



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

**Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών
και**

Μηχανικών Υπολογιστών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***Κατανεμημένοι Αλγόριθμοι για Μεγιστοποίηση Ρυθμού
Μετάδοσης σε Ευφυή Ασύρματα Δίκτυα***

Καλούμενος Νικόλαος Αλέξανδρος

A.M.: 2008030035

Εξεταστική επιτροπή :

Μ.Πατεράκης, Επιβλέπων Καθηγητής

Α.Μπλέτσας, Αναπληρωτής Καθηγητής

Π.Κουτσάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής

Χανιά, 2014

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Κατά πρώτον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Μιχάλη Πατεράκη για την καθοδήγηση, την στήριξη και την πολύτιμή βοήθειά του στην δημιουργία και υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής. Εν συνεχεία θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής κ. Μπλέτσα και κ. Κουτσάκη. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου που μου έδωσε την ευκαιρία να εμπλουτίσω τις γνώσεις μου στο αντικείμενο που με ενδιαφέρει και για την στήριξη όλων αυτών των χρόνων σπουδών.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η μή 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 (Cognitive Radio Networks) καθώς έχουν αναδειχθεί ως μια ελπιδοφόρα προσέγγιση για την υλοποίηση αποδοτικής επαναχρησιμοποίησης των φασμάτων που απαιτούν άδεια για την χρήση τους. Ο κατάλληλος σχεδιασμός του δευτερεύοντος δικτύου παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην αποδοτική υλοποίηση των ευφών ασύρματων δικτύων. Διάφορα πρωτόκολλα Έλεγχου Πρόσβασης στο Μέσο (Medium Access Control) έχουν προταθεί για τους δευτερεύοντες (μή αδειούχους) χρήστες ενός CRN για να αποκτήσουν αυτοί πρόσβαση στο υπό- χρησιμοποιούμενο φάσμα.

Στις περισσότερες προτεινόμενες στην βιβλιογραφία υλοποιήσεις ευφών 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 ένα κεντρικό σταθμό βάσης και άρα ο μηχανισμός λειτουργίας του δικτύου είναι κεντριοποιημένος. Στη δική μας μελέτη θεωρούμε ένα σενάριο επικοινωνίας στο οποίο υπάρχει ένας πρωτεύων χρήστης ο οποίος θέλει να επικοινωνήσει με έναν πρωτεύοντα προορισμό αγνοώντας την ύπαρξη του ευφυούς ασύρματου δικτύου. Ταυτόχρονα στο σύστημα υπάρχουν δευτερεύοντες χρήστες, οι οποίοι δεν μοιράζονται πληροφορία, όπως π.χ., τον αριθμό τους, τον αριθμό των πακέτων τους στην ουρά ή την κατάσταση των καναλιών τους, και οι οποίοι προσπαθούν να επικοινωνήσουν με έναν κοινό δευτερεύοντα προορισμό χρησιμοποιώντας κατανεμημένες τεχνικές προσπέλασης του καναλιού.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος	3
Περίληψη	7
Κεφάλαιο 1^ο – Ευφυή Ασύρματα Δίκτυα	8 – 17
1.1. Εισαγωγή	8 – 11
1.1.1. Είδη Ευφυών Δικτύων	9
1.1.2. Λειτουργίες των Ευφυών Δικτύων	9 – 10
1.1.3. Ανίχνευση Πομπού	10 – 11
1.2. Software Defined Radios (SDR)	11 – 13
1.2.1. Τα Οφέλη του SDR	12 – 13
1.3. Μοντέλα Ευφυών Ασύρματων Δικτύων	13 – 17
1.3.1. Κύρια Μοντέλα	13 – 16
1.3.1.1. Μοντέλα Overlay	13 – 14
1.3.1.2. Μοντέλα Underlay	14 – 15
1.3.1.3. Μοντέλα Interweave	15 – 16
1.3.2. Σύγκριση	16 – 17
Κεφάλαιο 2^ο – Network – Assisted Diversity Multiple Access (NDMA)	18– 29
2.1. Εισαγωγή	18
2.2. Μέθοδος NDMA	19 – 22
2.3. Το υπό εξέταση Σύστημά	22 – 24
2.3.1. Διαμόρφωση του Συστήματος	22 – 24
2.3.2. Το κανάλι	24
2.3.3. Ο Μηχανισμός	24
2.4. Η περίπτωση Δυναμικού Μεταβαλλόμενου Αριθμού Δευτερευόντων Χρηστών	24 – 25
2.5. Αναλυτικές Εκφράσεις για τις Μέσες Καθυστερήσεις	25 – 26
2.6. Προσομοίωση	26 – 28
2.6.1. Αποτελέσματα Προσομοίωσης	27

2.6.2. Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	27 – 28
2.7. Εισαγωγή Πιθανότητας Εσφαλμένης Μετάδοσης Πρωτεύοντος Πακέτου	28 – 29
Κεφάλαιο 3ο – Dirty Paper Coding (DPC)	30 – 43
3.1. Εισαγωγή	30
3.2. Εισάγοντας το DPC στο Σύστημά μας	30 – 31
3.3. Διαμόρφωση συστήματος	31 – 33
3.3.1. Μηχανισμός	31 – 32
3.3.2. NDMA Σύγκρουση και DPC Σύγκρουση	32 – 33
3.4. Περίπτωση Δυναμικά Μεταβαλλόμενου Αριθμού Δευτερευόντων Χρηστών	33 – 34
3.5. Αναλυτικές Εκφράσεις για τις Μέσες Καθυστερήσεις	34 – 35
3.6. Σχεδιασμός και Αξιολόγηση Μεθόδων	35 – 43
3.6.1. Η πρώτη μέθοδος	35 – 37
3.6.1.1. Προσομοίωση	36
3.6.1.1.1. Αποτελέσματα Προσομοίωσης	36 – 37
3.6.1.1.2. Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	37
3.6.2. Η δεύτερη μέθοδος	37 – 43
3.6.2.1. Προσομοίωση Μεθόδου DPC μόνο από ένα μέρος των δευτερευόντων χρηστών.	38 – 41
3.6.2.1.1. Αποτελέσματα Προσομοίωσης για $c = 4$	38 – 39
3.6.2.1.2. Αποτελέσματα Προσομοίωσης για $c = 2$	40
3.6.2.1.3. Αποτελέσματα Προσομοίωσης για $c = 4/3$	41
3.6.2. 2. Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	42 – 43
Κεφάλαιο 4^ο – Random Retransmission Slot Selection (R2S2)	44 – 55
4.1. Εισαγωγή	44
4.2. Μηχανισμός Memoryless R2S2	44 – 46
4.2.1. Προσομοίωση	45 – 46
4.2.1.1. Αποτέλεσμα προσομοίωσης	45 – 46
4.3. Μηχανισμός R2S2	47 – 51
4.3.1. Προσομοίωση	47 – 51

4.3.1.1. Αποτέλεσμα Προσομοίωσης για $K=5$	48 – 49
4.3.1.2. Αποτέλεσμα Προσομοίωσης για $K=20$	49 – 50
4.3.1.3. Αποτέλεσμα Προσομοίωσης για $K=60$	50 – 51
4.3.2. Σχολιασμός αποτελεσμάτων	51
4.4. Χρόνος Σύγκλισης	52 – 54
4.4.1. Ιδανικός χρόνος	52 – 54
4.4.1.1. Προσομοίωση	52 – 53
4.4.1.1.1. Αποτέλεσμα Προσομοίωσης	53 – 54
4.4.1.1.2. Σχολιασμός αποτελεσμάτων	54
4.5. Περίπτωση Δυναμικά Μεταβαλλόμενου Αριθμού Δευτερευόντων χρηστών	54 – 56
Κεφάλαιο 5^ο – Επίλογος	57– 58
5.1. Συνεισφορά Διπλωματικής Εργασίας	57– 58
5.2. Ιδέες Μελλοντικών Επεκτάσεων	58
Βιβλιογραφία	59

Περίληψη

Τα περισσότερα ευφυή ασύρματα δίκτυα που προτείνονται και εξετάζονται στην βιβλιογραφία στηρίζονται σε κεντριοποιημένες τεχνικές προσπέλασης του κοινού καναλιού. Πιο συγκεκριμένα, οι δευτερεύοντες χρήστες των δικτύων αυτών επικοινωνούν με έναν κεντρικό σταθμό βάσης ο οποίος παίρνει όλες τις αποφάσεις σχετικά με το ποιός χρήστης θα μεταδώσει σε μια χρονική σχισμή (slot) στην οποία ο πρωτεύων χρήστης του δικτύου είναι ανενεργός [1].

Σκοπός της εργασίας μας είναι η μοντελοποίηση και μελέτη ενός ευφυούς ασύρματου δικτύου που χρησιμοποιεί κατανεμημένες τεχνικές προσπέλασης των χρηστών στο κοινό κανάλι. Η δομή της εργασίας είναι η παρακάτω.

Στην Εισαγωγή (Κεφάλαιο 1) γίνεται αναφορά στα ευφυή ασύρματα δίκτυα και στα Software Defined Radios (SDR).

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η μέθοδος Network – Assisted Diversity Multiple Access (NDMA). Αρχικά παρουσιάζουμε την λειτουργία του NDMA καθώς και τον τρόπο που το εισάγουμε εμείς στο υπό εξέταση ευφύες ασύρματο δίκτυο (CRN). Έπειτα γίνεται παρουσίαση των μετρικών απόδοσης που θεωρούνται σημαντικές για την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος. Στην συνέχεια μελετάται η απόδοση του συστήματος στην περίπτωση δυναμικά μεταβαλλόμενου αριθμού δευτερευόντων χρηστών. Τέλος παρουσιάζονται αποτελέσματα για τις μέσες καθυστερήσεις μετάδοσης των πακέτων των χρηστών του δικτύου.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η μέθοδος Dirty Paper Coding (DPC). Αρχικά δείχνουμε τον τρόπο λειτουργίας του DPC και τον τρόπο που το χρησιμοποιούμε εμείς στην λειτουργία του μηχανισμού πρόσβασης στο κανάλι του CRN. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται οι μετρικές απόδοσης που θεωρούνται σημαντικές για την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος. Έπειτα, μελετάται η απόδοση του συστήματος στην περίπτωση δυναμικά μεταβαλλόμενου αριθμού δευτερευόντων χρηστών. Τέλος, παρουσιάζονται αποτελέσματα για τις μέσες καθυστερήσεις μετάδοσης των πακέτων των χρηστών του δικτύου.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η προτεινόμενη από εμάς μέθοδος Random Retransmission Slot Selection (R2S2). Αρχικά αναφερόμαστε στην κεντρική ιδέα που συντέλεσε στη δημιουργία της μεθόδου, δείχνουμε πως λειτουργεί το R2S2 και τον τρόπο που το χρησιμοποιούμε εμείς στο CRN. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται οι μετρικές απόδοσης που θεωρούνται σημαντικές για την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος. Έπειτα, μελετάται η απόδοση του συστήματος στην περίπτωση δυναμικά μεταβαλλόμενου αριθμού δευτερευόντων χρηστών.

Το κεφάλαιο 5 περιέχει τον επίλογο της διπλωματικής εργασίας. Παρουσιάζεται η συνεισφορά της διπλωματικής εργασίας και δίνονται μερικές ιδέες για μελλοντικές επεκτάσεις.

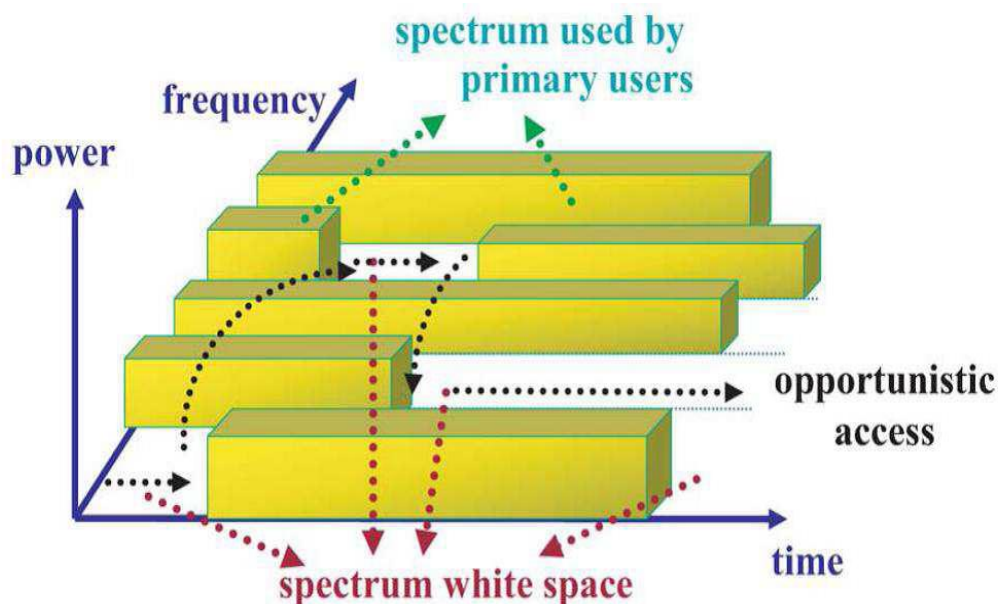
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Ευφυή Ασύρματα Δίκτυα

1.1 Εισαγωγή

Η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC) αποφάσισε τον Νοέμβριο του 2008 ότι τα αχρησιμοποίητα τμήματα του ράδιο - φάσματος, γνωστά ως λευκά κενά (white spaces), διατίθενται για δημόσια χρήση. Συσκευές λευκών κενών (white spaces' devices) υποχρεούνται να περιλαμβάνουν τεχνολογίες για την αποφυγή παρεμβολών, όπως φασματική ανίχνευση και δυνατότητες γεωκατανομής (geolocation).

Τα ευφυή ασύρματα δίκτυα [10] είναι μια μορφή ασύρματης επικοινωνίας στην οποία οι πομποδέκτες μπορούν έξυπνα να ανιχνεύουν ποια κανάλια επικοινωνίας χρησιμοποιούνται σε διάφορες χρονικές στιγμές και ποια όχι, ώστε να χρησιμοποιήσουν τα λευκά φασματικά κενά που δημιουργούνται στο χρόνο και στις συχνότητες (Σχήμα 1.1). Αυτή η μέθοδος βελτιστοποιεί την χρήση του διαθέσιμου ράδιο- φάσματος ενώ ελαχιστοποιεί τις παρεμβολές σε άλλους χρήστες.



Σχήμα 1.1: Λευκά Φασματικά Κενά (white spaces)

Πιο συγκεκριμένα, το κύριο χαρακτηριστικό των ευφυών ασύρματων δικτύων είναι η ικανότητα να αναγνωρίζουν τον πρωτεύοντα χρήστη, ο οποίος έχει την άδεια να χρησιμοποιεί κατά βούληση ένα συγκεκριμένο φάσμα - κανάλι, και να

προσαρμόζονται στον τρόπο επικοινωνίας του με σκοπό να ελαχιστοποιήσουν τις παρεμβολές που του προκαλούν.

Στη βασική τους μορφή τα ευφυή δίκτυα είναι μια υβριδική τεχνολογία που περιλαμβάνει Ψηφιακούς Δέκτες τεχνολογίας SDR (software defined radio) [11], καθώς εφαρμόζεται σε επικοινωνίες διασποράς φάσματος (spread spectrum). Πιθανές λειτουργίες των ευφύων δικτύων περιλαμβάνουν την ικανότητα ενός πομποδέκτη να καθορίζει τη γεωγραφική του τοποθεσία, να αναγνωρίζει και να εξουσιοδοτεί τους χρήστες του, να κρυπτογραφεί και να αποκρυπτογραφεί σήματα, να ακούει γειτονικές ασύρματες συσκευές σε λειτουργία και να προσαρμόζει την ενέργεια του σήματός του και τα χαρακτηριστικά διαμόρφωσής του.

Η ιδέα για ευφυή δίκτυα προτάθηκε από τον Joseph Mitola [9] σε σεμινάριο στο Royal Institute of Technology στη Στοκχόλμη και αναπτύχθηκε από τον ίδιο στον οργανισμό Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) των Ηνωμένων Πολιτειών.

1.1.1. Είδη Ευφύων Δικτύων

Υπάρχουν δυο κύρια είδη ευφύων δικτύων:

1) Πλήρη ευφυή δίκτυα (full cognitive radios)

Τα full cognitive radios λαμβάνουν υπόψη όλες τις παραμέτρους που ένας ασύρματος κόμβος ή δίκτυο μπορεί να γνωρίζει (π.χ. ισχύς μετάδοσης, συχνότητα φορέα, διαμόρφωση).

Το Full cognitive είναι γνωστό επίσης και ως "Mitola radio" [9].

2) Τα spectrum-sensing cognitive radio.

Τα spectrum-sensing cognitive radio χρησιμοποιούνται για να ανιχνεύσουν διαθέσιμα κανάλια στο ράδιο-φάσμα.

1.1.2. Λειτουργίες των Ευφύων Δικτύων

Οι κύριες λειτουργίες των ευφύων ασύρματων δικτύων είναι:

- **Έλεγχος Ισχύος (Power Control)**

Ο Έλεγχος Ισχύος χρησιμοποιείται τόσο για ευκαιριακές προσβάσεις (interweave) στο φάσμα όσο και για συστήματα που μοιράζονται το φάσμα (underlay) για τον υπολογισμό του περιορισμού παρεμβολής των δευτερευόντων χρηστών υποστηρίζοντας την κατανομή των καναλιών και την επιβολή περιορισμών ισχύος παρεμβολής για την προστασία του κύριου χρήστη.

- **Ανίχνευση Φάσματος (Spectrum Sensing)**

Ανίχνευση αχρησιμοποίητου φάσματος και διαμοιρασμός αυτού χωρίς παρεμβολές στις μεταδόσεις των πρωτευόντων χρηστών. Μια σημαντική απαίτηση από το ευφύες ασύρματο δίκτυο είναι να ανιχνεύει τα λευκά φασματικά κενά. Αυτό μπορεί να γίνει με τεχνικές ανίχνευσης πομπού

(Transmitter detection), ανιχνεύοντας τις μεταδόσεις του πρωτεύοντα (αδειούχου) χρήστη με τους πιο αποδοτικούς τρόπους.

- **Διαχείριση φάσματος (Spectrum Management)**

Η διαχείριση του φάσματος είναι η ικανότητα του ευφυούς δικτύου να αποφασίζει το καλύτερο προσιτό φάσμα το οποίο είναι σε θέση να καλύψει τις ανάγκες επικοινωνίας και ποιότητας εξυπηρέτησης των χρηστών.

1.1.3. Ανίχνευση Πομπού

Είναι φανερό ότι η ανίχνευση πομπού είναι ίσως η πιο σημαντική λειτουργία σε ένα ευφυές ασύρματο δίκτυο. Οι τεχνικές ανίχνευσης πομπού μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες:

- **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 πρωτεύων χρήστης παραμένει ανενεργός, να μπορούν χωρίς καθυστερήσεις να χρησιμοποιηθούν από δευτερεύοντες χρήστες. Από την άλλη πλευρά, η γνώση του εκπεμπόμενου σήματος από τον πρωτεύοντα χρήστη μπορεί να μην είναι διαθέσιμη. Τέλος, σε περίπτωση όπου υπάρχουν πολλοί πρωτεύοντες χρήστες ο δέκτης θα πρέπει να έχει ένα αφιερωμένο προσαρμοσμένο φίλτρο για κάθε ένα από αυτούς.

- **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 λαμβανομένου σήματος με ένα κατώφλι για να προσδιορίσουμε την παρουσία σήματος από τον πρωτεύοντα χρήστη. 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, $O(\frac{1}{SNR^2})$, 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 κάθε προσαρμοστικής επεξεργασίας σήματος για ακύρωση παρεμβολής.

- **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 (συνήθως λευκός θόρυβος) 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.

1.2. Software Defined Radios (SDR)



Σχήμα 1.2: Universal Software Radio Peripheral (USRP)

Διάφοροι ορισμοί μπορούν να βρεθούν στην βιβλιογραφία για να περιγράψουν τα Software Defined Radios (Σχήμα 1.2) γνωστά και ως Software Radios ή SDRs. Ένας ορισμός που προσφέρει σαφή εικόνα για την τεχνολογία και τα οφέλη τους είναι ο παρακάτω:

Τα Software Defined Radios είναι Radios στα οποία κάποιες ή όλες οι λειτουργίες του φυσικού επίπεδου (physical layer) είναι λογισμικά ορισμένες.

Radio είναι κάθε είδους συσκευή που ασύρματα μεταδίδει ή λαμβάνει σήματα στο ραδιοφωνικό-συχνотικό (RF) μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος για να διευκολύνει την μετάδοση πληροφορίας. Στις μέρες μας τα radios υπάρχουν σε ένα πλήθος αντικειμένων όπως είναι τα κινητά τηλέφωνα, οι υπολογιστές, τα αυτοκίνητα και οι τηλεοράσεις.

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-συχνотικές ή/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.

1.2.1. Τα Οφέλη του SDR

Τα Software defined radios αναμένεται ότι θα κάνουν εφικτή τη χρήση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος με ριζικά νέους τρόπους. Τα περισσότερα ράδιο πρότυπα χρησιμοποιούν μια συγκεκριμένη στενή μπάντα συχνοτήτων. Σε αντίθεση, οι SDR συσκευές μπορούν να συντονιστούν σε πολλές διαφορετικές συχνότητες ταυτόχρονα, καθιστώντας δυνατή την χρήση συστημάτων επικοινωνιών που δεν θα ήταν εφικτά με τους συμβατικούς radio εξοπλισμούς.

Για τους κατασκευαστές radio εξοπλισμού τα οφέλη είναι:

- Οι συσκευές δεν περιορίζονται σε λειτουργία ενός μόνο πρωτοκόλλου (όπως συμβαίνει σε περιπτώσεις υλοποιήσεων σε hardware), κάνοντάς τις έτσι πολύ ευέλικτες αφού ένα μόνο software radio chip μπορεί να εκτελέσει τις λειτουργίες πολλών radio chip ειδικού σκοπού.
- Επιτρέπουν τη γρήγορη προτυποποίηση νέων πρωτοκόλλων επικοινωνίας.
- Μια οικογένεια από προϊόντα radio μπορούν να υλοποιηθούν χρησιμοποιώντας μια κοινή πλατφόρμα αρχιτεκτονικής, δίνοντας τη δυνατότητα σε νέα προϊόντα να εισαχθούν στην αγορά πιο γρήγορα.
- Λογισμικά μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν στα διάφορα προϊόντα radio, μειώνοντας έτσι το κόστος ανάπτυξης.
- Είναι εφικτός ο επαναπρογραμματισμός, επιτρέποντας διορθώσεις κατά τη διάρκεια λειτουργίας της συσκευής, μειώνοντας έτσι το χρόνο και το κόστος που συνδέεται με τη λειτουργία και τη συντήρηση.

Για τους παρόχους radio υπηρεσιών τα οφέλη είναι:

- Νέα χαρακτηριστικά και δυνατότητες μπορούν να προστεθούν στις υπάρχουσες υποδομές χωρίς να απαιτούνται μεγάλες δαπάνες, επιτρέποντας στους φορείς παροχής υπηρεσιών να κάνουν πιο διαχρονικά τα δίκτυα τους.
- Η χρήση μιας κοινής ράδιο πλατφόρμας για πολλαπλές αγορές, μειώνοντας σημαντικά την υλικοτεχνική υποστήριξη και τις λειτουργικές δαπάνες.

- Απομακρυσμένες λήψεις λογισμικού, μέσω των οποίων η χωρητικότητα μπορεί να αυξηθεί, μπορούν να ενεργοποιηθούν αναβαθμίσεις και νέα προσοδοφόρα χαρακτηριστικά να εισαχθούν.

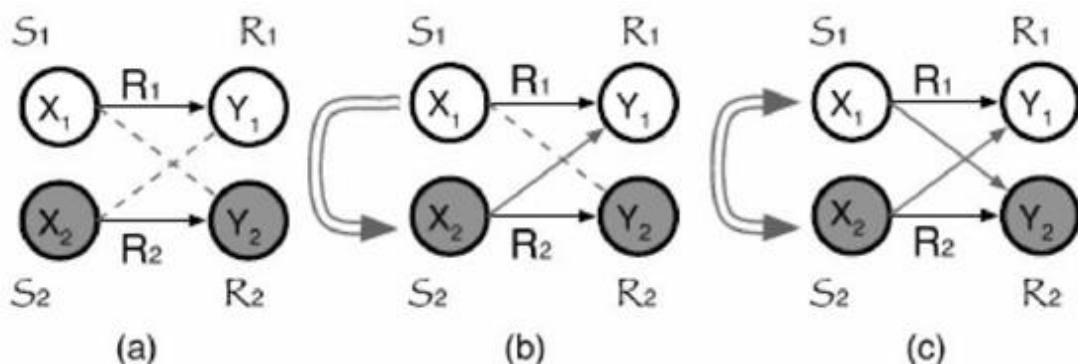
1.3. Μοντέλα Ευφυών Ασύρματων Δικτύων

Από τη στιγμή της εμφάνισης του, ο ορισμός του ευφυούς δικτύου έχει εξελιχθεί μέσα στα χρόνια. Κατά συνέπεια σήμερα υπάρχουν διάφορες ερμηνείες καθώς επίσης διάφορα μοντέλα του ευφυούς δικτύου.

1.3.1. Κύρια Μοντέλα

Τα κύρια μοντέλα που έχουν προταθεί όσον αφορά το διαμερισμό του φάσματος, τις πληροφορίες που έχει το ευφύες δίκτυο και τους περιορισμούς αποστολής (Σχήμα 1.3) χωρίζονται σε:

- overlay ή μοντέλα γνωστής παρεμβολής
- underlay ή μοντέλα αποφυγής παρεμβολής και
- interweave ή μοντέλα ευκαιριακής επικοινωνίας.



Σχήμα 1.3: (a) interweave, (b) overlay, (c) underlay

1.3.1.1. Μοντέλο Overlay

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

Παρόλα αυτά, το μοντέλο overlay υποθέτει ότι το μη ευφύες μήνυμα είναι γνωστό στον ευφυή πομπό όταν ο πρωτεύων χρήστης ξεκινά την μετάδοση του. Αν και αυτό είναι δύσκολο στην πράξη για αρχικές μεταδόσεις, η υπόθεση είναι βάσιμη για αναμεταδόσεις μηνυμάτων όπου ο δευτερεύων χρήστης λαμβάνει σωστά την πρώτη μετάδοση και την αποκωδικοποιεί, ενώ ο προοριζόμενος δέκτης (παραλήπτης) δεν

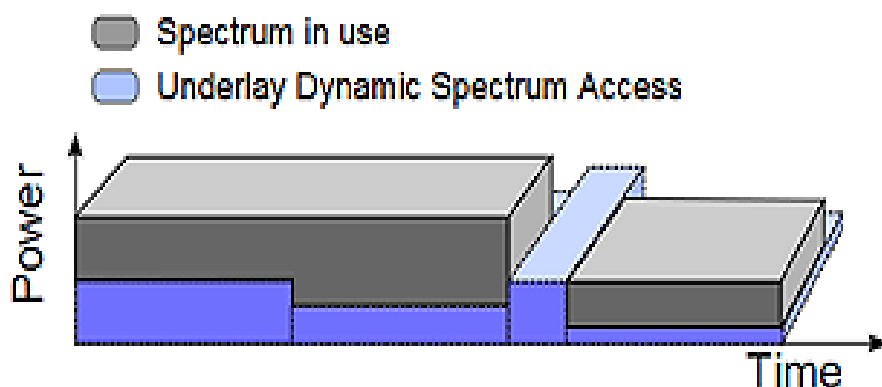
μπορεί να αποκωδικοποιήσει την αρχική μετάδοση λόγω παρεμβολής ή εξασθένησης (fading).

Εναλλακτικά, ο πρωτεύων χρήστης μπορεί να στείλει το μήνυμα του στον δευτερεύοντα χρήστη (υποθέτοντας ότι είναι κοντά) πριν την μετάδοση του. Την γνώση μηνυμάτων πρωτευόντων χρηστών ή/και της κωδικής λέξης μπορεί να εκμεταλλευτεί αποδοτικά το σύστημα, με σκοπό είτε να ακυρώσει είτε να μετριάσει την παρεμβολή στους ευφείς και μη δέκτες. Από τη μια, αυτή η πληροφορία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ακυρωθεί τελείως η παρεμβολή λόγω του μη ευφούς σήματος στον ευφή δέκτη με τεχνικές όπως το Dirty Paper Coding [7]. Από την άλλη, οι ευφείς χρήστες μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτή την γνώση και να αναθέσουν μέρος της ενέργειας τους για τις δικές τους επικοινωνίες και την υπόλοιπη ενέργεια για να βοηθήσουν τις μεταδόσεις των πρωτευόντων χρηστών (relay).

Με προσεκτική επιλογή για τον διαμορισμό της ενέργειας, η αύξηση στο SNR του πρωτεύοντος χρήστη λόγω της βοήθειας από τον ευφή χρήστη (relay) μπορεί να αντισταθμισθεί από μείωση στο SNR του πρωτεύοντος χρήστη λόγω παρεμβολής που γίνεται από την υπόλοιπη ενέργεια του δευτερεύοντος χρήστη που χρησιμοποιήθηκε για τις δικές του επικοινωνίες. Αυτό εξασφαλίζει ότι, ο ρυθμός μετάδοσης του πρωτεύοντος χρήστη παραμένει ίδιος, ενώ ο δευτερεύων χρήστης χρησιμοποιεί μέρος της ενέργειας του για τις δικές του μεταδόσεις.

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

1.3.1.2. Μοντέλο Underlay



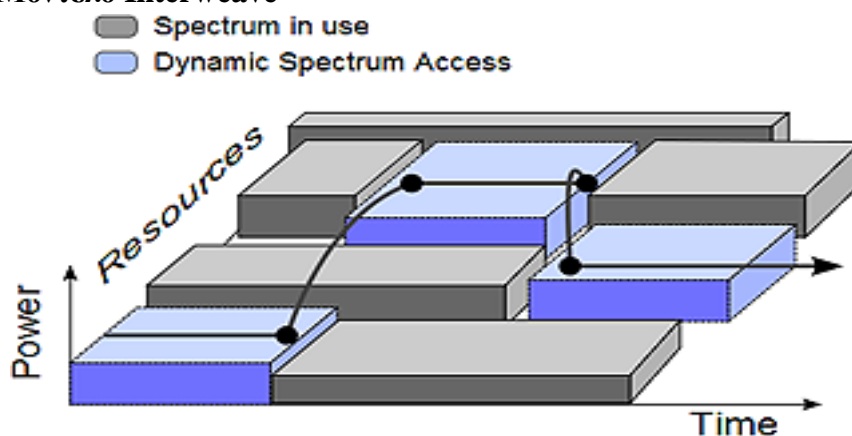
Σχήμα 1.4: Χρησιμοποίηση του φάσματος σε Underlay συστήματα

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 πρωτευόντων χρηστών. Σε αυτή τη περίπτωση, το ευφυές δίκτυο, γνωστό ως δευτερεύων χρήστης, δεν πρέπει να παρεμβάλλει στη μετάδοση του ήδη υπάρχοντος (συχνά αδειοδοτημένου) χρήστη, ο οποίος είναι γνωστός ως πρωτεύων χρήστης. Ειδικότερα, το παράδειγμα underlay ορίζει ότι ταυτόχρονη ύπαρξη ευφών και μη μεταδόσεων μπορεί να συμβεί (Σχήμα 1.4) μόνο αν η παρεμβολή που παράγεται από τις ευφυείς συσκευές στους μη ευφυείς δέκτες είναι κάτω από ένα αποδεκτό κατώφλι. Ο περιορισμός παρεμβολής για τους πρωτεύοντες χρήστες μπορεί να εκπληρωθεί χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραίες με σκοπό να οδηγηθούν τα ευφυή σήματα μακριά από τους μη ευφυείς δέκτες ή χρησιμοποιώντας τεχνικές διευρυμένου φάσματος (spread spectrum).

Η παρεμβολή που προκαλείται από έναν ευφυή πομπό σε ένα ευφυή δεκτή μπορεί να υπολογιστεί 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 δευτερεύοντα χρήστη σε μεταδόσεις μικρής εμβελείας.

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.

1.3.1.3. Μοντέλο Interweave



Σχήμα 1.5: Χρησιμοποίηση του φάσματος σε Interweave συστήματα

Το interweave παράδειγμα είναι βασισμένο στην ιδέα της ευκαιριακής μετάδοσης και αποτέλεσε το αρχικό κίνητρο για την δημιουργία των ευφών 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 σχετικά 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 πρωτευόντων (αδειούχων και μη) χρηστών στο φάσμα. Μπορεί επίσης να θεωρηθεί ότι όλοι οι χρήστες σε μια δεδομένη μπάντα είναι ευφυείς, όμως οι ήδη υπάρχοντες χρήστες μετατρέπονται σε πρωτεύοντες χρήστες, και οι νέοι χρήστες μετατρέπονται σε δευτερεύοντες χρήστες που δεν θα πρέπει να παρεμβάλουν στις μεταδόσεις που λαμβάνουν χώρα μεταξύ των ήδη υπάρχοντων πρωτευόντων χρηστών.

Συνοψίζοντας, ένα interweave ευφυές 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 (Σχήμα 1.5) με την ελάχιστη παρεμβολή στους ενεργούς χρήστες.

1.3.2. Σύγκριση

Στο πινάκα 1.1 συνοψίζονται οι διαφορές μεταξύ underlay, overlay και interweave. Ενώ το underlay και το overlay 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 (side information) :

- ✓ τα συστήματα underlay χρειάζονται γνώση της παρεμβολής που προκαλείται από τον ευφυή πομπό στον μη ευφυή δέκτη (ή δέκτες),
- ✓ τα συστήματα interweave χρειάζονται πληροφορίες σχετικά με την δραστηριότητα των πρωτευόντων ή ήδη υπάρχοντων χρηστών (Ανίχνευση Πομπού) και
- ✓ τα overlay συστήματα χρειάζονται γνώση σημαντικού side information (γνώση της κωδικής λέξης του πρωτεύοντος χρήστη και του μηνύματος του).

Εκτός από τα όρια ισχύος σε επίπεδα συσκευών, η ισχύς μετάδοσης του ευφυή χρήστη σε underlay και interweave προσεγγίσεις, εξαρτάται από τους περιορισμούς παρεμβολής και το εύρος ανίχνευσης, αντίστοιχα.

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

Στο Σχήμα 1.3 διακρίνονται οι παρεμβολές που δημιουργούνται στο κάθε σενάριο. Στο (α) Interweave δεν υπάρχουν παρεμβολές, στο (β) Overlay παρεμβάλλει μόνο ο δευτερεύων χρήστης στη μετάδοση του πρωτεύοντος ενώ στο (γ) Underlay παρεμβάλλει ο ένας στον άλλον.

Διαφορές underlay, overlay και interweave

Underlay	Overlay	Interweave
Οι ευφυείς (δευτερεύοντες) πομποί γνωρίζουν την ισχύ του καναλιού των πρωτευόντων χρηστών	Οι ευφυείς κόμβοι γνωρίζουν το gain του καναλιού, την κωδική λέξη και το μήνυμα των πρωτευόντων χρηστών	Οι δευτερεύοντες χρήστες γνωρίζουν τις φασματικές τρύπες στο χώρο, τον χρόνο ή την συχνότητα και τις χρονικές στιγμές που ο πρωτεύων χρήστης δεν τις χρησιμοποιεί.
Οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να μεταδώσουν ταυτόχρονα με τους πρωτεύοντες αρκεί η παρεμβολή που προκαλούν να παραμένει κάτω από ένα αποδεκτό όριο	Οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να μεταδώσουν ταυτόχρονα με τους πρωτεύοντες, η παρεμβολή στους πρωτεύοντες χρήστες μπορεί να αντισταθμιστεί χρησιμοποιώντας μέρος της ενέργειας των ευφύων χρηστών για relay των μή ευφύων μηνυμάτων	Οι δευτερεύοντες χρήστες μεταδίδουν ταυτόχρονα με τον πρωτεύοντα χρήστη μόνο στην περίπτωση λανθασμένης ανίχνευσης φασματικής τρύπας
Η εκπεμπόμενη ενέργεια του πρωτεύοντος χρήστη περιορίζεται από τον περιορισμό παρεμβολής	Οι ευφυείς χρήστες μπορούν να εκπέμψουν σε οποιαδήποτε ισχύ, η παρεμβολή στους πρωτεύοντες χρήστες μπορεί να αντισταθμιστεί με relaying των μηνυμάτων των πρωτευόντων χρηστών	Οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να εκπέμψουν σε οποιαδήποτε ισχύ

Πίνακας 1.1: Σύγκριση μεταξύ Underlay, Overlay και Interweave.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

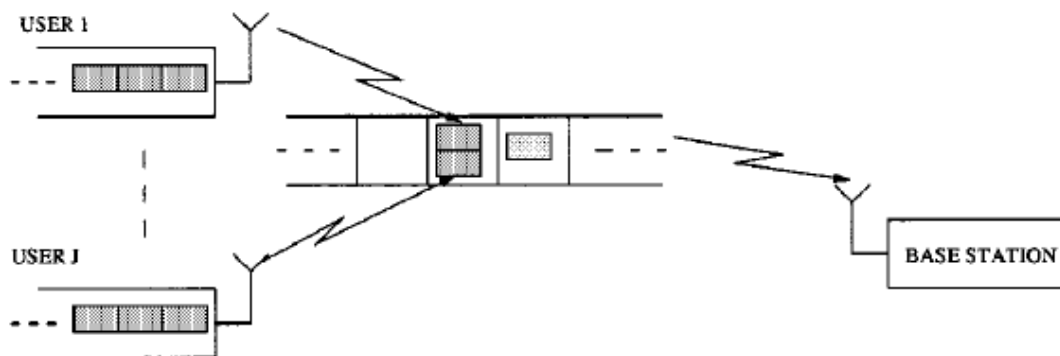
Network – Assisted Diversity Multiple Access (NDMA)

2.1. Εισαγωγή

Στα περισσότερα υπάρχοντα ασύρματα δίκτυα δεύτερης γενιάς, FDMA, TDMA ή/και CDMA τεχνικές χρησιμοποιούνται για να προσφέρουν σταθερές bit-rate (CBR) συνδέσεις σε πολλαπλούς χρήστες. Αυτές οι στρατηγικές στατικής κατανομής καναλιού είναι ιδανικές για ασύρματες υποδομές που προσφέρουν κυρίως υπηρεσίες φωνής. Παρόλα αυτά, όταν πρέπει να υποστηριχθούν πηγές δεδομένων, οι παραπάνω προσεγγίσεις αποδεικνύονται ανεπαρκείς όσον αφορά στην αξιοποίηση των πόρων του καναλιού, λόγω του ότι οι πηγές πληροφορίας παρουσιάζουν συνήθως εκρηκτική συμπεριφορά. Μέθοδοι τυχαίας πρόσβασης τύπου ALOHA παρέχουν μια απλή λύση στην υποστήριξη χρηστών με εκρηκτικό τρόπο δημιουργίας της πληροφορίας, όμως οι συγκρούσεις που συμβαίνουν σε αυτά τα σχήματα επιφέρουν Throughput penalties. Όταν η κίνηση είναι έντονη, οι συχνές συγκρούσεις έχουν σαν αποτέλεσμα ένα σημαντικό χάσιμο των πόρων του καναλιού. Βελτιώσεις, όπως οι τεχνικές ανίχνευσης φέροντος (CSMA) και ανίχνευσης σύγκρουσης (CD) έχουν αποδειχθεί χρήσιμες και αποδοτικές σε ενσύρματα δίκτυα. Όμως η προϋπόθεση "listen-while-talk" συχνά δεν είναι εφικτή στα πλαίσια των ασύρματων επικοινωνιών.

Σε παλαιότερες έρευνες πάνω σε τεχνικές τυχαίας πρόσβασης σε ασύρματα δίκτυα, δεν είχε δοθεί σημαντική προσοχή στην πληροφορία που περιέχεται στα συγκρουόμενα δεδομένα. Κατά κανόνα αυτή η πληροφορία απλά αγνοείτο από τα πρωτόκολλα πρόσβασης στο κανάλι. Στην πραγματικότητα τα συγκρουόμενα δεδομένα περιέχουν χρήσιμη πληροφορία, η οποία αν αξιοποιηθεί μπορεί να οδηγήσει σε μείωση των Throughput penalties που προκαλούνται από τις συγκρούσεις. Αυτό το πρόβλημα μελετήθηκε στο [4], στο οποίο προτάθηκε μια ριζικά νέα μέθοδος τυχαίας πρόσβασης καναλιού για ασύρματα δίκτυα δεδομένων, αποκαλούμενη Network-assisted Diversity Access (NDMA). Στο NDMA, προτείνεται μια διαδικασία αντιμετώπισης σύγκρουσης μέσω της οποίας ο κεντρικός σταθμός βάσης αποκτά την πληροφορία από τους διαφορετικούς χρήστες που μεταδίδουν ταυτόχρονα μέσα από τα συγκρουόμενα σήματα. Αν K χρήστες συγκρουστούν σε ένα σύστημα με σχισμές (slotted σύστημα), ο κεντρικός σταθμός βάσης (base station) αποθηκεύει τη συγκρουόμενη πληροφορία στη μνήμη, αντί να την αγνοήσει, και το πρωτόκολλο απαιτεί οι K συγκρουόμενοι χρήστες να μεταδώσουν ξανά τα πακέτα τους στα επόμενα $K-1$ slots, καταλήγοντας έτσι ο βασικός σταθμός να διαθέτει K διαφορετικές εκδοχές της αρχικής υπέρθεσης των K σημάτων. Στην συνέχεια, ένας αλγόριθμος source separation χρησιμοποιείται για να επιλύσει την σύγκρουση.

2.2. Μέθοδος NDMA



Σχήμα 2.1: Ασύρματο σύστημα τυχαίας πρόσβασης με σχισμές

Το NDMA είναι μια μέθοδος τυχαίας πρόσβασης στο μέσο που συνδυάζει ιδέες στο MAC επίπεδο για ασύρματα συστήματα σε ένα ευρυζωνικό σύστημα, και το αντίστοιχο σύστημα απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1. Το κανάλι πληροφορίας είναι χρονικά οργανωμένο σε σχισμές. Σε κάθε σχισμή κάθε χρήστης i από το σύνολο των J χρηστών μπορεί να στείλει ένα πακέτο δεδομένων, υπό την προϋπόθεση ότι η ουρά δεδομένων του δεν είναι κενή και του δίνεται η δυνατότητα να μεταδώσει. Στο [4] γίνεται η υπόθεση ότι όλα τα πακέτα δεδομένων έχουν ένα σταθερό μήκος N συμβόλων, και ότι τα σύμβολα, προέρχονται από ένα πεπερασμένο αστερισμό QAM. Επίσης, στο [4] υποτίθεται ότι το κανάλι ανάμεσα σε κάθε χρήστη και τον σταθμό βάσης είναι flat(επηρεάζει μόνο το πλάτος και τη φάση των συμβόλων εισόδου), slowly (σε σύγκριση με την διάρκεια της σχισμής) time-selective fading, και ότι όλοι οι χρήστες είναι τέλεια συγχρονισμένοι ώστε να αναγνωρίζουν τις αρχές των διαδοχικών χρονικών σχισμών. Τότε ο βασικής ζώνης, διακριτού χρόνου, ρυθμός συμβόλων του σήματος που λαμβάνεται στο κεντρικό σταθμό βάσης σε μια σχισμή του καναλιού θα είναι η υπέρθεση του σήματος μετάδοσης από κάθε χρήστη στην εν λόγω σχισμή. Μπορεί να γραφτεί σε μορφή διανύσματος, ως

$$y(l) = \sum_{i \in I(l)} a_i(l) \cdot s_i(l) + v(l), \quad (1)$$

όπου $s_i(l)$ είναι ένα $N \times 1$ διάνυσμα που αντιπροσωπεύει το πακέτο που στάλθηκε από το χρήστη i στην σχισμή l , $y(l)$, και $v(l)$ αντιπροσωπεύουν το διάνυσμα του λαμβανόμενου σήματος και το διάνυσμα του θορύβου στην σχισμή l , αντίστοιχα, $a_i(l)$ είναι ο fading coefficient του καναλιού μεταξύ χρήστη i και του κεντρικού σταθμού βάσης, και $I(l)$ είναι το σύνολο των δεικτών των χρηστών που συγκρούονται στην σχισμή l . Το μοντέλο της σχέσης στο (1) είναι ένα κλασικό πρόβλημα διαχωρισμού σήματος. Αν κάποιο είδος diversity είναι διαθέσιμο (π.χ., με τη χρήση πολλαπλών κεραιών), είναι δυνατόν να εξάγουμε τα δεδομένα του κάθε συγκρουόμενου χρήστη.

Η καινοτομία της προσέγγισης NDMA έγκειται στο ότι δημιουργεί πολυμορφία (diversity) μέσω αναμεταδόσεων αξιοποιώντας τους πόρους του πρωτοκόλλου. Ειδικότερα, εάν ο κεντρικός σταθμός βάσης ανιχνεύει K χρήστες ($I(l) = \{i_1, i_2, \dots, i_K\}$) να συγκρούονται σε μια σχισμή, θα ζητήσει από αυτούς τους συγκρουόμενους χρήστες να επαναμεταδώσουν τα πακέτα τους $K-1$ επιπλέον φορές στα επόμενα $K-1$ slots, ενώ οι μη εμπλεκόμενοι στην παραπάνω σύγκρουση χρήστες δεν επιτρέπεται να μεταδώσουν, μέχρι αυτή η περίοδος επαναμετάδοσης να έχει ολοκληρωθεί.

Τελικά, ο κεντρικός σταθμός βάσης δέχεται ένα σύνολο από K διαφορετικές εκδοχές της αρχικής υπέρθεσης των K συγκρουόμενων σημάτων, οι οποίες μπορούν να διαταχθούν σε ένα πίνακα ως εξής

$$\begin{bmatrix} y^{T(l)} \\ \vdots \\ y^T(l+K-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{i_1}(l) & \dots & a_{i_K}(l) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i_1}(l+K-1) & \dots & a_{i_K}(l+K-1) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_{i_1}^T(l) \\ \vdots \\ s_{i_K}^T(l) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v^T(l) \\ \vdots \\ v^T(l+K-1) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

ή αντίστοιχα,

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{S} + \mathbf{V}, \quad (3)$$

με προφανείς ορισμούς των πινάκων στην εξίσωση. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυτή η εξίσωση είναι ένα δημοφιλές μοντέλο στο τομέα της επεξεργασίας σήματος και ανίχνευσης πολλαπλών χρηστών.

Με τη χρήση του NDMA μια σύγκρουση K χρηστών επιλύεται σε K σχισμές του καναλιού με αποτέλεσμα να μην έχουμε κανένα αρνητικό αντίκτυπο στο Throughput του καναλιού.

Η κρίσιμη υπόθεση για την λειτουργία της τεχνικής είναι ότι ο σταθμός βάσης είναι σε θέση να ανιχνεύει αξιόπιστα πόσοι χρήστες έχουν συγκρουστεί στην πρώτη λήψη των συγκρουόμενων σημάτων. Στην πράξη όμως ο κεντρικός σταθμός βάσης μπορεί λανθασμένα να εκτιμήσει :

- είτε ότι συγκρούστηκαν περισσότεροι χρήστες από όσους συγκρούστηκαν πραγματικά με αποτέλεσμα να δεσμευτούν για τις επαναμεταδόσεις περισσότερες σχισμές του καναλιού από όσες πραγματικά απαιτούνται (αυτό θα οδηγήσει απλά σε χαμηλότερο Throughput, Throughput penalty)

- είτε να θεωρήσει ότι έχουν συγκρουσθεί λιγότεροι χρήστες από ότι στην πραγματικότητα κι έτσι ο αριθμός των σχισμών που θα δεσμευθούν για τις επαναμεταδόσεις να μην είναι αρκετός για την επίλυση της αρχικής σύγκρουσης.

Κατά τη διαδικασία ανίχνευσης των συγκρουόμενων χρηστών, υπάρχουν δυο παράμετροι που επηρεάζουν τον υπολογισμό του βαθμού (πολλαπλότητας) της σύγκρουσης. Η πιθανότητα ανίχνευσης P_D , η οποία αντιστοιχεί στη πιθανότητα ένας ενεργός χρήστης να ανιχνευθεί σωστά και η πιθανότητα λάθος συναγερμού P_F , η οποία αντιστοιχεί στη πιθανότητα ένας ανενεργός χρήστης να θεωρηθεί ως ενεργός δηλαδή ότι έχει μεταδώσει στην συγκεκριμένη σχισμή. Στο πίνακα 2.1 δίνονται οι τιμές των P_D και P_F για ένα εύρος τιμών SNR , $K = 16$ και Rayleigh fading κανάλι μεταξύ των χρηστών και του κεντρικού σταθμού βάσης [5].

Αν θεωρήσουμε το χρόνο διαδικασίας επίλυσης μιας σύγκρουσης ως εποχή (time epoch), τότε το μήκος μιας εποχής σε σχισμές καναλιού είναι ίσο με την υπολογιζόμενη από τον κεντρικό σταθμό βάσης πολλαπλότητα σύγκρουσης σε αυτή την εποχή. Η υπολογιζόμενη παραπάνω πολλαπλότητα σύγκρουσης εξαρτάται

- ο από την κατάσταση του κάθε χρήστη στην αρχή της εποχής, κατά πόσο δηλαδή η ουρά του είναι άδεια ή όχι, και
- ο από την εκτίμηση του κεντρικού σταθμού βάσης κατά πόσο ο κάθε χρήστης θεωρείται ενεργός ή όχι.

Συγκεκριμένα, το μήκος μιας εποχής μπορεί να εκφραστεί ως

$$h = \gamma_1 + \gamma_2 \dots + \gamma_J, \quad (4)$$

Στην παραπάνω έκφραση, το γ_i εκφράζει την συνεισφορά του χρήστη i στο μέγεθος της εποχής. Όταν ο χρήστης i είναι ενεργός (με μη κενή ουρά στο ξεκίνημα της εποχής) και ανιχνεύεται σωστά από τον κεντρικό σταθμό βάσης, ή όταν είναι ανενεργός (με κενή ουρά στο ξεκίνημα της εποχής) αλλά ανιχνεύεται λανθασμένα σαν ενεργός από τον κεντρικό σταθμό βάσης λόγω λάθους συναγερμού, τότε το γ_i ισούται με 1, συμβολίζοντας ότι μία σχισμή της εποχής θα πρέπει υπολογιστεί για τον χρήστη i . Σε αντίθετη περίπτωση, το γ_i ισούται με 0. Επειδή οι χρήστες θεωρούνται ανεξάρτητοι μεταξύ τους, τα γ_i είναι i.i.d. τυχαίες μεταβλητές. Έστω π_0 η πιθανότητα η ουρά ενός χρήστη να είναι άδεια στην αρχή μιας εποχής, τότε η συνάρτηση μάζας πιθανότητας της τυχαίας μεταβλητής γ_i είναι :

$$p(\gamma_i = k) = \begin{cases} (1 - \pi_0)P_D + \pi_0P_F & k = 1 \\ (1 - \pi_0)(1 - P_D) + \pi_0(1 - P_F) & k = 0 \end{cases} \quad (5)$$

SNR	10	13	16	20	25
P_D	0.9138	0.9772	0.9949	0.9994	1.0000
P_F	0.0034	0.0051	0.0052	0.0047	0.0053

Πίνακας 2.1: Τιμές των P_D και P_F σε ένα εύρος τιμών SNR.

Η ανίχνευση των ενεργών χρηστών βασίζεται σε training ή identification sequences (ακολουθίες οδήγησης) οι οποίες είναι ενσωματωμένες στα πακέτα των χρηστών. Για να μπορεί να επιτευχθεί η ανίχνευση πρέπει τα training ή identification (ID) sequences να είναι ορθογώνια μεταξύ τους.

Η απαίτηση για ορθογωνιότητα των ID sequences συνιστά το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου. Το μήκος των IDs χρειάζεται να μεγαλώνει γραμμικά με τον αριθμό των χρηστών και όχι λογαριθμικά, όπως γίνεται συχνά σε παραδείγματα διευθυνσιοδότησης.

Τη λύση σε αυτό το πρόβλημα δίνει η εργασία που παρουσιάστηκε στο [6]. Η μέθοδος στο [6] ονομάζεται Blind Network -Assisted Diversity Multiple Access (B-NDMA) και εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι ο πίνακας \mathbf{A} στην σχέση (3) μπορεί με κατάλληλες αλλαγές να παρουσιάσει μια ξεχωριστή δομή (Vandermonde). Με την βοήθεια αυτής της δομής ο σταθμός βάσης μπορεί να διαχωρίσει επιτυχώς τα συγκρουόμενα πακέτα K χρηστών, ύστερα από $K+1$ επαναλήψεις της σύγκρουσης χωρίς να είναι αναγκαία η χρήση training sequences.

Στην δική μας εργασία, για λόγους απλότητας, θα χρησιμοποιήσουμε την τεχνική NDMA, αγνοώντας το γεγονός ότι όσο αυξάνονται οι χρήστες, μειώνεται το μέγεθος πληροφορίας των πακέτων τους. Προσπαθούμε να μελετήσουμε πόσες επιτυχημένες μεταδόσεις θα συμβούν στο δίκτυο κατά τη διάρκεια του χρόνου που ο πρωτεύων χρήστης παραμένει σε ανενεργή κατάσταση (idle state).

2.3. Το υπό εξέταση Σύστημα

2.3.1. Διαμόρφωση του Συστήματος

Υποθέτουμε ένα σύστημα το οποίο αποτελείται από έναν πρωτεύοντα χρήστη (primary user, PU) και K δευτερεύοντες χρήστες (secondary users, SUs). Ο πρωτεύων χρήστης επικοινωνεί με ένα πρωτεύοντα προορισμό (primary destination, D_P) και κάθε δευτερεύων χρήστης πρέπει να στείλει τα δεδομένα του σε ένα κοινό δευτερεύοντα προορισμό (secondary destination, D_S).

Ο χρόνος θεωρείται χρονικά κβαντισμένος (slotted) και η αποστολή κάθε πακέτου γίνεται στην διάρκεια ενός slot. Οι αφίξεις πακέτων πληροφορίας σε κάθε χρήστη υποτίθενται ανεξάρτητες και στάσιμες Bernoulli διαδικασίες με μέσο ρυθμό αφίξεων λ_P (packets per slot) για τον πρωτεύοντα χρήστη και λ_{S_i} (packets per slot) για κάθε δευτερεύοντα χρήστη $i = 1, 2, \dots, K$. Τα νέα πακέτα καταφθάνουν στις

ουρές των χρηστών στην αρχή κάθε slot, πριν δηλαδή την στιγμή που μπορεί να αρχίσει η αποστολή τους. Έτσι ένα πακέτο πληροφορίας μπορεί να φτάσει στο πομπό στην αρχή ενός slot και να μεταδοθεί από αυτόν στο ίδιο slot. Αν ένα πακέτο ληφθεί λάθος στον προορισμό του, πρέπει να αποσταλεί ξανά μέχρι να αποκωδικοποιηθεί επιτυχημένα. Η διαδικασία επαναμετάδοσης είναι βασισμένη σε Acknowledgement/Negative-acknowledgement (ACK/NACK) μηχανισμό, στον οποίον μικρού μήκους πακέτα μεταδίδονται χωρίς λάθη (error free) από τους προορισμούς στο τέλος κάθε slot με σκοπό να ενημερώσουν τους πομπούς του δικτύου για την κατάσταση αποδοχής των πακέτων που μετέδωσαν στο ίδιο slot.

Τα πακέτα των δευτερευόντων χρηστών θεωρούνται μικρότερου μήκους από αυτά του πρωτεύοντος χρήστη, τόσο μικρότερου ώστε οι δευτερεύοντες χρήστες να προλαβαίνουν να ακούνε το κανάλι με σκοπό να βρουν ανενεργές σχισμές (idle slots) και στην συνέχεια να προλάβουν να μεταδώσουν το πακέτο τους, στην υπολειπόμενη διάρκεια μιας ανενεργής σχισμής (idle slot).

Οι απαντήσεις (ACK/NACK) του πρωτεύοντος και του δευτερευόντος προορισμού μπορούν να μεταδοθούν στο τέλος ενός slot χωρίς να συγκρουστούν.

Όλοι οι χρήστες (πρωτεύοντες και δευτερεύοντες) έχουν ουρές (buffers) άπειρης χωρητικότητας για να αποθηκεύουν τα εισερχόμενα πακέτα, όπου Q_P συμβολίζει την πρωτεύουσα ουρά και Q_{S_i} την ουρά του χρήστη i (με $i \in [1, K]$).

Ο πρωτεύων χρήστης μεταδίδει πακέτα πληροφορίας στον πρωτεύοντα προορισμό όποτε η ουρά του δεν είναι κενή. Όταν η ουρά του πρωτεύοντος χρήστη είναι κενή, τότε ο πρωτεύων χρήστης θεωρείται ανενεργός (idle) και οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να μεταδώσουν τα πακέτα πληροφορίας τους προς τον δευτερεύοντα προορισμό. Μια σχισμή κατά την οποία ο πρωτεύων χρήστης θεωρείται ανενεργός ονομάζεται ανενεργή σχισμή (idle slot). Το πρόβλημα είναι ποιός δευτερεύων χρήστης θα είναι αυτός ο οποίος θα χρησιμοποιήσει την δεδομένη ανενεργή σχισμή (idle slots) για να μεταδώσει το πακέτο πληροφορίας του. Στην βιβλιογραφία, έχουν προταθεί πολλές λύσεις σχετικά με ευκαιριακές μεταδόσεις. Η δική μας προσέγγιση είναι να χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο NDMA.

Έτσι όταν ο πρωτεύων χρήστης καταστεί ανενεργός, όλοι οι δευτερεύοντες χρήστες, οι οποίοι έχουν στην ουρά τους πακέτο πληροφορίας προς μετάδοση θα προσπαθήσουν να εκμεταλλευτούν την ανενεργή σχισμή (idle slot) και θα μεταδώσουν ταυτόχρονα. Αν m δευτερεύοντες χρήστες συγκρουστούν τότε θα προσπαθήσουμε να επιλύσουμε την σύγκρουση χρησιμοποιώντας NDMA, υποχρεώνοντας τους m δευτερεύοντες χρήστες να επαναμεταδώσουν τα πακέτα τους στις επόμενες $m-1$ ανενεργές σχισμές (idle slots). Κατά τη διάρκεια των παραπάνω ανενεργών σχισμών (idle slots), οι υπόλοιποι δευτερεύοντες χρήστες οι οποίοι δεν πήραν μέρος στην αρχική σύγκρουση, δεν έχουν το δικαίωμα να μεταδώσουν τυχόν δικά τους νέα πακέτα πληροφορίας. Τη στιγμή που θα έχει επιλυθεί η παραπάνω σύγκρουση, m δευτερεύοντες χρήστες θα έχουν μεταδώσει από ένα πακέτο ο

καθένας μέσα σε m ανενεργές σχισμές (idle slots). Με τον τρόπο αυτό οι δευτερεύοντες χρήστες στέλνουν μόνο κατά τη διάρκεια που ο πρωτεύων χρήστης παραμένει ανενεργός και διαμοιράζονται τις ανενεργές σχισμές (idle slots), αξιοποιώντας τις κατά 100%.

2.3.2. Το Κανάλι

Υποθέτουμε ότι έχουμε άψογο sensing του φάσματος (πιθανότητα ανίχνευσης $P_D = 1$ και πιθανότητα false alarm $P_F = 0$) το οποίο επιτρέπει στο ευφυές δίκτυο να έχει πρόσβαση στο κανάλι μόνο όταν ο πρωτεύων χρήστης είναι ανενεργός.

Ο κύριος στόχος της εργασίας είναι να προτείνει και να αναλύσει την απόδοση πρωτοκόλλων συνεργασίας για την υποστήριξη των μεταδόσεων στο ευφυές δίκτυο. Προβλήματα με φασματικό sensing και σενάρια όπου ένας δευτερεύων χρήστης παρεμβάλλει στη μετάδοση του πρωτεύοντος χρήστη είναι πέρα από τον σκοπό αυτής της εργασίας.

2.3.3. Ο Μηχανισμός

Στην αρχή κάθε χρονικής σχισμής οι δευτερεύοντες χρήστες ακούνε το κανάλι με σκοπό να προσδιορίσουν αν ο πρωτεύων χρήστης μεταδίδει ή όχι. Στη περίπτωση όπου ο πρωτεύων χρήστης μεταδίδει οι δευτερεύοντες χρήστες δεν κάνουν τίποτα. Σε αντίθετη περίπτωση, όταν ο πρωτεύων χρήστης είναι ανενεργός, όλοι οι ενεργοί δευτερεύοντες χρήστες προσπαθούν να μεταδώσουν το πακέτο πληροφορίας τους στον κοινό προορισμό τους. Τα πακέτα αυτά συγκρούονται κατά τη διάρκεια λήψης τους στον δευτερεύοντα προορισμό και σε αυτό το χρονικό σημείο εφαρμόζεται η μέθοδος NDMA. Ο δευτερεύων προορισμός επεξεργάζεται την συγκρουόμενη πληροφορία και υπολογίζει τον βαθμό (πολλαπλότητα) της σύγκρουσης, δηλαδή το πόσοι χρήστες συγκρούστηκαν μεταξύ τους. Έπειτα στέλνει αυτή τη πληροφορία πίσω στους δευτερεύοντες χρήστες για να τους ειδοποιήσει σχετικά με τον αριθμό των επιπλέον επαναμεταδόσεων που απαιτούνται για να αποκωδικοποιηθεί η πληροφορία.

Έτσι αν m δευτερεύοντες χρήστες συγκρουστούν κατά τη διάρκεια ενός idle slot του πρωτεύοντος χρήστη τότε θα μεταδώσουν ξανά την πληροφορία τους και στα επόμενα $m-1$ idle slots του πρωτεύοντος χρήστη. Όσοι δευτερεύοντες χρήστες δεν είχαν πάρει μέρος στην αρχική σύγκρουση απαγορεύεται να πάρουν μέρος και στις επόμενες μέχρις ότου να επιλυθεί η αρχική σύγκρουση. Οι δευτερεύοντες χρήστες οι όποιοι πήραν μέρος στην αρχική σύγκρουση ονομάζονται ενεργοί δευτερεύοντες χρήστες (K_{eff}).

2.4. Η Περίπτωση Δυναμικά Μεταβαλλόμενου Αριθμού Δευτερευόντων Χρηστών

Στη περίπτωση που ο αριθμός των δευτερευόντων χρηστών αλλάζει δυναμικά στην διάρκεια του χρόνου θα πρέπει να υπάρχει ένας μηχανισμός ο οποίος θα επιτρέπει

στους νέους δευτερεύοντες χρήστες του συστήματος να ειδοποιούνται για το πότε μπορούν να μεταδώσουν τα πακέτα πληροφορίας τους κατά τη διάρκεια μιας ανενεργούς σχισμής (idle slot) του πρωτεύοντος χρήστη και έτσι να πάρουν μέρος σε μια NDMA επίλυση σύγκρουσης. Μια λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η ακόλουθη. Στο τέλος της διαδικασίας επίλυσης μιας σύγκρουσης ο δευτερεύων προορισμός πληροφορεί όλους τους δευτερεύοντες χρήστες για την επιτυχημένη αποκωδικοποίηση των πακέτων τους. Έτσι, όλοι οι ανενεργοί δευτερεύοντες χρήστες που βρίσκονταν στο σύστημα ενημερώνονται ότι η επόμενη σχισμή (idle slot) του πρωτεύοντος χρήστη είναι ελεύθερη για μεταδόσεις πακέτων από τους τότε ενεργούς δευτερεύοντες χρήστες. Αν όμως ένας δευτερεύων χρήστης εισέλθει στο σύστημα μετά την ανενεργή σχισμή (idle slot) στην οποία τελείωσε η επίλυση μιας σύγκρουσης και πριν την επόμενη ανενεργή σχισμή (idle slot) όπου θα ξεκινάει μια νέα σύγκρουση, δεν είναι σε θέση να γνωρίζει ότι έχει το δικαίωμα να μεταδώσει και αυτός το πακέτο του στην επόμενη ανενεργή σχισμή (idle slot). Μια λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι ο δευτερεύων προορισμός να στέλνει πληροφορία σε κάθε slot σχετικά με την κατάσταση της τρέχουσας NDMA σύγκρουσης (εάν υφίσταται τέτοια).

2.5. Αναλυτικές Εκφράσεις για τις Μέσες Καθυστερήσεις

Ο μέσος χρόνος αναμονής ανενεργής σχισμής (idle slot) είναι αντιστρόφως ανάλογος με το 1 μείον το ρυθμό άφιξης πακέτων στον πρωτεύοντα χρήστη

$$W_{Idle} = \frac{1}{1-\lambda_p}.$$

Ο ελάχιστος χρόνος που χρειάζεται ο δευτερεύων χρήστης για να αποκτήσει πρόσβαση στο σύστημα είναι:

$$W_{eff_{min}} = 1.$$

Πιο συγκεκριμένα, ο ελάχιστος χρόνος πρόσβασης αντιστοιχεί στην περίπτωση που ο δευτερεύων χρήστης μπαίνει στο σύστημα και ακούει από τον δευτερεύοντα προορισμό ότι καμιά σύγκρουση δεν λαμβάνει χώρα εκείνη την στιγμή και την αμέσως επόμενη χρονική σχισμή ο πρωτεύων χρήστης παραμένει ανενεργός και δεν μεταδίδει πακέτο.

Ο μέγιστος χρόνος πρόσβασης για έναν δευτερεύοντα χρήστη αντιστοιχεί στην περίπτωση που το πακέτο του έρχεται την στιγμή που ξεκινά μια σύγκρουση στην οποία δεν έχει προλάβει να πάρει μέρος, οπότε αυτός πρέπει να περιμένει να τελειώσει η σύγκρουση αυτή και μετά να μεταδώσει το πακέτο του στην επόμενη ανενεργή σχισμή (idle slot). Αυτός ο χρόνος είναι ίσος με:

$$\begin{aligned}
W_{effmax} &= W_{Idle} \cdot (K_{eff} - 1) + W_{Idle} = \frac{1}{1 - \lambda_p} \cdot (K_{eff} - 1) + \frac{1}{1 - \lambda_p} \\
&= \frac{1}{1 - \lambda_p} \cdot K_{eff}
\end{aligned}$$

Αν υποθέσουμε ότι η πιθανότητα ενός χρήστη να εισέλθει στο σύστημα σε οποιαδήποτε σχισμή κατά τη διάρκεια μιας NDMA σύγκρουσης είναι ομοιόμορφα κατανομημένη τότε οι μέσες καθυστερήσεις ενός χρήστη με νέο πακέτο για μετάδοση μέχρι να αποκτήσει πρόσβαση στο σύστημα μπορούν να προσεγγιστούν από τον μέσο όρο των παραπάνω δύο περιπτώσεων:

$$W_{eff} = \frac{W_{effmin} + W_{effmax}}{2} = \frac{1 + \frac{1}{1 - \lambda_p} \cdot K_{eff}}{2}$$

Ο μέσος χρόνος μετάδοσης ενός πακέτου δευτερεύοντος χρήστη από τη στιγμή που λαμβάνει μέρος σε μια σύγκρουση είναι ίσος με:

$$W_{send} = 1 + (K_{eff} - 1) \cdot W_{Idle} = 1 + (K_{eff} - 1) \cdot \left(\frac{1}{1 - \lambda_p} \right)$$

Ειδικότερα, χρειαζόμαστε 1 σχισμή για την πρώτη μετάδοση του πακέτου και ο χρόνος $(K_{eff} - 1) \cdot \left(\frac{1}{1 - \lambda_p} \right)$ είναι ο μέσος χρόνος για να συμβούν ακόμη $K_{eff} - 1$ ανενεργές σχισμές (idle slots) ώστε να επιλυθεί η σύγκρουση.

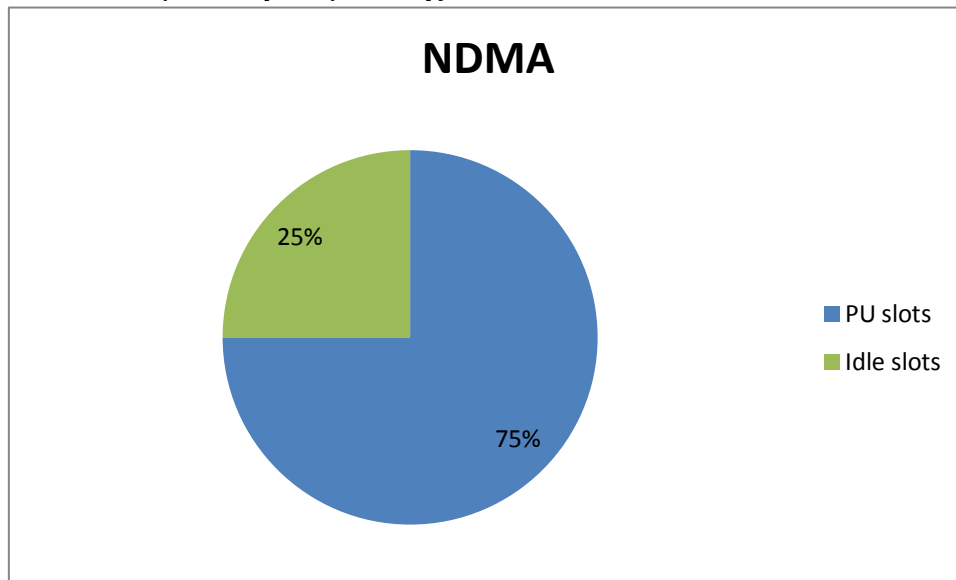
2.6. Προσομοίωση

Στο παρακάτω παράδειγμα ο πρωτεύων χρήστης έχει νέα πακέτα προς μετάδοση 75% του χρόνου. Κάθε φορά που έχει πακέτο πληροφορίας την ουρά του, το μεταδίδει άμεσα στο πρώτο slot που θα συναντήσει. Η πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης ισούται με 1. Επομένως οι μεταδόσεις του πρωτεύοντος είναι πάντα επιτυχημένες. Το υπόλοιπο 25% του χρόνου του καναλιού οι $K = 5$ δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να μεταδώσουν τα πακέτα πληροφορίας τους. Υποθέτουμε ότι όλοι οι δευτερεύοντες χρήστες έχουν πάντα πακέτα στην ουρά τους προς μετάδοση, οπότε $K_{eff} = K$ σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Αριθμός Κύκλων Προσομοίωσης: 10

Χρόνος Προσομοίωσης: 10.000.000 slots

2.6.1. Αποτελέσματα Προσομοίωσης



Σχήμα 2.2: Τα ποσοστά του χρόνου που ο πρωτεύων χρήστης μεταδίδει νέα πακέτα (PU slots) και παραμένει ανενεργός (Idle slots)

$$W_{Idle} = 4 \text{ slots}$$

$$W_{send} = 15 \text{ slots}$$

2.6.2. Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα στο Σχήμα 2.2 καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι:

Το Throughput του πρωτεύοντος χρήστη θα ισούται με 0.75. Με τη ιδανική χρήση NDMA οι δευτερεύοντες χρήστες έχουν την ευκαιρία να μεταδίδουν τα πακέτα τους στις ανενεργές σχισμές (idle slots). Καμία ανενεργή σχισμή (idle slot) του καναλιού δεν πάει χαμένη και σε κάθε εποχή επίλυσης σύγκρουσης δευτερευόντων χρηστών K πακέτα μεταδίδονται σε K ανενεργές σχισμές (idle slots). Έτσι, το συνολικό Throughput των δευτερευόντων χρηστών ισούται με $TH_{sum(S)} = 0,25$ δηλαδή ίσο με το ποσοστό του χρόνου που ο πρωτεύων χρήστης μένει ανενεργός. Το συνολικό Throughput των δευτερευόντων χρηστών χωρίζεται ίσα στους K δευτερεύοντες χρήστες κι έτσι κάθε δευτερεύων χρήστης έχει Throughput ίσο με $TH_{S_i} = \frac{TH_{sum(S)}}{K}$.

Ακόμη οι πειραματικοί μέσοι χρόνοι αναμονής ανενεργής σχισμής (W_{Idle}) και ενός πακέτου δευτερεύοντος χρήστη από τη στιγμή που λαμβάνει μέρος σε μια σύγκρουση (W_{send}) που παρουσιάζονται παραπάνω συμπίπτουν με τους θεωρητικά υπολογιζόμενους.

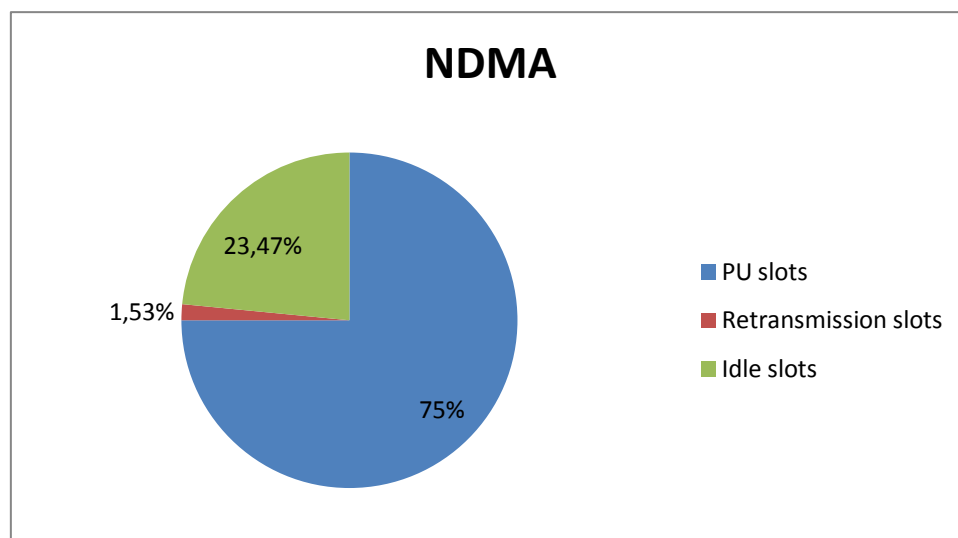
Ο πρωτεύων χρήστης αφήνει ελεύθερο το κανάλι για τους δευτερεύοντες χρήστες σε ποσοστό $1 - \lambda_p$ του χρόνου. Αυτόν τον χρόνο του καναλιού μοιράζονται οι δευτερεύοντες χρήστες που βρίσκονται στο σύστημα. Επομένως αν K δευτερεύοντες χρήστες βρίσκονται στο σύστημα και υποθέσουμε ότι είναι πανομοιότυποι, ο μέγιστος ρυθμός αφίξεων πακέτων σε αυτούς θα πρέπει να είναι

μικρότερος από $\frac{1-\lambda_P}{K}$, έτσι ώστε τα πακέτα των δευτερευόντων χρηστών να μεταδίδονται με πεπερασμένες μέσες καθυστερήσεις.

Χρησιμοποιώντας το NDMA έχουμε την δυνατότητα να εκμεταλλευτούμε όλες ανενεργές σχισμές (idle slots) του πρωτεύοντος χρήστη χωρίς να παρεμβάλουμε στην μετάδοση του. Το σημαντικό σε αυτή την περίπτωση είναι ότι οι δευτερεύοντες χρήστες δεν χρειάζεται να έχουν καμία γνώση ο ένας για τον άλλον, ούτε να έχουν α priori γνώσεις σχετικά με τον πρωτεύοντα χρήστη και τα μεταξύ τους κανάλια (γνώσεις που θα ήταν απαραίτητες σε ένα underlay μοντέλο ή σε κάποιο σενάριο interweave στο οποίο οι δευτερεύοντες χρήστες συντονίζονται από έναν κεντρικό κόμβο). Επιπλέον, η μέθοδος που βασίζεται στην τεχνική NDMA εξασφαλίζει την ισότιμή μεταχείριση των δευτερευόντων χρηστών.

2.7. Εισαγωγή Πιθανότητας Εσφαλμένης Μετάδοσης Πρωτεύοντος Πακέτου

Σε περίπτωση που η πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης του πρωτεύοντος χρήστη είναι μικρότερη από 1 και ο πρωτεύων χρήστης έχει νέα πακέτα για μετάδοση 75% του χρόνου, τότε οι ανενεργές σχισμές (idle slots) δεν αποτελούν το 25% του χρόνου καθώς ο πρωτεύων χρήστης λόγω της πιθανότητας σφάλματος απασχολεί το κανάλι περισσότερο από 75% του χρόνου. Το υπόλοιπο ποσοστό του χρόνου του καναλιού οι $K = 5$ δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να μεταδώσουν τα πακέτα πληροφορίας τους. Υποθέτουμε ότι όλοι οι δευτερεύοντες χρήστες έχουν πάντα πακέτα στην ουρά τους προς μετάδοση, οπότε $K_{eff} = K$ σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.



Σχήμα 2.3: Τα ποσοστά του χρόνου που ο πρωτεύων χρήστης μεταδίδει νέα πακέτα (PU slots), παραμένει ανενεργός (Idle slots) και επαναμεταδίδει (Retransmission slots).

$$W_{Idle} = 4.26 \text{ slots}$$

$$W_{send} = 18.04 \text{ slots}$$

Σύμφωνα με το Σχήμα 2.3, στην περίπτωση που η πιθανότητα εσφαλμένης μετάδοσης ισούται με $P_e = 0,02$ (2%) και ο πρωτεύων χρήστης έχει ρυθμό αφίξεων ίσον με $\lambda_p = 0,75$, τότε ο πρωτεύων χρήστης απασχολεί το κανάλι για μετάδοση νέων πακέτων 75% του χρόνου και επιπλέον 1,53% του χρόνου για επαναμετάδοση των μη επιτυχημένα μεταδοθέντων πακέτων του. Επομένως συνολικά ο πρωτεύων χρήστης απασχολεί το κανάλι 76,53% του χρόνου. Με αυτό τον τρόπο, οι ανενεργές σχισμές (idle slots) αποτελούν το 23,47% του χρόνου και οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να επιτύχουν μέγιστο συνολικό Throughput ίσο με 0,2347. Επίσης οι πειραματικοί μέσοι χρόνοι αναμονής ανενεργής σχισμής (idle slot) (W_{Idle}) και ενός πακέτου δευτερεύοντος χρήστη από τη στιγμή που λαμβάνει μέρος σε μια σύγκρουση (W_{send}) που παρουσιάζονται παραπάνω δεν συμπίπτουν με τους θεωρητικούς καθώς στους θεωρητικούς δεν έχει υπολογιστεί η πιθανότητα εσφαλμένης μετάδοσης (P_e).

Στην συνέχεια της εργασίας μας σκοπός μας είναι, να καταφέρουμε με κάποιο τρόπο οι δευτερεύοντες χρήστες να εκμεταλλευτούν τα slots που περιέχουν αναμεταδόσεις του πρωτεύοντος χρήστη ώστε να ανακτήσουν σημαντικό μέρος του Throughput που έχασαν λόγω της πιθανότητας εσφαλμένης μετάδοσης του πρωτεύοντος χρήστη. Στόχος στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι το συνολικό Throughput των δευτερευόντων χρηστών να πλησιάσει όσο το δυνατόν στο 0,25.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Dirty Paper Coding (DPC)

3.1. Εισαγωγή

Στις τηλεπικοινωνίες, το dirty paper coding είναι μια τεχνική για αποδοτικές μεταδόσεις ψηφιακών δεδομένων μέσα από ένα κανάλι που υπόκειται σε παρεμβολή γνωστή στον πομπό. Η τεχνική αποτελείται από κωδικοποίηση των δεδομένων πριν την αποστολή τους με σκοπό να ακυρώσουν την επίδραση της παρεμβολής.

Το όνομα της μεθόδου αυτής πηγάζει από την ακόλουθη σκέψη:

Φανταστείτε ένα φύλο χαρτί που είναι μερικώς λερωμένο με ανεξάρτητα βρώμικα σημεία, κανονικής κατανομημένης έντασης τα οποία ο αναγνώστης δεν μπορεί να τα ξεχωρίσει από το μελάνι του συγγραφέα. Υπό κάποια έννοια, το πρόβλημα να γράψουμε σε αυτό το φύλο χαρτί είναι ανάλογο με το να στείλουμε πληροφορία μέσα από ένα κανάλι. Το χαρτί, το μελάνι και η βρωμιά αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα το κανάλι, την πληροφορία που στέλνουμε και την παρεμβολή. Στην περίπτωση όπου ο συγγραφέας (πομπός) γνωρίζει τις θέσεις και την ένταση των λεκέδων (παρεμβολή), μπορεί να διαμορφώσει με τέτοιο τρόπο την γραφή του έτσι ώστε να αποφεύγει τα βρώμικα σημεία και να γράφει ανάμεσα. Έτσι ο αναγνώστης (δέκτης) μπορεί να διαβάσει το αρχικό μήνυμα επιτυχημένα.

Η βασική σκέψη είναι ότι ο βαθμός της παρεμβολής επηρεάζει και το μέγεθος της καθαρής πληροφορίας που μπορούμε να στείλουμε. Όσο πιο μεγάλη η παρεμβολή, τόσο μικρότερη πληροφορία μπορούμε να στείλουμε. Ο Costa έδειξε το 1983 [7] ότι μπορούμε να στείλουμε το ίδιο μέγεθος πληροφορίας σε ένα λερωμένο χαρτί με το μέγεθος πληροφορίας που θα στέλναμε σε ένα καθαρό.

Από την σκοπιά της θεωρίας πληροφορίας, το dirty paper coding επιτυγχάνει την χωρητικότητα του καναλιού χωρίς κυρώσεις στην ενεργεία και χωρίς να χρειάζεται ο δέκτης να έχει γνώση για την κατάσταση της παρεμβολής.

3.2. Εισάγοντας το DPC στο Σύστημα μας

Ας υποθέσουμε ότι κάθε δευτερεύων χρήστης έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύει το τελευταίο πακέτο του πρωτεύοντος χρήστη που έχει ακούσει (δηλαδή λάβει επιτυχημένα), το οποίο όμως δεν μεταδόθηκε επιτυχημένα στον πρωτεύοντα προορισμό.

Στο μοντέλο μας έχουμε εισάγει την πιθανότητα αποτυχημένης μετάδοσης του πακέτου του πρωτεύοντος χρήστη (P_e). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα κάποια από τα πακέτα του πρωτεύοντος χρήστη να μην φτάνουν σωστά στον πρωτεύοντα

προορισμό, είτε λόγω θορύβου είτε λόγω άλλων παραγόντων. Σαν αποτέλεσμα, ο πρωτεύων χρήστης αναγκάζεται να επαναμεταδώσει τα πακέτα αυτά μέχρις ότου αποκωδικοποιηθούν επιτυχώς στον πρωτεύοντα προορισμό. Με αυτό το τρόπο ο πρωτεύων χρήστης απασχολεί το κανάλι για περισσότερο χρόνο και ως φυσικό επακόλουθο το Throughput των δευτερευόντων χρηστών μειώνεται. Το μέγιστο Throughput που μπορούν να πετύχουν οι δευτερεύοντες χρήστες μπορεί να προσεγγιστεί από την έκφραση $1 - (\lambda_p + \lambda_p \cdot P_e)$. Είναι σημαντικό να βρεθεί ένας τρόπος να ανακτήσουμε ολόκληρο αν είναι δυνατό το χαμένο Throughput των δευτερευόντων χρηστών μέσω της αξιοποίησης των σχισμών επαναμετάδοσης (retransmission slots), εκμεταλλευόμενοι το γεγονός ότι ο πρωτεύων χρήστης σε μια σχισμή επαναμετάδοσης (retransmission slot) επαναλαμβάνει την μετάδοση του πακέτου που έστειλε προηγουμένως την οποία μπορεί να έχουν λάβει σωστά οι δευτερεύοντες χρήστες. Σε μια τέτοια περίπτωση οι δευτερεύοντες χρήστες γνωρίζουν την πληροφορία που περιέχεται στο πακέτο του πρωτεύοντος χρήστη και μπορούν να χρησιμοποιήσουν τεχνικές overlay στην μετάδοσή τους.

3.3. Διαμόρφωση Συστήματος

3.3.1. Μηχανισμός

Κάθε δευτερεύων χρήστης υποθέτουμε ότι έχει τη δυνατότητα να ακούσει όλη τη μετάδοση του πρωτεύοντος χρήστη από τη στιγμή που κάνει sense το slot καθώς επίσης να ακούσει το σήμα ανάδρασης από τον πρωτεύοντα προορισμό. Έτσι αν ο πρωτεύων χρήστης χρησιμοποιεί μια κωδικοποίηση γνωστή στους χρήστες του ευφυούς δικτύου τότε οι δευτερεύοντες χρήστες είναι σε θέση να λάβουν το πακέτο πληροφορίας του πρωτεύοντος χρήστη. Οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν να έχουν στη μνήμη τους ουρά χωρητικότητας ίση με το μέγεθος ενός πακέτου του πρωτεύοντος χρήστη, με σκοπό να αποθηκεύουν το τελευταίο πακέτο που μετέδωσε ο πρωτεύων χρήστης.

Σε περίπτωση όπου η λήψη του πακέτου στον πρωτεύοντα προορισμό δεν ήταν επιτυχής, ο πρωτεύων χρήστης σύμφωνα με το πρωτόκολλο θα προσπαθήσει να επαναμεταδώσει το πακέτο του την αμέσως επόμενη χρονική σχισμή (στο επόμενο slot). Έτσι γνωρίζοντας την πληροφορία την οποία πρόκειται να μεταδώσει ο πρωτεύων χρήστης, το ευφύες δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιήσει τεχνικές overlay.

Η μέθοδος που θα χρησιμοποιήσουμε για να πετύχουμε overlay cognitive μεταδόσεις είναι η Dirty Paper Coding (DPC). Δικαίωμα χρήσης DPC θα έχουν μόνο όσοι δευτερεύοντες χρήστες έχουν πάρει ήδη μέρος σε μια σύγκρουση κατά τη διάρκεια μιας σχισμής που ο πρωτεύων χρήστης δεν μεταδίδει (ακόμα κι αν μετέδωσε μόνο ένας δευτερεύων χρήστης και δεν υπήρξε NDMA σύγκρουση) και γνωρίζουν τον αριθμό των ενεργών δευτερευόντων χρηστών μέσα από την πολλαπλότητα της NDMA σύγκρουσης. Θεωρώντας ως a priori γνώση την παρεμβολή την οποία θα προκαλέσει η μετάδοση του πρωτεύοντος χρήστη, ο δευτερεύων χρήστης μπορεί να κωδικοποιήσει με τέτοιο τρόπο το πακέτο πληροφορίας ώστε να ακυρώνεται αυτή η

παρεμβολή. Βέβαια αυτό δεν σημαίνει ότι ο δευτερεύων χρήστης δεν θα παρεμβάλει στην μετάδοση του πρωτεύοντος σε αυτή την περίπτωση. Σκοπός μας είναι να μεγιστοποιήσουμε το Throughput των δευτερευόντων χρηστών χωρίς να μειώσουμε σημαντικά την ποιότητα εξυπηρέτησης (Quality of Service) του πρωτεύοντος χρήστη, δηλαδή να μην καθιστούμε τις μεταδόσεις του ανεπιτυχείς λόγω ταυτόχρονης μετάδοσης των δευτερευόντων χρηστών.

Στην δική μας μελέτη θεωρούμε ιδανικά ότι η χρήση DPC μετάδοσης από έναν μόνο δευτερεύοντα χρήστη δεν ακυρώνει την ταυτόχρονη επαναμετάδοση του πρωτεύοντος χρήστη. Ποιος δευτερεύων χρήστης θα είναι αυτός που θα μεταδώσει ταυτόχρονα με τον πρωτεύοντα χρήστη χρησιμοποιώντας DPC είναι το πρόβλημα που καλούμαστε να λύσουμε.

Κατά συνέπεια, πρέπει να σχεδιάσουμε έναν μηχανισμό με τον οποίο σε κάθε επαναμετάδοση του πρωτεύοντος χρήστη, θα επιλέγεται μόνο ένας δευτερεύων χρήστης. Η ταυτόχρονη μετάδοση δύο ή περισσότερων δευτερευόντων χρηστών κατά τη διάρκεια της μετάδοσης του πρωτεύοντος χρήστη θεωρούμε ότι έχει καταστρεπτικές συνέπειες για όλες τις μεταδόσεις. Σε περίπτωση που κανένας δευτερεύων χρήστης δεν χρησιμοποιήσει DPC η μετάδοση του πρωτεύοντος δεν επηρεάζεται, βέβαια δεν υπάρχει βελτίωση στο συνολικό Throughput των δευτερευόντων χρηστών.

3.3.2. NDMA Σύγκρουση και DPC Σύγκρουση

Σε περίπτωση που κατά τη διάρκεια χρήσης DPC δύο ή παραπάνω δευτερεύοντες χρήστες επιλέξουν να μεταδώσουν, τότε υπάρχει σύγκρουση στον δευτερεύοντα προορισμό. Σε αυτή την περίπτωση, ο δευτερεύων προορισμός δεν έχει τρόπο να ξεχωρίσει αν η σύγκρουση που έγινε οφείλεται σε πολλαπλούς χρήστες που χρησιμοποιούν DPC ή αν πρόκειται για μια NDMA σύγκρουση (δηλαδή μια σύγκρουση στην οποία εμπλέκονται μόνο δευτερεύοντες χρήστες ενώ ταυτόχρονα ο πρωτεύων χρήστης είναι ανενεργός). Έτσι είναι αναγκαίο να σχεδιαστεί ένας μηχανισμός ο οποίος θα δίνει την δυνατότητα στον δευτερεύοντα προορισμό να μπορεί να ξεχωρίζει το είδος των συγκρούσεων.

Για τον λόγο αυτό είναι αναγκαίο στο ασύρματο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο ο δευτερεύων προορισμός να μπορεί να ακούει τις μεταδόσεις του πρωτεύοντος προορισμού. Με αυτό το τρόπο, κάθε φορά που ο πρωτεύων προορισμός θα στέλνει ένα μήνυμα στο πρωτεύοντα χρήστη ότι το πακέτο του δεν στάλθηκε επιτυχημένα, ο δευτερεύων προορισμός θα γνωρίζει ότι η επόμενη χρονική σχισμή στο σύστημα θα χρησιμοποιηθεί για την επαναμετάδοση του πακέτου του πρωτεύοντος χρήστη. Αυτό όμως γίνεται μόνο στην περίπτωση όπου το πακέτο πληροφορίας του πρωτεύοντος χρήστη φτάνει στον πρωτεύοντα προορισμό χτυπημένο από θόρυβο.

Στην περίπτωση όπου ο πρωτεύων χρήστης μεταδώσει ένα πακέτο πληροφορίας το οποίο δεν θα φτάσει ποτέ στο πρωτεύοντα προορισμό τότε, ο πρωτεύων προορισμός δεν θα απαντήσει αρνητικά (NACK) στον πρωτεύοντα προορισμό. Παρόλα αυτά, και σε αυτή την περίπτωση η επόμενη χρονική σχισμή θα αποτελεί σχισμή επαναμετάδοσης (retransmission slot) πακέτου πληροφορίας από τον πρωτεύοντα χρήστη και άρα χρήσης DPC από τους δευτερεύοντες χρήστες. Πρέπει όμως να βρεθεί ένας τρόπος ώστε να μπορεί ο δευτερεύων προορισμός να αναγνωρίζει σωστά και αυτές τις χρονικές στιγμές. Έτσι άλλη μια αναγκαία προϋπόθεση για το σύστημα μας είναι ότι ο δευτερεύων προορισμός πρέπει να είναι σε θέση να ακούει πότε ο πρωτεύων χρήστης μεταδίδει πακέτο πληροφορίας και κατά πόσο η απάντηση του πρωτεύοντος προορισμού είναι θετική ή αρνητική ή δεν υπάρχει απάντηση.

Υπάρχει τέλος και η περίπτωση ο πρωτεύων προορισμός να έχει ακούσει την μετάδοση του πρωτεύοντος χρήστη, να έχει απαντήσει θετικά αλλά να μην έχει καταφέρει να ακούσει ο δευτερεύων προορισμός την απάντηση αυτή. Σε αυτή την περίπτωση ο δευτερεύων προορισμός θα κάνει την εσφαλμένη υπόθεση ότι η επόμενη χρονική σχισμή είναι σχισμή χρήσης DPC. Στην περίπτωση που τελικά στην επόμενη χρονική στιγμή ο πρωτεύων χρήστης παραμείνει ανενεργός και οι δευτερεύοντες χρήστες μεταδώσουν με αποτέλεσμα μια NDMA σύγκρουση, τότε ο δευτερεύων προορισμός θα θεωρήσει εσφαλμένα ότι πρόκειται για μια DPC σύγκρουση και θα αγνοήσει την πληροφορία της σύγκρουσης οδηγώντας έτσι σε αδυναμία επίλυσης της σύγκρουσης αυτής.

Τελικά συμπεραίνουμε ότι ο δευτερεύων προορισμός χρειάζεται να ξέρει μόνο αν πρωτεύων προορισμός έχει απαντήσει αρνητικά σχετικά με την αποκωδικοποίηση ενός πακέτου που μεταδόθηκε από το πρωτεύοντα χρήστη. Στην περίπτωση που ο δευτερεύων προορισμός δεν είναι σε θέση να ακούσει την απάντηση του πρωτεύοντος προορισμού, τότε για οποιαδήποτε σύγκρουση κι αν συμβεί στην επόμενη χρονική σχισμή, θα ενημερώσει τους δευτερεύοντες χρήστες ότι θεωρεί την σύγκρουση χαμένη πληροφορία (επειδή δεν ξέρει τι είδους είναι) και θα τους ζητήσει να ξανασυγκρουστούν ακόμα μια φορά για την επίλυση μιας NDMA σύγκρουσης σε περίπτωση που η χαμένη σχισμή αποτελούσε ανενεργή σχισμή (idle slot).

Έτσι είναι πιθανό μια NDMA σύγκρουση να πάρει παραπάνω από Κ ανενεργές σχισμές (idle slots) για να επιλυθεί αλλά σίγουρα το σύστημά μας δεν θα οδηγηθεί τότε σε αποσυντονισμό και σε κατάρρευση από μια λανθασμένη θεώρηση.

3.4. Περίπτωση Δυναμικά Μεταβαλλόμενου Αριθμού Δευτερευόντων Χρηστών

Στη περίπτωση που ο αριθμός των δευτερευόντων χρηστών αλλάζει δυναμικά στην διάρκεια του χρόνου θα πρέπει να υπάρχει ένας μηχανισμός ο οποίος θα επιτρέπει στους νέους δευτερεύοντες χρήστες του συστήματος να ειδοποιούνται

για το πότε μπορούν να μεταδώσουν τα πακέτα πληροφορίας τους κατά τη διάρκεια μιας σχισμής επαναμετάδοσης (retransmission slot) του πρωτεύοντος χρήστη και δυνητικά να πάρουν μέρος σε μια DPC μετάδοση.

Αρχικά ακολουθούμε την ίδια τεχνική με το προηγούμενο κεφάλαιο σχετικά με το πότε μπορεί ένας χρήστης να ξεκινήσει να παίρνει μέρος σε NDMA μεταδόσεις. Από την στιγμή που ένας χρήστης έχει πάρει μέρος σε μια NDMA μετάδοση, αυτό σημαίνει ότι θεωρείται ενεργός δευτερεύων χρήστης και η ύπαρξή του έχει γίνει γνωστή και στους υπόλοιπους δευτερεύοντες χρήστες. Αντίστοιχα και ο ίδιος γνωρίζει τον αριθμό των ενεργών δευτερευόντων χρηστών που υπάρχουν στο σύστημα μέσω της απάντησης που έστειλε σχετικά με την πολλαπλότητα της σύγκρουσης ο δευτερεύων προορισμός. Με άλλα λόγια όλοι οι ενεργοί δευτερεύοντες χρήστες γνωρίζουν τον αριθμό τους και έτσι μπορούν να προσαρμόσουν σύμφωνα με αυτόν την πιθανότητα να λάβουν μέρος σε μια DPC μετάδοση. Συνεπώς, την στιγμή που ένας νέος δευτερεύων χρήστης στο σύστημα πάρει μέρος σε μια μετάδοση NDMA και μετατραπεί σε ενεργό δευτερεύοντα χρήστη, από εκείνη την στιγμή έχει και το δικαίωμα χρήσης DPC μετάδοσης.

3.5. Αναλυτικές Εκφράσεις για τις Μέσες Καθυστερήσεις

Οι μέσες καθυστερήσεις στην περίπτωση χρήσης μόνο της τεχνικής NDMA για τους δευτερεύοντες χρήστες είναι μεγαλύτερες αφού η συχνότητα των ανενεργών σχισμών (idle slots) δεν εξαρτάται μόνο από το ρυθμό αφίξεων του πρωτεύοντος χρήστη αλλά και από την πιθανότητα εσφαλμένης μετάδοσης των πακέτων του. Έτσι οι μέσες καθυστερήσεις διαμορφώνονται προσεγγιστικά ως εξής:

Ο μέσος χρόνος αναμονής ανενεργής σχισμής (idle slot) είναι προσεγγιστικά ίσος με:

$$W_{Idle} = \frac{1}{1 - \lambda_p(1 + P_e)}$$

Ο ελάχιστος χρόνος που χρειάζεται ο δευτερεύων χρήστης για να αποκτήσει πρόσβαση στο σύστημα είναι:

$$W_{eff_{min}} = 1$$

Πιο συγκεκριμένα, ο ελάχιστος χρόνος πρόσβασης αντιστοιχεί στην περίπτωση που ο δευτερεύων χρήστης μπαίνει στο σύστημα και ακούει από τον δευτερεύοντα προορισμό ότι καμιά σύγκρουση δεν λαμβάνει χώρα εκείνη την στιγμή και την αμέσως επόμενη χρονική σχισμή ο πρωτεύων χρήστης παραμένει ανενεργός και δεν μεταδίδει πακέτο.

Ο μέγιστος χρόνος πρόσβασης για έναν δευτερεύοντα χρήστη αντιστοιχεί στην περίπτωση που το πακέτο του έρχεται την στιγμή που ξεκινά μια σύγκρουση στην οποία δεν έχει προλάβει να πάρει μέρος, οπότε αυτός πρέπει να περιμένει να τελειώσει η σύγκρουση αυτή και μετά να μεταδώσει το πακέτο του στην επόμενη ανενεργή σχισμή (idle slot). Αυτός ο χρόνος είναι προσεγγιστικά ίσος με:

$$\begin{aligned} W_{effmax} &= W_{Idle} \cdot (K_{eff} - 1) + W_{Idle} \\ &= \frac{1}{1 - \lambda_p(1 + P_e)} \cdot (K_{eff} - 1) + \frac{1}{1 - \lambda_p(1 + P_e)} \\ &= \frac{1}{1 - \lambda_p(1 + P_e)} \cdot K_{eff} \end{aligned}$$

Οι μέσες καθυστερήσεις ενός χρήστη με νέο πακέτο για μετάδοση μέχρι να αποκτήσει πρόσβαση στο σύστημα μπορούν να προσεγγιστούν από τον μέσο όρο των παραπάνω δύο περιπτώσεων:

$$W_{eff} = \frac{W_{effmin} + W_{effmax}}{2} = \frac{1 + \frac{1}{1 - \lambda_p(1 + P_e)} \cdot K_{eff}}{2}$$

Ο μέσος χρόνος μετάδοσης ενός πακέτου δευτερεύοντος χρήστη από τη στιγμή που λαμβάνει μέρος σε μια σύγκρουση είναι προσεγγιστικά ίσος με:

$$W_{send} = 1 + (K_{eff} - 1) \cdot W_{Idle} = 1 + (K_{eff} - 1) \cdot \left(\frac{1}{1 - \lambda_p(1 + P_e)} \right)$$

Ουσιαστικά αυτό που παρατηρούμε είναι ότι οι τύποι είναι ακριβώς οι ίδιοι με αυτούς της μεθόδου NDMA. Η μόνη αλλαγή είναι ότι η χρονική περίοδος που καταναλώνει ο πρωτεύων χρήστης για τη μετάδοση των πακέτων του είναι μεγαλύτερη από πριν καθώς πρέπει για κάποια πακέτα να προσπαθήσει να τα μεταδώσει ξανά αφήνοντας λιγότερες ανενεργές σχισμές (idle slots) στους δευτερεύοντες χρήστες.

3.6. Σχεδιασμός και Αξιολόγηση Μεθόδων

Στην συνέχεια παρουσιάζονται δύο μέθοδοι που σχεδιάστηκαν και αξιολογήθηκαν για την χρήση του DPC στο σύστημα μας.

3.6.1. Η Πρώτη Μέθοδος

Σε κάθε ευκαιρία χρήσης DPC, κάθε δευτερεύων χρήστης ρίχνει ένα κέρμα με πιθανότητα επιτυχίας αντιστρόφως ανάλογη του αριθμού των ενεργών δευτερευόντων χρηστών ($\frac{1}{K_{eff}}$).

3.6.1.1. Προσομοίωση

Στο παρακάτω παράδειγμα ο πρωτεύων χρήστης έχει νέα πακέτα προς μετάδοση 75% του χρόνου. Κάθε φορά που έχει πακέτο πληροφορίας στην ουρά του, το μεταδίδει άμεσα στο πρώτο επόμενο slot. Η πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης ισούται με 0,98 (πιθανότητα σφάλματος στην μετάδοση ίση με 2%). Στη διάρκεια των ανενεργών σχισμών (idle slots) οι $K = 5$ δευτερεύοντες χρήστες μεταδίδουν τα πακέτα πληροφορίας τους με τη χρήση του NDMA. Υποθέτουμε ότι όλοι οι δευτερεύοντες χρήστες έχουν πάντα πακέτα στην ουρά τους προς μετάδοση, οπότε $K_{eff} = K$ σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Κατά τη διάρκεια των σχισμών επαναμετάδοσης (retransmission slots), οι ενεργοί δευτερεύοντες χρήστες χρησιμοποιούν DPC με πιθανότητα αντιστρόφως ανάλογη του αριθμού τους δηλαδή ίση με $\frac{1}{K}$.

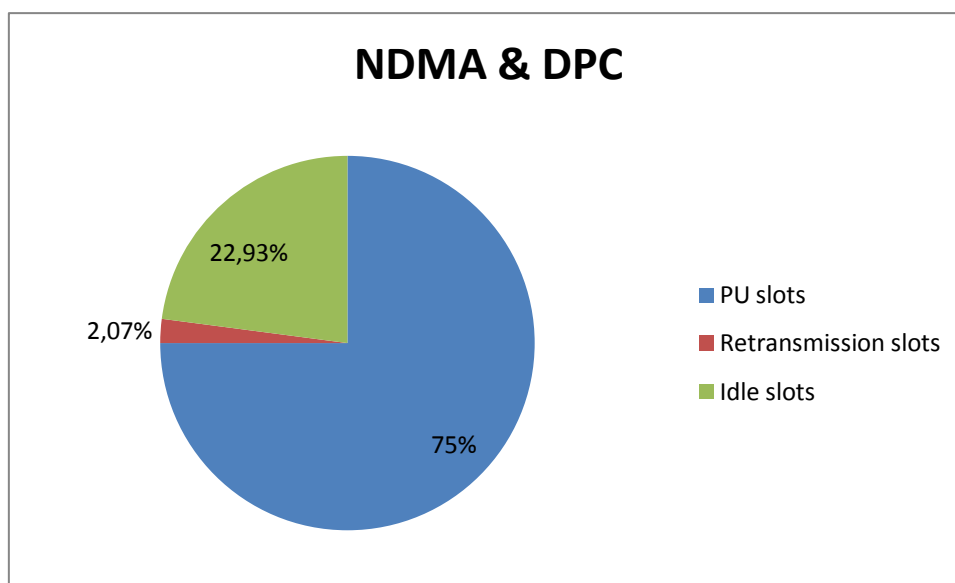
Αριθμός Κύκλων Προσομοίωσης: 10

Χρόνος Προσομοίωσης: 10.000.000 slots

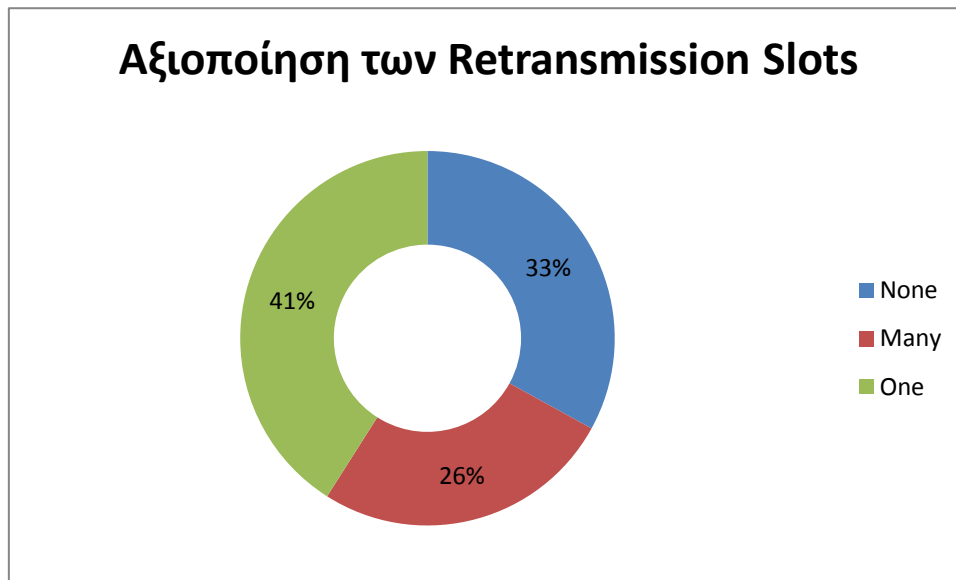
3.6.1.1.1. Αποτελέσματα Προσομοίωσης

PU Throughput	0.7500
SUs Throughput	0.2378

Πίνακας 3.1: Πρωτεύων και συνολικό δευτερεύων Throughput



Σχήμα 3.1: Τα ποσοστά του χρόνου που ο πρωτεύων χρήστης μεταδίδει νέα πακέτα (PU slots), παραμένει ανενεργός (Idle slots) και επαναμεταδίδει (Retransmission slots).



Σχήμα 3.2: Τα ποσοστά των Retransmission Slots στα οποία ο αριθμός των δευτερευόντων χρηστών που χρησιμοποιεί DPC είναι ίσο με ένα (One), μηδέν (None) και δύο ή παραπάνω (Many)

3.6.1.1.2. Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα στον Πίνακα 3.1 και στο Σχήμα 3.1, το Throughput του πρωτεύοντος χρήστη ισούται με 0,75, αλλά αυτός απασχολεί το κανάλι για περισσότερο από 75% του χρόνου.

Από τα αποτελέσματα στο Σχήμα 3.2 παρατηρήθηκε πως αρκετές φορές χρήση DPC κατά τη διάρκεια μιας σχισμής επαναμετάδοσης (retransmission slot), γινόταν από δύο ή παραπάνω δευτερεύοντες χρήστες καθιστώντας ανεπιτυχείς και τις δικές τους μεταδόσεις αλλά και τη μετάδοση του πρωτεύοντος χρήστη. Αυτό οδηγούσε στην αύξηση του αριθμού των σχισμών επαναμετάδοσης (retransmission slot), γεγονός το οποίο δεν ήταν επιθυμητό. Γι το λόγο αυτό, χρειαζόταν να βρεθεί ένας τρόπος μέσω του οποίου θα μειώναμε την ταυτόχρονη χρήση της DPC μεθόδου από δύο ή παραπάνω δευτερεύοντες χρήστες.

3.6.2. Η Δεύτερη Μέθοδος

Η πρώτη σκέψη ήταν να αυξήσουμε τον παρονομαστή της πιθανότητας ένας δευτερεύων χρήστης να επιλέξει την χρήση DPC σε $\left(\frac{1}{c \cdot K_{eff}}\right)$, όπου $c > 1$, με σκοπό να αναγκάσουμε τους δευτερεύοντες χρήστες να επιλέγουν με μικρότερη πιθανότητα την χρήση DPC.

Όπως και πριν, οι δευτερεύοντες χρήστες ακούνε το κανάλι για να ανιχνεύσουν τις μεταδόσεις του πρωτεύοντος χρήστη. Σε περίπτωση που αποστολή πακέτου πληροφορίας από τον πρωτεύοντα χρήστη δεν ήταν επιτυχημένη, αυτό σημαίνει πως όλοι οι δευτερεύοντες χρήστες που ήταν ενεργοί και άκουσαν σωστά το πακέτο

του πρωτεύοντος χρήστη, είναι σε θέση να μεταδώσουν ένα δικό τους πακέτο πληροφορίας στην επόμενη χρονική σχισμή μαζί με την επαναμετάδοση του πρωτεύοντα χρήστη χρησιμοποιώντας DPC μετάδοση.

Θεωρούμε ότι όλοι οι ενεργοί δευτερεύοντες χρήστες έχουν την δυνατότητα να ακούσουν σωστά το πακέτο του πρωτεύοντος χρήστη από τη στιγμή που ήδη ακούνε το κανάλι προς αναζήτηση λευκών κενών. Επίσης όλοι οι ενεργοί δευτερεύοντες χρήστες έχουν πάρει μέρος σε μια τουλάχιστον NDMA σύγκρουση (μπορεί να μην έχει επιλυθεί ακόμα) και επομένως ξέρουν τον αριθμό τους. Τώρα όμως η πιθανότητα με την οποία καθένας από αυτούς θα προσπαθήσει να χρησιμοποιήσει DPC μετάδοση δεν εξαρτάται μόνο από τον αριθμό τους αλλά και από μια σταθερά ασφαλείας που θα έχουμε την δυνατότητα να επιλέξουμε κατάλληλα. Έτσι η πιθανότητα χρήσης DPC θα είναι αντιστρόφως ανάλογη του αριθμού τους, K , και της σταθεράς c , δηλαδή ίση με $\frac{1}{K \cdot c}$.

3.6.2.1. Προσομοιώσεις Μεταδόσεων DPC μόνο από ένα μέρος των δευτερευόντων χρηστών

Στα παρακάτω παραδείγματα ο πρωτεύων χρήστης έχει νέα πακέτα προς μετάδοση 75% του χρόνου. Κάθε φορά που έχει πακέτο πληροφορίας στην ουρά του, το μεταδίδει άμεσα στο πρώτο επόμενο slot. Η πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης ισούται με 0,98 (αντιστοιχεί σε πιθανότητα σφάλματος 2%). Στη διάρκεια των ανενεργών σχισμών (idle slots) οι $K = 5$ δευτερεύοντες χρήστες μεταδίδουν τα πακέτα πληροφορίας τους με τη χρήση του NDMA. Υποθέτουμε ότι όλοι οι δευτερεύοντες χρήστες έχουν πάντα πακέτα στην ουρά τους προς μετάδοση, οπότε $K_{eff} = K$ σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Κατά τη διάρκεια των σχισμών επαναμετάδοσης (retransmission slots), οι ενεργοί δευτερεύοντες χρήστες χρησιμοποιούν DPC με πιθανότητα αντιστρόφως ανάλογη του αριθμού τους και ίση με $\frac{1}{K \cdot c}$.

Αριθμός Κύκλων Προσομοίωσης: 10

Χρόνος Προσομοίωσης: 10.000.000 slots

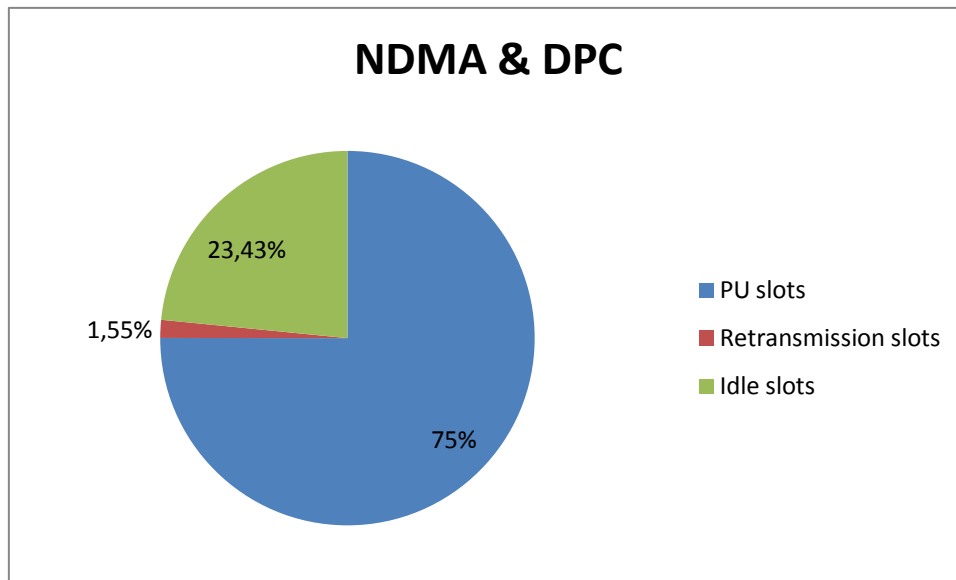
Κάθε φορά που δίνουμε μια τιμή στον αριθμό ασφαλείας, c , είναι σαν να προσομοιώνουμε την περίπτωση όπου κατά μέσο όρο μόνο το $\frac{1}{c}$ μέρος των χρηστών προσπαθεί να χρησιμοποιήσει DPC μεταδόσεις με πιθανότητα $(\frac{1}{K})$.

3.6.2.1.1. Αποτελέσματα προσομοίωσης για $c = 4$

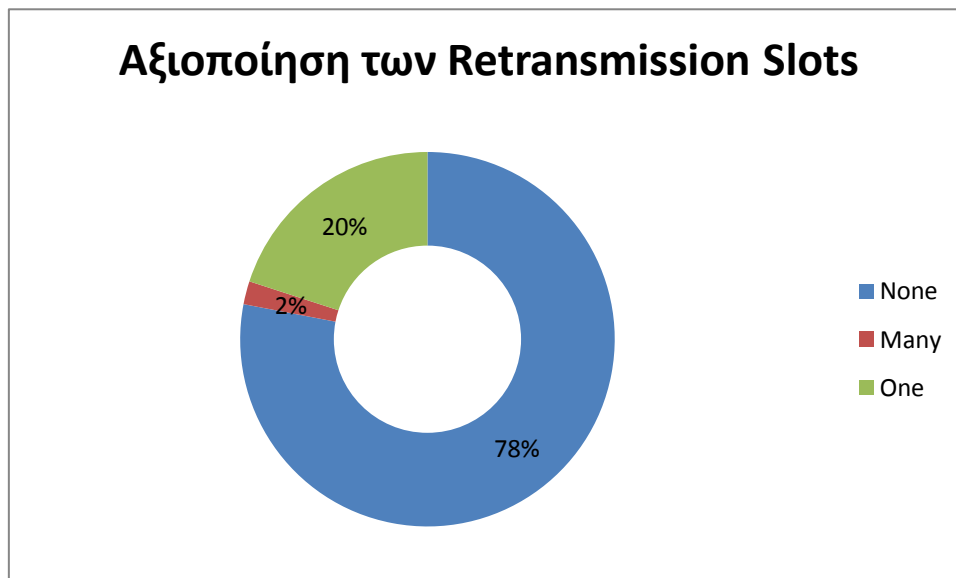
Αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου κατά μέσο όρο μόνο το $\frac{1}{4}$ των δευτερευόντων χρηστών προσπαθεί να χρησιμοποιήσει DPC μετάδοση. Σε αυτή την περίπτωση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι τα εξής,

PU Throughput	0.7500
SUs Throughput	0.2374

Πίνακας 3.2: Πρωτεύων και συνολικό δευτερεύων Throughput



Σχήμα 3.3: Τα ποσοστά του χρόνου που ο πρωτεύων χρήστης μεταδίδει νέα πακέτα (PU slots), παραμένει ανενεργός (Idle slots) και επαναμεταδίδει (Retransmission slots).



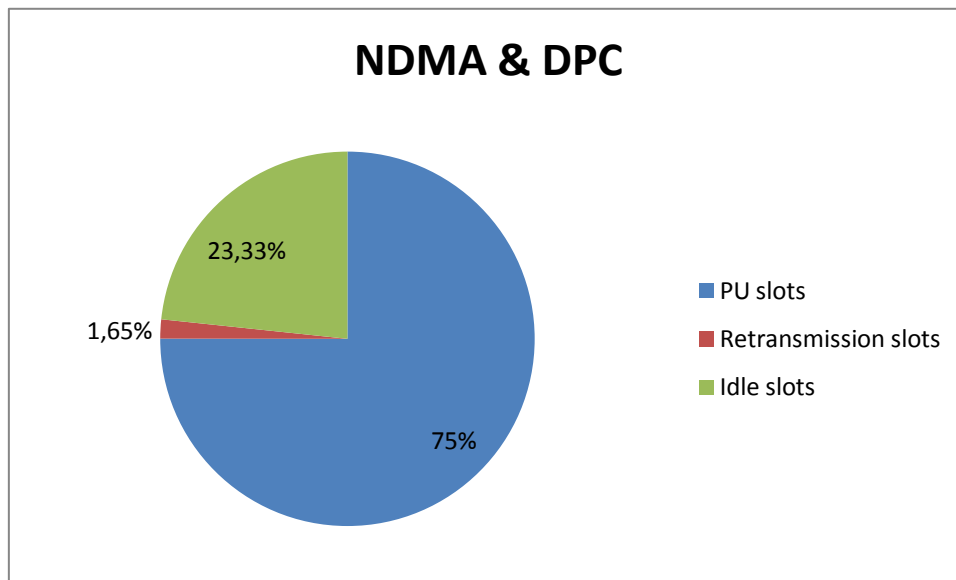
Σχήμα 3.4: Τα ποσοστά των σχισμών επαναμετάδοσης (Retransmission Slots) στα οποία ο αριθμός των δευτερευόντων χρηστών που χρησιμοποιεί DPC είναι ίσος με ένα (One), μηδέν (None) και δύο ή παραπάνω (Many)

3.6.2.1.2. Αποτελέσματα προσομοίωσης για $c = 2$

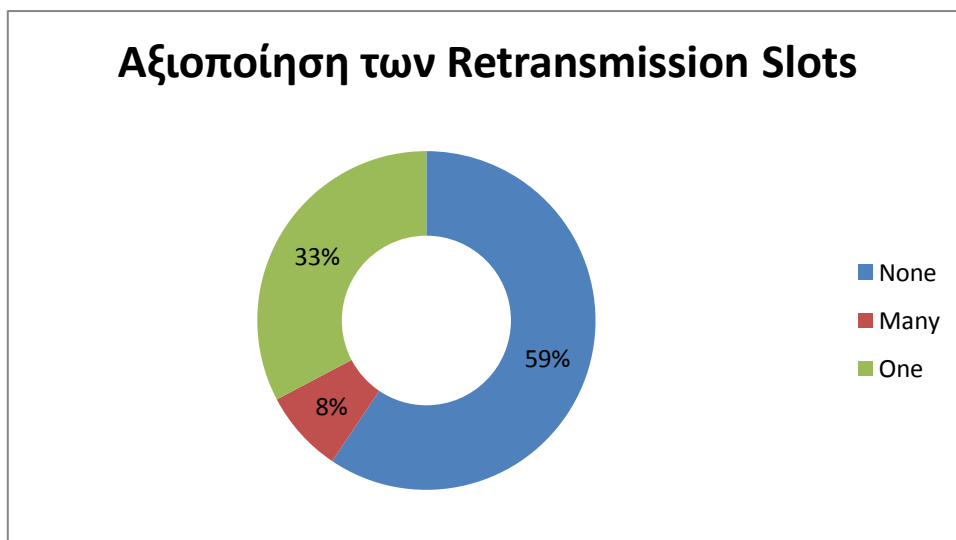
Αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου κατά μέσο όρο μόνο το $\frac{1}{2}$ των δευτερευόντων χρηστών προσπαθεί να χρησιμοποιήσει DPC μετάδοση. Τα αποτελέσματα της αντίστοιχης προσομοίωσης είναι τα εξής.

PU Throughput	0.7500
SUs Throughput	0.2388

Πίνακας 3.3: Πρωτεύων και συνολικό δευτερέων Throughput



Σχήμα 3.5: Τα ποσοστά του χρόνου που ο πρωτεύων χρήστης μεταδίδει νέα πακέτα (PU slots), παραμένει ανενεργός (Idle slots) και επαναμεταδίδει (Retransmission slots).



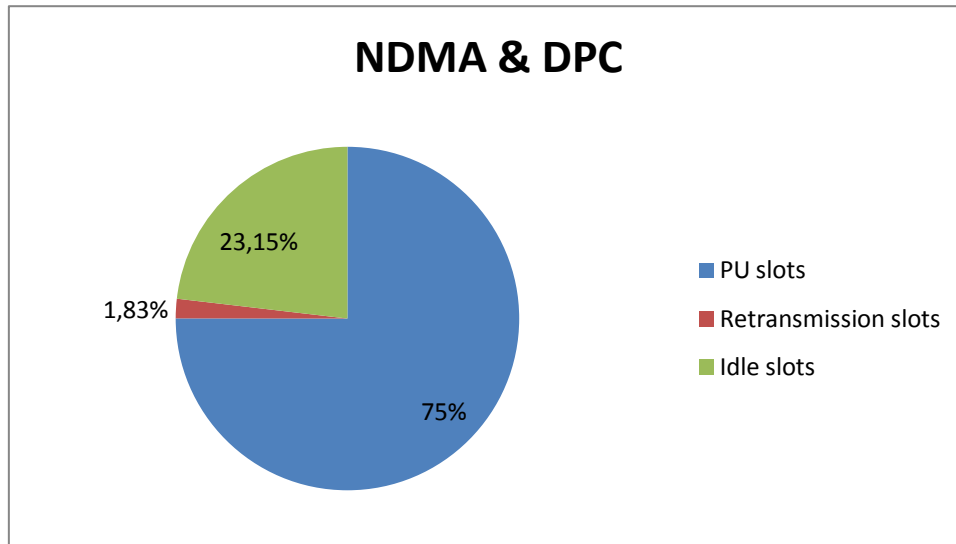
Σχήμα 3.6: Τα ποσοστά των ανενεργών σχισμών (Retransmission Slots) στα οποία ο αριθμός των δευτερευόντων χρηστών που χρησιμοποιεί DPC είναι ίσος με ένα (One), μηδέν (None) και δύο ή παραπάνω (Many)

3.6.2.1.3. Αποτελέσματα προσομοίωσης για $c = 4/3$

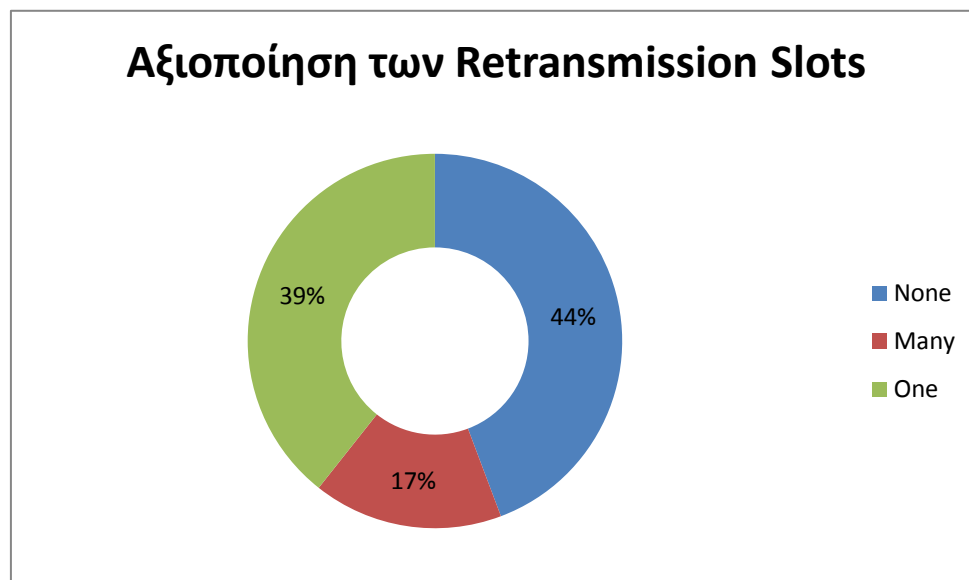
Αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου κατά μέσο όρο μόνο τα $\frac{3}{4}$ των δευτερευόντων χρηστών προσπαθούν να χρησιμοποιήσουν DPC μετάδοση. Τα αποτελέσματα της αντίστοιχης προσομοίωσης είναι τα εξής:

PU Throughput	0.7500
SUs Throughput	0.2387

Πίνακας 3.4: Πρωτεύων και συνολικό δευτερεύων Throughput



Σχήμα 3.7: Τα ποσοστά του χρόνου που ο πρωτεύων χρήστης μεταδίδει νέα πακέτα (PU slots), παραμένει ανενεργός (Idle slots) και επαναμεταδίδει (Retransmission slots).



Σχήμα 3.8: Τα ποσοστά των ανενεργών σχισμών (Retransmission Slots) στα οποία ο αριθμός των δευτερευόντων χρηστών που χρησιμοποιεί DPC είναι ίσος με ένα (One), μηδέν (None) και δύο ή παραπάνω (Many)

3.6.2.2. Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Με την προτεινόμενη μέθοδο υπολογισμού της πιθανότητας καταφέραμε να μειώσουμε τις περιπτώσεις χρήσης DPC από πολλαπλούς δευτερεύοντες χρήστες κι έτσι μειώθηκε και ο συνολικός αριθμός επαναμεταδόσεων του πρωτεύοντος χρήστη.

Παράλληλα όμως μειώσαμε αισθητά και τις περιπτώσεις χρήσεις του DPC από έναν μόνο δευτερεύοντα χρήστη. Οπότε το συνολικό Throughput των δευτερευόντων χρηστών δεν αυξήθηκε σημαντικά και τα slots επαναμετάδοσης δεν αξιοποιήθηκαν αποτελεσματικά για overlay μεταδόσεις.

Παρατηρήθηκε (Πίνακας 3.2) ότι μόνο στην περίπτωση $c = 4$, όπου κατά μέσο όρο το $\frac{1}{4}$ των ενεργών δευτερευόντων χρηστών επέλεξαν με πιθανότητα ίση με $\frac{1}{K}$ να χρησιμοποιήσουν DPC, οι δευτερεύοντες χρήστες είχαν περίπου το ίδιο Throughput με την περίπτωση όπου δεν εισάγαμε την σταθερά c (Πίνακας 3.1). Βέβαια στην περίπτωση όπου $c = 4$, καταφέραμε να μειώσουμε σημαντικά τον αριθμό των σχισμών επαναμετάδοσης (retransmission slots) (Σχήμα 3.3) που οφείλονταν σε συγκρούσεις δευτερευόντων χρηστών με τον πρωτεύοντα χρήστη λόγω της πολλαπλής χρήσης DPC.

Στις περιπτώσεις που κατά μέσο όρο τα $\frac{2}{4}$ και $\frac{3}{4}$ των δευτερευόντων χρηστών χρησιμοποιούσαν DPC, το Throughput των δευτερευόντων χρηστών αυξήθηκε περίπου το ίδιο (Πίνακας 3.3 και Πίνακας 3.4). Όμως εδώ ο αριθμός των επαναμεταδόσεων του πρωτεύοντος χρήστη που οφείλονται σε συγκρούσεις δευτερευόντων χρηστών με τον πρωτεύοντα χρήστη λόγω πολλαπλής χρήσης DPC, είναι λιγότερες στην περίπτωση με c ίσο με $\frac{2}{4}$ από αυτήν με c ίσο με $\frac{3}{4}$ (Σχήμα 3.5 και Σχήμα 3.7).

Παρατηρήθηκε ότι όταν χρησιμοποιούσαμε πιθανότητα χρήσης DPC από τα $\frac{2}{4}$ και $\frac{3}{4}$ των χρηστών, η αξιοποίηση των σχισμών επαναμετάδοσης (retransmission slots) μεγιστοποιείτο (Σχήμα 3.6 και Σχήμα 3.8).

Έτσι οδηγηθήκαμε σε μια νέα ιδέα. Αντί να προσπαθούμε να χωρίσουμε τους K δευτερεύοντες χρήστες σε K ανενεργές σχισμές επαναμετάδοσης (retransmission slots), να προσπαθήσουμε να επεκτείνουμε το χρόνο στον οποίο θα τους μοιράσουμε με σκοπό να μειώσουμε τις συγκρούσεις τους και να επιτύχουμε τα αποτελέσματα που είχαμε στις περιπτώσεις όπου μόνο τα $\frac{2}{4}$ ή $\frac{3}{4}$ των χρηστών έπαιρναν μέρος σε DPC μεταδόσεις. Έτσι οι K δευτερεύοντες χρήστες θα μοιραστούν σε $2K$ και $\frac{4}{3}K$ slots.

Βέβαια, με αυτό τον τρόπο δεν είναι προφανές αν θα μπορούμε να εγγυηθούμε την ισότιμη αντιμετώπιση των δευτερευόντων χρηστών ούτε ότι αν πάνε όλα καλά και στην διάρκεια μιας εποχής από σχισμές επαναμετάδοσης (retransmission slots)

μεταδώσουν όλοι οι δευτερεύοντες χρήστες από μια φορά, αυτό θα επαναληφθεί και στις επόμενες εποχές.

Θα ήταν λοιπόν χρήσιμο να βρεθεί ένας τρόπος με τον οποίο όταν παρουσιάζεται ένα επιθυμητό (από πλευράς απόδοσης) αποτέλεσμα σε μια εποχή από σχισμές επαναμετάδοσης (retransmission slots) δηλαδή επιτυχημένη μετάδοση από κάθε δευτερεύοντα χρήστη, να μπορούμε να επαναλαμβάνουμε το ίδιο επιθυμητό αποτέλεσμα και στις επόμενες εποχές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Random Retransmission Slot Selection (R2S2)

4.1. Εισαγωγή

Σε ένα οποιοδήποτε τηλεπικοινωνιακό δίκτυο το οποίο φιλοξενεί χρήστες, στοχεύουμε να εξυπηρετούμε τους χρήστες ισότιμα και αυτοί να διαμοιράζονται δίκαια το κοινό κανάλι. Έτσι στο υπό εξέταση τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, οι δευτερεύοντες χρήστες προσπαθούν να διαμοιραστούν τις χρονικές στιγμές που τους δίνεται η ευκαιρία να χρησιμοποιήσουν το κανάλι, κατά τη διάρκεια των ανενεργών σχισμών (idle slots) του πρωτεύοντος χρήστη, και η επίτευξη του στόχου της ισότιμης αντιμετώπισης των δευτερευόντων χρηστών επιτυγχάνεται χάρη στη χρήση του NDMA. Όμως δεν μπορούμε να πούμε ότι το ίδιο συμβαίνει και για τις DPC σχισμές. Κατά τη διάρκεια αυτών των σχισμών κάθε χρήστης προσπαθεί να τις διεκδικήσει και αυτό συμβαίνει σε κάθε DPC σχισμή. Μπορεί να συμβεί κάποιοι δευτερεύοντες χρήστες να έχουν κακή τύχη και να μην καταφέρουν να χρησιμοποιήσουν μετάδοση DPC ενώ από κάποιοι άλλοι να είναι τυχεροί και να έχουν καταφέρει να μεταδώσουν πολλές φορές πακέτο πληροφορίας τους με χρήση DPC. Έτσι δεν υπάρχει δίκαιος διαμοιρασμός των DPC σχισμών του καναλιού μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών.

Για αυτό τον λόγο ψάχνουμε ένα αποδοτικό τρόπο ώστε να εγγυηθούμε τον δίκαιο διαμοιρασμό των DPC σχισμών του καναλιού ανάμεσα στους δευτερεύοντες χρήστες. Η ιδανική περίπτωση αντιστοιχεί στην κατάσταση στην οποία έχουμε K δευτερεύοντες χρήστες και στις επόμενες K ανενεργές σχισμές (idle slots) έχει χρησιμοποιήσει DPC μετάδοση μια φορά ο καθένας. Με αυτόν τον τρόπο θα έχει επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

4.2. Μηχανισμός Memoryless R2S2

Σύμφωνα με τον μηχανισμό αυτό, κάθε χρήστης ο οποίος έχει δικαίωμα χρήσης DPC επιλέγει τυχαία και ισοπίθανα να μεταδώσει σε μία από τις επόμενες K σχισμές επαναμετάδοσης (retransmission slots), όπου K ο αριθμός των ενεργών δευτερευόντων χρηστών. Όταν έρχεται η χρονική σχισμή που επέλεξε και υπό την προϋπόθεση ότι κατάφερε να ακούσει και την μετάδοση του πρωτεύοντος χρήστη, εφαρμόζει DPC κωδικοποίηση.

Στην περίπτωση που ήταν ο μόνος που χρησιμοποίησε DPC τότε η μετάδοσή του ήταν επιτυχημένη. Αν όμως και κάποιοι άλλοι δευτερεύοντες χρήστες είχαν επιλέξει την ίδια χρονική στιγμή για DPC μετάδοση τότε οι μεταδόσεις τους θεωρούνται ανεπιτυχείς και περιμένουν το πέρας το K σχισμών επαναμετάδοσης (retransmission slots) για να επιλέξουν ξανά νέες σχισμές για προσπάθεια DPC μετάδοσης.

Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζουμε ότι κάθε δευτερεύων χρήστης έχει τον ίδιο αριθμό ευκαιριών να μεταδώσει τα πακέτα του με χρήση DPC.

4.2.1. Προσομοίωση

Στο παρακάτω παράδειγμα ο πρωτεύων χρήστης έχει νέα πακέτα προς μετάδοση 75% του χρόνου. Κάθε φορά που έχει πακέτο πληροφορίας στην ουρά του, το μεταδίδει άμεσα στο πρώτο slot που θα συναντήσει. Η πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης ισούται με 0,98. Το Throughput του πρωτεύοντος χρήστη είναι ίσο με 0,75 αλλά απασχολεί το κανάλι για περισσότερο από 75% του χρόνου. Στη διάρκεια των ανενεργών σχισμών (idle slots) του πρωτεύοντος χρήστη, οι $K = 5$ δευτερεύοντες χρήστες μεταδίδουν τα πακέτα πληροφορίας τους με τη χρήση της τεχνικής NDMA. Υποθέτουμε ότι όλοι οι δευτερεύοντες χρήστες έχουν πάντα πακέτα στην ουρά τους προς μετάδοση, οπότε $K_{eff} = K$ σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Κατά τη διάρκεια των σχισμών επαναμεταδόσεων (retransmission slots), οι ενεργοί δευτερεύοντες χρήστες χρησιμοποιούν DPC βασιζόμενοι στο μηχανισμό Memoryless R2S2 που παρουσιάστηκε παραπάνω.

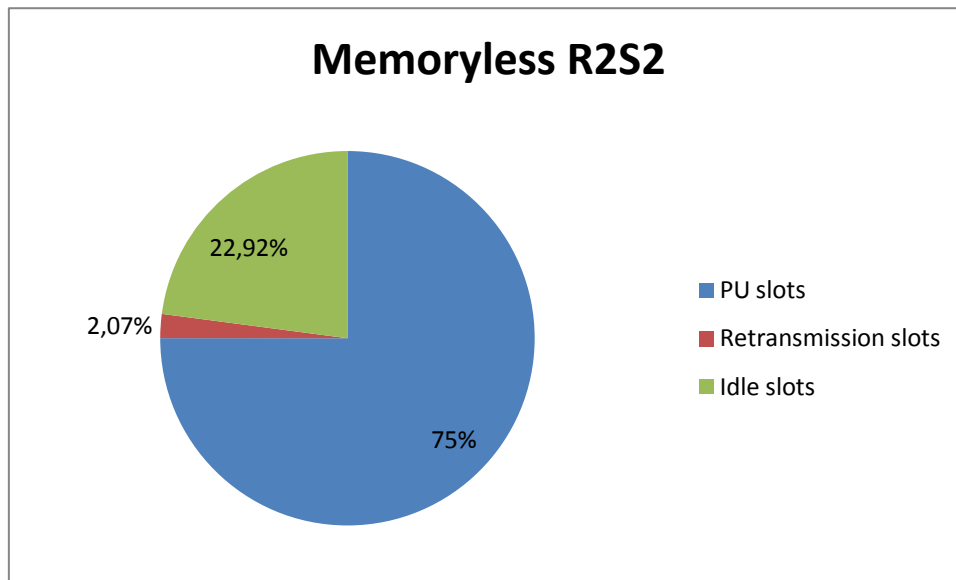
Αριθμός Κύκλων Προσομοίωσης: 10

Χρόνος Προσομοίωσης: 10.000.000 slots

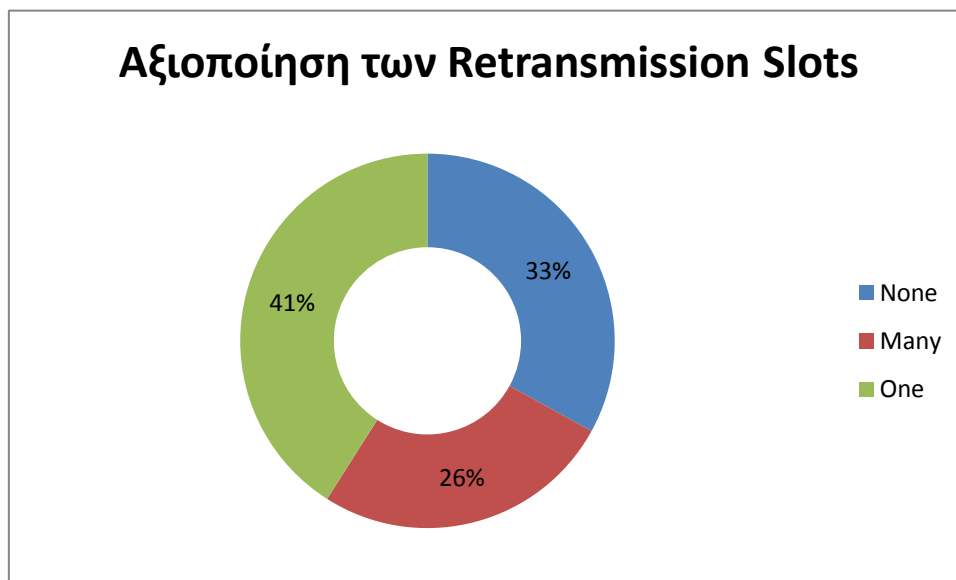
4.2.1.1. Αποτελέσματα Προσομοίωσης

PU Throughput	0.7500
SUs Throughput	0.2377

Πίνακας 4.1: Πρωτεύων και συνολικό δευτερεύων Throughput



Σχήμα 4.1: Τα ποσοστά του χρόνου που ο πρωτεύων χρήστης μεταδίδει νέα πακέτα (PU slots), παραμένει ανενεργός (Idle slots) και επαναμεταδίδει (Retransmission slots).



Σχήμα 4.2: Τα ποσοστά των σχισμών επαναμεταδόσεων (Retransmission Slots) στα οποία ο αριθμός των δευτερευόντων χρηστών που χρησιμοποιεί DPC είναι ίσος με ένα (One), μηδέν (None) και δύο ή παραπάνω (Many)

4.3. Μηχανισμός R2S2

Μπορούμε να εισάγουμε μνήμη στον μηχανισμό που προτείναμε στην παράγραφο 4.2. Στην περίπτωση που ένας δευτερεύων χρήστης κάνει μια επιτυχημένη χρήση μετάδοσης DPC σε μια σχισμή επαναμετάδοσης (retransmission slot), τότε ο χρήστης θυμάται αυτό τη σχισμή και επιλέγει την ίδια μετά το πέρας των K σχισμών επαναμετάδοσης (retransmission slots), αντί να επιλέξει τυχαία. Έτσι υπό την προϋπόθεση ότι το σύστημα αλλάζει αργά, δηλαδή ο αριθμός των δευτερευόντων χρηστών δεν αλλάζει απότομα και νέοι χρήστες δεν έρχονται πολύ συχνά, κάθε δευτερεύων χρήστης θα έχει επιλέξει τη δική του μοναδική σχισμή επαναμετάδοσης (retransmission slot) στην οποία θα χρησιμοποιήσει μετάδοση DPC, σαν αποτέλεσμα οι συγκρούσεις θα μειωθούν στο ελάχιστο.

Στην περίπτωση που δυο ή παραπάνω δευτερεύοντες χρήστες προσπαθήσουν να μεταδώσουν στην ίδια σχισμή επαναμετάδοσης (retransmission slot), τότε οι μεταδόσεις τους καθώς και η μετάδοση του πρωτεύοντος χρήστη θεωρούνται ανεπιτυχείς. Ύστερα από το πέρας των K σχισμών επαναμετάδοσης (retransmission slot), οι δευτερεύοντες χρήστες που συγκρούστηκαν αναγκάζονται να επιλέξουν ξανά τυχαία κάποια σχισμή επαναμετάδοσης (retransmission slot) όπως προηγουμένως. Στην περίπτωση όμως που ένας δευτερεύων χρήστης έκανε επιτυχημένη χρήση DPC, τότε θυμάται τη σχισμή επαναμετάδοσης (retransmission slot) την οποία χρησιμοποίησε.

Πιο συγκεκριμένα, αν ένας δευτερεύων χρήστης επέλεξε μέσα από τις επόμενες K σχισμές επαναμετάδοσης (retransmission slots) να κάνει χρήση DPC στη σχισμή επαναμετάδοσης (retransmission slot) α όπου $\alpha \in [1, K]$ και η μετάδοση του ήταν επιτυχημένη, τότε μετά το πέρας των K σχισμών επαναμεταδόσεων (retransmission slots) θα επιλέξει να κάνει χρήση DPC στη σχισμή επαναμετάδοσης (retransmission slot) $K + \alpha$. Με αυτό τον τρόπο, αυτό που θέλουμε να πετύχουμε είναι να καταφέρουν οι δευτερεύοντες χρήστες να επιλέξουν διαφορετικές σχισμές επαναμεταδόσεων (retransmission slots) για τις DPC μεταδόσεις τους και να συνεχίσουν να επιλέγουν αυτά τα slots στο μέλλον. Μετά από ένα χρονικό διάστημα, το σύστημα θα χρησιμοποιείται ιδανικά και ο κάθε δευτερεύων χρήστης θα έχει τη δική του σχισμή επαναμετάδοσης (retransmission slot) για χρήση DPC. Δηλαδή η χρήση των σχισμών επαναμετάδοσης (retransmission slots) από τους δευτερεύοντες χρήστες γίνεται με απόδοση 100%.

4.3.1. Προσομοίωση

Στο παρακάτω παράδειγμα ο πρωτεύων χρήστης έχει νέα πακέτα για μετάδοση το 75% του χρόνου. Κάθε φορά που έχει πακέτο πληροφορίας στην ουρά του, το μεταδίδει άμεσα στο πρώτο slot που θα συναντήσει. Η πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης ισούται με 0,98. Το Throughput του πρωτεύοντος χρήστη είναι ίσο με 0,75 αλλά αυτός απασχολεί το κανάλι περισσότερο από 75% του χρόνου. Στη διάρκεια των ανενεργών σχισμών (idle slots) του πρωτεύοντος χρήστη, οι K δευτερεύοντες

χρήστες μεταδίδουν τα πακέτα πληροφορίας τους με τη χρήση του μηχανισμού NDMA. Υποθέτουμε ότι όλοι οι δευτερεύοντες χρήστες έχουν πάντα πακέτα στην ουρά τους προς μετάδοση, οπότε $K_{eff} = K$ σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Κατά τη διάρκεια των σχισμών επαναμετάδοσης (retransmission slots), οι ενεργοί δευτερεύοντες χρήστες χρησιμοποιούν DPC βασιζόμενοι στο μηχανισμό του R2S2.

Αριθμός Κύκλων Προσομοίωσης: 10

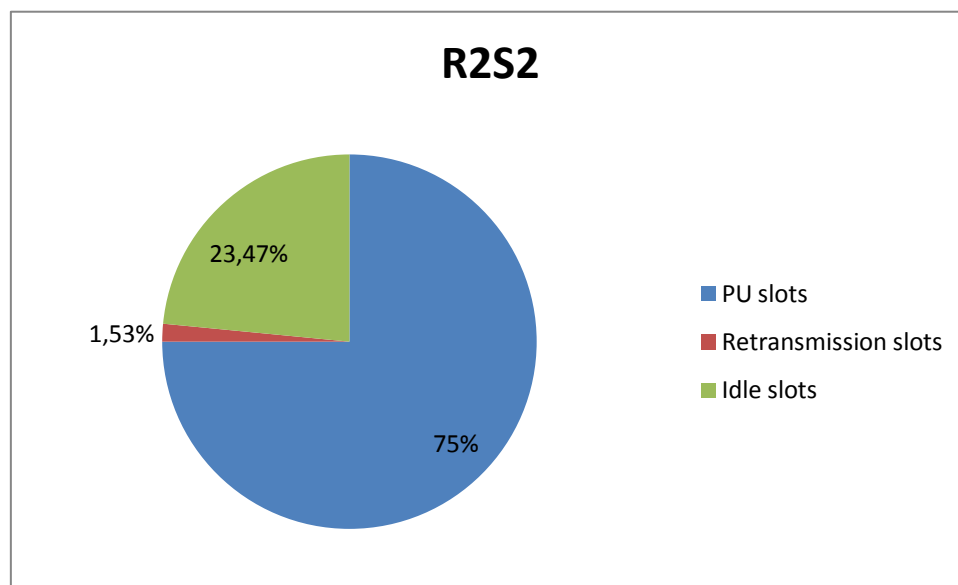
Χρόνος προσομοίωσης: 10.000.000 slots

Παρακάτω δοκιμάζουμε τον προτεινόμενο μηχανισμό για $K = 5, 20$ και 60

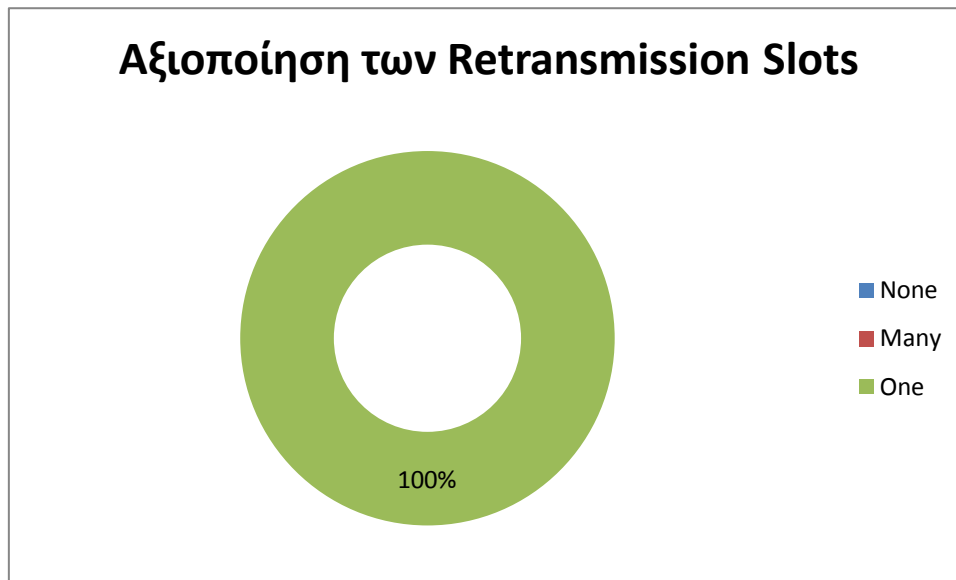
4.3.1.1. Αποτελέσματα Προσομοίωσης για $K = 5$

PU Throughput	0.7500
SUs Throughput	0.2499

Πίνακας 4.2: Πρωτεύων και συνολικό δευτερεύων Throughput



Σχήμα 4.3: Τα ποσοστά του χρόνου που ο πρωτεύων χρήστης μεταδίδει νέα πακέτα (PU slots), παραμένει ανενεργός (Idle slots) και επαναμεταδίδει (Retransmission slots).

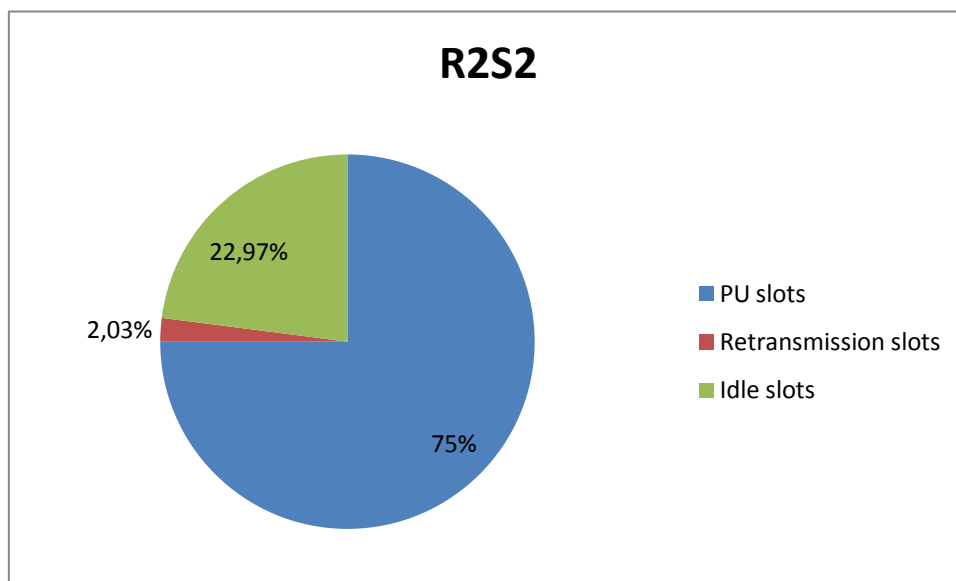


Σχήμα 4.4: Τα ποσοστά των σχισμών επαναμετάδοσης (Retransmission Slots) στα οποία ο αριθμός των δευτερευόντων χρηστών που χρησιμοποιεί DPC είναι ίσος με ένα (One), μηδέν (None) και δύο ή παραπάνω (Many)

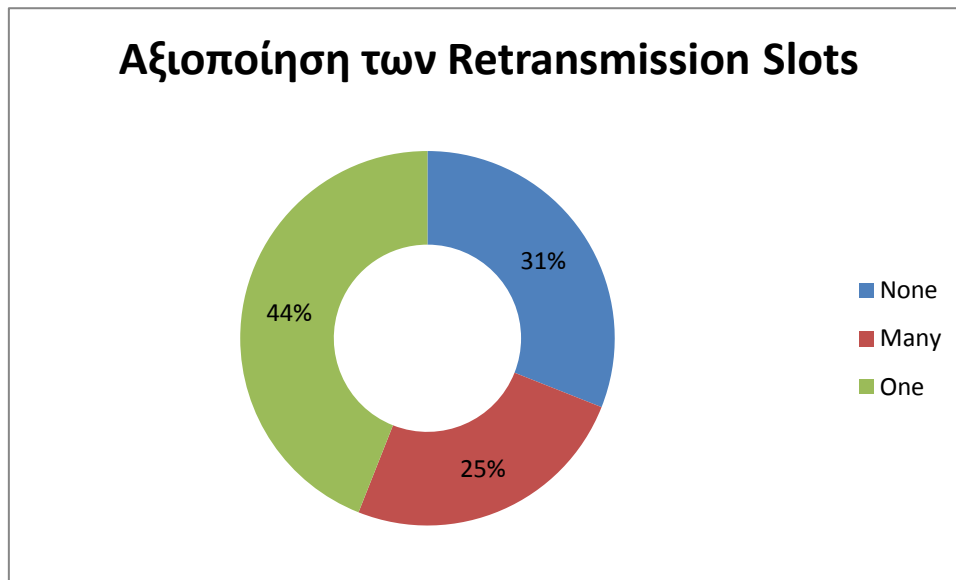
4.3.1.2. Αποτελέσματα Προσομοίωσης για $K = 20$

PU Throughput	0.7500
SUs Throughput	0.2387

Πίνακας 4.3: Πρωτεύων και συνολικό δευτερεύων Throughput



Σχήμα 4.5: Τα ποσοστά του χρόνου που ο πρωτεύων χρήστης μεταδίδει νέα πακέτα (PU slots), παραμένει ανενεργός (Idle slots) και επαναμεταδίδει (Retransmission slots).

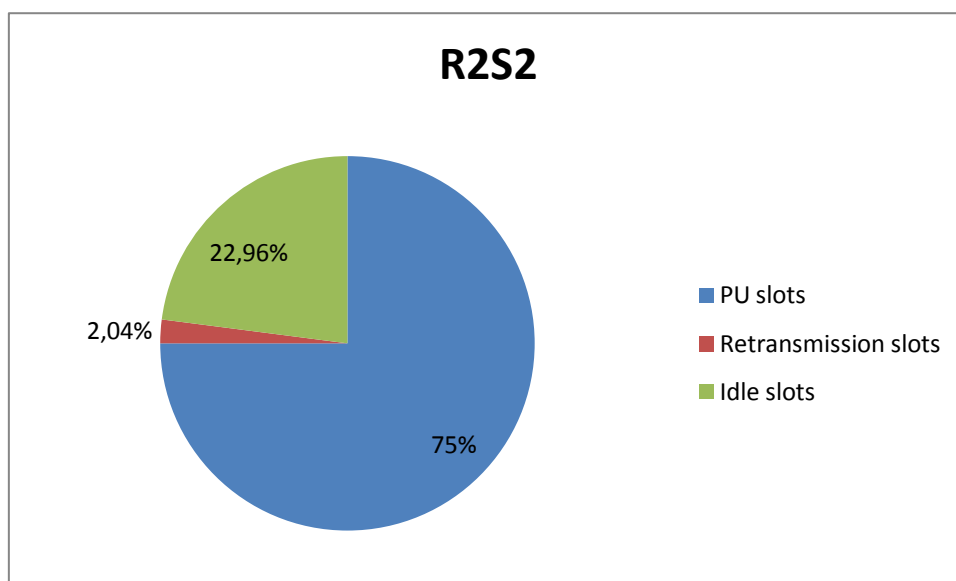


Σχήμα 4.6: Τα ποσοστά των σχισμών επαναμετάδοσης (Retransmission Slots) στα οποία ο αριθμός των δευτερευόντων χρηστών που χρησιμοποιεί DPC είναι ίσος με ένα (One), μηδέν (None) και δύο ή παραπάνω (Many)

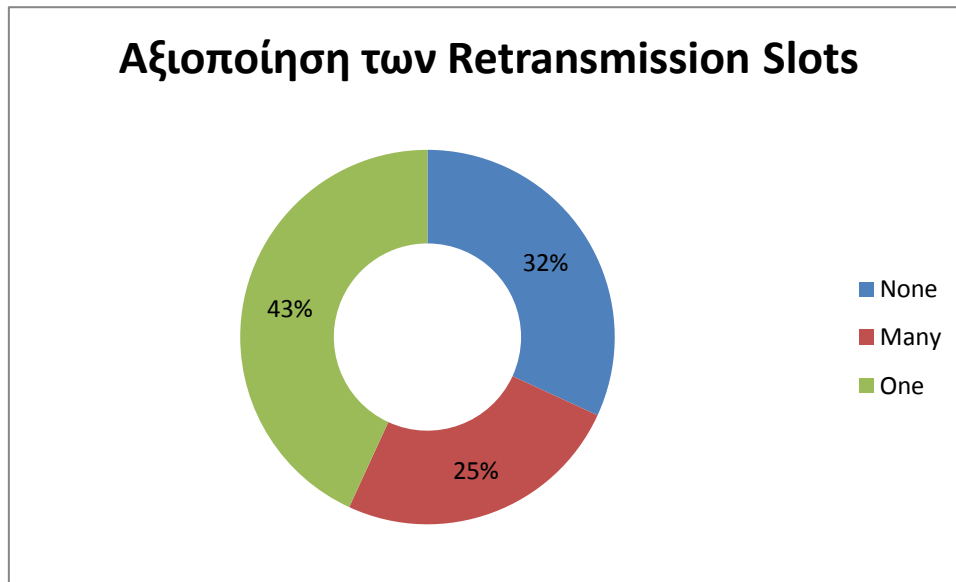
4.3.1.3. Αποτελέσματα Προσομοίωσης για $K = 60$

PU Throughput	0.7500
SUs Throughput	0.2384

Πίνακας 4.4: Πρωτεύων και συνολικό δευτερεύων Throughput



Σχήμα 4.7: Τα ποσοστά του χρόνου που ο πρωτεύων χρήστης μεταδίδει νέα πακέτα (PU slots), παραμένει ανενεργός (Idle slots) και επαναμεταδίδει (Retransmission slots).



Σχήμα 4.8: Τα ποσοστά των σχισμών επαναμετάδοσης (Retransmission Slots) στα οποία ο αριθμός των δευτερευόντων χρηστών που χρησιμοποιεί DPC είναι ίσος με ένα (One), μηδέν (None) και δύο ή παραπάνω (Many)

4.3.2. Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Παρατηρήσαμε ότι με την παραπάνω μέθοδο υπήρχαν πολλές συγκρούσεις μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών μέχρι τη σταθεροποίηση του συστήματος (η οποία επιτυγχάνεται στο χρονικό σημείο μετά το οποίο όλοι οι δευτερεύοντες χρήστες έχουν επιλέξει διαφορετικές σχισμές επαναμετάδοσης (retransmission slots) για τις DPC μεταδόσεις τους). Όσο πιο μεγάλος είναι ο αριθμός των δευτερευόντων χρηστών του ευφυούς δικτύου, τόσο πιο μεγάλος είναι ο χρόνος που απαιτείται για την σταθεροποίηση του συστήματος. Γι' το λόγο αυτό εισάγαμε την παρακάτω τροποποίηση στην μέθοδο R2S2.

Σύμφωνα με τον τροποποιημένο μηχανισμό, οι χρήστες επιλέγουν τυχαία μια σχισμή επαναμετάδοσης (retransmission slot) για DPC μετάδοση μέσα από K' σχισμές επαναμετάδοσης (retransmission slots), όπου $K' > K$. Έτσι οι δευτερεύοντες χρήστες έχουν μικρότερη πιθανότητα σύγκρουσης. Φυσικά εδώ υπάρχει ένα trade off. Όσο πιο πολύ απλώνουμε τους δευτερεύοντες χρήστες στις σχισμές επαναμετάδοσης (retransmission slots), τόσο μειώνουμε τις τυχόν παρεμβολές στον πρωτεύοντα χρηστή καθώς και τον χρόνο σταθεροποίησης του συστήματος θυσιάζοντας όμως την αποτελεσματική χρήση των σχισμών επαναμετάδοσης (retransmission slots). Είναι φανερό ότι με κάποιον τρόπο θα πρέπει να επιλέξουμε την κατάλληλη τιμή για το K' .

4.4. Χρόνος Σύγκλισης

Ο τροποποιημένος μηχανισμός R2S2 που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.3.2. έχει την δυνατότητα να οδηγήσει σε σταθερή λειτουργία του δικτύου και να δώσει πολύ καλά αποτελέσματα. Όμως για να το κάνει αυτό χρειάζεται κάποιος χρόνος ώστε να συγκλίνει. Ύστερα από αυτό το χρόνο, η αξιοποίηση των σχισμών επαναμετάδοσης (retransmission slots) είναι η μέγιστη δυνατή. Είναι σημαντικό να εξετάσουμε τον χρόνο σύγκλισης για διάφορους αριθμούς δευτερευόντων χρηστών στο δίκτυο.

Η μέθοδος R2S2 δίνει καλύτερα αποτελέσματα στις περιπτώσεις όπου η μεταβολή του αριθμού των δευτερευόντων χρηστών συμβαίνει αργά (δηλαδή στις περιπτώσεις που ένας δευτερεύων χρήστης παραμένει στο δίκτυο για αρκετό χρόνο). Στις περιπτώσεις όπου οι μεταβολές του αριθμού των δευτερευόντων χρηστών συμβαίνουν γρήγορα, ο αλγόριθμος δεν προλαβαίνει να συγκλίνει κι έτσι τα αποτελέσματα που παίρνουμε δεν αποτελούν τα καλύτερα δυνατά.

Στην περίπτωση που γνωρίζουμε ότι ο αριθμός των δευτερευόντων χρηστών στο σύστημα αλλάζει σχετικά γρήγορα, μπορούμε να θυσιάσουμε ένα μέρος του συνολικού Throughput με σκοπό να μειώσουμε τον χρόνο σύγκλισης του αλγόριθμου.

4.4.1. Ιδανικός Χρόνος

Από τις προσομοιώσεις που έγιναν παρατηρήθηκε πως όσο μεγάλωνε ο αριθμός των δευτερευόντων χρηστών στο δίκτυο, ο χρόνος σύγκλισης του αλγορίθμου R2S2 αυξάνονταν δραματικά, ακόμα και στις περιπτώσεις όπου προσπαθούσαμε να απλώσουμε αρκετά τους δευτερεύοντες χρήστες στις σχισμές επαναμετάδοσης (retransmission slots). Για παράδειγμα για $K = 100$ και $K' = 1,5K$, ακόμα και μετά το πέρας 2.000 R2S2 εποχών, ο αλγόριθμος δεν είχε συγκλίνει.

Όμως, στην περίπτωση εφαρμογής του αλγορίθμου R2S2 με K δευτερεύοντες χρήστες και $K' = 2K$ σχισμές επαναμετάδοσης (retransmission slot), ο αλγόριθμος συνέκλινε σχεδόν από την πρώτη R2S2 εποχή, κατά μέσο όρο χρειαζόμασταν 1,1 εποχή, ανεξαρτήτως του αριθμού των χρηστών.

4.4.1.1. Προσομοίωση

Στο παρακάτω παράδειγμα ο πρωτεύων χρήστης έχει νέα πακέτα για μετάδοση το 75% του χρόνου. Κάθε φορά που έχει πακέτο πληροφορίας στην ουρά του, το μεταδίδει άμεσα στο πρώτο slot που θα συναντήσει. Η πιθανότητα επιτυχημένης μετάδοσης ισούται με 0,98. Το Throughput του πρωτεύοντος χρήστη είναι ίσο με 0,75 αλλά αυτός απασχολεί το κανάλι περισσότερο από 75% του χρόνου. Στη διάρκεια των ανενεργών σχισμών (idle slots) του πρωτεύοντος χρήστη, οι $K = 5$

δευτερεύοντες χρήστες μεταδίδουν τα πακέτα πληροφορίας τους με τη χρήση του μηχανισμού NDMA. Υποθέτουμε ότι όλοι οι δευτερεύοντες χρήστες έχουν πάντα πακέτα στην ουρά τους προς μετάδοση, οπότε $K_{eff} = K$ σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Κατά τη διάρκεια των σχισμών επαναμετάδοσης (retransmission slots), οι ενεργοί δευτερεύοντες χρήστες χρησιμοποιούν DPC βασιζόμενοι στο μηχανισμό R2S2 με εύρος σχισμών επαναμετάδοσης (retransmission slots) ίσο με $2K$.

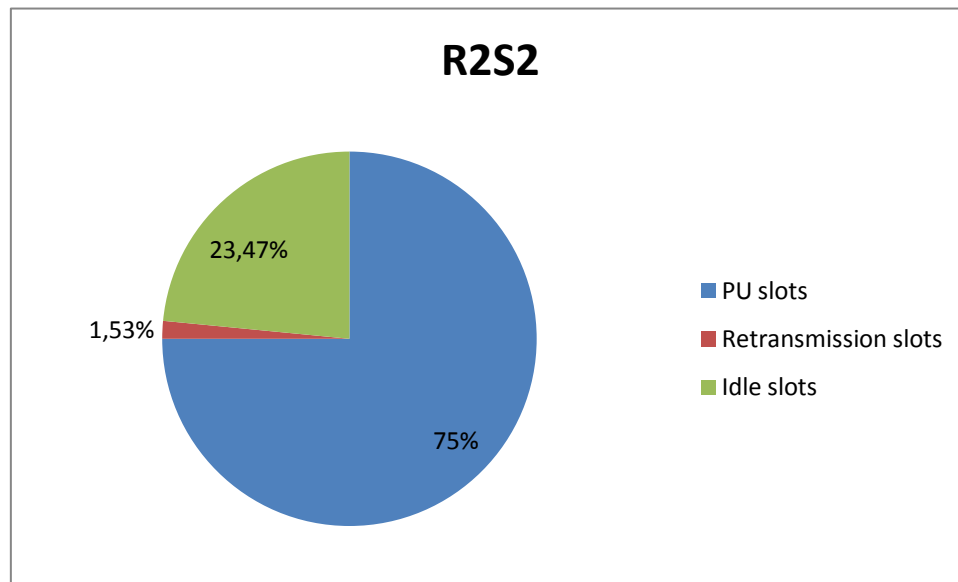
Αριθμός Κύκλων Προσομοίωσης: 10

Χρόνος Προσομοίωσης: 10.000.000 slots

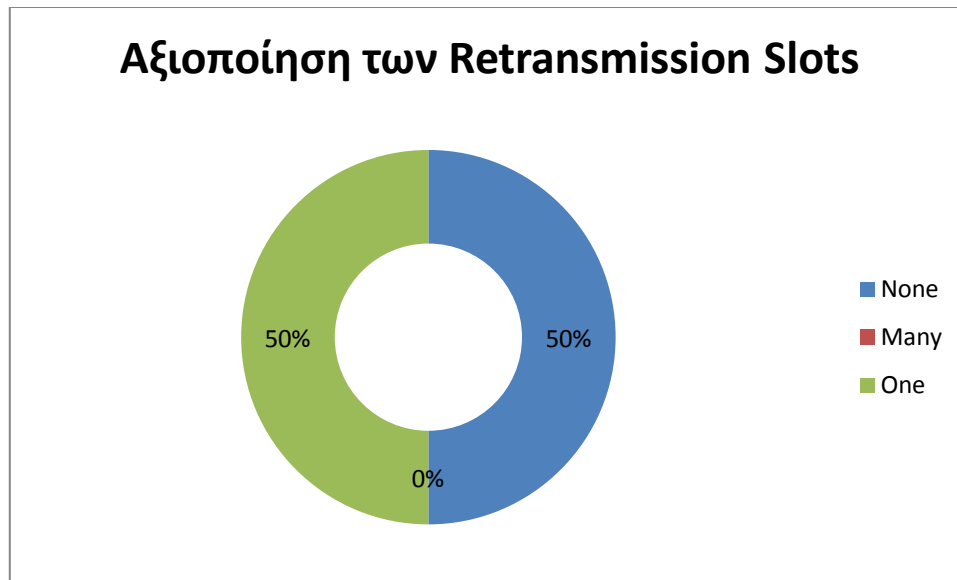
4.4.1.1.1. Αποτελέσματα Προσομοίωσης

PU Throughput	0.7500
SUs Throughput	0.2423

Πίνακας 4.5: Πρωτεύων και συνολικό δευτερέων Throughput



Σχήμα 4.9: Τα ποσοστά του χρόνου που ο πρωτεύων χρήστης μεταδίδει νέα πακέτα (PU slots), παραμένει ανενεργός (Idle slots) και επαναμεταδίδει (Retransmission slots).



Σχήμα 4.10: Τα ποσοστά των σχισμών επαναμετάδοσης (Retransmission Slots) στα οποία ο αριθμός των δευτερευόντων χρηστών που χρησιμοποιεί DPC είναι ίσος με ένα (One), μηδέν (None) και δύο ή παραπάνω (Many)

4.4.1.1.2. Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Με τον προτεινόμενο μηχανισμό αποφεύγονται σχεδόν όλες οι συγκρούσεις των δευτερευόντων χρηστών κατά την διάρκεια της πρώτης R2S2 εποχής και αξιοποιούνται αποδοτικά οι μισές σχισμές επαναμετάδοσης. Ύστερα από την πρώτη R2S2 εποχή, οι δευτερεύοντες χρήστες δεν συγκρούονται μεταξύ τους σε σχισμές επαναμετάδοσης (retransmission slots) και στο 50% αυτών των σχισμών είχαμε επιτυχημένη χρήση DPC ακριβώς από ένα δευτερεύοντα χρήστη.

4.5. Περίπτωση Δυναμικά Μεταβαλλόμενου Αριθμού Δευτερευόντων Χρηστών

Οι δευτερεύοντες χρήστες που βρίσκονται ήδη στο σύστημα και ξεκίνησαν να παίρνουν μέρος στον μηχανισμό R2S2 ξέρουν πότε τελειώνει η κάθε R2S2 εποχή. Οι νέοι όμως ενεργοί δευτερεύοντες χρήστες που εισέρχονται στο σύστημα, δεν γνωρίζουν πότε θα τελειώσει η τρέχουσα R2S2 εποχή ώστε να μπορούν να ξεκινήσουν να συμμετέχουν και οι ίδιοι στον μηχανισμό R2S2. Αυτό σημαίνει ότι, πρέπει να βρεθεί ένας τρόπος με τον οποίο οι νέοι δευτερεύοντες χρήστες θα ειδοποιούνται για το πότε μπορούν να ξεκινήσουν να παίρνουν μέρος σε DPC μεταδόσεις και άρα να χρησιμοποιούν τον μηχανισμό R2S2.

Ο μονός ο οποίος μπορεί να ειδοποιήσει σχετικά τους δευτερεύοντες χρήστες είναι ο δευτερεύων προορισμός. Αυτό μπορεί να επιτευχτεί μέσα από πληροφορία ενός bit στο ACK/NACK του δευτερεύοντος προορισμού. Το πρόβλημα όμως που αντιμετωπίσαμε ήταν ότι έπρεπε να βρούμε ένα τρόπο ο δευτερεύων προορισμός να μπορεί να κάνει καταμέτρηση των σχισμών επαναμετάδοσης (retransmission slots) που έχουν συμβεί σε μια εποχή.

Ένας τρόπος που μπορεί να επιτευχθεί αυτή η λειτουργία είναι ο δευτερέων προορισμός να μετρά τον αριθμό των σχισμών επαναμετάδοσης (retransmission slots) του πρωτεύοντος χρήστη χρησιμοποιώντας τις απαντήσεις που ακούει από τον πρωτεύοντα προορισμό (ACK/NACK) και να ειδοποιεί τους δευτερεύοντες χρήστες πότε τελειώνει μια εποχή R2S2. Ο υπολογισμός γίνεται από τον αριθμό των ενεργών χρηστών στην αρχή μιας εποχής και από τον αριθμό των σχισμών επαναμετάδοσης (retransmission slots). Οπότε απαραίτητη προϋπόθεση είναι ο δευτερέων προορισμός να είναι σε θέση να ακούει τις μεταδώσεις του πρωτεύοντος προορισμού. Πιο αναλυτικά, κάθε φορά που ο πρωτεύων χρήστης έχει μια ανεπιτυχή μετάδοση, ο πρωτεύων προορισμός θα μεταδώσει ότι δεν έλαβε σωστά το μεταδιδόμενο πακέτο. Έτσι ο πρωτεύων χρήστης γνωρίζει ότι στην επόμενη χρονική στιγμή πρέπει να επαναμεταδώσει το πακέτο του. Οι δευτερεύοντες χρήστες που έχουν ακούσει το πακέτο του πρωτεύοντος χρήστη και έχουν το δικαίωμα χρήσης DPC, μπορούν να εφαρμόσουν αυτή τη μέθοδο στην επόμενη χρονική σχισμή. Παράλληλα, ο δευτερέων προορισμός γνωρίζει και αυτός ότι η επόμενη χρονική σχισμή αποτελεί μια σχισμή επαναμετάδοσης (retransmission slot). Ο δευτερέων προορισμός γνωρίζοντας τον αριθμό των σχισμών επαναμετάδοσης (retransmission slots) καθώς και τον αριθμό των ενεργών δευτερευόντων χρηστών, μπορεί να ειδοποιήσει τους δευτερεύοντες χρήστες πότε ξεκινάει η επόμενη R2S2 εποχή.

Βέβαια, πάντα υπάρχει η περίπτωση ο δευτερέων προορισμός να μην είναι σε θέση να ακούσει μια απάντηση του πρωτεύοντος προορισμού. Στην περίπτωση αυτή, σε αντίθεση με πριν, ο δευτερέων προορισμός δεν είναι σε θέση να μετρήσει με ακρίβεια τον αριθμό των σχισμών επαναμετάδοσης (retransmission slots) και αυτό επηρεάζει αρνητικά την απόδοση του αλγορίθμου.

Μια λύση είναι στο παραπάνω πρόβλημα είναι η ακόλουθη.

Στην περίπτωση που ο δευτερέων προορισμός δεν άκουσε την απάντηση του πρωτεύοντος προορισμού και στην επόμενη χρονική σχισμή είτε δέχτηκε επιτυχημένα ένα πακέτο πληροφορίας λόγω DPC είτε συνέβη μια σύγκρουση (αγνώστου ταυτότητας) και παράλληλα ο πρωτεύων προορισμός στο τέλος αυτής της χρονική σχισμής δώσει απάντηση, τότε συνάγεται ότι αυτή η χρονική σχισμή ήταν σχισμή επαναμετάδοσης (retransmission slot). Θεωρούμε σπάνιο να μην ακούσει ο δευτερέων προορισμός σε δύο διαδοχικές σχισμές την απάντηση του πρωτεύοντος προορισμού.

Ακόμα όμως και αν δεχτούμε ότι η τελευταία περίπτωση μπορεί να συμβεί, το αποτέλεσμα θα ήταν ο δευτερέων προορισμός να μην είναι σε θέση να μετρήσει κάποιες σχισμές επαναμετάδοσης και να χρειαστούν κάποιες παραπάνω τέτοιες σχισμές μέχρι να ξεκινήσει η νέα R2S2 εποχή (οι παραπάνω αυτές σχισμές θα μείνουν αχρησιμοποίητες αφού κανένας δεν θα μπορεί να τις επιλέξει).

Τέλος, στις περιπτώσεις που ο δευτερεύων προορισμός ακούει μια σύγκρουση, την οποία δεν μπορεί να κατηγοριοποιήσει, μεταξύ NDMA και DPC σύγκρουσης, την αγνοεί.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

Επίλογος

Στο Κεφάλαιο αυτό αναλύεται η συμβολή της διπλωματικής εργασίας και προτείνονται ιδέες για μελλοντικές επεκτάσεις της εργασίας.

5.1. Συνεισφορά της Διπλωματικής Εργασίας

Στο πρώτο μέρος της διπλωματικής εργασίας (Κεφάλαιο 2), δείξαμε ότι η εισαγωγή της μεθόδου NDMA στα ευφυή ασύρματα δίκτυα επιφέρει σημαντική βελτίωση στην απόδοση της λειτουργίας τους.

Αρχικά δείξαμε ότι είναι εφικτή η υλοποίηση ενός κατανεμημένου μηχανισμού πρόσβασης στο μέσο σε ένα ευφυές ασύρματο δίκτυο. Στο προτεινόμενο νέο σχεδιασμό η χρήση κεντρικού σταθμού βάσης δεν είναι αναγκαία. Οι δευτερεύοντες χρήστες μπορούν ανεξάρτητα να στέλνουν τα πακέτα πληροφορίας τους κάθε φορά που ανιχνεύουν πως ο πρωτεύων χρήστης παραμένει ανενεργός στη διάρκεια μιας χρονικής σχισμής.

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνεται ότι η εκμετάλλευση των σχισμών στις οποίες ο πρωτεύων χρήστης παραμένει ανενεργός, είναι η ίδια τόσο στα συμβατικά ευφυή ασύρματα δίκτυα όσο και σε αυτά που χρησιμοποιούν την NDMA μέθοδο. Όμως, τα ευφυή δίκτυα που χρησιμοποιούν την μέθοδο NDMA δίνουν ίσες ευκαιρίες σε όλους τους δευτερεύοντες χρήστες στην αξιοποίηση των χρονικών σχισμών στις οποίες ο πρωτεύων χρήστης είναι ανενεργός, σε αντίθεση με τα συμβατικά ευφυή δίκτυα στα οποία το δικαίωμα αποστολής πακέτου πληροφορίας ενός δευτερεύοντος χρήστη εξαρτάται συνήθως από την κατάσταση του καναλιού του.

Στο δεύτερο μέρος της διπλωματικής εργασίας (Κεφάλαιο 3), δείξαμε ότι παρά την απουσία του κεντρικού κόμβου στο ευφυές δίκτυο που εξετάζουμε, η μέθοδος DPC μπορεί να εφαρμοστεί στο σύστημα μας και αυτό μπορεί να επιτευχθεί αν εκμεταλλευτούμε κατάλληλα πληροφορίες που συλλέγουμε από την χρήση της NDMA μεθόδου.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μας δείχνουν πως η ευκαιριακή χρήση DPC μετάδοσης αποτελεί μια καλή υποβέλτιστη λύση για την αξιοποίηση των σχισμών επαναμετάδοσης. Ο προτεινόμενος μηχανισμός δημιουργεί παρεμβολή του ευφυούς δικτύου στις επαναμεταδόσεις του πρωτεύοντος χρήστη στις περιπτώσεις όπου δύο ή παραπάνω δευτερεύοντες χρήστες επιλέγουν να χρησιμοποιήσουν την DPC μέθοδο κατά τη διάρκεια μιας σχισμής επαναμετάδοσης (retransmission slot) του πρωτεύοντος χρήστη.

Στο τρίτο μέρος της διπλωματικής εργασίας (Κεφάλαιο 4), με αλγοριθμικές αλλαγές που εισάγαμε καταφέραμε να αντισταθμίσουμε τις αρνητικές επιπτώσεις του

μηχανισμού που προτάθηκε στο Κεφάλαιο 3 εξασφαλίζοντας την ισότητα των ευκαιριών των δευτερευόντων χρηστών κατά τη διάρκεια σχισμών επαναμετάδοσης (retransmission slots) του πρωτεύοντος χρήστη.

Ο νέος μηχανισμός που προτάθηκε εγγυάται πως το συνολικό Throughput των δευτερευόντων χρηστών κατά τη διάρκεια σχισμών επαναμετάδοσης (retransmission slots) θα ισομοιράζεται μεταξύ των ενεργών δευτερευόντων χρηστών. Επιπλέον, δείξαμε μέσω των προσομοιώσεων ότι με κατάλληλη επιλογή τιμής μιας παραμέτρου ο μηχανισμός συγκλίνει σε λειτουργία με υψηλή απόδοση μετά από ένα σύντομο χρονικό διάστημα (σχεδόν από την πρώτη R2S2 εποχή), ότι σε αυτό το σημείο λειτουργίας αξιοποιείται από τους δευτερεύοντες χρήστες το 50% των σχισμών επαναμετάδοσης (retransmission slots), ενώ παράλληλα οι παρεμβολές στις επαναμεταδόσεις του πρωτεύοντος χρήστη μειωθήκαν δραματικά.

5.2. Ιδέες Μελλοντικών Επεκτάσεων

Σε αυτή την διπλωματική εργασία επικεντρωθήκαμε στην μοντελοποίηση ενός κατανομημένου ευφυούς ασύρματου δικτύου υποθέτοντας κάποιες ιδανικές συνθήκες. Θα παρουσίαζε μεγάλο ενδιαφέρον να προσομοιώναμε το μοντέλο του συστήματος μας εισάγοντας μια σειρά από συνθήκες που θα το έκαναν πιο ρεαλιστικό, για παράδειγμα θόρυβο σε όλα τα κανάλια, δηλαδή και σε αυτά των δευτερευόντων χρηστών, την γεωμετρία του δικτύου (π.χ. αποστάσεις), την παρεμβολή που προκαλεί ο δευτερεύων χρήστης στην μετάδοση του πρωτεύοντος κατά την διάρκεια χρήσης DPC, την πιθανότητα εσφαλμένης επίλυσης NDMA μιας σύγκρουσης, κ.λ.π. Η εισαγωγή των παραπάνω συνθηκών θα απαιτούσε αλλαγές στους προτεινόμενους αλγορίθμους και μηχανισμούς για να εξασφαλιστεί σωστή και αποδοτική λειτουργία του δικτύου.

Σε επόμενο στάδιο, θα είχε ενδιαφέρον η αξιολόγηση του μοντέλου του συστήματος μας και των προτεινόμενων αλγορίθμων σε πραγματικές συνθήκες (π.χ., σε πλατφόρμα δοκιμών με χρήση SDRs).

Βιβλιογραφία

- [1] Ioannis Krikidis, J. Nicholas Laneman, John Thompson, Steve McLaughlin, "*Protocol Design and Throughput Analysis for Multi-user Cognitive Cooperative Systems*", IEEE Trans. on Wireless Communications, vol. 8 , No. 9 , 2009.
- [2] Ezio Biglieri, Andrea J. Goldsmith, Larry J. Greenstein, Narayan B. Mandayam, H. Vincent Poor, "*Principles of Cognitive Radio Networks*", Cambridge University Press, pages 69—96, 2013
- [3] Ekram Hossain, Long Le, Natasha Devroye, Mai Vu, "*Cognitive Radio: From Theory to Practical Network Engineering*", in "*New Directions in Wireless Communications Research*" book, pages 251—289, 2009
- [4] Michail K. Tsatsanis, Ruifeng Zhang, Subrata Banerjee, "*Network-Assisted Diversity for Random Access Wireless Networks*", IEEE Trans. on Signal Processing, vol. 37, pages 702—711, Mar. 2000
- [5] Ruifeng Zhang, Michail K. Tsatsanis , "*A Random Multiple Access Scheme with Network Assisted Diversity and ARQ Control*", in IEEE Conference on Communications (Volume: 1), pages 154—158, 2000.
- [6] Ruifeng Zhang, Nicholas D. Sidiropoulos, Michail K. Tsatsanis , "*Collision Resolution in Packet Radio Networks Using Rotational Invariance Techniques*", IEEE Trans. on Communications, vol. 50, No. 1, Jan. 2002.
- [7] M. Costa , "*Writing on Dirty Paper*", IEEE Trans. on Information Theory, vol. 29, May 1983.
- [8] Aleksandar Jovicic, Pramod Viswanath, "*Cognitive Radio: An Information-Theoretic Perspective*", IEEE Trans. on Information Theory, vol. 55, Issue 9, Oct. 2007.
- [9] Joseph Mitola III, Gerald Q. Maguire, Jr., "*Cognitive radio: making software radios more personal*", IEEE Personal Communications Magazine, vol. 6, no. 4, pages 13—18, Aug. 1999.
- [10] Ying-Chang Liang, Hsiao_Hwa Chen, Mitola J., Mahonen P., Kohno R., Reed J.H., Milstein L., "*Guest Editorial Cognitive Radio: Theory and Application*", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 26, no. 1, January 2008.
- [11] <http://www.wirelessinnovation.org/assets/documents/SoftwareDefinedRadio.pdf>