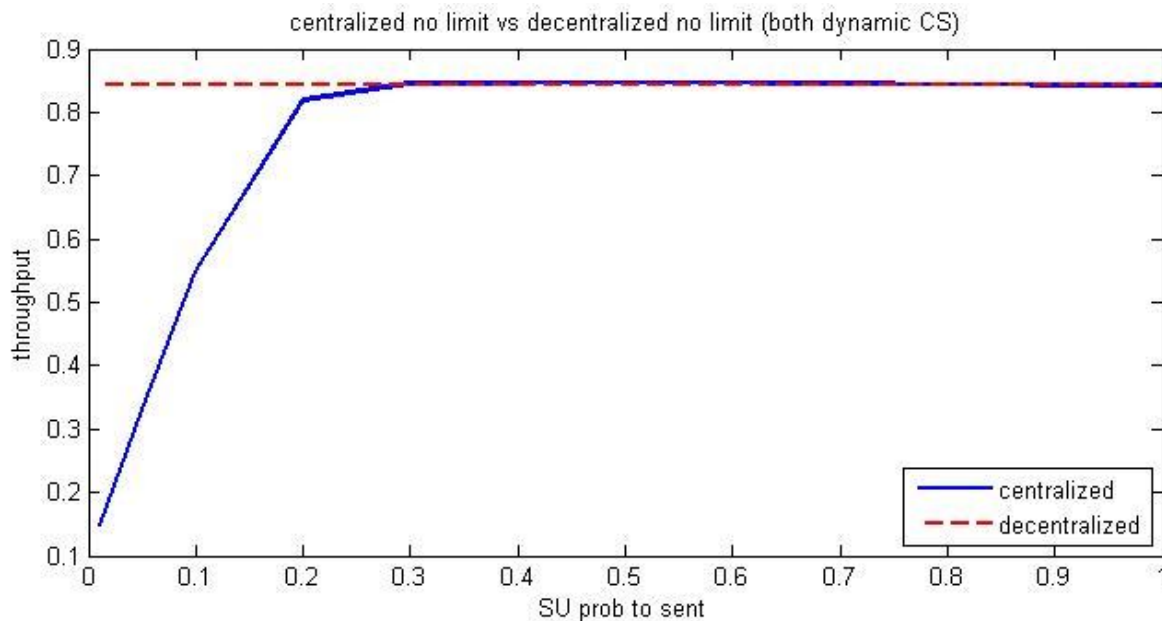
Σχήμα 30: *centralized vs decentralized (παράδειγμα 2)*

Παρατηρούμε από την γραφική παράσταση στο Σχήμα 30 ότι τα δύο σχήματα επιτυγχάνουν τα ίδια αποτελέσματα για κάθε εξεταζόμενο αριθμό χρηστών στο σύστημα.

3. Επίδραση της πιθανότητας p ένας SU να μπει στην διαδικασία διεκδίκησης καναλιού**

inputs	value
Number of channels	20
Slot duration	6 ms
Number of SUs	100

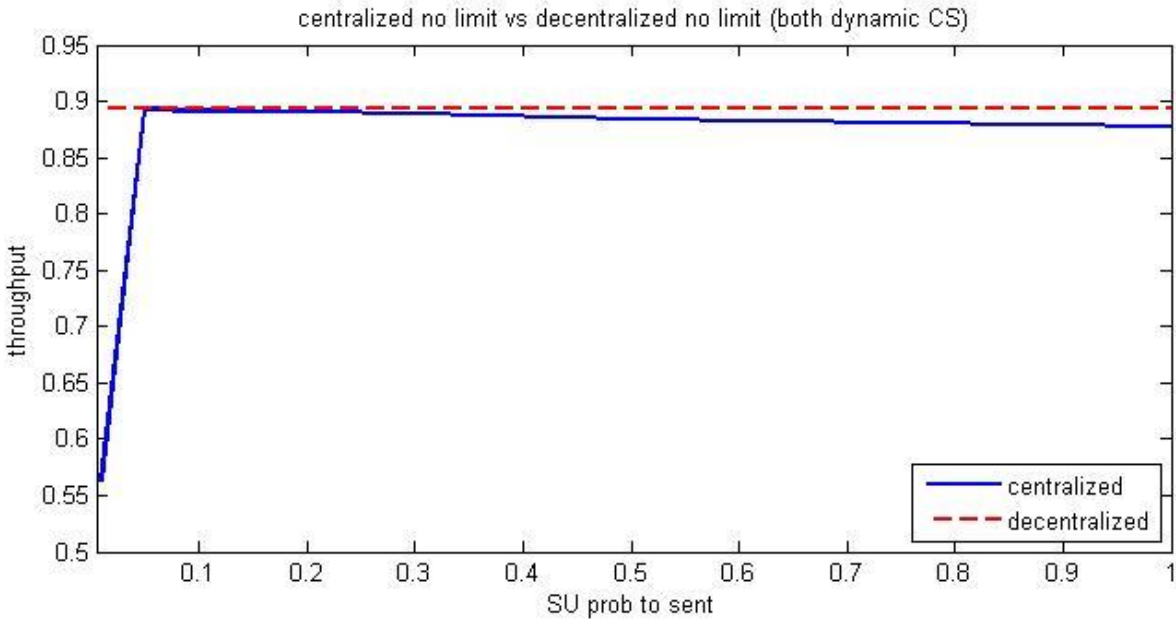
** Εδώ η μεταβλητή p ελέγχεται μόνο για το μοντέλο με κεντρικό έλεγχο. Στο decentralized μοντέλο η μεταβλητή p αλλάζει τιμή από τους χρήστες δυναμικά μέσα σε κάθε παράδειγμα.



Σχήμα 31: centralized vs decentralized (παράδειγμα 3)

Παρατηρούμε από τη γραφική παράσταση στο Σχήμα 31 ότι το centralized σύστημα ξεκινάει από χαμηλό throughput για μικρές τιμές της πιθανότητας p και όσο αυτή μεγαλώνει τόσο μεγαλύτερο throughput επιτυγχάνεται. Το decentralized σχήμα επιτυγχάνει σταθερό throughput γιατί όποια αρχική τιμή και να δώσουμε στην πιθανότητα p , οι χρήστες θα την αλλάξουν στην διάρκεια λειτουργίας του συστήματος ώστε να επιτύχουν το καλύτερο δυνατό throughput. Ακολουθεί το ίδιο παράδειγμα για 1000 χρήστες.

inputs	value
Number of channels	20
Slot duration	6 ms
Number of SUs	1000



Σχήμα 32: centralized vs decentralized (παράδειγμα 4)

Στο Σχήμα 32 έχουμε το ίδιο παράδειγμα με το Σχήμα 31 με τη διαφορά ότι πλέον υπάρχουν 1000 χρήστες, αντί για 100, στο σύστημα. Παρατηρούμε όμως μια αλλαγή στα αποτελέσματα καθώς το throughput, στο centralized σχήμα, για πιθανότητα p μεγαλύτερη από 0.3 αρχίζει και μειώνεται. Για πιθανότητα $p = 1$ το decentralized σχήμα είναι πιο αποδοτικό κατά 1,5%. Αυτή η μείωση στο throughput οφείλεται στο γεγονός ότι οι πολλοί χρήστες σε συνδυασμό με μια μεγάλη πιθανότητα p οδηγεί στο να έχουμε τελικά σύγκρουση μεγάλης πολλαπλότητας. Η πολλαπλότητα αυτή είναι τόσο μεγάλη που ακόμα και το CS δυναμικό σχήμα υπόκειται απώλεια στην απόδοση του. Αντίθετα στο decentralized σχήμα που οι ίδιοι οι Secondary Users ελέγχουν την πιθανότητα p , η πολλαπλότητα της σύγκρουσης είναι πολύ μικρότερη. Άρα η σύγκρουση επιλύεται, στον βαθμό που απαιτείται για να έχουμε όλα τα κανάλια σε χρήση, πολύ πιο γρήγορα απ' ό,τι στο centralized σχήμα κερδίζοντας έτσι περισσότερο χρόνο για μετάδοση. Επίσης το decentralized σχήμα είναι πολύ καλύτερο για μικρό p λόγω και πάλι της δυνατότητας των χρηστών να το αυξήσουν ώστε να επιτύχουν να έχουν όλα τα κανάλια σε χρήση.

Άρα μετά την εισαγωγή της αποκεντροποίησης του συστήματος και με την πιθανότητα p να ελέγχεται από τους SUs αποφεύγουμε τέτοιου είδους μειονεκτήματα που είχαμε πριν σε κάποια ακραία παραδείγματα όπως στα αποτελέσματα στο Σχήμα 32. Γενικά το decentralized σχήμα όπως παρουσιάστηκε παραπάνω επιτυγχάνει τα ίδια ή και καλύτερα αποτελέσματα από το αντίστοιχο centralized σχήμα, με το πλεονέκτημα όμως ότι λειτουργεί χωρίς κεντρικό έλεγχο.

Κεφάλαιο 5

Επίλογος

Σε αυτό το κεφάλαιο κάνουμε ανακεφαλαίωση της διπλωματικής εργασίας και αναλύουμε την συνεισφορά της. Τέλος προτείνονται ιδέες για μελλοντικές επεκτάσεις της εργασίας.

5.1 Ανακεφαλαίωση και συνεισφορά

Στο πρώτο μέρος της διπλωματικής εργασίας (κεφάλαιο 2) κάναμε μια σύντομη εισαγωγή στα ευφυή ασύρματα δίκτυα. Είδαμε τις βασικές λειτουργίες τους, τα κύρια μοντέλα καθώς και μερικά πρωτόκολλα MAC για ευφυή ασύρματα δίκτυα που έχουν παρουσιαστεί στην βιβλιογραφία. Μέσα από αυτά τα πρωτόκολλα πήραμε ιδέες για να φτιάξουμε το δικό μας μοντέλο συστήματος στο κεφάλαιο 3 και να προσθέσουμε τελικά έναν αποδοτικό και καταναεμημένο μηχανισμό επίλυσης σύγκρουσης στην αρχή του κεφαλαίου 4 (4.1 ο μηχανισμός της στοίβας). Στη συνέχεια του κεφαλαίου 4 περιγράφεται η υλοποίηση και η προσομοίωση του μοντέλου του συστήματος μέσα από διαφορετικές προσεγγίσεις. Η πρώτη προσέγγιση περιελάμβανε ένα στατικό μοντέλο (στατικό ως προς την διάρκεια κατά την οποία οι δευτερεύοντες χρήστες ανταλλάσσουν μηνύματα ελέγχου πάνω στο κανάλι ελέγχου) και στην συνέχεια δοκιμάστηκαν δύο δυναμικά (αποκαλούμενα Full Success και Channel Success αντίστοιχα). Προσομοιώσαμε τα προτεινόμενα μοντέλα με διάφορους συνδυασμούς τιμών των παραμέτρων του συστήματος, τα συγκρίναμε και τα αξιολογήσαμε με βάση την απόδοσή τους (δηλαδή το επιτυγχανόμενο throughput). Στο τέλος του κεφαλαίου εισάγαμε έναν μηχανισμό αποκεντροποίησης του συστήματος και συγκρίναμε τα αποτελέσματα που μας έδωσε με τις προηγούμενες κεντροποιημένες προσεγγίσεις.

Όπως έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενα κεφάλαια, ο στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας ήταν η μοντελοποίηση και μελέτη ενός ευφυούς ασύρματου δικτύου που θα λειτουργεί χωρίς κεντρικό έλεγχο, χωρίς όμως να έχουμε κάποια μείωση στο συνολικό throughput του συστήματος σε σχέση με κεντροποιημένες λύσεις. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συστήματος που παραθέτουμε βλέπουμε καταρχήν ότι τα δυναμικά μοντέλα είναι πιο αποδοτικά από τα στατικά, και πιο συγκεκριμένα το δυναμικό μοντέλο channel success δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα σε throughput κάτω από οποιεσδήποτε υποθέσεις. Εισάγοντας τον μηχανισμό αποκεντροποίησης στο σύστημα τα αποτελέσματα γίνονται ακόμη καλύτερα και επιπλέον αποφεύγουμε μερικές περιπτώσεις μείωσης της απόδοσης (π.χ., στην περίπτωση πολύ μεγάλου αριθμού χρηστών στο σύστημα σε συνδυασμό με μεγάλη τιμή της πιθανότητας p).

5.2 Ιδέες για Μελλοντική Εργασία

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία επικεντρωθήκαμε στην υλοποίηση και προσομοίωση ενός ευφυούς ασύρματου δικτύου υποθέτοντας κάποιες ιδανικές συνθήκες. Θα παρουσίαζε μεγάλο ενδιαφέρον να προσομοιώνουμε το μοντέλο του συστήματος μας εισάγοντας μια σειρά από συνθήκες που θα το έκαναν πιο ρεαλιστικό, για παράδειγμα θόρυβο σε όλα τα κανάλια, την πιθανότητα εσφαλμένου sensing από έναν ή περισσότερους δευτερεύοντες χρήστες και ακολούθως τι συνέπειες θα είχε αυτό στην απόδοση του συστήματος αφού κάτι τέτοιο θα οδηγούσε σε συγκρούσεις μεταξύ Primary και Secondary Users. Η εισαγωγή των παραπάνω συνθηκών θα απαιτούσε αλλαγές στους προτεινόμενους αλγορίθμους και μηχανισμούς για να εξασφαλιστεί η σωστή και αποδοτική λειτουργία του δικτύου.

Βιβλιογραφία

1. *Definition Cognitive Radio*. [<http://searchnetworking.techtarget.com/definition/cognitive-radio>]
2. **Theodorou, Maria**. "*Design and Performance Evaluation of Sensing Algorithms and Cooperative Relay Selection Protocols for Multichannel Cognitive Radio Networks*", M.Sc. Thesis, ECE School, Technical Univ. of Crete, Chania, July 2015.
3. **Zhang, Hang Su and Xi**. "CREAM-MAC: An Efficient Cognitive Radio-Enabled Multi-Channel MAC Protocol for Wireless Networks", in World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, 2008, WoWMoM 2008, Newport Beach, CA, June 2008.
4. **Athanasios V. Adamis, Konstantinos N. Maliatsos and Philip Constantinou**. "A New MAC Protocol with Control Channel Auto-Discovery for Self-Deployed Cognitive Radio Networks", in European Wireless Conference, Paris, France, April 2007.
5. **Zhang, Hang Su and Xi**. "Opportunistic MAC Protocols for Cognitive Radio Based Wireless Networks", in 2007 Conference on Information Sciences and Systems, CISS '07, Baltimore, MD, March 2007.
6. **Agrawal, Yogesh R Kondareddy and Prathima**. "Synchronized MAC Protocol For Multi-hop Cognitive Radio Networks", ICC '08, Beijing, May 2008.
7. **Li-Chun Wang, Chung-Wei Wang and Kai-Ten Feng**. "A Queueing-Theoretical Framework for QoS-Enhanced Spectrum Management in Cognitive Radio Networks", IEEE Wireless Communications, December 2011.
8. **Sultan, Ahmed El Shafie and Ahmed**. "Optimal Random Access and Random Spectrum Sensing for an Energy Harvesting Cognitive Radio", in 2012 IEEE Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob) Conference, Barcelona, October 2012.
9. **Ian F. Akyildiz, Won-Yeol Lee and Kaushik R. Chowdhury**. "CRAHNs: Cognitive radio ad hoc networks", in Ad Hoc Networks Journal, Volume 7, Issue 5, July 2009.
10. *Cognitive Radio*. [https://en.wikipedia.org/wiki/Cognitive_radio]
11. *Cognitive Network*. [https://en.wikipedia.org/wiki/Cognitive_network]