

# ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ



## ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

«Σχεδιασμός και υλοποίηση σχημάτων επικοινωνίας για  
την τεχνολογία LTE σε μη αδειοδοτημένο φάσμα, υπό  
πραγματικές συνθήκες»

ΣΑΜΑΡΑΣ ΑΓΟΡΑΣΤΟΣ- ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: Αθανάσιος Κοράκης, Επίκουρος

Μέλη Επιτροπής: Δημήτριος Κατσαρός, Επίκουρος

Αντώνιος Αργυρίου, Λέκτορας

ΒΟΛΟΣ 2015

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**



**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**«Σχεδιασμός και υλοποίηση σχημάτων επικοινωνίας για την τεχνολογία  
LTE σε μη αδειοδοτημένο φάσμα, υπό πραγματικές συνθήκες»**

**ΣΑΜΑΡΑΣ ΑΓΟΡΑΣΤΟΣ-ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΚΟΡΑΚΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ**

**Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή**

**Την...../...../.....**

**Κοράκης Αθανάσιος,  
Επίκουρος Καθηγητής**

**Κατσαρός Δημήτριος ,  
Επίκουρος Καθηγητής**

**Αργυρίου Αντώνιος,  
Λέκτορας**

**ΒΟΛΟΣ 2015**

**Σχεδιασμός και υλοποίηση σχημάτων επικοινωνίας για την  
τεχνολογία LTE σε μη αδειοδοτημένο φάσμα, υπό  
πραγματικές συνθήκες**

**Design and implementation of communication schemes for  
enabling the operation of LTE in unlicensed bands, in real  
environment settings**

.....

Σαμαράς Αγοραστός-Δημήτριος

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

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

*Αφιερώνεται  
στην οικογένεια μου*

«Αιέν αριστεύειν και υπείροχον έμμεναι άλλων, μηδέ γένος  
πατέρων αισχυνέμεν».

Ιλιάδα, Ζ 208.



## **ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ**

**ΣΥΝΟΨΗ**

**ABSTRACT**

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

**SUMMARY**

**ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΚΕΦΑΛΑΙΩΝ**

**ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

**ΠΡΟΛΟΓΟΣ**

### **ΜΕΡΟΣ Ι**

**ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ LTE ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΣΕ  
ΜΗ ΑΔΕΙΟΔΟΤΗΜΕΝΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ**

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:** Long Term Evolution (LTE) ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:** Spectrum Sensing (Cognitive Radio)

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:** LTE Unlicensed (LTE – U)

## **ΜΕΡΟΣ II**

### **ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ LTE ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΣΕ ΜΗ ΑΔΕΙΟΔΟΤΗΜΕΝΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ**

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ**

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ**

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ**

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

## Σύνοψη

Στις σύγχρονες ασύρματες κινητές τηλεπικοινωνίες συνεχής επιδίωξη αποτελεί η αύξηση της ταχύτητας μεταφοράς δεδομένων. Το βασικότερο χαρακτηριστικό διαχωρισμού των γενιών πρωτοκόλλων ασύρματης επικοινωνίας είναι η προδιαγραφή ελαχίστου bitrate. Πλέον, διανύεται η τέταρτη γενιά ασύρματων δικτύων (4G, 4,5G), ενώ ήδη έχουν τεθεί οι προδιαγραφές για την επόμενη γενιά και γίνονται έρευνες και πειραματικοί έλεγχοι για την υλοποίηση τέτοιων τεχνολογιών. Επιπλέον, η συνεχής εμφάνιση νέων πρωτοκόλλων ασύρματης επικοινωνίας έχει οδηγήσει σε μεγάλη φόρτιση του φάσματος, ιδίως του αδειοδοτημένου. Συνεπώς, προέκυψε μια δημοφιλής πρόταση για τη δημιουργία δικτύων 5G, η επέκταση της τεχνολογίας LTE και σε μη εξουσιοδοτημένο φάσμα.

Στην συγκεκριμένη μεταπτυχιακή εργασία προτείνεται ένας μηχανισμός υλοποίησης LTE δικτύωσης σε μη αδειοδοτημένο φάσμα, με χρήση cognitive radio. Αναλύεται ο τρόπος δράσης του και η μορφή λειτουργιών που εκτελούν τα επιμέρους περιφερειακά. Τελικά εξετάζεται πειραματικά και εκτιμάται η αποδοτικότητα του, στην αποφυγή παρεμβολών και τη μεταφορά πληροφορίας. Αυτή η μελέτη, ευελπιστεί να αποτελέσει βάση για τη σχεδίαση ενός συστήματος ασύρματης τηλεπικοινωνίας 5G LTE-U, το οποίο θα έχει τη δυνατότητα εφαρμογής του LTE μηχανισμού σε μη εξουσιοδοτημένες συχνότητες, μειώνοντας παράλληλα τις παρεμβολές από και προς άλλες ασύρματες τεχνολογίες, στο ίδιο εύρος ζώνης.



## Abstract

Modern wireless communications are defined the constant pursuit of bitrates augmentation. The main element, which characterizes the generation of a wireless protocol, is its minimum bitrate specification. We are now in the fourth wireless networks generation (4G, 4,5G), yet the requirements for the next generation have already been announced and research is being conducted for the materialization of this technology. Furthermore, the continuous development of new wireless communication protocols has generated great congestion in the frequency spectrum, especially the licensed part of it. Hence, a popular suggestion for creating 5G networks has emerged, the extension of LTE technology in unlicensed spectrum, as well.

A mechanism for extending LTE networking in unlicensed spectrum, via use of cognitive radio, is proposed within the context of this master thesis. The way it works is analyzed, as well as the context of the functionalities that are executed by its individual peripherals. Ultimately, it is experimentally tested and evaluated for its efficiency in data propagation and also interference avoidance. This thesis can become the basis for the design of 5G LTE-U wireless networks, which extend LTE topologies in unlicensed frequencies, while attenuating the effect of interference to and from other wireless technologies operating in the same bandwidth.

## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η σχεδίαση ενός ολοκληρωμένου συστήματος εκπομπής τεχνολογίας LTE σε μη αδειοδοτημένο φάσμα συχνοτήτων. Αυτή η υλοποίηση δύναται να αποτελέσει τον πυρήνα για τη μελλοντική σχεδίαση ενός ολοκληρωμένου συστήματος LTE-U, το οποίο θα έχει τη δυνατότητα αυτόματης εύρεσης της βέλτιστης συχνότητας εκπομπής. Η διατριβή χωρίζεται θεματολογικά σε δύο τμήματα, το θεωρητικό μέρος (Κεφάλαια 1-3) και το πειραματικό μέρος (Κεφάλαια 4-6). Αναλυτικότερα:

Στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο, επιχειρείται μία γενική παρουσίαση του πρωτοκόλλου LTE. Αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας του και περιγράφονται τα επιμέρους τμήματα που το αποτελούν. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι βασικές λειτουργίες του όπως επιτελούνται στα αντίστοιχα επίπεδα του.

Στο κεφάλαιο 2, παρουσιάζεται η τεχνολογία του cognitive radio. Γίνεται αναφορά στα χαρακτηριστικά του και τον τρόπο δημιουργίας του. Επιπλέον αναλύονται οι λειτουργίες του, ως επέκταση της τεχνολογίας SDR (Software Defined Radio). Παρουσιάζονται τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, από τα οποία μπορεί να επωφεληθεί το πρωτόκολλο LTE – Unlicensed. Στο τελικό τμήμα του κεφαλαίου, παρουσιάζονται οι μεθοδολογίες φασματογραφίας και τα αντίστοιχα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα κάθε μίας.

Το θεωρητικό μέρος της μεταπτυχιακής εργασίας ολοκληρώνεται στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο, όπου περιγράφεται η καινούρια τεχνολογία, LTE Unlicensed. Αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας της τεχνολογίας Long Term Evolution (LTE) σε μη αδειοδοτημένο φάσμα συχνοτήτων και οι επιπλοκές που επιφέρει σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες, που λειτουργούν σε αυτές τις μπάντες. Τελικά, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα που θα επιφέρει αυτή η εφαρμογή σε μη εξουσιοδοτημένες συχνότητες για τη μετάβαση στην επόμενη γενιά ασύρματων τηλεπικοινωνιών.

Το πρώτο κεφάλαιο του πειραματικού μέρους (Κεφάλαιο 4), ξεκινά με την περιγραφή του μηχανισμού LTE εκπομπής σε μη αδειοδοτημένες συχνότητες, ο οποίος προτείνεται στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Αρχικά αναλύονται οι συγκυρίες που οδήγησαν στη γέννηση της ιδέας καθώς και ο λόγος, για τον οποίο οι τεχνολογίες ασύρματης τηλεπικοινωνίας θα επωφεληθούν από αυτήν. Έπειτα, παρουσιάζεται συναφής έρευνα και έργο που έχει υλοποιηθεί μέχρι στιγμής στον ίδιο θεματικό τομέα.

Στο επόμενο κεφάλαιο, το κεφάλαιο 5, παρουσιάζεται η υλοποίηση του προτεινόμενου μηχανισμού. Αρχικά αναλύονται όλα τα επιμέρους τμήματα και τεχνολογίες που το συνθέτουν και περιγράφεται το έργο που επιτελούν στη λειτουργία του. Στη συνέχεια, αναλύονται οι ενέργειες που χρειάστηκαν για το στήσιμο της πλατφόρμας και την αρχική λειτουργία της, καθώς και οι τροποποιήσεις που διενεργήθηκαν, ώστε να αποκτήσει την τελική μορφή του. Μετά από αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα λειτουργίας του και η διαφορά που επιφέρει.

Στο τελικό κεφάλαιο της διατριβής, γίνεται η μαθηματική ανάλυση των αποτελεσμάτων από τις πειραματικές εφαρμογές. Ερμηνεύονται τα στοιχεία και εξάγονται

συμπεράσματα σχετικά με τη λειτουργία του και το αντίκτυπο που αυτή έχει στην απόδοση του ασύρματου δικτύου επικοινωνίας. Στο τέλος, παρουσιάζονται ορισμένες προτάσεις μελλοντικής εξέλιξης του μηχανισμού, ώστε να βελτιστοποιηθεί και επεκταθεί η λειτουργικότητα του.

## Summary

The subject of this master thesis is the creation of a propagation system that adheres to the LTE technology, in the unlicensed frequency spectrum. This design can form the core of a future LTE-U framework that will be able to automatically search for and find the optimal propagation frequency. This thesis is divided in two main themes; the theoretical part (chapters 1 to 3) and the experimental part (chapters 4 to 6). Specifically:

In the first chapter, there is a general approach to the LTE protocol. The way it functions and also its individual parts are analyzed. Moreover, crucial operations of this protocol are presented in the way they are accomplished in its according layers.

In chapter 2, the technology of cognitive radio is introduced. Its functionality and special characteristics are presented. Additionally, there is an analysis of its functionalities, in the sense of its relation to the SDR (Software Defined Radio) technology. The specific aspects of cognitive radio, which can benefit the LTE – Unlicensed protocol, are introduced. In the final part of this chapter, the main spectrum sensing methodologies are presented, as well as their respective advantages and drawbacks.

The theoretical part of this master thesis is concluded in the third chapter, where the startup network technology LTE Unlicensed is depicted. The way Long Term Evolution (LTE) network protocol functions in an unlicensed frequency spectrum is being analyzed and also the complications it induces as far as the rest of the network protocols that use these frequency bands are concerned. Finally, there is an analysis of the benefits that this extension of LTE in unlicensed frequencies will bring about, in accordance to general pursuit of the next wireless generation protocol.

The first part of the experimental part (chapter 4), starts with the depiction of the LTE transmitting mechanism in unlicensed spectrum that is proposed in the context of this thesis. Initially, the circumstances that brought about the genesis of this idea are being analyzed, as well as the main reasons that wireless communication technologies will benefit from using LTE technology in unlicensed spectrum. Furthermore, there is a prospectus of all similar work in the research field of the same topic as this thesis.

In the course of the next chapter, chapter 5, there is a presentation of how the proposed mechanism was implemented. First of all, every individual hardware and software aspect of this particular mechanism is presented in accordance to its role in the general function. Later are analyzed all those steps that were taken in order to set up the platform for its initial run. Next there is a description of all the particular modifications, which were made upon the platform, in order to reach the desired final functionality across the network. After these, the results of the experiment itself are depicted and also the changes it induces in the whole process.

In the closing chapter of this work, the mathematic analysis of the experiments' results is located. With the aid of mathematical metric formulae, there results are interpreted and conclusions are drawn, in regard to the operation of the mechanism and its impact to the wireless communication network performance. In conclusion, there is a

presentation of specific proposal for future work that will augment and extend this mechanism's functionalities.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΚΕΦΑΛΑΙΩΝ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΚΕΦΑΛΑΙΩΝ .....	14
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	17
ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	19
Long Term Evolution (LTE) ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ .....	22
1.1 Γενική περιγραφή της τεχνολογίας LTE.....	22
1.2 Επίπεδο MAC .....	24
1.3 Επίπεδο RLC .....	26
1.4 Επίπεδο PDCP.....	30
Spectrum Sensing (Cognitive Radio) .....	34
LTE Unlicensed (LTE – U) .....	42
3.1 LTE σε μη αδειοδοτημένες συχνότητες (LTE Unlicensed).....	42
3.2 Μη αδειοδοτημένες συχνότητες και LTE .....	43
3.3 Συνύπαρξη WiFi και LTE-U.....	44
3.4 Πλεονεκτήματα χρήσης LTE σε μη αδειοδοτημένες συχνότητες .....	47
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ .....	49
4.1 Πώς προέκυψε η ιδέα .....	49
4.2 Πρότερη έρευνα πάνω στο θέμα .....	50
ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ .....	53
5.1 Η πλατφόρμα του OpenAirInterface .....	53
5.2 Αρχική προετοιμασία .....	55
5.3 Τροποποιήσεις στη δομή.....	59
5.4 Προσεγγίσεις αντιμετώπισης θέματος .....	62
5.5 LTE δίκτυο επικοινωνίας με δυναμική διαχείριση φάσματος .....	64
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	67
6.1 Πειραματική εφαρμογή του μηχανισμού .....	67
6.2 Συμπεράσματα από την εφαρμογή του μηχανισμού.....	72
6.2.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων.....	72
6.2.2 Συμπεράσματα.....	76

6.3 Προτάσεις για μελλοντική εξέλιξη του μηχανισμού.....	78
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	80
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α' .....	82
Συντμήσεις .....	82
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β' .....	85
Δείγματα κώδικα .....	85





## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την εκπόνηση της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής εργασίας έπαιξαν καθοριστικό ρόλο αρκετά πρόσωπα τα οποία σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω είτε για την άμεση συμβολή τους στο καθ' εαυτό θέμα της εργασίας, είτε για την έμμεση συμβολή τους στο ψυχολογικό υπόβαθρο που απαιτούνταν για την περάτωση της.

Αρχικά, θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον επίκουρο καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του πανεπιστημίου Θεσσαλίας και επιβλέποντα την εργασία, για τις σημαντικές συμβουλές του. Επιπλέον, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω που μου εμπιστεύθηκε αυτό το πολύ ενδιαφέρον θέμα, με πρακτική εφαρμογή και σημαντικό ερευνητικό χαρακτήρα.

Επίσης, ευχαριστώ τον Νίκο Μακρή και τον Βιργίλιο Πασσά από το εργαστήριο του πανεπιστημίου, NITLAB, για την πολύτιμη βοήθειά τους στην κατανόηση ορισμένων θεμάτων και για όλο τον χρόνο που διέθεσαν ώστε να καταστεί εφικτός ο λειτουργικός έλεγχος του μηχανισμού στο testbed.

Τέλος, χρωστώ ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου, που ήταν στο πλευρό μου καθ' όλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού μου διπλώματος. Μου έδωσαν την ψυχολογική ώθηση και την εσωτερική ηρεμία που χρειάστηκε προκειμένου να εργαστώ πάνω στο συγκεκριμένο θέμα με την πλήρη απαιτούμενη αφοσίωση.



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στον τεχνολογικό τομέα των τηλεπικοινωνιών δεν υπάρχει καθεστηκυία τάξη, καθώς διαρκώς εμφανίζονται νέες ιδέες και εξελίξεις. Οι ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων συνεχώς αυξάνονται και πλέον στην συντριπτική τους πλειοψηφία τα αναπτυγμένα κράτη παρέχουν σχεδόν πλήρεις πληθυσμιακές καλύψεις υψηλών προδιαγραφών. Από την άλλη, χάρη στη ραγδαία ανάπτυξη των κινητών συσκευών έχουν ενσωματωθεί σε αυτές πολλές λειτουργικότητες που παλιότερα συναντώνταν μόνο σε υπολογιστές. Επιπλέον, σήμερα υπάρχουν εκατοντάδες εκατομμύρια χρηστών κινητής τηλεφωνίας με πρόσβαση σε εξελιγμένα πρωτόκολλα μεταφοράς δεδομένων (3G -4G), οι οποίοι επιζητούν διαρκώς μεγαλύτερες ταχύτητες μεταφοράς πληροφορίας. Αν σε όλα αυτά προστεθεί και η επικείμενη άφιξη τεχνολογίας δικτύων πέμπτης γενιάς (5G), γίνεται εύκολα αντιληπτή η παρούσα κατάσταση στο πεδίο των δικτύων κινητής, η οποία αλλάζει με καλπάζοντες ρυθμούς.

Το διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων είναι ένα περατό μέγεθος, το οποίο συνεχώς επιβαρύνεται με νέες εφαρμογές επικοινωνίας δεδομένων, με απότοκο οι διαθέσιμες φασματικές θυρίδες για μεταφορά δεδομένων να εξαλείφονται. Στην προσπάθεια να περιοριστεί αυτό το φαινόμενο και να ρυθμιστεί με τακτικό τρόπο η χρήση των ραδιοσυχνοτήτων, τα περισσότερα κράτη έχουν οριοθετήσει με νομοθεσίες, συγκεκριμένες μπάντες συχνοτήτων για συγκεκριμένους σκοπούς χρήσης (π.χ. ραδιόφωνο, στρατιωτικές εφαρμογές κλπ.). Εντούτοις εκτός από αυτές τις εξουσιοδοτημένες συχνότητες, υπάρχουν και μερικές μη εξουσιοδοτημένες μπάντες συχνοτήτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από διάφορες τεχνολογίες και πρωτόκολλα. Οι πιο γνωστές από αυτές είναι τα εύρη συχνοτήτων όπου λειτουργεί και το WiFi, 2,4 GHz και 5 GHz.

Επίσης μία σχετικά καινούρια έννοια στον χώρο των δικτύων είναι το *cognitiveradio*. Το *cognitiveradio* είναι πρωτόκολλο δικτύων που στηρίζεται στη φασματογραφία για την αποτύπωση ιδιοτήτων των πιθανών καναλιών εκπομπής. Ως παρακλάδι της κίνησης SDR (*SoftwareDefinedRadio*), η οποία είναι μια προσπάθεια υλοποίησης λειτουργιών που επιτελεί hardware σε συμβατικές συσκευές δικτύων με λογισμικό, χρησιμοποιεί τεχνικές *spectrumsensing*, προκειμένου να βολιδοσκοπήσει τα ίχνη παρεμβολής στα εξεταζόμενα κανάλια συχνοτήτων. Υπάρχουν αρκετές τεχνικές υλοποίησης αυτής της διεργασίας (π.χ. με σύγκριση ενεργειακού ίχνους), όλες εκ των οποίων αποσκοπούν στην εύρεση εκείνου εύρους συχνοτήτων με τις ευνοϊκότερες συνθήκες για εκπομπή σημάτων, τα οποία συνήθως είναι εκεί όπου υπάρχει το μικρότερο ίχνος από έτερα σήματα.

Στα πλαίσια της εξέλιξης της τέταρτης γενιάς δικτύων (LTE, WiMAX) προς την πέμπτη, έχει προταθεί πρόσφατα η επέκταση των δικτύων LTE Advanced και σε μη εξουσιοδοτημένες συχνότητες, δημιουργώντας το πρωτόκολλο LTE Unlicensed (LTE-U). Με αυτό τον τρόπο η υποδομή αυτού του πρωτοκόλλου θα επωφεληθεί τα μέγιστα από τις πρόσθετες συχνότητες, εκτινάσσοντας τα bitrates που θα επιτυγχάνει. Βέβαια αυτή η κίνηση έχει γίνει δεκτή στην ερευνητική και βιομηχανική κοινότητα με κάποιες ενστάσεις, καθώς υπάρχουν φόβοι πως η σαφώς υπέρτερη δομή του LTE Advanced θα κατακλύσει τις

μη εξουσιοδοτημένες συχνότητες, καθιστώντας τα υπόλοιπα πρωτόκολλα που επενεργούν σε αυτές (Bluetooth, WiFi κλπ.) ανήμπορα να λειτουργήσουν σωστά [2].

Όλα τα παραπάνω σημεία, λοιπόν, συνθέτουν το μωσαϊκό του τεχνολογικού τομέα, όπου ανήκει θεματικά η συγκεκριμένη διατριβή. Συγκεκριμένα, προτείνεται ένας τρόπος ενσωμάτωσης των τεχνικών του cognitive radio στο πρωτόκολλο LTE-U, ώστε να μπορεί να λειτουργεί αρμονικά με τις υπόλοιπες τεχνολογίες δικτύων στις μη εξουσιοδοτημένες συχνότητες. Διενεργώντας φασματογραφία των συχνοτήτων σε ένα κανάλι εκπομπής θα είναι σε θέση να εντοπίζει κάθε φορά το εύρος με τις πιο ελπιδοφόρες συνθήκες για την εγκαθίδρυση ζεύξης επικοινωνίας και να το επιλέγει για εκπομπή. Επιπλέον προτείνεται ένας αλγόριθμος απόφασης για την επιλογή του βέλτιστου καναλιού μετάδοσης και επιπρόσθετα υλοποιήθηκε ένα πρότυπο δίκτυο επικοινωνίας βασισμένο στις παραπάνω παραδοχές. Τέλος, η λειτουργία αυτού του μηχανισμού επικοινωνίας ελέγχεται σε ένα testbed, ώστε να εξεταστεί η συμπεριφορά του σε ρεαλιστικές συνθήκες εκπομπής και παρεμβολών.

## **ΜΕΡΟΣ Ι**

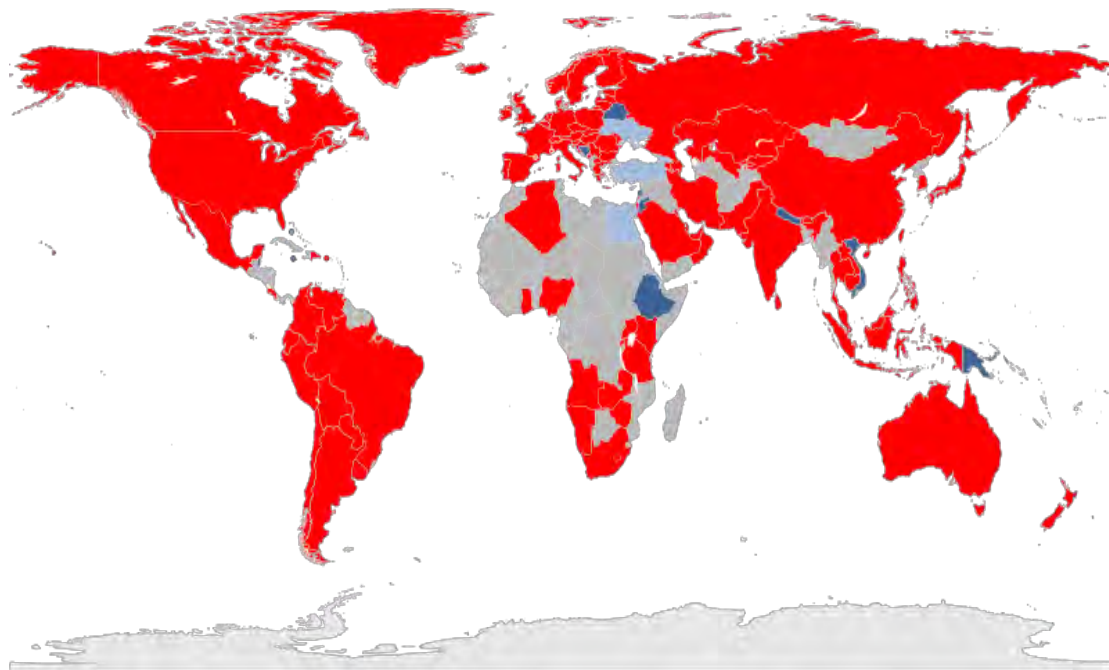
### **ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΛΤΕ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΣΕ ΜΗ ΑΔΕΙΟΔΟΤΗΜΕΝΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ: **Long Term Evolution (LTE) ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ**

### **1.1 Γενική περιγραφή της τεχνολογίας LTE**

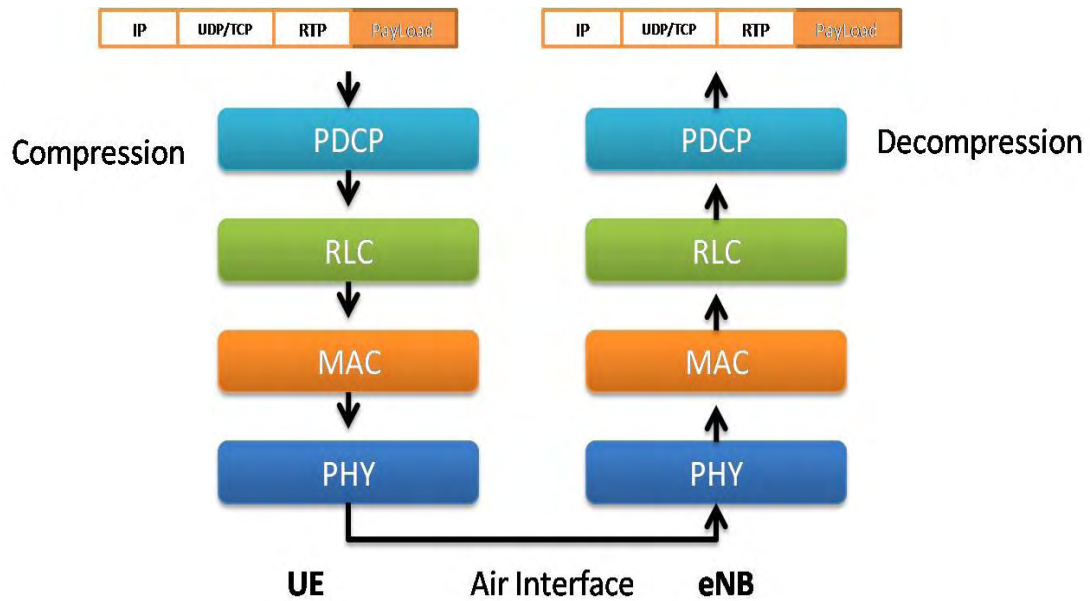
Το LTE (Long Term Evolution) είναι μια τεχνολογία αιχμής που χρησιμοποιείται σήμερα ευρέως για μεταφορά δεδομένων από κινητές συσκευές. Βασίζεται στα προγενέστερα πρωτόκολλα επικοινωνίας GSM (Global System for Mobile communications) και UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Η δημιουργία του προέκυψε ως αναβάθμιση των δύο προαναφερθέντων τεχνολογιών με σκοπό της επίτευξη μεταφοράς μεγαλύτερου όγκου δεδομένων από συσκευές κινητής τηλεπικοινωνίας. Αναπτύχθηκε από την πολυεθνική (Η.Π.Α., Ευρώπη, Κορέα, Ιαπωνία, Κίνα και Ινδία) σύμπραξη 3GPP, με στόχο την ανάπτυξη και εφαρμογή ενός προηγμένου συστήματος μεταφοράς δεδομένων, μέσα από συντονισμένη έρευνα, ώστε αυτό να αποτελέσει το πρώτο (πραγματικά) παγκόσμιο πρότυπο κινητής τηλεπικοινωνίας. Αναφορικά, τα πρώτα δημόσια δίκτυα LTE που εγκαταστάθηκαν παγκοσμίως, ήταν στο Όσλο και τη Στοκχόλμη στις 14 Δεκεμβρίου 2009 [25].

Το LTE, στην αρχική μορφή του, μολονότι διαφημίζεται ως δίκτυο τέταρτης γενιάς τηλεπικοινωνιών (4G), τυπικά δεν είναι ακριβές αυτό (για την ακρίβεια ο χαρακτηρισμός 3G+/3,5G είναι ακριβέστερος), καθώς δεν πληροί τις ελάχιστες απαιτήσεις ταχυτήτων ροής δεδομένων και χωρητικότητας καναλιού, όπως έχουν θεσπιστεί από τον διεθνή οργανισμό ITU-R (International Telecommunication Union – Radiocommunication sector). Αντιθέτως, το LTE Advanced (3GPP Release 10), μαζί με την τεχνολογία WiMAX θεωρούνται ως αμιγείς τεχνολογίες τέταρτης γενιάς.



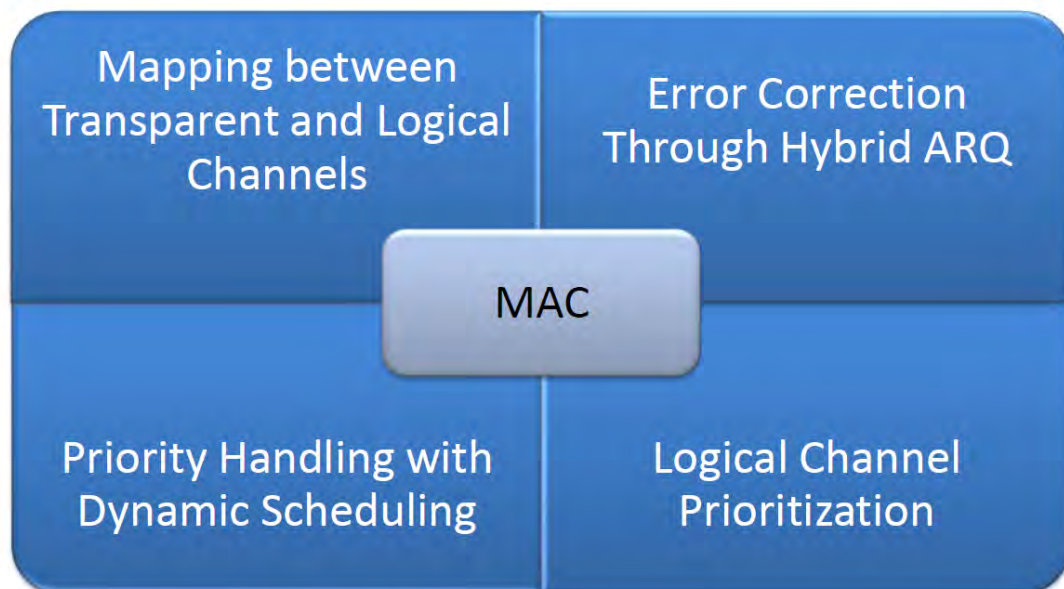
**Εικόνα 1.1:** Παγκόσμια χρήση δικτύων LTE (Ιούνιος 2013)

Όσον αφορά την ανάπτυξη της LTE τεχνολογίας, έπειτα από τροποποιήσεις και βελτιώσεις στην δομή του σήματος επιτεύχθηκε μεγαλύτερη χωρητικότητα καναλιού και επομένως μεγαλύτερη ταχύτητα ροής δεδομένων. Ουσιαστικά, εφαρμόστηκαν ρηξικέλευθες, για την εποχή του, DSP (Digital Signal Processing) τεχνικές στην ψηφιακή επεξεργασία και κωδικοποίηση του σήματος, σε συνδυασμό με μια μικρή αναδόμηση/απλοποίηση στην αρχιτεκτονική του δικτύου [25], κάτι που ελάττωσε την καθυστέρηση σε σχέση με τα πρωταρχικά 3G πρωτόκολλα. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του LTE, αυτό προσφέρει 300 Mbps μέγιστη ταχύτητα downlink, 75 Mbps μέγιστη ταχύτητα uplink, latency μικρότερη από 5 ms και δυναμικό εύρος ζώνης από 1,4 MHz έως 20 MHz [25]. Στη συνέχεια ακολουθεί μια σύντομη ανάλυση τριών βασικών δομών της LTE τεχνολογίας, το επίπεδο RLC (Radio Link Control), το πρωτόκολλο PDCP (Packet Data Convergence Protocol) και το επίπεδο MAC (Medium Access Control).



Εικόνα 1.2: Σχηματική αναπαράσταση επιπέδων του LTE πρωτοκόλλου

## 1.2 Επίπεδο MAC



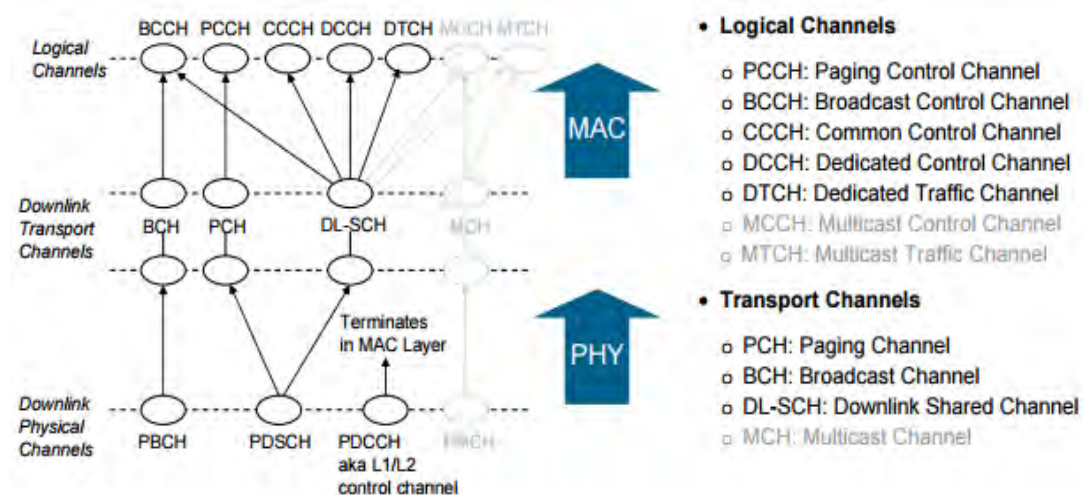
Εικόνα 1.3: Λειτουργίες του επιπέδου MAC

Το επίπεδο MAC [21] είναι το «χαμηλότερο» επίπεδο στη στοίβα πρωτοκόλλου του LTE, εφόσον εντοπίζεται ακριβώς πριν τη σύνδεση με το φυσικό μέσο μεταφοράς



δεδομένων. Επιτελεί τετραπλή λειτουργία στην διεξαγωγή της επικοινωνίας, καθώς είναι υπεύθυνο για την αντιστοίχιση της πληροφορίας από τα λογικά κανάλια σε φυσικά, την ανίχνευση (και διόρθωση) σφαλμάτων μέσω της τεχνολογίας *Hybrid ARQ*, την εξυπηρέτηση αιτήσεων με ιεραρχικό τρόπο και για την ιεράρχηση των λογικών καναλιών. Κάθε λειτουργία του θα αναλυθεί σύντομα στις ακολουθείσες παραγράφους.

Σε ανώτερο επίπεδο από το MAC (RLC) υπάρχουν λογικά κανάλια δεδομένων, ενώ σε κατώτερο (Physical) υπάρχουν κανάλια μεταφοράς πληροφορίας (transport channels). Το επίπεδο MAC αναλαμβάνει την αντιστοίχιση των δεδομένων από λογικά κανάλια σε φυσικά. Τα λογικά κανάλια αντιπροσωπεύουν τις υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων που χορηγούνται από το εν λόγω επίπεδο και ορίζονται βάσει του τύπου δεδομένων που μεταφέρουν. Επομένως, για παράδειγμα υπάρχουν κανάλια ελέγχου και κανάλια κυκλοφορίας (τα οποία ρυθμίζουν τη ροή των δεδομένων και μεταφέρουν πληροφορία για τη συμφόρηση των αντίστοιχα). Τα κανάλια μεταφοράς βρίσκονται κάτω από το επίπεδο MAC και αντιπροσωπεύουν τις υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων που προσφέρονται από το επίπεδο ζεύξης δεδομένων (datalink). Αντίθετα με τα λογικά, τα φυσικά κανάλια ορίζονται από τον τρόπο μεταφοράς δεδομένων και την κωδικοποίηση της πληροφορίας (modulation schemes).



**Εικόνα 1.4:** Αντιστοίχιση από λογικά σε φυσικά κανάλια

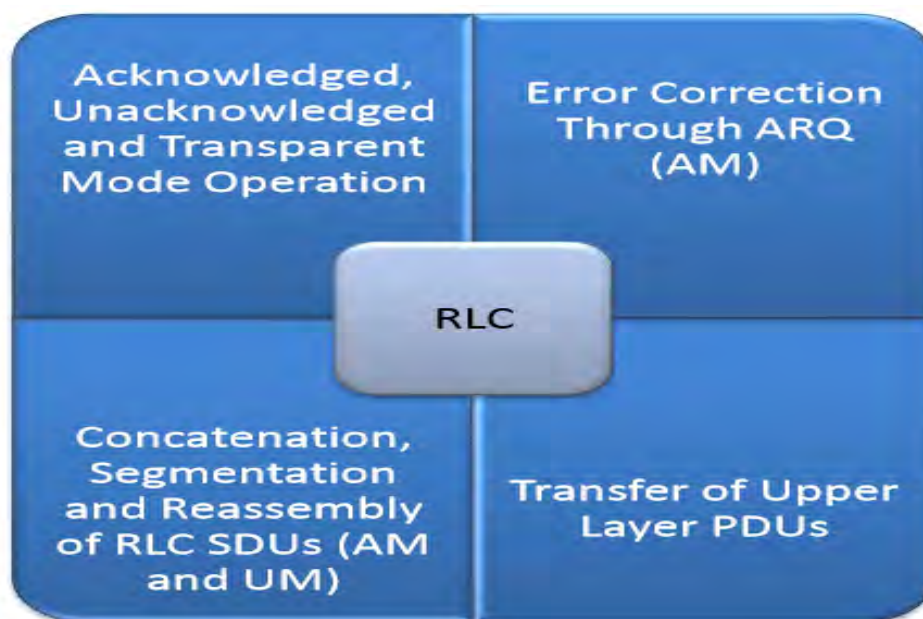
Η ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων στα δεδομένα λαμβάνει χώρα στο επίπεδο MAC, με τη μέθοδο Hybrid ARQ (Hybrid Automatic Repeat - reQuest). Αυτή η λειτουργία γίνεται σε συνεργασία με τις λειτουργίες του φυσικού επιπέδου και εκπέμπει transport blocks (TB), προκειμένου να εντοπίσει τυχόν λάθη [24]. Το MAC επίπεδο είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση και δημιουργία των blocks, ενώ το φυσικό για την λειτουργία τους. Όταν εντοπιστεί σφάλμα βάσει ενός CRC κώδικα το MAC επίπεδο εκπέμπει ένα μήνυμα NACK, το οποίο λαμβάνεται από το φυσικό επίπεδο και επανεκπέμπεται το μήνυμα προς τον κόμβο (e-NodeB) συνήθως με διαφορετικό σχήμα κωδικοποίησης. Αυτή η λειτουργία επαναλαμβάνεται λίγες φορές, με αποτέλεσμα τελικά ο παραλήπτης να έχει επαρκή

δεδομένα για να αποδομήσει το μήνυμα. Με αυτόν τον τρόπο, λοιπόν, απαλείφεται η ανάγκη για απόλυτα ορθές μεταδόσεις, αφού αρκεί απλώς ο δέκτης να έχει αρκετή πληροφορία συνδυαστικά για να αποκωδικοποιήσει την αρχική πληροφορία.

Μόλις ένα μπλοκ μεταφοράς δεδομένων (TB) γίνει διαθέσιμο ξανά μετά την διενέργεια του HARQ, αντιστοιχίζεται μέσω του MAC σε κάποιο λογικό κανάλι, το οποίο διαθέτει δεδομένα έτοιμα προς αποστολή. Βέβαια, υπάρχουν και μερικά δεσμευμένα κανάλια όπως το κανάλι ελέγχου, το οποίο χρησιμοποιείται για προγραμματισμό (scheduling) της αποστολής δεδομένων και για την ομαλή λειτουργία της επικοινωνίας. Κάθε φυσικό κανάλι μεταφοράς μπορεί να υποστηρίξει διάφορες κωδικοποιήσεις πληροφορίας, επομένως μπορεί να κυμαίνονται τα χαρακτηριστικά του (αξιοπιστία, ταχύτητα κλπ.). Το MAC ιεραρχεί τα λογικά κανάλια βάσει των δεδομένων που φέρουν και αντίστοιχα ορίζει την «σύνδεσή» τους με τα κατάλληλα φυσικά κανάλια.

Τέλος, το επίπεδο MAC ορίζει τον χρονοπρογραμματισμό (scheduling) της επικοινωνίας του κόμβου με τον χρήστη [24]. Αυτό το βασικότατο κομμάτι των τηλεπικοινωνιών διεξάγεται με τη βοήθεια μετρήσεων που λαμβάνονται μέσω του φυσικού επιπέδου. Αυτές οι μετρήσεις μεταφέρονται σε ανώτερο επίπεδο (RRC– Radio Resource Control) και έτσι γίνεται μια εκτίμηση των MCSs που θα χρησιμοποιηθούν μετέπειτα. Στο επίπεδο MAC ρυθμίζεται και ο χρονισμός της επικοινωνίας, βάσει των μετρήσεων αυτών. Για παράδειγμα, αν η ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων είναι υψηλή, τότε δε χρειάζονται πολλά timeslots και το MAC ρυθμίζει τον αριθμό τους στο απαραίτητο επίπεδο για την ομαλή διεξαγωγή της επικοινωνίας.

### 1.3 Επίπεδο RLC



**Εικόνα 1.5:** Λειτουργίες του επιπέδου RLC

Το επίπεδο RLC [22] είναι το αμέσως ανώτερο επίπεδο από το MAC στη στοίβα πρωτοκόλλου του LTE. Οι κύριες λειτουργίες που επιτελεί, είναι η τμηματοποίηση της πληροφορίας σε πακέτα, τα οποία οδηγούνται σε λογικά κανάλια (και έπειτα σε φυσικά για εκπομπή) και αντίστροφα η επανασυγκρότηση του μηνύματος από τα επιμέρους τμήματα. Διαθέτει τρεις καταστάσεις λειτουργίας, τις Acknowledged, Unacknowledged και Transparent Mode. Αυτές οι τρεις καταστάσεις λειτουργίας χαρακτηρίζονται από διαφορετικές δυνατότητες και ενέργειες που επιτελούνται. Η κάθε μία χρησιμοποιείται για διαφορετικά είδη επικοινωνίας και με διαφορετικούς σκοπούς. Επιπλέον σε αυτό το επίπεδο εντοπίζεται και ο μηχανισμός διόρθωσης σφαλμάτων ARQ (Automatic Repeat - reQuest). Σε αντίθεση με το υβριδικό του έτερο (που εφαρμόζεται σε transport blocks) εφαρμόζεται σε υψηλό επίπεδο κατά τη συγκρότηση των πακέτων υπηρεσιών. Μόλις εντοπιστεί ένα λάθος κατά τη δόμηση των SDUs στο ανώτερο επίπεδο του RLC, προγραμματίζεται, μέσω συντονισμού υπηρεσιών, πλέον, αναμετάδοση του αντίστοιχου πακέτου.

Η τμηματοποίηση της πληροφορίας αφορά την αποδόμηση μονάδων πληροφορίας πρωτοκόλλου PDU (Protocol Data Unit) σε μονάδες πληροφορίας υπηρεσιών SDU (Service Data Unit). Τα PDUs έχουν δυναμικό μέγεθος, καθώς αυτό εξαρτάται από τις συνθήκες που επικρατούν στο κανάλι επικοινωνίας και βασίζεται κυρίως στο μέγεθος των αντίστοιχων Transport Blocks. Σημαντικό ρόλο στην διαδικασία αυτή παίζει και το είδος της υπηρεσίας που εκτελείται. Για παράδειγμα μια υπηρεσία video streaming απαιτεί συνήθως μεγάλα SDUs, ενώ η μεταφορά ήχου μικρότερα. Επομένως αν λόγω των συνθηκών που επικρατούν κατά την επικοινωνία (π.χ. πολλή ύπαρξη αλληλοπαρεμβολών), ή της ίδιας της μορφής επικοινωνίας (π.χ. κλήση βίντεο) τα SDUs είναι μεγάλα, αλλά τα διαθέσιμα Transport Blocks είναι λίγα/μικρής χωρητικότητας, μπορεί ένα ολοκληρωμένο SDU να εμπεριέχεται σε πολλά επιμέρους PDUs. Επίσης, μπορεί να συμβαίνει και η αντίθετη περίπτωση (καλές συνθήκες επικοινωνίας/μικρές σε απαιτήσεις όγκου δεδομένων) και να εμπεριέχονται σε ένα PDU, πολλά SDUs από διαφορετικές υπηρεσίες. Έτσι, λοιπόν, το επίπεδο RLC είναι υπόλογο για την αποδόμηση και δόμηση των διαφορετικών αναπαραστάσεων των δεδομένων και σωστή αντιστοίχιση των στις υπηρεσίες. Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτή η παράδοση των SDUs γίνεται με απόλυτη χρονική σειρά, ενώ όσα πακέτα είναι εκτός σειράς συνήθως εκπέμπονται κατά τη φάση του handover.

Transparent Mode	Unacknowledged Mode	Acknowledged Mode
<ul style="list-style-type: none"> <li>• No segmentation and reassembly of RLC SDUs</li> <li>• No RLC headers are added</li> <li>• No delivery guarantees</li> <li>• Suitable for carrying voice</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Segmentation and reassembly of RLC SDUs</li> <li>• RLC Headers are added</li> <li>• No delivery guarantees</li> <li>• Suitable for carrying streaming traffic</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Segmentation and reassembly of RLC SDUs</li> <li>• RLC Headers are added</li> <li>• Reliable in sequence delivery service</li> <li>• Suitable for carrying TCP traffic</li> </ul>

**Πίνακας 1.1:** Διαθέσιμες λειτουργικότητες των διαφορετικών καταστάσεων λειτουργίας του επιπέδου RLC

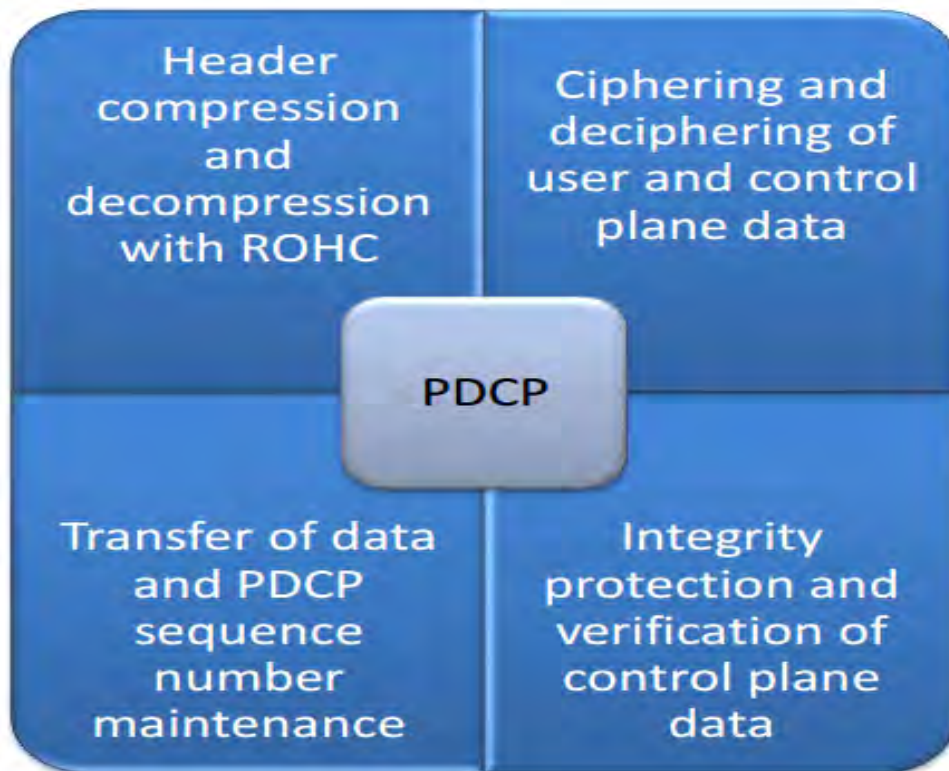
Η πρώτη κατάσταση λειτουργίας, η transparent mode είναι και η πιο απλή και παράλληλα με τις λιγότερες δυνατότητες, λειτουργία του επιπέδου RLC. Συγκεκριμένα, δεν υποστηρίζει την αποσυγκρότηση και ανασυγκρότηση πακέτων υπηρεσιών (SDUs) και δεν υπάρχει δυνατότητα εκσφαλμάτωσης και κατά συνέπεια διόρθωσης των τυχόντων σφαλμάτων, καθώς δε δύναται να ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός HARQ. Επομένως, δεν υπάρχει κάποια εγγύηση ορθής παράδοσης των δεδομένων και επιπλέον, στα πακέτα αυτής της κατάστασης λειτουργίας δεν προστίθεται κάποια επικεφαλίδα (header) επιπέδου, τα δεδομένα απλώς μεταδίδονται όπως είναι. Αυτή η λειτουργία είναι κατάλληλη για μεταφορά δεδομένων χαμηλών απαιτήσεων σε πόρους, όπως φωνητικά δεδομένα και συνήθως χρησιμοποιείται για μηνύματα ελέγχου (π.χ. κατά την αρχή της σύνδεσης για λίγα μηνύματα, μέχρι να εφαρμοστεί ο διάλογος επικοινωνίας).

Η δεύτερη κατάσταση λειτουργίας του επιπέδου RLC ονομάζεται unacknowledged mode και διαχωρίζεται από την τρίτη κατάσταση, κυρίως από το γεγονός ότι δε προσφέρει εγγύηση ασφαλούς παράδοσης των δεδομένων. Προσφέρει δυνατότητα δόμησης και αποδόμησης πακέτων υπηρεσιών και στα μηνύματα που δημιουργούνται κατά αυτή την κατάσταση λειτουργίας προστίθενται επικεφαλίδες του επιπέδου RLC. Για τη μετάδοση μηνυμάτων, τα δεδομένα (δηλαδή SDUs) που λαμβάνονται από το ανώτερο επίπεδο (PDCP ή RRC) προστίθενται σε μια ουρά προτεραιότητας (Buffer) προς εκπομπή. Μόλις το RLC ενημερωθεί από το κατώτερο επίπεδο του MAC ότι υπάρχει διαθέσιμο slot για αποστολή δεδομένων, κατακερματίζει τα SDUs σε πακέτα PDUs του RLC και προσθέτει μια κεφαλίδα σε κάθε πακέτο που δημιουργεί. Μόλις ολοκληρωθεί αυτή η διαδικασία, προωθεί τα δεδομένα (σε μορφή πακέτων) στο επίπεδο του MAC ώστε να γίνει η μετάδοσή τους. Αντίστροφα κατά τη λήψη πληροφορίας, το επίπεδο RLC δέχεται ληφθέντα δεδομένα από

το MAC. Μόλις ληφθεί ένα PDU, αφαιρείται η κεφαλίδα του (για το συγκεκριμένο επίπεδο) και σε περίπτωση που σε αυτό έχουν εμφωλευθεί δεδομένα που ολοκληρώνουν ένα SDU, αρχίζει η συγκρότηση των πακέτων υπηρεσιών από τα επιμέρους πακέτα μετάδοσης δεδομένων. Με το πέρας αυτής της διαδικασίας η πληροφορία προωθείται προς τα ανώτερα επίπεδα. Η μετάδοση δεδομένων με αυτό τον τρόπο λειτουργίας συντονίζεται με κάποιες μεταβλητές κατάστασης (VT(US), VR(UH) κλπ.) και συνήθως χρησιμοποιείται για δεδομένα ενδιάμεσων απαιτήσεων όπως πληροφορίες συμφόρησης των διαθέσιμων καναλιών μετάδοσης.

Η acknowledged mode συσιστά την τρίτη και τελευταία κατά σειρά κατάσταση λειτουργίας του επιπέδου RLC. Είναι η πιο ολοκληρωμένη μορφή του, η οποία χρησιμοποιείται για την μετάδοση των πιο απαιτητικών δεδομένων και σε αυτήν επιτελούνται όλες οι δυνατές διαδικασίες του RLC. Κύριο χαρακτηριστικό της είναι ότι σε αντίθεση με τις προαναφερθείσες δύο καταστάσεις του RLC, προσφέρει εγγύηση ασφαλούς μετάδοσης των δεδομένων. Κατά τη διενέργεια μετάδοσης ενός πακέτου SDU, μόλις αυτό ληφθεί από το ανώτερο επίπεδο, προστίθεται σε έναν buffer με πακέτα προς εκπομπή. Κατά αντιστοιχία με την unacknowledged mode, μόλις το κατώτερο επίπεδο του MAC διαφημίσει, ότι ο scheduler του διαθέτει ελεύθερη θέση για αποστολή, κατακερματίζει τα SDUs σε πακέτα PDUs για να γίνει η μετάδοσή τους στο φυσικό μέσο. Σε αυτό το σημείο όμως διαφοροποιείται με τις άλλες καταστάσεις λειτουργίας, καθώς κρατά και ένα τοπικό αντίγραφο του πακέτου σε περίπτωση που χρειαστεί αναμετάδοσή του. Μόλις ολοκληρωθεί αυτή η διαδικασία, προστίθεται σε κάθε πακέτο δεδομένων μια επικεφαλίδα RLC και αποστέλλονται στα κατώτερα επίπεδα για να ολοκληρωθεί η εκπομπή τους. Αντιστρόφως κατά την λήψη δεδομένων από κατώτερα επίπεδα, μόλις κάποιο πακέτο PDU ληφθεί από το MAC επίπεδο, αφαιρείται η επικεφαλίδα του. Αν έχουν ληφθεί ορθά τα δεδομένα του πακέτου αυτό μαρκάρεται ως επιτυχία και ένα μήνυμα ACK στέλνεται σε περιοδικό χρόνο για αυτό το πακέτο (και όποιο άλλο πακέτο λαμβάνεται ορθά). Αν ληφθεί ορθά το πακέτο, αυτό αφαιρείται από τη λίστα αναμετάδοσης και ενημερώνεται το σύστημα για να ελευθερώσει τον buffer και να αποθηκευθούν σε αυτόν άλλα πακέτα προς πιθανή αναμετάδοση. Σε περίπτωση που δε γίνει σωστή λήψη των δεδομένων, το αντίστοιχο πακέτο μαρκάρεται ως αποτυχία και ένα μήνυμα NACK αποστέλλεται σε περιοδικό χρόνο για αυτό το πακέτο (και όποιο άλλο πακέτο δε λαμβάνεται ορθά), ώστε ο scheduler να προγραμματίσει την αναμετάδοση του. Αν δε ληφθεί ορθά το πακέτο, αυτό αναμεταδίδεται από τη λίστα αναμετάδοσης και σε ενδεχόμενο που είναι δυνατή η αναμετάδοση του πακέτου με το αρχικό μέγεθός του, αυτό κατακερματίζεται εκ νέου σε μικρότερα τμήματα και προγραμματίζεται η αναμετάδοση τους ώστε να γίνει ορθά η αποδόμηση του αρχικού πακέτου SDU. Μόλις ληφθεί ένα PDU, που τα δεδομένα του ολοκληρώνουν ένα SDU, αρχίζει η συγκρότηση των πακέτων υπηρεσιών από τα επιμέρους πακέτα μετάδοσης. Εν τέλει με το πέρας αυτής της διαδικασίας, τα νεο-αναδομηθέντα SDUs μεταφέρονται προς τις αντίστοιχες υπηρεσίες των ανώτερων επιπέδων. Η μετάδοση δεδομένων με αυτό τον τρόπο λειτουργίας συντονίζεται με κάποιες μεταβλητές κατάστασης (VT(R), VR(H) κλπ.) και συνήθως χρησιμοποιείται για δεδομένα υψηλών απαιτήσεων όπως πακέτα TCP.

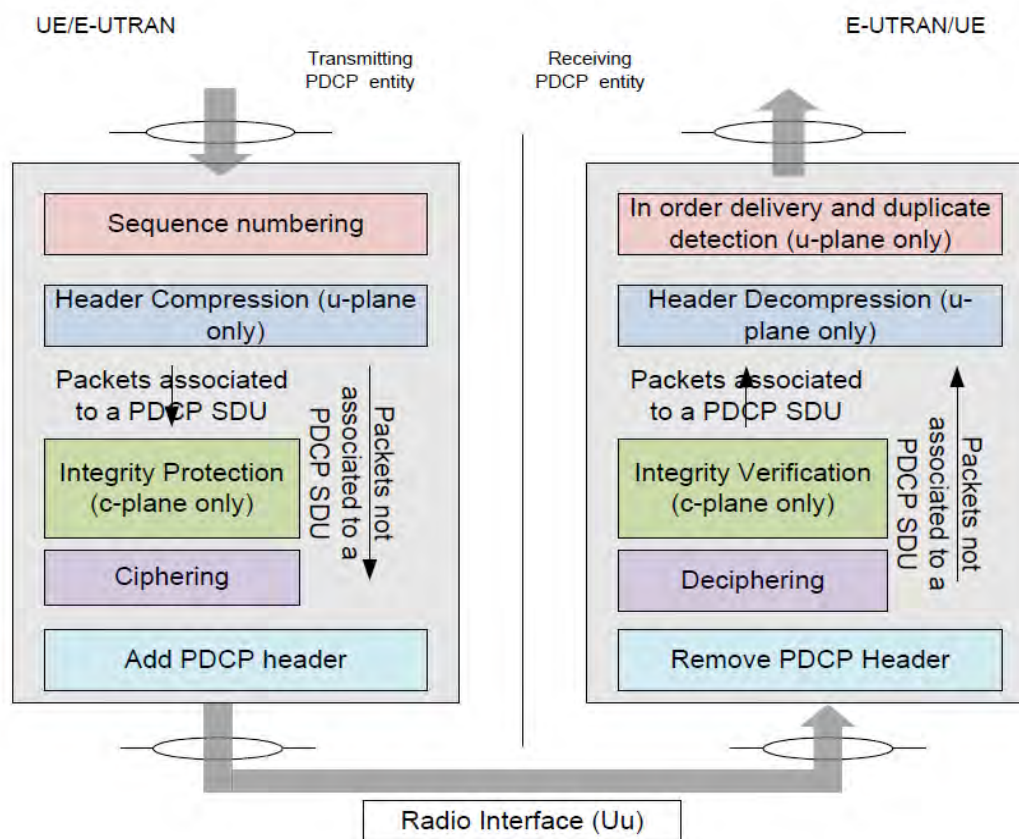
## 1.4 Επίπεδο PDCP



**Εικόνα 1.6:** Λειτουργίες του επιπέδου PDCP

Το υψηλότερο ιεραρχικά επίπεδο του μηχανισμού που χρησιμοποιεί το LTE για την μετάδοση δεδομένων είναι το επίπεδο Packet Data Convergence Protocol (PDCP) [23]. Το συγκεκριμένο επίπεδο εμφανίζεται και σε προηγούμενα πρωτόκολλα κινητής επικοινωνίας, όπως το GSM και προγενέστερες εκδόσεις του 3GPP. Ενώ σε αυτές τις πρώτες εφαρμογές του όμως επικοινωνούσε αποκλειστικά με τα κομμάτια που επιτελούσαν τη διαχείριση των πακέτων πληροφορίας, πλέον το PDCP μπορεί να συνεργάζεται και υπηρεσίες ανωτέρων επιπέδων. Είναι ένα κομβικό κομμάτι του πρωτοκόλλου, το οποίο επιτελεί αρκετές λειτουργίες και σε επίπεδο χρήστη/δεδομένων (user plane), αλλά και σε επίπεδο ελέγχου σημάτων (control plane). Το PDCP είναι υπεύθυνο για τη συμπίεση και αποσυμπίεση των επικεφαλίδων (διαδικασία ROHC – Robust Header Compression) και τη διατήρηση αριθμών πρωτεριότητας (SN – sequence number) PDCP. Επίσης, αφαιρεί τα διπλότυπα των SDUs κατά τη διαδικασία της συγκρότησης που γίνεται σε χαμηλότερα επίπεδα και μεταφέρει με τάξη τα PDUs των ανωτέρων επιπέδων στα κατώτερα, όπου διενεργείται η αναδόμηση τους. Επιπλέον, σε αυτό γίνεται η κρυπτογράφηση και αποκρυπτογράφηση των δεδομένων πληροφορίας, αλλά και ελέγχου σημάτων και είναι υπεύθυνο για τη σωστή παράδοση των μηνυμάτων και επιβεβαίωση σωστής λήψης, ελέγχοντας ποια πακέτα δε λήφθηκαν ορθά και προγραμματίζοντας έτσι τις αναμεταδόσεις πακέτων. Τέλος, στο επίπεδο PDCP γίνεται η

απόρριψη πακέτων, των οποίων έχει λήξει η χρονική υπογραφή/όριο καθώς και η απόρριψη διπλότυπων μηνυμάτων (ανωτέρου επιπέδου).



**Εικόνα 1.7:** Σχηματική απεικόνιση του πρωτοκόλλου PDCP

Μια από τις σημαντικότερες λειτουργίες του PDCP είναι η συμπίεση και αποσυμπίεση επικεφαλίδων στα πακέτα δεδομένων, κάτι που είναι ιδιαίτερα απαραίτητο για την επικοινωνία διαδικτύου βάσει πρωτοκόλλου Voice Over Internet Protocol (VoIP), μία κρίσιμη λειτουργία του LTE και συναντάται μόνο για το user plane. Συγκεκριμένα στο πρωτόκολλο LTE, όλα τα φωνητικά δεδομένα/σήματα χρειάζεται να μπορούν να μεταδίδονται πάνω από το διαδίκτυο, οπότε προκύπτει ως ζητούμενο η μεγιστοποίηση στην αποδοτικότητα αυτής της λειτουργίας. Για τον συγκεκριμένο σκοπό έχουν προταθεί ανά τους καιρούς αρκετά standards, τα οποία επιτελούν τη λεγόμενη αποδοτική συμπίεση επικεφαλίδας, ROHC (Robust Header Compression). Κατ'αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται υψηλή εξοικονόμηση στον όγκο δεδομένων που χρειάζεται να εκπεμφθεί και μεγιστοποιείται η αποδοτικότητα μεταφοράς πληροφορίας over IP. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η συντριπτική πλειοψηφία αυτών των πρωτοκόλλων έχει σχεδιαστεί να λειτουργούν, λαμβάνοντας υπόψη απώλειες πακέτων δεδομένων, ένα φαινόμενο ιδιαίτερα σύνηθες στην ασύρματη τηλεπικοινωνία. Το ROHC διακρίνεται σε τρία είδη λειτουργίας, το μη κατευθυντικό ROHC, το δικατευθυντικό αισιόδοξο ROHC και το δικατευθυντικό αξιόπιστο ROHC. Στον πρώτο τρόπο λειτουργίας, ακολουθείται μόνο μία κατεύθυνση για τα πακέτα δεδομένων, από τον συμπιεστή προς τον αποσυμπιεστή επικεφαλίδων. Όπως γίνεται κατανοητό αυτός ο τρόπος λειτουργίας εφαρμόζεται όταν δεν υπάρχει διαθέσιμο το

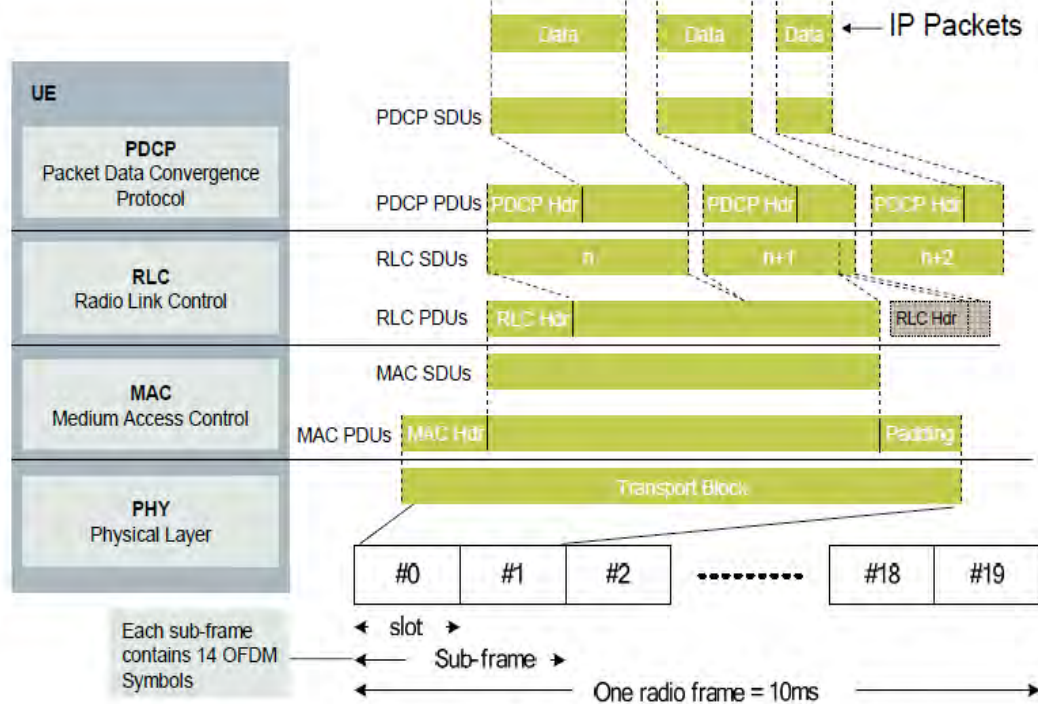
αντίστροφο μονοπάτι (από αποσυμπιεστή προς συμπιεστή). Στο δεύτερο είδος ROHC (bidirectional optimistic ROHC), λειτουργεί παρόμοια με το πρώτο, μόνο που εδώ υπάρχει και η διαδρομή επιστροφής από τον αποσυμπιεστή στον συμπιεστή, η οποία χρησιμοποιείται για την αποστολή μηνυμάτων λάθους (και ζήτηση προς αποστολή των πακέτων εκ νέου) και μερικές φορές για την αποστολή μηνυμάτων ACK για σημαντικά πακέτα πληροφορίας. Η αισιόδοξη κατάσταση λειτουργίας αποσκοπεί στην πλέον αποδοτική συμπίεση εν παραλλήλω με την ελαχιστοποίηση χρήσης του καναλιού επιστροφής (εξ ου και η ονομασία «αισιόδοξο»). Ο τελευταίος τρόπος λειτουργίας, το δικατευθυντικό αξιόπιστο ROHC, ακολουθεί την ίδια δομή λειτουργίας με το αισιόδοξο, αλλά διαφοροποιείται στον τρόπο χρήσης του μονοπατιού ανατροφοδότησης από την αποσυμπίεση προς την συμπίεση. Συγκεκριμένα, εντατικοποιείται η χρήση της feedback διαδρομής και εφαρμόζεται μια αυστηρότερη λογική πολιτική στις διαδικασίες συμπίεσης και αποσυμπίεσης. Χάρη σε αυτά αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση των λαθών (π.χ. λόγω λανθασμένου συγχρονισμού μεταξύ συμπιεστή και αποσυμπιεστή) και για τον λόγο αυτόν, ονομάζεται «αξιόπιστος» τρόπος λειτουργίας και χρησιμοποιείται στη διαχείριση σημαντικών δεδομένων. Η λειτουργία ROHC, περιγράφεται αναλυτικά στα πρότυπα IETF RFC 3095, RFC 4815 και RFC 3843.

Ο συμπιεστής έχει μια σχετικά απλή διαδικασία λειτουργίας που περιλαμβάνει τον έλεγχο των τμημάτων της επικεφαλίδας και την επιλογή της ενέργειας που πρέπει να υλοποιήσει για αυτά. Πιο συγκεκριμένα, με την έναρξη της λειτουργίας του, αρχικοποιούνται τα δεδομένα του και αναμένεται η αποστολή των επικεφαλίδων που προορίζονται για συγκεκριμένα πακέτα δεδομένων. Μόλις ληφθεί μια κεφαλίδα, αρχίζει η επεξεργασία της, όπου γίνεται ο εντοπισμός των σταθερών τμημάτων της, όπως θύρα λειτουργίας (port) και διεύθυνση IP και η αποθήκευσή των για να αποφεύγονται οι επαναλήψεις αυτής της διαδικασίας (δεδομένου ότι αυτά τα στοιχεία δε μεταβάλλονται κατά την αποστολή των επιμέρους τμημάτων). Στη συνέχεια εντοπίζονται τα δυναμικά πεδία της επικεφαλίδας και αφού αποσταλούν όσες διαφοροποιήσεις βρεθούν σε αυτά τα πεδία, συμπιέζονται όλα τα σταθερά τμήματα της επικεφαλίδας και τα περισσότερα δυναμικά. Στην τελική φάση λειτουργίας του ο συμπιεστής, συμπιέζει όλα τα μεταβαλλόμενα πεδία (π.χ. sequence numbers) και στέλνει έναν αριθμό προτεραιότητας (logical sequence number) και ένα μερικό άθροισμα εξακρίβωσης (checksum). Μόλις ο αποσυμπιεστής του άλλου άκρου λάβει ένα πακέτο, αποσυμπιέζει τις συμπιεσμένες επικεφαλίδες και ελέγχει αν λήφθηκαν ορθά. Αν όλα έχουν αποσταλεί σωστά, αρχίζει με αντίστροφη πλέον σειρά η διαδικασία αποσυμπίεσης δεδομένων.

Ακόμα μία εξαιρετικά σημαντική λειτουργία που επιτελείται στο επίπεδο του PDCP είναι η κωδικοποίηση (και αποκωδικοποίηση) της πληροφορίας. Η κωδικοποίηση των δεδομένων είναι κρίσιμη για την ορθή λειτουργία του πρωτοκόλλου επικοινωνίας, γιατί με αυτόν τον τρόπο προστατεύονται τα δεδομένα επικοινωνίας του χρήστη, αλλά και μηνύματα ελέγχου του LTE για τον σωστό χρονισμό των δύο άκρων επικοινωνίας και των συντονισμό των επιμέρους επιπέδων/διεργασιών. Η κωδικοποίηση της πληροφορίας γίνεται πριν εφαρμοστούν οι τεχνικές συρρίκνωσης επικεφαλίδας ROHC, καθώς αυτές μπορούν να εφαρμοστούν μόνο σε μη κρυπτογραφημένα δεδομένα. Κατά την κωδικοποίηση των μνημάτων, όταν λαμβάνονται δεδομένα πρώτα αποκωδικοποιούνται και στη συνέχεια αποσυμπιέζονται, ενώ αντιστρόφως κατά το ανέβασμα δεδομένων (uplink) πρώτα συμπιέζονται και στη συνέχεια κωδικοποιούνται, ώστε να αποσταλούν. Τα επιμέρους χαρακτηριστικά για την ευρύτερη προστασία δεδομένων στο πρωτόκολλο επικοινωνίας LTE δεν έχουν διασαφηνιστεί ακόμη πλήρως. Εντούτοις, οι δύο επικρατέστερες προτάσεις θωράκισης της πληροφορίας αυτή τη στιγμή είναι η χρήση του AES (Advanced Encryption Standard) ή SNOW αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται και στο

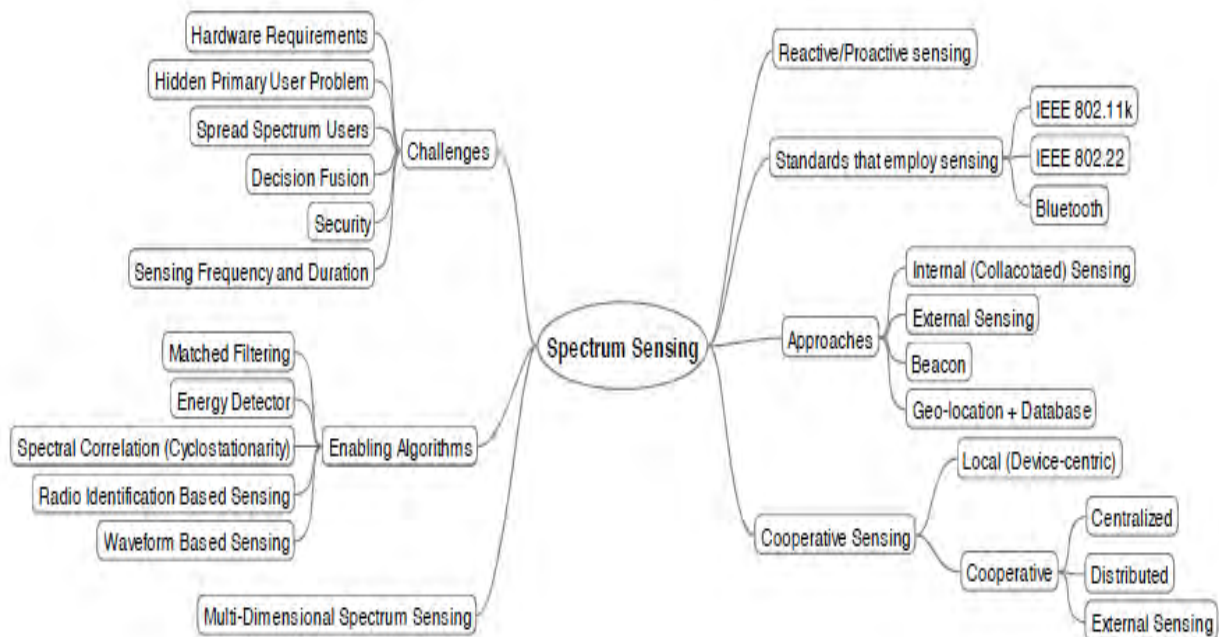


πρωτόκολλο 3G. Ο επίσημος φορέας που είναι υπεύθυνος για την ασφάλεια δεδομένων στο LTE, ονομάζεται 3GPP System Architecture Working Group 3 (SA3).



**Εικόνα 1.8:** Ολική λειτουργία του μηχανισμού LTE

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟΔΕΥΤΕΡΟ:** **Spectrum Sensing (Cognitive Radio)**



**Εικόνα 2.1:** Τα βασικά σημεία του Spectrum Sensing [28]

Το διαθέσιμο εύρος συχνοτήτων είναι ένα περατό μέγεθος, το οποίο μάλιστα φιλοξενεί συνεχώς αυξανόμενα μεγέθη μεταδιδόμενης πληροφορίας. Αν και έχει γίνει κατανομή των συχνοτήτων βάσει νομοθεσιών, ώστε να οριοθετηθεί η χρήση τους και να γίνει μια πιο αποδοτική και οργανωμένη χρήση του φάσματος, προκύπτουν αδιάλειπτα καινούριες τεχνολογίες επικοινωνίας (και όχι μόνο), οι οποίες διεκδικούν ένα δικό τους κομμάτι συχνοτήτων. Για τον λόγο αυτό μερικές μπάντες (2,4 GHz, 5 GHz κλπ.) δεν είναι εξουσιοδοτημένες σε συγκεκριμένους φορείς υπηρεσιών, αλλά είναι ελεύθερες για χρήση από πληθώρα τεχνολογιών, με την πιο γνωστή να είναι τα τοπικά δίκτυα WiFi. Και αυτές οι συχνότητες βέβαια διέπονται από τους κανονισμούς τους (π.χ. όλες οι συσκευές πρέπει να ανιχνεύουν αν υπάρχει εκπομπή από άλλο φορέα, πριν χρησιμοποιήσουν το κανάλι για εκπομπή), με τους οποίους πρέπει να συμμορφώνονται όλα τα πρωτόκολλα που τις χρησιμοποιούν.



αποτελεσματικότητα. Υπάρχει, με άλλα λόγια, καλύτερη εμπειρία χρήσης και για τον λόγο αυτό περισσότερες συσκευές ενστερνίζονται αυτή την τεχνολογία.

Η δυνατότητα του cognitive radio να μεταπηδά σε συχνότητες με μικρό ίχνος σημάτων, το βοηθά να ελαχιστοποιεί τις αλληλοπαρεμβολές. Για τον λόγο αυτό σε αυτή τη διατριβή θεωρείται ότι LTE-U θα μπορούσε επωφεληθεί τα μέγιστα από την υιοθέτηση του cognitive radio, εφόσον το κυριότερο θέμα που έχει να αντιμετωπίσει, είναι η δημιουργία όσο το δυνατόν μικρότερης παρεμβολής στα δίκτυα WiFi. Εντούτοις, το απαιτητικότερο, ίσως, κομμάτι του και παράλληλα μακράν το σημαντικότερο για να λειτουργήσει σωστά το cognitive radio, είναι ο τρόπος με τον οποίο θα υλοποιηθεί το spectrum sensing.

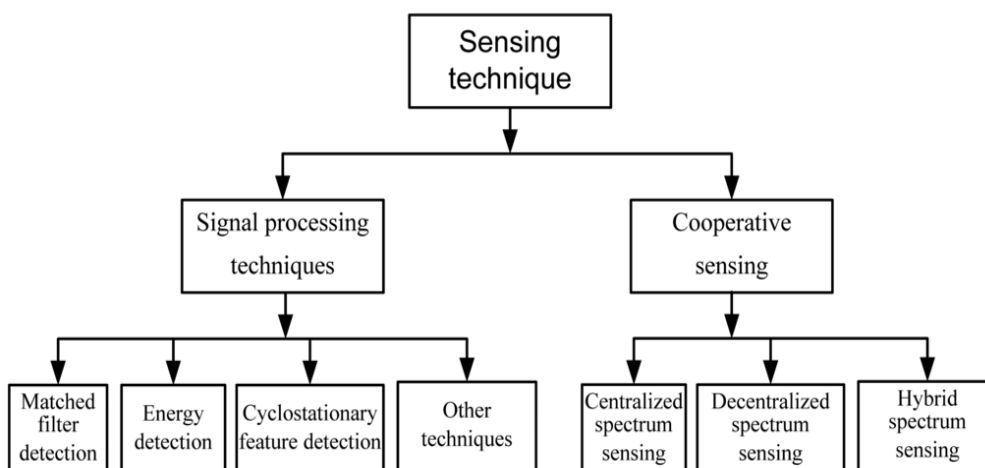


**Εικόνα 2.3:** *USRP B210*

Οι βασικές αρχές που διέπουν την θεωρία του spectrum sensing είναι τρεις. Αρχικά χρειάζεται η ανίχνευση ίχνους άλλων εκπομπών να διεξάγεται συνεχώς (με περιοδικό τρόπο). Αυτό είναι απαραίτητο, διότι ανά πάσα στιγμή μπορεί να προκύψει ένας νέος πομπός, ή αντίστοιχα να βρεθεί ένα ευνοϊκότερο κανάλι, λόγω της παύσης μιας εκπομπής. Επιπλέον επειδή το cognitive radio ως επί το πλείστο χρησιμοποιείται από χρήστες για συχνότητες όπου δεν έχουν εξουσιοδότηση (secondary users), είναι απαραίτητη η δυνατότητά του, ανά πάσα στιγμή να ανιχνεύει την ύπαρξη ενός εξουσιοδοτημένου χρήστη (primary user). Το δεύτερο βασικό σημείο του είναι ότι χρειάζεται να ανιχνεύει συνεχώς για ευκαιρίες σε άλλες συχνότητες. Έτσι, μόλις στο χρησιμοποιούμενο κανάλι εμφανιστεί ένας εξουσιοδοτημένος/κύριος χρήστης, να μπορεί να ανακατευθύνει την επικοινωνία σε άλλο

εύρος συχνοτήτων. Τέλος, βασικό σημείο του spectrum sensing είναι και η δυνατότητα προσδιορισμού του ανιχνευθέντος σήματος. Είναι σημαντικό να μπορεί το σύστημα cognitive radio να διαχωρίσει τα σήματα των κύριων χρηστών, από αυτά των δευτερευόντων (μη εξουσιοδοτημένων) και τον θόρυβο. Στην πρώτη περίπτωση, θα πρέπει να γίνει αναζήτηση εναλλακτικού καναλιού επικοινωνίας, ενώ στις άλλες δύο δεν επιβάλλεται η αλλαγή καναλιού και επομένως μπορεί να αγνοηθεί η ύπαρξή τους, στην περίπτωση που δεν υπάρχει ευνοϊκότερο κανάλι.

Υπάρχουν αρκετές μεταβλητές που πρέπει να διαμορφωθούν, προκειμένου να μπορέσει ένας μηχανισμός spectrumsensing να λειτουργήσει ορθά και σύμφωνα με τις ποιοτικές απαιτήσεις των σύγχρονων εφαρμογών [6]. Αυτή η παραμετροποίηση είναι απαραίτητη, ώστε να εξασφαλιστεί η υψηλή απόδοση του cognitiveradio, χωρίς αυτό να παρεμβάλλεται σε άλλους χρήστες. Μία βασική παράμετρος (και η πιο προφανής) που επιβάλλεται να ρυθμιστεί, είναι το εύρος ζώνης φασματογραφίας. Αυτή εξαρτάται από τον αριθμό των διαθέσιμων καναλιών προς εξέταση (μαζί με αυτό που χρησιμοποιείται ήδη) που υπάρχουν στη συγκεκριμένη μπάντα συχνοτήτων. Επιπλέον στην ίδια παραμετροποίηση πρέπει να οριστεί και το παράθυρο συχνοτήτων που θα ελεγχθεί. Πρέπει να επιτευχθεί η καταλληλότερη αντιστάθμιση σε αυτό το σημείο, καθώς η επιλογή ενός μικρού εύρους θα αυξήσει την ευαισθησία της ανίχνευσης (επειδή μειώνεται το σχετικό υπόβαθρο θορύβου – noise floor), ωστόσο παράλληλα επιβάλλεται να είναι και αρκετά μεγάλο, ώστε να επαρκεί για την ορθή ανίχνευση των έτερων μεταδόσεων. Ακόμη μια παραμετροποίηση που χρειάζεται είναι ο προσδιορισμός του ανιχνευθέντος σήματος. Ο μηχανισμός spectrum sensing θα πρέπει να είναι σε θέση να διακρίνει τα σήματα στο κανάλι ανίχνευσης. Να μπορεί δηλαδή να διαχωρίσει την εκπομπή ενός πρωτεύοντος χρήστη, από αυτή ενός μη εξουσιοδοτημένου, θορύβου ή και άλλου είδους σημάτων όπως περιοδικές εκπομπές χρονοισμού. Επίσης πρέπει να προσδιοριστεί η ακρίβεια ανίχνευσης, διότι το σύστημα που διενεργεί το spectrum sensing χρειάζεται να μπορεί να εντοπίσει παρεμβολές σημάτων με ακρίβεια και να περιορίζονται οι ψευδείς συναγερμοί (false alarm). Η τελευταία κύρια παράμετρος προς διαμόρφωση σε ένα σύστημα φασματογραφίας είναι η περιοδικότητά του. Με άλλα λόγια επιβάλλεται σε συνεργασία με τον κύριο μηχανισμό εκπομπής να ρυθμίζονται τα timeslots, στα οποία θα εκτελείται το spectrum sensing, ώστε να συνυπάρχουν αυτές οι δύο λειτουργίες αρμονικά.



**Εικόνα 2.4:** *Τεχνικές spectrum sensing*

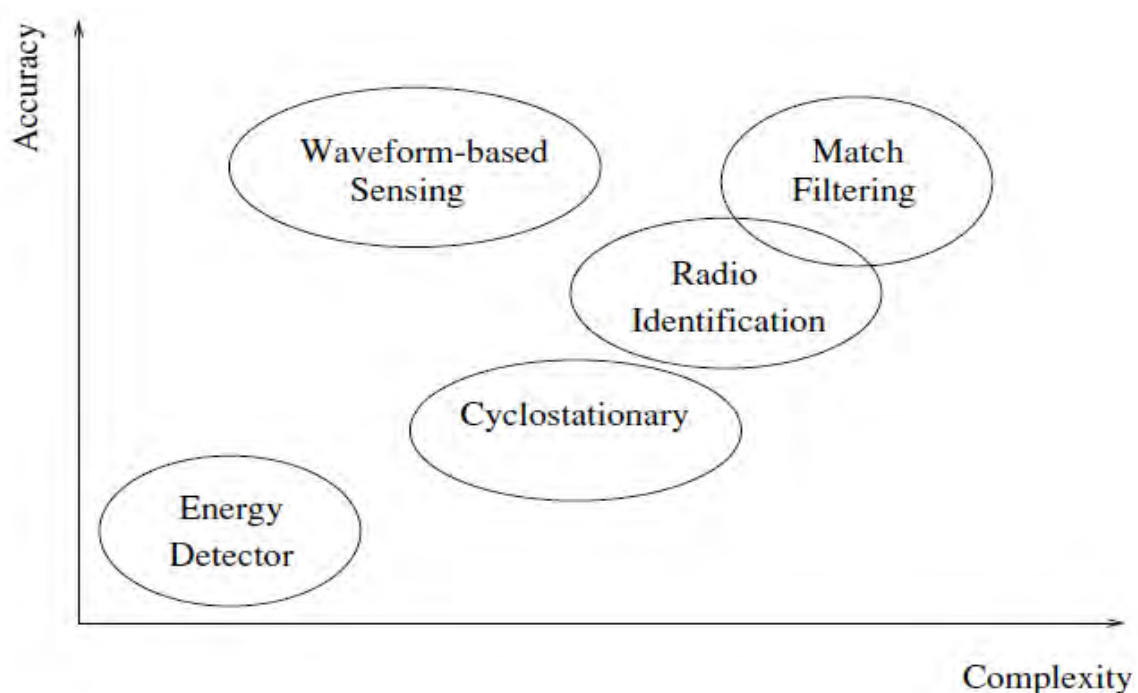
Οι κυριότεροι μηχανισμοί με τους οποίους διεξάγεται το spectrum sensing στο cognitive radio, όπως απεικονίζονται και στην Εικόνα 2.4, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο ευρύτερες ομάδες [28]. Στις τεχνικές οι οποίες επεξεργάζονται μεμονομένα το σήμα που ανιχνεύουν και σε αυτές που πολλά συστήματα τα οποία επιτελούν spectrum sensing, στο τέλος της φάσης ανίχνευσης μοιράζονται μεταξύ τους τα αποτελέσματα της φασματογραφίας, αποκτώντας έτσι μια πιο σίγουρη και ολοκληρωμένη εικόνα για το φάσμα. Μολονότι μέχρι πρόσφατα η πρώτη κατηγορία ήταν η πιο διαδεδομένη λόγω της ανεξάρτητης (stand-alone) φύσης της, με τη σύγχρονη διάδοση της ενσωμάτωσης τεχνολογιών spectrum sensing σε πληθώρα συσκευών, έχει αναπτυχθεί ιδιαίτερα και η συνεργατική φασματογραφία.

Όσον αφορά τις τεχνικές spectrum sensing οι βασικές είναι τρεις, όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 2.4, δεδομένου ότι η συνεργατική φασματογραφία δεν ορίζει καινούριες τεχνικές αλλά χρησιμοποιεί τις ήδη υπάρχουσες σε διαφορετικά μηχανήματα και αναλύει τα αποτελέσματά τους συγκεντρωτικά. Η πρώτη τεχνική ονομάζεται matched filter detection και είναι ταυτόχρονα η πιο ακριβής, αλλά και η πιο περιορισμένη. Χρησιμοποιεί προσχεδιασμένα φίλτρα σηματικού ίχνους. Έτσι, αν κατά το spectrum sensing εντοπιστεί κάποια κυματομορφή που να ταιριάζει στο φίλτρο, τότε όχι μόνο ανιχνεύθηκε παρεμβολή με τρόπο αρκετά σίγουρο, αλλά μπορεί το μηχάνημα να αναγνωρίσει και τον τύπο του σήματος. Έχει περιορισμένη εφαρμογή, διότι προϋποθέτει την εκ των προτέρων γνώση των σημάτων προς αναζήτηση (ώστε να σχεδιαστούν κατάλληλα τα αντίστοιχα φίλτρα), κάτι που δεν είναι πάντοτε εφικτό. Για την υλοποίηση της συγκεκριμένης μεθόδου δεν υπάρχουν σημαντικές απαιτήσεις σε υπολογιστή ισχύ, καθώς η σύγκριση ταιριάσματος φίλτρων είναι μια σχετικά απλή διαδικασία.

Η επόμενη μέθοδος εντοπισμού σημάτων ονομάζεται energy detection και ασχολείται με το ενεργειακό υπόβαθρο του καναλιού. Συγκεκριμένα, ελέγχει τα ενεργειακά αποτυπώματα στο εύρος των συχνοτήτων που εξετάζει και προσπαθεί να εντοπίσει σήματα διαχωρίζοντας το ενεργειακό τους αντίκτυπο από αυτό του θορύβου. Έτσι όταν εντοπιστεί μια μεγάλη διαφορά από τη συνήθη στάθμη ενέργειας του καναλιού (η οποία αποδίδεται σε θόρυβο), το μηχάνημα αναγνωρίζει την ύπαρξη ενός σήματος. Αυτή η τεχνική δε μπορεί

να διαχωρίσει το είδος του σήματος, ωστόσο μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα ενδεχόμενα spectrum sensing καθώς δεν απαιτεί, για την ορθή λειτουργία της, πρότερη γνώση των σημάτων που αναζητά. Ο εντοπισμός σημάτων εξετάζοντας το ενεργειακό τους ίχνος δεν είναι πάντοτε ακριβής, γιατί για να υπάρξει απόλυτη εμπιστοσύνη στα ευρήματα, απαιτείται το σήμα εκπομπής να λαμβάνεται σχετικά καθαρά. Επομένως, αν υπάρχει σήμα εκπομπής, αλλά είναι σχετικά εξασθενημένο ή η ενεργειακή του στάθμη είναι κοντά σε αυτή του θορύβου, αυτή η τεχνική φασματογραφίας, υπάρχει περίπτωση να το παραβλέψει. Επιπλέον μπορεί να οδηγήσει σε ψευδείς συναγερμούς όταν υπάρχουν ξαφνικές εξάρσεις θορύβου και τις εκλαμβάνει λανθασμένα ως εκπεμπόμενα σήματα. Στον αντίποδα όμως, αυτή η τεχνική είναι αρκετά γρήγορη και έχει πολύ μικρές απαιτήσεις υπολογιστικής ισχύος.

Η τελευταία κύρια τεχνική ονομάζεται cyclostationary feature detection και η λειτουργία της στηρίζεται στη στοιχειώδη περιοδικότητα που είναι εμφωλευμένη σε κάθε σήμα (δεδομένου ότι μόνο ο θόρυβος είναι άναρχο σήμα). Μέσα από την αυτοσυσχέτιση όλων των ληφθέντων σημάτων εμφανίζεται η περιοδικότητα στα στίγματά τους στο φάσμα. Σε περίπτωση που κάποιο στίγμα εμφανίζει περιοδικότητα, έχει εντοπιστεί κάποιο σήμα, αν όμως ακολουθούν άναρχη κατανομή πρόκειται απλά για θόρυβο. Για την εκτέλεση αυτής της τεχνικής δεν απαιτείται πρότερη γνώση των σημάτων προς αναζήτηση, εντούτοις μια τέτοια γνώση σίγουρα θα βοηθούσε πολύ και θα οδηγούσε σχεδόν σε εντελώς ακριβή ανίχνευση. Αυτή η μέθοδος χαρακτηρίζεται από αρκετή ακρίβεια, ωστόσο λόγω της μαθηματικής πολυπλοκότητας που εμφανίζει η πράξη της αυτοσυσχέτισης, είναι και αρκετά αργή υπολογιστικά. Κατά συνέπεια, για την εφαρμογή της έχει υψηλές απαιτήσεις υλικού και συνήθως τα μηχανήματα spectrum sensing που υλοποιούν αυτή την τεχνική είναι πιο ακριβά από τα υπόλοιπα.



**Εικόνα 2.5:** Σύγκριση τεχνικών spectrum sensing [28]

Στην όλη διαδικασία του spectrum sensing υπάρχουν βέβαια και αρκετά εμπόδια που πρέπει να υπερβεί [6]. Από άποψη υλικού (spectrum sensing hardware) απαιτείται υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας, ψηφιοποιητές (Analog-to-Digital Converters / ADC) υψηλής ευκρίνειας και υπολογιστικές διατάξεις με μεγάλη ταχύτητα υπολογισμών, όπως DSPs και FPGAs. Ακόμη ένα πρόβλημα που εμφανίζεται σε τέτοιες υλοποιήσεις είναι το λεγόμενο πρόβλημα του κρυμμένου πρωτεύοντος χρήστη. Συγκεκριμένα, λόγω διασποράς σήματος, ή απλά αποτυχίας ανίχνευσης του εξουσιοδοτημένου χρήστη, μπορεί αυτός να μην εντοπιστεί και κατά συνέπεια να υπάρξει ανεπιθύμητη παρεμβολή από τη συσκευή cognitive radio σε αυτόν. Μια επέκταση αυτού του θέματος είναι και η ανίχνευση εξουσιοδοτημένων χρηστών που λειτουργούν με μεταπήδηση συχνοτήτων (spread spectrum signaling / frequency hopping), όπως οι δορυφόροι. Αυτοί οι χρήστες είναι δύσκολοι στην ανίχνευση, καθώς το σύνολο του ενεργειακού τους ίχνους είναι διεσπαρμένο σε σχετικά διευρυμένο παράθυρο συχνοτήτων. Μία μερική λύση σε αυτό το ζήτημα είναι η γνώση του μοτίβου αλλαγής συχνοτήτων, ώστε να συντονιστούν και κατάλληλα οι ανιχνευτές του φάσματος. Επιπλέον, οι εξουσιοδοτημένοι χρήστες επιβάλλεται να έχουν διάθεση του εύρους τους ανά πάσα στιγμή, κάτι που προκαλεί προβλήματα στη διενέργεια του spectrumsensing, αν τη στιγμή εκείνη θέλει να εκπέμψει ένας κύριος χρήστης. Σε συστήματα με συνεργατική φασματογραφία χρειάζεται να ενστερνιστεί μία μέθοδος ασφαλούς ερμηνείας των επιμέρους αποτελεσμάτων. Ειδικά σε περιπτώσεις όπου για τις κοινές συχνότητες υπάρχει κάποιο είδος διαφωνίας. Τέλος, υπάρχουν και θέματα κακόβουλου λογισμικού. Συγκεκριμένα, υπάρχει ένα σενάριο γνωστό ως PUE (Primary User Emulation attack), στο οποίο ένας μη εξουσιοδοτημένος χρήστης τροποποιεί το στίγμα του έτσι να μοιάζει με και να εκλαμβάνεται ως ένα σήμα εκπομπής από πρωτεύων χρήστη. Επέκταση αυτού του προβλήματος αποτελεί και η επιλογή της σωστής ενέργειας, σε περίπτωση που ανιχνευθεί μια τέτοια κατάσταση. Ένας προτεινόμενος τρόπος αντιμετώπισης αυτής της κατάστασης, είναι οι εξουσιοδοτημένοι χρήστες να διαφημίζουν την ψηφιακή υπογραφή τους με τη βοήθεια ενός συστήματος δημοσίου κλειδιού, ώστε οι δευτερεύοντες χρήστες να μπορούν να εξακριβώνουν ότι πρόκειται για αδειοδοτημένη εκπομπή. Βέβαια αυτό μπορεί να γίνει μόνο για ψηφιακά σήματα και για να τεθεί σε εφαρμογή αυτή η λύση θα πρέπει οι δευτερεύοντες χρήστες να μπορούν να συγχρονιστούν με τις εκπομπές των εξουσιοδοτημένων και να τις αποκωδικοποιούν.

Ένα τελευταίο θέμα στον σχεδιασμό ενός συστήματος cognitive radio είναι ότι χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή, προκειμένου να λειτουργεί σταθερά. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου όταν αυξάνεται σε όλα τα κανάλια η περιεκτικότητα σε σήματα, οι μηχανισμοί cognitiveradio καταρρέουν, αλλάζοντας συνεχώς κανάλι εκπομπής και καθιστώντας κατ'αυτόν τον τρόπο καθόλου αποτελεσματική ή (στο χειρότερο σενάριο) αδύνατη την επικοινωνία μεταξύ των δύο άκρων. Αυτοί οι ατέρμονες βρόγχοι εμφανίζονται σχετικά σπάνια, αλλά εν πάσι περιπτώσι χρειάζεται ιδιαίτερη μέριμνα στον σχεδιασμό του cognitiveradio, ώστε να τους αντιμετωπίζει με τον κατάλληλο τρόπο και να μην οδηγεί σε κατάρρευση του γενικότερου συστήματος επικοινωνίας. Επιπλέον, πολλές τεχνολογικά προηγμένες τεχνικές τηλεπικοινωνίας (όπως και το ίδιο το cognitiveradio κατά τη φάση ανίχνευσης συχνοτήτων) μπορεί να οδηγούν σε ευέλικτα ως προς τις συχνότητες σήματα,

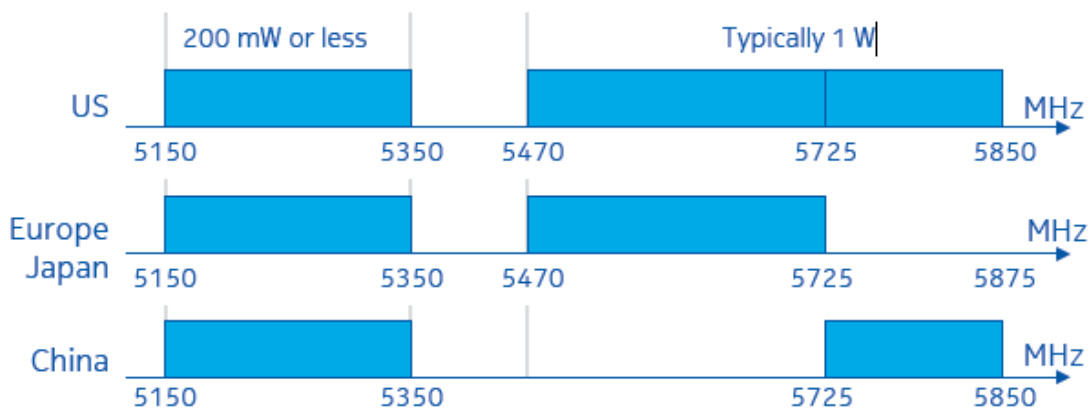


με απότοκο να εμφανίζονται στιγμιαία ίχνη. Πρέπει λοιπόν ο μηχανισμός σε αυτές τις περιπτώσεις να μη οδηγείται σε false detection και αλλάζει τελικά σε ένα λιγότερο ευνοϊκό κανάλι εκπομπής.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ:** **LTE Unlicensed (LTE - U)**

### **3.1 LTE σε μη αδειοδοτημένες συχνότητες (LTE Unlicensed)**

Το LTE unlicensed είναι μια ρηξικέλευθη ιδέα, η οποία είχε προταθεί και αναπτυχθεί αρχικά από την εταιρία Qualcomm, η οποία ουσιαστικά αφορά την χρήση του 4G LTE πρωτοκόλλου σε μη εξουσιοδοτημένες μπάντες συχνοτήτων. Πιο συγκεκριμένα, μια πιθανή ζώνη εφαρμογής είναι η ελεύθερη μπάντα των 5GHz, όπου λειτουργούν τα δίκτυα WiFi και θα μπορούσε να αποτελέσει μια εναλλακτική για τα WiFi hotspots που προσφέρονται από τις εταιρίες-παρόχους κινητής τηλεφωνίας. Η τεχνολογία LTE in Unlicensed Spectrum (LTE-U) θα επιτρέπει στους χρήστες κινητών συσκευών να επιτυγχάνουν μεγαλύτερες ταχύτητες ροής δεδομένων, εκμεταλλευόμενοι τις ελεύθερες συχνότητες που χρησιμοποιούν και οι συσκευές WiFi. Έχουν γίνει μάλιστα και ορισμένες προβλέψεις από εταιρίες κινητής τηλεφωνίας για την εφαρμογή πλήρως λειτουργικών δικτύων με LTE-U μέσα στο 2016. Η κεντρική ιδέα πίσω από την εφαρμογή μιας τέτοιας μείξης διαφορετικών πρωτοκόλλων είναι να χρησιμοποιούνται οι ελεύθερες συχνότητες (2,4 GHz, 5GHz κλπ.) για τον μεγάλο όγκο των δεδομένων και οι εξουσιοδοτημένες συχνότητες του LTE Advanced για την ανταλλαγή μηνυμάτων χρονισμού και ελέγχου. Το 2014 δημιουργήθηκε το LTE-U φόρουμ, όπου συμμετέχουν αρκετές σημαντικές εταιρίες παραγωγής κινητών συσκευών και ασχολείται κυρίως με τη θεσμοθέτηση αυτής της καινούριας τεχνολογίας, αλλά και με την αντιμετώπιση προβλημάτων που μπορεί να προκύψουν από τη συνύπαρξη πολλών συσκευών (LTE-U και WiFi συσκευές) σε αυτές τις κοινές συχνότητες [1].



**Εικόνα 3.1:** Διαθέσιμες ελεύθερες συχνότητες στην μπάντα των 5 GHz [27]

Ήδη τα δίκτυα LTE μεταφέρουν πολύ μεγάλους όγκους δεδομένων, δεδομένου ότι οι συνδρομητές που χρησιμοποιούν αυτή την τεχνολογία είναι πολλοί και ο αριθμός τους αυξάνεται σε μόνιμη βάση (300 εκατομμύρια μέχρι τα μέσα του 2014). Οι ταχύτητες που επιτυγχάνονται πλέον με το αναβαθμισμένο πρωτόκολλο LTE Advanced είναι της τάξης των 300 Mbps, αλλά στην έκδοση 3GPP Release 13, προτάθηκε μια καινοτόμος ιδέα, η οποία είναι γνωστή με την ονομασία LAA (License Assisted Access), η οποία θα επιτρέπει στους χρήστες της να συνδέονται και να επωφελούνται και από τις συχνότητες των WiFi δικτύων [20]. Με αυτό τον τρόπο θα βελτιώνεται σημαντικά το bitrate που επιτυγχάνεται από τους χρήστες. Εντούτοις, παράλληλα με την ιδέα αυτή έχουν προκύψει διαφωνίες που θεματοποιούνται γύρω από την υπερβολική επιβάρυνση των συχνοτήτων αυτών, αλλά αναπτύσσονται και μέθοδοι για την διαχείριση αυτών των θεμάτων.

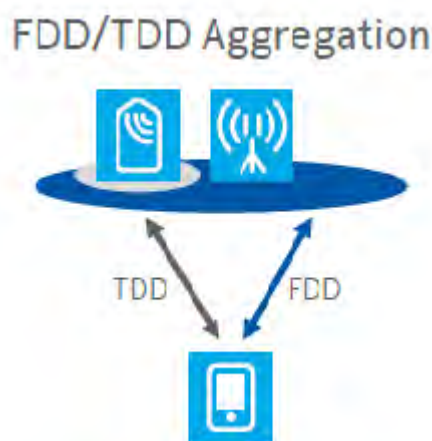
### 3.2 Μη αδειοδοτημένες συχνότητες και LTE

Οι συχνότητες γύρω από τις οποίες περιστρέφονται οι περισσότερες εφαρμογές αυτής της τεχνολογίας είναι της μπάντας των 5GHz. Το χαρακτηριστικό που καθιστά αυτό το εύρος ζώνης ιδιαίτερα ελκυστικό σε σχέση με την άλλη ελεύθερη μπάντα των 2,4 GHz για την ταυτόχρονη συνύπαρξη τριών τεχνολογιών (LTE Advanced – LTE Unlicensed – WiFi), είναι ότι πολύ μεγάλο μέρος του αποτελείται από μη εξουσιοδοτημένες συχνότητες [26]. Αυτό παρατηρείται σε παγκόσμια κλίμακα, καθώς σχεδόν όλες οι χώρες υπάρχουν μη αδειοδοτημένες συχνότητες σε αυτή τη μπάντα, για παράδειγμα στην Ευρώπη υπάρχουν 455MHz ελεύθερων συχνοτήτων και στην Κίνα 325 MHz [18]. Βέβαια, οι ελεύθερες συχνότητες υπόκεινται και αυτές σε κανονισμούς και νομοθεσίες. Συγκεκριμένα, όλες οι συσκευές που λειτουργούν σε αυτό το εύρος θα πρέπει να είναι σε θέση να παύουν τη λειτουργία τους αν κάποια συχνότητα σε αυτή τη ζώνη χρησιμοποιείται από δορυφόρο, ή επιπλέον πρέπει να διακατέχονται από πρόνοηση για την αποφυγή άπληστης συμπεριφοράς και για ομαλή συνύπαρξη με τα υπόλοιπα μέσα της ίδιας μπάντας. Ο δεύτερος προαναφερθείσας περιορισμός ονομάζεται και Clear Channel Assessment (CCA), ή Listen-Before-Talk (LBT) και μεταφράζεται ως ότι δεν είναι εφικτή η άμεση μετάδοση ενός πακέτου δεδομένων, σε περίπτωση που το κανάλι είναι κατειλημμένο. Επιπλέον υπάρχουν και περιορισμοί που αφορούν τη μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ εκπομπής, οι οποίοι βέβαια διαφέρουν για τις επιμέρους συχνότητες της μπάντας.

Το LTE Unlicensed στηρίζεται στο πρωτόκολλο λειτουργίας του LTE Advanced και θα μπορούσε να περιγραφεί απλοϊκά ως η επέκταση του τελευταίου για λειτουργία στις ελεύθερες συχνότητες. Ένας τρόπος εκμετάλλευσης αυτών των συχνοτήτων θα μπορούσε να είναι η χρήση τους για τον μεγάλο όγκο του downlink, ενώ για τη ζεύξη αποστολής δεδομένων (uplink) να χρησιμοποιείται κανονικά το εύρος συχνοτήτων του LTE. Ο κόμβος του LTE, eNodeB, επιπλέον θα χρησιμοποιεί τις δεσμευμένες συχνότητες (οι οποίες επιτρέπουν και τη μετάδοση δεδομένων με πιο ασφαλές τρόπο) για ανταλλαγή σημάτων ελέγχου και χρονισμού, ενώ θα χρησιμοποιεί από τα ελεύθερα κανάλια, κάποιο με μικρό

ίχνος παρουσίας άλλων σημάτων. Μόλις επιλεγεί αυτό το κανάλι θα πρέπει να γίνει Listen-Before-Talk και όποια άλλη ενέργεια προβλέπεται από τους κανονισμούς των ελεύθερων συχνοτήτων.

Ο λογικός εγκέφαλος που θα ρυθμίζει τη χρήση των ελεύθερων συχνοτήτων χρειάζεται να είναι σε θέση να λαμβάνει ανατροφοδότηση για την ποιότητα του καναλιού και της σύνδεσης, την οποία με τη σειρά του θα αναμεταδίδει προς τον κόμβο eNB. Αυτό εξυπηρετεί στο να γνωρίζει ο κόμβος ανά πάσα στιγμή τι είδους ποιότητας ζεύξη υπάρχει (σε σχέση με την εξουσιοδοτημένη), ώστε να επιτυγχάνονται και QoS (Quality of Service) υπηρεσίες. Προκειμένου να λειτουργήσει η ζεύξη αποστολής δεδομένων (συνήθως διενεργείται με Time Division Duplexing) σε ελεύθερες συχνότητες απαιτείται η ύπαρξη συγκεκριμένων μηχανισμών και στον κόμβο της unlicensed μπάντας και στον eNodeB (διαφορετικά η απαίτηση υπάρχει μόνο για τον κόμβο εξουσιοδοτημένων συχνοτήτων). Εντούτοις, αυτά τα χαρακτηριστικά δεν υπάρχουν στους πρώτους (ως επί το πλείστο) καθιστώντας, κατά συνέπεια, αυτόν τον τρόπο λειτουργίας ανέφικτο.



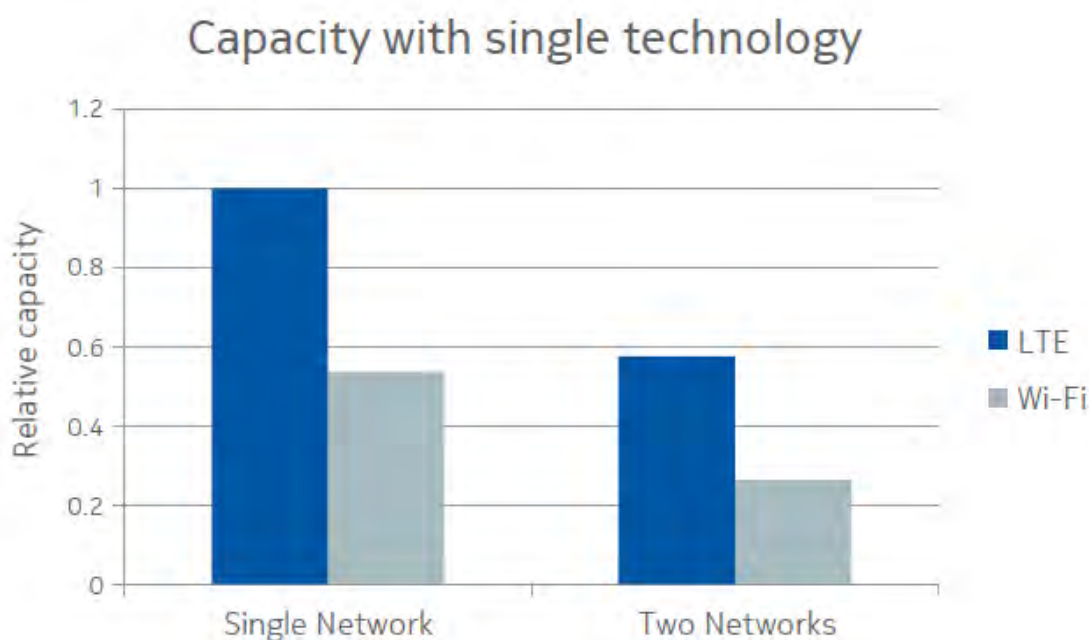
**Εικόνα 3.2:** Χρήση licensed μπάντας για uplink [27]

### 3.3 Συνύπαρξη WiFi και LTE-U

Το μεγαλύτερο στοίχημα που έχει να κερδίσει αυτή η νέα τεχνολογία τηλεπικοινωνιών, LTE Unlicensed, είναι να καταφέρει την ομαλή συνύπαρξη με άλλους χρήστες δικτύων WiFi, που χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες. Ήδη αρκετές εκατοντάδες εκατομμύρια κάτοχοι σύγχρονων κινητών συσκευών χρησιμοποιούν τεχνολογίες 4<sup>ης</sup> Γενιάς (4G), ενώ η τεχνολογία WiFi είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη, με κάθε δημόσιο χώρο πλέον να προσφέρει ελεύθερα το τοπικό δίκτυο του προς χρήση. Λαμβάνοντας αυτά τα δεδομένα υπόψη γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι στις κοινές συχνότητες αυτών των δύο τεχνολογιών θα υπάρχουν μεγάλοι αριθμοί συσκευών χρήστη (UE – User Equipment) και δυσθεώρητοι όγκοι δεδομένων που θα συναγωνίζονται διαρκώς για μια χρονική/φασματική θυρίδα.

Είναι βέβαιο πως αν αυτή η κατάσταση εγκαθιδρυθεί με τρόπο ανεξέλεγκτο θα προκύψουν πολλές παρεμβολές και θα μειωθεί αισθητά η ποιότητα χρήσης. Είναι σχεδόν σίγουρο ότι το μεγαλύτερο κόστος θα πληρώσουν τα WiFi δίκτυα καθώς το πρωτόκολλο LTE, διακατέχεται από αρκετά πιο εύρυθμους μηχανισμούς εκσφαλμάτωσης και κωδικοποίησης σχετικά με το πρώτο. Ήδη πολλοί φορείς (όπως η Google [4]) έχουν καταθέσει τους προβληματισμούς τους για αυτή την κίνηση, εντούτοις οι περισσότεροι βασίζονται σε ελλιπή στοιχεία, καθώς η συντριπτική πλειοψηφία των πειραμάτων ελέγχου εκτελέστηκαν με τη χρήση συμβατικού μηχανισμού και όχι εξειδικευμένου σε LTE-U.

Είναι, λοιπόν, πρωτεύουσας σημασίας η ανάπτυξη μηχανισμών αποφυγής συγκρούσεων μεταξύ των χρηστών με διαφορετικά πρωτόκολλα επικοινωνίας. Αποτελεί επομένως επιτακτικότητα, η εφαρμογή του μηχανισμού LBT (Listen-Before-Talk) ώστε να εξασφαλίζεται ότι η μετάδοση γίνεται σε ελεύθερο κανάλι και να ελαχιστοποιούνται οι αλληλοπαρεμβολές. Βεβαίως, οι αλληλοπαρεμβολές δεν είναι εφικτό να απαλειφθούν πλήρως, καθώς πάντα θα υπάρχει ένα ίχνος παρουσίας έτερων σημάτων, μια κατάσταση όμως που είναι προβλεπόμενη. Μάλιστα μετρήσεις έχουν δείξει ότι σε κανάλια (συνήθως των 20KHz) όπου συνυπάρχουν δύο διαφορετικά σήματα, ο αντίκτυπος της αλληλοπαρεμβολής είναι μεγαλύτερος όταν συνυπάρχουν δύο χρήστες WiFi και μικρότερος όταν συνυπάρχουν δύο χρήστες WiFi LTE-U [27], χάρη στους προηγμένους μηχανισμούς που έχουν σχεδιαστεί στα πρωτόκολλα των δεύτερων, κάτι που γίνεται περισσότερο εμφανές, όσο το απαιτούμενο φορτίο μετάδοσης αυξάνει σε όγκο δεδομένων.

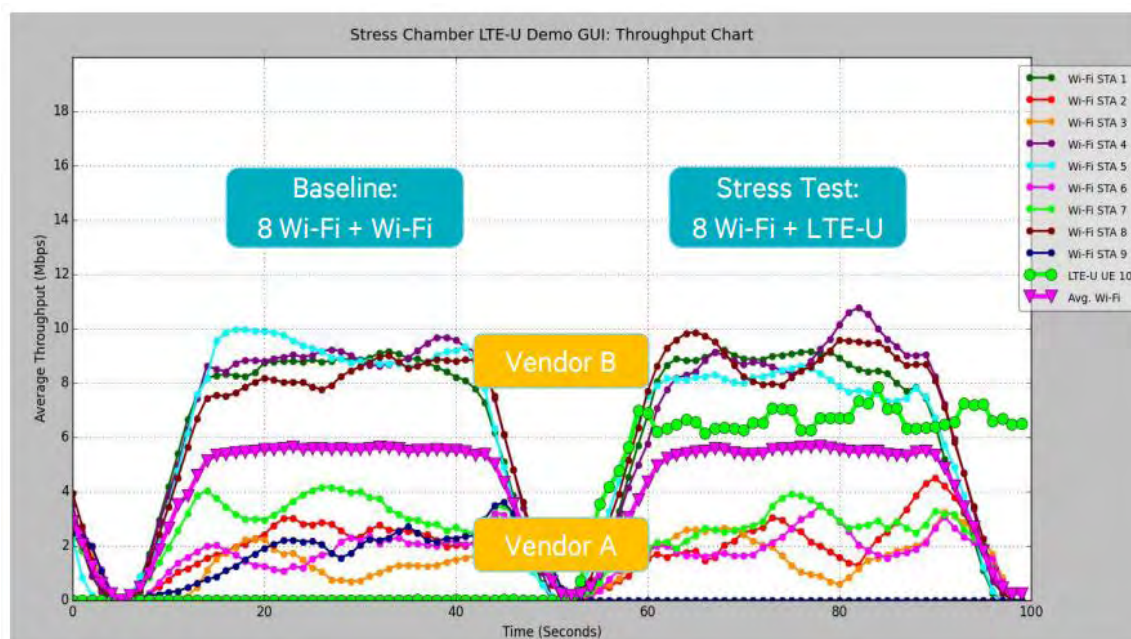


**Εικόνα 3.3:** Διακύμανση συμπεριφοράς δικτύου με ένα και δύο δίκτυα LTE/Wi-Fi [27]

Το LTE Unlicensed χρησιμοποιεί αρκετούς μηχανισμούς του πρωτοκόλλου LTE Advanced (αναπτυγμένα Coding and Modulation Schemes), επομένως έχει σχεδιαστεί να είναι ανθεκτικότερο σε αλληλοπαρεμβολές (ειδικά σε σχέση με το WiFi). Το αντίκτυπο

στους χρήστες WiFi, μπορεί να περιοριστεί ακόμα περισσότερο με τη χρήση κάποιων αλγορίθμων ελέγχου πρόσβασης (fairness algorithm) στον κόμβο που ελέγχει το LTE δίκτυο (τον eNodeB), ώστε να γίνεται πιο δίκαια η χρήση των slots από τα διάφορα δίκτυα, σε σημείο που η παρεμβολή από δίκτυα LTE να φτάνει τις τάξεις παρεμβολής από άλλα δίκτυα WiFi. Σε αυτή την περίπτωση, επομένως, δεν έχει καμία σημασία για μια συσκευή που λειτουργεί WiFi, αν το έτερο δίκτυο λειτουργεί με το ίδιο πρωτόκολλο, ή με το LTE-U, εφόσον η παρεμβολή κυμαίνεται στα ίδια ύψη.

Η διαχείριση των συχνοτήτων από το πρωτόκολλο LTE είναι μια δυναμική διαδικασία. Επομένως είναι εφικτό να ελέγχονται περιοδικά όλα τα διαθέσιμα κανάλια εκπομπής και να επιλέγεται κάθε φορά, αυτό με την μικρότερη παρουσία θορύβου. Κατ' αυτόν τον τρόπο και ενισχύεται η ποιότητα εκπομπής του χρήστη, αλλά και ελαχιστοποιείται η παρεμβολή του σε άλλες συσκευές. Η παρούσα εργασία προτείνει και εφαρμόζει έναν τρόπο επίτευξης του προηγούμενου μηχανισμού. Σε συνδυασμό με τα προηγούμενα η Licensed - Assisted Access (LAA) του LTE-U, μπορεί να βελτιστοποιηθεί σε βαθμό που να επηρεάζει ελάχιστα κάποιο άλλο δίκτυο WiFi. Επιπλέον ένα πρόσθετο συμπέρασμα που απορρέει από την ανωτέρα ανάλυση είναι ότι εφόσον τα δίκτυα LTE διαχειρίζονται καλύτερα τη συνύπαρξη με άλλους χρήστες, προκύπτουν μικρότερες απώλειες δεδομένων, συνεπώς και εμφανίζεται αποδοτικότερη χρήση της χωρητικότητας του δικτύου.



Εικόνα 3.4: Σύγκριση αντίκτυπου WiFi και LTE-U σε έτερα WiFi δίκτυα

### 3.4 Πλεονεκτήματα χρήσης LTE σε μη αδειοδοτημένες συχνότητες

Η χρήση τεχνολογιών του πρωτοκόλλου LTE Advanced σε μη εξουσιοδοτημένες συχνότητες μπορεί να οδηγήσει στην αποδοτικότερη χρήση του φάσματος. Με τους χρήστες κινητών υπηρεσιών μεταφοράς δεδομένων, η χρήση του φάσματος γίνεται σε μόνιμη βάση περισσότερο εντατική, μεγαλύτεροι όγκοι δεδομένων μεταδίδονται κάθε στιγμή και οι διαθέσιμες χρονικές και φασματικές θυρίδες ελαττώνονται. Επομένως γίνεται όλο και πιο σημαντικό να σχεδιάζονται τρόποι για την αποδοτικότερη αξιοποίηση του φάσματος. Στο πνεύμα αυτής της αρχής η χρήση LTE-U σε μπάντες ελεύθερων συχνοτήτων (2,4 GHz, 5GHz) έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι οδηγεί σε μεγαλύτερο throughput και goodput (τα δεδομένα που λαμβάνουν οι υπηρεσίες) [3].

Εφαρμόζοντας δίκτυα LTE Unlicensed, μπορεί να μειωθεί και το επίπεδο παρεμβολών. Η τεχνολογία LTE χρησιμοποιεί femtocells, τα οποία είναι μικροί κόμβοι κυψελωτών δικτύων, χαμηλής ισχύος εκπομπής. Κατά συνέπεια είναι εφικτό να δημιουργηθούν αρκετά μικρότερα τοπικά δίκτυα στη θέση ενός μεγαλύτερου, μοιράζοντας έτσι τους χρήστες σε διαφορετικά τοπικά δίκτυα, κάτι που θα μειώσει το μέγεθος των αλληλοπαρεμβολών και θα οδηγήσει στη καλύτερη φασματική αξιοποίηση και εμπειρία χρήσης.

Τέλος, το πιο προφανές και ίσως σημαντικότερο πλεονέκτημα που προσφέρει η επέκταση του LTE πρωτοκόλλου σε μη εξουσιοδοτημένες συχνότητες είναι η οξεία αύξηση στην ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων. Οι συσκευές θα είναι πλέον σε θέση να αυξήσουν το ωφέλιμο εύρος ζώνης και να μεταφέρουν μεγαλύτερους όγκους δεδομένων [19]. Ακόμα, αποφορτώνονται οι εξουσιοδοτημένες συχνότητες σε καταστάσεις όπου δε μεταδίδεται εξαιρετικά μεγάλος όγκος πληροφορίας, με απότοκο να μπορούν να χρησιμοποιηθούν πιο άνετα για την αξιόπιστη μεταφορά κρίσιμης πληροφορίας, όπως μηνύματα ελέγχου, ή κάποια πακέτα δεδομένων μεγάλης σημασίας.

## **ΜΕΡΟΣ ΙΙ**

### **ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΛΤΕ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΣΕ ΜΗ ΑΔΕΙΟΔΟΤΗΜΕΝΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ**



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ:** **ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ**

### **4.1 Πώς προέκυψε η ιδέα**

Αν όχι το σημαντικότερο, τότε σίγουρα ένα από τα κυριότερα προβλήματα που έχει να αντιμετωπίσει το εγχείρημα επέκτασης της τεχνολογίας LTE Advanced σε μη εξουσιοδοτημένες συχνότητες, είναι η επιλογή ενός τρόπου που να εξασφαλίζει την ομαλή συνύπαρξη με τις προϋπάρχουσες τεχνολογίες σε αυτές τις ζώνες συχνοτήτων. Αυτό το βήμα είναι αρκετά σημαντικό για την εξέλιξη των τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών, καθώς πολλές ελπίδες για την μετάβαση στην πέμπτη γενιά τηλεπικοινωνιών βασίζονται σε αυτό. Για να γίνει βέβαια αυτό, χρειάζεται πρώτα να βρεθεί μια εφαρμογή αντιστάθμισης. Με άλλα λόγια επιβάλλεται αυτή η επέκταση να υλοποιηθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να μην «καταπνίξει» τα πρωτόκολλα που λειτουργούν ήδη στις μη εξουσιοδοτημένες συχνότητες, αλλά και αυτές οι εκπτώσεις να μην επιβαρύνουν ιδιαίτερα την απόδοση του ίδιου του LTE πρωτοκόλλου.

Η τεχνολογία του cognitive radio είναι σχετικά πρόσφατη, ωστόσο έχει ωριμάσει αρκετά ώστε να παράγει αποτελέσματα ακριβείας. Έχουν σχεδιαστεί και παράγονται πλέον συσκευές που υλοποιούν τις διάφορες μεθοδολογίες της φασματογραφίας (USRPs), οι οποίες είναι πλήρως συμβατές με την συντριπτική πλειοψηφία των πειραματικών και εμπορικών διατάξεων επικοινωνίας. Η ενσωμάτωση ενός τέτοιου μηχανισμού σε οποιαδήποτε μορφή δικτύου προσφέρει μια ευελιξία στον τρόπο μετάδοσης των δεδομένων, ιδιαίτερα ως προς την επιλογή του καναλιού μεταφοράς δεδομένων. Μπορεί η διάταξη να επιλέγει κάθε φορά διαφορετικό κανάλι με άπληστη συμπεριφορά, αν ικανοποιεί τα κριτήρια επιλογής, όπως είναι αυτά διαμορφωμένα στον μηχανισμό.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω σημεία ενάγεται εύλογα το συμπέρασμα ότι η ενσωμάτωση μηχανισμών ευφυών ραδιοσυστημάτων και spectrum sensing μπορεί να βοηθήσει αρκετά το LTE-U να κερδίσει το στοίχημα αρμονικής συνύπαρξης με τα άλλα δίκτυα στις ίδιες συχνότητες. Με τη χρήση αυτών των τεχνικών θα προσδοθεί μία ευελιξία στον μηχανισμό του LTE-U που του είναι ιδιαίτερα απαραίτητη, ώστε να αποφύγει ενεργητικές και παθητικές παρεμβολές. Θα μπορέσει, λοιπόν, να διατηρήσει ένα υψηλό επίπεδο λειτουργίας και παράλληλα να μειώσει την επίδρασή του στα υπόλοιπα δίκτυα.

Δεδομένου ότι σε ένα εύρος συχνοτήτων παρατηρείται μια διακύμανση όσον αφορά τη χρήση κάθε καναλιού συχνοτήτων, υπάρχουν ανά πάσα στιγμή παράθυρα φάσματος με μικρή φόρτωση. Με την φασματογραφία θα καταστεί εφικτός, λοιπόν, ο προσδιορισμός αυτών των συχνοτήτων με τον λιγότερο θόρυβο ή την μικρότερη παρουσία άλλων σημάτων. Μεταφέροντας επομένως την επικοινωνία στο νέο αυτό κανάλι μειώνονται οι παρεμβολές, οπότε με καλύτερη ποιότητα καναλιού υπάρχει και μεγαλύτερη πιθανότητα ορθής

παράδοσης των PDUs, επομένως και μεγαλύτερες ταχύτητες. Παράλληλα, μειώνονται και οι ενεργητικές παρεμβολές στις υπόλοιπες επικοινωνίες, οπότε το αντίκτυπο της χρήσης μη εξουσιοδοτημένων συχνοτήτων από το LTE πρωτόκολλο γίνεται μικρότερο, σχεδόν της τάξης παρεμβολών των άλλων παρόμοιων μη εξουσιοδοτημένων τεχνολογιών.

Έτσι, λοιπόν, προέκυψε αυτή η ιδέα συνδυασμού των προαναφερθέντων δύο μηχανισμών. Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί ο τρόπος που υλοποιήθηκε και η παραμετροποίηση που χρειάστηκε. Επειδή σε αυτό το εγχείρημα εμπλέκονται διάφορες τεχνολογίες απαιτήθηκε πρώτα ο σχεδιασμός κάποιων δομών προσαρμογής ώστε να μπορούν να επικοινωνούν και να συνεργάζονται σωστά.

## 4.2 Πρότερη έρευνα πάνω στο θέμα

Όπως είναι απόλυτα αναμενόμενο οι εξελίξεις σε μια υπηρεσία που διαθέτει εκατοντάδες εκατομμύρια χρήστες και συνδρομητές, αποτελούν αντικείμενο ενδιαφέροντος για ένα αντίστοιχα πολυπληθές ερευνητικό κοινό. Ιδιαίτερα μάλιστα όταν πρόκειται για μια πολύ επίκαιρη εξέλιξη, στην οποία δεν έχει γίνει ακόμα μεγάλη πρόοδος και το (ερευνητικό) πεδίο είναι γόνιμο. Έτσι συμβαίνει και με την τεχνολογία που μελετάται στα πλαίσια αυτής της διατριβής. Τα δίκτυα τέταρτης γενιάς (4G, 4,5G) είναι μια αρκετά πρόσφατη εξέλιξη των προηγούμενων 3GPP δικτύων τρίτης γενιάς, η οποία αύξησε σημαντικά τις ταχύτητες δεδομένων (bitrates) που βιώνουν οι χρήστες της. Πάνω σε αυτή την ρηξικέλευθη τεχνολογία στηρίζεται και η εξέλιξη που αφορά τη συγκεκριμένη εργασία, το LTE Unlicensed. Με άλλα λόγια η επέκταση της λειτουργικότητας του δικτύου LTE Advanced και σε μη εξουσιοδοτημένες συχνότητες. Αυτή είναι μια πολύ καινούρια τεχνολογία (που ενδέχεται να οδηγήσει σε δίκτυα 4G+, ακόμη και 5G), η οποία στην εμβρυϊκή, πειραματική της φάση αποτελεί ένα ανοιχτό πεδίο για προτάσεις και πειραματισμούς. Μολονότι έχουν γίνει κάποιες έρευνες, το πρωτόκολλο LTE-U βρίσκεται ακόμα στο στάδιο της παραμετροποίησης και της προσπάθειας να αντιμετωπιστούν κάποια προβλήματα, όπως η συνύπαρξη με άλλες τεχνολογίες δικτύων (π.χ. WiFi) που έχουν πεδίο δράσης τις μη εξουσιοδοτημένες μπάντες συχνοτήτων.

Η πλειοψηφία της ερευνητικής εργασίας πάνω στο αντικείμενο του LTEUnlicensed, σχετίζεται με τον τρόπο χρήσης του προστιθέμενου φάσματος. Με άλλα λόγια έχουν γίνει προτάσεις κυρίως για τον συντονισμό των λειτουργιών uplink και downlink σε κατάλληλες συχνότητες, ώστε να γίνει η μέγιστη αξιοποίηση του προστιθέμενου φάσματος. Μια ακόμα ομάδα ερευνών ασχολείται με την ανάπτυξη τεχνικών εξισορρόπησης της πρόσβασης στο εύρος των ανταγωνιζόμενων πρωτοκόλλων, ώστε να μην αναδειχθεί σε άπληστο «γείτονα» το LTE Unlicensed στις λειτουργίες των ελεύθερων συχνοτήτων. Η τελευταία και μικρότερη ομάδα εργασιών μελετά τρόπους πρόσβασης των μη εξουσιοδοτημένων συχνοτήτων από το LTE-U, ώστε να διαταράσσεται η λειτουργία των υπόλοιπων μεταδόσεων στον ελάχιστο δυνατό βαθμό. Σε αυτή την τελευταία θεματική ομάδα ανήκει και η προκειμένη διατριβή.

Παρακάτω παρουσιάζονται πιο συγκεκριμενοποιημένα τα αντικείμενα από κάποιες αντιπροσωπευτικές εργασίες/δημοσιεύσεις πάνω σε αυτό το πεδίο.

Η εργασία που παρουσιάζεται στο [8] αφορά μία μελέτη των πρωτοκόλλων MAC που χαρακτηρίζει την καταλληλότητά τους για χρήση cognitive radio και LTE Unlicensed. Η ερευνητική ομάδα δέχονται ότι οι τεχνικές φασματογραφίας μπορούν να προσφέρουν πολύτιμες λύσεις στο νεόδμητο πρωτόκολλο και ορίζουν πως ο κύριος φόρτος αυτής της διαδικασίας ανήκει στο Medium Access Control (MAC) επίπεδο. Κατόπιν επιχειρείται μια κατηγοριοποίηση των διαφόρων ειδών του επιπέδου αυτού ανάλογα με την πολυπλοκότητά τους, την αρχιτεκτονική, το αν ο σχεδιασμός τους τα επιτρέπει να λειτουργούν καλώς στα πλαίσια ενός δικτύου LTE Unlicensed και το πώς διαχειρίζονται τα σήματα και τη μεταφορά δεδομένων. Τέλος, παρουσιάζουν μία μελέτη γύρω από τον τρόπο λειτουργίας του spectrum sensing, τα διάφορα είδη του και την επίδρασή του στη διαχείριση του φάσματος. Αν και αποτελεί μια ολοκληρωμένη έρευνα γύρω από το πρωτόκολλο LTE Unlicensed και το συνδυασμό του με cognitive radio, δε προτείνει κάποια συγκεκριμένη μέθοδο υλοποίησης.

Στο ίδιο πνεύμα με την προηγούμενη εργασία είναι και η [7]. Συγκεκριμένα, αναλύει τα πλεονεκτήματα της ενσωμάτωσης λειτουργιών cognitiveradio στο LTE Unlicensed. Παρουσιάζει κάποιες βασικές έννοιες του cognitiveradio, αρχιτεκτονικές υλοποίησής του και ορισμένες εφαρμογές του. Επιχειρείται μια ανάλυση και κατηγοριοποίηση αυτών των τεχνικών και μια ποιοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων τους και του βαθμού απόδοσης του cognitive radio. Είναι μια συνολική μελέτη, η οποία σκιαγραφεί τα πλεονεκτήματα της φασματογραφίας στις τεχνολογίες δικτύων και παρουσιάζει την επεκτασιμότητά της σε όλες τις λειτουργικότητες τους. Σε κοινό πλαίσιο κινείται και η έρευνα [12] παρουσιάζοντας αντίστοιχα τη συνεργατική φασματογραφία και τους τρόπους εφαρμογής της σε δίκτυα τηλεπικοινωνιών.

Στη δημοσίευση [10], η ερευνητική ομάδα ασχολείται με την αύξηση στη χωρητικότητα (δεδομένων) και κάλυψης που θα εμφανιστούν στα δίκτυα LTE με την ενσωμάτωση του εύρους ζώνης του Wi-Fi. Αρχικά παρουσιάζεται η πρόσθετη κάλυψη που θα προκύψει (λόγω της πληθώρας τοπικών ασυρμάτων δικτύων τεχνολογίας Wi-Fi) και κατά συνέπεια και η αύξηση στα bitrates των δεδομένων χάρη στο πρόσθετο εύρος προς διάθεση. Στη συνέχεια, περιγράφονται ορισμένοι τρόποι ενσωμάτωσης αυτών των συχνοτήτων στο πρωτόκολλο του LTE Unlicensed και τελικά αναλύονται κάποια προβλήματα σε αυτή τη διαδικασία. Συνολικά, προτείνεται μια γενικότερης φύσεως συνεργασία των δύο ευρών συχνοτήτων (εξουσιοδοτημένες για uplink και μη εξουσιοδοτημένες για downlink).

Στην [11] γίνεται η παρουσίαση ενός πρωτοκόλλου παραμετροποίησης, το οποίο έχει ως κύριο μέλημα την εξισορροπημένη χρήση του μη εξουσιοδοτημένου φάσματος από όλες τις συσκευές (UEs) που λειτουργούν σε αυτό. Ο μηχανισμός CSCC (Common Spectrum Coordination Channel) είναι ένα κοινό πρωτόκολλο, το οποίο αποτελεί ένα συνδυασμό της λειτουργίας χαμηλής ταχύτητας του IEEE 802.11b και μιας περιοδικής εκπομπής σε επίπεδο MAC. Συνεπώς προτείνεται ένας συντονιστικός, εξισορροπητικός μηχανισμός, ο οποίος θα είναι υπεύθυνος για την δίκαιη παροχή πρόσβασης στις συχνότητες του δικτύου για όλα τα πρωτόκολλα που συνυπάρχουν σε αυτό.

Η εργασία που παρουσιάζεται στο [13] αποτελεί μια μελέτη της ωφελιμότητας στην επέκταση του LTE Advanced μηχανισμού σε μη εξουσιοδοτημένες συχνότητες. Χρησιμοποιώντας τη θεωρία παιχνιδιών μελετά διαφορετικές ενδεχόμενες καταστάσεις και τι αντίκτυπο έχουν αυτές στη λειτουργία όλων των μηχανισμών που μοιράζονται τις συχνότητες αυτές. Καταλήγει συγκεντρώνοντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης ανάλογα με τον αντίκτυπό τους στην απόδοση των πρωτοκόλλων.

Στο ίδιο πνεύμα με την προαναφερθείσα μελέτη κυμαίνεται και η [17], επιχειρώντας μέσα από τη θεωρία παιγνίων να προσεγγίσει την αποδοτικότερη κατανομή του εύρους ζώνης συχνοτήτων στα επιμέρους πρωτόκολλα. Χρησιμοποιώντας ένα σύστημα «κοστολόγησης» στην πρόσβαση συχνοτήτων, συγκλίνει τελικά στο βέλτιστο εύρος συχνοτήτων ενός καναλιού ανά πρωτόκολλο. Το τελικό πόρισμα της μελέτης συνδέεται με την ορθή λειτουργία του μηχανισμού LTE Licensed Assisted Access (LAA). Επιπλέον, η συγκεκριμένη έρευνα καταλήγει στο συμπέρασμα ότι με την κατάλληλη κοστολόγηση της πρόσβασης σε συχνότητες, μπορούν να επωφεληθούν και οι τεχνολογίες με μικρότερο σχετικά bitrate (εν προκειμένω το Wi-Fi).

Μία εναλλακτική λύση για την συνύπαρξη των ετερογενών δικτύων LTE και Wi-Fi στις ίδιες συχνότητες αναλύεται στο [14]. Συγκεκριμένα, προτείνεται η οργάνωση των δικτύων σε μικρές τοπικές κυψέλες, σε κάθε μία από τις οποίες θα λειτουργεί μια συνεργατική, δυναμική χρήση των συχνοτήτων από τα επιμέρους πρωτόκολλα. Επιπλέον γίνεται η χρήση ενός testbed για ρεαλιστική ανάλυση αυτού του μηχανισμού κεντρικοποιημένου συστήματος σε περιβάλλον πραγματικών αλληλοπαρεμβολών.

Αντιθέτως, στα πλαίσια του [15] παρουσιάζεται ένας μη κεντρικοποιημένος μηχανισμός συνύπαρξης. Διαμορφώνεται ελαφρώς ο μηχανισμός LBA (Listen-Before-Talk) του LTE-U, ώστε να ανιχνεύει εκπομπές του Wi-Fi, κατά τις χρονικές θυρίδες μη εκπομπής, συγκρίνοντας το λαμβανόμενο ενεργειακό ίχνος με ένα κατώφλι. Στη συνέχεια το πρωτόκολλο του LTE θα ρυθμίζει ανάλογα με τις μετρήσεις αυτές, κατάλληλα τις χρονικές θυρίδες εκπομπής του, επιτρέποντας έτσι το πρωτόκολλο Wi-Fi να λειτουργεί με μικρό κόστος για το ίδιο.

Στο paper [16] παρουσιάζεται ένας συνδυασμός του cyclostationary spectrum sensing με το πρωτόκολλο LTE-U, ώστε να γίνει ομαλά η επέκτασή του σε μη εξουσιοδοτημένες συχνότητες. Χρησιμοποιείται ένα φίλτρο half-duplex εκπομπής-λήψης για δειγματοσκόπηση του καναλιού με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία του cognitive radio. Αναλύεται η απόδοση της cyclostationary φασματογραφίας σε περιβάλλον όπου συνυπάρχουν δίκτυα Wi-Fi και LTE και τελικά προτείνεται ένας τρόπος για επιτευχθεί η ακύρωση του προβλήματος της αυτοπαρεμβολής.

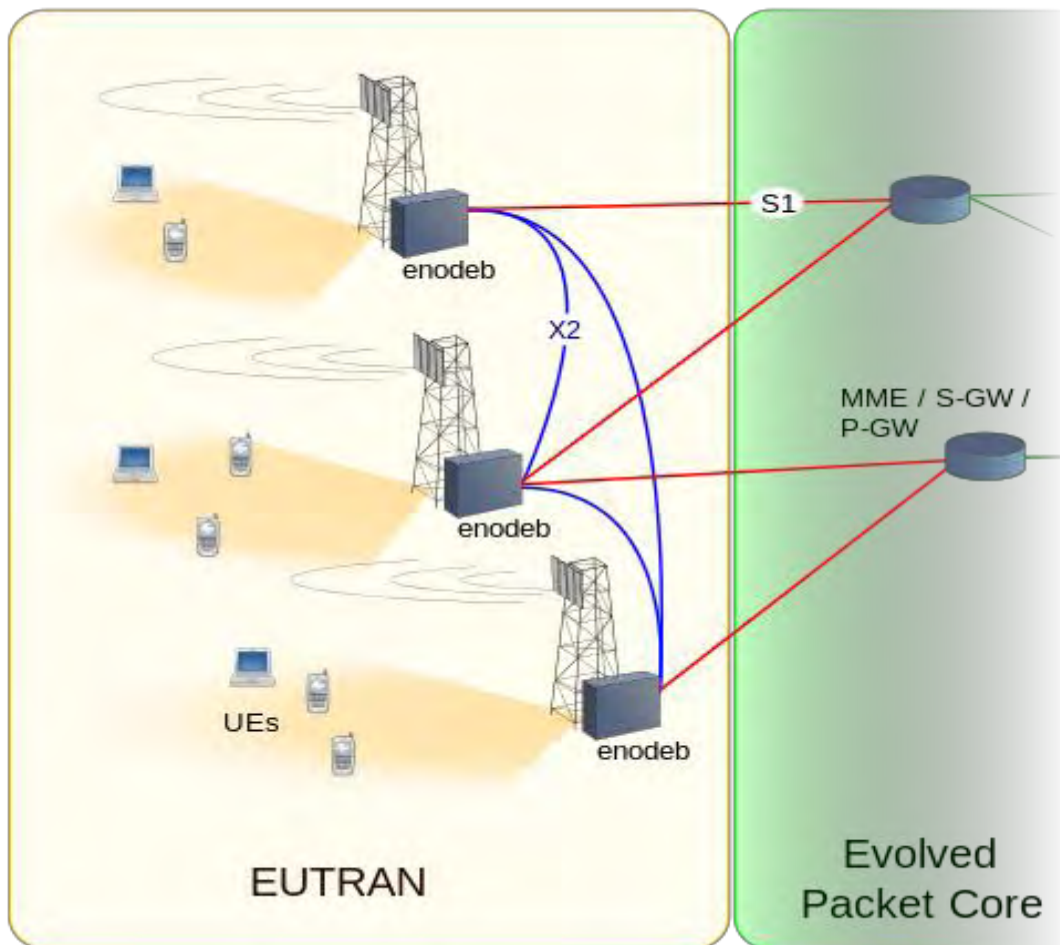
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ: **ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ**

### **5.1 Η πλατφόρμα του OpenAirInterface**

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής χρησιμοποιήθηκε ως βασικό δομικό συστατικό η πλατφόρμα OpenAirInterface. Αποτέλεσε δομικό κομμάτι για το υπόβαθρο, με τη βοήθεια του οποίου κατέστη εφικτή η σχεδίαση, ανάπτυξη και πρακτική εφαρμογή του σχήματος επικοινωνίας LTE που προτείνεται σε αυτή τη διατριβή. Η πλατφόρμα σχεδίασης δικτύων αυτή είναι ανοιχτού λογισμικού και χρησιμοποιείται από μία ευρεία (και με μεγάλη γεωγραφική διασπορά) ερευνητική κοινότητα για τη μελέτη των διαφορετικών πλευρών δικτύων τέταρτης γενιάς (4G, 4G+). Επιπλέον, γίνεται και ερευνητική χρήση της για την υλοποίηση μεθόδων και τεχνολογιών που έχουν ως σκοπό την εξέλιξη ήδη υπάρχουσών τεχνολογιών (βελτίωση εφαρμογής των, ή εφαρμογή των σε νέους τομείς) ή και την ανάπτυξη νέων πρωτοκόλλων και τεχνολογιών που μπορεί να οδηγήσουν στη δημιουργία πραγματικών 5G τηλεπικοινωνιακών πρωτοκόλλων.

Το ινστιτούτο EURECOM, το οποίο είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία και εξέλιξη αυτής της πειραματικής πλατφόρμας είναι ένα κέντρο μεταπτυχιακών σπουδών και βρίσκεται στο τεχνολογικό πάρκο SophiaAntipolis (το οποίο είναι το μεγαλύτερο στην Ευρώπη), στο νοτιοανατολικό άκρο της Γαλλίας. Συνεργάζεται στενά με μεγάλες εταιρίες του χώρου των τηλεπικοινωνιών (Swisscom, SFR, Orange κλπ.) για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών με εμπορικές επεκτάσεις. Ιδρύθηκε το 1991 ως μια συνεργασία εταιριών για τη δημιουργία ενός ακαδημαϊκού ινστιτούτου, το οποίο θα είναι αρμόδιο για την εξέλιξη και δημιουργία νέων τεχνολογιών τηλεπικοινωνίας [5].

Στα πλαίσια, λοιπόν, αυτού του ινστιτούτου δημιουργήθηκε και η πλατφόρμα OpenAirInterface. Είναι ανοιχτού λογισμικού και η χρήση της είναι ανοικτή στην ερευνητική κοινότητα για την εξέλιξη και πειραματισμό σε τεχνολογίες δικτύων. Αρμόδιο για την υποστήριξη αυτού του λογισμικού είναι ένα παράρτημα του ινστιτούτου Eurecom, που ονομάζεται OpenAirInterface (OAI) Software Alliance (OSA). Το OSA έχει ως κύριο αντικείμενο τη δημιουργία ενός περιβάλλοντος υποστήριξης για τα κυψελωτά δίκτυα 3GPP (EPC, EUTRAN), στα πρότυπα άλλων δομών ανοιχτού λογισμικού, όπως το OpenStack. Αν και πρόκειται για λογισμικό ανοιχτού κώδικα έχουν σχεδιαστεί αρκετές επεκτάσεις, προκειμένου να του επιτρέπουν τη συνεργασία με υλικό κλειστού κώδικα. Το λογισμικό που αφορά την υποστήριξη του EPC (Evolved Packet Core) κομματιού των δικτύων ονομάζεται openairCN, ενώ αυτό που ασχολείται με την χρήση του δικτύου (access-network), δηλαδή το πρωτόκολλο EUTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access), ονομάζεται openair5G.



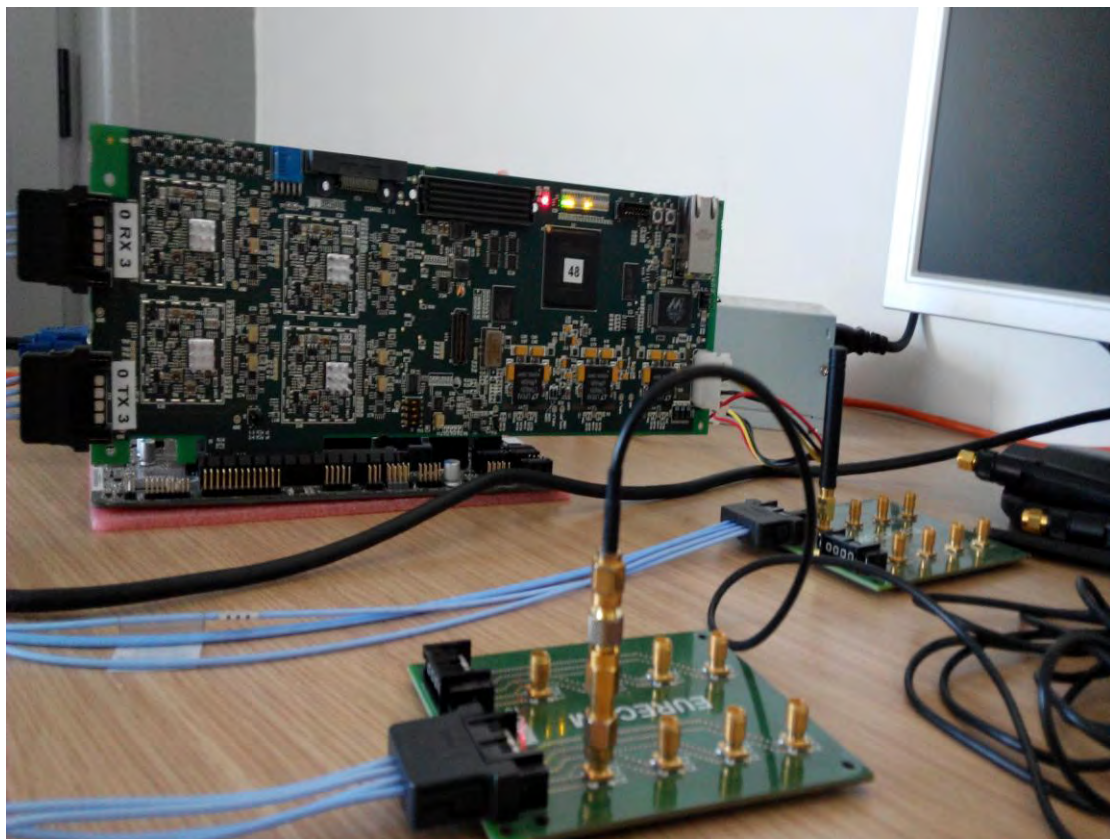
**Εικόνα 5.1:** Σχηματική αναπαράσταση των EPC και EUTRAN τμημάτων ενός LTE δικτύου

Η πλατφόρμα του OpenAirInterface (OAI) αυτή καθ'αυτή είναι υλοποιημένη σε ανοιχτό κώδικα και υλοποιεί την πλειοψηφία των λειτουργικοτήτων LTE δομής. Τμήμα του κώδικα παρουσιάζεται στο τέλος της διατριβής, στο Παράρτημα Β'. Σχεδιάστηκε ως ένας κοινός δίαυλος ανάμεσα στη βιομηχανία και τον ακαδημαϊκό τομέα, ώστε το ακαδημαϊκό κομμάτι να μπορεί να μελετήσει πρακτικά, ρεαλιστικά θέματα της τεχνολογίας δικτύων. Συγκεκριμένα αποτελεί μια υλοποίηση LTE δικτυακής δομής, σύμφωνης με την Release 10 της 3GPP και προσφέρει υποστήριξη για τα τμήματα που ολοκληρώνουν ένα τηλεπικοινωνιακό περιβάλλον τέταρτης γενιάς (UE, eNB, MME, HSS, SGW και PGW) σε υπολογιστικό περιβάλλον Linux. Έχει ελεύθερη άδεια χρήσης και μπορεί να συνεργαστεί με εργαστηριακό εξοπλισμό, όπως φασματογράφοι, USRPs (Universal Software Radio Peripheral), πλατφόρμες PXIe (PCI eXtensions for Instrumentation) και κινητούς εξοπλισμούς χρήστη (UE), όπως smartphones. Για την πειραματική διάταξη της συγκεκριμένης εργασίας έγινε χρήση διατάξεων software defined radio, με δυνατότητες spectrum sensing, των USRP B210, για τη συνεργασία του κόμβου eNB με τον χρήστη UE, σε κανάλια με μικρή παρεμβολή σημάτων και θορύβου.

Ο κώδικας που υλοποιεί την πλατφόρμα αποτελεί συλλογική δουλειά αρκετών ερευνητών και εξελίσσεται ανά τα έτη, προκειμένου να συμβαδίζει με τις τεχνολογικές εξελίξεις στα δίκτυα. Έτσι διαθέτει αρχεία γραμμένα κυρίως σε γλώσσα C++, αλλά και μερικά σε Python, τα οποία σχηματίζουν τις δομικές οντότητες μιας 4Gδομής, όπως ο MAC scheduler των LTE. Όλα αυτά τα αρχεία είναι πλήρως διαμορφώσιμα και είναι εύκολο για το ερευνητικό κοινό να προγραμματίσει την υλοποίηση των προαναφερθέντων οντοτήτων στην επιθυμητή συμπεριφορά, απλώς διαμορφώνοντας τη συμπεριφορά των μεταβλητών στον κώδικα. Αυτές οι αλλαγές μπορεί να είναι κάτι απλό, όπως μια αλλαγή του κέρδους λήψης στην κεραία του δέκτη, έως κάτι αρκετά πιο περίπλοκο, όπως ο προγραμματισμός της αυτόματης μεταπήδησης σε άλλο κανάλι επικοινωνίας, όταν εντοπιστεί διαθέσιμο παράθυρο συχνότητας με ευνοϊκότερες συνθήκες επικοινωνίας (λιγότερο θόρυβο, μικρότερο ίχνος σημάτων κλπ.), κάτι που πραγματεύεται και η παρούσα διατριβή.

## 5.2 Αρχική προετοιμασία

Για την υλοποίηση της δικτυακής τοπολογίας που περιγράφεται σε αυτή τη διατριβή χρησιμοποιήθηκε ένας αριθμός διαφορετικών συστατικών πρωτοκόλλων και τεχνολογιών. Συγκεκριμένα, βασικό κομμάτι στο εγχείρημα είναι η πλατφόρμα OpenAirInterface (OAI), η οποία αναλύεται στο κεφάλαιο 5.1 και χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία ενός τοπικού δικτύου. Το λογισμικό OAI υλοποιήθηκε σε ένα υπολογιστικό (CPU – HDD - RAM) σύστημα υψηλών προδιαγραφών, με λογισμικό interface σε Linux, στο οποίο συνδέθηκαν τα εξειδικευμένα περιφερειακά του OAI. Το πρώτο από αυτά τα ειδικά για τη λειτουργία του OpenAirInterface περιφερειακά, αποτέλεσε η κάρτα ExMIMO, η οποία είναι μια εφαρμογή συστήματος Software Defined Radio και παρείχε δυνατότητες δικτύων όπως υλοποίηση πομπού, δέκτη και spectrum sensing. Χρησιμοποιεί PCI πρωτόκολλο για τη διασύνδεσή της στο υπολογιστικό τμήμα και δεσπόζον στοιχείο της είναι το FPGA Spartan-6. Το δεύτερο εξειδικευμένο περιφερειακό είναι οι κεραίες MIMO της πλατφόρμας, οι οποίες διασυνδέονταν στο σύστημα, δια μέσου της PCI κάρτας. Πάνω σε αυτή την τοπολογία και συγκεκριμένα μέσω των κεραιών (λήψης – εκπομπής), συνδέθηκε και μια συσκευή cognitiveradio, το USRP B210, το οποίο είχε τον ρόλο του πελάτη (UE) και επικοινωνούσε με το υλικό μέρος της πλατφόρμας OAI με χρήση του πρωτοκόλλου USB, το οποίο χρησιμοποιήθηκε επιπλέον και για σκοπούς φασματογραφίας. Επίσης, δημιουργήθηκαν μερικά scripts εντολών σε γλώσσα προγραμματισμού Python, τα οποία επιτέλεσαν τον ρόλο ενός ευρύτερου συντονιστή - adapterκαι γεφύρωσαν τις λειτουργίες της πλατφόρμας OAI με τις λειτουργίες του USRP.



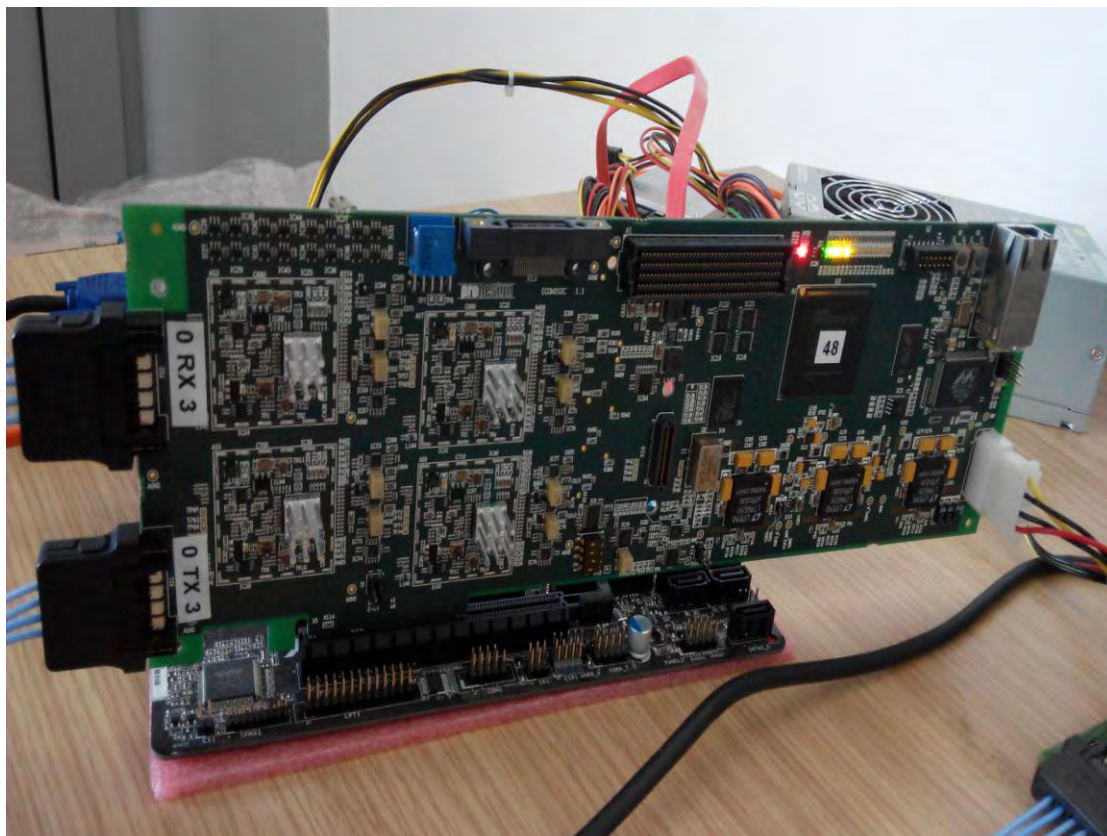
*Εικόνα 5.2: Το hardware τμήμα της πλατφόρμας OpenAirInterface*



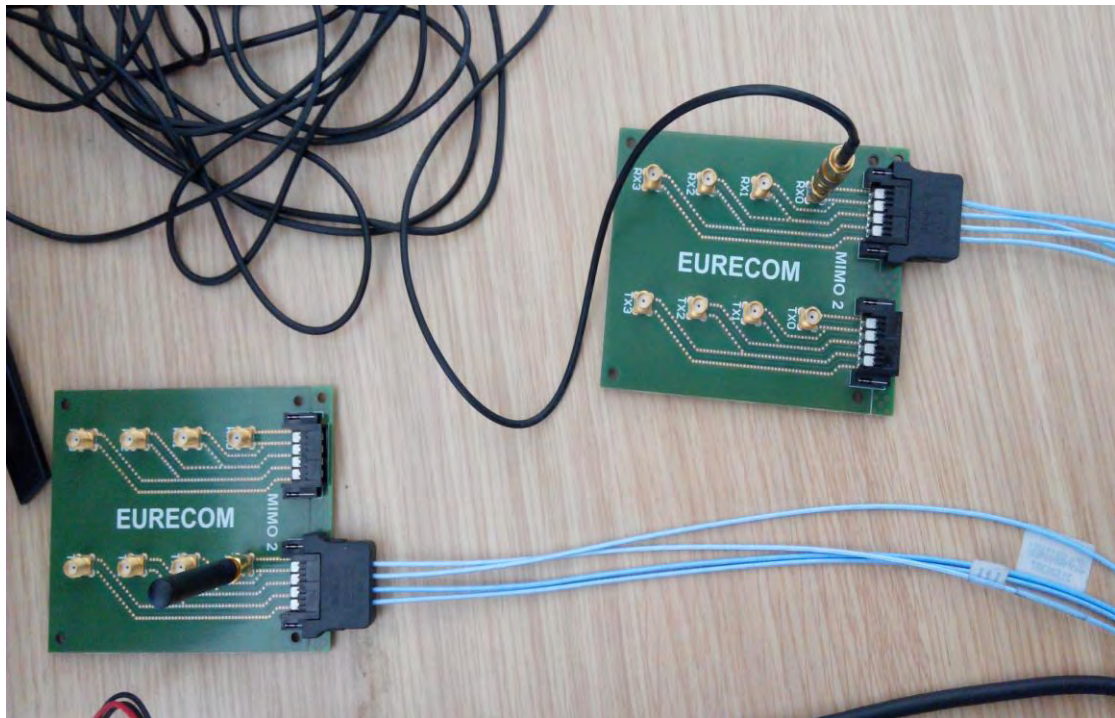
*Εικόνα 5.3: Το υπολογιστικό σύστημα της διάταξης*



Στην πρώτη φάση της υλοποίησης χρειάστηκε να γίνει μια εξοικείωση με την πλατφόρμα του OpenAirInterface. Είναι ένα προϊόν εργασίας αρκετών ατόμων στο ινστιτούτο Eurecom της Γαλλίας και δημιουργεί διαμορφώσιμα δίκτυα χρησιμοποιώντας hardwareόπως FPGA (Field Programmable Gate Array) και το αντίστοιχο λογισμικό που την πλατisivώνει. Αυτό το λογισμικό χωρίζεται σε έξι κύρια παραρτήματα καθένα από τα οποία συντελεί τη διαμόρφωση και μιας διαφορετικής λειτουργίας του LTE πρωτοκόλλου. Η έκδοση του κώδικα είναι διαθέσιμη προς λήψη για τοπική χρήση μέσω της επίσημης σελίδας του OpenAirInterface [7].



**Εικόνα 5.4:** Η πλακέτα ExMIMO2

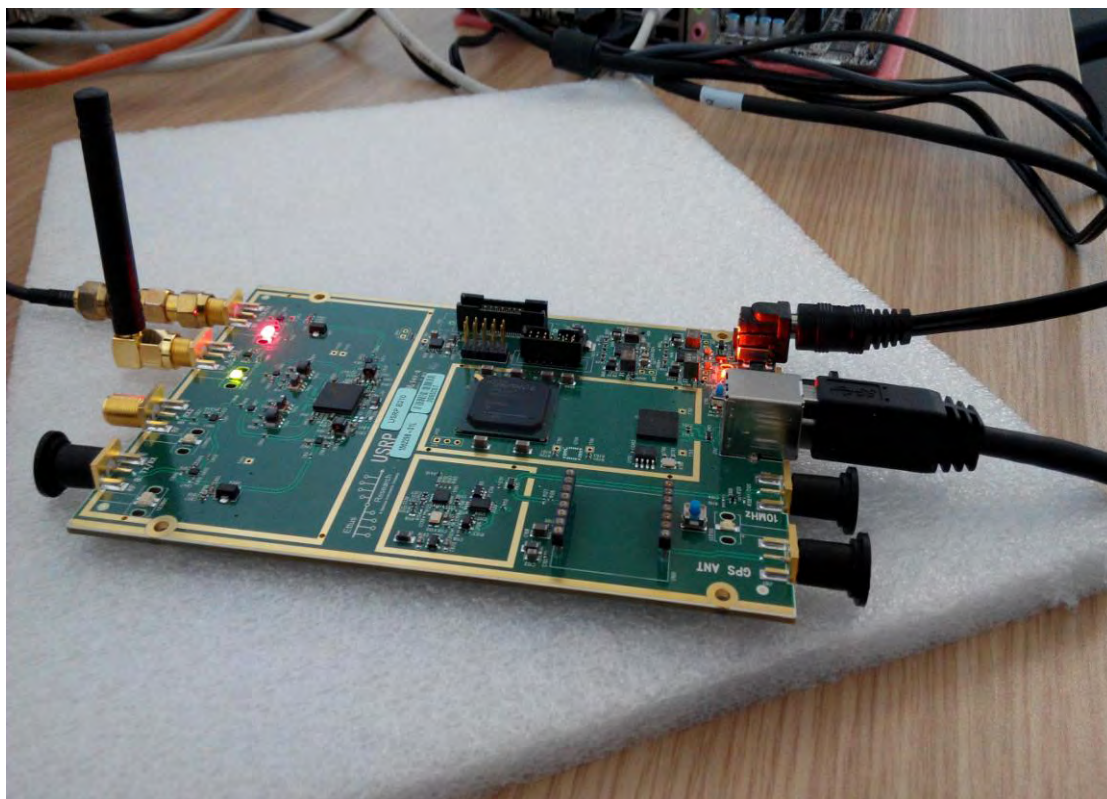


**Εικόνα 5.5:** Οι κεραίες εκπομπής και λήψης

Για την χρήση της πλατφόρμας στη συγκεκριμένη πειραματική διάταξη χρησιμοποιήθηκε το εσωτερικό testbed του NITLab, στο ΕΚΕΤΑ (Εθνικό Κέντρο Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης). Εγκαταστάθηκε και έπειτα εκτελέστηκε στους εσωτερικούς κόμβους του δικτύου σε μορφή εικόνας το λογισμικό ΟΑΙ, σύμφωνα με τις οδηγίες του Ινστιτούτου Eurecom. Με αυτό τον τρόπο κατέστη εφικτή η απομακρυσμένη εφαρμογή και χρήση των δικτύων. Χρησιμοποιώντας απομακρυσμένα την πλατφόρμα Linux και μέσω του τερματικού, χρειαζόταν αρχικά να γίνει σύνδεση μέσω ssh σε κάποιον κόμβο του εργαστηρίου με δημόσια IP διεύθυνση και στη συνέχεια σύνδεση (πάλι μέσω ssh) σε συγκεκριμένους εσωτερικούς κόμβους του testbed. Φορτώνοντας την εικόνα του λογισμικού σε κόμβους μπορούσε να διαμορφωθεί κάποιος ως κόμβος εκπομπής eNB και κάποιος άλλος ως UE και να τελεστεί μεταφορά δεδομένων μεταξύ των.

Όσον αφορά το κομμάτι της φασματογραφίας αρχικά επρόκειτο να χρησιμοποιηθεί η ίδια η πλατφόρμα του ExMIMO, ωστόσο διαμορφωμένη κατάλληλα για να προστεθεί και δυνατότητα εκπομπής σε μη αδειοδοτημένες συχνότητες, πέραν των εξουσιοδοτημένων που χρησιμοποιεί το LTE. Σε αυτή την περίπτωση θα απαιτούντο αλλαγές και στον κώδικα UHD (USRP Hardware Driver) που χρησιμοποιούσε αυτό το υλικό, ώστε να μπορέσει να εκπέμψει και σε μη προκαθορισμένα κανάλια. Επιπλέον για να επιτευχθεί emulating και σε LTE κανάλια θα χρειαζόνταν εκτεταμένες αλλαγές στον κώδικα του GNURadio (στο τοπικό στιγμιότυπο του). Εν είδει ευτυχούς συγκυρίας πρόσφατα πραγματοποιήθηκε ενσωμάτωση του OpenAirInterface σε ένα διαφορετικό τύπο USRPs, το USRPB210. Χρησιμοποιώντας λοιπόν αυτό τον διαφορετικό τύπο USRP, χρειάστηκαν μόνο μερικές αλλαγές στον κώδικα UHD, προκειμένου να εξετάζει με δυναμικό τρόπο ένα εύρος συχνοτήτων και να καθορίζεται το USRP ώστε να εκπέμψει σε αυτή. Αυτές οι λειτουργικότητες υλοποιήθηκαν

με τη βοήθεια μερικών Python scripts, με συντονιστικό ρόλο, όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια.



**Εικόνα 5.6:** Το USRP B210 του πειράματος

### 5.3 Τροποποιήσεις στη δομή

Εφόσον ολοκληρώθηκε το αρχικό στήσιμο και συσχέτιση των πρωτοκόλλων αυτών, έπρεπε να γίνουν κάποιες ρυθμίσεις, ώστε να εξασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία τους. Τα μηχανήματα εκπομπής ρυθμισμένα στο πρωτόκολλο του LTE, προεπιλεγμένα λειτουργούν στην μπάντα του LTE 7 (δηλαδή 2,26 GHz – 2,68 GHz). Η τεχνολογία εκπομπής που χρησιμοποιεί η πλατφόρμα OAI εντούτοις, ονομάζεται ExMIMO2 (από το Express Multiple Input – Multiple Output) και δεν έχει δυνατότητα εκπομπής στις μη αδειοδοτημένες συχνότητες των 5 GHz. Ως ένα είδος προσαρμογής (εξαιτίας αυτού του περιορισμού) το πρωτόκολλο επικοινωνίας που προτείνεται στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, δοκιμάστηκε στη χαμηλότερη μπάντα του LTE 13 (δηλαδή 746 MHz – 756 MHz). Αυτή βέβαια η διαφοροποίηση έχει μηδαμινό αντίκτυπο, καθώς οι μηχανισμοί ενδιαφέροντος εντοπίζονται και στα δύο είδη ευρών συχνοτήτων.

Μόλις ένας κόμβος διαμορφώνεται για να λειτουργήσει ως κόμβος εκπομπής (eNodeB), δέχεται ως όρισμα ένα αρχείο διαμόρφωσης (configuration file - .conf), το οποίο

ορίζει τις ζωτικές για λειτουργία μεταβλητές του κόμβου, όπως κεντρική συχνότητα downlink, το uplink offset, το κέρδος της κεραίας κλπ. Στο Παράρτημα Β' εντίθεται ένα τέτοιο αρχείο. Σε περίπτωση που υπάρχει ασυμφωνία στα δεδομένα που αναγράφονται μέσα στο αρχείο και στα ορίσματα του eNB, τότε αυτός δε δύναται να υλοποιηθεί. Επιπλέον, το OpenAirInterface έχει προδιαγεγραμμένες σε μορφή struct (γνωστή δομή δεδομένων της γλώσσας C, με μορφή πίνακα), συγκεκριμένες προεπιλεγμένες διαμορφώσεις (μπάντα, συχνότητα κατερχόμενης και ανερχόμενης ζεύξης κλπ.), όπου μόνο με αυτές μπορεί να συμμορφωθεί. Επομένως, αρχικά απαιτήθηκε η πραγματοποίηση αλλαγών στον κώδικα του OAI και η προσθήκη νέων διαμορφώσεων σε μη αδειοδοτημένο φάσμα, για την εξυπηρέτηση του σκοπού αυτής της πρότασης για λειτουργία του LTE Unlicensed.

Εφόσον πραγματοποιήθηκαν αυτές οι τροποποιήσεις στα απαιτούμενα αρχεία του OpenAirInterface, δοκιμάστηκε η λειτουργία του στο testbed. Χρησιμοποιώντας δύο κόμβους και ενεργοποιώντας τον ένα ως κόμβο εκπομπής και τον δεύτερο ως κόμβο λήψης εξακριβώθηκε η ομαλή λειτουργία του OAI στις νέες συχνότητες. Στη συνέχεια διαμορφώθηκε η λειτουργία του spectrum sensing με τη χρήση των USRPs ώστε να εξετάζει το συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων που ενδιέφερε το πείραμα και να αποθηκεύει τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε ένα αρχείο κειμένου, μέσα στον αρχικό (root) κατάλογο της πλατφόρμας.

Το τελευταίο κομμάτι (και ίσως το ζωτικότερο για την ορθή λειτουργία του προτεινόμενου μηχανισμού) ήταν η σύνδεση των δύο προηγούμενων λειτουργικότητων σε ένα κοινό πλαίσιο, ώστε να λειτουργούν αρμονικά. Το προσχέδιο της πρότασης στη συγκεκριμένη διατριβή προβλέπει την διενέργεια φασματογραφίας σε τακτικά/περιοδικά διαστήματα, ούτως ώστε να ανιχνεύονται οι συχνότητες με τις ευνοϊκότερες συνθήκες εκπομπής, ήτοι με τη μικρότερη παρουσία σήματος και υπόβαθρο θορύβου. Αυτή η λειτουργία υλοποιήθηκε με ένα αρχείο κώδικα σε γλώσσα (προγραμματισμού) Python, το οποίο ήταν ουσιαστικά ένας wrapper για τη χρήση των αποτελεσμάτων του spectrum sensing από το OAI και αποτελεί τη γέφυρα μετάβασης από τη λειτουργία φασματογραφίας στη λειτουργία εκπομπής.

Βάσει του wrapper ανά περιοδικά διαστήματα (η περίοδος είναι πλήρως διαμορφώσιμη) γίνεται βολιδοσκόπηση ενός σταθερού παραθύρου συχνοτήτων μέσα στο επιλεγμένο κανάλι και έπειτα πραγματοποιείται η σύγκριση των επιμέρους συνθηκών προκειμένου να επιλέγεται το ευνοϊκότερο παράθυρο εκπομπής, βάσει του κανόνα *ολικού βέλτιστου*. Συγκεκριμένα, το USRP χρησιμοποιεί ένα σταθερό παράθυρο για τη διαπέραση του καναλιού, το οποίο χαρακτηρίζεται από βήμα ολίσθησης 1 MHz. Κατά συνέπεια το κανάλι διαπερνάται από ένα παράθυρο σταθερού εύρους και από αυτά τα επιμέρους παράθυρα που προκύπτουν, αποθηκεύεται μόνο ένα, αυτό που χαρακτηρίζεται από τις βέλτιστες συνθήκες επικοινωνίας. Η απόφαση για τον βαθμό ευνοϊκότητας κάθε παραθύρου, λαμβάνεται βασιζόμενη σε έναν κανόνα ολικού βέλτιστου. Ο υπολογισμός αυτού του μέτρου σύγκρισης είναι ένας βεβαρημένος μέσος όρος, που αποτελείται από τα παρακάτω τέσσερα χαρακτηριστικά του αντίστοιχου παραθύρου συχνοτήτων, ιεραρχημένα ανάλογα με τη βαρύτητα τους στον υπολογισμό της τελικής τιμής του μέτρου:

1. Ο μέσος όρος έντασης σήματος: Προσμετράται η ένταση των σημάτων σε κάθε συχνότητα του παραθύρου ελέγχου και αποτυπώνεται βάσει του μέσου όρου των εντάσεων αυτών, μια γενική εικόνα για τις παρεμβολές στο παράθυρο.
2. Η τυπική απόκλιση έντασης σήματος: Μερικές φορές το κανάλι με τον μικρότερο μέσο όρο έντασης παρεμβολών δεν είναι το προτιμότερο, καθώς μπορεί να υπάρχει μια συνιστώσα υψηλού μεγέθους κοντά στην κεντρική συχνότητα (όπου και θα εντοπιστεί η μεγαλύτερη ένταση εκπομπής). Σε περίπτωση που οι υπόλοιπες συνιστώσες είναι σχετικά μικρές, τότε δεν αποτυπώνεται το αντίκτυπο της υψηλής παρεμβολής στον μέσο όρο. Αντίστοιχα σε ένα παράθυρο μπορεί να υπάρχουν πολλές μικρές συνιστώσες διατηρώντας ένα μέσο όρο ίσως μεγαλύτερο. Εντούτοις, το δεύτερο κανάλι, χωρίς κάποια ισχυρή παρεμβολή και με τη μεγαλύτερη εξομάλυνσή του, ίσως είναι προτιμότερο από το πρώτο. Αυτά λοιπόν τα σενάρια προβλημάτων καλείται να επιλύσει η δεύτερη συνιστώσα του μέτρου σύγκρισης.
3. Ο μέσος όρος έντασης θορύβου: Κάθε συχνότητα έχει ένα συγκεκριμένο υπόβαθρο θορύβου, το οποίο μαζί με τις παρεμβολές δυσχεραίνει κι αυτό την επικοινωνία. Προσμετράται λοιπόν η ένταση του θορύβου σε κάθε συχνότητα του παραθύρου ελέγχου και υπολογίζεται ο μέσος όρος τους.
4. Η τυπική απόκλιση έντασης θορύβου: Στο ίδιο πνεύμα με την αντίστοιχη συνιστώσα για την ένταση παρεμβαλλόμενων σημάτων, η τυπική απόκλιση θορύβου είναι ένα μέτρο ομαλότητας για την κατανομή του θορύβου στις επιμέρους συχνότητες.

Εφόσον υπολογιστεί το βέλτιστο παράθυρο εκπομπής, ο συντονιστικός αλγόριθμος επεξεργάζεται το αρχείο διαμόρφωσης, που χρησιμοποιεί ο πομπός. Αναθέτοντας στις ζητούμενες μεταβλητές (κυρίως συχνότητες uplink και downlink) τις τιμές που προέκυψαν από την ανίχνευση των συχνοτήτων, καθορίζει ουσιαστικά τις συνθήκες εκπομπής του επόμενου γύρου.

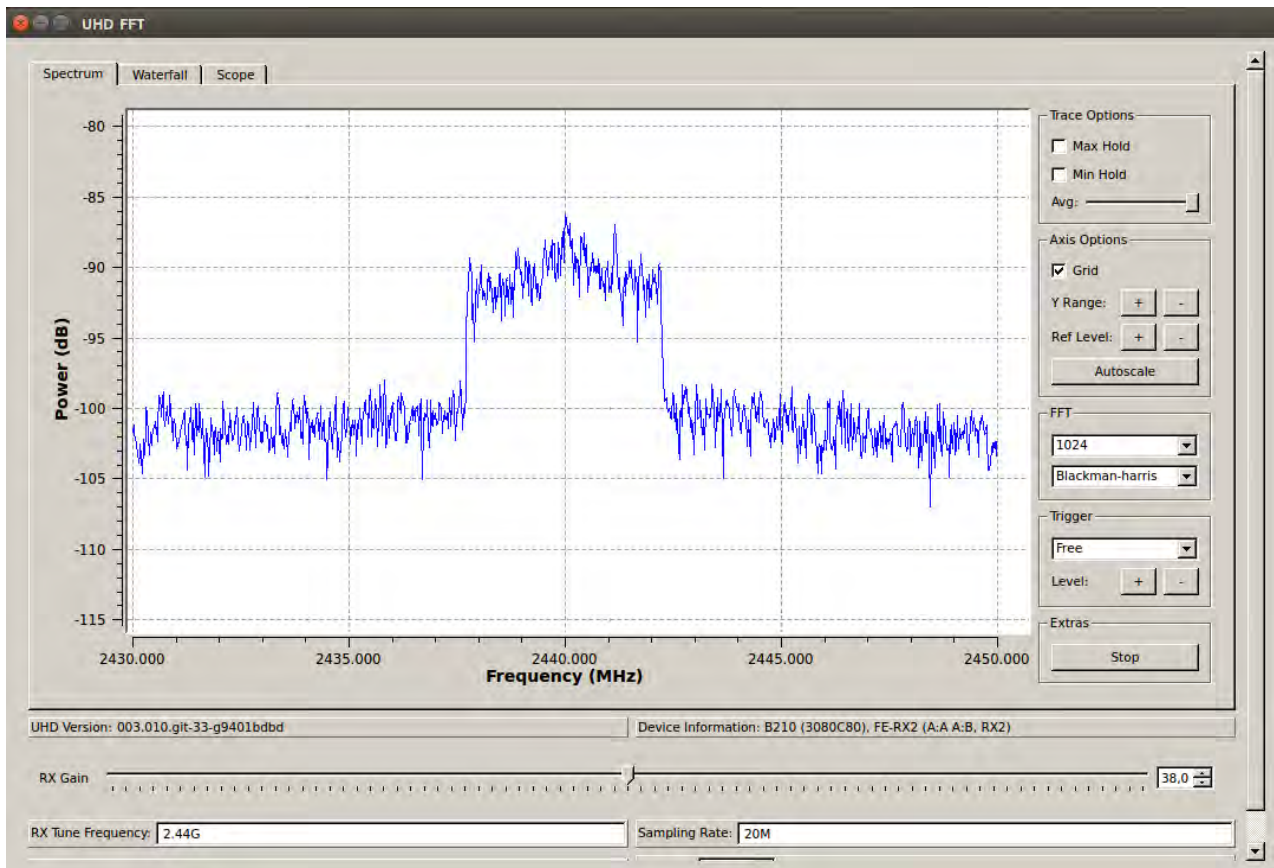
Στο τελικό κομμάτι της λειτουργίας ο κόμβος-πομπός (eNodeB) διαφημίζει στον κόμβο - χρήστη (UE) τις νέες συνθήκες ζεύξης, ώστε να συνεχιστεί η επικοινωνία με τα νέα δεδομένα. Αυτό πραγματοποιήθηκε με χρήση `rythonscripts`, τα οποία υλοποίησαν τον απαραίτητο επικοινωνιακό δίαυλο μεταξύ των δύο κόμβων (eNB και UE), με μορφή TCP sockets. Συγκεκριμένα, όταν ολοκληρωθεί στον wrapper η λειτουργία του spectrum sensing και διαπιστωθεί βάσει του ολικού βέλτιστου το ευνοϊκότερο παράθυρο συχνοτήτων για εκπομπή, ανοίγεται ένας TCP δίαυλος προς τη συγκεκριμένη διεύθυνση IP του κόμβου-χρήστη. Μέσα στον δίαυλο περνάει η κεντρική συχνότητα του παραθύρου εκπομπής. Από την άλλη, ο κόμβος χρήστης πραγματοποιεί τη σύνδεση στο TCP socket και αναμένει δεδομένα από τον πομπό. Μόλις πραγματοποιηθεί η λήψη της συγκεκριμένης πληροφορίας, εκτελείται η ενεργοποίηση του χρήστη λαμβάνοντας ως όρισμα την κεντρική συχνότητα του ευνοϊκότερου παραθύρου εκπομπής και αυτός εκπέμπει πλέον στο βέλτιστο κανάλι.

## 5.4 Προσεγγίσεις αντιμετώπισης θέματος

Η βέλτιστη δυνατή προσέγγιση του θέματος ενεργοποίησης LTE πρωτοκόλλου σε μη αδειοδοτημένο φάσμα θα ήταν η χρήση του μηχανισμού αυτού στο μη αδειοδοτημένο φάσμα της μπάντας 5 GHz, εφόσον εκεί πρόκειται να υλοποιηθεί το LTE – U. Εντούτοις, υπήρξαν φυσικοί περιορισμοί στις δυνατότητες του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε, οι απέτρεψαν την υλοποίηση του ιδανικότερου σεναρίου. Συγκεκριμένα, η πλακέτα ExMIMO2 της πλατφόρμας OAI, λειτουργεί με απόγειο ραδιοσυχνότητες τα 4,4 GHz. Επομένως λόγω αυτού του φυσικού λειτουργικού περιορισμού κατέστη αδύνατη η δημιουργία ενός (τοπικού) δικτύου στις ελεύθερες συχνότητες των 5 GHz, με τη χρήση αυτού του προεπιλεγμένου υλικού.

Εντούτοις, στα πλαίσια του πειράματος μόλις έγιναν εύκαιρα τα USRPs B210, λόγω της λειτουργικής ανωτερότητας τους εντάχθηκαν στην πλατφόρμα υλοποίησης, ως κύριοι φορείς του spectrum sensing. Τα εν λόγω USRPs έχουν τη δυνατότητα λειτουργίας μέχρι τη συχνότητα των 6GHz. Επομένως, με την καινούρια προσθήκη αυτή, αποπειράθηκε η δημιουργία ενός δικτύου LTE – U στις συχνότητες των 5 GHz. Αν και πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένες δοκιμές σε αυτή τη διαμόρφωση δικτύου, σύντομα κατέστη προφανές ότι δεν ηδύνατο η λειτουργία ενός δικτύου LTE – U στο μη αδειοδοτημένο φάσμα των 5 GHz, με τον τρέχον εξοπλισμό. Συγκεκριμένα, ο κώδικας Openair4G, ο οποίος - λόγω της αμιγούς πειραματικής μορφής που βρίσκεται ακόμα - είναι ιδιαίτερα ασταθής στη λειτουργία του, επέδειξε κάκιστη λειτουργική συμπεριφορά μη μπορώντας να δημιουργήσει ζεύξη μεταξύ των δύο κόμβων επικοινωνίας. Γενικότερα, έπειτα από τη διενέργεια πληθώρας πειραμάτων με διάφορες διαμορφώσεις παρατηρήθηκε ότι σε συχνότητες ανώτερες των 2,6 GHz, εμφανίζονται πάρα πολλές περιπτώσεις buffer overruns.

Κατά συνέπεια, η επόμενη λογική προσέγγιση για την εφαρμογή μηχανισμού εκπομπής LTE σε δίκτυα μη αδειοδοτημένων συχνοτήτων ήταν η χρήση της μπάντας των 2,4 GHz. Αυτή είναι μία μπάντα ελεύθερων συχνοτήτων, την οποία χρησιμοποιούν πληθώρα τεχνολογιών, όπως οι WiFi (802.11b/g/n), Bluetooth, φούρνοι μικροκυμάτων και κλειδιά αυτοκινήτων. Το LTE πρωτόκολλο, ωστόσο, δεν έχει σχεδιαστεί για λειτουργία σε αυτές τις συχνότητες. Συνεπώς, χρειάστηκε να γίνει τροποποίηση του λογισμικού της πλατφόρμας OAI, προκειμένου να εισαχθούν οι απαραίτητοι μηχανισμοί για να επιτραπεί η υλοποίηση ενός Long Term Evolution δικτύου στις συχνότητες των 2,4 GHz. Αυτό επετεύχθη όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.7, εντούτοις προέκυψαν νέες δυσκολίες, που απέτρεψαν την χρήση αυτών των συχνοτήτων.



**Εικόνα 5.7:** Στιγμιότυπο λειτουργίας OAI στη μπάντα των 2,4 GHz

Μολονότι επετεύχθη η δημιουργία ενός τοπικού δικτύου LTE στις συχνότητες των 2,4 GHz, δεν ήταν εφικτή η χρήση του για εκτίμηση λειτουργίας του μηχανισμού που προτείνεται στα πλαίσια αυτή της διατριβής, καθώς ήταν ανέφικτη η σύνδεση του κόμβου χρήστη (UE) στον κόμβο eNB. Συγκεκριμένα, λόγω του εξαιρετικά μεγάλου αριθμού τεχνολογιών που στεγάζονται σε αυτές τις συχνότητες, υπήρχαν και πολλά σήματα, τα οποία δημιουργούσαν πολύ υψηλά επίπεδα θορύβου και παρεμβολών. Αυτή η φασματική κατάσταση, σε συνδυασμό με την υψηλή αστάθεια του πειραματικού κώδικα του OAI και τις σχετικά περιορισμένες δυνατότητες του υλικού δικτύωσης, καταστούσαν αδύνατη τη σύνδεση κόμβων – χρηστών, στους κόμβους εκπομπής.

Έτσι, λοιπόν, η εξέλιξη της συγκεκριμένης εργασίας οδηγήθηκε στην τελική προσέγγιση. Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση η κάρτα ExMIMO 2, χρησιμοποιήθηκε ως κόμβος εκπομπής (eNB) και ένα USRP B210 ως κόμβος – πελάτης (UE), αυτή τη φορά σε μια εγγενή συχνότητα του LTE. Το πειραματικό δίκτυο LTE-U υλοποιήθηκε στην LTE 13 μπάντα (DL: 746 MHz – 756 MHz και UL: 777 MHz – 787 MHz), η οποία, επίσης, ήταν και το παράθυρο εφαρμογής του spectrum sensing. Αυτή η συχνότητα δε δημιούργησε κάποια επιπλέον εμπόδια στην υλοποίηση του δικτύου, καθώς οι κόμβοι μπορούσαν να επικοινωνήσουν χρησιμοποιώντας τον μηχανισμό OAI και βάσει τη χρήσης των ελληνικών ραδιοσυχνοτήτων, εμφανίζονται μικρά επίπεδα θορύβου και παρεμβολών.

Για αυτό το στάδιο του spectrum sensing και μετά το πέρας του ελέγχου και την εύρεση της βέλτιστης συχνότητας εκπομπής, το αρχικό σχέδιο υλοποίησης προέβλεπε στη χρήση των ενσωματωμένων συναρτήσεων του λογισμικού openair4G, για τη διαμόρφωση της επικοινωνίας σε επίπεδο συχνοτήτων. Συγκεκριμένα, υπάρχουν στον κώδικα συναρτήσεις με χρήσιμες λειτουργικότητες, όπως μεταβολή της κεντρικής συχνότητας εκπομπής του κόμβου eNB και τροποποίηση του αρχείου διαμόρφωσής του. Εντούτοις αυτό το είδος αυτοματοποίησης δεν κατέστη εφικτό, καθώς οι συναρτήσεις αυτές βρίσκονταν σε μη λειτουργική κατάσταση. Κατά συνέπεια, μετά την εύρεση του βέλτιστου παραθύρου εκπομπής, η μεταβίβαση στις νέες συχνότητες, η τροποποίηση του αρχείου διαμόρφωσης eNB και ο συντονισμός με τον κόμβο UE, υλοποιήθηκαν με μη αυτοματοποιημένο τρόπο, χρησιμοποιώντας python scripts ως προσαρμογείς (adapters) και για συντονισμό.

## 5.5 LTE δίκτυο επικοινωνίας με δυναμική διαχείριση φάσματος

Μετά το πέρας της σύνδεσης των επιμέρους στοιχείων του μηχανισμού και τη σύδεση τους με λειτουργικό τρόπο (συμφώνως με τις διαδικασίες που περιγράφονται στις προηγούμενες ενότητες), ήταν πλέον εφικτή η υλοποίηση του μηχανισμού. Σε αυτή τη διαμόρφωση υλοποίησης, το ExMIMO 2 λειτουργεί ως κόμβος εκπομπής και ένα USRP B210 ως κόμβος χρήστης ο οποίος συνδέεται στο δίκτυο που δημιουργείται από τον πρώτο. Μόλις επιτευχθεί η αρχική ζεύξη αυτών των δύο άκρων, ενεργοποιείται από τον κόμβο eNB η λειτουργία της φασματογραφίας με τη χρήση ενός USRP B210. Με το πέρας αυτής της λειτουργίας, ενεργοποιείται το αρχείο (python script) wrapper, το οποίο διατρέχει τα αποτελέσματα της φασματογραφίας και επιλέγει τη βέλτιστη συχνότητα εκπομπής. Ο κώδικας παρατίθεται στο Παράρτημα Β' και η λειτουργία του μπορεί να χωριστεί στα παρακάτω στάδια:

1. **Spectrum sensing:** Αρχικά ενεργοποιείται το USRP για να διερευνήσει τις επιλεγμένες συχνότητες με τη χρήση Energy Detection spectrum sensing. Για κάθε βήμα που εξετάζει αποθηκεύει σε ένα αρχείο κειμένου τη συχνότητα που εξέτασε την ένταση σήματος (σε dB) που εντόπισε και το υπόβαθρο θορύβου (επίσης σε dB) που προσμέτρησε.
2. **Έλεγχος συχνοτήτων – κανόνας total optimization:** Στη συνέχεια γίνεται προσπάθεια εύρεσης της βέλτιστης συχνότητας. Το σύνολο των ανιχνευθέντων συχνοτήτων διαπερνώνται από ένα παράθυρο ολίσθησης, το οποίο λόγω του τρόπου εκπομπής του ExMIMO, περιέχει πέντε συνεχόμενες συχνότητες (δηλαδή εύρος 5 MHz) και σε κάθε επανάληψη ολισθαίνει με βήμα 1 MHz. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται N-4 παράθυρα (όπου N ο αριθμός των επιμέρους ανιχνευθέντων συχνοτήτων), αλληλοκαλυπτόμενα, τα οποία συγκρίνονται βάσει



του κανόνα ολικής βελτιστοποίησης (total optimization rule). Αυτός ο κανόνας αποτελεί έναν σταθμισμένο μέσο όρο (περιγράφεται αναλυτικά στην Ενότητα 5.3) και αποτιμά την ποιότητα εκπομπής κάθε παραθύρου βάσει την ισχύς σήματος και θορύβου που ανιχνεύθηκαν σε αυτό. Στη διενέργεια αυτού του κανόνα προστίθενται και οι έλεγχοι άκρου, οι οποίοι ελέγχουν αν το παράθυρο είναι ολόκληρο μέσα στο κανάλι ανίχνευσης. Σε περίπτωση που δεν ικανοποιούνται οι εν λόγω έλεγχοι, το παράθυρο απορρίπτεται (κι ας ήταν το βέλτιστο συμφώνως του κανόνα ολικού βέλτιστου). Μόλις βρεθεί το βέλτιστο παράθυρο εκπομπής επιλέγεται η κεντρική συχνότητα του ως βέλτιστη συχνότητα εκπομπής, βάσει της οποίας θα συνεχιστεί ο επόμενος κύκλος επικοινωνίας.

3. **Τροποποίηση αρχείου διαμόρφωσης κόμβου eNB:** Κάθε κόμβος εκπομπής διαμορφώνεται βάσει ενός αρχείου διαμόρφωσης (ένα δείγμα τέτοιου αρχείου παρατίθεται στο Παράρτημα Β'), το οποίο ρυθμίζει κάθε στοιχείο του τρόπου εκπομπής του. Μετά την εύρεση λοιπόν της βέλτιστης συχνότητας εκπομπής στο προηγούμενο βήμα, ο wrapper τροποποιεί το αρχείο αυτό ώστε να υπακούει στην επιθυμητή διαμόρφωση. Με το πέρας της τροποποίησης του αρχείου αυτού, ο κόμβος eNB είναι έτοιμος να εκπέμψει στη νέα, βέλτιστη συχνότητα για τον επόμενο κύκλο επικοινωνίας.
4. **Μεταβίβαση της βέλτιστης συχνότητας στον UE:** Στο τέλος της λειτουργίας στην πλευρά του κόμβου εκπομπής, ο wrapper δημιουργεί έναν διάυλο επικοινωνίας προς τον κόμβο – χρήστη, ώστε να τον ενημερώσει για την (νέα) βέλτιστη συχνότητα εκπομπής. Αυτός ο διάυλος υλοποιείται με τη μορφή TCP sockets μέσω των οποίων μεταβιβάζεται η απαραίτητη πληροφορία από τον κόμβο eNB στον κόμβο UE.
5. **Επανενεργοποίηση της εκπομπής:** Μόλις διαφημιστεί η βέλτιστη συχνότητα εκπομπής στον UE, ο wrapper ενεργοποιεί εκ νέου την εκπομπή του κόμβου eNB. Πλέον ο κόμβος εκπομπής αρχίζει να εκπέμπει συμφώνως των νέων βέλτιστων δεδομένων.

Η λειτουργία συντονισμού του συστήματος συνεχίζεται πλέον στη μεριά του κόμβου – χρήστη. Η client side του wrapper, μόλις λάβει την πληροφορία από το TCP socket, ενεργοποιεί τον κόμβο UE. Τα ορίσματα που καλούνται στην υλοποίηση του πλέον θα είναι τροποποιημένα, ώστε να συντονίζεται στη βέλτιστη συχνότητα εκπομπής που έλαβε από τον κόμβο εκπομπής. Με αυτόν τον τρόπο λειτουργεί ο προτεινόμενος μηχανισμός και οδηγεί συνεχώς στην εύρεση αυτής της βέλτιστης συχνότητας, η οποία θα επιτρέπει την επικοινωνία των κόμβων σε εύρη με τη μικρότερη παρουσία έτερων σημάτων (παρεμβολές) και τον λιγότερο θόρυβο.

Η λειτουργία αυτού του σχεδίου υλοποίησης LTE επικοινωνίας με δυναμική διαχείριση φάσματος ελέγχθηκε πειραματικά σε ένα δίκτυο testbed. Συλλέχθηκαν δεδομένα από σειρά πειραμάτων, τα οποία δοκίμασαν τον συγκεκριμένο μηχανισμό επικοινωνίας σε διάφορες διαμορφώσεις. Επιπλέον συγκρίθηκε η λειτουργία με δυναμικής διαχείριση φάσματος, με την λειτουργία σταθερής διαμόρφωσης του τρόπου εκπομπής. Τα

προαναφερθέντα αποτελέσματα, καθώς και τα πορίσματα που απορρέουν από την ανάλυση τους, παρουσιάζονται στο κεφάλαιο που ακολουθεί.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ:** **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ**

### **6.1 Πειραματική εφαρμογή του μηχανισμού**

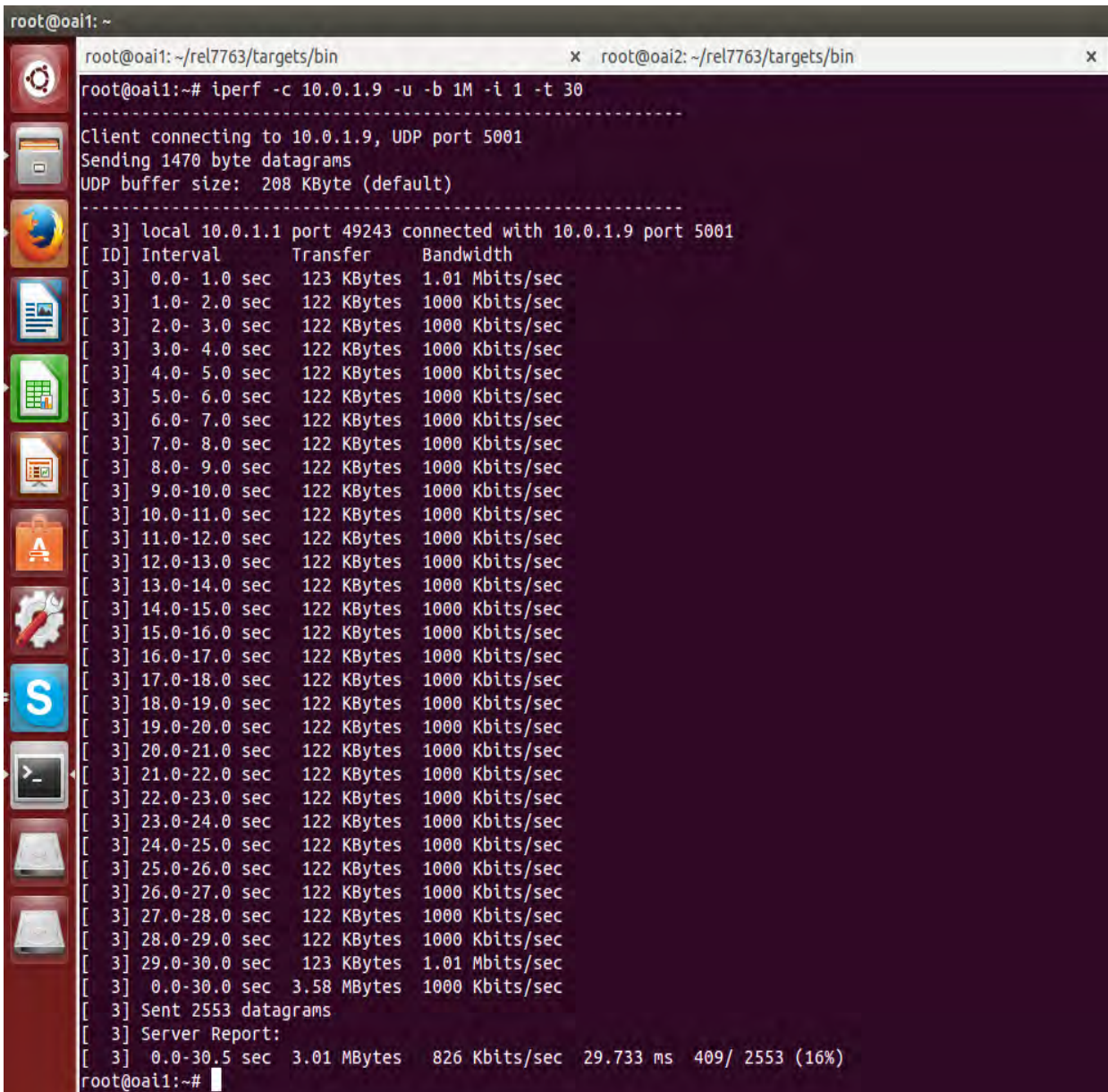
Για την υλοποίηση και αξιολόγηση του μηχανισμού που προτείνεται στα πλαίσια της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής διατριβής, αξιοποιήθηκε το εσωτερικό δίκτυο κόμβων στο εργαστήριο Nitlab. Υλοποιήθηκε μεγάλος αριθμός πειραμάτων, υπό διαφορετικές διαμορφώσεις και σενάρια, ώστε να διαπιστωθεί αφενός η λειτουργία του LTE δικτύου με δυναμική χρήση συχνοτήτων και αφετέρου να συγκριθεί με τη συμπεριφορά του αντίστοιχου αλγορίθμου σταθερού φάσματος. Στη συνέχεια, έγινε εκτίμηση των αποτελεσμάτων από τα πειράματα και εξήχθησαν συγκεκριμένα πορίσματα για τη λειτουργία του μηχανισμού και των επιμέρους στοιχείων γενικότερα.

Σε όλα τα σενάρια των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν δύο κόμβοι, ο ένας ως eNode B και ο άλλος σε ρόλο User Equipment. Μεταξύ των εγκαταστάθηκε επικοινωνία δεδομένων βάσει των προδιαγραφών του πρωτοκόλλου LTE, αλλά υπό διαφορετικές ομάδες συνθηκών κάθε φορά. Για να αξιολογηθεί κάθε διαμόρφωση χρησιμοποιήθηκε η λειτουργία iperf, η οποία δημιουργεί UDP πακέτα από τον κόμβο εκπομπής στον κόμβο λήψης και ελέγχει στατιστικά της επικοινωνίας, όπως πόσα πακέτα παραδόθηκαν, με τι ταχύτητα κλπ. Επομένως, αποτέλεσε ένα μέτρο της απόδοσης για κάθε διαμόρφωση σχετικά με την αξιοπιστία και την ταχύτητα μετάδοσης πληροφορίας που την χαρακτήριζε, τα δύο σημαντικότερα, άλλωστε, χαρακτηριστικά κάθε ασύρματης, κινητής τηλεπικοινωνίας. Βάσει αυτών των δεδομένων έγινε και η αξιολόγηση του μηχανισμού.

Σε αυτό το σημείο χρειάζεται να αναφερθούν κάποια σημεία που δε φαίνονται από την στατιστική ανάλυση των πειραμάτων. Στη τρίτη και τέταρτη κατηγορία πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ένας κόμβος – παρεμβολέας, ο οποίος παρήγαγε διαρκώς κίνηση Orthogonal Frequency-Division multiplexing (OFDM), δυσχεραίνοντας κατά αυτόν τον τρόπο την επικοινωνία των δύο κόμβων. Σε αυτού του είδους τα πειράματα όπου χρησιμοποιήθηκαν οι προεπιλεγμένες ρυθμίσεις με παρουσία κόμβου παρεμβολής εμφανίστηκε ιδιαίτερα μεγάλη αποτυχία ζεύξης. Εκτός από τον συνήθη αριθμό από αποτυχημένες απόπειρες λόγω υψηλής αστάθειας του κώδικα orrepair, εμφανίστηκαν πολλές ακόμα αποτυχίες που ανάγονται στην επένεργεια της παρεμβολής, καθώς δεν υπήρξε κάτι αντίστοιχο όταν χρησιμοποιήθηκε δυναμικό φάσμα. Επιπλέον, στα πειράματα όπου χρησιμοποιήθηκε δυναμική χρήση φάσματος, υπό παρουσία παρεμβολέα, οι τυπικές αποκλίσεις εμφανίζονται λίγο ανεβασμένες, διότι σε μικρές ποσότητες (σχετικά) εμφανίζονταν ελαφρώς κακές (ποιοτικά) συνδέσεις. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τέσσερις κύριες διαμορφώσεις πειραμάτων που υλοποιήθηκαν για τη δοκιμή του μηχανισμού και ορισμένα βασικά στατιστικά αυτών, από ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα πειραμάτων:

- **Απλή επικοινωνία με προεπιλεγμένες ρυθμίσεις**

- Συχνότητα εκπομπής: *σταθερή*
- Μέση τιμή throughput (Mbytes): *3,066*
- Τυπική απόκλιση throughput (Mbytes): *0,032*
- Μέση τιμή bitrate (Kbps): *852,5*
- Τυπική απόκλιση bitrate (Kbps): *12,6*
- Μέση τιμή μη παραδοθέντων πακέτων (από 2553): *366,8 (14%)*
- Τυπική απόκλιση μη παραδοθέντων πακέτων (από 2553): *22,6 (1%)*

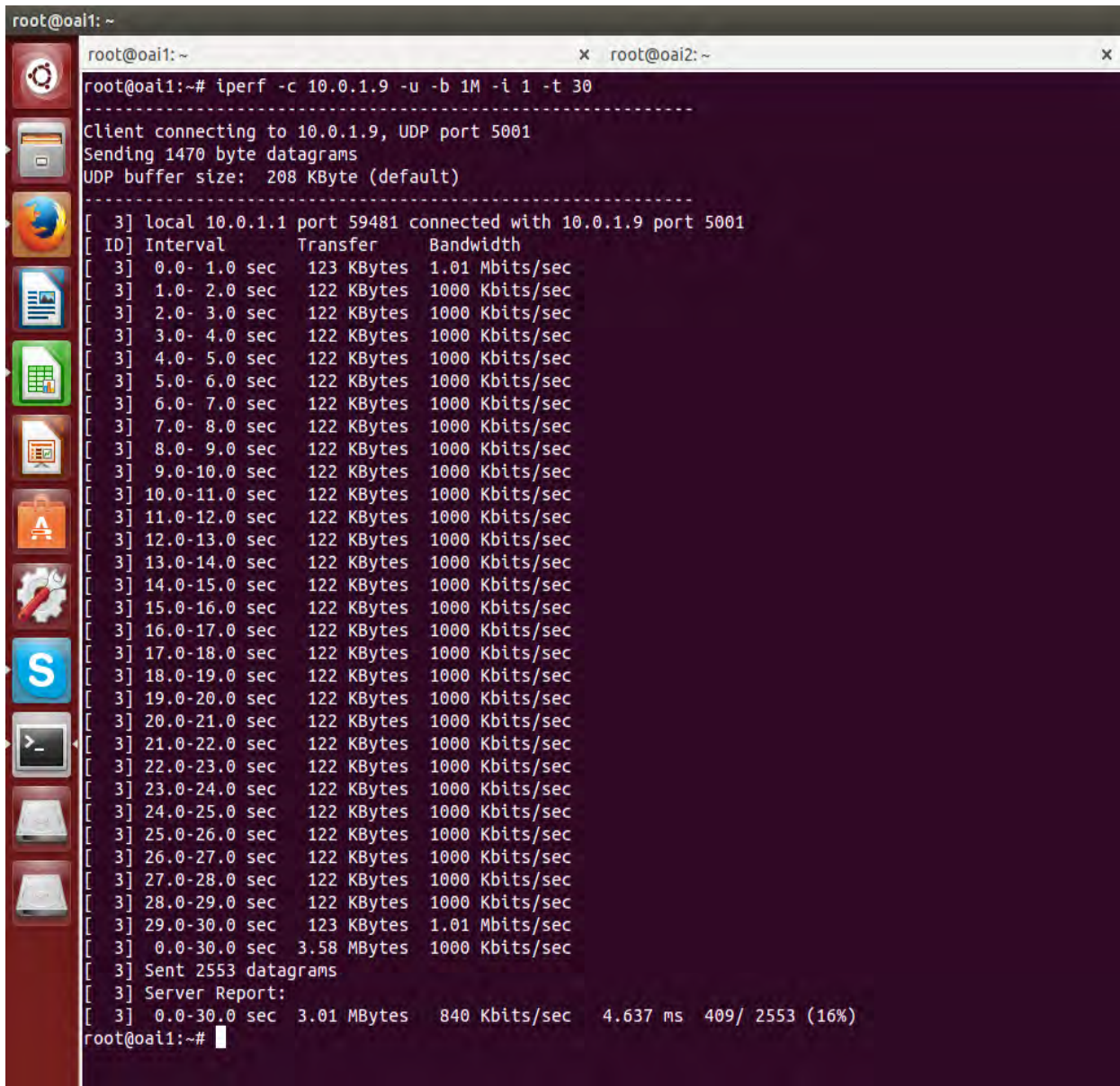


```
root@oai1: ~
root@oai1:~/rel7763/targets/bin x root@oai2:~/rel7763/targets/bin
root@oai1:~# iperf -c 10.0.1.9 -u -b 1M -i 1 -t 30
-----
Client connecting to 10.0.1.9, UDP port 5001
Sending 1470 byte datagrams
UDP buffer size: 208 KByte (default)
-----
[ 3] local 10.0.1.1 port 49243 connected with 10.0.1.9 port 5001
[ ID] Interval      Transfer    Bandwidth
[ 3] 0.0- 1.0 sec  123 KBytes  1.01 Mbits/sec
[ 3] 1.0- 2.0 sec  122 KBytes  1000 Kbits/sec
[ 3] 2.0- 3.0 sec  122 KBytes  1000 Kbits/sec
[ 3] 3.0- 4.0 sec  122 KBytes  1000 Kbits/sec
[ 3] 4.0- 5.0 sec  122 KBytes  1000 Kbits/sec
[ 3] 5.0- 6.0 sec  122 KBytes  1000 Kbits/sec
[ 3] 6.0- 7.0 sec  122 KBytes  1000 Kbits/sec
[ 3] 7.0- 8.0 sec  122 KBytes  1000 Kbits/sec
[ 3] 8.0- 9.0 sec  122 KBytes  1000 Kbits/sec
[ 3] 9.0-10.0 sec  122 KBytes  1000 Kbits/sec
[ 3] 10.0-11.0 sec 122 KBytes  1000 Kbits/sec
[ 3] 11.0-12.0 sec 122 KBytes  1000 Kbits/sec
[ 3] 12.0-13.0 sec 122 KBytes  1000 Kbits/sec
[ 3] 13.0-14.0 sec 122 KBytes  1000 Kbits/sec
[ 3] 14.0-15.0 sec 122 KBytes  1000 Kbits/sec
[ 3] 15.0-16.0 sec 122 KBytes  1000 Kbits/sec
[ 3] 16.0-17.0 sec 122 KBytes  1000 Kbits/sec
[ 3] 17.0-18.0 sec 122 KBytes  1000 Kbits/sec
[ 3] 18.0-19.0 sec 122 KBytes  1000 Kbits/sec
[ 3] 19.0-20.0 sec 122 KBytes  1000 Kbits/sec
[ 3] 20.0-21.0 sec 122 KBytes  1000 Kbits/sec
[ 3] 21.0-22.0 sec 122 KBytes  1000 Kbits/sec
[ 3] 22.0-23.0 sec 122 KBytes  1000 Kbits/sec
[ 3] 23.0-24.0 sec 122 KBytes  1000 Kbits/sec
[ 3] 24.0-25.0 sec 122 KBytes  1000 Kbits/sec
[ 3] 25.0-26.0 sec 122 KBytes  1000 Kbits/sec
[ 3] 26.0-27.0 sec 122 KBytes  1000 Kbits/sec
[ 3] 27.0-28.0 sec 122 KBytes  1000 Kbits/sec
[ 3] 28.0-29.0 sec 122 KBytes  1000 Kbits/sec
[ 3] 29.0-30.0 sec 123 KBytes  1.01 Mbits/sec
[ 3] 0.0-30.0 sec 3.58 MBytes  1000 Kbits/sec
[ 3] Sent 2553 datagrams
[ 3] Server Report:
[ 3] 0.0-30.5 sec 3.01 MBytes  826 Kbits/sec 29.733 ms 409/ 2553 (16%)
root@oai1:~#
```

Εικόνα 6.1: Στιγμιότυπο τρεξίματος

- **Απλή επικοινωνία με δυναμική χρήση φάσματος**

- Συχνότητα εκπομπής: *δυναμική*
- Μέση τιμή throughput (Mbytes): *2,884*
- Τυπική απόκλιση throughput (Mbytes): *0,0388*
- Μέση τιμή bitrate (Kbps): *801,7*
- Τυπική απόκλιση bitrate (Kbps): *12,64*
- Μέση τιμή μη παραδοθέντων πακέτων (από 2553): *497,3 (19,4%)*
- Τυπική απόκλιση μη παραδοθέντων πακέτων (από 2553): *25,04 (0,92%)*



```
root@oai1: ~
root@oai1:~# iperf -c 10.0.1.9 -u -b 1M -i 1 -t 30
-----
Client connecting to 10.0.1.9, UDP port 5001
Sending 1470 byte datagrams
UDP buffer size: 208 KByte (default)
-----
[ 3] local 10.0.1.1 port 59481 connected with 10.0.1.9 port 5001
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth
[ 3] 0.0- 1.0 sec   123 KBytes    1.01 Mbits/sec
[ 3] 1.0- 2.0 sec   122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 2.0- 3.0 sec   122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 3.0- 4.0 sec   122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 4.0- 5.0 sec   122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 5.0- 6.0 sec   122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 6.0- 7.0 sec   122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 7.0- 8.0 sec   122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 8.0- 9.0 sec   122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 9.0-10.0 sec   122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 10.0-11.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 11.0-12.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 12.0-13.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 13.0-14.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 14.0-15.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 15.0-16.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 16.0-17.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 17.0-18.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 18.0-19.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 19.0-20.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 20.0-21.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 21.0-22.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 22.0-23.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 23.0-24.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 24.0-25.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 25.0-26.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 26.0-27.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 27.0-28.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 28.0-29.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 29.0-30.0 sec  123 KBytes    1.01 Mbits/sec
[ 3] 0.0-30.0 sec  3.58 MBytes   1000 Kbits/sec
[ 3] Sent 2553 datagrams
[ 3] Server Report:
[ 3] 0.0-30.0 sec  3.01 MBytes   840 Kbits/sec   4.637 ms  409/ 2553 (16%)
root@oai1:~#
```

Εικόνα 6.2: Στιγμιότυπο τρεξίματος

- **Επικοινωνία με προεπιλεγμένες ρυθμίσεις, παρουσία κόμβου – παρεμβολέα**

- Συχνότητα εκπομπής: σταθερή
- Μέση τιμή throughput (Mbytes): 1,365
- Τυπική απόκλιση throughput (Mbytes): 0,107
- Μέση τιμή bitrate (Kbps): 372,9
- Τυπική απόκλιση bitrate (Kbps): 33,66
- Μέση τιμή μη παραδοθέντων πακέτων (από 2553): 1579,2 (62%)
- Τυπική απόκλιση μη παραδοθέντων πακέτων (από 2553): 75,52 (3%)

```

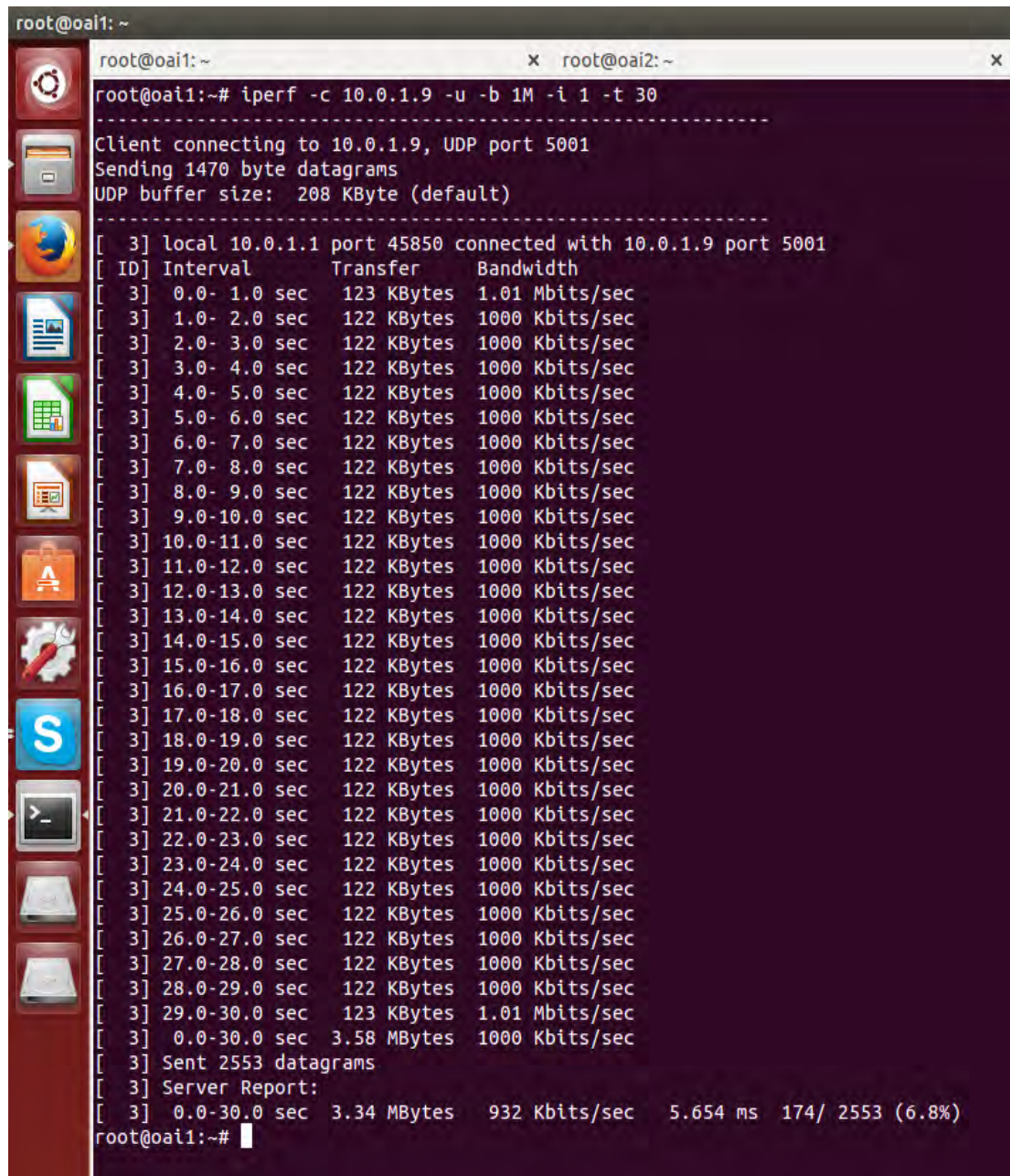
root@oai1: ~/rel7763/targets/bin
root@oai1:~/rel7763/targets/bin# iperf -c 10.0.1.9 -u -b 1M -i 1 -t 30
-----
Client connecting to 10.0.1.9, UDP port 5001
Sending 1470 byte datagrams
UDP buffer size: 208 KByte (default)
-----
[ 3] local 10.0.1.1 port 51720 connected with 10.0.1.9 port 5001
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth
[ 3] 0.0- 1.0 sec   123 KBytes    1.01 Mbits/sec
[ 3] 1.0- 2.0 sec   122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 2.0- 3.0 sec   122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 3.0- 4.0 sec   122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 4.0- 5.0 sec   122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 5.0- 6.0 sec   122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 6.0- 7.0 sec   122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 7.0- 8.0 sec   122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 8.0- 9.0 sec   122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 9.0-10.0 sec   122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 10.0-11.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 11.0-12.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 12.0-13.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 13.0-14.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 14.0-15.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 15.0-16.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 16.0-17.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 17.0-18.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 18.0-19.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 19.0-20.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 20.0-21.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 21.0-22.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 22.0-23.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 23.0-24.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 24.0-25.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 25.0-26.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 26.0-27.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 27.0-28.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 28.0-29.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 29.0-30.0 sec  123 KBytes    1.01 Mbits/sec
[ 3] 0.0-30.0 sec  3.58 MBytes   1000 Kbits/sec
[ 3] Sent 2553 datagrams
[ 3] Server Report:
[ 3] 0.0-31.1 sec  1.26 MBytes   341 Kbits/sec  75.135 ms 1653/ 2553 (65%)
root@oai1:~/rel7763/targets/bin#

```

Εικόνα 6.3: Στιγμιότυπο τρεξίματος

- **Επικοινωνία με δυναμική χρήση φάσματος, παρουσία κόμβου – παρεμβολέα**

- Συχνότητα εκπομπής: *δυναμική*
- Μέση τιμή throughput (Mbytes): *3,10*
- Τυπική απόκλιση throughput (Mbytes): *0,20*
- Μέση τιμή bitrate (Kbps): *859,33*
- Τυπική απόκλιση bitrate (Kbps): *59,29*
- Μέση τιμή μη παραδοθέντων πακέτων (από 2553): *340,6 (13%)*
- Τυπική απόκλιση μη παραδοθέντων πακέτων (από 2553): *142,59 (6%)*



```
root@oai1: ~
root@oai1:~# iperf -c 10.0.1.9 -u -b 1M -i 1 -t 30
-----
Client connecting to 10.0.1.9, UDP port 5001
Sending 1470 byte datagrams
UDP buffer size: 208 KByte (default)
-----
[ 3] local 10.0.1.1 port 45850 connected with 10.0.1.9 port 5001
[ ID] Interval      Transfer       Bandwidth
[ 3] 0.0- 1.0 sec   123 KBytes    1.01 Mbits/sec
[ 3] 1.0- 2.0 sec   122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 2.0- 3.0 sec   122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 3.0- 4.0 sec   122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 4.0- 5.0 sec   122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 5.0- 6.0 sec   122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 6.0- 7.0 sec   122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 7.0- 8.0 sec   122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 8.0- 9.0 sec   122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 9.0-10.0 sec   122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 10.0-11.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 11.0-12.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 12.0-13.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 13.0-14.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 14.0-15.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 15.0-16.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 16.0-17.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 17.0-18.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 18.0-19.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 19.0-20.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 20.0-21.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 21.0-22.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 22.0-23.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 23.0-24.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 24.0-25.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 25.0-26.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 26.0-27.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 27.0-28.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 28.0-29.0 sec  122 KBytes    1000 Kbits/sec
[ 3] 29.0-30.0 sec  123 KBytes    1.01 Mbits/sec
[ 3] 0.0-30.0 sec  3.58 MBytes   1000 Kbits/sec
[ 3] Sent 2553 datagrams
[ 3] Server Report:
[ 3] 0.0-30.0 sec  3.34 MBytes   932 Kbits/sec   5.654 ms 174/ 2553 (6.8%)
root@oai1:~#
```

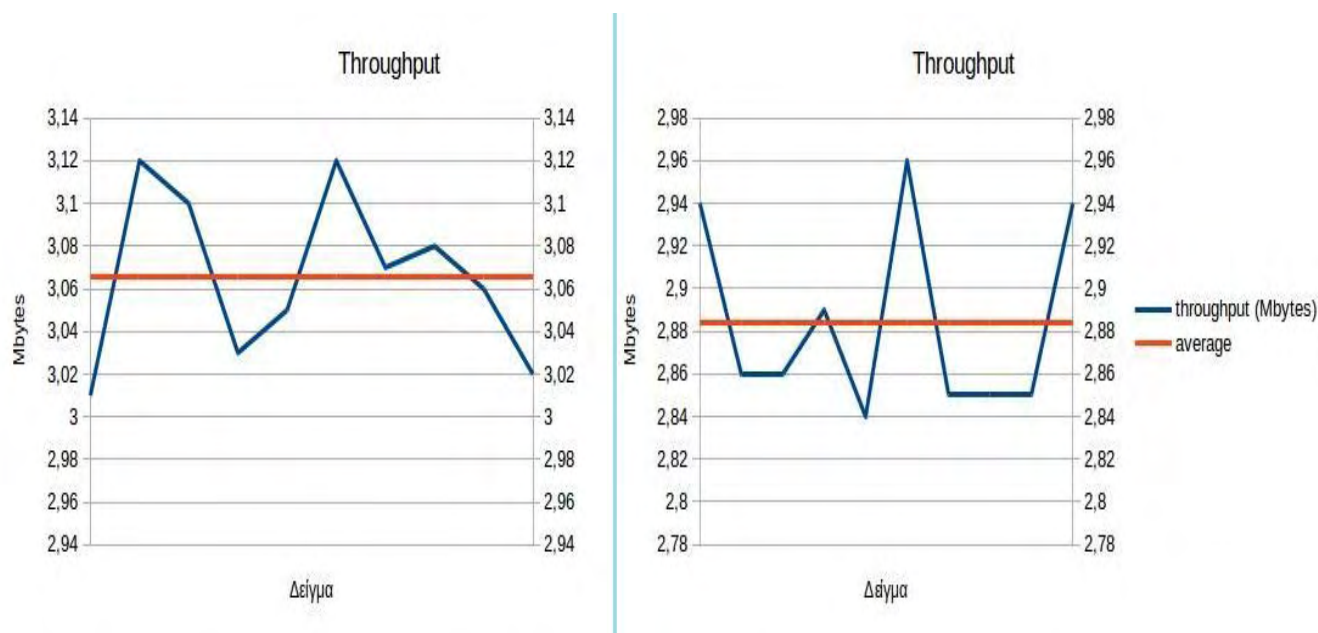
Εικόνα 6.4: Στιγμιότυπο τρεξίματος

## 6.2 Συμπεράσματα από την εφαρμογή του μηχανισμού

### 6.2.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων

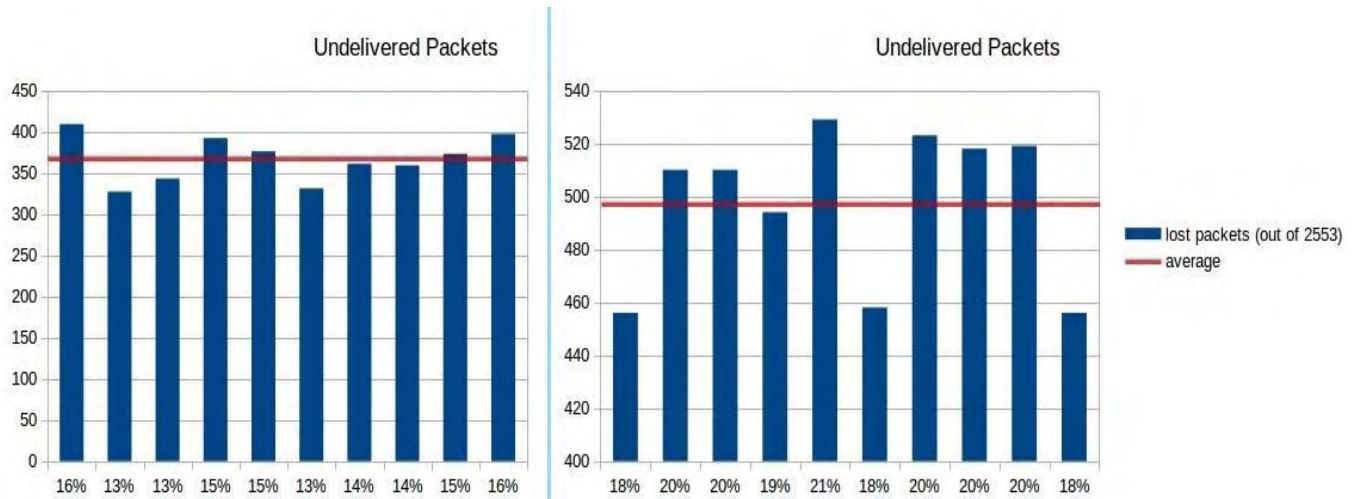
Οι τέσσερις ομάδες πειραμάτων που εκτελέστηκαν μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο ευρύτερα θεματικά πλαίσια, τα πειράματα τα οποία διεξήχθησαν χωρίς την παρουσία παρεμβολών και αυτά όπου επιχειρήθηκε επικοινωνία πομπού – χρήστη, υπό την παρουσία OFDM παρεμβολών. Υπό αυτό το θεματολογικό πρίσμα θα επιχειρηθεί, λοιπόν, και η ανάλυση των αποτελεσμάτων. Αυτό θα γίνει κυρίως υπό τη μορφή συγκρίσεων των δύο μηχανισμών, αυτού με σταθερή συχνότητα επικοινωνίας και του προτεινόμενου στα πλαίσια αυτής της μεταπτυχιακής διατριβής, ο οποίος υλοποιεί δυναμική χρήση του φάσματος για την επικοινωνία του eNB με τον χρήστη (UE). Οι συγκρίσεις των δύο μηχανισμών θα στηριχθούν στην ποιότητα επικοινωνίας, που επετεύχθη στα αντίστοιχα (αντιπροσωπευτικά) δείγματα πειραμάτων, όπως αυτή ορίζεται από καίρια χαρακτηριστικά της επικοινωνίας (bitrate, throughput κλπ.)

- Πειράματα δίχως παρουσία επιθετικής παρεμβολής

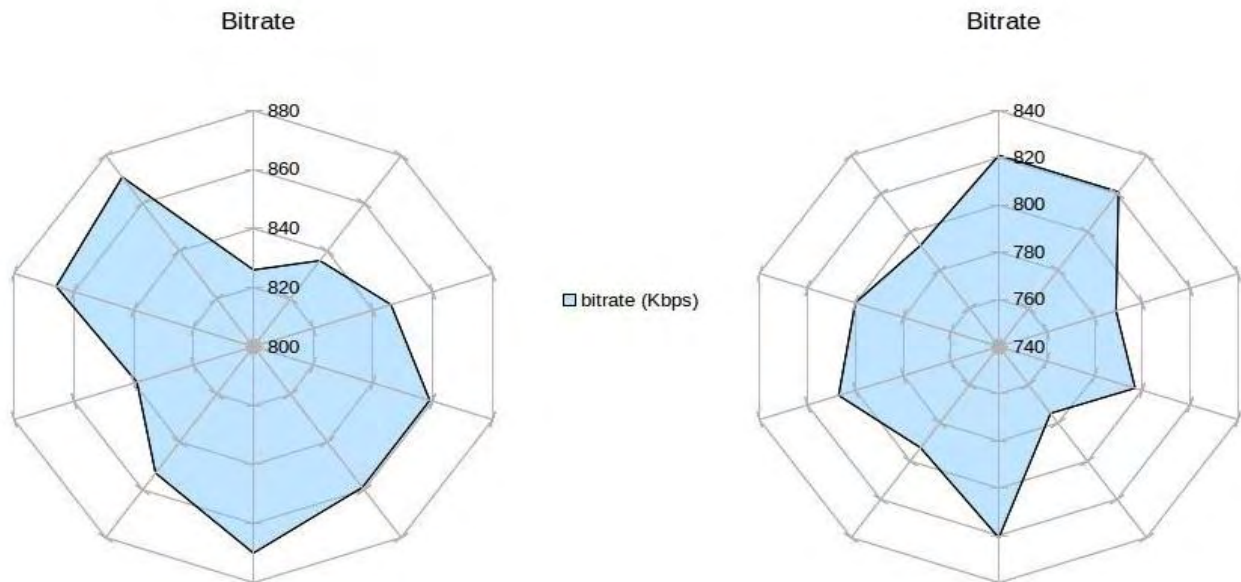


**Εικόνα 6.5:** Συγκριτικό διάγραμμα throughput (δεξιά για τον σταθερό μηχανισμό και αριστερα για τον δυναμικό)





**Εικόνα 6.6:** Συγκριτικό διάγραμμα throughput (δεξιά για τον σταθερό μηχανισμό και αριστερά για τον δυναμικό)

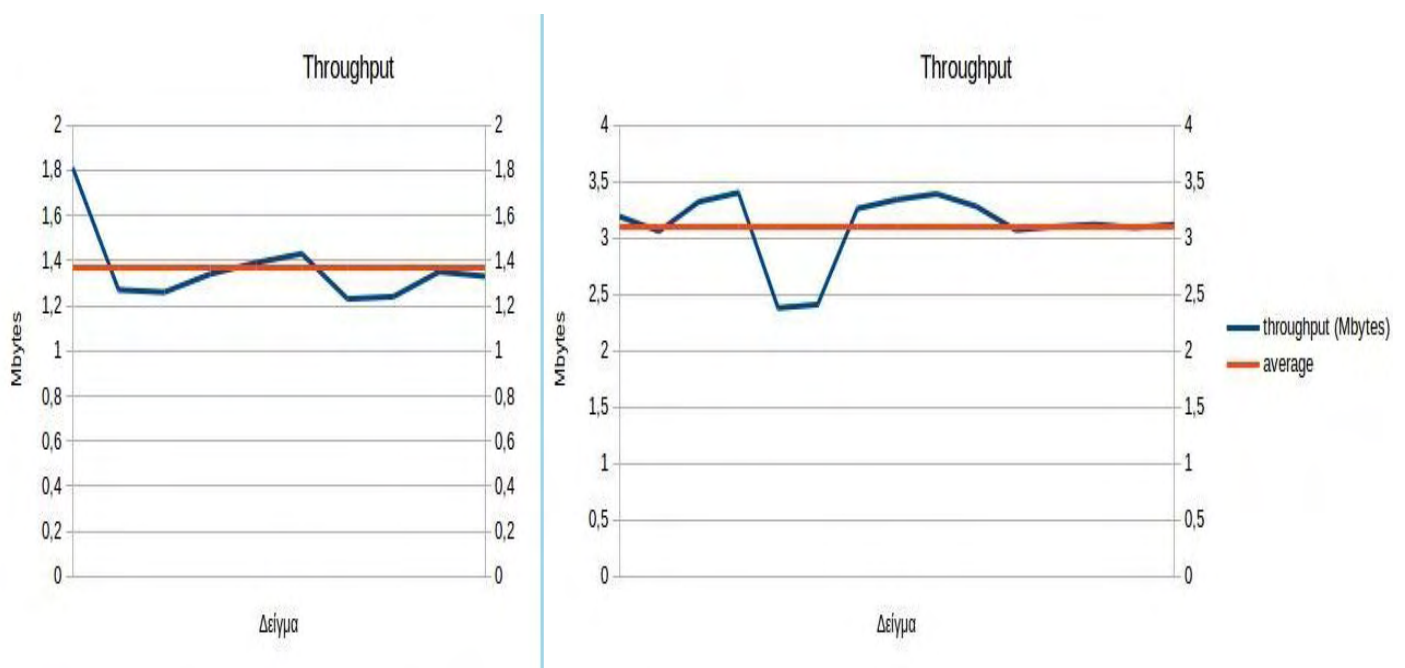


**Εικόνα 6.7:** Συγκριτικό διάγραμμα throughput (δεξιά για τον σταθερό μηχανισμό και αριστερά για τον δυναμικό)

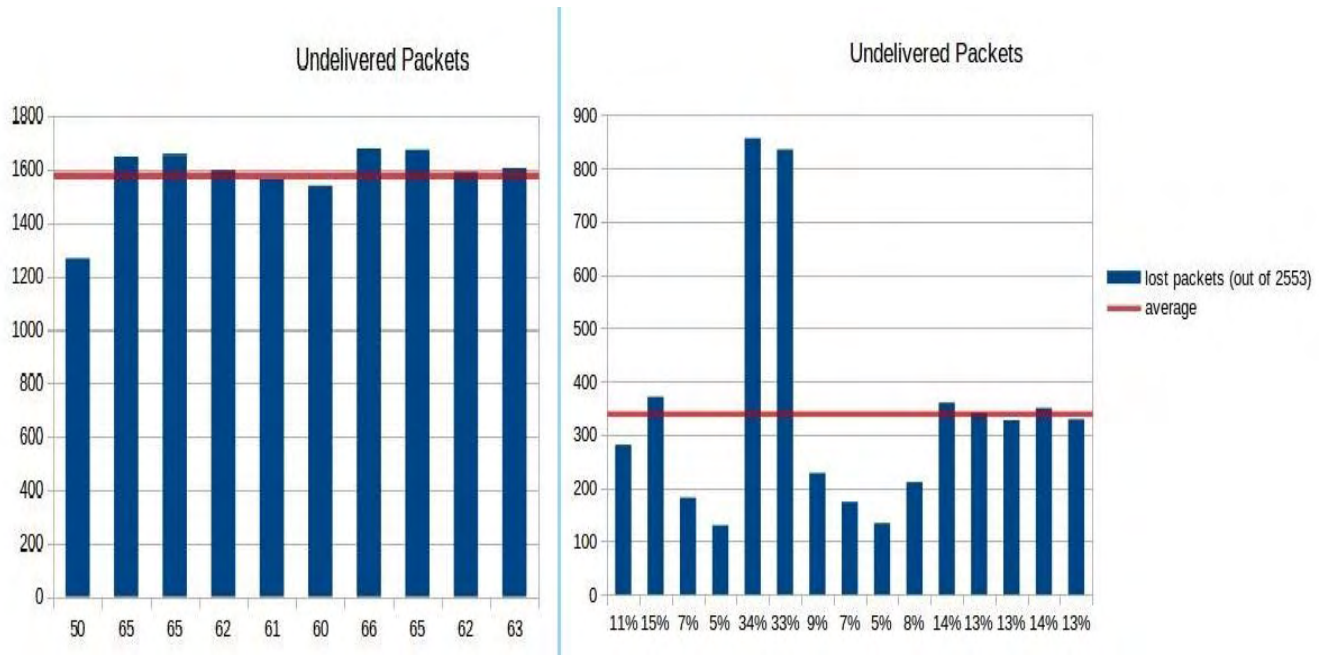
Από τα αντίστοιχα αποτελέσματα των πειραμάτων σε καθεστώς ελλείψεως επιθετικής παρεμβολής, αλλά και από τη μελέτη των αντίστοιχων επιμέρους συγκριτικών διαγραμμάτων καθίσταται φανερό πως και οι δύο κατηγορίες λειτουργούν εξίσου καλά. Σε όλους τους τομείς είναι ελαφρώς καλύτερα τα αποτελέσματα του μηχανισμού σταθερής συχνότητας, εντούτοις η διαφορά είναι μικρή και δε δικαιολογεί κάποια ύπαρξη ανωτερότητας έναντι του μηχανισμού δυναμικής χρήσης εύρους. Συγκεκριμένα, όσον αφορά τον όγκο δεδομένων που μεταδίδονται (throughput) εμφανίζεται μια μικρή διαφορά της τάξης των 182 KB υπέρ του σταθερού μηχανισμού. Επίσης και στην ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων υπερτερεί κατά 50,8 Kbps ο σταθερός μηχανισμός, όπως και στον αριθμό απολεσθέντων πακέτων κατά 130,5 πακέτα (και ποσοστιαία κατά 5,4%).

Αυτές οι διαφορές είναι πολύ μικρές για να δικαιολογήσουν κάποια καλύτερη απόδοση του μηχανισμού σταθερών συχνοτήτων. Η πιθανότερη αιτία πρόκλησης των είναι η δυναμικότητα του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων και η έλλειψη προβλεψιμότητας που επιφέρει η αστάθεια του κώδικα `orepair`. Στο πεδίο των αποκλίσεων ο σταθερός μηχανισμός εμφανίζει μεγαλύτερη ομαλότητα στη συμπεριφορά του με αντίστοιχες τυπικές αποκλίσεις 0,032, 12,6 και 22,6 (1%) σε throughput, bitrate και απολεσθέντα πακέτα. Αντιθέτως, ο μηχανισμός δυναμικής χρήσης συχνοτήτων εμφανίζει στα αντίστοιχα μεγέθη τιμές 0,039, 12,64 και 25,04 (0,92%). Ίσως σε αυτό να έπαιξε ρόλο και η μη στατική φύση του αλγορίθμου, ωστόσο και σε αυτόν τον τομέα οι δύο μηχανισμοί δεν εμφανίζουν κάποια σημαντική διαφοροποίηση. Επομένως, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι σε περιβάλλον χωρίς επιθετικές παρεμβολές οι δύο μηχανισμοί εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά.

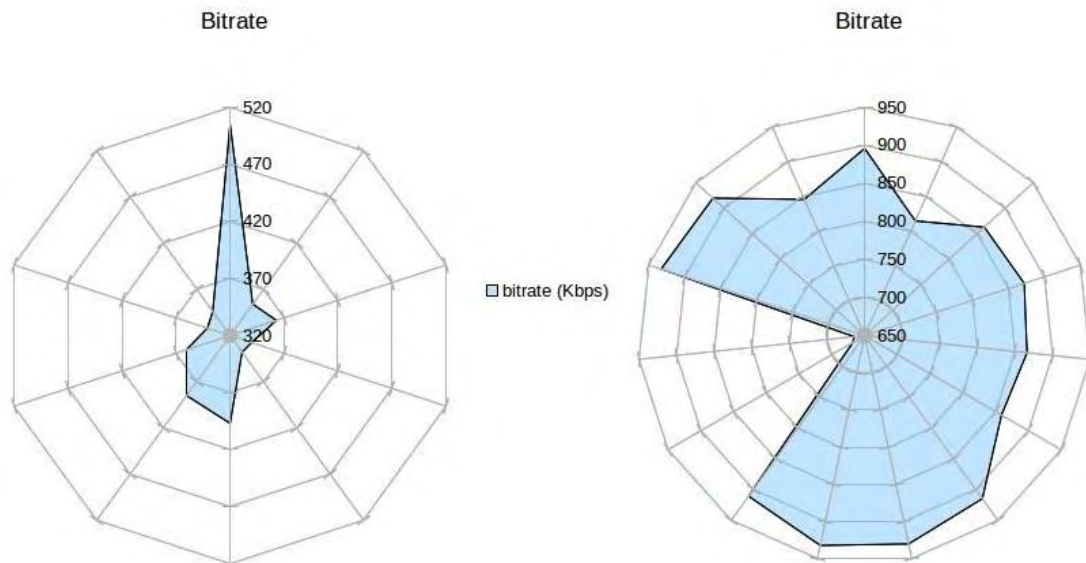
- Πειράματα υπό καθεστώς επιθετικής παρεμβολής



**Εικόνα 6.8:** Συγκριτικό διάγραμμα throughput (δεξιά για τον σταθερό μηχανισμό και αριστερά για τον δυναμικό)



Εικόνα 6.9: Συγκριτικό διάγραμμα throughput (δεξιά για τον σταθερό μηχανισμό και αριστερα για τον δυναμικό)



Εικόνα 6.10: Συγκριτικό διάγραμμα throughput (δεξιά για τον σταθερό μηχανισμό και αριστερα για τον δυναμικό)

Στη δεύτερη κατηγορία πειραμάτων – τέλεση υπό καθεστώς επιθετικής παρεμβολής – η κατάσταση διαφοροποιείται δραματικά. Μελετώντας τα αντίστοιχα συγκριτικά διαγράμματα για τον κάθε μηχανισμό καθώς και αποτελέσματα των πειραμάτων με χρήση κόμβου παρεμβολής, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι υφίσταται μεγάλη διαφορά στον τρόπο λειτουργίας των συγκρινόμενων μηχανισμών. Σε όλους τους τομείς υπερτερεί καταφανώς ο μηχανισμός δυναμικής χρήσης φάσματος, έναντι του σταθερού. Συγκεκριμένα, όσον αφορά τον όγκο δεδομένων που μεταδίδονται (throughput) εμφανίζεται μια διαφορά της τάξης

των 1,74 MB υπέρ του σταθερού μηχανισμού, με άλλα λόγια ο δυναμικός μηχανισμός μεταδίδει σχεδόν τον διπλάσιο όγκο δεδομένων. Επιπλέον, για ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων, ο δυναμικός μηχανισμός πετυχαίνει μέσο όρο bitrates 859,33 Kbps, εν αντιθέσει με τον μηχανισμό σταθερής συχνότητας, ο οποίος κυμαίνεται σε λιγότερο από τη μισή ταχύτητα, στα 372,9. Τέλος, μεγάλη διαφορά εντοπίζεται και στον αριθμό απολεσθέντων πακέτων, της τάξης των 1238,6 πακέτων (49%), 1579,2 έναντι 340,6 μη παραδοθέντα πακέτα.

Σε επίπεδο αποκλίσεων ο μη διαμορφωμένος μηχανισμός χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη ομοιομορφία και σταθερότητα. Οι τυπικές του αποκλίσεις σε throughput, bitrate και απολεσθέντα πακέτα είναι αντίστοιχα 0,11, 33,66 και 22,6 (3%). Αντιθέτως, ο μηχανισμός δυναμικής χρήσης συχνοτήτων εμφανίζει στα αντίθετα μεγέθη τιμές 0,039, 12,64 και 25,04 (0,92%). Αντίστοιχα, ο μηχανισμός δυναμικής χρήσης συχνοτήτων χαρακτηρίζεται τυπική απόκλιση throughput 0.2 Mbytes, bitrate 59.29 Kbps και απολεσθέντων πακέτων 142,59 πακέτα (6%). Αυτή η διαφορά στην ομοιομορφία της συμπεριφοράς του δεύτερου αλγορίθμου είναι λογική, αν ληφθεί υπόψη ότι οι συχνότητες άλλαζαν κάθε φορά ανάλογα με το μικρότερο ίχνος παρεμβολής. Επομένως, κάθε διαφορετικό παράθυρο εκπομπής διαθέτει και διαφορετικά χαρακτηριστικά, οδηγώντας, λοιπόν, σε πιο αποκλίνουσα συμπεριφορά τον αλγόριθμο.

Αυτές οι μεγάλες αναντιστοιχίες στη συμπεριφορά των δύο μηχανισμών, σκιαγραφούν τη μεγάλη διαφορά στη συμπεριφορά και λειτουργία τους. Ο μηχανισμός σταθερής συχνότητας κατέρρευσε υπό την πίεση των επιθετικών παρεμβολών, αδυνατώντας πολλές φορές να επιτύχει ακόμα και ζεύξη ανάμεσα στους δύο κόμβους επικοινωνίας. Ακόμα και όταν εγκαθιδρυόταν μια επικοινωνία, οι συνθήκες διεξαγωγής της ήταν επισφαλείς. Είναι χαρακτηριστικό ότι σε αρκετές περιπτώσεις το βέλτιστο αυτού του μηχανισμού, ήταν χειρότερο από το ελάχιστο του δυναμικού. Αντιθέτως ο μηχανισμός δυναμικής χρήσης συχνοτήτων εμφάνισε μεγάλη ευελιξία κατά τη λειτουργία του αποφεύγοντας τις παρεμβολές και εγκαθιδρύοντας επικοινωνία μεταξύ των δύο κόμβων με ευνοϊκές συνθήκες. Είναι χαρακτηριστικό το γεγονός ότι τα αποτελέσματα του κατά τη φάση των παρεμβολών εμφανίζουν ελάχιστη διαφοροποίηση από αυτά της φάσης χωρίς παρεμβολές. Κατά συνέπεια, μπορεί να εξαχθεί ασφαλώς το συμπέρασμα, ότι σε περιβάλλον με παρουσία επιθετικής παρεμβολής οι δύο μηχανισμοί εμφανίζουν καθαρά ανόμοια συμπεριφορά.

## 6.2.2 Συμπεράσματα

Με τη αιγίδα της παραπάνω ανάλυσης των αποτελεσμάτων προκύπτουν κάποια βασικά συμπεράσματα. Κατ' αρχάς, η εισαγωγή δυνατοτήτων spectrum sensing στον μηχανισμό του LTE, το βοήθησε να αντεπεξέλθει άριστα σε περιβάλλον παρεμβολών. Δεδομένου ότι η μπάντα LTE 13 είναι μια σχετικά «στενή» από άποψη εύρους μπάντα (εύρος: 10 MHz) και σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα των πειραμάτων, είναι εμφανές ότι αυτές οι δυνατότητες cognitive radio προσέδωσαν έναν μεγάλο βαθμό ευελιξίας στον LTE

μηχανισμό. Κατέστη εφικτή η αποφυγή του παραθύρου παρεμβολών και η επιλογή κάθε φορά του βέλτιστου παραθύρου εκπομπής, το οποίο θα επέτρεπε την ακώλυτη επικοινωνία των δύο άκρων.

Το throughput εμφάνισε μεγαλύτερα μεγέθη με τη χρήση spectrum sensing και την επιλογή της κατάλληλης συχνότητας. Στα πειράματα που διενεργήθηκαν ο μηχανισμός δυναμικής χρήσης συχνοτήτων παρουσίασε υπερδιπλάσια ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων. Ώντας σε θέση να αποφύγει το παράθυρο παρεμβολής επέλεγε κάθε φορά την καταλληλότερη για εκπομπή συχνότητα. Γενικεύοντας από το ελεγχόμενο περιβάλλον του πειράματος, στις πραγματικές ραδιοσυχνότητες, θα υπάρχουν παρεμβολές σχεδόν ανά πάσα στιγμή και σε διαφορετικά μέρη του φάσματος. Επομένως, αυτός ο μηχανισμός θα χρειάζεται σε μόνιμη βάση για την ομαλή ζεύξη δεδομένων ανάμεσα στον κόμβο – πομπό και τον κόμβο – χρήστη.

Επεκτείνοντας τα συμπεράσματα και στην μπάντα των 5GHz, δύναται να εξαχθεί το συμπέρασμα πώς αυτός ο μηχανισμός θα μπορέσει να ωφελήσει ιδιαίτερος το πρωτόκολλο LTE-U. Το μεγαλύτερο εμπόδιο που καλείται να αντιμετωπίσει το LTE-U είναι η κατάλληλη εφαρμογή του στις μη αδειοδοτημένες συχνότητες, χωρίς να στραγγαλίζει τη λειτουργία των υπολοίπων τεχνολογιών / πρωτοκόλλων. Αυτός ο μηχανισμός που προτείνεται στα πλαίσια της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής διατριβής, έχει τις δυνατότητες να αποτελέσει ένας χρήσιμος τρόπος αντιμετώπισης αυτού του θέματος. Συγκεκριμένα με την αντίστοιχη λειτουργία spectrum sensing, το LTE-U, θα μπορεί να εντοπίσει άλλες εκπομπές και να αποφεύγει κανάλια υψηλής περιεκτικότητας σημάτων, μειώνοντας έτσι το αντίκτυπο του στα υπόλοιπα πρωτόκολλα.

Επιπλέον, η λειτουργία σε δυναμικό εύρος συχνοτήτων καταστεί την εκμετάλλευση του πρόσθετου εύρους συχνοτήτων πιο αποδοτική. Με τη χρήση συχνοτήτων στην μπάντα των 5 GHz, το LTE-U αποκτά μία μεγάλη ποσότητα πρόσθετου φάσματος για μεταφορά δεδομένων. Βέβαια, δεν είναι όλες οι συχνότητες του πρόσθετου εύρους το ίδιο εκμεταλλεύσιμες, καθώς σε κάθε μία επικρατούν διαφορετικές συνθήκες θορύβου σημάτων κλπ. Η χρήση cognitive radio σε αυτά τα φάσματα, θα γνωστοποιήσει τις συνθήκες των επιμέρους πιθανών παραθύρων εκπομπής, οδηγώντας κατά αυτόν τον τρόπο σε πιο συνετή επιλογή των και εκμετάλλευση των πρόσθετων φασματικών πόρων με αποδοτικότερο τρόπο.

Τέλος, ως ένα γενικότερο συμπέρασμα, κάθε μηχανισμός μπορεί να ωφεληθεί από τη δυναμική χρήση συχνοτήτων. Εκτός από τη δημιουργία σχημάτων επικοινωνίας για LTE δίκτυα σε μη αδειοδοτημένο φάσμα, οποιοσδήποτε μηχανισμός μπορεί να χρησιμοποιεί δυναμικά το φάσμα για τη βελτίωση της λειτουργίας του. Μία καθολική εφαρμογή του cognitive radio, ίσως αλλάξει τον σημερινό τρόπο θεώρησης του φάσματος συχνοτήτων και των ορίων του.

### 6.3 Προτάσεις για μελλοντική εξέλιξη του μηχανισμού

Στα πλαίσια αυτής της διατριβής αποδείχθηκε ότι ο προτεινόμενος μηχανισμός εκμετάλλευσης δυναμικού φάσματος στο LTE πρωτόκολλο μπορεί να λειτουργήσει εξαιρετικά σε περιβάλλοντα παρεμβολών. Σε αντίθεση με το σταθερό παράθυρο εκπομπής, το οποίο κατέρρευε όταν βρισκόταν σε παράθυρο έντονης παρουσίας έτερων σημάτων, εμφανίζει την δυνατότητα αποφυγής των παρεμβολών και εντοπισμού των βέλτιστων συνθηκών επικοινωνίας, διατηρώντας την ποιότητα μεταφοράς δεδομένων. Συνεπώς εμφάνισε πολύ θετική συμπεριφορά ως μια εναλλακτική υλοποίηση ενός πρωτοκόλλου LTE-U. Εντούτοις, υπάρχουν ακόμα μερικά σημεία στη συγκεκριμένη ιδέα που θα μπορούσαν να την εξελίξουν περισσότερο.

Η πλατφόρμα υλοποίησης Software Defined Radio του OpenAirInterface, ExMIMO2, δεν έχει δυνατότητα εκπομπής στις μη αδειοδοτημένες συχνότητες των 5 GHz. Σύμφωνα όμως τα επίσημα σχέδια της 3GPP το LTE Unlicensed αποσκοπεί στη χρήση αυτής της μπάντας, καθώς διαθέτει αρκετά μεγάλο πλήθος τέτοιων μη αδειοδοτημένων συχνοτήτων, σε πολλά κράτη. Κατά συνέπεια ένα λογικό πρώτο βήμα θα ήταν η διαμόρφωση της πλατφόρμας, ώστε να καταστεί δυνατή η εκπομπή στις εν λόγω συχνότητες. Σε περίπτωση που κάτι τέτοιο δε καταστεί εφικτό, προτείνεται η αναζήτηση εναλλακτικού λογισμικού (plug-in, stand-alone) με δυνατότητα εκπομπής στη μπάντα των 5 GHz. Μόλις ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός, θα μπορέσει να γίνει επιβεβαίωση των εξαχθέντων πορισμάτων και για τις επίσημες συχνότητες του LTE-U. Βέβαια, ήδη η επεκτασιμότητα των αποτελεσμάτων και σε αυτές τις συχνότητες γίνεται να θεωρηθεί λογική, επειδή δεν επηρεάζονται από κάποια ειδική ιδιότητα του συγκεκριμένου φάσματος, όπου διενεργήθηκε το πείραμα στην αρχική του μορφή. Η κύρια προσφορά από μία τέτοια τροποποίηση θα είναι η μελέτη της λειτουργίας του μηχανισμού σε πραγματικές συνθήκες. Θα μπορέσει, δηλαδή, να μελετηθεί η συμπεριφορά του αλγορίθμου σε μορφές δικτύων και ενάντια σε τεχνολογίες, όπου όντως θα εφαρμοστεί το πρωτόκολλο του LTE-U. Επομένως θα διευκολυνθούν πολύ οι οποιοσδήποτε τροποποιήσεις/ρυθμίσεις τυχόν χρειαστούν.

Στη συγκεκριμένη πρωταρχική υλοποίηση του μηχανισμού η λειτουργία του spectrum sensing στον κόμβο eNB, αρχίζει την εκτέλεσή της με ρητές εντολές του προγράμματος και μόλις ολοκληρωθεί αυτή η διαδικασία διαφημίζει τη βέλτιστη συχνότητα εκπομπής στον κόμβο UE. Αυτό το πλαίσιο λειτουργίας εμφανίζει μεγάλη χρησιμότητα για τη δοκιμή του μηχανισμού, γιατί προσδίδει έναν χειροκίνητο έλεγχο εκτέλεσης των εντολών, διευκολύνοντας την εκσφαλμάτωση. Πράγματι με τη μη αυτοματοποιημένη λειτουργία υπάρχει μεγαλύτερος έλεγχος του αλγορίθμου και αποτέλεσε κέρδος για τα αρχικά στάδια δοκιμής. Εφόσον, ωστόσο, διαπιστώθηκε η ομαλή λειτουργία του συστήματος, θεωρείται ότι η αυτοματοποίηση πρέπει να αποτελέσει μία από τις άμεσες εξελίξεις του. Σύμφωνα με το γενικότερο πλάνο αυτής της αυτοματοποίησης απαιτείται η ρύθμιση των κόμβων (πομπού και δεκτών), ώστε ανά συγκεκριμένη περίοδο χρονικών στιγμιστύπων, να παύεται στιγμιαία η λειτουργία τους, ώστε να πραγματοποιηθεί η φασματογραφία. Με το πέρας αυτής της φασματικής σκιαγράφησης, η λειτουργία των κόμβων θα συνεχίζεται για τη νέα περίοδο, σύμφωνα με τις τελευταίες βέλτιστες ρυθμίσεις. Για την υλοποίηση αυτού του

βήματος (στη συγκεκριμένη πλατφόρμα OAI) χρειάζονται εκτεταμένες τροποποιήσεις του λογισμικού OpenAirInterface, προκειμένου να εισαχθεί η εν λόγω περιοδικότητα στη λειτουργία των κόμβων εκπομπής και λήψης.

Οι παράμετροι εφαρμογής αυτού του πειράματος ήταν γνωστές εκ των προτέρων και ορισμένες από αυτές, σταθερές. Συγκεκριμένα, υπήρχε πρότερη γνώση του εύρους ζώνης όπου θα εφαρμοζόταν ο αλγόριθμος και είχε μελετηθεί κατά τη φάση σχεδίασης του αλγορίθμου ο χρόνος που απαιτείται από το USRP για να φασματογραφήσει το συγκεκριμένο κανάλι. Το δεύτερο σκέλος έχει υψηλή σημασία για τη λειτουργία του αλγορίθμου, διότι συνδέεται άμεσα με την περίοδο δειγματοληψίας. Με άλλα λόγια, αν η αναζήτηση βέλτιστου παραθύρου εκπομπής αρχίσει την εκτέλεση της, πριν ολοκληρωθεί το spectrum sensing(και αποθηκεύσει τα αποτελέσματα στο αρχείο καταγραφής) ενδεχομένως να οδηγούσε σε κατάρρευση του μηχανισμού. Σε περίπτωση που θα επιχειρούταν η προσπέλαση του αρχείου καταγραφής (των αποτελεσμάτων της φασματογραφίας) πριν ολοκληρωθεί η φασματογραφία θα χρησιμοποιούταν ένα ημιτελές αρχείο, ή στη χειρότερη περίπτωση ένα κενό. Στο πρώτο ενδεχόμενο η επιλογή θα βασιζόταν σε μη επαρκή στοιχεία (οπότε μπορεί να επιλεγόταν μία μη βέλτιστη συχνότητα εκπομπής), ενώ στο χειρότερο δε θα υπήρχε επιλογή και θα οδηγούνταν ο μηχανισμός σε μη αιτιατή συμπεριφορά. Συνεπώς, θα εξυπηρετούσε σε μεγάλο βαθμό το όλο εγχείρημα, η τροποποίηση του wrapper αλγορίθμου για να μη λειτουργεί με συγκεκριμένα δεδομένα καναλιού, αλλά είτε να δέχεται δυναμικά κατά την κλήση του τα στοιχεία αυτά, είτε να τα αντιλαμβάνεται αυτόματα. Μία τέτοια επέκταση θα προσδώσει στον μηχανισμό μεγάλη ευελιξία και δυνατότητες επέκτασης σε ποικίλες διαμορφώσεις καναλιών και εύρη συχνοτήτων.

Εφόσον υλοποιηθούν οι προαναφερθείσες προτάσεις μελλοντικής εξέλιξης, θα ήταν χρήσιμη η εφαρμογή του μηχανισμού σε περιβάλλον επιθετικών παρεμβολών από άλλα ασύρματα δίκτυα. Ουσιαστικά, προτείνεται η εφαρμογή ενός ελέγχου αντοχής (stress test) για τον αλγόριθμο σε ένα κανάλι με υψηλή περιεκτικότητα με διαφορετικές τεχνολογίες δικτύων, οι οποίες συναγωνίζονται για πρόσβαση στις συχνότητες. Κρίνεται ότι θα ήταν χρήσιμη η εφαρμογή ποικιλομορφίας για τα δίκτυα, ώστε να εξαχθεί και μία εκτίμηση παρεμβολών από και σε άλλα πρωτόκολλα δικτύου. Αυτό το τελικό βήμα θα αποτελέσει ένα μέτρο εκτίμησης για τον αλγόριθμο και θα οδηγήσει στη σκιαγράφηση των ορίων λειτουργικότητάς του, επιδεικνύοντας κατά πόσο είναι εφικτή η ομαλή λειτουργία του σε ένα ιδιαίτερα απαιτητικό περιβάλλον.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] "LTE in unlicensed spectrum", [https://en.wikipedia.org/wiki/LTE\\_in\\_unlicensed\\_spectrum](https://en.wikipedia.org/wiki/LTE_in_unlicensed_spectrum)
- [2] "LTE-U Unlicensed, LTE-LAA", <http://www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/lte-long-term-evolution/lte-u-unlicensed-laa-license-assisted-access.php>
- [3] "The benefits of LTE in unlicensed spectrum", <https://www.qualcomm.com/news/onq/2015/07/13/benefits-lte-unlicensed-spectrum>
- [4] "Google whitepaper on LTE-U / WiFi co-existence", <http://apps.fcc.gov/ecfs/document/view?id=60001078145>
- [5] "Presentation, Eurecom", <http://www.eurecom.fr/en/eurecom/strategy>
- [6] "Cognitive radio spectrum sensing", <http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/cognitive-radio-cr/spectrum-sensing.php>
- [7] "Building OAI executables", <https://twiki.eurecom.fr/twiki/bin/view/OpenAirInterface/AutoBuild>
- [8] Antonio De Domenico, Emilio CalvaneseStrinati, and Maria-Gabriella Di Benedetto, "A Survey on MAC Strategies for Cognitive Radio Networks", in IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 14, NO. 1, FIRST QUARTER 2012.
- [9] Beibei Wang and K. J. Ray Liu, "Advances in Cognitive Radio Networks: A Survey", in IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN SIGNAL PROCESSING, VOL. 5, NO. 1, FEBRUARY 2011.
- [10] Jonathan Ling, Satish Kanugovi, Subramanian Vasudevan, A Krishna Pramod, in "Enhanced capacity & coverage by Wi-Fi LTE Integration", IEEE Communications Magazine, Topic: The Future of Wi-Fi (November 2014).
- [11] D. Raychaudhuri and Xiangpeng Jing, in "A Spectrum Etiquette Protocol for Efficient Coordination of Radio Devices in Unlicensed Bands", Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2003. PIMRC 2003. 14th IEEE Proceedings.
- [12] Ian F. Akyildiz, Brandon F. Lo \*, RavikumarBalakrishnan, in "Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: A survey", Physical Communication Volume 4, Issue 1, March 2011, Pages 40–62.
- [13] FeiTeng, DongningGuo and Michael L. Honig, in "Sharing of Unlicensed Spectrum by Strategic Operators", Signal and Information Processing (GlobalSIP), 2014 IEEE Global Conference on.
- [14] Shweta S. Sagari, in "Coexistence of LTE and WiFi Heterogeneous Networks via Inter Network Coordination", Proceedings of the 2014 workshop on PhD forum Pages 1-2.
- [15] Minyao Xing, Yuexing Peng, Teng Xia, Hang Long, Kan Zheng, in "Adaptive Spectrum Sharing of LTE Co-existing with WLAN in Unlicensed Frequency Bands", arXiv:1503.07948 [cs.NI], Cornell University Library 27/3/15.
- [16] Ville Syrjälä and MikkoValkama, in "Coexistence of LTE and WLAN in Unlicensed Bands: Full-Duplex Spectrum Sensing", CROWNCOM 2015, Doha, Qatar, Apr. 2015.
- [17] Wu, Ting-Hsuan, Mei-Ju Shih, and Hung-Yu Wei. "Tiered Licensed-Assisted Access with Paid Prioritization: A Game Theoretic Approach for Unlicensed LTE." (2015).
- [18] Zhang, Haijun, et al. "Coexistence of Wi-Fi and heterogeneous small cell networks sharing unlicensed spectrum." *Communications Magazine, IEEE* 53.3 (2015): 158-164.



- [19] Sagari, Shweta, et al. "Coordinated Dynamic Spectrum Management of LTE-U and Wi-Fi Networks." *arXiv preprint arXiv:1507.06881* (2015).
- [20] Choi, Jihoon, Eunkyung Kim, and Sungcheol Chang. "Dynamic Resource Adjustment for Coexistence of LAA and Wi-Fi in 5 GHz Unlicensed Bands." *ETRI Journal* 37.5 (2015): 845-855.
- [21] "3GPP LTE Channels and MAC Layer", <http://www.eventhelix.com/lte/presentations/3GPP-LTE-MAC.pdf>
- [22] "3GPP LTE Radio Link Control(RLC) Sub Layer", <http://www.eventhelix.com/lte/presentations/3GPP-LTE-RLC.pdf>
- [23] "3GPP LTE Packet Data Convergence Protocol (PDCP) Sub Layer", <http://www.eventhelix.com/lte/presentations/3GPP-LTE-PDCP.pdf>
- [24] "LTE MAC Scheduler Interface Specification v1.11", Femto Forum Technical Document
- [25] "Long Term Evolution Protocol Overview", [https://www.freescale.com/files/wireless\\_comm/doc/white\\_paper/LTEPTCLOVWWP.pdf](https://www.freescale.com/files/wireless_comm/doc/white_paper/LTEPTCLOVWWP.pdf)
- [26] "Making best use of unlicensed spectrum", <https://www.qualcomm.com/invention/technologies/1000x/spectrum/unlicensed>
- [27] "LTE for unlicensed spectrum, Nokia whitepaper", [http://networks.nokia.com/sites/default/files/document/nokia\\_lte\\_unlicensed\\_white\\_paper.pdf](http://networks.nokia.com/sites/default/files/document/nokia_lte_unlicensed_white_paper.pdf).
- [28] Yücek, Tevfik, and HüseyinArslan. "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications." *Communications Surveys&Tutorials, IEEE*11.1 (2009): 116-130.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α΄

### Συντμήσεις

**3GPP:** 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project

**ADC:** Analog-to-Digital Converter

**bit:** binary digit

**bps:** bits per second

**CCA:** Clear Channel Assessment

**CPU:** Central Processing Unit

**CRC:** Cyclic Redundancy Check

**CSCC:** Common Spectrum Coordination Channel

**dB:** deciBels

**DSP:** Digital Signal Processing

**ΕΚΕΤΑ:** Εθνικό Κέντρο Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης

**eNB:** eNode B

**EPC:** Evolved Packet Core

**EUTRAN:** Evolved Universal Terrestrial Radio Access

**ExMIMO:** Express Multiple Input – Multiple Output

**FPGA:** Field Programmable Gate Array

**G:** Generation, (wireless telecommunications)

**GSM:** Global System for Mobile communications

**HARQ:** Hybrid Automatic Repeat – reQuest

**HDD:** Hard Disk Drive

**IEEE:** Institute of Electrical and Electronics Engineers

**ITU-R:** International Telecommunication Union Radiocommunication sector

**LAA:** License Assisted Access

**LTE:** Long Term Evolution

**LTE-U:** Long Term Evolution Unlicensed

**LBT:** ListenBefore Talk

**MAC:** MediumAccessControl

**MIMO:** Multiple Input – Multiple Output

**NACK/ACK:** Non ACKnowledgement / ACKnowledgement

**OAI:** OpenAirInterface

**OFDM:** Orthogonal Frequency – Division Multiplexing

**OSA:** OpenAirInterface Software Alliance

**PCI:** Peripheral Component Interconnect

**PDCP:** Packet Data Convergence Protocol

**PDU:** Protocol Data Unit

**PUE:** Primary User Emulation

**PXIe:** PCI eXtensions for Instrumentation

**QoS:** Quality of Service

**RAM:** Random Access Memory

**RLC:** Radio Link Control

**ROHC:** RObust Header Compression

**RRC:** Radio Resource Control

**SDU:** Service Data Unit

**SN:** Sequence Number

**SA3:** System Architecture working group 3

**TCP:** Transmission Control Protocol

**TP:** Transport Block

**UDP:** User Datagram Protocol

**UE:** User Equipment

**UHD:** USRP Hardware Driver

**UMTS:** Universal Mobile Telecommunications System

**USB:** Universal Serial Bus

**VoIP:** Voice over Internet Protocol

**WiFi:** Wireless Fidelity

**WiMAX:** Worldwide Interoperability for Microwave Access

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β΄

### Δείγματα κώδικα

#### 1. enb.band13.rel10.exmimo2.conf

```
Active_eNBs = ("eNB_Eurecom_LTEBox");
# Asn1_verbosity, choice in: none, info, annoying
Asn1_verbosity = "none";
eNBs =
(
{
////////// Identification parameters:
eNB_ID= 0xe00;
cell_type= "CELL_MACRO_ENB";
eNB_name = "eNB_Eurecom_LTEBox";
// Tracking area code, 0x0000 and 0xfffe are reserved values
tracking_area_code = "1";
mobile_country_code= "208";
mobile_network_code= "92";
////////// Physical parameters:
component_carriers = (
{
frame_type                = "FDD";
tdd_config                = 3;
tdd_config_s              = 0;
prefix_type               = "NORMAL";
eutra_band                = 13;
downlink_frequency        = 748500000L;
uplink_frequency_offset  = 31000000;
Nid_cell                  = 0;
    N_RB_DL                = 25;
Nid_cell_mbsfn            = 0;
nb_antennas_tx            = 1;
nb_antennas_rx            = 1;
tx_gain                   = 2;
rx_gain                   = 2;
prach_root                = 22;
prach_config_index        = 0;
prach_high_speed          = "DISABLE";
prach_zero_correlation    = 1;
prach_freq_offset         = 2;
pucch_delta_shift         = 1;
pucch_nRB_CQI             = 1;
pucch_nCS_AN              = 0;
pdsch_referenceSignalPower = -24;
pdsch_p_b                 = 0;
pusch_n_SB                = 1;
    pusch_enable64QAM      = "DISABLE";
```

```

pusch_hoppingMode           = "interSubFrame";
pusch_hoppingOffset         = 0;
pusch_groupHoppingEnabled   = "ENABLE";
pusch_groupAssignment       = 0;
pusch_sequenceHoppingEnabled = "DISABLE";
    pusch_nDMRS1             = 0;
pich_duration               = "NORMAL";
pich_resource               = "ONESIXTH";
srs_enable                  = "DISABLE";
    /* srs_BandwidthConfig    =;
srs_SubframeConfig         =;
srs_ackNackST              =;
srs_MaxUpPts               =;*/
    pusch_p0_Nominal         = -75;
pusch_alpha                 = "AL1";
    pucch_p0_Nominal        = -108;
    msg3_delta_Preamble     = 6;
    pucch_deltaF_Format1    = "deltaF2";
    pucch_deltaF_Format1b   = "deltaF3";
    pucch_deltaF_Format2    = "deltaF0";
    pucch_deltaF_Format2a   = "deltaF0";
    pucch_deltaF_Format2b   = "deltaF0";
rach_numberOfRA_Preambles  = 64;
rach_preamblesGroupAConfig = "DISABLE";
    /*
rach_sizeOfRA_PreamblesGroupA= ;
rach_messageSizeGroupA= ;
rach_messagePowerOffsetGroupB= ;
    */
rach_powerRampingStep      = 2;
rach_preambleInitialReceivedTargetPower = -100;
rach_preambleTransMax      = 10;
rach_raResponseWindowSize  = 10;
rach_macContentionResolutionTimer = 48;
    rach_maxHARQ_Msg3Tx     = 4;

pcch_default_PagingCycle   = 128;
pcch_nB                    = "oneT";
bcch_modificationPeriodCoeff = 2;
    ue_TimersAndConstants_t300 = 1000;
    ue_TimersAndConstants_t301 = 1000;
    ue_TimersAndConstants_t310 = 1000;
    ue_TimersAndConstants_t311 = 10000;
    ue_TimersAndConstants_n310 = 20;
    ue_TimersAndConstants_n311 = 1;
}
);
srb1_parameters :
{
    # timer_poll_retransmit = (ms) [5, 10, 15, 20,... 250, 300, 350, ... 500]
timer_poll_retransmit = 80;
    # timer_reordering = (ms) [0,5, ... 100, 110, 120, ... ,200]

```

```

timer_reordering    = 35;
  # timer_reordering = (ms) [0,5, ... 250, 300, 350, ... ,500]
timer_status_prohibit = 0;
  # poll_pdu = [4, 8, 16, 32 , 64, 128, 256, infinity(>10000)]
poll_pdu= 4;
  # poll_byte = (kB) [25,50,75,100,125,250,375,500,750,1000,1250,1500,2000,3000,infinity(>10000)]
poll_byte= 99999;
  # max_retx_threshold = [1, 2, 3, 4 , 6, 8, 16, 32]
max_retx_threshold= 4;
}
# ----- SCTP definitions
SCTP :
{
  # Number of streams to use in input/output
  SCTP_INSTREAMS = 2;
  SCTP_OUTSTREAMS = 2;
};
////////// MME parameters:
mme_ip_address = ( { ipv4 = "192.168.13.11";
                    ipv6 = "192:168:30::17";
};
active = "yes";
preference = "ipv4";
}
);

NETWORK_INTERFACES :
{
  ENB_INTERFACE_NAME_FOR_S1_MME = "eth1";
  ENB_IPV4_ADDRESS_FOR_S1_MME = "192.168.13.171/24";

  ENB_INTERFACE_NAME_FOR_S1U = "eth1";
  ENB_IPV4_ADDRESS_FOR_S1U = "192.168.13.171/24";
  ENB_PORT_FOR_S1U = 2152; # Spec 2152
};
log_config :
{
  global_log_level = "info";
  global_log_verbosity = "high";
  hw_log_level = "info";
  hw_log_verbosity = "high";
  phy_log_level = "info";
  phy_log_verbosity = "high";
  mac_log_level = "info";
  mac_log_verbosity = "high";
  rlc_log_level = "info";
  rlc_log_verbosity = "high";
  pdcp_log_level = "info";
  pdcp_log_verbosity = "high";
  rrc_log_level = "info";
  rrc_log_verbosity = "high";
};
});

```

## 2. Python Wrapper (eNB side)

```
import os
import linecache
import time
import Queue
import threading
import sys
import socket

def spectrum_sense():
    os.system("/root/USRP/gnuradio/gr-uhd/examples/python/usrp_spectrum_sense.py -s 2000000 -b 1000000
0.746G 0.756G > /tmp/output.txt")

def start_enb():
    os.chdir("rel7763/targets/bin/")
    os.system("./lte-softmodem-nos1.Rel10 -O enb.band13.rel10.exmimo2.conf -S --ulsch-max-errors 1000")

try:
    t = threading.Thread(target=spectrum_sense, args = ())
    t.daemon = True
    t.start()

    time.sleep(20) #for spectrum sensing purposes
    #os.system("killall -9 python")

    freq_list = []
    optimal_window = []

    with open("/tmp/output.txt", 'r') as f:
        for i in range(22, 47): #line in enumerate(f, 22): #for x in range(0, 3):
            line = linecache.getline("/tmp/output.txt", i)
            if(line):
                signal = line[77:81]
                noise = line[-14:-1]
                freq_status = [line[56:67], signal, noise]
                freq_list.append(freq_status)

    for i in range(0, 5):
        optimal_window.append(freq_list[i])
    #print(optimal_window)

    time.sleep(10)
    #mean values
    sum_sig = []
    sum_noise = []
    for i in range(0, 5):
        sum_sig.append(float(optimal_window[i][1]))
```



```

    sum_noise.append(float(optimal_window[i][2]))
signal_mean_value_level = sum(sum_sig)/len(sum_sig)
noise_mean_value_level = sum(sum_noise)/len(sum_noise)

#variances
variance_sig_sum = []
variance_noise_sum = []
for i in range(0, 5):
    variance_sig_sum.append(abs(sum_sig[i] - signal_mean_value_level))
    variance_noise_sum.append(abs(sum_noise[i] - noise_mean_value_level))
signal_variance = sum(variance_sig_sum) / len(sum_sig)
noise_variance = sum(variance_noise_sum) / len(sum_noise)

#total optimization rule (50% signal presense mean value, 30% variance of signal presense, 15% noise presense
mean value, 5% variance of noise presense)
opt_rule = (0.5 * signal_mean_value_level) + (0.3 * signal_variance) + (0.15 * noise_mean_value_level) + (0.05
* noise_variance)

temp_optimal_window = optimal_window[:]
for i in range(5, len(freq_list)): #line in enumerate(f, 22): #for x in range(0, 3):
    print(i)
    print(opt_rule)
    temp_optimal_window.remove(temp_optimal_window[0]) #del temp_optimal_window[0]
    temp_optimal_window.append(freq_list[i])
    print(temp_optimal_window[2][0])
    #mean values
    temp_sum_sig = []
    temp_sum_noise = []
    for i in range(0, 5):
        temp_sum_sig.append(float(temp_optimal_window[i][1]))
        temp_sum_noise.append(float(temp_optimal_window[i][2]))
    temp_signal_mean_value_level = sum(temp_sum_sig)/len(temp_sum_sig)
    temp_noise_mean_value_level = sum(temp_sum_noise)/len(temp_sum_noise)
    #variances
    temp_variance_sig_sum = []
    temp_variance_noise_sum = []
    for i in range(0, 5):
        temp_variance_sig_sum.append(abs(temp_sum_sig[i] - temp_signal_mean_value_level))
        temp_variance_noise_sum.append(abs(temp_sum_noise[i] - temp_noise_mean_value_level))
    temp_signal_variance = sum(temp_variance_sig_sum) / len(temp_sum_sig)
    temp_noise_variance = sum(temp_variance_noise_sum) / len(temp_sum_noise)
    #total optimization rule (50% signal presense mean value, 30% variance of signal presense, 15% noise
presense mean value, 5% variance of noise presense)
    temp_opt_rule = (0.5 * temp_signal_mean_value_level) + (0.3 * temp_signal_variance) + (0.15 *
temp_noise_mean_value_level) + (0.05 * temp_noise_variance)
    print(temp_opt_rule)
    #check for optimal window
    if (temp_opt_rule < opt_rule and float(optimal_window[2][0]) > 748500000 and
float(optimal_window[2][0]) < 753500000):
        opt_rule = temp_opt_rule
        optimal_window = []
        optimal_window = temp_optimal_window[:]

```

```

        print("opt window", optimal_window)
    else:
        print("discarded")
        print("\n")

    #if float(optimal_window[2][0]) < 748500000:
    #    optimal_window[2][0] = "748500000.0"
    #elif float(optimal_window[2][0]) > 753500000:
    #    optimal_window[2][0] = "753500000.0"

    print("ideal frequency is ", optimal_window[2][0])

    with open("rel7763/targets/bin/enb.band13.rel10.exmimo2.conf", 'r') as f:
        line0 = linecache.getline("rel7763/targets/bin/enb.band13.rel10.exmimo2.conf", 31)
        line1 = '    downlink_frequency          = ' + optimal_window[2][0][:-2] + 'L;\n'
    #line0.replace(line0[64:73], optimal_window[2][0][:-2])
    lines = f.readlines()

    with open("rel7763/targets/bin/enb.band13.rel10.exmimo2.conf", 'w') as f:
        for line in lines:
            if line == line0:
                f.write(line1)
                #print(line)
            else:
                f.write(line)

    #os.chdir("rel7763/targets/bin/")
    #os.system("./lte-softmodem-nos1.Rel10 -O enb.band13.rel10.exmimo2.conf -S --usch-max-errors 100")
    #time.sleep(10)

    t1 = threading.Thread(target=start_enb, args = ())
    t1.daemon = True
    t1.start()

    #socket utilities
    TCP_IP = '10.64.44.57'
    TCP_PORT = 5005
    BUFFER_SIZE = 1024
    MESSAGE = optimal_window[2][0]

    s = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)
    s.connect((TCP_IP, TCP_PORT))
    s.send(MESSAGE)
    data = s.recv(BUFFER_SIZE)
    s.close()

    print "sent data:", data
    #socket utilities

```

```
# os.system("killall -9 python")
# sys.exit
time.sleep(1000)
except (KeyboardInterrupt, SystemExit):
# cleanup_stop_thread();
os.system("killall -9 python")
os.system("killall -9 lte-softmodem-nos1.Rel10")
os.system("/bin/ps aux | /bin/grep -ie 'lte-softmodem-nos1.Rel10' | /usr/bin/awk '{print $2}' | /usr/bin/xargs
kill -9")
sys.exit()
```