

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Σχεδίαση και ανάπτυξη συνεργατικών συστημάτων ασύρματης
επικοινωνίας σε γνωστικά ασύρματα δίκτυα**

**Design and implementation of cooperative wireless communication
systems in cognitive radio networks**

Διπλωματική Εργασία



Ρουμπέας Κωνσταντίνος-Μάριος

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ:

Κοράκης Αθανάσιος

Αργυρίου Αντώνιος

Βόλος έτος 2018

Copyright © Κωνσταντίνος–Μάριος Ε. Ρουμπέας, 2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Ευχαριστήριο Σημείωμα

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Επίκουρο Καθηγητή του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας κ. Θανάση Κοράκη και το εργαστήριο NITlab, που μου έδωσε τη δυνατότητα τα τελευταία δυο χρόνια των σπουδών μου να ασχοληθώ με τον πολύπλευρο κλάδο των Δικτύων. Χωρίς την αρωγή του δεν θα είχα φτάσει στο σημείο να παίρνω μέρος σε τόσο ενδιαφέροντα project. Επίσης χρωστάω ένα μεγάλο ευχαριστώ στο συνοδοιπόρο μου στην εκπόνηση αυτής τη διπλωματική εργασίας Βιργίλιο Πασσά, για το χρόνο που αφιέρωσε και τις καίριες υποδείξεις που μου έκανε. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου, που με στήριζαν πάντα καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Βόλος, Ιούλιος 2018

Ρουμπέας Κωνσταντίνος - Μάριος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

0. Περίληψη	6
1. Εισαγωγή	8
1.1. Ασύρματα Δίκτυα.....	8
1.2. Licensed vs Unlicensed bands.....	9
1.3. Τρόποι για καλύτερη εκμετάλλευση του φάσματος	10
1.3.1. Cognitive Radios.....	10
1.3.2. Cooperative Communications in Wireless Networks.....	11
1.3.2.1. Coordinated Cooperative Communications in Wireless Networks.....	12
1.3.2.2. Uncoordinated Cooperative Communications in Wireless Networks.....	12
1.4. Software Define Radio (SDR).....	13
1.5. Universal Software Radio Peripheral (USRP).....	14
1.6. GNU Radio.....	15
2. Αλγόριθμοι Υλοποίησης.....	16
2.1. Υλοποίηση 1: Passive Spectrum Sense.....	16
2.1.1. Εισαγωγή	16
2.1.2. Λειτουργία του benchmark_rx.py	16
2.1.3. Λειτουργία του benchmark_tx.py	17
2.1.4. Συμπεράσματα	18
2.2. Υλοποίηση 2: RX Probe	19
2.2.1. Εισαγωγή	19
2.2.2. Λειτουργία του benchmark_rx.py	19
2.2.3. Λειτουργία του benchmark_tx.py	20
2.2.4. Συμπεράσματα	21
2.3. Υλοποίηση 3: Active Spectrum Sense.....	22
2.3.1. Εισαγωγή.....	22
2.3.2. Λειτουργία του benchmark_rx.py	22
2.3.3. Λειτουργία του benchmark_tx.py	23

2.3.4. Συμπεράσματα	24
2.4. Υλοποίηση 2: TX Probe	25
2.4.1. Εισαγωγή	25
2.4.2. Λειτουργία του benchmark_rx.py	25
2.4.3. Λειτουργία του benchmark_tx.py	26
2.4.4 Συμπεράσματα	27
2.5. Δυσκολίες	27
3. Πειράματα	28
3.1. Εισαγωγή	28
3.2. Πειράματα χωρίς την ύπαρξη άλλης μετάδοσης	28
3.2.1. Passive Spectrum Sense χωρίς άλλη μετάδοση.....	28
3.2.2. RX Probe χωρίς άλλη μετάδοση	30
3.2.3. Active Spectrum Sense χωρίς άλλη μετάδοση.....	32
3.2.4. TX Probe χωρίς άλλη μετάδοση.....	34
3.3. Πειράματα με την ύπαρξη μιας στατικής μετάδοσης	36
3.3.1. Passive Spectrum Sense vs στατική μετάδοση.....	36
3.3.2. RX Probe vs στατική μετάδοση.....	38
3.3.3. Active Spectrum Sense vs στατική μετάδοση.....	40
3.3.4. TX Probe vs στατική μετάδοση	42
3.4. Πειράματα με την ύπαρξη κινούμενης μετάδοσης δυο συχνοτήτων	44
3.4.1. Passive Spectrum Sense vs κινούμενη μετάδοση δυο συχνοτήτων	44
3.4.2 RX Probe vs Κινούμενη μετάδοση δυο συχνοτήτων	46
3.4.3. Active Spectrum Sense vs κινούμενη μετάδοση δυο συχνοτήτων	48
3.4.4. TX Probe vs κινούμενη μετάδοση δυο συχνοτήτων	50
3.5. Αξιολόγηση τωβ υλοποιήσεων σε τριάδες	52
3.5.1. Πείραμα 1: Passive Spectrum Sense vs RX Probe vs Active Spectrum Sense.....	54
3.5.2. Πείραμα 2: Passive Spectrum Sense vs TX Probe vs Active Spectrum Sense.....	56
3.5.3. Πείραμα 3: RX Probe vs TX Probe vs Active Spectrum Sense.....	57
3.5.4. Πείραμα 4: RX Probe vs TX Probe vs Passive Spectrum Sense.....	58
4. Επίλογος.....	61

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 0

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διπλωματική εργασία, που έχετε στα χέρια σας πραγματεύεται τρόπους για να γίνει uncoordinated cooperation σε unlicensed bands. Τα unlicensed bands είναι κομμάτια του φάσματος ελεύθερα προς χρήση από τον οποιονδήποτε. Αυτό το γεγονός δημιουργεί την επιτακτική ανάγκη για συνεργασία ανάμεσα στις μεταδόσεις, που χρησιμοποιούν το ίδιο κομμάτι του φάσματος την ίδια χρονική στιγμή. Όταν αυτό γίνεται συντονισμένα (coordinated), το εγχείρημα είναι σχετικά απλό. Δυσκολεύει όμως αισθητά, όταν αυτή η συνεργασία γίνεται χωρίς κάποιο συντονισμό (uncoordinated). Κάθε μια ασύρματη υλοποίηση λειτουργεί με διαφορετικό τρόπο, προκειμένου να επιτύχει τις καλύτερες δυνατές συνθήκες μετάδοσης, ανάλογα με το περιβάλλον και τον ανταγωνισμό που έχει την εκάστοτε χρονική στιγμή. Αυτή την ποικιλία στις αντιδράσεις των διαφόρων ασύρματων υλοποιήσεων θα έχετε την ευκαιρία να παρατηρήσετε ως ένα βαθμό, με τη βοήθεια τεσσάρων προγραμμάτων μετάδοσης, που έγιναν για αυτό το σκοπό. Οι υλοποιήσεις Passive Spectrum Sense, RX Probe, Active Spectrum Sense και TX Probe, έρχονται να μας προσφέρουν πολύτιμα συμπεράσματα για έναν κλάδο, που ενώ έχει προσεγγιστεί σε μεγάλο βαθμό θεωρητικά, πρακτικά φαίνεται να υπάρχει αρκετός δρόμος να διανυθεί. Όλα αυτά επιτυγχάνονται με τη βοήθεια της πλατφόρμας του GNU Radio. Για την ακρίβεια με τη χρήση ενός μέρους αυτού, που αναφέρεται σε ψηφιακές μεταδόσεις στενής ζώνης.

CHAPTER 0

ABSTRACT

This diploma thesis deals with ways to become uncoordinated cooperation in unlicensed bands. Unlicensed bands are pieces of the spectrum free to use by anyone. This fact creates the urgent need for collaboration between broadcasts that use the same piece of spectrum at the same time. When this is coordinated, things are simpler. The attempt becomes harder when this collaboration is uncoordinated. Each wireless implementation works in a different way in order to achieve the best possible transmission conditions according to the environment and the competition it has at the time. This variety in the reactions of various wireless implementations will have the opportunity to observe to some extent with the help of four broadcast programs that have been made for this purpose. Passive Spectrum Sense, RX Probe, Active Spectrum Sense and TX Probe implementations offer us valuable insights into a field that has been widely approached theoretically, and there is practically enough way to go. All this is done with the help of the GNU Radio platform. In fact, with a piece of this, which contains scripts in python and found in path ~home / gr-digital / examples / narrowband.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Ασύρματα Δίκτυα

Ως ασύρματο δίκτυο χαρακτηρίζεται το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, συνήθως τηλεφωνικό ή δίκτυο υπολογιστών, το οποίο χρησιμοποιεί ραδιοκύματα ως φορείς πληροφορίας. Τα δεδομένα μεταφέρονται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, με συχνότητα φέροντος, η οποία εξαρτάται κάθε φορά από τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που απαιτείται να υποστηρίξει το δίκτυο. Η ασύρματη επικοινωνία, σε αντίθεση με την ενσύρματη, δεν χρησιμοποιεί ως μέσο μετάδοσης κάποιον τύπο καλωδίου. Σε παλαιότερες εποχές τα τηλεφωνικά δίκτυα ήταν αναλογικά, αλλά σήμερα όλα τα ασύρματα δίκτυα βασίζονται σε ψηφιακή τεχνολογία και επομένως, κατά μία έννοια, είναι ουσιαστικά δίκτυα υπολογιστών.

Στα ασύρματα δίκτυα εντάσσονται τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, οι δορυφορικές επικοινωνίες, τα ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής (WWAN), τα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (WMAN), τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) και τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα (WPAN). Η τηλεόραση και το ραδιόφωνο, αν και ως τηλεπικοινωνιακά μέσα είναι εκ φύσεως ασύρματα, στις περισσότερες περιπτώσεις δεν συμπεριλαμβάνονται στα ασύρματα δίκτυα, καθώς η μετάδοση γίνεται προς πάσα κατεύθυνση χωρίς να υπάρχει κάποιο δομημένο «δίκτυο» τηλεπικοινωνιακών κόμβων (συσκευών) με τη συνήθη έννοια. Επιπλέον, τα μεταφερόμενα δεδομένα συνήθως είναι αναλογικά και επομένως δεν μπορούν να θεωρηθούν δίκτυα υπολογιστών.



Image 1.1. Worldwide Web

1.2. Licensed vs Unlicensed bands

Όπως προαναφέρθηκε όλες οι ασύρματες τεχνολογίες χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητικά κύματα για να εκπέμπουν και να λαμβάνουν πληροφορία. Προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα αρκετές απ' αυτές τις τεχνολογίες, να μπορούν να λειτουργούν ταυτόχρονα, είναι απαραίτητο να χωριστεί το ασύρματο φάσμα σε κομμάτια, τις μπάντες συχνοτήτων (frequency bands). Για παράδειγμα η VHF τηλεόραση έχει ανατεθεί σε μία μπάντα συχνοτήτων (από 30 έως 300 MHz), ενώ το AM ραδιόφωνο λειτουργεί σε μία άλλη εντελώς διαφορετική από την προηγούμενη (από 540 έως 1700 kHz).

Αυτά είναι τα licensed bands, κάτι που σημαίνει, ότι υπάρχουν κάποιες εταιρείες που πληρώνουν τέλη για το δικαίωμα στην αποκλειστική χρήση καναλιών μέσα σε συγκεκριμένη μπάντα μιας γεωγραφικής περιοχής. Για παράδειγμα τρεις τηλεοπτικοί σταθμοί της ίδιας περιοχής έχουν το δικαίωμα να χρησιμοποιούν τα VHF κανάλια 6,2 και 9 αντίστοιχα μιας συγκεκριμένης μπάντας συχνοτήτων.

Το licensing είναι ένας τρόπος να εξασφαλιστεί, ότι οι διάφορες ασύρματες μεταδόσεις δεν θα παρεμβάλλονται η μια στην άλλη. Όπως γίνεται κατανοητό χωρίς την αδειοδότηση, οι παρεμβολές ανάμεσα σε δυο πομποδέκτες θα λειτουργούσαν αποτρεπτικά για την αξιοπρεπή λήψη του σήματος. Με το licensing το μόνο μέρος που μπορούν να συμβούν παρεμβολές είναι στα άκρα της εκχωρημένης με άδεια περιοχής κάλυψης.

Παρόλα αυτά το licensing κάθε άλλο παρά πρακτικό είναι για κάποιες συγκεκριμένες χρήσεις. Παραδείγματα τέτοιων χρήσεων είναι η επικοινωνία του ασύρματου ποντικιού με το USB stick ή των ασύρματων ακουστικών με τη βάση τους. Αυτού του είδους ασύρματες τεχνολογίες εκπέμπουν σε unlicensed (χωρίς άδεια) μπάντες συχνοτήτων. Η συχνότητα 2.4 GHz ISM band είναι αυτή που χρησιμοποιείται στις περισσότερες χώρες ελεύθερα χωρίς άδεια. Μια άλλη ευρέως χρησιμοποιούμενη unlicensed band είναι η 5 GHz UNII band. Η κατανομή του φάσματος ποικίλει ανάλογα με τη χώρα. Στις Η.Π.Α οι συχνότητες ανατίθενται σύμφωνα με το Federal Communications Commission (FCC) και φαίνονται στην παραπομπή, που βρίσκεται στο τέλος της σελίδας.

Οι unlicensed ασύρματες τεχνολογίες δεν χρειάζονται κάποιου είδους άδεια, υπό την προϋπόθεση ότι προϊόντα και χρήστες συμμορφώνονται στους κανόνες που συνοδεύουν τα unlicensed bands (για παράδειγμα η μέγιστη ένταση μετάδοσης). Παρόλα αυτά είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι ασύρματες τεχνολογίες χωρίς άδεια είναι από τη φύση τους ευάλωτες στις παρεμβολές. Ίσως έχετε παρατηρήσει φθορά του σήματος στο WLAN του σπιτιού ή της δουλειάς. Αυτό συμβαίνει λόγω ενός αντίστοιχου WLAN ενός γείτονα στο ίδιο κανάλι της μπάντας που οριοθετείται από τα 2.4 και 5 GHz.

Όταν χρησιμοποιούνται unlicensed τεχνολογίες όπως το Wi-Fi είναι απαραίτητο να γίνουν προσαρμογές, προκειμένου να αποφευχθούν οι παρεμβολές. Είναι επίσης πιθανό να αλλάξει το περιβάλλον γύρω από την εκπομπή. Τέτοια προβλήματα δεν θα αντιμετώπιζε μια licensed τεχνολογία, αφού έχει μοναδικότητα χρήσης του καναλιού με χρηματικό αντίτιμο.

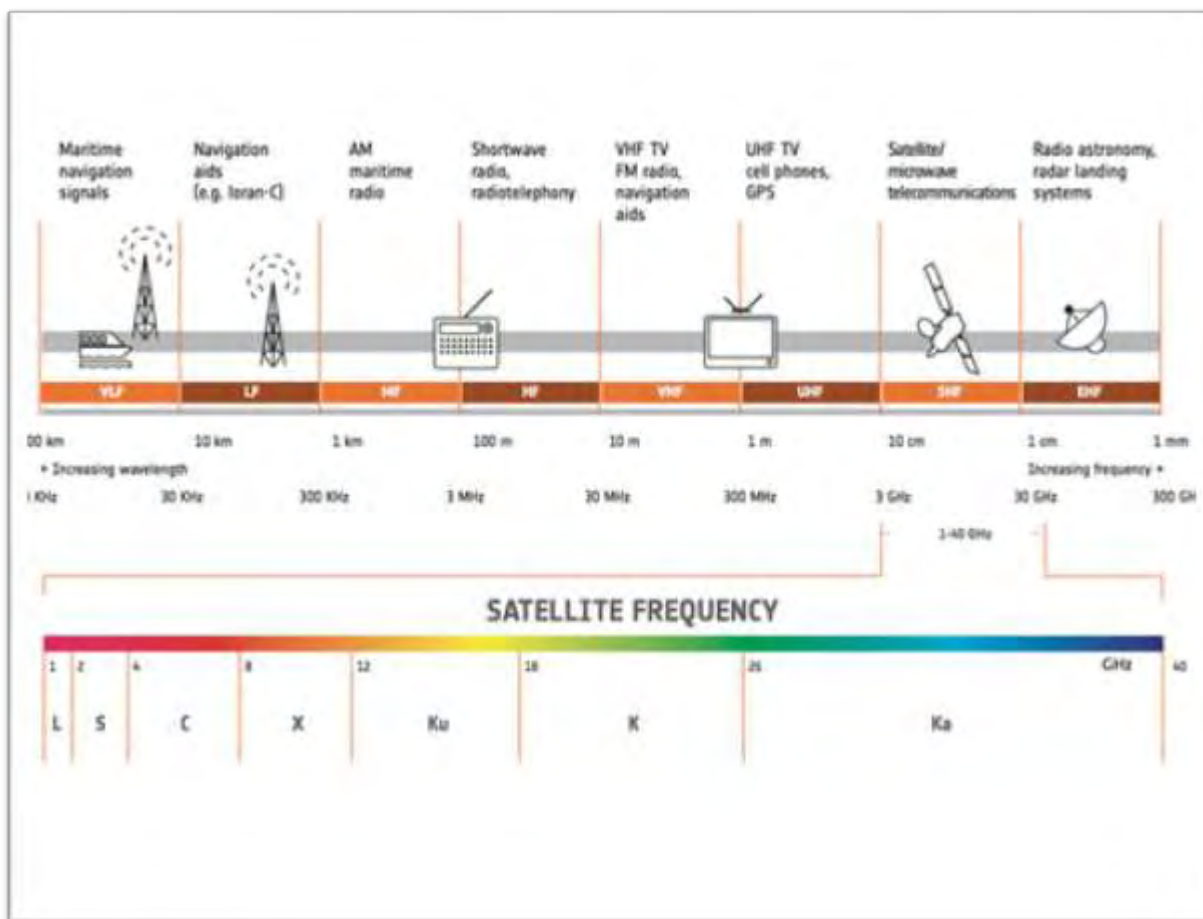


Image 1.2. Satellite frequency bands

1.3. Τρόποι για καλύτερη εκμετάλλευση του φάσματος

Η ύπαρξη πληθώρας unlicensed ασύρματων τεχνολογιών δημιουργεί την επιτακτική ανάγκη για εύρεση τεχνικών με στόχο την καλύτερη εκμετάλλευση του φάσματος. Τέτοιες είναι τα cognitive radios και το cooperation.

1.3.1. Cognitive Radios

Ένα Cognitive Radio (CR) είναι μια συσκευή, που μπορεί να προγραμματιστεί και ρυθμιστεί δυναμικά για να χρησιμοποιήσει τα καλύτερα ασύρματα κανάλια στην περιοχή του, με σκοπό να αποφευχθούν οι παρεμβολές από άλλους χρήστες και η συμφόρηση. Μια τέτοια συσκευή ανιχνεύει αυτόματα διαθέσιμα κανάλια στο ασύρματο φάσμα και στη συνέχεια αλλάζει συχνότητα ανάλογα με τις παραμέτρους μετάδοσης ή λήψης, ώστε να επιτρέπει περισσότερες ταυτόχρονες ασύρματες επικοινωνίες σε μια συγκεκριμένη ζώνη φάσματος μίας περιοχής. Αυτή η διαδικασία είναι μια μορφή δυναμικής διαχείρισης του φάσματος.

Στην πιο βασική του μορφή, το CR είναι μια υβριδική τεχνολογία, που περιλαμβάνει software defined radio (SDR). Το SDR θα εξηγηθεί εκτενέστερα παρακάτω. Μέσα στις πιθανές λειτουργίες ενός CR είναι η ικανότητα ενός πομποδέκτη (transceiver) να προσδιορίζει τη

γεωγραφική του θέση, να αναγνωρίζει και να εξουσιοδοτεί το χρήστη του, να κρυπτογραφεί ή να αποκρυπτογραφεί σήματα, όπως επίσης και να αντιλαμβάνεται γειτονικές ασύρματες συσκευές σε λειτουργία, έτσι ώστε να προσαρμόζει τα χαρακτηριστικά ισχύος εξόδου (output power) και διαμόρφωσης (modulation).

Υπάρχουν δυο τύποι cognitive radio, το full cognitive radio και το spectrum-sensing cognitive radio. Το full cognitive radio λαμβάνει υπόψιν όλες τις παραμέτρους που μπορεί να γνωρίζει ένας ασύρματος κόμβος ή δίκτυο. Το spectrum-sensing cognitive radio χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την ανίχνευση του φάσματος, με σκοπό την εύρεση ελεύθερων καναλιών.

The Federal Communications Commission (FCC) καθιέρωσε το Νοέμβριο του 2008 κάποια αχρησιμοποίητα κομμάτια του RF spectrum (γνωστά ως white spaces), τα οποία θα ήταν διαθέσιμα στο κοινό για χρήση. Οι συσκευές white space πρέπει να περιλαμβάνουν τεχνολογίες για να αποφεύγουν τις παρεμβολές, όπως spectrum sensing και ικανότητα ανίχνευσης της γεωγραφικής τους θέσης. Τις τεχνολογίες αυτές τις διαθέτουν εξ ορισμού τα cognitive radios.

Η ιδέα του CR αναπτύχθηκε από τον Joseph Mitola στο Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) των Η.Π.Α. Το full cognitive radio είναι επίσης γνωστό και ως "Mitola radio."

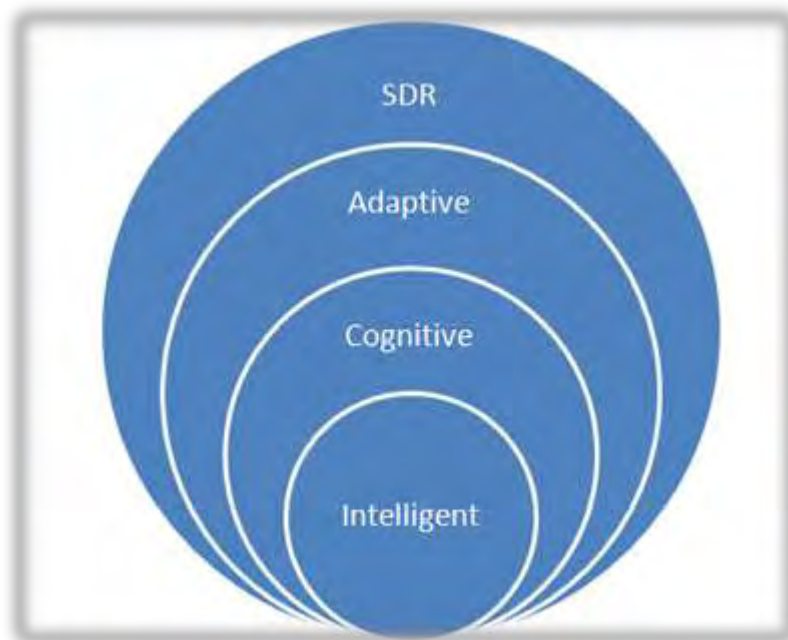


Image 1.3. Venn diagram

1.3.2. Cooperative Communications in Wireless Networks

Τα ασύρματα δίκτυα επόμενης γενιάς θα υπερβούν τα υπάρχοντα παραδείγματα επικοινωνίας από σημείο σε σημείο ή από σημείο σε πολλαπλά σημεία των κλασικών κυψελοειδών δικτύων. Θα βασίζονται πλέον σε σύνθετες αλληλεπιδράσεις, όπου οι εμπλεκόμενοι κόμβοι θα συνεργάζονται μεταξύ τους για να βελτιώσουν όχι μόνο τις επιδόσεις της δικής τους επικοινωνίας, αλλά και του παγκόσμιου δικτύου. Οι συνεργατικές επικοινωνίες, που βασίζονται σε κόμβους αναμετάδοσης έχουν αναδειχθεί ως μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για αύξηση της φασματικής και ενεργειακής απόδοσης, κάλυψη του δικτύου και μείωση της πιθανότητας διακοπής της επικοινωνίας. Ομοίως με πομποδέκτες πολλαπλών κεραιών, παρέχεται διαφοροποίηση δημιουργώντας πολλαπλά αντίγραφα του σήματος. Με τον σωστό συντονισμό διαφορετικών καταναμημένων στο χώρο κόμβων σε ένα ασύρματο σύστημα, μπορεί κανείς να συνθέσει

αποτελεσματικά μια εικονική συστοιχία κεραιών, που εξομοιώνει τη λειτουργία ενός πομποδέκτη πολλαπλών σημείων.

Η ανάγκη για ασύρματα δίκτυα νέας γενιάς προκάλεσε την έναρξη ερευνών σε πυρετώδεις ρυθμούς σχετικά με τις συνεργατικές επικοινωνίες τα τελευταία χρόνια. Παρόλα αυτά, πολλές πτυχές των επικοινωνιών συνεργασίας είναι ακόμα και σήμερα ανοιχτά προβλήματα. Επιπλέον, τα περισσότερα από τα συνεργαζόμενα συστήματα που έχουν προταθεί μέχρι στιγμής βασίζονται σε ιδανικές υποθέσεις, όπως μη δεσμευτικοί περιορισμοί συγχρονισμού μεταξύ των κόμβων αναμετάδοσης ή η ύπαρξη τέλειων πληροφοριών για την κατάσταση των καναλιών στη μονάδα κατανομής πόρων. Υπάρχει ανάγκη για έρευνα σχετικά με την ανεύρεση πρακτικών τρόπων υλοποίησης συνεργασιών με βάση ρεαλιστικές υποθέσεις.

Ο στόχος και η φιλοδοξία αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι να συμβάλει σε αυτόν τον διττό σκοπό: να προωθήσει την κατανόηση της συνεργατικής μετάδοσης και να διερευνήσει πρακτικούς περιορισμούς ρεαλιστικών συνεργατικών συστημάτων.

Όπως προκύπτει από τις παραπάνω θέσεις, οι συνεργατικές επικοινωνίες είναι κατανοητές σε μεγάλο από θεωρητικής απόψεως. Ωστόσο, οι πρακτικές υλοποιήσεις των συστημάτων επικοινωνιακής συνεργασίας είναι ακόμη αρκετά περιορισμένες.

1.3.2.1. Coordinated Cooperative Communications in Wireless Networks

Η μια υποκατηγορία συνεργατικών επικοινωνιών στα ασύρματα δίκτυα είναι οι συντονισμένες συνεργατικές επικοινωνίες. Αυτή επιτρέπει στις τεχνολογίες, που συνυπάρχουν σε ένα ασύρματο δίκτυο να συνεργάζονται μέσω μιας μετάδοσης ή επεξεργασίας σημάτων. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγονται αποτελεσματικά οι συγκρούσεις ανάμεσα στις μεταδόσεις των διαφόρων ασύρματων τεχνολογιών, με αποτέλεσμα η επικοινωνία ανάμεσα σε πομπό και δέκτη να γίνεται πιο αποτελεσματικά.

1.3.2.2. Uncoordinated Cooperative Communications in Wireless Networks

Η δεύτερη υποκατηγορία συνεργατικών επικοινωνιών στα ασύρματα δίκτυα και αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι οι ασυντόνιστες συνεργατικές επικοινωνίες. Σε τέτοιου είδους επικοινωνίες η εκάστοτε ασύρματη τεχνολογία λειτουργεί χωρίς να υπάρχει κανένας συντονισμός με αντίστοιχες τεχνολογίες, που συνυπάρχουν σε ένα ασύρματο δίκτυο. Η απόφαση για τις βέλτιστες συνθήκες μετάδοσης λαμβάνονται μεμονωμένα και βασίζονται στις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον (επίπεδα θορύβου), την απόσταση των κόμβων και στις δυνατότητες που έχει η εκάστοτε ασύρματη τεχνολογία.

Οι ασυντόνιστες συνεργατικές επικοινωνίες είναι μια λύση χαμηλού κόστους και ενδείκνυται για καταστάσεις υψηλού θορύβου. Επίσης εξυπηρετεί το ενδεχόμενο ύπαρξης μεγάλου αριθμού και πυκνότητας κόμβων σε ένα ασύρματο δίκτυο, καθώς σε τέτοιες περιπτώσεις ο συντονισμός ανάμεσα στις ασύρματες τεχνολογίες, κρίνεται ως ένα ιδιαίτερος δύσκολο εγχείρημα.

1.4. Software Define Radio (SDR)

Το Software Define Radio (SDR) είναι ένα σύστημα επικοινωνίας, στο οποίο τα στοιχεία που παραδοσιακά γίνονταν μέσω hardware (π.χ μείκτες, φίλτρα, modulators/demodulators, detectors) ορίζονται μέσω software με τη βοήθεια ενός υπολογιστή ή ενός embedded system. Η ταχεία πρόοδος της τεχνολογίας επιτρέπει με τη βοήθεια του SDR να δοκιμαστούν και να υλοποιηθούν ιδέες, οι οποίες υπήρχαν μόνο σε θεωρητική βάση.

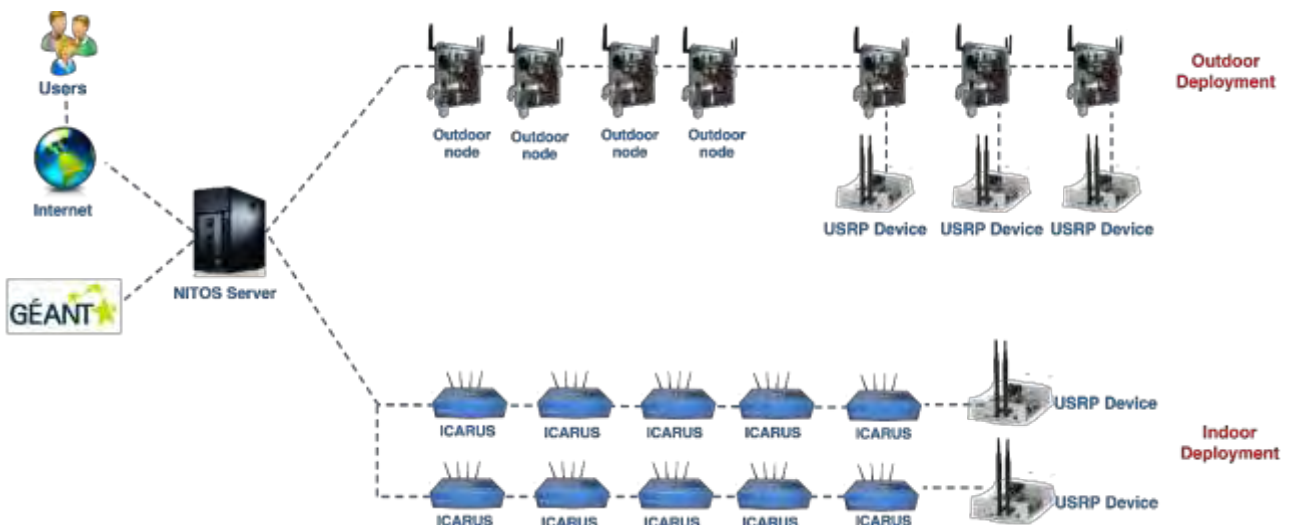


Image 1.4. NITlab's SDR testbed

1.5. Universal Software Radio Peripheral (USRP)

Τα USRP είναι ένα είδος software define radio, τα οποία κατασκευάζονται και πωλούνται από της Ettus Research και τη μητρική της εταιρεία, τη National Instruments. Αναπτύχθηκε από μια ομάδα με επικεφαλή τον Matt Ettus. Η οικογένεια προϊόντων USRP προορίζεται να είναι μια σχετικά φθηνή πλατφόρμα υλικού για το SDR και χρησιμοποιείται συνήθως από ερευνητικά εργαστήρια, πανεπιστήμια και χομπίστες.

Οι περισσότερες συσκευές USRP συνδέονται με έναν κεντρικό υπολογιστή μέσω ενός συνδέσμου υψηλής ταχύτητας, ο οποίος ελέγχει τη συσκευή στη μετάδοση / λήψη δεδομένων (Image 4). Ορισμένα μοντέλα USRP με τη βοήθεια του κατάλληλου επεξεργαστή έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν αυτόνομα.

Η οικογένεια των USRP σχεδιάστηκε για να παρέχει προσβασιμότητα, με πολλά από τα προϊόντα να είναι ελεύθερα στη χρήση ανοιχτού κώδικα. Όλα τα προϊόντα USRP ελέγχονται από το πρόγραμμα οδήγησης UHD, το οποίο είναι δωρεάν λογισμικό και λογισμικό ανοιχτού κώδικα. Τα USRP χρησιμοποιούνται συνήθως με το λογισμικό GNU Radio με σκοπό τη δημιουργία σύνθετων SDR συστημάτων.



Image 1.5. USRP B210

1.6. GNU Radio

Το GNU Radio είναι ένα δωρεάν εργαλείο ανάπτυξης λογισμικού που παρέχει μπλοκ επεξεργασίας σήματος για την δημιουργία SDR's και συστημάτων επεξεργασίας σήματος. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί με εξωτερικό υλικό RF hardware ή χωρίς hardware σε περιβάλλον προσομοίωσης. Χρησιμοποιείται ευρέως σε ακαδημαϊκά και εμπορικά περιβάλλοντα για την υποστήριξη, τόσο της έρευνας ασύρματων επικοινωνιών, όσο και των συστημάτων πραγματικού κόσμου.



Image 1.6. GNU Radio logo

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

2.1. Υλοποίηση 1: Passive Spectrum Sense

2.1.1. Εισαγωγή

Η πρώτη ιδέα, που υλοποιήθηκε με βάση τους κώδικες, που προσφέρει το GNU Radio ονομάζεται Passive Spectrum Sense. Όπως δείχνει το όνομα η υλοποίηση χρησιμοποιεί έμμεσο τρόπο για να διαπιστώσει εάν το κανάλι εκπομπής είναι ελεύθερο. Με βάση τα αποτελέσματα προκύπτει η απόφαση συνέχισης της μετάδοσης στο ίδιο κανάλι ή της προτίμησης κάποιας άλλης συχνότητας. Τα scripts, που τροποποιήθηκαν για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι τα `benchmark_tx.py` και `benchmark_rx.py`, που βρίσκονται στο `~home/gr-digital/examples/narrowband`.

2.1.2. Λειτουργία του `benchmark_rx.py`

Για να ξεκινήσει η ανάλυση λειτουργίας του `benchmark_rx.py` θα πρέπει πρώτα να εξεταστούν οι παράμετροι, που χρησιμοποιήθηκαν για να επιτευχθεί η επιθυμητή λειτουργία. Υπάρχουν δυο block κώδικα, εκ των οποίων το ένα χρησιμοποιεί το receive chain του USRP (υπάρχει στη βασική υλοποίηση του Gnuradio) και το άλλο το transmit chain. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι παράμετροι, που χρησιμοποιήθηκαν στο εκάστοτε block.

Parameters	Receive Block	Transmit Block
TX Amplitude	0.55	0.55
Gain	50	80
Bitrate	2x10 ⁶	1x10 ⁶
Constellation Points	4	4
Modulation	gmsk	gmsk

Το receive block είναι αυτό μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η κύρια μετάδοση. Το transmit block είναι αυτό, που δημιουργεί το feedback κανάλι. Μέσω του καναλιού αυτού μεταδίδονται οι πληροφορίες για το αν θα πρέπει η μετάδοση να μεταπηδήσει σε άλλη συχνότητα ή όχι.

Αρχικοποιούνται τα δυο block. Το ένα (receive) ρυθμίζεται να λαμβάνει 1.5MHz αριστερά από την συχνότητα, που δόθηκε από τον χρήστη. Το δεύτερο (feedback) ρυθμίζεται και στέλνει 2MHz δεξιά από τη δοθείσα συχνότητα. Με αυτό τον τρόπο δεν θα υπάρχει σύγκρουση ανάμεσα στις δυο μεταδόσεις. Στη συνέχεια ξεκινούν οι 2 μεταδόσεις. Ταυτόχρονα, σε 2 νήματα τρέχουν οι συναρτήσεις `rx_callback` και `ack`. Η πρώτη που αφορά το receiver, λαμβάνει τα πακέτα, που στέλνονται και αυξάνει τους μετρητές `n_revd_hop` και `n_right_hop`. Οι μετρητές αντιπροσωπεύουν το σύνολο των μηνυμάτων που ελήφθησαν και πόσα απ' αυτά ήταν σωστά ανάμεσα σε δυο εναλλαγές συχνότητας, αντίστοιχα. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιεί με τη σειρά της η `ack`, προκειμένου να αποφασίσει αν θα πρέπει να γίνει κάποια εναλλαγή ή όχι. Κάθε τρία δευτερόλεπτα ελέγχει τη διαφορά ανάμεσα στους δυο μετρητές. Αν αυτή είναι μεγαλύτερη ή ίση του 100 τότε το

data παίρνει την τιμή chr(0), που συμβολίζει το False, ενώ αν είναι μικρότερη παίρνει την τιμή chr(1), που συμβολίζει το True. Ακολούθως δημιουργούνται 3 πακέτα, που περιέχουν το data και στέλνονται μέσω του feedback καναλιού στο benchmark_tx.py. Η ύπαρξη τριών πακέτων γίνεται για λόγους ασφαλείας (αν χαθεί ένα πακέτο, υπάρχουν άλλα δυο με την ίδια πληροφορία, έτσι ώστε ο transmitter να είναι πάντα ενημερωμένος). Σε περίπτωση που το data είναι 1 σημαίνει, ότι η μετάδοση βαίνει καλώς και δεν χρειάζεται να αλλάξει κάτι. Σε αντίθετη περίπτωση (το data παίρνει την τιμή 0) ενεργοποιείται η συνάρτηση set_next_freq, που είναι αρμόδια για τις εναλλαγές συχνότητας. Μέσα σε αυτή τη συνάρτηση το φάσμα των 5MHz είναι χωρισμένο σε 6 ίσα κανάλια του 0.5MHz έκαστο. Κάθε φορά που καλείται, μεταπηδά στο αμέσως επόμενο από τα δεξιά κανάλι (π.χ αν βρίσκεται η μετάδοση στα 1803MHz, μεταπηδά στα 1803.5MHz). Η μεταπήδηση από το κανάλι, που βρίσκεται αμέσως πριν απ' αυτό του feedback, γίνεται στο πρώτο (άκρη αριστερά) για να αποφευχθεί τυχόν σύγκρουση.

2.1.3. Λειτουργία του benchmark_tx.py

Όπως συνέβη και στο benchmark_rx.py έτσι κι εδώ, η επεξήγηση του αλγορίθμου θα ξεκινήσει με παράθεση των παραμέτρων που συνέβαλαν στη σωστή λειτουργία της υλοποίησης. Και εδώ υπάρχουν δυο block κώδικα, εκ των οποίων το ένα χρησιμοποιεί το transmit chain του USRP (υπάρχει στη βασική υλοποίηση του GNU Radio) και το άλλο το receive chain. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στο εκάστοτε block.

Parameters	Transmit Block	Receive Block
TX Amplitude	0.55	0.55
Gain	65	70
Bitrate	2x10 ⁶	1x10 ⁶
Constellation Points	4	4
Modulation	gmsk	gmsk

Το transmit block είναι αυτό μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η κύρια μετάδοση. Μέσω του receive block το feedback κανάλι ενημερώνει το TX για το ενδεχόμενο να χρειαστεί κάποια μεταπήδηση συχνότητας.

Όπως και στο άλλο benchmark script έτσι και τώρα αρχικοποιούνται τα δυο block με το transmit να στέλνει 1.5 MHz αριστερά από τη συχνότητα, που δόθηκε από τη γραμμή εντολών και το feedback κανάλι να λαμβάνει 2 MHz δεξιά από τη συχνότητα αυτή. Οι δυο μεταδόσεις ξεκινούν. Ο transmitter μεταδίδει, ενώ παράλληλα μέσω του rx_callback λαμβάνονται μηνύματα για την απόφαση, που έχει παρθεί στη μεριά του receiver για εναλλαγή συχνότητας ή όχι. Μέσα στην προαναφερθείσα συνάρτηση έχει υλοποιηθεί ένας αλγόριθμος, για να ερμηνεύει σωστά την ασφάλεια, που υπάρχει από τον receiver. Αυτό σημαίνει ότι ανά τρεις συνεχόμενους αριθμούς πακέτων (pktno) λαμβάνεται υπόψιν μόνο του ενός (αν φτάσουν και τα τρία pktno με αριθμούς 0,1,2 στον transmitter θα ληφθεί υπόψιν μόνο του ενός για να αποφευχθούν λανθασμένες ενέργειες). Τα δεδομένα (data) ερμηνεύονται όπως και στον receiver με το 1 να αντιστοιχεί στο True, που ενημερώνει τον εκπομπό ότι δεν συντρέχει λόγος για αλλαγή συχνότητας, ενώ το 0 αντιστοιχεί στο False και υποδεικνύει την ανάγκη για αλλαγή συχνότητας. Αυτό γίνεται εφικτό με

τη συνάρτηση `set_next_freq`. Η λειτουργία της είναι ακριβώς η ίδια με την αντίστοιχη συνάρτηση, όπως αναλύθηκε στην ενότητα του `benchmark_rx.py`.

2.1.4. Συμπεράσματα

Η συγκεκριμένη υλοποίηση στις δοκιμές, που έγιναν με την παράλληλη μετάδοση άλλων υλοποιήσεων στο ίδιο φάσμα, έδωσε πάρα πολύ ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Το `Passive Spectrum Sense` είχε την ευχέρεια να αναγνωρίζει αρκετά γρήγορα την ύπαρξη άλλης μετάδοσης στο κανάλι εκπομπής και να την αποφεύγει. Δυστυχώς, υπάρχει ένα μικρό διάστημα σύγκρουσης κάτι που είναι ανέφικτο να διορθωθεί, αφού ο αλγόριθμος εφαρμόζει έμμεσο sensing. Ένα ακόμα μεγάλο στοίχημα για τις υλοποιήσεις, που εφαρμόζουν εναλλαγές συχνότητας είναι να γίνεται σωστός συγχρονισμός ανάμεσα σε transmitter και receiver κατά τις εναλλαγές συχνοτήτων. Και σ' αυτόν τον τομέα η ιδέα του `Passive Spectrum Sense` παίρνει άριστα. Αυτό οφείλεται αποκλειστικά στην χρήση του `gmsk modulation`. Ο συγκεκριμένος τρόπος modulation είναι ο καλύτερος (αν όχι ο μοναδικός) αρωγός στο συγχρονισμό των δυο scripts. Ως παρατήρηση πρέπει να αναφερθεί, ότι για την άρτια λειτουργία του `gmsk` είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν αρκετά μεγάλα gain και στον transmitter και στον receiver.

2.2. Υλοποίηση 2: RX Probe

2.2.1. Εισαγωγή

Η δεύτερη υλοποίηση, που δημιουργήθηκε στη βάση του GNU Radio ονομάζεται RX Probe. Το όνομα προέρχεται από ένα κομμάτι κώδικα, που βρίσκεται στο script `receive_path.py`, το `probe`. Αυτό το block έχει τη δυνατότητα να ελέγχει αν σε κάποιο εύρος συχνότητας υπάρχει μια μετάδοση ή όχι. Με βάση τα αποτελέσματα, που προσφέρει το `probe`, προκύπτει η απόφαση ως προς ποιά συχνότητα είναι βέλτιστη για να μετακινηθεί η μετάδοση. Όπως ακριβώς συνέβη και στην υλοποίηση `Passive Spectrum Sense`, έτσι και τώρα τα scripts, που τροποποιήθηκαν είναι το `benchmark_tx.py` και `benchmark_rx.py`. Το path για να εντοπιστούν είναι `~home/gr-digital/examples/narrowband`.

2.2.2. Λειτουργία του `benchmark_rx.py`

Για να ξεκινήσει η ανάλυση λειτουργίας του `benchmark_rx.py` θα πρέπει πρώτα να εξεταστούν οι παράμετροι, που χρησιμοποιήθηκαν για να επιτευχθεί η επιθυμητή λειτουργία. Υπάρχουν τρία block κώδικα, εκ των οποίων το πρώτο χρησιμοποιεί το `receive chain` του USRP (υπάρχει στη βασική υλοποίηση του GNU Radio) και το δεύτερο το `transmit chain`. Το τρίτο block μέσω του `receive chain` εκτελεί ανίχνευση ενέργειας μέσα σε ένα καθορισμένο φάσμα. Η ενέργεια αυτή του υποδεικνύει την ύπαρξη ή μη κάποιας μετάδοσης. Αυτό είναι και το `probe`, που προαναφέρθηκε. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στο εκάστοτε block.

Parameters	Receive Block	Transmit Block	Probe
TX Amplitude	0.55	0.55	-
Gain	50	80	50
Bitrate	2×10^6	1×10^6	-
Constellation Points	4	4	-
Modulation	gmsk	gmsk	-
Antenna	RX2	TX/RX	TX/RX
Sample Rate	-	-	0.5×10^6
Alpha	-	-	0.001
Thresh	-	-	-40

Το `receive block` είναι εκείνο μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η κύρια μετάδοση. Μέσω του `transmit block` το `feedback` κανάλι ενημερώνει το TX για το αν θα χρειαστεί να γίνει κάποια μεταπήδηση σε άλλη συχνότητα ή όχι. Όπως θα παρατηρήσετε στη συγκεκριμένη υλοποίηση έχουν προστεθεί κάποιοι παράμετροι σε σχέση με την προηγούμενη. Αυτές είναι οι `antenna`, `sample rate`, `alpha` και `thresh`. Η πρώτη μας εξυπηρετεί στον καθορισμό της κεραίας, που θα χρησιμοποιήσει το εκάστοτε block (`receive`, `transmit`, `probe`). Ο λόγος, που το `transmit` και το `probe` μοιράζονται την ίδια κεραία είναι η αναγκαιότητα του `receive` να λειτουργεί ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγετε ο κίνδυνος να χαθεί ο συγχρονισμός. Οι άλλες τρεις παράμετροι αφορούν αποκλειστικά το `probe`. Το `sample rate` καθορίζει το εύρος της συχνότητας, που θα ελεγχθεί την

εκάστοτε χρονική στιγμή. Το alpha αποτελεί τον πόλο, που τοποθετείται σ' ένα μονό IIR φίλτρο πόλων. Χρησιμοποιείται για να φιλτράρεται το σήμα προτού συγκριθεί με το κατώφλι(threshold). Τέλος, το threshold(κατώφλι) είναι η τιμή ενέργειας, πάνω από την οποία το probe αποφασίζει, ότι υπάρχει ενέργεια στο φάσμα κατά συνέπεια και μετάδοση.

Αρχικοποιούνται τα τρία block. Το πρώτο (receive) ρυθμίζεται να λαμβάνει 1.5MHz αριστερά από την συχνότητα, που δόθηκε από τον χρήστη. Το δεύτερο (feedback) θα στέλνει 2MHz δεξιά από τη δοθείσα συχνότητα. Με αυτό τον τρόπο δεν θα υπάρχει σύγκρουση ανάμεσα στις δυο μεταδόσεις. Το τρίτο και τελευταίο (probe) ξεκινάει το sensing 2MHz αριστερά της προαναφερθείσας συχνότητας. Το receive block ξεκινά και μαζί του ξεκινά και η λήψη μηνυμάτων. Ταυτόχρονα σε 2 νήματα τρέχουν οι συναρτήσεις rx_callback και probe. Η πρώτη, που αφορά το receiver λαμβάνει τα πακέτα, που στέλνονται. Η δεύτερη αφορά το probe και εξυπηρετεί στο σκανάρισμα των συχνοτήτων από το σημείο έναρξης, έως και 1MHz δεξιά από τη δοθείσα συχνότητα. Ο λόγος, που δεν κινείται δεξιότερα, είναι διότι δεν είναι επιθυμητό να χρησιμοποιήσει η κύρια μετάδοση τις συχνότητες αυτές, καθώς τις χρησιμοποιεί το feedback κανάλι. Μέχρι να βρεθεί κενό στο φάσμα, το probe διαπερνά τις συχνότητες, που προαναφέρθηκαν με βήμα 0.5MHz. Όσο ανιχνεύεται μετάδοση, η συνάρτηση επιστρέφει True, ενώ όταν δεν υπάρχει ενέργεια στο κανάλι επιστρέφει False. Μόλις βρεθεί ελεύθερο κανάλι, το block του probe σταματά ενεργοποιώντας αυτό, που χρησιμοποιεί το feedback κανάλι. Μέσω αυτού στέλνεται στον εκπομπό της κύριας μετάδοσης η νέα συχνότητα, για να συνεχιστεί χωρίς παρεμβολές η μετάδοση. Δημιουργούνται 3 πακέτα, που περιέχουν το data και στέλνονται. Αυτό γίνεται για λόγους ασφαλείας (αν χαθεί ένα πακέτο, υπάρχουν άλλα δυο με την ίδια πληροφορία, έτσι ώστε ο transmitter να ναι πάντα ενημερωμένος). Αφού ολοκληρωθεί αυτή η διαδικασία ρυθμίζεται και ο δέκτης στη συχνότητα αυτή. Τέλος, το block του feedback καναλιού σταματά, για να δώσει εκ νέου τη σκυτάλη στο block του probe. Αρχίζει ξανά από την αρχή όλη η διαδικασία, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Αυτός ο κύκλος θα συμβαίνει έως ότου τελειώσει το πείραμα.

Ο λόγος, που έχει επιλεγεί να διακόπτονται τα block του feedback και του probe είναι, προκειμένου να καταλαμβάνει το receive το μεγαλύτερο κομμάτι του I/O. Αυτό είναι, που έχει και τη μεγαλύτερη βαρύτητα. Τα άλλα δυο τρέχουν αποκλειστικά και μόνο για όσο χρόνο τους είναι απαραίτητος να αποδώσουν τα ζητούμενα αποτελέσματα.

2.2.3.Λειτουργία του benchmark_tx.py

Όπως συνέβη και στο benchmark_rx.py έτσι κι εδώ η επεξήγηση του αλγορίθμου θα ξεκινήσει με παράθεση των παραμέτρων, που συνέβαλαν στη σωστή λειτουργία της υλοποίησης. Εδώ υπάρχουν δυο block κώδικα, εκ των οποίων το ένα χρησιμοποιεί το transmit chain του USRP (υπάρχει στη βασική υλοποίηση του GNU Radio) και το άλλο το receive chain. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι παράμετροι, που χρησιμοποιήθηκαν στο εκάστοτε block.

Parameters	Transmit Block	Receive Block
TX Amplitude	0.55	0.55
Gain	65	70
Bitrate	2x10 ⁶	1x10 ⁶
Constellation Points	4	4
Modulation	gmsk	gmsk

Το transmit block είναι αυτό μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η κύρια μετάδοση. Μέσω του receive block το feedback κανάλι ενημερώνει τον TX για το αν θα χρειαστεί να γίνει κάποια μεταπήδηση συχνότητας ή όχι.

Όπως και στο άλλο benchmark script έτσι και εδώ αρχικοποιούνται τα δυο block με το transmit να στέλνει 1.5 MHz αριστερά από τη συχνότητα, που δόθηκε από τη γραμμή εντολών και το feedback κανάλι να λαμβάνει 2 MHz δεξιά από τη συχνότητα αυτή. Οι δυο μεταδόσεις ξεκινούν. Ο transmitter μεταδίδει, ενώ παράλληλα μέσω του rx_callback λαμβάνονται μηνύματα με τη νέα συχνότητα, αυτή που έχει αποφασίσει το probe, ότι είναι βέλτιστη για να συνεχιστεί η μετάδοση. Μέσα στην προαναφερθείσα συνάρτηση έχει υλοποιηθεί ένας αλγόριθμος, για να ερμηνεύει σωστά την ασφάλεια, που υπάρχει από τον receiver. Αυτό σημαίνει ότι ανά τρεις συνεχόμενους αριθμούς πακέτων (pktno) λαμβάνεται υπόψιν μόνο του ενός (αν φτάσουν και τα τρία pktno με αριθμούς 0,1,2 στον transmitter θα ληφθεί υπόψιν μόνο του ενός για να αποφευχθούν λανθασμένες ενέργειες). Τα δεδομένα (data) ερμηνεύονται όπως και στον receiver. Μέσα σ' αυτά εμπεριέχεται η βέλτιστη συχνότητα. Ο transmitter ρυθμίζεται σε αυτή και πλέον η μετάδοση συνεχίζεται κανονικά σε άλλο σημείο του φάσματος.

2.2.4. Συμπεράσματα

Η συγκεκριμένη υλοποίηση στις δοκιμές, που έγιναν με την παράλληλη μετάδοση άλλων υλοποιήσεων στο ίδιο φάσμα, έδωσε πάρα πολύ ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Το RX Probe αναγνωρίζει με πολύ αξιόπιστο τρόπο την ύπαρξη ή όχι κάποιας μετάδοσης σε κάποιο εύρος του φάσματος. Ένα μεγάλο στοίχημα για τις υλοποιήσεις, που εφαρμόζουν εναλλαγές συχνότητας είναι να γίνεται σωστός συγχρονισμός ανάμεσα σε transmitter και receiver κατά τις εναλλαγές συχνοτήτων. Και εδώ η ιδέα του RX Probe αποδεικνύεται ιδιαίτερος αξιόπιστη. Αυτό οφείλεται αποκλειστικά στην χρήση του gmsk modulation. Ο συγκεκριμένος τρόπος modulation είναι ο καλύτερος (αν όχι ο μοναδικός) αρωγός στο συγχρονισμό των δυο scripts. Ως παρατήρηση πρέπει να αναφερθεί, ότι για την άρτια λειτουργία του gmsk είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν αρκετά μεγάλα gain και στον transmitter και στον receiver.



2.3. Υλοποίηση 3: Active Spectrum Sense

2.3.1. Εισαγωγή

Η τρίτη υλοποίηση, που δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας τα python scripts του GNU Radio ονομάζεται Active Spectrum Sense. Το συγκεκριμένο όνομα, που είναι παρεμφερές με αυτό της πρώτης υλοποίησης (Passive Spectrum Sense), δόθηκε γιατί σε αντίθεση με την προαναφερθείσα, γίνεται προσπάθεια άμεσης ανίχνευσης ενέργειας στο φάσμα και κατά συνέπεια μετάδοσης. Με αυτό τον τρόπο θα έχει η δική μας μετάδοση τη δυνατότητα να βρίσκει το κενό στο φάσμα και να μεταδίδει σε αυτό. Έτσι τόσο αυτή όσο και οι υπόλοιπες μεταδόσεις, που χρησιμοποιούν το ίδιο bandwidth θα λειτουργούν ανεμπόδιστα. Για να γίνει αυτού του είδους το sensing έχουν παντρευτεί το benchmark_rx.py με κομμάτια κώδικα του script usrp_spectrum_sense.py. Αυτό βρίσκεται στο path ~home/gr-uhd/examples/python. Επίσης για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος έχει τροποποιηθεί και το benchmark_tx.py. Τα δυο benchmark scripts βρίσκονται στο ~home/gr-digital/examples/narrowband.

2.3.2 Λειτουργία του benchmark_rx.py

Για να ξεκινήσει η ανάλυση λειτουργίας του benchmark_rx.py θα πρέπει πρώτα να εξεταστούν οι παράμετροι, που χρησιμοποιήθηκαν για να επιτευχθεί η επιθυμητή λειτουργία. Υπάρχουν τρία block κώδικα, εκ των οποίων το πρώτο χρησιμοποιεί το receive chain του USRP (υπάρχει στη βασική υλοποίηση του GNU Radio) και το δεύτερο το transmit chain. Το τρίτο block μέσω του receive chain εκτελεί ανίχνευση ενέργειας μέσα σε ένα καθορισμένο φάσμα, η οποία του υποδεικνύει την ύπαρξη ή μη κάποιας μετάδοσης. Αυτό βασίζεται στο top block, που βρίσκεται στο script usrp_spectrum_sense.py. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι παράμετροι, που χρησιμοποιήθηκαν στο εκάστοτε block.

Parameters	Receive Block	Transmit Block	Sense
TX Amplitude	0.55	0.55	-
Gain	50	80	-
Bitrate	2×10^6	1×10^6	-
Constellation Points	4	4	-
Modulation	gmsk	gmsk	-
Antenna	RX2	TX/RX	TX/RX
Channel Bandwidth	-	-	18.75×10^3

Το receive block είναι εκείνο μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η κύρια μετάδοση. Μέσω του transmit block το feedback κανάλι ενημερώνει το TX για το αν θα χρειαστεί να γίνει κάποια μεταπήδηση σε άλλη συχνότητα ή όχι. Όπως μπορείτε να παρατηρήσετε στον παραπάνω πίνακα πέραν των συνηθισμένων παραμέτρων, που υπήρχαν και στις προηγούμενες δυο υλοποιήσεις, υπάρχουν δυο νέες το antenna και το channel bandwidth. Η πρώτη μας εξυπηρετεί στον καθορισμό της κεραίας, που θα χρησιμοποιήσει το εκάστοτε block (receive, transmit, sense). Ο λόγος, που το transmit και το sense μοιράζονται την ίδια κεραία είναι η αναγκαιότητα του receive να λειτουργεί

ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγετε ο κίνδυνος να χαθεί ο συγχρονισμός. Η δεύτερη παράμετρος σχετίζεται άμεσα με το fft size, δηλαδή το μέγεθος των υπο-φασμάτων, που θα χωριστεί το αρχικό bandwidth. Για κάθε ένα απ' αυτά τα υπο-φάσματα, το sense επιστρέφει το επίπεδο θορύβου που υπάρχει προκειμένου να αποφασιστεί η βέλτιστη συχνότητα για να συνεχιστεί η μετάδοση. Το channel bandwidth και το fft size είναι τιμές αντιστρόφως ανάλογες. Μικρότερα σε fft size bins (υπο-φάσματα) παρέχουν πιο ακριβή δεδομένα θορύβου, αλλά επειδή είναι περισσότερα σε αριθμό χρειάζεται περισσότερος χρόνος για να γίνει το sensing. Στη συγκεκριμένη εκδοχή το φάσμα έχει χωριστεί σε τέσσερα κομμάτια.

Αρχικοποιούνται τα τρία block. Το πρώτο (receive) ρυθμίζεται να λαμβάνει 1.5MHz αριστερά από την συχνότητα, που δόθηκε από τον χρήστη. Το δεύτερο (feedback) θα στέλνει 2MHz δεξιά από τη δοθείσα συχνότητα. Με αυτό τον τρόπο δεν θα υπάρχει σύγκρουση ανάμεσα στις δυο μεταδόσεις. Το τρίτο και τελευταίο (sense) ξεκινάει το sensing 2MHz αριστερά της προαναφερθείσας συχνότητας. Το receive block ξεκινά και μαζί του ξεκινά και η λήψη μηνυμάτων. Ταυτόχρονα σε 2 νήματα τρέχουν οι συναρτήσεις rx_callback και main_loop. Η πρώτη, που αφορά το receiver λαμβάνει τα πακέτα, που στέλνονται. Η δεύτερη σχετίζεται με το sensing. Σ' αυτή, αφού πρώτα ξεκινήσει το sensing block, αρχίζει το σκανάρισμα σε όλες τις συχνότητες από 2MHz αριστερά της δοθείσας συχνότητας έως και 2MHz δεξιά απ' αυτή. Μέσα στη συνάρτηση έχει δοθεί ένα κατώφλι (threshold). Μόλις το sensing βρει μια συχνότητα η οποία να έχει θόρυβο κάτω απ' αυτό τότε το sensing block σταματάει και καλείται μια άλλη συνάρτηση, η ack. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται κάθε 15 δευτερόλεπτα. Στην ack ξεκινάει το transmit block του feedback καναλιού. Στη συνέχεια δημιουργούνται 10 ίδια πακέτα, τα οποία εμπεριέχουν την πληροφορία με τη νέα συχνότητα για να συνεχιστεί η μετάδοση από τον εκπομπό. Αυτό γίνεται για λόγους ασφαλείας (αν χαθεί ένα πακέτο, υπάρχουν άλλα δυο με την ίδια πληροφορία, έτσι ώστε ο transmitter να είναι πάντα ενημερωμένος). Αφού ολοκληρωθεί αυτή η διαδικασία ρυθμίζεται και ο δέκτης στη συχνότητα αυτή. Τέλος, το block του feedback καναλιού σταματά, για να δώσει εκ νέου τη σκυτάλη στο block του sense. Αρχίζει ξανά από την αρχή όλη η διαδικασία, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Αυτός ο κύκλος θα λαμβάνει χώρα έως ότου τελειώσει το πείραμα.

Όπως στο RX Probe έτσι και τώρα έχει επιλεγεί να διακόπτονται τα block του feedback και του sense, προκειμένου να καταλαμβάνει το receive το μεγαλύτερο κομμάτι του I/O. Αυτό έχει και τη μεγαλύτερη βαρύτητα. Τα άλλα δυο τρέχουν αποκλειστικά και μόνο για όσο χρόνο τους είναι απαραίτητος να αποδώσουν τα ζητούμενα αποτελέσματα.

2.3.3.Λειτουργία του benchmark_tx.py

Όπως συνέβη και στο benchmark_rx.py έτσι κι εδώ η επεξήγηση του αλγορίθμου θα ξεκινήσει με παράθεση των παραμέτρων, που συνέβαλαν στη σωστή λειτουργία της υλοποίησης. Εδώ υπάρχουν δυο block κώδικα, εκ των οποίων το ένα χρησιμοποιεί το transmit chain του USRP (υπάρχει στη βασική υλοποίηση του GNU Radio) και το άλλο το receive chain. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι παράμετροι, που χρησιμοποιήθηκαν στο εκάστοτε block.

Parameters	Transmit Block	Receive Block
TX Amplitude	0.55	0.55
Gain	65	70
Bitrate	2×10^6	1×10^6
Constellation Points	4	4
Modulation	gmsk	gmsk

Το transmit block είναι αυτό μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η κύρια μετάδοση. Μέσω του receive block το feedback κανάλι ενημερώνει το TX για το αν θα χρειαστεί να γίνει κάποια μεταπήδηση συχνότητας ή όχι.

Όπως και στο άλλο benchmark script έτσι και εδώ αρχικοποιούνται τα δυο block με το transmit να στέλνει 1.5 MHz αριστερά από τη συχνότητα, που δόθηκε από τη γραμμή εντολών και το feedback κανάλι να λαμβάνει 2 MHz δεξιά από τη συχνότητα αυτή. Οι δυο μεταδόσεις ξεκινούν. Ο transmitter μεταδίδει, ενώ παράλληλα μέσω του rx_callback λαμβάνονται μηνύματα με τη νέα συχνότητα, αυτή που έχει αποφασίσει το probe, ότι είναι βέλτιστη για να συνεχιστεί η μετάδοση. Μέσα στην προαναφερθείσα συνάρτηση έχει υλοποιηθεί ένας αλγόριθμος, για να ερμηνεύει σωστά την ασφάλεια, που υπάρχει από τον receiver. Αυτό σημαίνει ότι ανά δέκα συνεχόμενους αριθμούς πακέτων (pktno) λαμβάνεται υπόψιν μόνο του ενός (αν φτάσουν και τα δέκα pktno με αριθμούς 0,1,2,3,...,9 στον transmitter θα ληφθεί υπόψιν μόνο του ενός για να αποφευχθούν λανθασμένες ενέργειες). Τα δεδομένα (data) ερμηνεύονται όπως και στον receiver. Μέσα σ' αυτά εμπεριέχεται η βέλτιστη συχνότητα. Ο transmitter ρυθμίζεται σε αυτή και πλέον η μετάδοση συνεχίζεται κανονικά σε άλλο σημείο του φάσματος.

2.3.4. Συμπεράσματα

Η υλοποίηση κλήθηκε να δώσει τα διαπιστευτήρια της τρέχοντας μόνη της αρχικά και με άλλες υλοποιήσεις στη συνέχεια. Τα αποτελέσματα ήταν αρκετά ικανοποιητικά. Το sensing αναγνώριζε με τον πλέον αξιόπιστο τρόπο τα κενά στο φάσμα κι έτσι η μετάδοση λειτουργούσε χωρίς να παρενοχλεί ή να παρενοχλείτε από άλλες μεταδόσεις. Όπως και στις προηγούμενες δυο υλοποιήσεις, έτσι και τώρα ήταν ιδιαίτερος σημαντικό να επιτυγχάνεται συγχρονισμός μετά τις μεταπηδήσεις σε νέες συχνότητες. Με τη χρήση gmsk modulation υπήρξε δυνατότητα να επιτευχθεί αυτό. Οτιδήποτε άλλο χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια του πειράματος απέτυχε να συγχρονίσει τις δυο πλευρές. Ως παρατήρηση πρέπει να αναφερθεί, ότι για την άρτια λειτουργία του gmsk είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν αρκετά μεγάλα gain και στον transmitter και στον receiver.

2.4. Υλοποίηση 2: TX Probe

2.4.1. Εισαγωγή

Η τέταρτη και τελευταία ιδέα, που υλοποιήθηκε με βάση τους κώδικες, που προσφέρει το GNU Radio ονομάζεται TX Probe. Το όνομα αυτής της υλοποίησης είναι παρεμφερές με αυτό της RX Probe, όπως και το σκεπτικό, δηλαδή θα χρησιμοποιηθεί ένα κομμάτι κώδικα, που βρίσκεται στο script `receive_path.py`, το `probe`. Η προσέγγιση όμως αυτή τη φορά θα είναι διαφορετική καθώς το sensing θα γίνεται από τη μεριά του transmitter. Παρόλο που όπως έχει προαναφερθεί, δεν είναι η βέλτιστη προσέγγιση να γίνεται το sensing από τον TX, καθώς μεγαλύτερη σημασία έχει το περιβάλλον γύρω από τον RX κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθεί και αυτό το σενάριο, για να υπάρξει πλήρης εικόνα γύρω από τους τρόπους υλοποίησης συνεργατικών δικτύων. Το `probe` λοιπόν, ελέγχει αν σε κάποιο εύρος συχνότητας υπάρχει μια μετάδοση ή όχι. Με βάση τα αποτελέσματα, που προσφέρει, προκύπτει η απόφαση ως προς ποιά συχνότητα είναι βέλτιστη για να μετακινηθεί η μετάδοση. Όπως ακριβώς συνέβη και στις τρεις προηγούμενες υλοποιήσεις, έτσι και τώρα τα scripts, που τροποποιήθηκαν είναι το `benchmark_tx.py` και `benchmark_rx.py`. Το path για να εντοπιστούν είναι `~home/gr-digital/examples/narrowband`.

2.4.2. Λειτουργία του `benchmark_rx.py`

Για να ξεκινήσει η ανάλυση λειτουργίας του `benchmark_rx.py` θα πρέπει πρώτα να εξεταστούν οι παράμετροι, που χρησιμοποιήθηκαν για να επιτευχθεί η επιθυμητή λειτουργία. Αυτή τη φορά τα πράγματα είναι αρκετά πιο απλά σε σχέση με τις άλλες τρεις υλοποιήσεις. Υπάρχει ένα block κώδικα και χρησιμοποιεί το `receive chain` του USRP (υπάρχει στη βασική υλοποίηση του GNU Radio). Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι παράμετροι, που χρησιμοποιήθηκαν στο block αυτό.

Parameters	Receive Block
TX Amplitude	0.55
Gain	50
Bitrate	2×10^6
Constellation Points	4
Modulation	gmsk

Μέσω του `receive block` επιτυγχάνεται η κύρια μετάδοση. Στη συγκεκριμένη υλοποίηση όμως έχει επιφορτιστεί και με μια επιπλέον αρμοδιότητα, να λαμβάνει `feedback` μηνύματα για ενδεχόμενη μεταπήδηση συχνότητας. Τα μηνύματα αυτά στέλνονται μέσω του κύριου καναλιού κι έχουν αριθμό πακέτου μεγαλύτερο του 4000, προκειμένου να μην μπερδευτούν με αυτά της κύριας μετάδοσης.

Αρχικοποιείται το `receive block` και ξεκινάει να λαμβάνει μηνύματα στα 1.5MHz αριστερά της δοθείσας από το χρήστη συχνότητας. Όταν λάβει κάποιο σωστό πακέτο με `rktno` μεγαλύτερο του 4000 ενεργοποιείται αυτόματα ο μηχανισμός μεταπήδησης. Ο δέκτης αλλάζει συχνότητα λήψης σε αυτή που υποδεικνύουν τα δεδομένα του προαναφερθέντος πακέτου.

2.4.3. Λειτουργία του benchmark_tx.py

Όπως συνέβη και στο benchmark_rx.py έτσι κι εδώ η επεξήγηση του αλγορίθμου θα ξεκινήσει με παράθεση των παραμέτρων, που συνέβαλαν στη σωστή λειτουργία της υλοποίησης. Και εδώ υπάρχει ένα block κώδικα, που χρησιμοποιεί το transmit chain του USRP (υπάρχει στη βασική υλοποίηση του GNU Radio). Επίσης είναι ενσωματωμένο το probe, που χρησιμοποιεί το receive chain του USRP, κατά συνέπεια δεν λειτουργεί ανταγωνιστικά με την μετάδοση. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι παράμετροι, που χρησιμοποιήθηκαν στο block αυτό.

Parameters	Transmit Block
TX Amplitude	0.55
Gain	65
Bitrate	2×10^6
Constellation Points	4
Modulation	gmsk
Sample Rate	0.5×10^6
Thres	-40
Alpha	0.001

Μέσω του transmit block επιτυγχάνεται η κύρια μετάδοση. Όπως θα παρατηρήσετε στη συγκεκριμένη υλοποίηση έχουν προστεθεί κάποιοι παράμετροι, που υπάρχουν και στην RX Probe. Αυτές είναι οι sample rate, alpha και thresh. Και οι τρεις παράμετροι αφορούν αποκλειστικά το probe. Το sample rate καθορίζει το εύρος της συχνότητας, που θα ελεγχθεί την εκάστοτε χρονική στιγμή. Το alpha αποτελεί τον πόλο, που τοποθετείται σ' ένα μονό IIR φίλτρο πόλων. Χρησιμοποιείται για να φιλτράρεται το σήμα προτού συγκριθεί με το κατώφλι(threshold). Τέλος, το thresh(κατώφλι) είναι η τιμή ενέργειας, πάνω από την οποία το probe αποφασίζει, ότι υπάρχει ενέργεια στο φάσμα κατά συνέπεια και μετάδοση.

Όπως και στο άλλο benchmark script έτσι και εδώ αρχικοποιείται το block με το transmit να στέλνει 1.5 MHz αριστερά από τη συχνότητα, που δόθηκε από τη γραμμή εντολών όπως και το probe. Ξεκινάει η μετάδοση. Ο transmitter μεταδίδει, ενώ παράλληλα το probe κάνει sensing για να ανιχνεύσει ελεύθερο κανάλι. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται κάθε φορά, που θα σταλούν 4000 πακέτα και διαρκεί όσο χρόνο απαιτείται για να βρεθεί συχνότητα χωρίς θόρυβο. Όταν αυτή η συχνότητα βρεθεί, τότε δημιουργείται ένα πακέτο που εμπεριέχει στα δεδομένα του (data) τη νέα συχνότητα μετάδοσης. Τα πακέτα αυτά έχουν αριθμό μεγαλύτερο του 4000 (που είναι ο αριθμός πακέτων που δίνονται από τον packet server) ώστε να μπορεί ο receiver να αναγνωρίσει ότι πρόκειται για feedback μηνύματα. Ακολουθεί μια παύση (time.sleep()) της τάξης του μισού δευτερολέπτου, ώστε να προλάβει ο receiver να μεταπηδήσει πριν τον transmitter και να επιτευχθεί συγχρονισμός. Η μετάδοση πλέον συνεχίζεται κανονικά στη νέα συχνότητα.

2.4.4. Συμπεράσματα

Η υλοποίηση κλήθηκε, όπως και οι προηγούμενες τρεις, να δοκιμαστεί τόσο σε ελεύθερο φάσμα όσο και με άλλες παράλληλες μεταδόσεις. Και η προσαρμοστικότητα της κρίθηκε εξαιρετική. Το probe αναγνώριζε αξιόπιστα τα κενά στο φάσμα και μεταπηδούσε σε αυτά. Έτσι παρέμενε σε μεγάλο βαθμό ανεπηρέαστη από τις παρεμβολές. Το ζήτημα του συγχρονισμού στις μεταπηδήσεις λυνόταν για μια ακόμα φορά μέσω του gmsk modulation, που ενδείκνυται σε τέτοιες περιπτώσεις. Ως παρατήρηση πρέπει να αναφερθεί, ότι για την άρτια λειτουργία του gmsk είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν αρκετά μεγάλα gain και στον transmitter και στον receiver.

2.5. Δυσκολίες

Οι δυσκολίες, που αντιμετωπίστηκαν μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα ήταν αρκετές. Αλλά οι βασικότερες κι αυτές, που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής και σωστού χειρισμού είναι δυο.

Η πρώτη είναι μια που έχει αναφερθεί ήδη αρκετά και αφορά το συγχρονισμό στις μεταπηδήσεις. Πέρα από το σωστό modulation (gmsk βέλτιστη λύση) πολύ σημαντικό είναι να στηθεί πρώτα ο receiver και μετά ο transmitter. Αν γίνει το ανάποδο, το πιθανότερο είναι να μην μπορέσουν να επικοινωνήσουν οι δυο πλευρές, καθώς είτε ο receiver δεν θα λαμβάνει είτε τα πακέτα θα λαμβάνονται λανθασμένα και θα ερμηνεύονται ως κατεστραμμένα. Επίσης η χρονικές στιγμές, που θα είναι έτοιμοι ο TX και ο RX δεν πρέπει να χουν μεγάλη απόκλιση μεταξύ τους, διότι και πάλι ενδεχομένως να προκύψει πρόβλημα συγχρονισμού.

Η δεύτερη αφορά περισσότερο τις δυο ενδιάμεσες υλοποιήσεις (RX Probe, Active Spectrum Sense) και λιγότερο την πρώτη και την τελευταία (Passive Spectrum Sense, TX Probe) και έχει να κάνει με τη συνύπαρξη των διαφορετικών block (receive, transmit, sense). Το εγχείρημα γίνεται ακόμα δυσκολότερο αν αναλογιστεί κάποιος ότι το receive και το sense είναι ανταγωνιστικά μεταξύ τους, καθώς και τα δυο χρειάζονται το ένα και μοναδικό receive chain του USRP. Άρα το θέμα αυτό αφορά κυρίως το δέκτη. Έχοντας κατά νου, ότι το σημαντικότερο είναι να γίνεται λήψη μηνυμάτων σε συνδυασμό, ότι αν σταματήσουμε το block του receive είναι πολύ μεγάλες οι πιθανότητες απώλειας συγχρονισμού καταλήγουμε στο συμπέρασμα, ότι πρέπει να περιοριστεί στο απολύτως απαραίτητο η χρήση των άλλων δυο block. Άρα θα πρέπει να λειτουργούν συγκεκριμένες χρονικές στιγμές κι όχι συνέχεια και αποκλειστικά για όσο χρόνο χρειάζονται να διεκπεραιώσουν τις διεργασίες τους. Αν λειτουργούν και τα τρία block αδιάκοπα, ούτε το receive γίνεται με τον ενδεδειγμένο τρόπο, αλλά και ο κώδικας εμφανίζει διαρκή overflow (συμβολίζονται με πολλαπλά D στην κονσόλα).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

3.1.Εισαγωγή

Το τρίτο κεφάλαιο της διπλωματικής μου εργασίας θα ασχοληθεί με πειράματα, που έγιναν χρησιμοποιώντας τις τέσσερις υλοποιήσεις. Αυτά θα χωριστούν σε τέσσερις κατηγορίες. Στην πρώτη οι υλοποιήσεις θα τρέχουν μόνες τους στο φάσμα, για να διαπιστώσουμε πως ανταποκρίνονται χωρίς την ύπαρξη ανταγωνισμού. Στη συνέχεια θα κληθούν να αντιμετωπίσουν μια στατική μετάδοση, η οποία θα εκπέμπει διαρκώς στην ίδια συχνότητα. Ακολούθως τα πράγματα θα δυσκολέψουν αφού ο επόμενος αντίπαλος θα κάνει μεταπηδήσεις συχνότητας ανά κάποια δευτερόλεπτα. Η τέταρτη και τελευταία κατηγορία είναι και η πιο απαιτητική και ενδιαφέρουσα. Οι τέσσερις υλοποιήσεις θα αναμετρηθούν μεταξύ τους σε τριάδες στο ίδιο bandwidth. Με αυτό τον τρόπο θα διαπιστώσουμε, ποια ανταποκρίνεται καλύτερα στον ανταγωνισμό και προσαρμόζεται πιο αξιόπιστα.

3.2.Πειράματα χωρίς την ύπαρξη άλλης μετάδοσης

Η πρώτη σειρά πειραμάτων ξεκινάει με την τοποθέτηση των τεσσάρων υλοποιήσεων διαδοχικά στο ίδιο φάσμα χωρίς την ύπαρξη κάποιας άλλης μετάδοσης. Τα πειράματα θα τρέξουν για συνολικά εξήντα δευτερόλεπτα. Για την κάθε υλοποίηση ξεχωριστά θα υπάρξει επισύναψη τριών εικόνων. Η πρώτη θα είναι στα δεκαπέντε δευτερόλεπτα μετάδοσης, η δεύτερη στα σαρανταπέντε και η τρίτη θα αναγράφει το σύνολο σωστών πακέτων, που στάλθηκαν από την υλοποίηση.

3.2.1. Passive Spectrum Sense χωρίς άλλη μετάδοση

Η όλη διαδικασία των πειραμάτων θα ξεκινήσει με μια διαδικασία, που δεν έχει να μας προσφέρει ιδιαίτερα συμπεράσματα. Τουλάχιστον όταν μιλάμε για την υλοποίηση Passive Spectrum Sense. Η μετάδοση ξεκινά ανεμπόδιστα, οπότε όσες φορές και να έτρεξε το συγκεκριμένο πείραμα δεν παρουσιάστηκε η ανάγκη για κάποια μεταπήδηση σε άλλη συχνότητα. Κι αυτό προκύπτει από τη λειτουργία της υλοποίησης, καθώς το κριτήριο για να γίνει αλλαγή συχνότητας είναι αν λαμβάνονται σωστά τα πακέτα. Αν λαμβάνονται λάθος τότε γίνεται η υπόθεση, ότι υπάρχει κάποια άλλη μετάδοση στο ίδιο φάσμα και παρεμβάλλεται. Ακολουθούν οι εικόνες, που επιβεβαιώνουν τις παραπάνω διατυπώσεις.

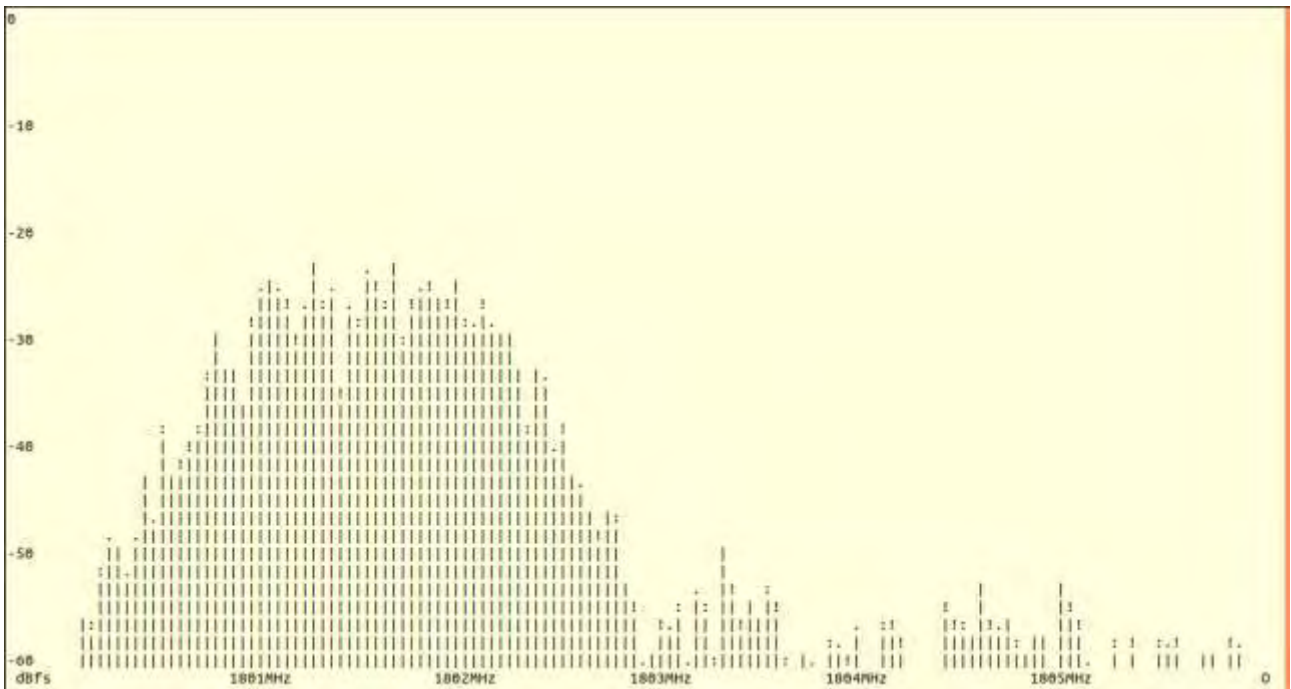


Image 3.1. Passive Spectrum Sense χωρίς την ύπαρξη άλλης μετάδοσης στα 15 δευτερόλεπτα

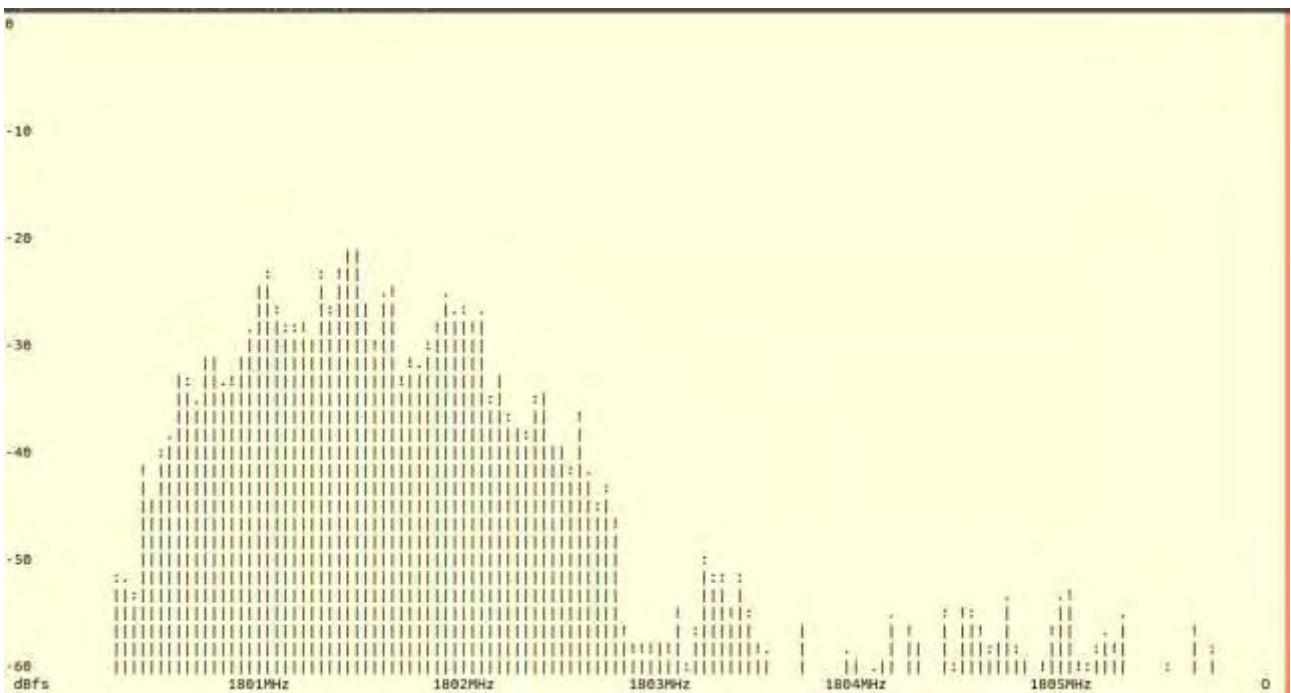


Image 3.2. Passive Spectrum Sense χωρίς την ύπαρξη άλλης μετάδοσης στα 45 δευτερόλεπτα

```
23:40:26 INFO Object: =====
23:40:26 INFO Object:
23:40:26 INFO Object:                Score Report:
23:40:26 INFO Object:    Team1  Received 4000 packets correctly
23:40:26 INFO Object:
23:40:26 INFO Object: =====
23:40:26 INFO OmfEc::Experiment: Experiment: 2018-07-04T20:39:02.184Z finished
```

Image 3.3. Passive Spectrum Sense χωρίς την ύπαρξη άλλης μετάδοσης
Score Report

3.2.2.RX Probe χωρίς άλλη μετάδοση

Η παρατήρηση της συγκεκριμένης υλοποίησης σε ελεύθερο φάσμα παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον απ' ό,τι η Passive Spectrum Sense. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι το probe έχει σκοπό να προσπαθήσει να βρει κάποιο ελεύθερο κανάλι για να συνεχιστεί η μετάδοση ανεμπόδιστα. Εφόσον η υλοποίηση λειτουργεί μόνη της όλο το υπόλοιπο φάσμα είναι κενό και ελεύθερο προς χρήση. Το probe ενεργεί κάθε δεκαπέντε δευτερόλεπτα. Ως φυσικό επακόλουθο αυτού, τέσσερις συνολικά φορές κατά τη διάρκεια ενός πειράματος εξήντα δευτερολέπτων, θα υπάρξει μεταπήδηση συχνότητας. Δυστυχώς λοιπόν, με τον τρόπο που είναι δομημένοι οι κώδικες η μετάδοση θα κάνει άσκοπες ενέργειες, που δεν θα προσφέρουν κάποιο όφελος στην αξιόπιστη παράδοση/παραλαβή μηνυμάτων. Στις εικόνες που θα παρατεθούν παρακάτω μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό το γεγονός ότι, έχουν συμβεί μεταπηδήσεις συχνότητας και στα δεκαπέντε και στα σαρανταπέντε δευτερόλεπτα.

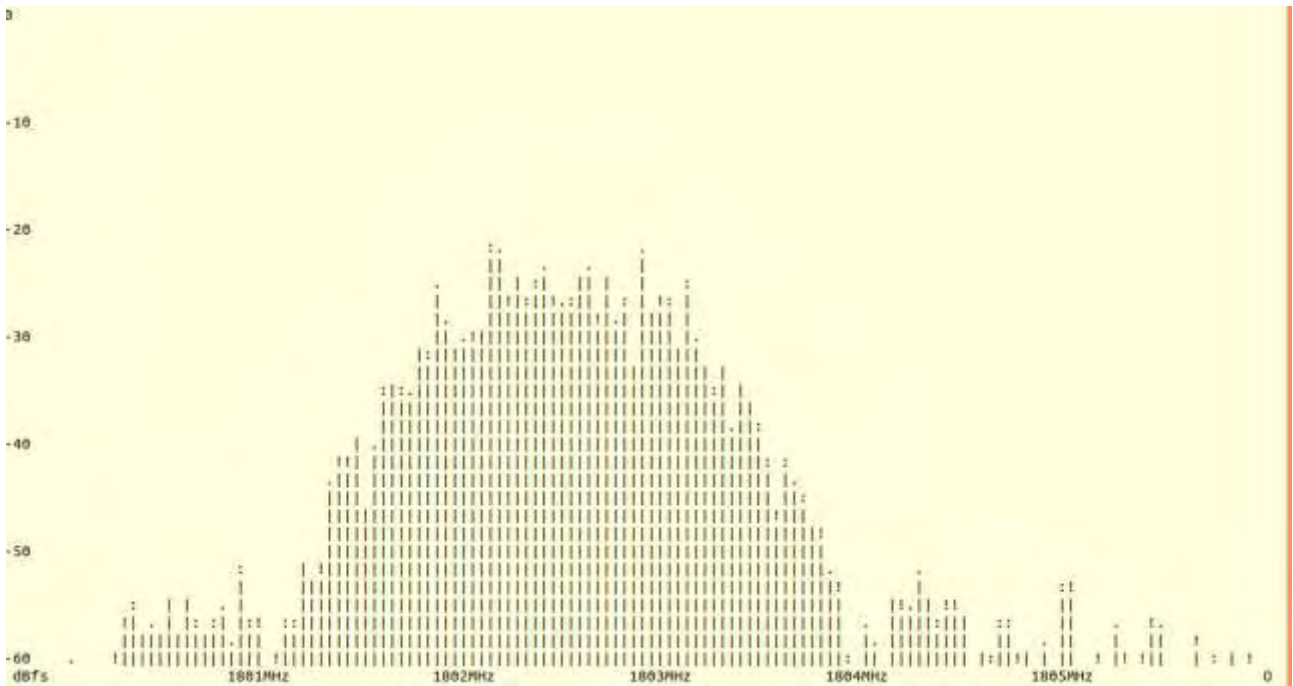


Image 3.4. RX Probe χωρίς την ύπαρξη άλλης μετάδοσης
στα 15 δευτερόλεπτα

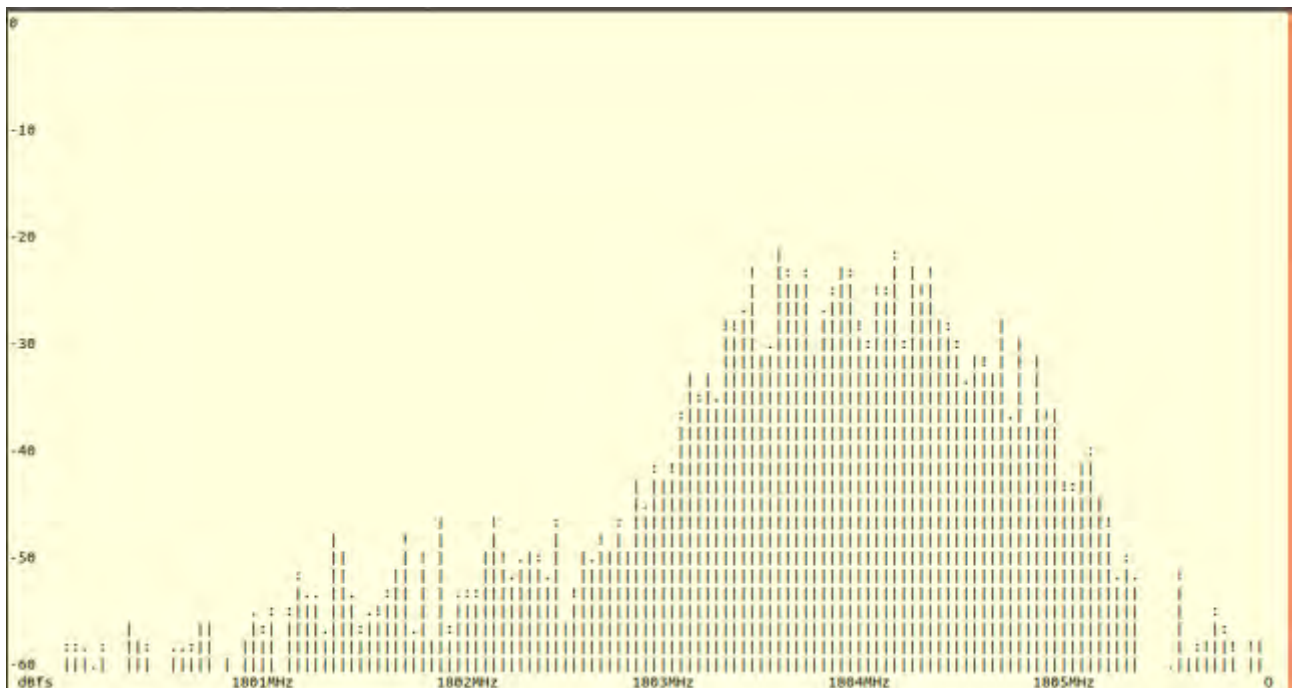


Image 3.5. RX Probe χωρίς την ύπαρξη άλλης μετάδοσης
στα 45 δευτερόλεπτα

```

23:51:46 INFO Object: =====
23:51:46 INFO Object:
23:51:46 INFO Object:                      Score Report:
23:51:46 INFO Object:      Team1  Received 4000 packets correctly
23:51:46 INFO Object:
23:51:46 INFO Object: =====
23:51:46 INFO OmfEc::Experiment: Experiment: 2018-07-04T20:50:24.111Z finished

```

Image 3.6. RX Probe χωρίς την ύπαρξη άλλης μετάδοσης
Score Report

3.2.3. Active Spectrum Sense χωρίς άλλη μετάδοση

Οι παρατηρήσεις και η λειτουργία του Active Spectrum Sense σε καταστάσεις ελεύθερου bandwidth δεν έχουν να προσθέσουν κάποια νέα γνώση ή συμπέρασμα σε σχέση με όσα είδαμε το RX Probe. Εφόσον και αυτή η υλοποίηση σκανάρει το φάσμα μέσω του RX με σκοπό την εύρεση κενού καναλιού μετάδοσης, είναι επόμενο να πραγματοποιεί άσκοπες μεταπηδήσεις. Η διαφορά των δυο υλοποιήσεων είναι ο τρόπος, που κάνουν το sensing και ερμηνεύουν τα αποτελέσματα. Και σ' αυτή την περίπτωση το sensing γίνεται κάθε δεκαπέντε δευτερόλεπτα για να έχει το receive περισσότερο χρόνο στο I/O, αφού αυτή είναι και η σημαντικότερη ενέργεια στο δέκτη. Τα δυο block κώδικα είναι ανταγωνιστικά (απαιτούν το receive chain για να λειτουργήσουν) με το sense να επικρατεί σε ενδεχόμενο ταυτόχρονης λειτουργίας. Ως φυσικό επακόλουθο όλων των παραπάνω στις εικόνες που θα παρατεθούν παρακάτω μπορεί να γίνει αντιληπτό το γεγονός ότι, έχουν συμβεί μεταπηδήσεις συχνότητας και στα δεκαπέντε και στα σαρανταπέντε δευτερόλεπτα



Image 3.7. Active Spectrum Sense χωρίς την ύπαρξη άλλης μετάδοσης
στα 15 δευτερόλεπτα

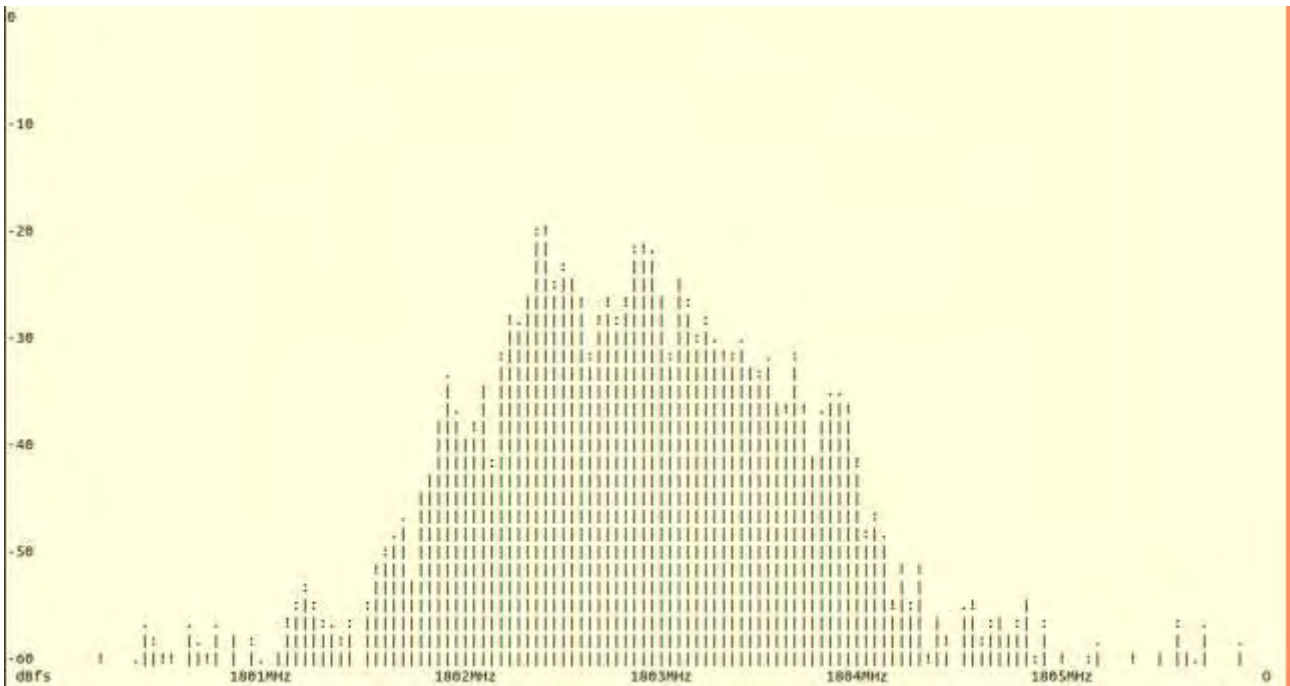


Image 3.8. Active Spectrum Sense χωρίς την ύπαρξη άλλης μετάδοσης στα 45 δευτερόλεπτα

```
00:04:08 INFO Object: =====
00:04:08 INFO Object:
00:04:08 INFO Object:                Score Report:
00:04:08 INFO Object:    Team1  Received 2450 packets correctly
00:04:08 INFO Object:
00:04:08 INFO Object: =====
00:04:08 INFO OmfEc::Experiment: Experiment: 2018-07-04T21:02:44.407Z finished
```

Image 3.9. Active Spectrum Sense χωρίς την ύπαρξη άλλης μετάδοσης Score Report

3.2.4. TX Probe χωρίς άλλη μετάδοση

Όπως ακριβώς συνέβη και στις προηγούμενες δυο υλοποιήσεις έτσι και τώρα η υλοποίηση TX Probe σκανάρει όλο το bandwidth, από την μεριά του transmitter αυτή τη φορά με σκοπό την εύρεση ελεύθερου καναλιού. Εφόσον η υλοποίηση λειτουργεί μόνη της όλο το υπόλοιπο φάσμα είναι κενό και ελεύθερο προς χρήση. Το probe τίθεται σε λειτουργία κάθε φορά, που στέλνονται 4000 πακέτα. Και όλες τις φορές είναι σε θέση να βρει ελεύθερο κανάλι. Αυτό έχει ως επακόλουθο να γίνονται άσκοπες μεταπηδήσεις, που δεν προσφέρουν κάτι στην εύρυθμη λειτουργία της μετάδοσης. Η διαπίστωση αυτή μπορεί να παρατηρηθεί στις παρακάτω εικόνες.

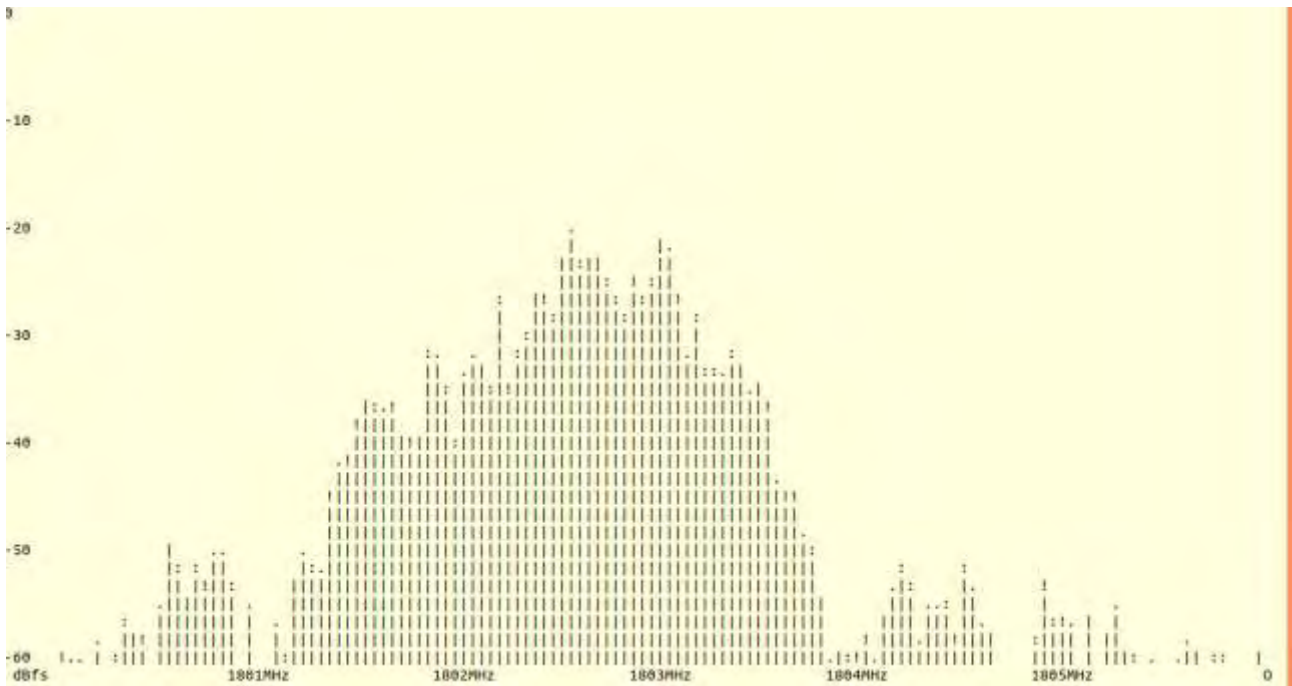


Image 3.10. TX Probe χωρίς την ύπαρξη άλλης μετάδοσης στα 15 δευτερόλεπτα

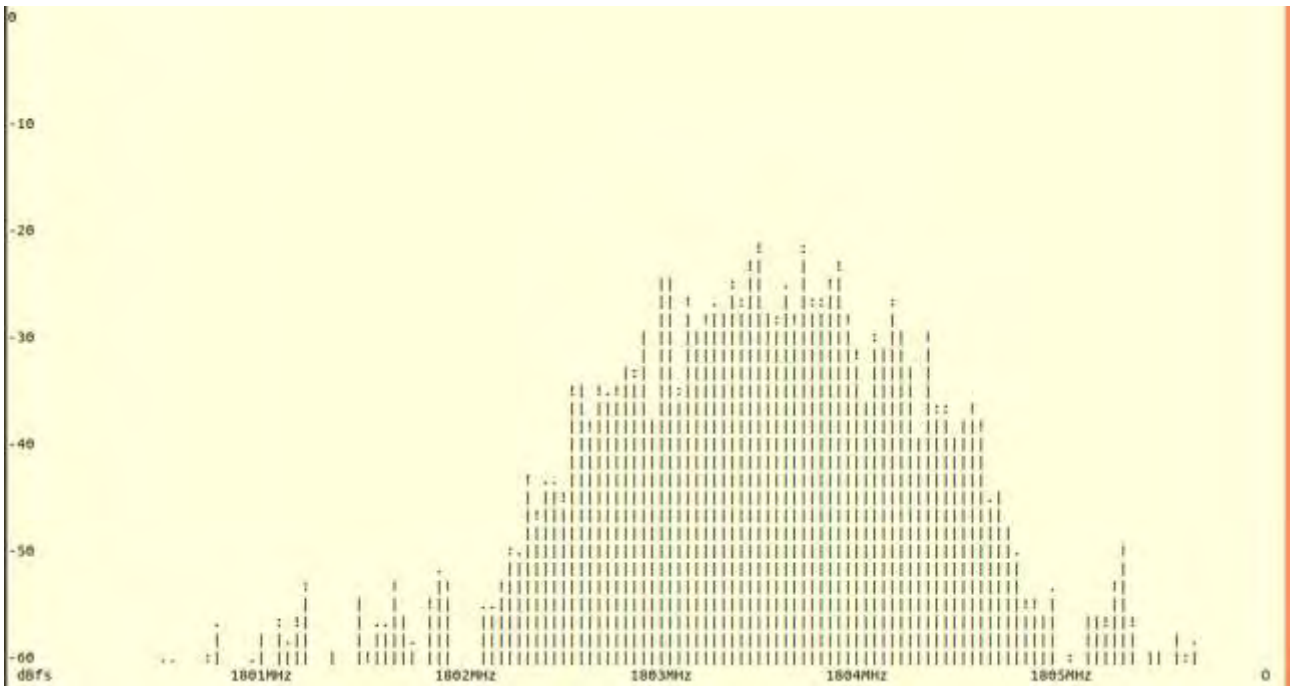


Image 3.11. TX Probe χωρίς την ύπαρξη άλλης μετάδοσης στα 45 δευτερόλεπτα

```

00:17:15 INFO Object: =====
00:17:15 INFO Object:
00:17:15 INFO Object:                Score Report:
00:17:15 INFO Object:    Team1  Received 3999 packets correctly
00:17:15 INFO Object:
00:17:15 INFO Object: =====
00:17:15 INFO OmfEc::Experiment: Experiment: 2018-07-04T21:15:53.118Z finished

```

Image 3.12. TX Probe χωρίς την ύπαρξη άλλης μετάδοσης Score Report

3.3. Πειράματα με την ύπαρξη μιας στατικής μετάδοσης

Η δεύτερη σειρά πειραμάτων περιλαμβάνει την τοποθέτηση των τεσσάρων υλοποιήσεων διαδοχικά στο ίδιο φάσμα με την ταυτόχρονη ύπαρξη μιας άλλης στατικής μετάδοσης. Τα πειράματα θα τρέξουν για συνολικά εξήντα δευτερόλεπτα. Για την κάθε υλοποίηση ξεχωριστά θα υπάρξει επισύναψη τριών εικόνων. Η πρώτη θα είναι στα δεκαπέντε δευτερόλεπτα μετάδοσης, η δεύτερη στα σαρανταπέντε και η τρίτη θα αναγράφει το σύνολο σωστών πακέτων, που στάλθηκαν από την υλοποίηση.

3.3.1. Passive Spectrum Sense vs στατική μετάδοση

Τα πρώτα διαπιστευτήρια, που καλείται να δώσει η υλοποίηση Passive Spectrum Sense είναι απέναντι σε μια υλοποίηση, που θα είναι στατική καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Η στατική αυτή μετάδοση τοποθετήθηκε σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος συχνοτήτων, προκειμένου να μπορούν να προκύψουν πιο ασφαλή και αξιόπιστα συμπεράσματα.

Αρχικά όταν η ξένη μετάδοση βρισκόταν σε απόσταση μεγαλύτερη της τάξης του 0.5MHz από το κέντρο μετάδοσης του Passive Spectrum Sense, τότε η υλοποίηση είχε ακριβώς την ίδια συμπεριφορά με το σενάριο του κενού φάσματος. Δηλαδή δεν υπήρχε πρόβλημα στη σωστή μετάδοση μηνυμάτων και κατά συνέπεια καμία μεταπήδηση συχνότητας.

Στις επόμενες υποπεριπτώσεις του πειράματος, όταν και η μετάδοση βρέθηκε εντός του εύρους μετάδοσης της υλοποίησης η συμπεριφορά ήταν εντελώς διαφορετική. Η μετάδοση μετά το πέρας ενός μικρού χρονικού διαστήματος αντιλαμβανόταν και απέφευγε την παρεμβολή. Άλλες φορές αυτό γινόταν γρηγορότερα και άλλες όχι στον επιθυμητό ρυθμό. Αυτό είχε αποκλειστική σχέση με τη θέση της στατικής μετάδοσης. Με την υλοποίηση να χρησιμοποιεί αλγόριθμο μεταπήδησης προς τα δεξιά με ρυθμό 0.5 MHz γίνεται αντιληπτό, ότι πιο εύκολα και γρήγορα αποφεύγονται μεταδόσεις που τείνουν προς το αριστερό άκρο του Passive Spectrum Sense από εκείνες, που βρίσκονται κοντά στο δεξί άκρο.

Γενικά λόγω της φύσης της υλοποίησης είναι αναπόφευκτο να μην υπάρξει σύγκρουση μεταξύ των μεταδόσεων για κάποιο έστω και μικρό χρονικό διάστημα. Αυτό είναι και το τίμημα του έμμεσου sensing.

Ακολουθούν εικόνες από τη συνύπαρξη της Passive Spectrum Sense και της στατικής μετάδοσης.

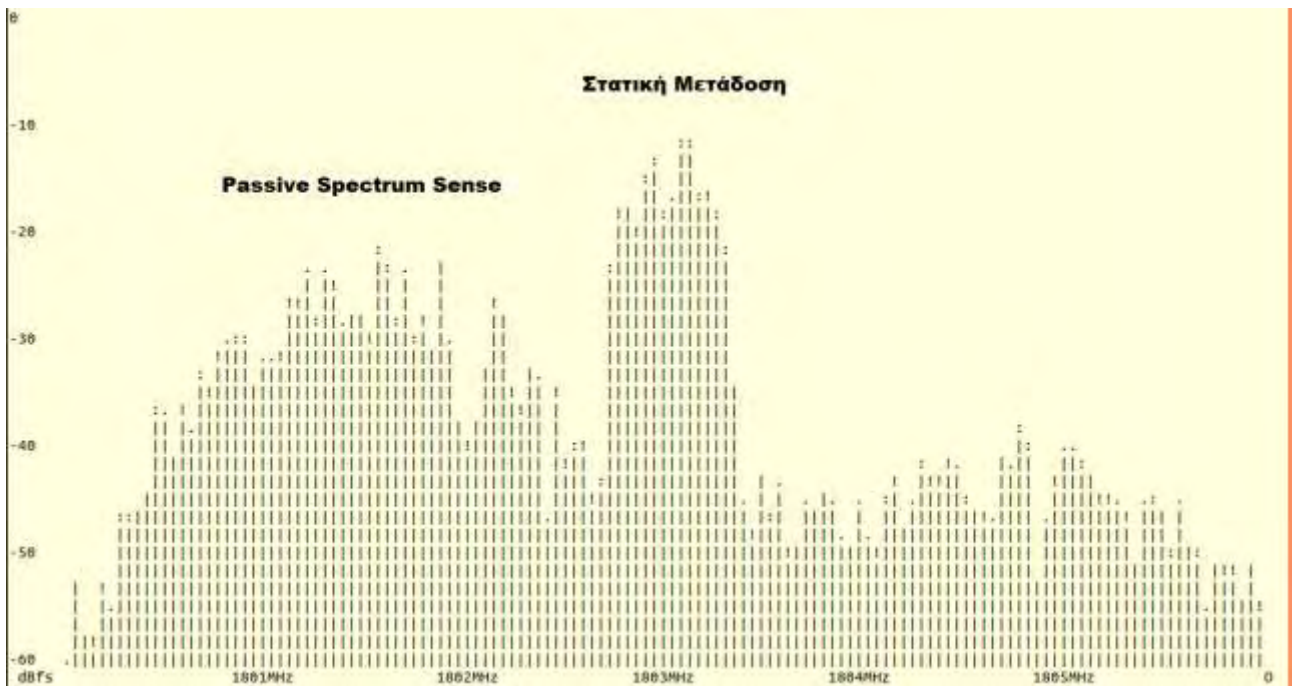


Image 3.13. Passive Spectrum Sense με την ύπαρξη στατικής μετάδοσης στα 15 δευτερόλεπτα

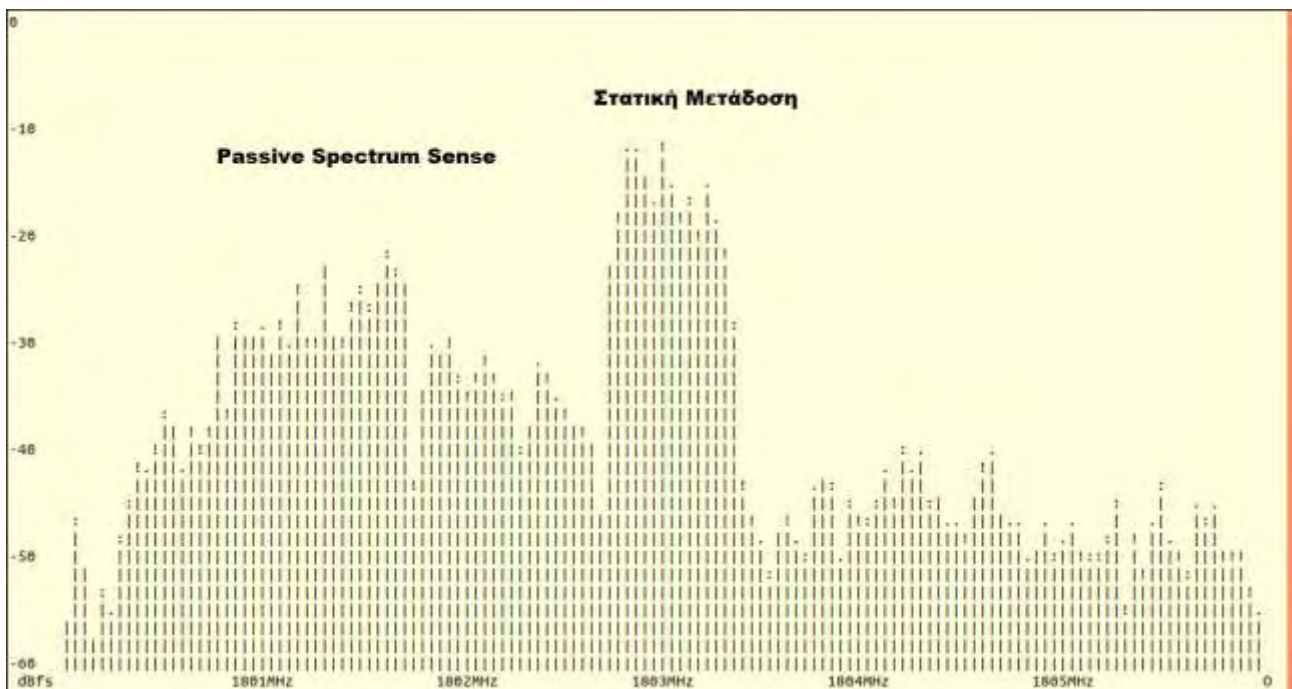


Image 3.14. Passive Spectrum Sense με την ύπαρξη στατικής μετάδοσης στα 45 δευτερόλεπτα


```

00:44:38 INFO Object: =====
00:44:38 INFO Object:
00:44:38 INFO Object:           Score Report:
00:44:38 INFO Object: Team1 Received 4000 packets correctly
00:44:38 INFO Object:
00:44:38 INFO Object:
00:44:38 INFO Object: =====
00:44:38 INFO OmfEc::Experiment: Experiment: 2018-07-04T21:43:16.100Z finished

```

Image 3.15. Passive Spectrum Sense με την ύπαρξη στατικής μετάδοσης
Score Report

3.3.2. RX Probe vs στατική μετάδοση

Την ίδια δοκιμή με το Passive Spectrum Sense θα κληθεί να κάνει τώρα η RX Probe. Η ξένη μετάδοση θα είναι στατική σε όλη τη διάρκεια του πειράματος και θα τοποθετηθεί σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος συχνοτήτων, προκειμένου να μπορούν να προκύψουν πιο ασφαλή και αξιόπιστα συμπεράσματα.

Σε αντίθεση με την προηγούμενη υλοποίηση που εξετάστηκε, εδώ δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες αποκλίσεις στη συμπεριφορά του RX Probe ως προς την αποδοτικότητα του. Αυτό προκύπτει απ' το γεγονός, ότι η τάση της μετάδοσης είναι να εκμεταλλευτεί τα κενά κομμάτια του φάσματος. Έτσι μπορεί και αποφεύγει αποτελεσματικά τις παρεμβολές.

Δυστυχώς ο τρόπος, που έχει δομηθεί ο εν λόγω κώδικας έχει μια αχίλλειο πτέρνα. Αυτή είναι, ότι το probe λειτουργεί κάθε δεκαπέντε δευτερόλεπτα. Έτσι αν η ξένη μετάδοση ξεκινήσει στο ίδιο σημείο με τη δικιά μας τότε έχουμε δεκαπέντε δευτερόλεπτα μη αξιόπιστης μετάδοσης. Αυτό το γεγονός είναι αρκετά δύσκολο να βελτιωθεί με τη γνώση, ότι τα USRP που χρησιμοποιήθηκαν δεν προσφέρουν δεύτερο transmit chain. Οπότε η ανάγκη να προστατευθεί το receive, μας αναγκάζει να μειώσουμε στο ελάχιστο δυνατό το sensing.

Ακολουθως παρατίθενται εικόνες από τη ροή του συγκεκριμένου πειράματος.

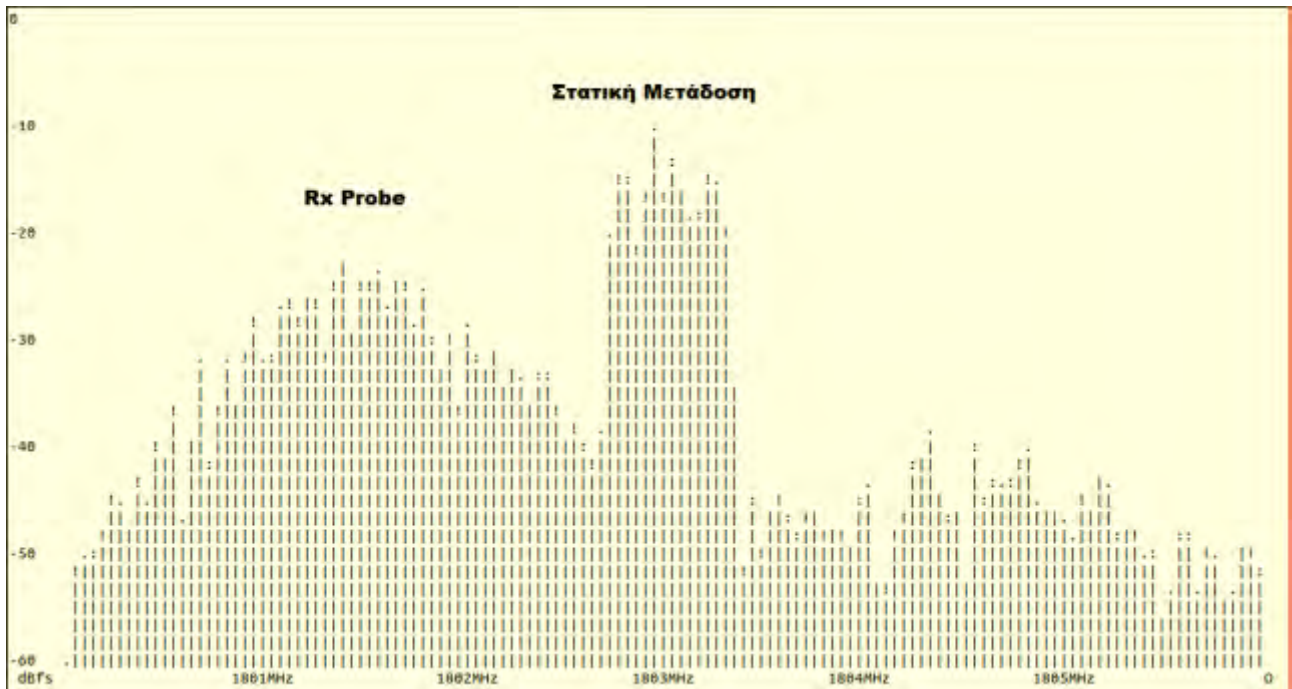


Image 3.16. RX Probe με την ύπαρξη στατικής μετάδοσης στα 15 δευτερόλεπτα

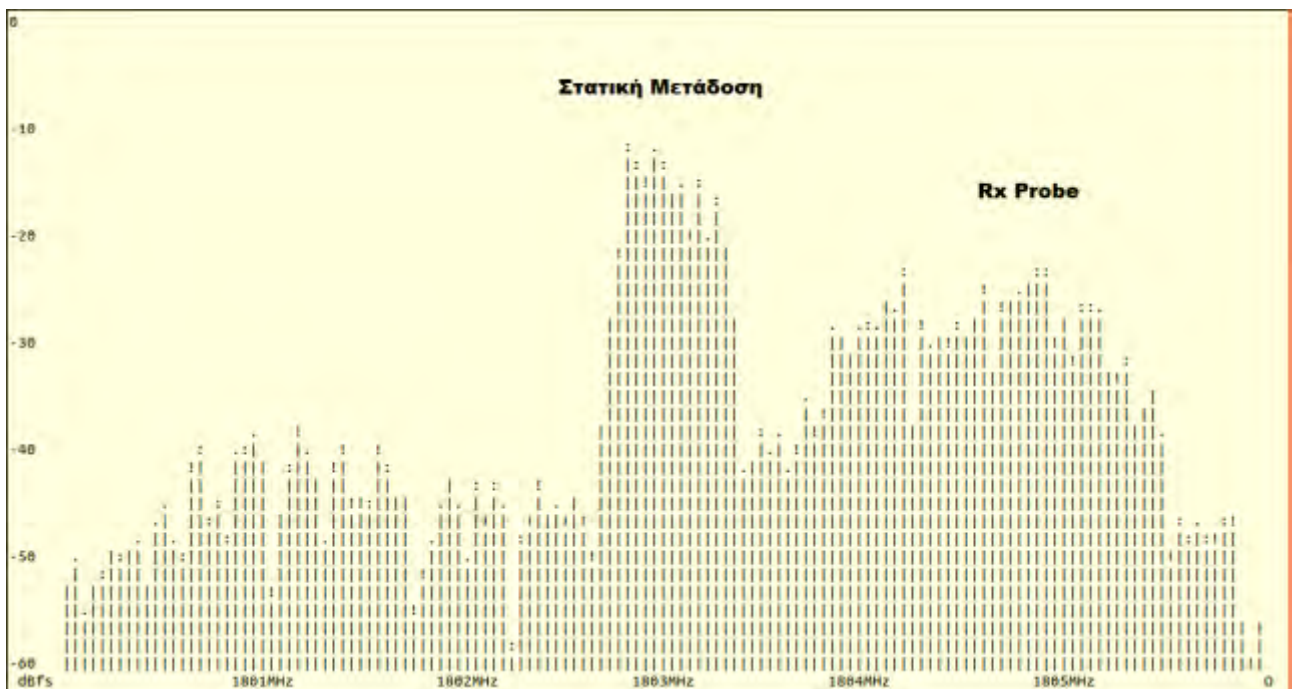


Image 3.17. RX Probe με την ύπαρξη στατικής μετάδοσης στα 45 δευτερόλεπτα

```
01:42:18 INFO Object: =====
01:42:18 INFO Object:
01:42:18 INFO Object:                      Score Report:
01:42:18 INFO Object:
01:42:18 INFO Object:      Team1  Received 2457 packets correctly
01:42:18 INFO Object:
01:42:18 INFO Object: =====
01:42:18 INFO OmfEc::Experiment: Experiment: 2018-07-04T22:40:55.898Z finished
```

Image 3.18. RX Probe με την ύπαρξη στατικής μετάδοσης
Score Report

3.3.3. Active Spectrum Sense vs στατική μετάδοση

Η προτελευταία υλοποίηση, που μένει για να αναμετρηθεί με τη στατική μετάδοση είναι η Active Spectrum Sense. Όπως ακριβώς συνέβη και στα δυο προηγούμενα πειράματα, έτσι και τώρα η στατική μετάδοση θα τοποθετηθεί σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος συχνοτήτων, προκειμένου να μπορούν να προκύψουν πιο ασφαλή και αξιόπιστα συμπεράσματα.

Η συμπεριφορά που παρουσίασε η συγκεκριμένη υλοποίηση είναι παρόμοια με αυτή του RX Probe. Και το Active Spectrum Sense δεν παρουσίασε καμία αλλαγή συμπεριφοράς, όπου κι αν βρισκόταν η σταθερή μετάδοση. Είχε την ικανότητα με ιδιαίτερα αξιόπιστο τρόπο να αποφεύγει το θόρυβο και να μεταδίδει ανενόχλητα.

Ακόμα και η αδυναμία, που παρουσιάζει το Active Spectrum Sense είναι ίδια με αυτή της προαναφερθείσας υλοποίησης. Αυτό σημαίνει, ότι αν η σταθερή μετάδοση ξεκινήσει στο σημείο, που βρίσκεται και η δική μας μετάδοση, τότε τα πρώτα δεκαπέντε δευτερόλεπτα (μέχρι την πρώτη έναρξη του sensing) θα υπάρχει παρεμβολή.

Ακολουθούν στιγμιότυπα από το συγκεκριμένο πείραμα.

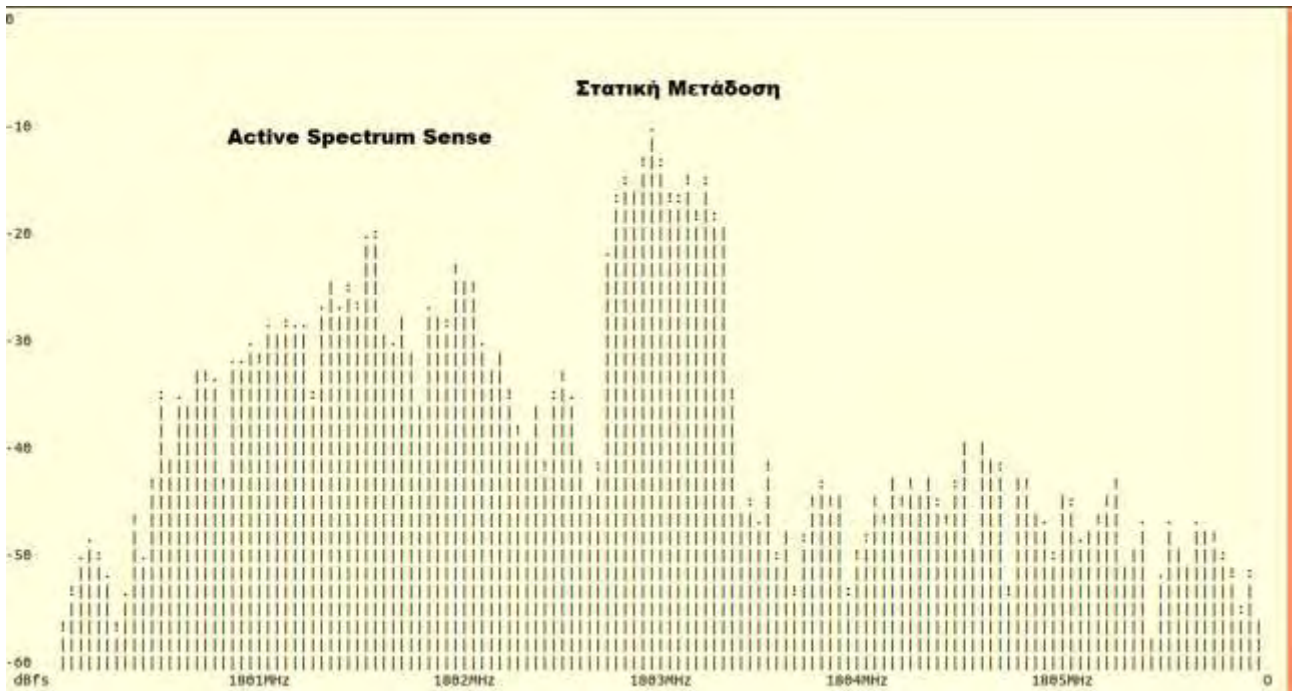


Image 3.19. Active Spectrum Sense με την ύπαρξη στατικής μετάδοσης στα 15 δευτερόλεπτα

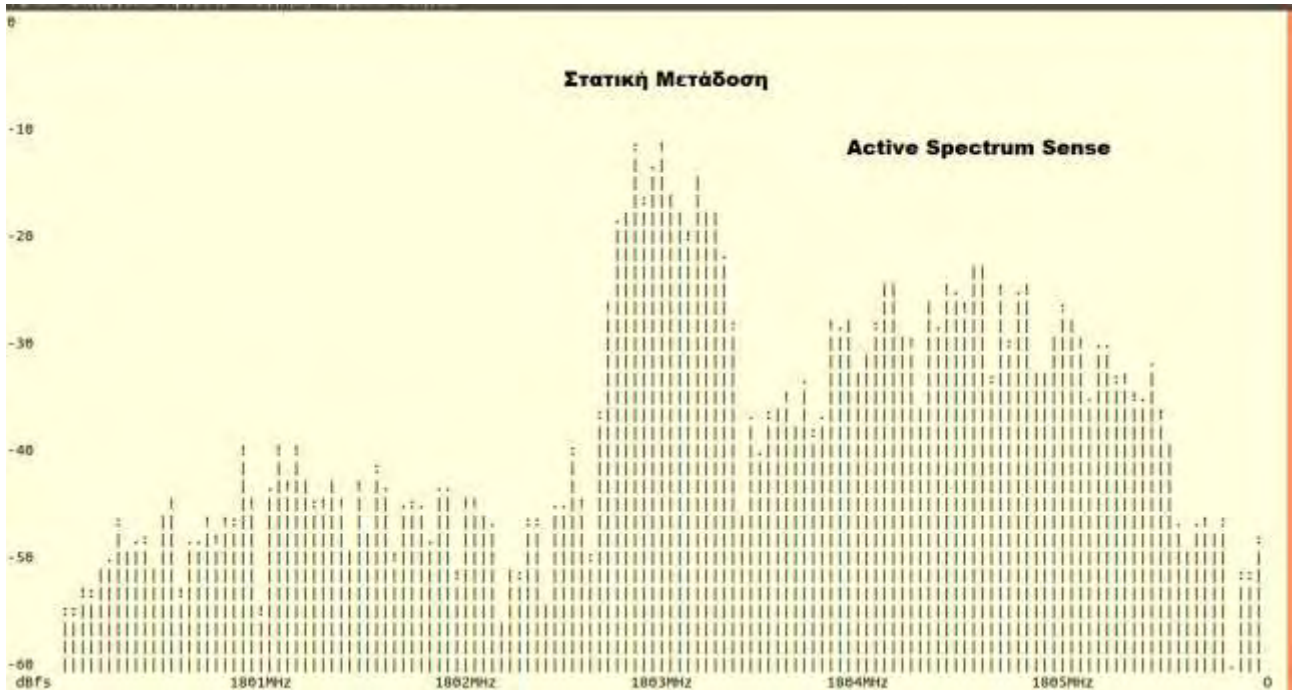


Image 3.20. Active Spectrum Sense με την ύπαρξη στατικής μετάδοσης στα 45 δευτερόλεπτα

```
01:50:44 INFO Object: =====
01:50:44 INFO Object:
01:50:44 INFO Object:                Score Report:
01:50:44 INFO Object:
01:50:44 INFO Object:    Team1  Received 2488 packets correctly
01:50:44 INFO Object:
01:50:44 INFO Object: =====
01:50:44 INFO OmfEc::Experiment: Experiment: 2018-07-04T22:49:21.952Z finished
```

Image 3.21. Active Spectrum Sense με την ύπαρξη στατικής μετάδοσης
Score Report

3.3.4. TX Probe vs στατική μετάδοση

Τελευταία υλοποίηση που απομένει για να αναμετρηθεί με τη στατική μετάδοση είναι η TX Probe. Όπως ακριβώς συνέβη και στα προηγούμενα πειράματα, έτσι και τώρα η στατική μετάδοση θα τοποθετηθεί σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος συχνοτήτων, προκειμένου να μπορούν να προκύψουν πιο ασφαλή και αξιόπιστα συμπεράσματα.

Η TX Probe έχοντας ως σκοπό κάθε 4000 πακέτα να βρίσκει ελεύθερο κανάλι για να συνεχιστεί η μετάδοση, δεν φαίνεται να επηρεάζεται από τη συχνότητα, που θα τοποθετηθεί η σταθερή μετάδοση. Είχε τη δυνατότητα αξιόπιστο τρόπο να συνεχίζει τη μετάδοση αποφεύγοντας όλες τις παρεμβολές.

Η αχίλλειος πτέρνα της TX Probe ήταν στο ενδεχόμενο η σταθερή μετάδοση να μεταδίδει ακριβώς στο ίδιο κανάλι με εκείνη. Τότε εγκυμονεί ο κίνδυνος να χαθούν τα feedback πακέτα με αποτέλεσμα ο πομπός και ο δέκτης να χαθούν και να μην μπορέσουν ποτέ να ξαναβρεθούν καταστρέφοντας όλη τη μετάδοση.

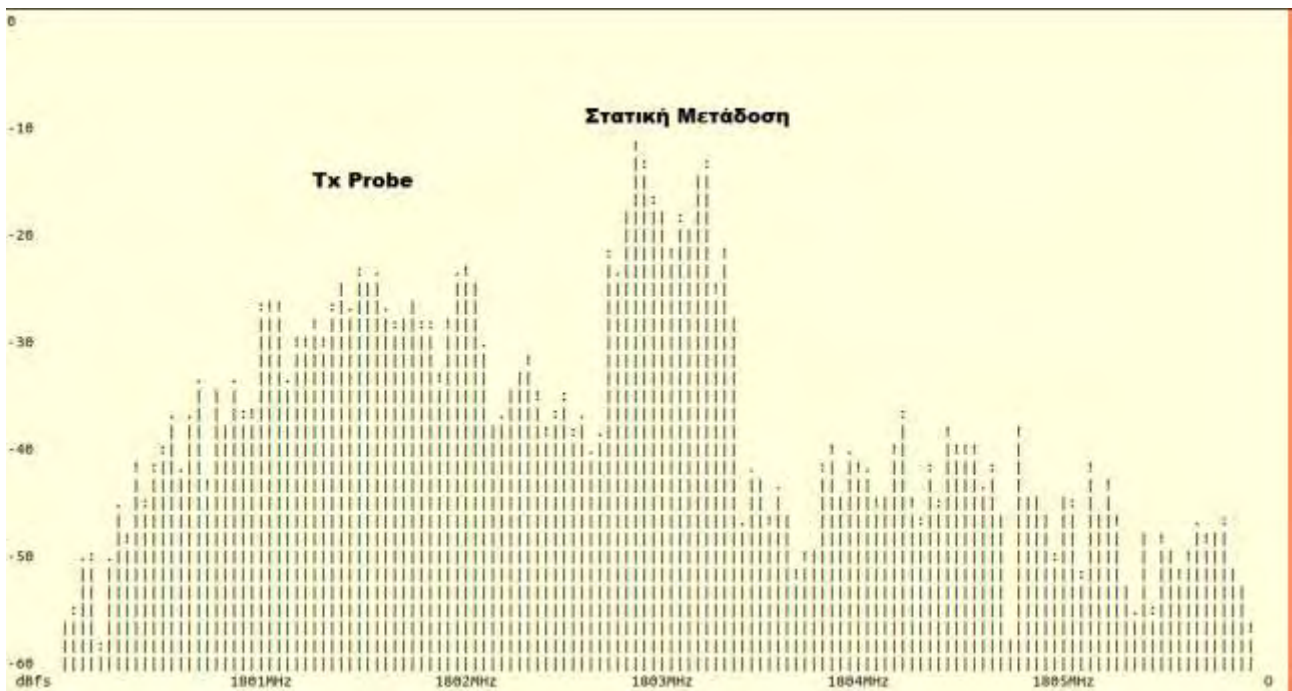


Image 3.22. TX Probe με την ύπαρξη στατικής μετάδοσης στα 15 δευτερόλεπτα

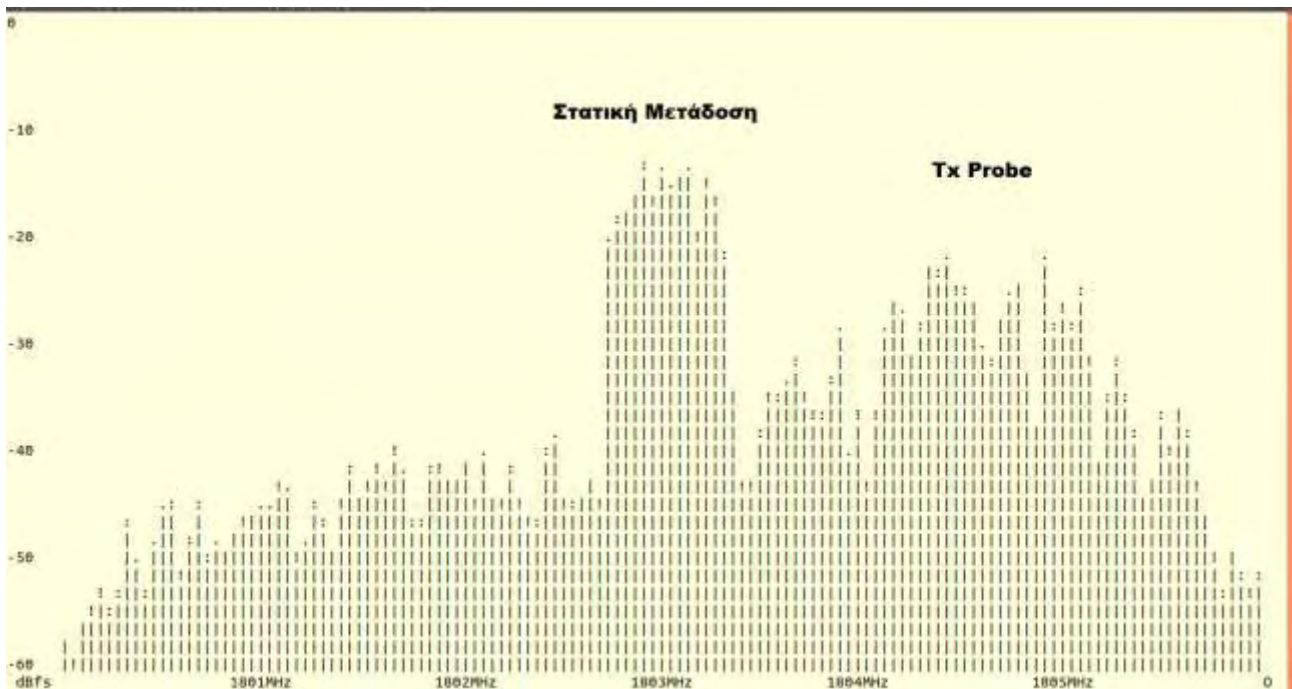


Image 3.23. TX Probe με την ύπαρξη στατικής μετάδοσης στα 45 δευτερόλεπτα


```

02:23:25 INFO Object: =====
02:23:25 INFO Object:
02:23:25 INFO Object:                Score Report:
02:23:25 INFO Object:
02:23:25 INFO Object:    Team1  Received 3995 packets correctly
02:23:25 INFO Object:
02:23:25 INFO Object: =====
02:23:25 INFO OmfEc::Experiment: Experiment: 2018-07-04T23:22:02.809Z finished

```

Image 3.24. TX Probe με την ύπαρξη στατικής μετάδοσης
Score Report

3.4.Πειράματα με την ύπαρξη κινούμενης μετάδοσης δυο συχνοτήτων

Η τρίτη σειρά πειραμάτων αφορά την τοποθέτηση των τεσσάρων υλοποιήσεων διαδοχικά στο ίδιο φάσμα με μια άλλη κινούμενη αυτή τη φορά μετάδοση. Τα πειράματα θα τρέξουν για συνολικά εξήντα δευτερόλεπτα. Για την κάθε υλοποίηση ξεχωριστά θα υπάρξει επισύναψη τριών εικόνων. Η πρώτη θα είναι στα δεκαπέντε δευτερόλεπτα μετάδοσης, η δεύτερη στα σαρανταπέντε και η τρίτη θα αναγράφει το σύνολο σωστών πακέτων, που στάλθηκαν από την υλοποίηση.

3.4.1.Passive Spectrum Sense vs κινούμενη μετάδοση δυο συχνοτήτων

Η συνέχεια στα πειράματα αποδοτικότητας της Passive Spectrum Sense θα δοθεί, τοποθετώντας στο ίδιο φάσμα με τη δική μας υλοποίηση μια μετάδοση, η οποία θα κινείται ανάμεσα σε δυο συχνότητες ανά κάποια δευτερόλεπτα. Όπως και στην πρώτη σειρά πειραμάτων έτσι και τώρα θα χρησιμοποιηθεί ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Ακόμα θα ποικίλουν οι αποστάσεις των μεταπηδήσεων (για τον κύριο όγκο των πειραμάτων οι δυο συχνότητες, που θα μεταπηδά η ξένη μετάδοση θα έχουν απόσταση της τάξης του 1.5 MHz) και ο χρόνος που θα μεσολαβεί ανάμεσα στις μεταπηδήσεις (θα κυμαίνεται κατά κύριο λόγο στα 5 δευτερόλεπτα).

Όπως στα προηγούμενα δυο πειράματα έτσι και τώρα, όταν η ξένη μετάδοση βρισκόταν σε απόσταση μεγαλύτερη του 0.5MHz, η συμπεριφορά της υλοποίησης ήταν ίδια με το ενδεχόμενο να μετέδιδε μόνη της στο φάσμα. Η ομαλή παράδοση/λήψη πακέτων δεν εμποδιζόταν με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ανάγκη για μεταπήδηση σε κάποια άλλη συχνότητα.

Η εικόνα ήταν διαφορετική όταν η μια από τις δυο κεντρικές συχνότητες της κινούμενης μετάδοσης ήταν εντός του εύρους αρχικής λειτουργίας του Passive Spectrum Sense. Η υλοποίηση με μια μικρή καθυστέρηση αντιλαμβανόταν την ύπαρξη παρεμβολής και ξεκινούσε τις μεταπηδήσεις συχνότητας. Όταν σταματούσε να κινείται η μετάδοση η παρατήρηση ήταν ότι αυτό γινόταν ανάμεσα στα δυο σημεία λειτουργίας της ξένης μετάδοσης, όπου και μετέδιδε ανεμπόδιστα. Αυτό ασφαλώς ήταν το καλύτερο σενάριο, αφού ήταν αρκετές οι φορές που δεν προλάβαινε να φτάσει μέχρι αυτό το σημείο μέχρι το τέλος του πειράματος, οπότε σε ένα ικανό μέρος αυτού είχε παρεμβολή.

Εν κατακλείδι η κύρια παρατήρηση και συμπέρασμα μετά από αυτό το πείραμα είναι ότι η υλοποίηση Passive Spectrum Sense αντιλαμβάνεται σχετικά γρήγορα την ύπαρξη παρεμβολής απλά η δεξιά κατεύθυνση, που κινείται δεν είναι πάντα η σωστή για να την αποφύγει.

. Στα στιγμιότυπα που ακολουθούν μπορεί να παρατηρηθεί η συμπεριφορά της Passive Spectrum Sense.

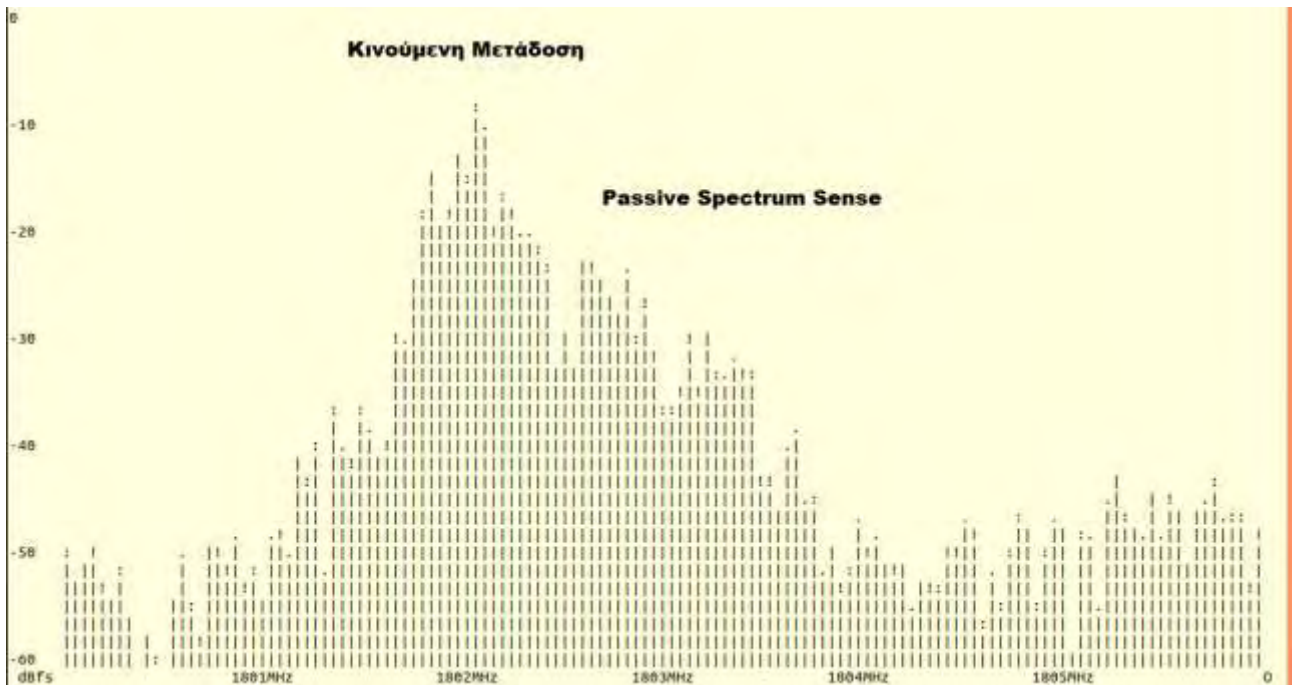


Image 3.25. Passive Spectrum Sense με την ύπαρξη κινούμενης μετάδοσης δυο συχνοτήτων στα 15 δευτερόλεπτα

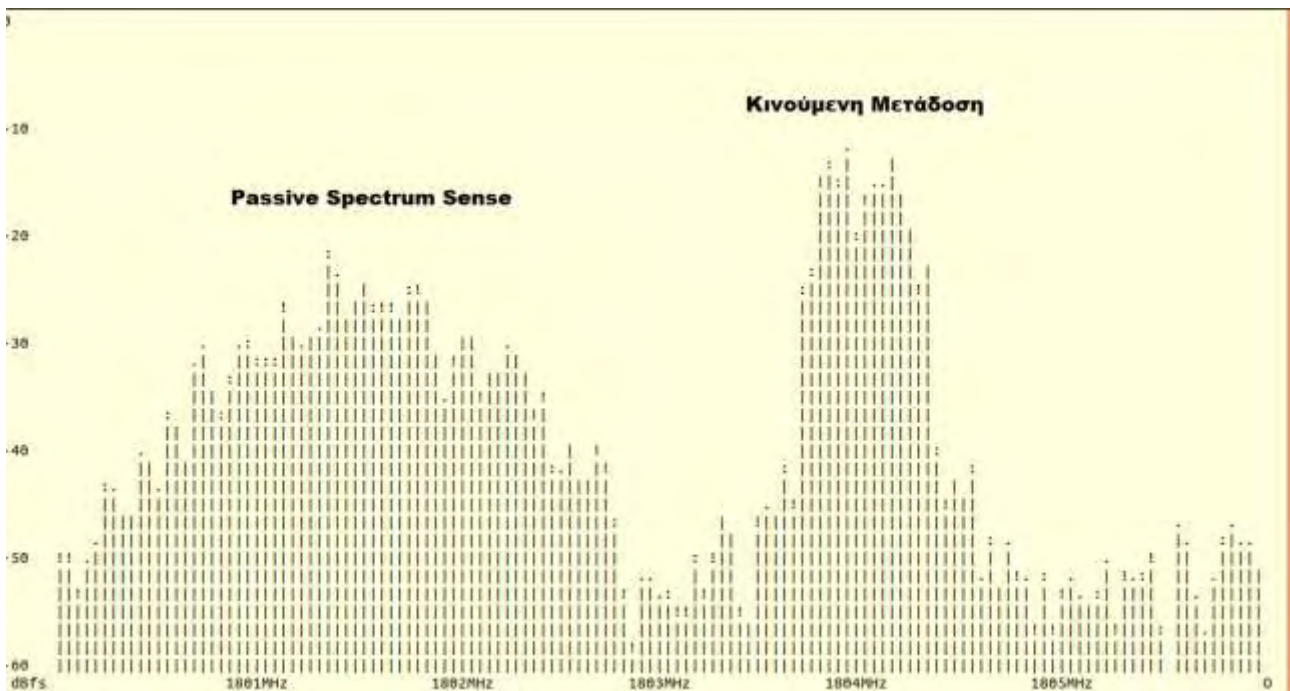


Image 3.26. Passive Spectrum Sense με την ύπαρξη κινούμενης μετάδοσης δυο συχνοτήτων στα 45 δευτερόλεπτα

```

01:03:15 INFO Object: =====
01:03:15 INFO Object:
01:03:15 INFO Object:                Score Report:
01:03:15 INFO Object:                Team1 Received 4000 packets correctly
01:03:15 INFO Object:
01:03:15 INFO Object: =====
01:03:15 INFO OmfEc::Experiment: Experiment: 2018-07-04T22:01:53.357Z finished

```

Image 3.27. Passive Spectrum Sense με την ύπαρξη κινούμενης μετάδοσης δυο συχνοτήτων Score Report

3.4.2. RX Probe vs Κινούμενη Μετάδοση δυο Συχνοτήτων

Ακολουθεί η σειρά της RX Probe να τοποθετηθεί στο ίδιο φάσμα με μια μετάδοση, η οποία θα κινείται ανάμεσα σε δυο συχνότητες ανά κάποια δευτερόλεπτα. Όπως και στην πρώτη σειρά πειραμάτων έτσι και τώρα θα χρησιμοποιηθεί ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Ακόμα θα ποικίλουν οι αποστάσεις των μεταπηδήσεων (για τον κύριο όγκο των πειραμάτων οι δυο συχνότητες, που θα μεταπηδά η ξένη μετάδοση θα έχουν απόσταση της τάξης του 1.5 MHz) και ο χρόνος που θα μεσολαβεί ανάμεσα στις μεταπηδήσεις (θα κυμαίνεται κατά κύριο λόγο στα 5 δευτερόλεπτα).

Όπως ακριβώς παρατηρήθηκε και στα προηγούμενα δυο πειράματα, έτσι και τώρα δεν παρατηρείται κάποια αλλαγή στη συμπεριφορά του RX Probe σε σχέση με τις συχνότητες εναλλαγής ή τον χρόνο μεταπήδησεων της ξένης συχνότητας. Βρίσκει με ιδιαίτερη αξιοπιστία τα κομμάτια του φάσματος χωρίς θόρυβο και συνεχίζει τη μετάδοση εκεί.

Το πρόβλημα, που παρατηρείται έχει σχέση και πάλι με το χρόνο λειτουργίας του probe. Όταν η ξένη μετάδοση ξεκινάει στο εύρος του RX Probe δεν μπορεί να την αποφύγει μέχρι την πρώτη λειτουργία του. Ενδεχομένως με τη χρήση κάποιου άλλου μηχανήματος μετάδοσης κι όχι του USRP B210 να μπορούσε να μετριαστεί αυτό το πρόβλημα και γιατί όχι να εξαλειφθεί.

Ακολουθούν στιγμιότυπα που πιστοποιούν τις παραπάνω διατυπώσεις.

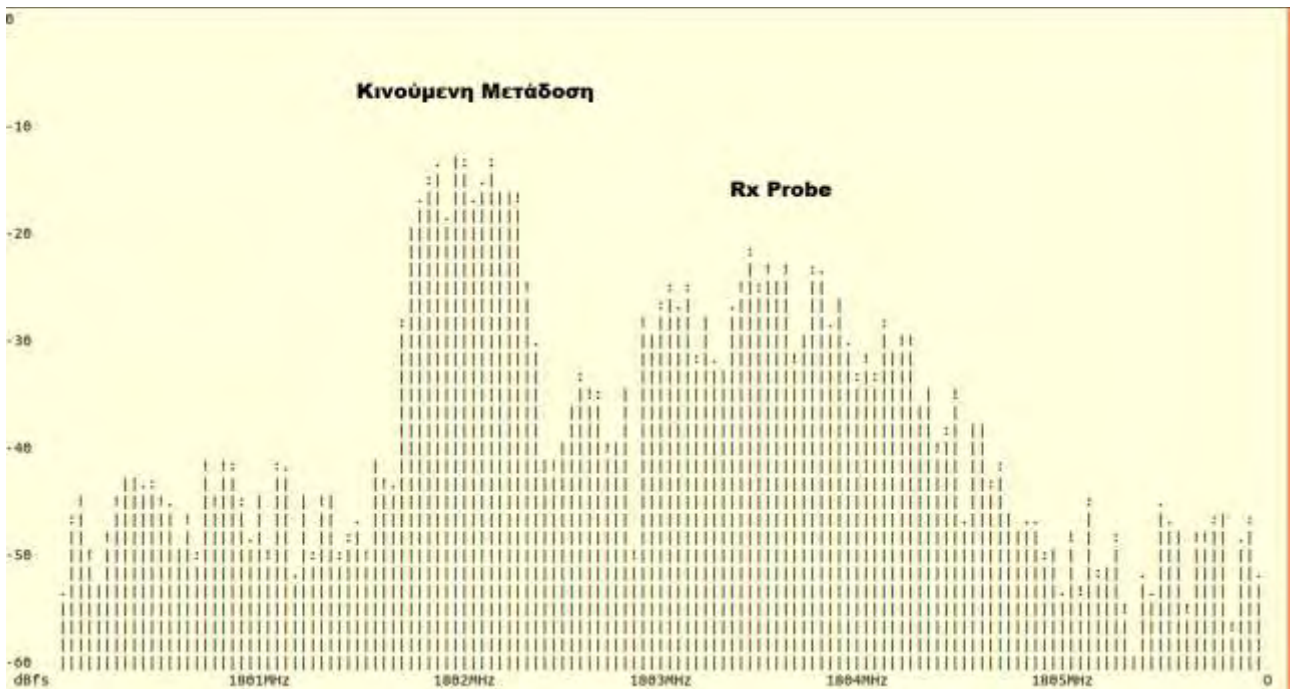


Image 3.28. RX Probe με την ύπαρξη κινούμενης μετάδοσης δυο συχνοτήτων στα 15 δευτερόλεπτα

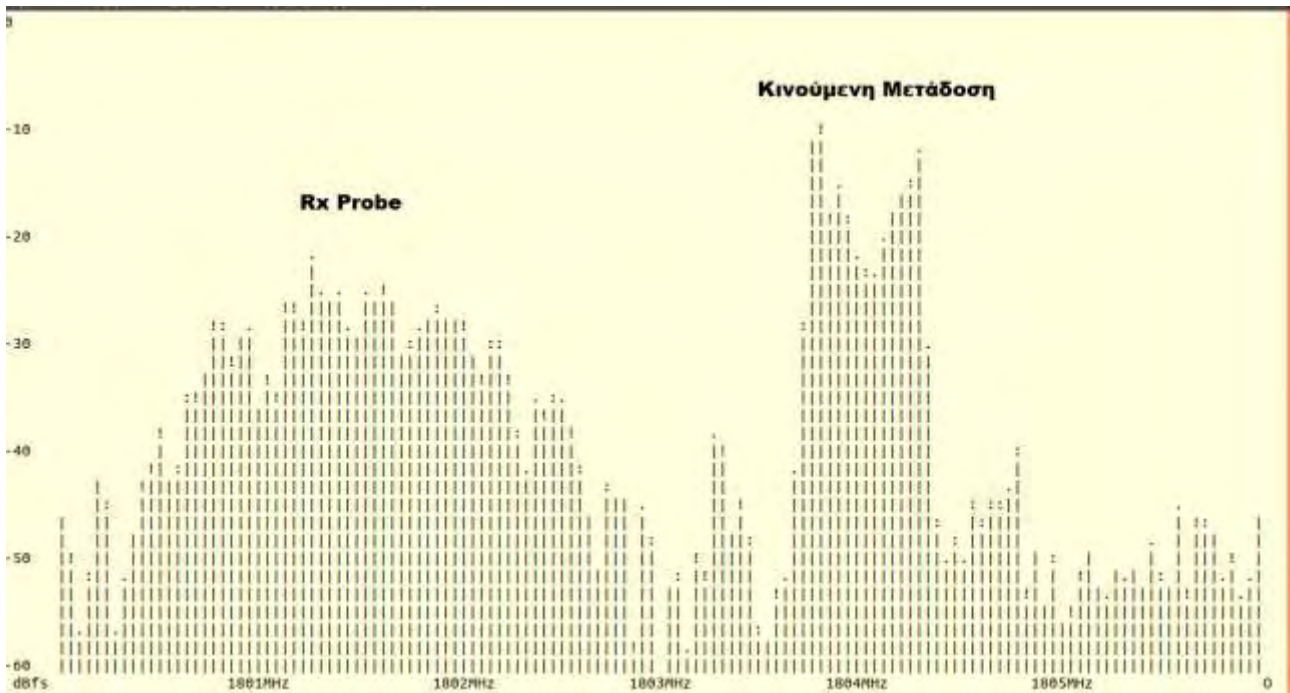


Image 3.29. RX Probe με την ύπαρξη κινούμενης μετάδοσης δυο συχνοτήτων στα 45 δευτερόλεπτα

```

01:22:18 INFO Object: =====
01:22:18 INFO Object:
01:22:18 INFO Object:                      Score Report:
01:22:18 INFO Object:
01:22:18 INFO Object:      Team1  Received 1989 packets correctly
01:22:18 INFO Object:
01:22:18 INFO Object: =====
01:22:18 INFO OmfEc::Experiment: Experiment: 2018-07-04T22:20:56.022Z finished

```

Image 3.30. RX Probe με την ύπαρξη κινούμενης μετάδοσης δυο συχνοτήτων Score Report

3.4.3. Active Spectrum Sense vs Κινούμενη Μετάδοση δυο Συχνοτήτων

Το επόμενο πείραμα σ' αυτή την κατηγορία αφορά την τοποθέτηση του Active Spectrum Sense στο ίδιο φάσμα με μια μετάδοση, η οποία θα κινείται ανάμεσα σε δυο συχνότητες ανά κάποια δευτερόλεπτα. Όπως και στην πρώτη σειρά πειραμάτων έτσι και τώρα θα χρησιμοποιηθεί ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Ακόμα θα ποικίλουν οι αποστάσεις των μεταπηδήσεων (για τον κύριο όγκο των πειραμάτων οι δυο συχνότητες, που θα μεταπηδά η ξένη μετάδοση θα έχουν απόσταση της τάξης του 1.5 MHz) και ο χρόνος που θα μεσολαβεί ανάμεσα στις μεταπηδήσεις (θα κυμαίνεται κατά κύριο λόγο στα 5 δευτερόλεπτα).

Αυτό το πείραμα δεν έρχεται να μας προσθέσει κάποια νέα γνώση όσον αφορά τη συμπεριφορά του Active Spectrum Sense. Όπως και στις καταστάσεις που αναλύθηκαν παραπάνω λειτουργεί κι έχει παρόμοια εικόνα με το RX Probe. Δηλαδή η ξένη μετάδοση δεν την εμποδίζει να βρει τα κανάλια χωρίς θόρυβο και να συνεχίσει να λειτουργεί σε αυτά.

Το πρόβλημα, που παρατηρείται και εδώ έχει σχέση και πάλι με το χρόνο λειτουργίας του sensing. Εάν λοιπόν η ξένη μετάδοση ξεκινήσει στο ίδιο κανάλι με το Active Spectrum Sense τότε μέχρι την πρώτη λειτουργία του sensing (δεκαπέντε δευτερόλεπτα) έχουμε παρεμβολή. Σε περίπτωση, που είχαμε και δεύτερο receive chain στη διάθεση μας για μόνιμη λειτουργία του sensing δεν θα εμφανιζόταν αυτό το πρόβλημα.

Τα στιγμιότυπα από αυτό το πείραμα παρατίθενται παρακάτω.

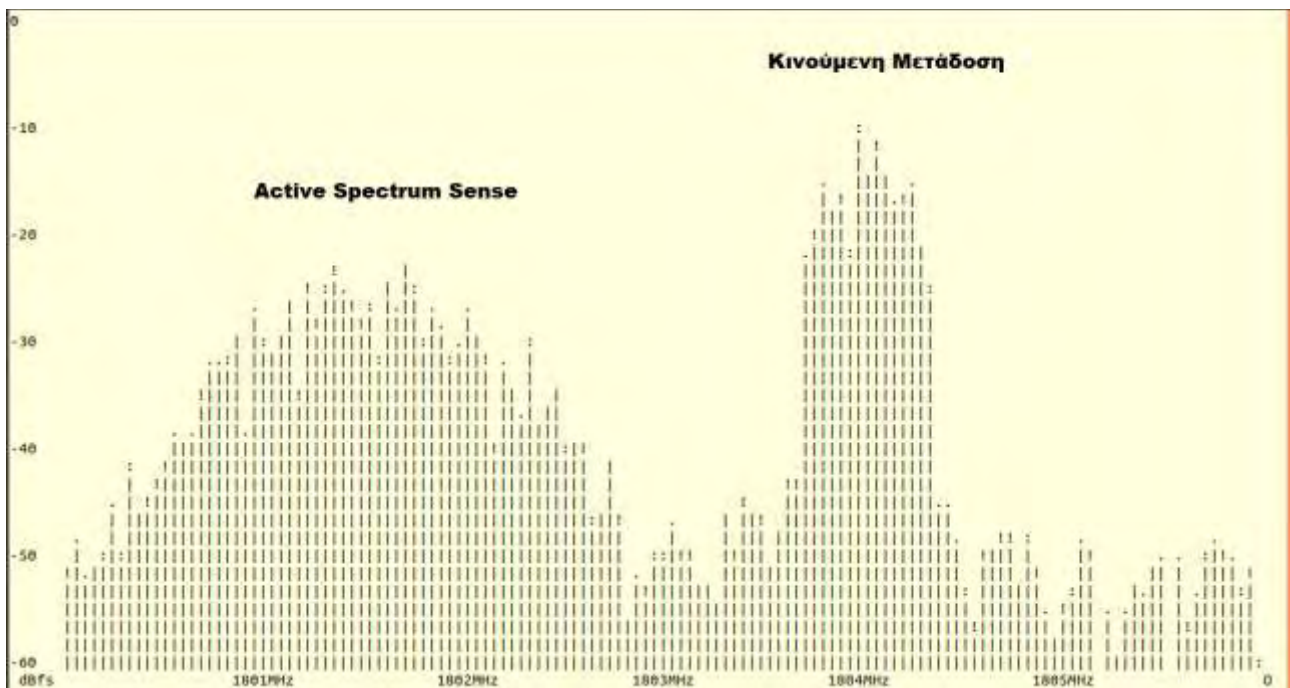


Image 3.31. Active Spectrum Sense με την ύπαρξη κινούμενης μετάδοσης δυο συχνοτήτων στα 15 δευτερόλεπτα

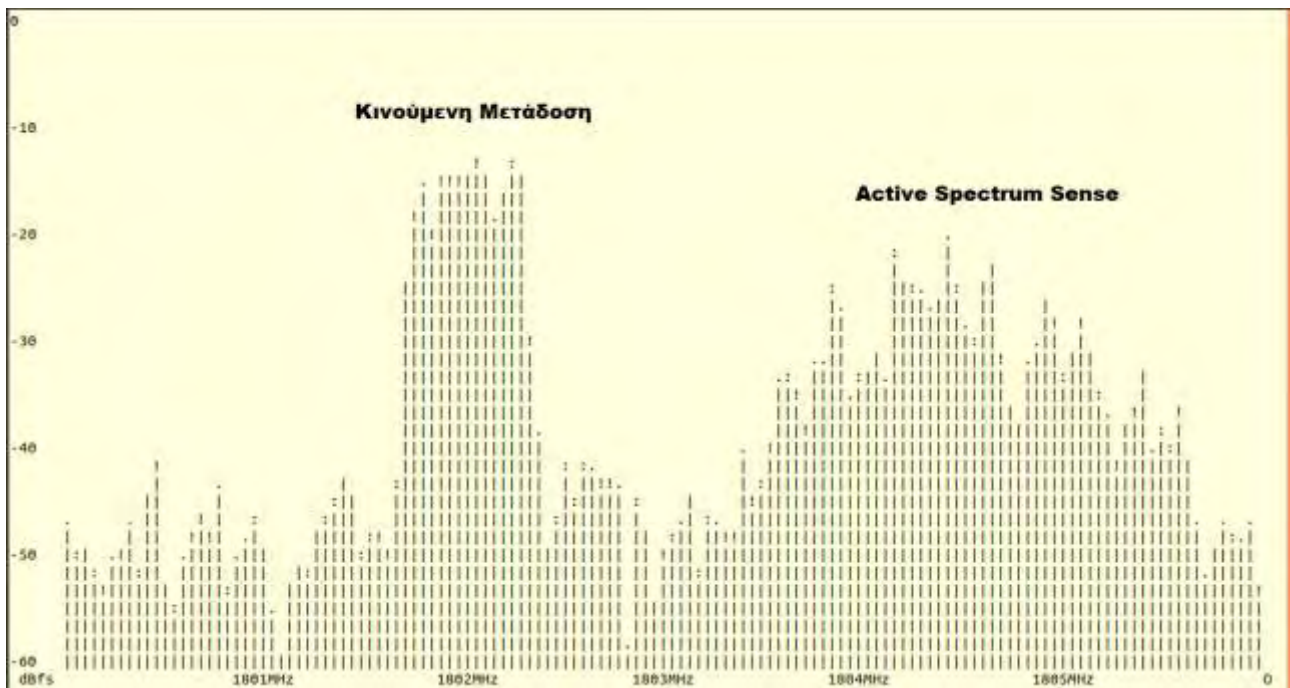


Image 3.32. Active Spectrum Sense με την ύπαρξη κινούμενης μετάδοσης δυο συχνοτήτων στα 45 δευτερόλεπτα

```

14:23:21 INFO Object: =====
14:23:21 INFO Object:
14:23:21 INFO Object:                Score Report:
14:23:21 INFO Object:
14:23:21 INFO Object:    Team1  Received 2451 packets correctly
14:23:21 INFO Object:
14:23:21 INFO Object: =====
14:23:21 INFO OmfEc::Experiment: Experiment: 2018-07-05T11:21:58.049Z finished

```

Image 3.33. Active Spectrum Sense με την ύπαρξη κινούμενης μετάδοσης δυο συχνοτήτων Score Report

3.4.4. TX Probe vs Κινούμενη Μετάδοση δυο Συχνοτήτων

Η τελευταία υλοποίηση, που θα κληθεί να δώσει τα διαπιστευτήρια της απέναντι σε μια κινούμενη μετάδοση δυο συχνοτήτων είναι η TX Probe. Όπως ακριβώς συνέβη και στα υπόλοιπα πειράματα της ίδιας κατηγορίας έτσι και τώρα θα χρησιμοποιηθεί ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων.

Ακόμα θα ποικίλουν οι αποστάσεις των μεταπηδήσεων (για τον κύριο όγκο των πειραμάτων οι δυο συχνότητες, που θα μεταπηδά η ξένη μετάδοση θα έχουν απόσταση της τάξης του 1.5 MHz) και ο χρόνος που θα μεσολαβεί ανάμεσα στις μεταπηδήσεις (θα κυμαίνεται κατά κύριο λόγο στα 5 δευτερόλεπτα).

Η παρατήρηση, που μπορεί να γίνει σ' αυτό το τελευταίο πείραμα αυτής της κατηγορίας είναι ότι η TX Probe βρίσκει με ιδιαίτερη ευκολία το κανάλι χωρίς θόρυβο για να συνεχίσει εκεί τη μετάδοση. Επίσης δεν προκύπτει κάποιο θέμα συντονισμού.

Ο μοναδικός τρόπος να βλάψει η ξένη μετάδοση τη μετάδοση της υλοποίησης είναι να δημιουργήσει παρεμβολή τη στιγμή που στέλνονται τα feedback μηνύματα. Τότε εγκυμονεί ο κίνδυνος αυτά να μην βρουν ποτέ τον προορισμό τους, με αποτέλεσμα να μεταπηδήσει ο πομπός χωρίς να κάνει κάτι αντίστοιχο ο δέκτης. Κάτι τέτοιο θα ήταν καταστροφικό για τη συνέχεια της μετάδοσης.

Στα στιγμιότυπα που παρατίθενται στη συνέχεια, προέρχονται από τη διάρκεια του πειράματος.

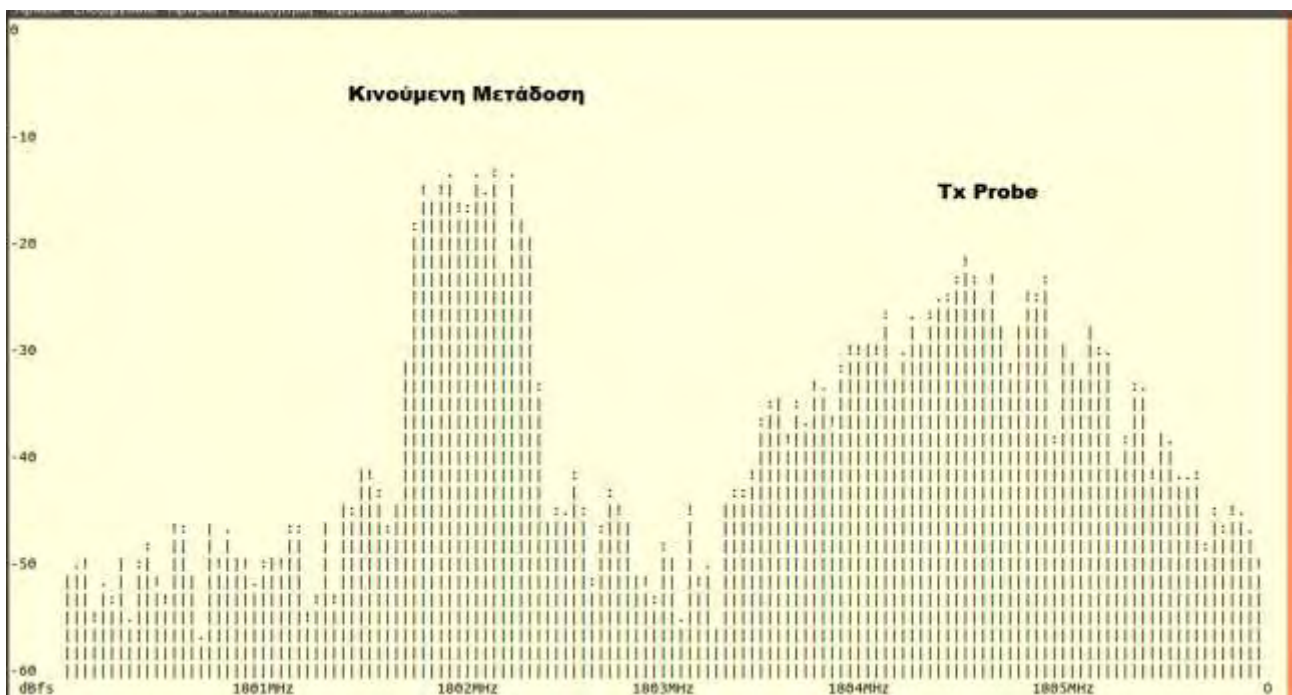


Image 3.34. TX Probe με την ύπαρξη κινούμενης μετάδοσης δυο συχνοτήτων στα 15 δευτερόλεπτα

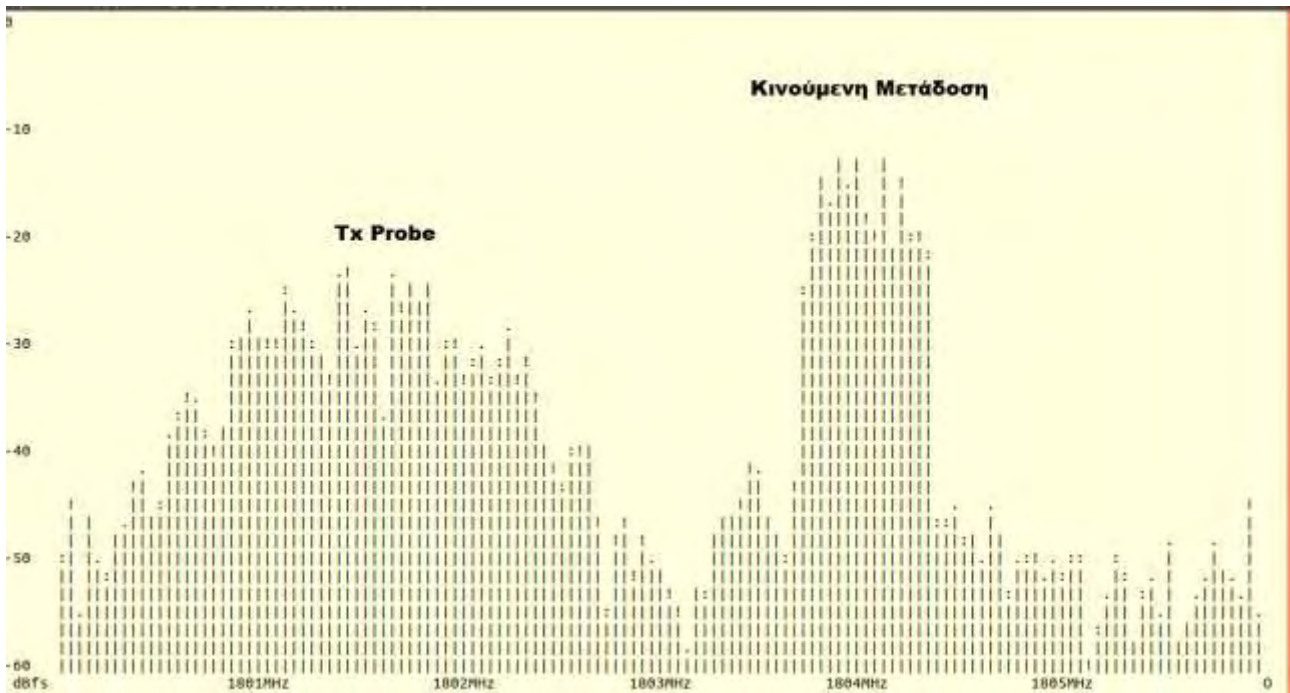


Image 3.35. TX Probe με την ύπαρξη κινούμενης μετάδοσης δυο συχνοτήτων στα 45 δευτερόλεπτα

```

02:19:44 INFO Object: =====
02:19:44 INFO Object:
02:19:44 INFO Object:                Score Report:
02:19:44 INFO Object:    Team1  Received 3872 packets correctly
02:19:44 INFO Object:
02:19:44 INFO Object: =====
02:19:44 INFO OmfEc::Experiment: Experiment: 2018-07-04T23:18:21.820Z finished

```

Image 3.36. TX Probe με την ύπαρξη κινούμενης μετάδοσης δυο συχνοτήτων Score Report

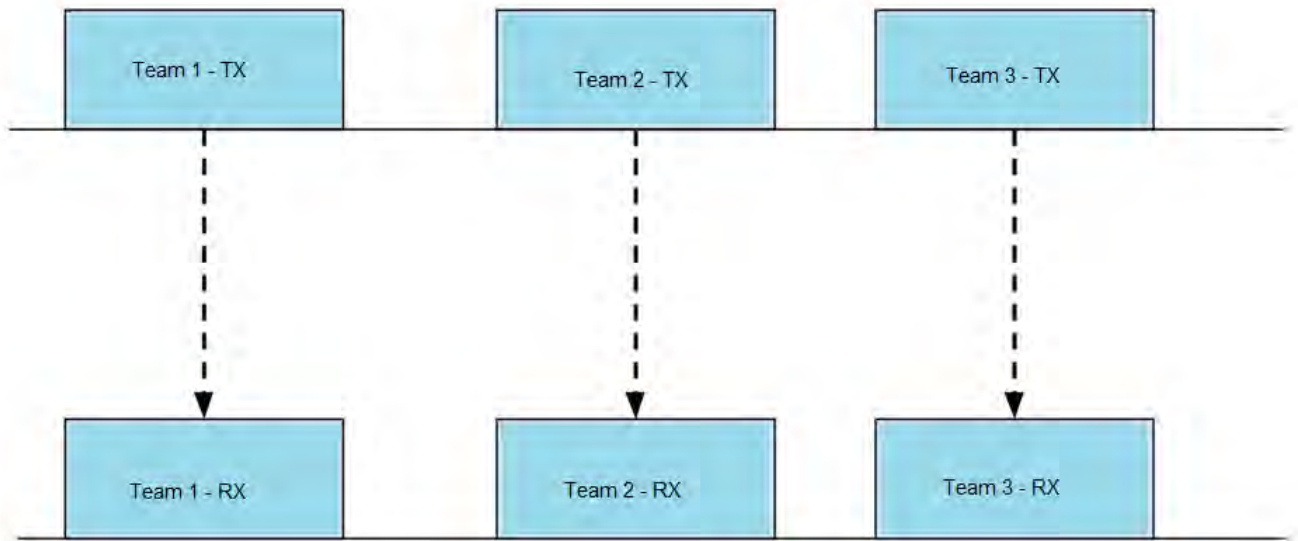
3.5. Αξιολόγηση των υλοποιήσεων σε τριάδες

Για το τέλος έμεινε το πιο ενδιαφέρον, ίσως, πείραμα απ' όλα. Η στιγμή, που και οι τέσσερις υλοποιήσεις θα βρεθούν σε τριάδες την ίδια χρονική στιγμή στο ίδιο φάσμα με σκοπό να στείλουν όσο το δυνατόν περισσότερα πακέτα η κάθε μια. Αρχικά, επειδή όπως ίσως θα παρατηρήσατε στο δεύτερο κεφάλαιο και οι τρεις από τις τέσσερις υλοποιήσεις (εξαιρείται η TX Probe) χρησιμοποιούν ακριβώς τις ίδιες παραμέτρους στο feedback κανάλι, είναι αρκετά μεγάλες οι πιθανότητες να αποπροσανατολίσει η μια υλοποίηση την άλλη, αναγνωρίζοντας λανθασμένα τα μηνύματα μεταπήδησης μιας άλλης υλοποίησης ως δικά της. Για να αποφευχθεί αυτό και να γίνει ο διαγωνισμός επί ίσοις όροις, είναι επιτακτική ανάγκη να μουν κάποιες ταυτότητες (ID) στα μηνύματα. Σε κάθε αγώνα θα παρατίθενται τρεις εικόνες, μια όταν το πείραμα φτάσει στα 15 δευτερόλεπτα, μια στα 45 δευτερόλεπτα και μια με το τελικό αποτέλεσμα.

Προτού αρχίσει η σειρά πειραμάτων είναι απαραίτητο να επεξηγηθούν οι κανόνες, που τη διέπουν. Ο πρώτος εξ αυτών είναι ότι οι τρεις υλοποιήσεις, που θα διαγωνίζονται θα έχουν ως σημείο έναρξης την ίδια συχνότητα. Κάθε αγώνας θα διαρκεί εξήντα δευτερόλεπτα και νικήτρια υλοποίηση θα είναι εκείνη, που θα φτάσει πρώτη τα 4000 σωστά πακέτα. Εάν αυτό δεν συμβεί, τότε θα λαμβάνονται υπόψιν τα σωστά πακέτα στο τέλος του πειράματος. Η υλοποίηση με το μεγαλύτερο αριθμό σωστών πακέτων θα επιβραβεύεται με 2 βαθμούς, ενώ οι υλοποιήσεις με τον δεύτερο και τρίτο μεγαλύτερο αριθμό σωστών πακέτων θα λαμβάνουν 1 και 0 βαθμούς αντίστοιχα. Μετά το πέρας και της επεξήγησης των κανόνων τα πειράματα είναι έτοιμα να ξεκινήσουν. Τώρα θα παρατεθεί ο αρχικός πίνακας κατάταξης.

Όνομα Υλοποίησης	Αριθμός Αγώνων	Βαθμολογία
<i>1.Passive Spectrum Sense</i>	0	0
<i>2.RX Probe</i>	0	0
<i>3.Active Spectrum Sense</i>	0	0
<i>4.TX Probe</i>	0	0

Το περιβάλλον που θα διεξαχθεί αυτή η σειρά πειραμάτων θα έχει την παρακάτω μορφή :



3.5.1. Πείραμα 1: Passive Spectrum Sense vs RX Probe vs Active Spectrum Sense

Οι πρώτες υλοποιήσεις, που θα κληθούν να αναμετρηθούν είναι οι Passive Spectrum Sense, η RX Probe και η Active Spectrum Sense. Το αποτέλεσμα του πειράματος παρατίθεται στο παρακάτω στιγμιότυπο.

```
10:27:18 INFO Object: =====
10:27:18 INFO Object:
10:27:18 INFO Object:          Score Report:
10:27:18 INFO Object:
10:27:18 INFO Object:   Team1  Received 3858 packets correctly
10:27:18 INFO Object:
10:27:18 INFO Object:   Team2  Received 116 packets correctly
10:27:19 INFO Object:
10:27:19 INFO Object:   Team3  Received 2433 packets correctly
10:27:19 INFO Object:
10:27:19 INFO Object: =====
10:27:19 INFO OmfEc::Experiment: Experiment: 2018-07-05T07:25:56.457Z finished
```

Image 3.37. Πείραμα 1 Score Report

Όνομα Υλοποίησης	Ομάδα
Passive Spectrum Sense	Team 1
RX Probe	Team 2
Active Spectrum Sense	Team 3

Εκ του αποτελέσματος φαίνεται, ότι η Passive Spectrum Sense ανταποκρίθηκε καλύτερα στέλνοντας σχεδόν όλα τα πακέτα σωστά. Ικανοποιητική κρίνεται και η προσαρμογή της Active Spectrum Sense, η οποία κατάφερε να βρουν τον προορισμό τους λίγο πάνω από τα μισά διαθέσιμα πακέτα. Στο αντίποδα η απόδοση της RX Probe κρίνεται απογοητευτική.

Με την ολοκλήρωση του πρώτου πειράματος η βαθμολογία διαμορφώνεται ως εξής :

Όνομα Υλοποίησης	Αριθμός Αγώνων	Βαθμολογία
<i>1.Passive Spectrum Sense</i>	1	2
<i>2.Active Spectrum Sense</i>	1	1
<i>3.RX Probe</i>	1	0
<i>4.TX Probe</i>	0	0

3.5.2. Πείραμα 2: *Passive Spectrum Sense vs TX Probe vs Active Spectrum Sense*

Το δεύτερο πείραμα θα διεξαχθεί ανάμεσα στις *Passive Spectrum Sense*, *TX Probe* και *Active Spectrum Sense*. Το αποτέλεσμα του πειράματος παρατίθεται στο παρακάτω στιγμιότυπο.

```
20:58:24 INFO Object: =====
20:58:24 INFO Object:
20:58:24 INFO Object:           Score Report:
20:58:24 INFO Object:
20:58:24 INFO Object:   Team1  Received 3858 packets correctly
20:58:24 INFO Object:
20:58:24 INFO Object:   Team2  Received 109 packets correctly
20:58:24 INFO Object:
20:58:24 INFO Object:   Team3  Received 2312 packets correctly
20:58:24 INFO Object:
20:58:24 INFO Object: =====
20:58:24 INFO OmfEc::Experiment: Experiment: 2018-07-04T17:57:01.722Z finished
```

Image 3.38. Πείραμα 2 Score Report

Όνομα Υλοποίησης	Ομάδα
Passive Spectrum Sense	Team 1
TX Probe	Team 2
Active Spectrum Sense	Team 3

Το Score Report του δεύτερου πειράματος βγάζει για δεύτερη φορά νικήτρια την *Passive Spectrum* και μάλιστα με αρκετά υψηλό αριθμό σωστών πακέτων. Στο ίδιο μήκος κύματος με την πρώτη αναμέτρηση κινήθηκε και η *Active Spectrum Sense*. Στην αντίπερα όχθη η δεύτερη

υλοποίηση που βασίζεται στο probe, η TX Probe δεν κυμάνθηκε σε ικανοποιητικά επίπεδα.

Μετά το πέρας της δεύτερου πειράματος η βαθμολογία διαμορφώνεται ως εξής :

Όνομα Υλοποίησης	Αριθμός Αγώνων	Βαθμολογία
1.Passive Spectrum Sense	2	4
2.Active Spectrum Sense	2	2
3.RX Probe	1	0
4.TX Probe	1	0

3.5.3. Πείραμα 3: Rx Probe vs TX Probe vs Active Spectrum Sense

Το επόμενο πείραμα θα διεξαχθεί ανάμεσα στις RX Probe, TX Probe και Active Spectrum Sense. Το αποτέλεσμα του πειράματος παρατίθεται στο παρακάτω στιγμιότυπο.

```
12:09:08 INFO Object: =====
12:09:08 INFO Object:
12:09:08 INFO Object:             Score Report:
12:09:08 INFO Object:
12:09:08 INFO Object:   Team1  Received 0 packets correctly
12:09:08 INFO Object:
12:09:08 INFO Object:   Team2  Received 2 packets correctly
12:09:08 INFO Object:
12:09:08 INFO Object:   Team3  Received 2325 packets correctly
12:09:09 INFO Object:
12:09:09 INFO Object: =====
12:09:09 INFO OmfEc::Experiment: Experiment: 2018-07-05T09:07:45.482Z finished
```

Image 3.39. Πείραμα 3 Score Report

Όνομα Υλοποίησης	Ομάδα
RX Probe	Team 1
TX Probe	Team 2
Active Spectrum Sense	Team 3

Στο πρώτο πείραμα χωρίς την παρουσία της Passive Spectrum Sense βρίσκει το πάτημα η Active Spectrum Sense να πάρει τη νίκη δείχνοντας αξιοζήλευτη σταθερότητα για τρίτο συνεχόμενο πείραμα. Από την άλλη μεριά, απογοητευτικά είναι τα αποτελέσματα των δυο probe υλοποιήσεων, οι οποίες λόγω του παρόμοιου τρόπου λειτουργίας τους όσον αφορά το sensing σε συνδυασμό με την απόκλιση των 2ms ανάμεσα στην πραγματική εικόνα του περιβάλλοντος και αυτής που αντιλαμβάνεται το probe οδηγούσαν τους δυο μονομάχους μόνιμα στα ίδια κανάλια.

Μετά το πέρας του τρίτου πειράματος η βαθμολογία διαμορφώνεται ως εξής :

Όνομα Υλοποίησης	Αριθμός Αγώνων	Βαθμολογία
<i>1.Active Spectrum Sense</i>	3	4
<i>2.Passive Spectrum Sense</i>	2	4
<i>3.TX Probe</i>	2	1
<i>4.RX Probe</i>	2	0

3.5.4. Πείραμα 4: RX Probe vs TX Probe vs Passive Spectrum Sense

Το τελευταίο πείραμα θα διεξαχθεί ανάμεσα στις RX Probe, TX Probe και Passive Spectrum Sense. Το αποτέλεσμα του αγώνα παρατίθεται στο παρακάτω στιγμιότυπο.

```
12:30:56 INFO Object: =====
12:30:56 INFO Object:
12:30:56 INFO Object:             Score Report:
12:30:56 INFO Object:
12:30:56 INFO Object: Team1 Received 0 packets correctly
12:30:56 INFO Object:
12:30:56 INFO Object: Team2 Received 1 packets correctly
12:30:56 INFO Object:
12:30:56 INFO Object: Team3 Received 2686 packets correctly
12:30:56 INFO Object: =====
12:30:56 INFO OmfEc::Experiment: Experiment: 2018-07-05T09:29:34.423Z finished
```

Image 3.40. Πείραμα 4 Score Report

Όνομα Υλοποίησης	Ομάδα
RX Probe	Team 1
TX Probe	Team 2
Passive Spectrum Sense	Team 3

Η εικόνα του τελευταίου πειράματος είναι ίδια με αυτή του τρίτου. Η Passive Spectrum Sense συμπληρώνει το απόλυτο σε αυτή τη σειρά πειραμάτων στέλνοντας σωστά λίγο περισσότερα από τα μισά διαθέσιμα πακέτα. Οι υλοποιήσεις με βάση το probe αντιμετώπισαν το ίδιο πρόβλημα

με αυτό που προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.5.3 με αποτέλεσμα να φέρουν απογοητευτικά αποτελέσματα.

Η τελική βαθμολογία διαμορφώνεται ως εξής :

Όνομα Υλοποίησης	Αριθμός Αγώνων	Βαθμολογία
<i>1.Passive Spectrum Sense</i>	3	6
<i>2.Active Spectrum Sense</i>	3	4
<i>3.RX Probe</i>	3	2
<i>4.TX Probe</i>	3	0

Αυτή η σειρά πειραμάτων είναι η τελευταία που θα διεξαχθεί στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής και καταλήγει με νικήτρια την Passive Spectrum Sense. Στη δεύτερη θέση εμφανίζεται η Active Spectrum Sense, ενώ τις θέσεις του βάθρου συμπληρώνει η RX Probe. Στη τελευταία θέση κατέληξε η TX Probe.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Έπειτα από ένα εξάμηνο, που περιείχε ατελείωτες ώρες διαβάσματος, πολλές γραμμές κώδικα κι ακόμα περισσότερα λάθη ήρθε η στιγμή να γίνει ένας σύντομος απολογισμός των πεπραγμένων και των συμπερασμάτων που προέκυψαν από αυτά. Ξεκινώντας θα ήθελα να αναφέρω, ότι η ενασχόληση μου με τον τομέα των δικτύων και επικοινωνιών και πιο συγκεκριμένα με τα unlicensed bands και το uncoordinate cooperation αποδείχτηκε ιδιαίτερος ενδιαφέρον στα πλαίσια ενός διαρκώς αναπτυσσόμενου κλάδου που μου έχει κεντρίσει και με το παραπάνω το ενδιαφέρον. Οι γνώσεις και τα συμπεράσματα που έβγαλα κατά τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας θα αποτελέσουν πολύτιμο εφόδιο για τη συνέχεια.

Στα πλαίσια της μελέτης, που έκανα διαπίστωσα, ότι είναι μείζονος σημασίας για μεταδόσεις που κινούνται στα πλαίσια των unlicensed bands να μπορούν να προσαρμοστούν σ' ένα άγνωστο περιβάλλον. Αυτό προσπάθησα να υλοποιήσω και εγώ. Τίποτα απ' όσα διαβάσατε παραπάνω δεν θα ήταν εφικτό χωρίς την πλατφόρμα του Gnu Radio και των μηχανημάτων USRP, που μου παρείχε το ερευνητικό εργαστήριο NITlab του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Το παραπάνω εγχείρημα είναι ιδιαίτερα απαιτητικό, αν βάλει κάποιος κιάλας στην εξίσωση, ότι μιλάμε για uncoordinate cooperation, δηλαδή οι διάφορες μεταδόσεις που χρησιμοποιούν το ίδιο φάσμα την ίδια χρονική στιγμή δεν συνεργάζονται μεταξύ τους, παρά προσπαθούν η κάθε μια να αποφύγει τις παρεμβολές των υπολοίπων. Το βαθμό δυσκολίας έρχεται να δυσκολέψει λίγο ακόμα η κατασκευαστική ιδιαιτερότητα των USRP B210 της Ettus, που χρησιμοποιήθηκαν για να χτιστούν οι υλοποιήσεις. Το γεγονός, ότι διαθέτουν ένα μόνο receive chain καθιστά απαραίτητο σε οποιονδήποτε επιχειρήσει κάτι παρόμοιο με ό τι είδατε παραπάνω να είναι ιδιαίτερα προσεκτικός στον τρόπο διαχείρισης των δυο block, που χρειάζονται τον ίδιο πόρο για να δουλέψουν (receive chain), το receive και το sense με αποτέλεσμα να λειτουργούν ανταγωνιστικά. Έτσι οποιονδήποτε άλλο block πέραν του receive στο δέκτη θα πρέπει να λειτουργεί μόνο για όσο χρόνο είναι απολύτως απαραίτητο ώστε το μεγαλύτερο μέρος του I/O να το έχει το receive. Μια προσέγγιση για να αποφευχθεί αυτό το πρόβλημα θα ήταν να γίνεται το sensing από τον εκπομπό (TX), ο οποίος δεν χρησιμοποιεί το receive chain του και σε περίπτωση αλλαγής να ενημερώνει με κάποια μηνύματα, που θα στέλνονται παράλληλα με την κεντρική μετάδοση, για την ενδεχόμενη μεταπήδηση συχνότητας. Παρόλα αυτά, ενώ αυτό στην περίπτωση μας φαίνεται ιδιαίτερα πρακτικό στην πραγματικότητα δεν είναι η ενδεδειγμένη προσέγγιση. Κι αυτό διότι είναι σημαντικό να ανιχνεύεται σωστά το περιβάλλον γύρω από τον δέκτη (για να λαμβάνει σωστά μηνύματα χωρίς παρεμβολές) κι όχι γύρω από τον εκπομπό.

Κλείνοντας θα ήθελα να εκφράσω την πεποίθησή μου, ότι ο συγκεκριμένος τομέας της επικοινωνίας, είναι ένας τομέας που ενώ σε θεωρητικό επίπεδο υπάρχουν αρκετές γνώσεις σε πρακτικό επίπεδο χρειάζονται ακόμα πολλά βήματα για να κατακτηθεί. Το γεγονός μάλιστα ότι το συγκεκριμένο κομμάτι του φάσματος, που πραγματεύεται η εργασία, είναι ελεύθερο προς χρήση από τον οποιονδήποτε κάνει την ανάγκη για δημιουργία συνεργατικών δικτύων, που προσαρμόζονται στο περιβάλλον τους επιτακτική.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. https://el.wikipedia.org/wiki/Ασύρματο_δίκτυο
2. <https://searchnetworking.techtarget.com/answer/Whats-the-difference-between-licensed-and-unlicensed-wireless>
3. https://en.wikipedia.org/wiki/Cognitive_radio
4. <https://searchnetworking.techtarget.com/definition/cognitive-radio>
5. <https://jwcn-urasipjournals.springeropen.com/articles/10.1155/2009/768314>
6. https://en.wikipedia.org/wiki/Software-defined_radio
7. https://en.wikipedia.org/wiki/Universal_Software_Radio_Peripheral
8. K. B. Letaief and W. Zhang, "Cooperative Communications for Cognitive Radio Networks," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 5, pp. 878-893, May 2009
9. [http://129.78.67.83/people/guoqiang.mao/UserFiles/File/Xiong12Uncoordinated\(1\).pdf](http://129.78.67.83/people/guoqiang.mao/UserFiles/File/Xiong12Uncoordinated(1).pdf)