



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μελέτη και προσομοίωση αλγοριθμικών διαδικασιών για
επικοινωνίες συσκευής-προς-συσκευή σε δίκτυα 4^{ης} γενιάς**

Γεώργιος Μ. Λεγάκης

**Επιβλέποντες: Λάζαρος Μεράκος, Καθηγητής
Δημήτριος Τσόλκας, Διδάκτωρ**

ΑΘΗΝΑ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2017

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη και προσομοίωση αλγοριθμικών διαδικασιών για επικοινωνίες συσκευής-προς-συσκευή σε δίκτυα 4^{ης} γενιάς

Γεώργιος Μ. Λεγάκης

A.M.: 1115200900086

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ: Λάζαρος Μεράκος, Καθηγητής
Δημήτριος Τσόλκας, Διδάκτωρ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι επικοινωνίες συσκευής-προς-συσκευή (Device-to-Device – D2D) σε δίκτυα 4^{ης} γενιάς έχουν προταθεί ως μία πολλά υποσχόμενη τεχνολογία η οποία ενσωματώνεται στο σύστημα Long Term Evolution-Advanced (LTE-A), με στόχο τη βελτίωση της εμπειρίας των χρηστών, την εξισορρόπηση του τηλεπικοινωνιακού φόρτου, και την αποδοτικότερη αξιοποίηση των ραδιοπόρων.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι: α) η παρουσίαση του δικτύου LTE-A το οποίο μπορεί να ενσωματώσει την τεχνολογία D2D, β) η μελέτη των προκλήσεων που παρουσιάζει η ενσωμάτωση αυτή και των τεχνικών που έχουν ήδη προταθεί στην υπάρχουσα βιβλιογραφία, γ) η προσομοίωση αλγοριθμικών διαδικασιών που υπεισέρχονται στις D2D επικοινωνίες με το omnet++, στο ειδικό περιβάλλον προσομοίωσης που ορίζεται για D2D επικοινωνίες, το SimuLTE.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Συστήματα και Δίκτυα Επικοινωνιών

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: LTE-A, επικοινωνία συσκευής προς συσκευή, D2D αλγόριθμοι, επιλογή λειτουργίας, SimuLTE

ABSTRACT

Device-to-Device (D2D) communications in 4th generation networks has been proposed as a promising concept underlay Long Term Evolution-Advanced (LTE-A) standard and aims to improve user experiences, offloading the core network and utilizing radio resources efficiently.

The purpose of this thesis is: a) to present the LTE-A network, which can integrate D2D technology, b) to study the challenges that have been arisen researching this integration and the techniques that have already been proposed in the existing literature, c) to simulate algorithmic processes that infiltrate into D2D communications within omnet++, in a omnet-based model designed for D2D communications, which is SimuLTE.

SUBJECT AREA: Communication Systems and Networks

KEYWORDS: LTE-A, device-to-device communication, D2D algorithms, mode selection, SimuLTE

Αφιερώνεται στη μνήμη του πατπού μου Γεωργίου Λεγάκη.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για τη διεκπεραίωση της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες, καθ. Λάζαρο Μεράκο και Διδ. Δημήτριο Τσόλκα, για τη συνεργασία και την πολύτιμη συμβολή τους στην ολοκλήρωση της.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	13
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
1.1 Το σύστημα Long Term Evolution Advanced (LTE-A)..... Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
1.2 Η δομή του LTE-A..... Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
1.3 Η Αρχιτεκτονική του LTE-A..... Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
1.4 Η Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλων του LTE-A	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
1.4.1 Πρωτόκολλα Διεπαφής Αέρα	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
1.4.2 Πρωτόκολλα Μεταφοράς σε Σταθερό Δίκτυο.....	19
1.4.3 Πρωτόκολλα Επιπέδου Χρήστη.....	20
1.4.4 Πρωτόκολλα Επιπέδου Ελέγχου.....	21
2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ-ΠΡΟΣ-ΣΥΣΚΕΥΗ (D2D)	22
2.1 Η Αρχιτεκτονική του D2D και οι Απαιτήσεις στο LTE-A Δίκτυο	23
2.2 Μετάδοση στο Sidelink	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
2.3 Έλεγχος και Απόδοση Ισχύος.....	26
2.4 Κατανομή των Πόρων.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
2.5 Τεχνολογία Πολλαπλής Κεραίας και Συστήματα MIMO ...	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
2.6 Διαχείριση Κινητικότητας και Handover	27
2.7 Κωδικοποίηση του Δικτύου.....	28
2.8 Ανακάλυψη Γειτονικής Συσκευής	28
3. ΑΛΓΟΡΙΘΜΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ-ΠΡΟΣ-ΣΥΣΚΕΥΗ .	30
3.1 D2D Ανακάλυψη.....	31
3.1.1 Αλγόριθμος Ανακάλυψης ύστερα από Αίτημα (request-based discovery algorithm) για Ανίχνευση Συσκευής στο Δίκτυο LTE	33
3.1.2 Αλγόριθμος Απευθείας Ανακάλυψης (direct discovery algorithm) για Ανίχνευση Συσκευής στο Δίκτυο LTE	34

3.2	Αλγόριθμοι Συσκευής προς Συσκευή για Έλεγχο Ισχύος στο LTE.....	35
3.2.1	Αλγόριθμος Ελέγχου Ισχύος στο Δίκτυο LTE	35
3.2.2	Αλγόριθμος Μεγιστοποίησης-Χρησιμότητας (Utility-Maximization) Ελέγχου Ισχύος.....	36
3.3	Αλγόριθμοι Επικοινωνίας Συσκευής προς Συσκευή για Δέσμευση των Πόρων στο Δίκτυο LTE	37
3.3.1	Τυχαία Κατανομή Πόρων (Random Resource Allocation).....	37
3.3.2	Ισορροπημένη Κατανομή Πόρων (Balanced Random Allocation).....	37
3.3.3	Κατανομή Πόρων με Προστασία του Κυψελοειδούς Δικτύου (Cellular Protection Allocation)..	38
3.3.4	Κατανομή Πόρων με Ελάχιστες Παρεμβολές (Minimum Interference Allocation)	39
3.4	Τεχνολογία D2D Επιλογή Λειτουργίας (Mode Selection)	40
3.4.1	Αλγόριθμος Επιλογής Λειτουργίας σύμφωνα με την Κατανάλωση Ισχύος στο Δίκτυο LTE	40
3.4.2	Αλγόριθμος Επιλογής Λειτουργίας σύμφωνα με την Τιμή του SINR στο Δίκτυο LTE	41
3.4.3	Αλγόριθμος Επιλογής Λειτουργίας σύμφωνα με τα Αποτελέσματα μιας Πληθώρας Παραμέτρων στο Δίκτυο LTE	43
4.	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ MODE SELECTION ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ 4ΣΦΑΛΜΑ! ΔΕΝ ΕΧΕΙ ΟΡΙΣΤΕΙ ΣΕΛΙΔΟΔΕΙΚΤΗΣ.	
4.1	Περιβάλλον Προσομοίωσης.....	45
4.2	Σχολιασμός Αλγορίθμου και Διεξαγωγή Πειραμάτων	47
4.3	Περιγραφή των Προσομοιώσεων	48
4.3.1	Περιγραφή 1ης προσομοίωσης.....	50
4.3.2	Περιγραφή 2ης προσομοίωσης.....	54
4.3.3	Περιγραφή 3ης προσομοίωσης.....	58
5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	64
	ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ	65
	ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	66
	ΑΝΑΦΟΡΕΣ	68

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Στοίβα Πρωτόκολλων Διεπαφής Αέρα.....	19
Σχήμα 2: Στοίβα Πρωτόκολλων Μεταφοράς σε Σταθερό Δίκτυο Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
Σχήμα 3: Στοίβα πρωτόκολλων του Επιπέδου Χρήστη Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
Σχήμα 4: Στοίβα πρωτόκολλων του Επιπέδου Ελέγχου Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
Σχήμα 5: Κανάλια του Sidelink για τη διεπαφή αέρα Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
Σχήμα 6: Αλγόριθμος κατανομής των πόρων.....	37
Σχήμα 7: Αρχιτεκτονική του SimuLTE.....	46
Σχήμα 8: Σχήμα κίνησης κάθε κινητού τηλεφώνου	49

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

- Εικόνα 1: Αρχιτεκτονική του LTEσελ. **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Εικόνα 2: Οι επικοινωνίες D2D σε ένα παραδοσιακό κυψελοειδές ασύρματο σύστημα επικοινωνιώνσελ. **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Εικόνα 3: Οι επικοινωνίες D2D στην αρχιτεκτονική του δικτύου LTEσελ. **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
- Εικόνα 4: Ζεύξεις ελέγχου και δεδομένων του Sidelink.....σελ. 25
- Εικόνα 5: Ο αλγόριθμος Balanced Random Allocation.....σελ. 38
- Εικόνα 6: Ο αλγόριθμος Cellular Protection Allocationσελ. 38
- Εικόνα 7: Παρεμβολές που προκύπτουν απο μία υποψήφια σύνδεση D2D σε κυψέλη με μία ζεύξη D2D και μία κυψελοειδή ζεύξησελ. 39
- Εικόνα 8: Στιγμιότυπο προσομοίωσης από το εργαλείο omnetppσελ. 49
- Εικόνα 9: Ενδεικτική κίνηση των κινητών σταθμών στο χώρο της 1^{ης} προσομοίωσηςσελ. 50
- Εικόνα 10: Παράσταση μεταξύ CQI Best και απόστασης κινητών τηλεφώνων της 1^{ης} προσομοίωσηςσελ. 53
- Εικόνα 11: Παράσταση μεταξύ CQI Best και απόστασης του 1^{ου} κινητού τηλεφώνου και του eNodeB από την 1^η προσομοίωση.....σελ. 53
- Εικόνα 12: Παράσταση μεταξύ CQI Best και απόστασης του 2^{ου} κινητού τηλεφώνου και του eNodeB από τη 1^η προσομοίωσησελ. 54
- Εικόνα 13: Ενδεικτική κίνηση κινητών στη 2^η προσομοίωσησελ. 55
- Εικόνα 14: Παράσταση μεταξύ CQI Best και απόστασης κινητών τηλεφώνων της 2^{ης} προσομοίωσηςσελ. 57
- Εικόνα 15: Παράσταση μεταξύ CQI Best και απόστασης του 1^{ου} κινητού τηλεφώνου και του eNodeB από την 2^η προσομοίωση.....σελ. 57
- Εικόνα 16: Παράσταση μεταξύ CQI Best και απόστασης του 2^{ου} κινητού τηλεφώνου και του eNodeB από την 2^η προσομοίωση.....σελ. 58
- Εικόνα 17: Ενδεικτική κίνηση κινητών στη 3^η προσομοίωσησελ. 59
- Εικόνα 18: Παράσταση μεταξύ CQI Best και απόστασης κινητών τηλεφώνων της 3^{ης} προσομοίωσηςσελ. 61

Εικόνα 19: Παράσταση μεταξύ CQI Best και απόστασης του 1 ^{ου} κινητού τηλεφώνου και του eNodeB από την 3 ^η προσομοίωση.....	σελ. 61
Εικόνα 20: Παράσταση μεταξύ CQI Best και απόστασης του 2 ^{ου} κινητού τηλεφώνου και του eNodeB από την 3 ^η προσομοίωση.....	σελ. 62
Εικόνα 21: Αναλυτική παράσταση των CQI και απόστασης κινητών τηλεφώνων της 3 ^{ης} προσομοίωσης	σελ. 62
Εικόνα 22: Αναλυτική παράσταση των CQI και απόστασης του 1 ^{ου} κινητού τηλεφώνου και του eNodeB από την 3 ^η προσομοίωση	σελ. 63
Εικόνα 23: Αναλυτική παράσταση των CQI και απόστασης του 2 ^{ου} κινητού τηλεφώνου και του eNodeB από την 3 ^η προσομοίωση	σελ. 63

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

- Πίνακας 1: Πίνακας κίνησης κινητών τηλεφώνων στην 1η προσομοίωση σελ. 51
- Πίνακας 2: Πίνακας των CQI και των αποστάσεων για την 1η προσομοίωση σελ. 52
- Πίνακας 3: Πίνακας κίνησης κινητών τηλεφώνων στην 2^η προσομοίωση..... σελ. 55
- Πίνακας 4: Πίνακας των CQI και των αποστάσεων για την 2^η προσομοίωση..... σελ. 56
- Πίνακας 5: Πίνακας κίνησης κινητών τηλεφώνων στην 3^η προσομοίωση..... σελ. 59
- Πίνακας 6: Πίνακας των CQI και των αποστάσεων για την 3^η προσομοίωση..... σελ. 60

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια των σπουδών για την απόκτηση του Προπτυχιακού Διπλώματος στον τομέα της Πληροφορικής και των Τηλεπικοινωνιών που απονέμει το Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια, η εκθετική ανάπτυξη της ασύρματης επικοινωνίας και της κυκλοφορίας δεδομένων, οι ολοένα και υψηλότερες απαιτήσεις για ευρυζωνικές ασύρματες κινητές επικοινωνίες και η ανάγκη εμφάνισης νέων ασύρματων εφαρμογών και υπηρεσιών αποτέλεσαν τους βασικούς παράγοντες για την περαιτέρω ανάπτυξη του Δικτύου LTE- A.

Η επικοινωνία συσκευής προς συσκευή (Device-to-Device) είναι μια πολλά υποσχόμενη νέα λειτουργία στο σύστημα LTE-A που προσφέρει υψηλότερη φασματική απόδοση (spectral efficiency) και συντελεί στην βελτίωση προβλημάτων όπως η κάλυψη και η διαχείριση παρεμβολών, ενώ ενισχύει και την συνολική απόδοση του δικτύου σε όρους ποιότητας υπηρεσίας και ποιότητας εμπειρίας. Στη πράξη, με τη δυνατότητα D2D, οι συσκευές σε φυσική εγγύτητα είναι σε θέση να ανακαλύψουν η μία την άλλη και στην συνέχεια να επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους.

Η λειτουργία D2D θεωρείται αναπόσπαστο μέρος των επικοινωνιών 5G, βρίσκοντας εφαρμογή σε πολλούς διαφορετικούς τομείς, όπως η αποφυγή υπερφόρτωσης του δικτύου, η ασφάλεια, οι κοινωνικές υπηρεσίες κ.α..

Στην παρούσα εργασία, το πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζει μία επισκόπηση του LTE-A εστιάζοντας στην αρχιτεκτονική του συστήματος και των πρωτοκόλλων που χρησιμοποιεί. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στις επικοινωνίες συσκευής-προς-συσκευή και επικεντρώνεται στην παρουσίαση των σημαντικότερων προκλήσεων που αφορούν την πραγματοποίηση και την ενσωμάτωση τους στο σύστημα LTE-A. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι αλγόριθμοι που έχουν σχεδιαστεί για την επίλυση αυτών των προκλήσεων και αφορούν το δίκτυο LTE-A. Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται οι βασικές οντότητες που έχουν υλοποιηθεί στο περιβάλλον omnet++, γίνεται μία εισαγωγή του SimuLTE και παριστάνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ενός απλού αλγορίθμου επιλογής λειτουργίας. Τέλος το πέμπτο κεφάλαιο παρέχει συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα στο μέλλον.

1.1 Το σύστημα Long Term Evolution-Advanced (LTE-A)

Long Term Evolution (LTE) είναι μια τεχνολογία αιχμής, που περιλαμβάνει κάποια ανεπτυγμένα και αποδοτικά χαρακτηριστικά τα οποία δεν είχαν χρησιμοποιηθεί ποτέ πριν στον τομέα των ασύρματων και κινητών επικοινωνιών και δίνουν στα LTE ένα βασικό πλεονέκτημα σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες. Το LTE είναι η τυπική ονομασία από το project κινητής τεχνολογίας 3GPP που θέτει ένα σύνολο νέων παραμέτρων για την εξυπηρέτηση των μελλοντικών αναγκών στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Το 3GPP LTE ξεκίνησε το 2004 και η εισαγωγή του έχει ως στόχο την ενίσχυση του δικτύου UTRAN (Universal Terrestrial Radio Access Network) συμβάλλοντας ταυτόχρονα στην υποστήριξη των κινητών τεχνολογιών τέταρτης γενιάς (4G) [1]. Ορισμένα χαρακτηριστικά του LTE περιλαμβάνονται σε παλαιότερες εκδόσεις της υπάρχουσας πρότυπης κινητής τηλεφωνίας, που ονομάζεται Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Τηλεπικοινωνιών (UMTS), τα οποία βελτιώθηκαν και τροποποιήθηκαν προκειμένου να παρέχουν στο LTE την ικανότητα να εκτελεί με πιο βέλτιστο τρόπο όλες τις απαραίτητες λειτουργίες σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο σύστημα κινητής επικοινωνίας. Επιπλέον δημιουργεί προϋποθέσεις για την κάλυψη ενός μεγάλου εύρους εφαρμογών κάτω από τα πλαίσια της συνεχόμενης τεχνολογικής ανάπτυξης. Μερικά από τα χαρακτηριστικά του LTE είναι ιδανικά για την περίπτωση εφαρμογών ITS, όπου το ταχέως μεταβαλλόμενο περιβάλλον και οι πολύ αυστηρές απαιτήσεις για την αποφυγή καθυστερήσεων, δημιουργούν την ανάγκη για υψηλές προδιαγραφές, ώστε να αυξηθεί η απόδοση στα συστήματα επικοινωνιών. Με τη χρήση κάποιων παραμέτρων οι καθυστερήσεις ελαχιστοποιούνται και η απόδοση του LTE μπορεί να βελτιστοποιηθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό, κάνοντας για παράδειγμα λήψη μιας μετάδοσης από πολλαπλούς δέκτες [2]. Αυτές οι παράμετροι οδήγησαν στην ανάπτυξη του LTE-Advanced. Το LTE-Advanced, το οποίο είναι επίσης γνωστό ως LTE Release 10, βελτιώνει το υπάρχον LTE και υποστηρίζει πολύ υψηλότερους ρυθμούς, υψηλότερη απόδοση, κάλυψη και χαμηλότερες καθυστερήσεις, πράγμα το οποίο συνολικά έχει ως αποτέλεσμα μία καλύτερη εμπειρία από την πλευρά του χρήστη. Αυτό επιτυγχάνεται επειδή το LTE-A διαθέτει κάποιες επιπλέον τεχνικές όπως είναι η επέκταση του εύρους ζώνης μέσω της ένωσης καναλιών (carrier aggregation), η χωρική πολυπλεξία (spatial multiplexing) για τη μετάδοση και λήψη σε συστήματα με πολλαπλούς πομπούς και δέκτες (MIMO) και ο δυναμικός συντονισμός (Coordinated Multipoint) πολλαπλών σταθμών βάσης στην κατερχόμενη ζεύξη. Επιπλέον, το LTE-A υποστηρίζει ετερογενείς (heterogeneous) αναπτύξεις που αποσκοπούν στην επέκταση της κάλυψης του δικτύου και στην αύξηση της χωρητικότητας του, χρησιμοποιώντας μικρότερες κυψέλες (picocells, femtocells), διασυνδέσεις (relays) όπου ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη μεσολαβούν επιπλέον κόμβοι προκειμένου να επικοινωνήσουν, λόγω της μεγάλης απόστασης μεταξύ τους ή επειδή για παράδειγμα δεν υπάρχει κάλυψη δικτύου σε ένα από τους δύο χρήστες, αλλά και κατανομημένους σταθμούς βάσης (remote radio heads). Αυτές οι αναπτύξεις πραγματοποιούνται μέσα στη μακρο-κυψέλη (microcell) [32].

1.2 Η δομή του LTE-A

Για την καλύτερη κατανόηση του προτύπου, είναι πολύ σημαντικό να έχουμε μια σταθερή εικόνα της δομής και αρχιτεκτονικής του LTE-A. Το LTE-A είναι ένα δίκτυο υποδομής μέσα στο οποίο η επικοινωνία πραγματοποιείται μέσω ενός σταθμού βάσης και ποτέ απευθείας μεταξύ δύο ή περισσότερων χρηστών. Αυτό αποτελεί την μεγαλύτερη διαφορά αυτού του προτύπου από το πρότυπο 802.11p. Το LTE-A συχνά αναφέρεται ως η τέταρτη γενιά (4G) των δικτύων κινητής επικοινωνίας, ωστόσο η πρώτη έκδοση του LTE (Release 8) δεν πληρούσε τα κριτήρια 4G που διατυπώνονται από την διεθνή επιτροπή τηλεπικοινωνιών (IMT-Advanced) [4]. Η πρώτη έκδοση που είχε τις προδιαγραφές να πληρεί αυτά τα κριτήρια ήταν η έκδοση 10. Παράλληλα με τις δραστηριότητες τυποποίησης, η επόμενη γενιά των κινητών δικτύων (NGMN) ιδρύθηκε για να οδηγήσει την ανάπτυξη 4G από την πλευρά των χρηστών. Το LTE-A περιγράφει τη νέα τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης ή Radio Access Network (RAN) η οποία ορίζει την αλληλεπίδραση μεταξύ των εξελιγμένων σταθμών βάσης EvB (evolved Base Stations) και των τερματικών των χρηστών (User Equipment - UE). Το UE αναφέρεται στην πράξη σε μια φορητή συσκευή που χρησιμοποιείται από τον τελικό χρήστη για λόγους επικοινωνίας, περιέχει μια κάρτα ολοκληρωμένου κυκλώματος (UICC) και περιλαμβάνει μια προγραμματισμένη εφαρμογή που ονομάζεται USIM που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό και τον έλεγχο ταυτότητας του τελικού χρήστη [1]. Αυτή η νέα τεχνολογία είναι μια εξέλιξη της πρόσβασης UMTS Terrestrial Radio Access (UTRA), ένα σύστημα που χρησιμοποιήθηκε στο UMTS και αυτός είναι ο λόγος που ονομάζεται Evolved - UTRA (EUTRA). Το interface των ραδιοσυχνοτήτων βασίζεται στην Ορθογώνια Διαίρεση Συχνότητας Πολλαπλής Πρόσβασης (OFDMA) στην κατερχόμενη ζεύξη (downlink) και στο Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SCFDMA) στην ανερχόμενη ζεύξη (uplink) [5].

1.3 Η αρχιτεκτονική του LTE-A

Η Εικόνα 1 δείχνει μια επισκόπηση της αρχιτεκτονικής πρόσβασης στο δίκτυο LTE-A. Το σύστημα αρχιτεκτονικής εξέλιξης (SAE) αφορά τη βασική αρχιτεκτονική του LTE-A. Όπως απεικονίζεται, το LTE-A δίκτυο αποτελείται από το κυρίως δίκτυο που είναι το EPC (Evolved Packet Core) και το δίκτυο πρόσβασης E-UTRAN. Το EPC είναι ένα ενιαίο κεντρικό δίκτυο βασισμένο σε IP (internet protocol) που υποστηρίζει πολλαπλά δίκτυα πρόσβασης, έτσι ώστε πολλαπλές 3GPP τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης, όπως το HSPA και το LTE, να μπορούν να έχουν πρόσβαση και να αναπτυχθούν στα πλαίσια του ίδιου δικτύου. Το δίκτυο EPC είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση της σηματοδότησης, της πολιτικής και της ασφάλειας καθώς και ο άμεσος τρόπος σύνδεσης με το διαδίκτυο. Το eNodeB είναι συνδεδεμένο με το EPC μέσω δύο ξεχωριστών οντοτήτων, της Mobility Management Entity (MME) και του Serving Gateway (S-GW), οι οποίες σε συνδυασμό με την PDN Gateway (P-GW) είναι τα σημαντικότερα στοιχεία του EPC. Το EPC περιλαμβάνει και επιπλέον στοιχεία-κόμβους τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω [3] :

- **MME**

Η Mobility Management Entity (Μονάδα Διαχείρισης Κινητικότητας) είναι ο κεντρικός φορέας ελέγχου στο EPC. Το επίπεδο ελέγχου και οι πληροφορίες που προέρχονται από τον κόμβο eNodeB δρομολογούνται κυρίως στο MME. Μια από τις πιο βασικές λειτουργίες του MME είναι ότι χειρίζεται τη σηματοδότηση μεταξύ του UE και του CN (Core Network). Πιο συγκεκριμένα, υποστηρίζει την εγκαθίδρυση, τη συντήρηση και την απελευθέρωση της ζεύξης του eNodeB και

του S-GW. Επίσης, χειρίζεται το θέμα της ασφάλειας και της ταυτοποίησης καθώς και το προφίλ εγγραφής και τις υπηρεσίες συνδεσιμότητας μεταξύ του UE και του δικτύου. Τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται μεταξύ του UE και του CN είναι τα πρωτόκολλα NAS (Non Access Stratum).

- **P-GW**

Το PDN-GateWay χρησιμεύει ως ενδιάμεσος δρομολογητής τελικού σημείου μεταξύ του EPS και των εξωτερικών δικτύων. Παρέχει τόσο διεύθυνση IP στο UE όσο και επιβολή συγκεκριμένου QoS και χρέωση με βάση τη ροή δεδομένων και σύμφωνα με τους κανονισμούς που έχουν οριστεί στο PCRF. Είναι υπεύθυνο για το φιλτράρισμα των IP πακέτων του χρήστη προφυλάσσοντας την κυκλοφορία των δεδομένων. Επίσης εξυπηρετεί τη συμβατότητα μεταξύ τεχνολογιών που δεν ανήκουν αποκλειστικά στο 3GPP όπως το CDMA2000 και το WiMAX.

- **S-GW**

Το Serving-GateWay είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση του **U-plane tunnel** και συνδέει το EPC και το RAN LTE. Όλα τα πακέτα των χρηστών δρομολογούνται μέσω του S-GW, το οποίο είναι υπεύθυνο και για το handover, δηλαδή τη διατήρηση της ζεύξης ενώ το UE μετακινείται μεταξύ διαφορετικών eNBs. Επιπλέον, το S-GW, είναι πολύ σημαντικό από την άποψη των δυνατοτήτων διασύνδεσης με άλλες τεχνολογίες 3GPP, όπως GPRS / GSM και UMTS. Επίσης, το S-GW εκτελεί δραστηριότητες διαχείρισης όπως να συγκεντρώνει πληροφορίες για τις χρεώσεις του επισκεπτόμενου από το UE, δικτύου και συμμόρφωση σύμφωνα με τους κανονισμούς και κάνει την βέλτιστη κατανομή των διαθέσιμων πόρων ανάλογα με τα αιτήματα που δέχεται από το MME, το P-GW και το PCRF.

- **PCRF**

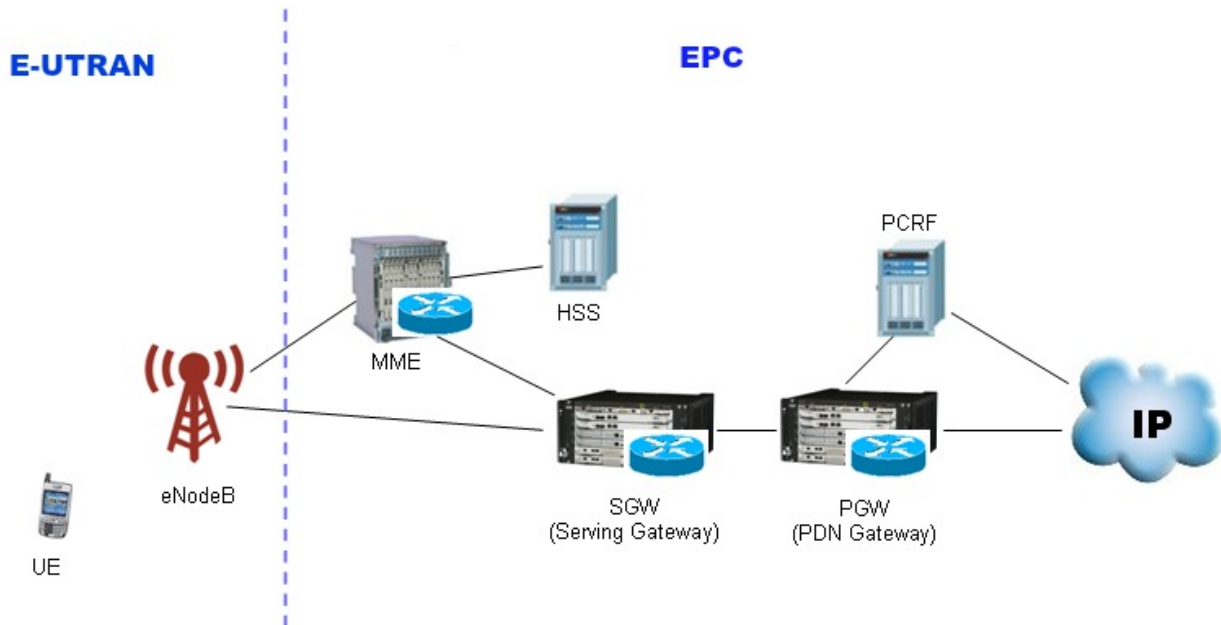
Το Policy Control and Charging Rules Function είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση πολιτικών (policy control) όσο και για τον έλεγχο των χρεώσεων στο PCEF που είναι μέρος του P-GW. Παρέχει επίσης εξουσιοδότηση του QoS σύμφωνα με το οποίο αποφασίζεται πόση κίνηση (data flow) θα διαχειρίζεται το PCEF και διαβεβαιώνει ότι υπάρχει συμφωνία με το προφίλ του χρήστη.

- **HSS**

Το Home Subscriber Server είναι μια βάση δεδομένων που περιέχει τις λεπτομέρειες τις συνδρομής των τελικών χρηστών. Κρατάει με άλλα λόγια τα προφίλ των συνδρομητών και οποιουδήποτε περιορισμούς έχουν, πληροφορίες για το PDN με το οποίο μπορεί να συνδεθεί κάθε χρήστης και πληροφορίες όπως η ταυτότητα του MME στο οποίο είναι συνδεδεμένος ή εγγεγραμμένος. Τέλος είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο ταυτότητας και την παραγωγή κλειδίων ασφαλείας (security keys).

Ενώ το EPC αποτελείται από πολλά στοιχεία, το E-UTRAN περιλαμβάνει ένα συγκεκριμένο στοιχείο, το eNodeB, δηλαδή το σταθμό βάσης, το οποίο συνδέεται με τα UEs που είναι οι τελικοί χρήστες. Είναι υπεύθυνο για τη συνολική διαχείριση των πόρων, την συμπύκνωση των κεφαλίδων των πακέτων για την αποφυγή υπερφόρτωσης του δικτύου (overhead), για θέματα ασφαλείας και για την σύνδεση με το EPC. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι ένα eNodeB παρόλο που είναι στοιχείο του E-UTRAN, διαχειρίζεται περισσότερες από μία κυψέλες έχοντας τον ρόλο του controller που υπήρχε σε δίκτυα προηγούμενων γενιών, βελτιώνοντας με αυτό τον τρόπο την

αποδοτικότητα και μειώνοντας τις καθυστερήσεις. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι λειτουργικές ικανότητες του eNodeB προέρχονται από την σύνδεσή του με δύο μεγάλες οντότητες του EPC, το MME, και το S-GW. Επίσης πολλαπλά UE μπορούν να εξυπηρετηθούν από ένα μόνο eNodeB, ωστόσο ένα συγκεκριμένο UE μπορεί να συνδεθεί με ένα μόνο eNodeB σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή.



Εικόνα 1. Αρχιτεκτονική του LTE

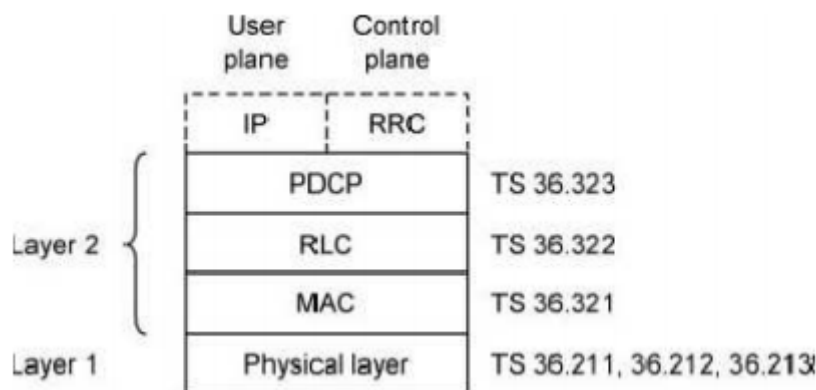
1.4 Η αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλων του LTE-A

Τα πρωτόκολλα για την επικοινωνία στο LTE-A παρουσιάζονται με την μορφή δύο επιπέδων, το επίπεδο των χρηστών (U-plane) για τον χειρισμό των δεδομένων που αφορούν τους χρήστες και το σύνολο των πρωτοκόλλων που αφορούν τα επίπεδα ελέγχου (C-plane), που είναι υπεύθυνα για τον χειρισμό των μηνυμάτων που έχουν σχέση με ζητήματα που αφορούν την σηματοδότηση. Στο πακέτο των πρωτοκόλλων εντοπίζονται δύο βασικά στρώματα. Το πρώτο στρώμα ασχολείται με τον χειρισμό των πληροφοριών όπως ορίζει το LTE-A και το δεύτερο είναι υπεύθυνο για την μεταφορά πληροφοριών μεταξύ των σημείων.

Το MME είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο της συμπεριφοράς της συσκευής με το να στέλνει δεδομένα που εμπεριέχουν στοιχεία για την σηματοδότηση. Το πρόβλημα είναι όμως ότι δεν εντοπίζεται αμεσότητα στις επιλογές διαδρομών του MME μέχρι την συσκευή. Έτσι στην περίπτωση της διεπαφής με τον αέρα το θέμα γίνεται πιο πολύπλοκο, οπότε είναι αναγκαίος ο χωρισμός της σε μια διάσταση επιμέρους επιπέδων τα οποία είναι το AS (access stratum) και το NAS (non access stratum).

1.4.1 Πρωτόκολλα Διεπαφής Αέρα

Στην βιβλιογραφία η διεπαφή αέρα αναφέρεται Uu και οριοθετείται ανάμεσα στην συσκευή και στον σταθμό βάσης. Στο σχήμα 2 παρουσιάζονται τα πρωτόκολλα που αφορούν την διεπαφή Uu. Το physical layer εμπεριέχει το σύνολο των ψηφιακών και αναλογικών λειτουργιών κάτω από τις οποίες επεξεργάζεται τα σήματα που χρησιμοποιούνται από την συσκευή και τον σταθμό βάσης, με σκοπό την ανταλλαγή πληροφοριών. Το physical layer αποτελείται αρχικά από τον επεξεργαστή καναλιών μεταφοράς που διαχειρίζεται την περίπτωση προβλημάτων και δυσλειτουργιών, τον επεξεργαστή φυσικών καναλιών με την εφαρμογή μεθοδολογιών OFDMA και SCFDMA, την μετάδοση από πολλαπλές κεραιές, καθώς και τον αναλογικό επεξεργαστή που διαμορφώνει τα δεδομένα δίνοντάς τους αναλογικό χαρακτήρα. Τα πακέτα δεδομένων και μηνυμάτων που αφορούν τη σηματοδότηση μεταβιβάζονται μέσα από τα πρωτόκολλα RLC και MAC με την χρήση λογικών καναλιών. Επίσης δεδομένα μεταφέρονται με κανάλια μεταφοράς ανάμεσα στο MAC και το physical layer. Τέλος με την χρήση φυσικών καναλιών επιτυγχάνεται η μεταφορά δεδομένων για τα διάφορα επίπεδα του physical layer. Το πρωτόκολλο Media Access Control (MAC) έχει ορισθεί για την πραγματοποίηση ελέγχου χαμηλής κλίμακας για το φυσικό επίπεδο και ειδικότερα για την μετάδοση πληροφοριών χρονοδιαγράμματος ανάμεσα στη συσκευή και τον σταθμό βάσης. Στην συνέχεια το πρωτόκολλο Radio link control (RLC) καταφέρνει να διατηρήσει την σύνδεση δεδομένων μεταξύ των χρηστών, δίνοντας έμφαση στην αξιοπιστία. Στο Packet Data Convergence Protocol (PDCP) πραγματοποιείται ένα σύνολο λειτουργιών για την μεταφορά δεδομένων που έχουν άμεση σχέση με παραμέτρους ασφαλείας και με θέματα συμπίεσης της κεφαλίδας [22].



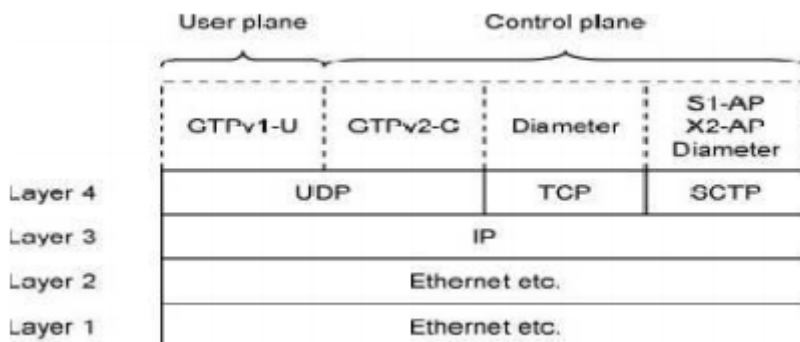
Σχήμα 1. Στοιβά Πρωτοκόλλων Διεπαφής Αέρα

1.4.2 Πρωτόκολλα Μεταφοράς σε σταθερό Δίκτυο

Όλες οι διεπαφές σε σταθερά δίκτυα χρησιμοποιούν το IETF σαν πρωτόκολλο μεταφοράς. Στην συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιούνται τέσσερα επίπεδα για το μοντέλο OSI όπως φαίνεται στο σχήμα 2. Στο πρώτο και δεύτερο επίπεδο γίνεται η χρήση κατάλληλων πρωτοκόλλων, για παράδειγμα το ethernet. Στην συνέχεια όλα τα στοιχεία που βρίσκονται στο δίκτυο συνδέονται με μια IP. Το δίκτυο με τη βοήθεια της διεύθυνσης καταφέρνει να διαχειριστεί τα δεδομένα μεταξύ των στοιχείων. Στο LTE το IPv4 και το IPv6 υποστηρίζονται, ενώ όσο αναφορά το EPC το IPv4 πρέπει να

υποστηρίζεται υποχρεωτικά σύμφωνα με την έκτη έκδοση. Στο επάνω μέρος της IP υπάρχει ένα επίπεδο που χρησιμοποιεί τα εξής πρωτόκολλα:

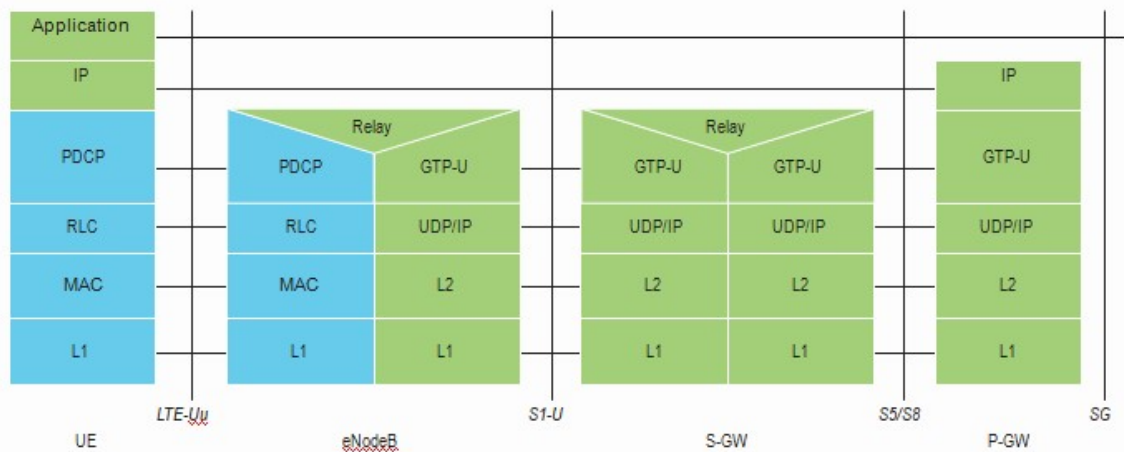
- Το UDP μέσα από το οποίο θα σταλούν δεδομένα μεταξύ των στοιχείων που βρίσκονται στο δίκτυο.
- Το TCP που κάνει όλες τις διορθώσεις και συμβάλει στο να ξαναστείλει πακέτα που περιέχουν κάποιο λάθος.
- Το SCTP που εμπεριέχει πρόσθετες λειτουργίες ώστε να υποστηρίξει μηνύματα που αναφέρονται στη σηματοδότηση.



Σχήμα 2. Στοιβά Πρωτοκόλλων Μεταφοράς σε Σταθερό Δίκτυο

1.4.3 Πρωτόκολλα Επιπέδου Χρήστη

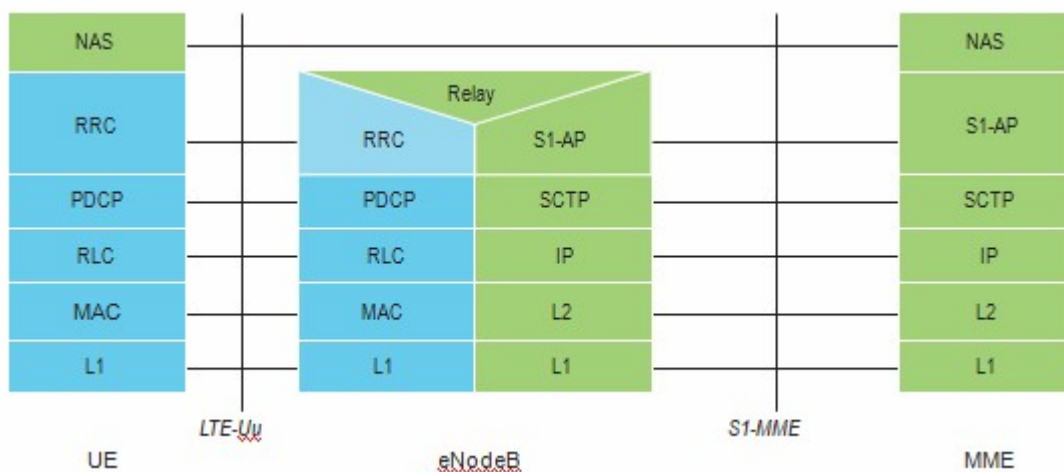
Στο επίπεδο χρήστη δημιουργούνται πακέτα δεδομένων τα οποία επεξεργάζονται από διάφορα πρωτόκολλα όπως τα TCP,UDP και IP. Τα πακέτα στο κεντρικό δίκτυο (EPC) είναι ενσωματωμένα σε ένα συγκεκριμένο πρωτόκολλο EPC και στέλνονται μεταξύ του P-GW και του eNodeB. Ανάλογα με τη διεπαφή (interface) χρησιμοποιούνται και διαφορετικά πρωτόκολλα. Για παράδειγμα, το πρωτόκολλο σήραγγας GPRS (GTP) χρησιμοποιείται στη διεπαφή S1 μεταξύ του eNodeB και του S-GW και στη διασύνδεση S5 / S8 μεταξύ S-GW και P-GW. Η στοιβά πρωτοκόλλων για το επίπεδο χρήστη εμφανίζεται με μπλε χρώμα στο σχήμα 1.



Σχήμα 3. Στοιβά Πρωτόκολλων του Επιπέδου Χρήστη

1.4.4 Πρωτόκολλα Επιπέδου Ελέγχου

Στο επίπεδο ελέγχου, το πρωτόκολλο RRC (Radio Resource Control) δημιουργεί τα μηνύματα σηματοδότησης που ανταλλάσσονται μεταξύ του σταθμού βάσης και του τερματικού. Και στις δυο περιπτώσεις τα δεδομένα πριν σταλούν στο φυσικό επίπεδο (physical layer) για μετάδοση, επεξεργάζονται και από τα PDCP, RLC και MAC πρωτόκολλα. Η λειτουργικότητα του Επιπέδου Ελέγχου αφορά την ασύρματη πρόσβαση (radio) και εξαρτάται από την κατάσταση του εξοπλισμού χρήστη, η οποία περιλαμβάνει δύο καταστάσεις: αδρανής (idle) ή συνδεδεμένη (connected). Η στοιβά πρωτοκόλλων για το επίπεδο ελέγχου μεταξύ του UE και του MME φαίνεται στο σχήμα 2. Η μπλε περιοχή της στήλης υποδεικνύει τα "πρωτόκολλα AS", δηλαδή τα πρωτόκολλα που εκτελούνται μεταξύ του eNodeB και του UE. Τα κατώτερα στρώματα εκτελούν τις ίδιες λειτουργίες με αυτές του επίπεδο χρήστη, με την εξαίρεση ότι δεν υπάρχει συνάρτηση συμπύεσης κεφαλίδας για το επίπεδο ελέγχου[3].

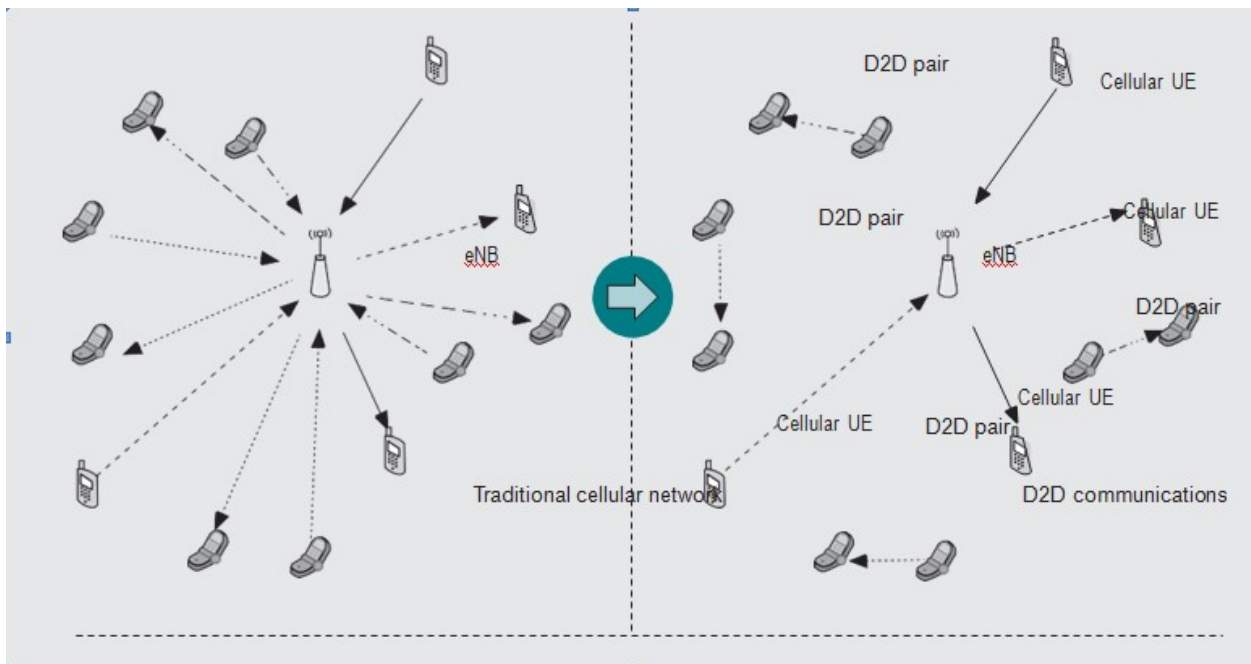


Σχήμα 4. Στοιβά Πρωτόκολλων του Επιπέδου Ελέγχου

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ-ΠΡΟΣ-ΣΥΣΚΕΥΗ (D2D)

Σε συμβατικά κυψελοειδή δίκτυα, οι συσκευές μπορούν να επικοινωνούν μόνο με το σταθμό βάσης (BS) μέσω διαδρομών ανερχόμενης ζεύξης (uplink) ή κατερχόμενης ζεύξης (downlink). Ο όρος Device to Device αναφέρεται σε απευθείας επικοινωνίες μικρής εμβέλειας μεταξύ των τερματικών του δικτύου κινητής τηλεφωνίας, χωρίς την ενδιάμεση μετάδοση από έναν σταθμό βάσης. Διαφοροποιείται από παρόμοιες συμβατικές προσεγγίσεις όπως Bluetooth και WiFi-Direct, επειδή οι επικοινωνίες D2D χρησιμοποιούν άδεια φάσματος τηλεπικοινωνιών με την εγγύηση της ποιότητας υπηρεσιών (QoS) και απαιτείται αυτόματο δίκτυο ανίχνευσης-επιλογής. Οι επικοινωνίες D2D έχουν βασιστεί πάνω στους πρωτογενείς χρήστες αποκομίζοντας τα οφέλη του να συγχρονίζονται και ελέγχονται από τον BS. Η εισαγωγή των επικοινωνιών D2D στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας είναι η πιο βέλτιστη από πολλές απόψεις, αφού προσδίδει στις υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας μια πιο ευέλικτη και δυναμική υποδομή [19]. Η μικρή απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη παρέχει καλύτερες συνθήκες σύνδεσης και, ως εκ τούτου, η σύνδεση είναι πολύ πιο αποτελεσματική και με χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Από την πλευρά του δικτύου, η χρήση του φάσματος τηλεπικοινωνιών και η επεξεργασία των πόρων μειώνεται δραματικά, δεδομένου ότι αποφεύγεται η ενδιάμεση μετάδοση στον BS. Επιπλέον, η συνύπαρξη των μεταδόσεων των κινητών τηλεφώνων και του D2D σε κοινές ζώνες φάσματος μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη χρησιμοποίηση του φάσματος, αποφορτίζοντας την ίδια στιγμή το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας.

Από την πλευρά των φορέων παροχής υπηρεσιών τηλεπικοινωνίας νέα επιχειρηματικά μοντέλα μπορεί να αναπτυχθούν, χωρίς την ανάγκη για αγορά μεγαλύτερου φάσματος τηλεπικοινωνιών. Όσο αναφορά την τυποποίηση της διαδικασίας, άμεση επικοινωνία προσφέρεται από τοπικά δίκτυα σε συχνότητες χωρίς άδεια ISM (non-ISM bands). Οι επικοινωνίες D2D απουσιάζουν από τα περισσότερα συστήματα κινητής τηλεφωνίας. Τα πιθανά οφέλη από τις επικοινωνίες D2D είναι εξίσου ελκυστικά σε κυψελοειδή δίκτυα. Για το Long Term Evolution (LTE) σύστημα, οι πρώτες προσπάθειες τυποποίησης έχουν αρχίσει πρόσφατα στην έκδοση 12 (Release 12), στο οποίο οι επικοινωνίες D2D εξετάζονται κυρίως υπό την προοπτική της παροχής νέων εμπορικών ή δημόσιων υπηρεσιών και ασφάλειας [20].



Εικόνα 2. Οι επικοινωνίες D2D σε ένα παραδοσιακό κυψελοειδές ασύρματο σύστημα επικοινωνιών

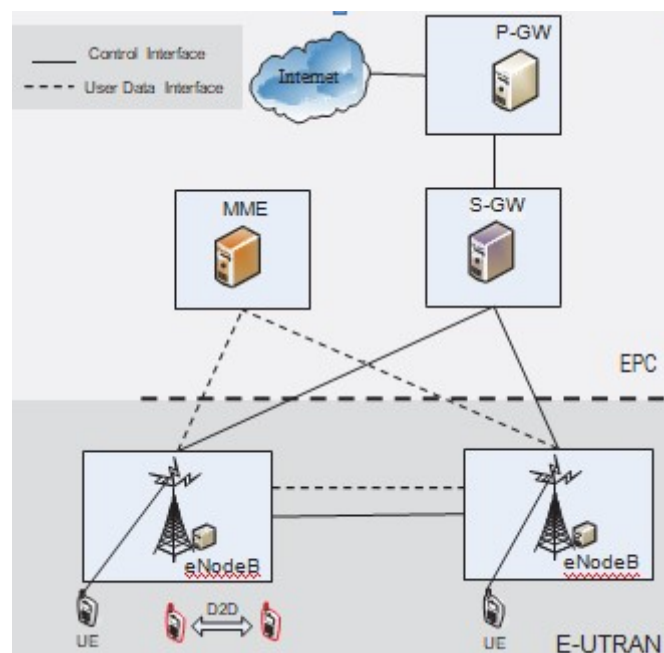
2.1 Η Αρχιτεκτονική του D2D και οι Απαιτήσεις στο LTE-A Δίκτυο

Το LTE-advanced ήταν η πρώτη πλατφόρμα που υποστηρίζει την εφαρμογή επικοινωνιών D2D. Τον Ιούνιο του 2012, το 3GPP ξεκίνησε μία μελέτη για την δημιουργία της έκδοσης 12 LTE (Release 12) και την τυποποίηση της ώστε να περιλαμβάνει νέα βήματα για την ανάπτυξη της επικοινωνίας D2D και την δημιουργία νέων υπηρεσιών στο LTE-A. Αρχικά η ενσωμάτωση του D2D στο δίκτυο LTE-Advanced προωθήθηκε από την Qualcomm, η οποία προηγουμένως είχε αναπτύξει μια δική της τεχνολογία που ονομάζεται FlashLinQ, η οποία επιτρέπει στις συσκευές σε κυψελωτά δίκτυα να ανακαλύπτουν αυτόματα και συνεχώς χιλιάδες άλλες συσκευές με δυνατότητα FlashLinQ σε απόσταση 1 χιλιομέτρου και να επικοινωνούν. Η Qualcomm σχεδίαζε να προσαρμόσει το FlashLinQ στην αρχιτεκτονική 3GPP χρησιμοποιώντας το LTE και πρότεινε ως στοιχείο μελέτης στο 3GPP το D2D σε LTE-A. Το αντικείμενο εργασίας ονομάστηκε ProSe (Υπηρεσίες βάσει προσέγγισης) στο 3GPP TSG SA1 και ολοκληρώθηκε τον Μάιο του 2013. Σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία το ProSe χωρίζεται σε δύο μέρη, που ονομάζονται D2D ανίχνευση και επικοινωνία. Με την D2D ανίχνευση, οι χρήστες μπορούν να ανιχνεύσουν άλλους χρήστες που βρίσκονται στο δίκτυο με ακρίβεια τοποθεσίας. Με την χρήση του E-UTRA, αυτή η διαδικασία προσδιορίζει ότι ένα UE είναι σε κοντινή απόσταση με έναν άλλο. Η D2D επικοινωνία μπορεί να επιτευχθεί κατευθείαν μεταξύ των χρηστών μέσω τις ProSe ανίχνευσης και να μειώσει την ανάγκη για χειροκίνητη αλληλεπίδραση ή μέσω eNBs. Η άμεση επικοινωνία μεταξύ των UE, μπορεί επίσης να επιτευχθεί χωρίς τη χρήση της κοντινής ανίχνευσης. Μέσα στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας, η άμεση επικοινωνία ολοκληρώνεται με τον συνδυασμό χρήσης του δικτύου και την διαδικασία ανίχνευσης κοντινών συσκευών που υποστηρίζεται από το εν λόγω δίκτυο. Μέσα στο σύστημα 3GPP σε συνδυασμό με το ProSe υπάγονται οι παρακάτω λειτουργίες:

- EPC-level ProSe Discovery

- Μοντέλο ProSe απευθείας ανίχνευσης
- Μοντέλο ProSe απευθείας επικοινωνίας
- UE-to-Network relay or UE-to-UE relay

Η μελέτη για την εφαρμογή του ProSe παρουσιάστηκε στο TR 22.803 και αφορά επιπλέον απαιτήσεις τις οποίες θα πρέπει να πληρεί το LTE-A προκειμένου να υποστηρίξει το ProSe. Αυτές οι επιπλέον απαιτήσεις αφορούν επιπλέον λειτουργίες όπως για παράδειγμα το γεγονός ότι το δίκτυο θα πρέπει να έχει συνεχώς τον έλεγχο της χρήσης των πόρων από το E-UTRAN για την ProSe ανακάλυψη και την ProSe επικοινωνία μεταξύ των UE. Επίσης αφορούν λειτουργίες σχετικά με τη διαχείριση ενέργειας των UE όπως για παράδειγμα τότε αυτά θα πρέπει να είναι ενεργά και τότε όχι. Ορίζονται, ακόμη, απαιτήσεις σχετικά με την ασφάλεια, την εξουσιοδότηση, το ιδιωτικό απόρρητο, την πρόσβαση σε WLAN και την δημόσια ασφάλεια [6]. Το TSG SA2 (Service and System Aspects Working Group 2) το οποίο είναι υπεύθυνο για τον προσδιορισμό των κύριων λειτουργιών και των μονάδων του δικτύου και έχει ως σκοπό να αξιολογήσει πιθανές λύσεις του τεχνικού συστήματος 3GPP για αρχιτεκτονικές βελτιώσεις ώστε να υποστηρίξει την ProSe τεχνολογία με βάση τις απαιτήσεις της υπηρεσίας SA1, είναι σε εξέλιξη. Τον Δεκέμβριο του 2016, ο όμιλος 3GPP SA2 ολοκλήρωσε την πρώτη φάση της μελέτης του σχετικά με την αρχιτεκτονική και τις κύριες λειτουργίες του συστήματος κινητής επικοινωνίας 5G [7].

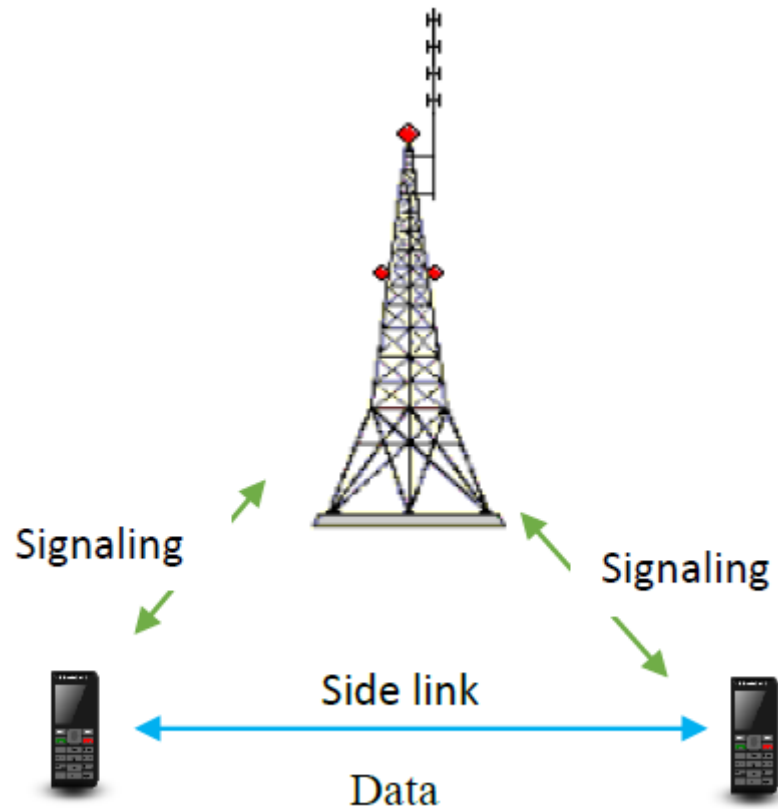


Εικόνα 3. Οι επικοινωνίες D2D στην αρχιτεκτονική του δικτύου LTE

2.2 Μετάδοση στο Sidelink

Το Sidelink (SL) χρησιμοποιείται για την ανακάλυψη των D2D συσκευών και υπηρεσιών (ProSe Direct Discovery) και για την επικοινωνία μεταξύ των UEs (ProSe Direct communication). Ειδικότερα, όπως φαίνεται στην εικόνα 4 το Sidelink περιγράφει τη δομή του καναλιού το οποίο αποτελείται από λογικά, φυσικά και κανάλια μεταφοράς πάνω από τη διεπαφή αέρα Uu όπου πραγματοποιείται η εφαρμογή της D2D

επικοινωνία. Οι πόροι που εκχωρούνται στο SL δεσμεύονται από το Uplink, δηλαδή από τα υποπλάγια της συχνότητας UL στο FDD ή από τα υποπλάγια που έχουν εκχωρηθεί στο UL στο TDD. Οι λόγοι για τους οποίους οι περισσότερες τεχνικές δεσμεύουν πόρους από το UL είναι επειδή τα υποπλάγια του UL είναι συνήθως λιγότερο κατειλημμένα από αυτά του DL. Επιπλέον, τα περισσότερα υποπλάγια του DL δεν είναι ποτέ πραγματικά κενά διότι υπάρχουν σχεδόν πάντα τα κυκλικά σήματα αναφοράς κελιού (Cell Reference Signal) που μεταδίδονται.



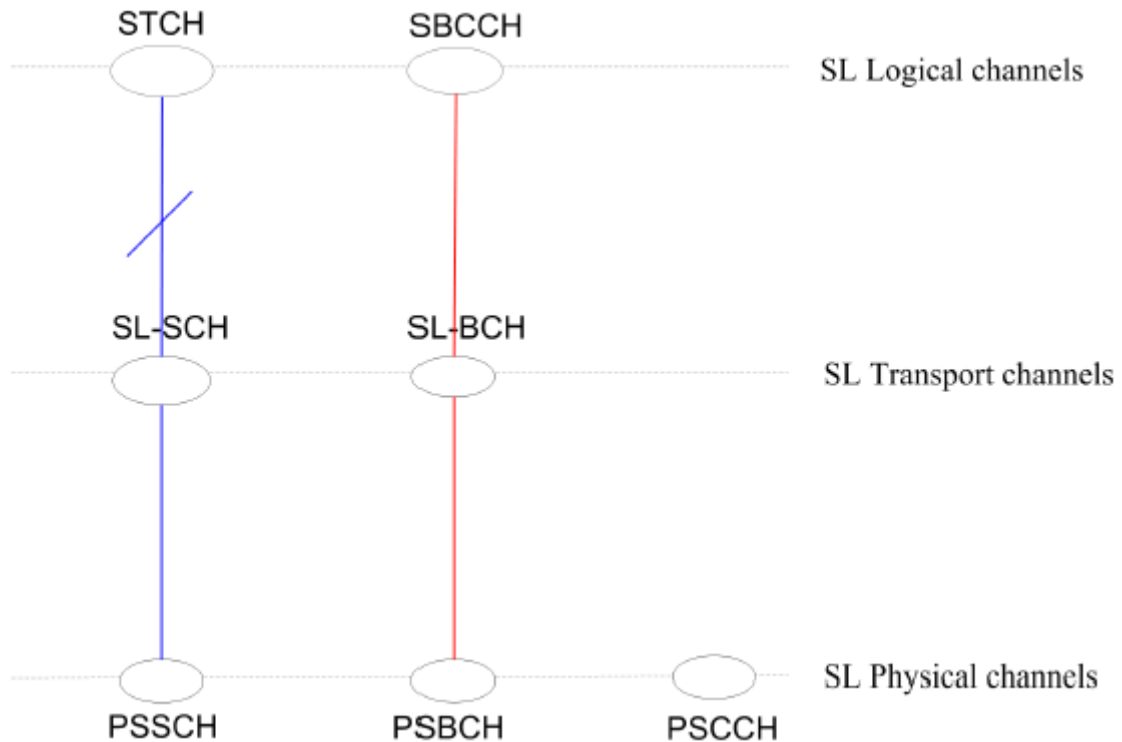
Εικόνα 4. Ζεύξεις ελέγχου και δεδομένων του Sidelink

Υπάρχουν δύο λογικά κανάλια SL που ορίζονται για επικοινωνία, το SL Traffic Channel (STCH) και το SL Broadcast Control Channel (SBCCH). Το STCH χρησιμοποιείται για τη μετάδοση δεδομένων που εμπεριέχουν τις πληροφορίες του χρήστη. Συνδέεται με το SL Shared Channel (SL-SCH), ένα κανάλι μεταφοράς το οποίο μπορεί να έχει τον κίνδυνο συγκρούσεων, ανάλογα με την εκχώρηση πόρων από το eNB. Αυτό με τη σειρά του συνδέεται με το Physical SL Shared Channel (PSSCH), το οποίο μεταφέρει τα δεδομένα στον αέρα.

Το SBCCH μεταφέρει πληροφορίες σηματοδότησης που χρησιμοποιούνται για συγχρονισμό στην περίπτωση που οι συσκευές βρίσκονται εκτός κάλυψης του δικτύου ή στο σενάριο μερικής κάλυψης ή για το συγχρονισμό μεταξύ των UEs που βρίσκονται σε διαφορετικές κυψέλες. Συνδέεται με το SL Broadcast Channel (SL-BCH), ένα κανάλι μεταφοράς με μια προκαθορισμένη μορφή μεταφοράς, η οποία υφίσταται επειδή τα μπλοκ από το SBCCH έχουν όλα το ίδιο μέγεθος. Το SL-BCH συνδέεται με το Physical SL Broadcast Channel, το PSBCH.

Το Physical SL Control Channel (PSCCH) είναι το ισοδύναμο με το PDCCH που χρησιμοποιείται στα κυψελοειδή δίκτυα πάνω από το Uu. Περιέχει τις Πληροφορίες Ελέγχου Sidelink (Sidelink Control Information - SCI), και μεταφέρει όλες τις που χρειάζεται το λαμβάνων UE φέρουν ώστε να μπορέσει να αποδιαμορφώσει το PSSCH.

Επομένως, το SCI αποστέλλεται πάντοτε εκ των προτέρων σε ένα μπλοκ δεδομένων STCH. Το σχήμα 5 δείχνει όλα τα κανάλια του Sidelink που αναφέρθηκαν παραπάνω. Με μπλε χρώμα εμφανίζεται το μονοπάτι που ακολουθούν τα δεδομένα, ενώ με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται το μονοπάτι που ακολουθεί η σηματοδότηση για τον έλεγχο[24].



Σχήμα 5. Κανάλια του Sidelink για τη διεπαφή αέρα.

2.3 Έλεγχος και Απόδοση Ισχύος

Ο έλεγχος ισχύος είναι ένας πολύ βασικός μηχανισμός να μειωθούν οι παρεμβολές μεταξύ των χρηστών σε ένα δίκτυο LTE-A για τις D2D επικοινωνίες. Επιπλέον πρέπει να γίνει μια κατανομή της ισχύς μετάδοσης έτσι ώστε να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις QoS, για παράδειγμα το SINR των χρηστών στο δίκτυο. Με την κατάλληλη κατανομή της ισχύος η αξιοποίηση του ραδιοφάσματος μπορεί να βελτιωθεί επιτρέποντας σε περισσότερα ζεύγη συσκευών D2D να μοιράζονται παρόμοιους πόρους. Δεδομένου ότι οι κινητές συσκευές στα κυψελοειδή δίκτυα βασίζονται στην περιορισμένη ενέργεια που τους προσφέρει η μπαταρία τους, η διατήρηση της κατανάλωσης ενέργειας είναι ένα πολύ σημαντικό ζήτημα για την καλύτερη αποτελεσματικότητα στις D2D επικοινωνίες. Έτσι ενεργειακή απόδοση πρέπει να εξετασθεί με βάση την εξοικονόμηση ενέργειας και την ταυτόχρονη ικανοποίηση των απαιτήσεων QoS [15].

2.4 Κατανομή των Πόρων

Οι D2D πομποί μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές παρεμβολές στο κυψελοειδές δίκτυο κατά τη διάρκεια διαμοιρασμού των πόρων μεταξύ τους. Κατά τη διάρκεια του downlink (DL), όταν δηλαδή ένα UE δέχεται πληροφορία από το σταθμό βάσης, το UE μπορεί να ταυτόχρονα να δεχθεί παρεμβολές από μία συσκευή D2D που μεταδίδει

εκείνη τη στιγμή. Από την άλλη πλευρά, το eNodeB μπορεί επίσης να είναι θύμα παρεμβολών από μία συσκευή D2D που μεταδίδει κατά τη διάρκεια της φάσης του uplink (UL), όταν οι πόροι κατανέμονται τυχαία. Μια τέτοια παρεμβολή μπορεί να αποφευχθεί ή να περιοριστεί εάν οι πόροι κατανέμονται έξυπνα με συντονισμό από το eNodeB. Κάθε D2D σύνδεσμος πρέπει να ενσωματώνεται στο περιβάλλον του δικτύου και να προσαρμόζεται κατάλληλα ώστε να αξιοποιήσει τους πόρους χωρίς να προκαλέσει επιβλαβή παρεμβολές στους χρήστες του κυψελοειδούς δικτύου. Τα συστήματα διανομής μπορούν να χρησιμοποιούν είτε ένα πλήρως κατανεμημένο μοντέλο ή ένα μοντέλο προώθησης μηνυμάτων. Στην πρώτη περίπτωση κάθε D2D σύνδεσμος έχει πρόσβαση στο ραδιοφάσμα χωρίς να μπορεί να επικοινωνεί με άλλους κόμβους. Αυτό το μοντέλο παρέχει χαμηλότερο ποσοστό σηματοδότησης με μεγάλη ευκολία στην διανομή αλλά δεν θεωρείται η πιο βέλτιστη λύση. Στη δεύτερη περίπτωση οι D2D κόμβοι ανταλλάσσουν τοπικές πληροφορίες με τις γειτονικές συσκευές προκειμένου να επιτευχθούν οι πιο κοντινές και βέλτιστες λύσεις. Ωστόσο οι πληθώρα των μηνυμάτων και η δυσκολία διανομής τους είναι το βασικότερο πρόβλημα αυτού του μοντέλου. Ως εκ τούτου τα συστήματα διανομής και κατανομής πόρων είναι απαραίτητα για την βέλτιστη ανίχνευσή του ραδιοφάσματος καθώς και την προσβασιμότητά του με γνώμονα την επίτευξή του βέλτιστου αποτελέσματος με βάση την πολυπλοκότητα και το βαθμό διανομής [16][8].

2.5 Τεχνολογία Πολλαπλής Κεραίας και Συστήματα MIMO

Στις D2D επικοινωνίες οι πομποδέκτες μπορούν να χρησιμοποιήσουν συστήματα πολλαπλών κεραιών και συστήματα MIMO για να αυξήσουν την απόδοση των δεδομένων και την κάλυψη της σύνδεσης χωρίς το πρόβλημα της αυξημένης ισχύος κατά την εκπομπή ή το εύρος ζώνης. Η τεχνική MIMO διευρύνει την ισχύ κατά την μετάδοση από τις κεραιές έτσι ώστε να επιτευχθούν ταχύτητες που να υποστηρίζουν περισσότερα bit ανά δευτερόλεπτο ανά hertz του εύρους ζώνης και μετριάζονται οι επιδράσεις του fading. Το μεγαλύτερο πρόβλημα της χρήσης της τεχνολογίας MIMO στις D2D επικοινωνίες είναι ο σχεδιασμός αποτελεσματικών ακροδεκτών που είναι απαραίτητοι για τις πολλαπλές ροές δεδομένων. Ο σχεδιασμός των ακροδεκτών πρέπει να στοχεύει στην μείωση της ισχύς εκπομπής ώστε να μειωθούν οι παρεμβολές στις γειτονικές συσκευές εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα τις απαιτήσεις του QOS. Πρόσφατες έρευνες έχουν επικεντρωθεί σε αυτό τον τομέα και στην δημιουργία προηγμένων τεχνικών επεξεργασίας σήματος στους πομποδέκτες για να μειωθεί το ποσοστό των παρεμβολών. Βέβαια αυτές οι τεχνικές απαιτούν πληροφορίες για τα κανάλια και είναι γενικά μια αρκετά πολύπλοκη διαδικασία και πιθανόν δεν θεωρείται κατάλληλη για τις επικοινωνίες D2D [17].

2.6 Διαχείριση Κινητικότητας και Handover

Στις κυψελοειδείς τηλεπικοινωνίες, οι όροι handover ή handoff αναφέρονται στη διαδικασία μεταφοράς μιας συνεχιζόμενης κλήσης ή συνόδου δεδομένων από ένα κανάλι συνδεδεμένο στο κεντρικό δίκτυο σε άλλο κανάλι. Δεδομένου ότι το εύρος μετάδοσης των ζευξιών επικοινωνίας D2D αναμένεται να είναι περιορισμένο, η διαχείριση της κινητικότητας και του handover αποτελούν σημαντικά ζητήματα της επικοινωνίας D2D. Σύμφωνα με έρευνες οι επικοινωνίες D2D πρέπει να σχεδιάζονται για σταθερές ζεύξεις και κόμβους με περιορισμένη κινητικότητα. Μέσα σε μία κυψέλη το handover μπορεί να προκληθεί όταν οι D2D πομποδέκτες μετακινηθούν ή αν το μέγεθος των παρεμβολών είναι πολύ υψηλό και εμποδίζει την D2D επικοινωνία. Ως εκ τούτου οι ζεύξεις D2D μπορούν να παραδίδονται στις κυψελοειδείς ζεύξεις και αντίστροφα. Αυτό είναι γνωστό ως mode selection και vertical handover, όπου το eNB

αποφασίζει εάν η επικοινωνία θα πραγματοποιηθεί απευθείας μέσω της D2D λειτουργίας ή θα μεταδοθεί από το eNB σε λειτουργία UL / DL. Το horizontal handover χρειάζεται να ερευνηθεί περισσότερο στο μέλλον για να εξακριβωθεί με ποιες παραμέτρους θα βελτιωθεί κατάλληλα. Μια βέλτιστη διαδικασία horizontal handover είναι αναγκαία να σχεδιαστεί για να επιτευχθεί μια ομαλή επικοινωνία μέσω των D2D ζεύξεων. Οι D2D ζεύξεις πρέπει να είναι σε θέση να συνεχίσουν την απευθείας επικοινωνία κατά την μετακίνηση από την μια κυψέλη στην άλλη ή πρέπει να μπου σε κυψελοειδή λειτουργία πριν από την παράδοση σε μια άλλη κυψέλη [18][21].

2.7 Κωδικοποίηση του Δικτύου

Η κωδικοποίηση του δικτύου είναι μια άλλη πολλά υποσχόμενη τεχνική για τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του δικτύου και για την μείωση του όγκου των πληροφοριών δρομολόγησης που απαιτούνται σε δίκτυα peer-to-peer. Με την κωδικοποίηση του δικτύου οι κόμβοι μετάδοσης μπορούν να συνδυάσουν τα πακέτα δεδομένων πριν την μετάδοση. Αυτή η τεχνική βοηθάει την συνδυαστική επικοινωνία μεταξύ των κόμβων D2D έτσι ώστε να ενισχυθεί η πιθανή ροή πληροφοριών ανάμεσα στους κόμβους. Σε ένα άλλο σενάριο οι D2D κόμβοι μπορούν να βοηθήσουν τους χρήστες του κυψελοειδούς δικτύου για την αναμετάδοση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας στους διάφορους προορισμούς. Κατά την αναμετάδοση οι κόμβοι D2D μπορούν να συνδυάσουν τα πακέτα τους με τα κυψελοειδή πακέτα και στην συνέχεια να μεταβιβάσουν τα δεδομένα ταυτόχρονα στις τοποθεσίες τους αλλά και στις κυψελοειδή τοποθεσίες, με επαναχρησιμοποίηση των κυψελοειδών πόρων. Μια απλή τεχνική κωδικοποίησης δικτύου είναι η γραμμική κωδικοποίηση στην οποία μια πολλαπλασιαστική και προσθετική μέθοδος εφαρμόζεται πάνω σε ένα πεπερασμένο πεδίο για να συνδυαστούν πολλαπλά πακέτα. Παρά τα πλεονεκτήματα της κωδικοποίησης των δικτύων προκύπτουν πολλές δυσκολίες από τη χρήση τους στις D2D επικοινωνίες. Αρχικά παρατηρείται ότι χρειάζεται πολύ μεγάλο διάστημα και πόροι για ένα D2D κόμβο ώστε να αποκωδικοποιήσει τα εισερχόμενα δεδομένα. Επίσης η ύπαρξη πολλών συνδυαστικών πακέτων εμποδίζει την εξασφάλιση της μοναδικότητας των διάφορων συντελεστών [11].

2.8 Ανακάλυψη Γειτονικής Συσκευής

Η ανακάλυψη συσκευών αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της επικοινωνίας συσκευής προς συσκευή και βασική προϋπόθεση για την ενσωμάτωση υπηρεσιών στα δίκτυα LTE, οι οποίες γνωρίζουν κι έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν πληροφορίες για την εγγύτητα δύο ή περισσότερων τερματικών. Χωρίς τη δυνατότητα ανακάλυψης γειτονικών συσκευών είναι αδύνατο να δημιουργηθεί μία σύνδεση D2D. Επομένως, η λύση του προβλήματος της ανακάλυψης της συσκευής, δηλαδή του προβλήματος της συνάντησης των τερματικών επικοινωνίας στο χρόνο, της συχνότητας και του διαστήματος που μεσολαβεί πριν ξεκινήσει η πραγματική άμεση επικοινωνία, είναι ένα ιδιαίτερα κρίσιμο ζήτημα. Η ανακάλυψη της συσκευής αναγνωρίζεται επίσης ως το κύριο εργαλείο που παρέχει στις συσκευές μια αίσθηση του περιβάλλοντος του δικτύου. [10]

Επιπλέον, η ανακάλυψη γειτονικής συσκευής περιλαμβάνει μια ποικιλία υπηρεσιών που αφορούν την εκμετάλλευση των πληροφοριών θέσης των τερματικών συσκευών του χρήστη (UEs). Το κοινωνικό δίκτυο των κινητών (mobile social network) που συνεπάγεται την κοινωνική σχέση μεταξύ των χρηστών κινητής τηλεφωνίας, το μάρκετινγκ, δηλαδή για παράδειγμα ένα UE σε ένα κατάσταση θα πρέπει να είναι σε θέση να ανακαλύψει ένα πελάτη ο οποίος πλησιάζει σε αυτό και να του στείλει μία

διαφήμιση πράγμα το οποίο εμπεριέχει και την υπηρεσία του κοινωνικού δικτύου των χρηστών κινητής τηλεφωνίας, η δυνατότητα των χρηστών που βρίσκονται σε εγγύτητα να παίξουν ταυτόχρονα ένα παιχνίδι και η ανταλλαγή πολυμέσων και αρχείων είναι μερικές από αυτές τις υπηρεσίες. [12]

3. ΑΛΓΟΡΙΘΜΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ-ΠΡΟΣ-ΣΥΣΚΕΥΗ

Η επικοινωνία συσκευής με συσκευή είναι ένα μέσο ώστε να επωφεληθούν οι ασύρματες επικοινωνίες, επειδή επιτρέπουν την επαναχρησιμοποίηση των κυψελοειδών αυξάνοντας τα bitrates των χρηστών και της χωρητικότητας του δικτύου και βελτιώνουν την κάλυψη του αλλά και την κατανάλωση ενέργειας. Ωστόσο, υπάρχει η ανάγκη σχεδιασμού νέων μεθόδων ανακάλυψης των συσκευών που βρίσκονται σε εγγύτητα αλλά και του σχεδιασμού νέων αλγορίθμων ή της αναθεώρησης και τροποποίησης των υφιστάμενων τεχνικών που αφορούν τη διαχείριση πόρων (RRM), του ελέγχου ισχύος (PC) και των διαδικασιών που αφορούν το φυσικό επίπεδο (physical layer). Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να πραγματοποιηθούν οι δυνατότητες της D2D επικοινωνίας, δηλαδή το κέρδος από την επαναχρησιμοποίηση των πόρων και ο περιορισμός των παρεμβολών στο κυψελοειδές δίκτυο. Επομένως η απόδοση των D2D χρηστών καθώς και η συνολική απόδοση του συστήματος μπορεί να ενισχυθεί από τη χρήση των κατάλληλων αλγορίθμων και τεχνικών, πράγμα το οποίο δημιουργεί νέες προκλήσεις, διότι σε σχέση με τα σενάρια κυψελοειδούς επικοινωνίας, το σύστημα πρέπει να αντιμετωπίσει νέες καταστάσεις παρεμβολών. Για παράδειγμα, σε ένα σύστημα ορθογωνίας πολυπλεξίας με διαίρεση συχνότητας (OFDM) όπως είναι το LTE, στο οποίο τα UE κάνουν χρήση των δυνατοτήτων της επικοινωνίας D2D (LTE direct mode), οι ζεύξεις επικοινωνίας D2D ενδέχεται να επαναχρησιμοποιήσουν ορισμένα από τα OFDM μπλοκ χρόνου-συχνότητας (RB) των φυσικών πόρων. Λόγω αυτής της επαναχρησιμοποίησης, η ορθογωνικότητα του κελιού (cell) χάνεται και η ενδοκυτταρική παρεμβολή μπορεί να γίνει σοβαρή λόγω των τυχαίων θέσεων των πομπών και δεκτών D2D καθώς και των κυψελοειδών UE που επικοινωνούν με τους αντίστοιχους σταθμούς βάσης που τα εξυπηρετούν.

Οι βασικές λειτουργίες που καθιστούν δυνατές τις επικοινωνίες D2D και τις οποίες θα πρέπει να εξυπηρετούν οι αλγόριθμοι και οι μέθοδοι που προαναφέρθηκαν είναι οι εξής[13]:

1. Ανακάλυψη D2D ομοτίμων και Ανακάλυψη D2D υπηρεσιών: Ανακάλυψη συσκευών που βρίσκονται σε εγγύτητα καθώς και εγγραφή της D2D συσκευής σε υπηρεσίες στις οποίες είναι εγγεγραμμένοι και άλλοι χρήστες που βρίσκονται σε εγγύτητα
2. Διαδικασίες που αφορούν το φυσικό επίπεδο: Κωδικοποίηση, σηματοδότηση, μετάδοση και λήψη δεδομένων κ.λπ.
3. Διαχείριση των πόρων (Radio Resource Management) η οποία περιλαμβάνει[14]:
 - Ισχύς μετάδοσης (transmit power): ο Έλεγχος Ισχύος (Power Control) είναι ένας μηχανισμός για την ιδανική επιλογή των εκπεμπόμενων ισχύων προκειμένου να επιτευχθούν καλές επιδόσεις του συστήματος και να μειωθούν οι παρεμβολές,
 - Κατανομή των πόρων (Resource Allocation) : Οι αλγόριθμοι RA καθορίζουν την επιλογή συγκεκριμένων OFDM RBs ή καναλιών συχνότητας από ένα σύνολο διαθέσιμων πόρων για κάθε ζεύγος εκπομπής / λήψης (Κυψελοειδούς ή D2D)
 - Επιλογή λειτουργίας (Mode Selection) : Οι αλγόριθμοι MS καθορίζουν αν οι υποψήφιες D2D συσκευές που είναι σε κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους θα πρέπει να επικοινωνούν με άμεσο τρόπο χρησιμοποιώντας μία D2D ζεύξη ή μέσω της κανονικής κυψελοειδούς λειτουργίας (δηλ. μέσω BS),

- Τεχνικές που χρησιμοποιούν τη δυνατότητα πολλαπλών εισόδων και πολλαπλών εξόδων (Multiple Input Multiple Output) : Αφορά τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται στα συστήματα MIMO δηλαδή στην περίπτωση που έχουμε πολλαπλούς δέκτες στη λήψη και πολλαπλές κεραίες εκπομπής. Τέτοια συστήματα μπορούν να εφαρμοστούν στις κυψελοειδείς μεταδόσεις για παράδειγμα, για την αποφυγή δημιουργίας παρεμβολών σε ένα δέκτη D2D.

3.1 D2D Ανακάλυψη

Το θεμελιώδες πρόβλημα της ανακάλυψης συσκευών είναι ότι δύο συσκευές πρέπει να είναι σε θέση να βρουν η μία την άλλη στο χώρο, το χρόνο και τη συχνότητα χωρίς καμία καθοδήγηση. Αυτό μπορεί να γίνει μέσω της εφαρμογής ενός μηχανισμού σάρωσης / αναζήτησης χρησιμοποιώντας ακολουθίες συγχρονισμού ή ακολουθίες σήματος αναφοράς, που είναι γνωστές ως ακολουθίες beacon. Οι ακολουθίες beacon χρησιμοποιούνται και σε άλλες τεχνολογίες D2D, π.χ. Bluetooth και Wi-Fi Direct. Ένα UE, το οποίο είναι σε θέση να ανιχνευθεί από κοντινά UE, μπορεί να γνωστοποιήσει την παρουσία του σύμφωνα με αυτές τις ακολουθίες. Με τον ίδιο τρόπο μπορεί να ανακαλύψει το ίδιο το UE τα κοντινά του UEs. Ανάλογα με το αν υπάρχουν ή δεν υπάρχουν απαντήσεις από τα UEs που βρίσκονται σε εγγύτητα, οι προσεγγίσεις που αφορούν την ανακάλυψη συσκευών σε εγγύτητα μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες:

- Απευθείας ανακάλυψη βασισμένη σε beacon πλαίσια (direct discovery)
- Ανακάλυψη ύστερα από αίτημα (request-based discovery)

Στην απευθείας ανακάλυψη το UE ανακαλύπτει τις γειτονικές συσκευές χωρίς να λάβει βοήθεια από το eNB. Πιο συγκεκριμένα, μια συσκευή είτε μεταδίδει το δικό της σήμα ανακάλυψης, είτε ακούει για άλλα σήματα ανακάλυψης αυτόνομα, χωρίς δηλαδή να πάρει κάποια άδεια. Στη συνέχεια αν υπάρχουν άλλες συσκευές σε εγγύτητα που ενδιαφέρονται να επικοινωνήσουν απευθείας με αυτήν, απαντάνε σε αυτό το σήμα. Λόγω του ότι η τοπολογία δικτύου αλλάζει συνεχώς σε ένα δίκτυο ασύρματων κινητών συσκευών, η άμεση ανακάλυψη είναι καταλληλότερη σε σχέση με την ανακάλυψη που βασίζεται στα αιτήματα, προκειμένου να παρακολουθείται συνεχώς η εξέλιξη της τοπολογίας του δικτύου. Επίσης αυτό το είδος ανακάλυψης πραγματοποιείται και σε περιπτώσεις όπου η κάλυψη δικτύου δεν είναι εφικτή. Στην ανακάλυψη ύστερα από αίτημα, το eNB συγκεντρώνει όλες τις πληροφορίες για να κάνει δυνατή την επικοινωνία D2D. Το eNB θα διαβιβάσει τις απαιτούμενες πληροφορίες στα UEs που βρίσκονται κοντά. Δηλαδή, τα UE είτε γνωρίζουν ήδη την ταυτότητα άλλου UE με τον οποίο θέλουν να ξεκινήσει η επικοινωνία D2D, είτε ζητάνε να μάθουν ποια UE βρίσκονται κοντά. Γενικά, αυτή η κατηγορία πρωτοκόλλων εφαρμόζεται σε σενάρια ανακάλυψης που και οι συσκευές είναι εγγεγραμμένες σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή.

Ακόμη ανάλογα με το αν υπάρχει συμμετοχή του δικτύου στην ανίχνευση των κοντινών συσκευών, η διαδικασία της ανακάλυψης θα μπορούσε να κατηγοριοποιηθεί σε δύο τύπους:

- Ανίχνευση με τη βοήθεια του δικτύου (network-assisted)
- Ανίχνευση χωρίς τη βοήθεια του δικτύου (non-network-assisted)

Στην περίπτωση του D2D με τη βοήθεια δικτύου, το δίκτυο μπορεί να διαμεσολαβήσει στη διαδικασία ανακάλυψης αναγνωρίζοντας τις υποψήφιες D2D συσκευές, συντονίζοντας τη δέσμευση χρόνου και της συχνότητας για την επίτευξη καλύτερης απόδοσης τόσο σε ενέργεια όσο και σε χρόνο. Μια τυπική διαδικασία της D2D discovery ξεκινά πρώτα με την ανίχνευση της κοντινής τοποθεσίας και συνεχίζει με την ανίχνευσή της ταυτότητας. Δεδομένου ότι η ανίχνευση μπορεί να πραγματοποιείται για πρώτη φορά μεταξύ δύο χρηστών D2D και ο πομπός και ο δέκτης D2D μπορεί να είναι αρχικά μη συγχρονισμένοι (π.χ., σε διαφορετικό δίκτυο, ή εκτός δικτύου) το σύστημα πρέπει να είναι σε θέση να αποκωδικοποιήσει μια ασυγχρόνιστη μεταφορά δεδομένων. Στην συγκεκριμένη περίπτωση ο συγχρονισμός μπορεί να επιτευχθεί μέσω της ακολουθίας beacon κατά το αρχικό στάδιο της D2D ανίχνευσης, έτσι ώστε τα επόμενα μηνύματα να επωφεληθούν από την συγχρονισμένη μετάδοση. Μια δομή παρόμοια με την RACH σε συγχρονισμό με το LTE μπορεί να εφαρμοστεί με την δημιουργία ακολουθιών beacon εάν στο D2D χρησιμοποιείται SC-FDMA. Στην περίπτωση χρήσης του OFDMA ο συγχρονισμός επιτυγχάνεται με PSS / SSS. Μετά τη μετάδοση των beacon ακολουθιών για την ανίχνευση εγγύτητας, υπάρχουν δύο τρόποι για να προσδιοριστεί η ταυτότητα του χρήστη που συνδέεται με την ακολουθία beacon. Ο πρώτος τρόπος είναι μέσω ενός μηνύματος που περιέχει πληροφορίες για την ταυτότητα ή μέσω σηματοδότησης του δικτύου της. Όσο αφορά το δεύτερο τρόπο, τα UE αναφέρουν τις ακολουθίες beacon που ανιχνεύθηκαν στο δίκτυο και μέσω του δικτύου ενημερώνεται το UE για την ταυτότητα του. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος συνεπάγεται με πρόσθετη επιβάρυνση κατανάλωσης ενέργειας. Επιπλέον, εάν οποιοδήποτε συσκευή είναι εκτός της περιοχής κάλυψης του δικτύου, ένας ειδικός μηχανισμός σηματοδότησης πρέπει να σχεδιαστεί για την ανίχνευση ταυτότητας [20].

Η χρήση των πόρων για την ανίχνευση του σήματος στις D2D επικοινωνίες αποτελεί βασικό παράγοντα σχεδιασμού και μπορεί να υποδιαιρεθεί σε διάφορες σχεδιαστικές επιλογές:

- Όταν το D2D χρησιμοποιεί ειδικούς πόρους ή επικάλυψη πόρων μέσα από κυψελοειδής μεταδόσεις
- Όταν το D2D λειτουργεί με DL ή UL πόρους
- Στην περίπτωση αποκλειστικής χρήσης των πόρων, υπάρχει διαφοροποίηση στο πώς ανιχνεύονται πολλαπλά σήματα μέσω κυψελοειδής μεταδόσεις.

Στις D2D επικοινωνίες η ανίχνευση σήματος που χρησιμοποιεί επικαλυπτόμενους πόρους μπορεί να διαταράξει σημαντικά την κυψελοειδή μετάδοση, ως εκ τούτου, ειδική χρήση των πόρων προτιμάται για την προστασία των κυψελοειδών επικοινωνιών. Το D2D μπορεί να λειτουργήσει τόσο με πόρους UL όσο και με DL. Ωστόσο, μόνο η χρήση UL πόρων μπορεί να προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα. Πρώτον, ο υπάρχων πομποδέκτης LTE UE RF μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί και να μειώσει κατά πολύ το κόστος υλοποίησης. Στην συνέχεια οι διάφοροι περιορισμοί που έχουν ορισμένες χώρες εμποδίζουν τα UE, στην ανάπτυξη του FDD από τη μετάδοση στη ζώνη DL. Επίσης η ανίχνευση D2D χρησιμοποιεί UL στο σύστημα FDD και προτείνεται η χρήση βοηθητικού UL στο σύστημα TDD. Κατά τη λειτουργία των πόρων του UL, το D2D και η μετάδοση UL μπορεί να κατηγοριοποιηθούν με βάση την συχνότητα και το χρόνο πολυπλεξίας. Συχνότητα πολυπλεξίας σημαίνει ότι οι πόροι ανίχνευσης ορίζονται μέσα σε ένα χρονικό διάστημα και έτσι τα UE, που συμμετέχουν στην ανίχνευσή πρέπει να είναι ενεργά για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, γεγονός που οδηγεί σε μη αποδοτική κατανάλωση ενέργειας. Χρόνος πολυπλεξίας αναφέρεται στην αποτελεσματικότητα όσο αναφορά την

κατανάλωση ενέργειας του δέκτη. Ένα UE όταν συμμετέχει στην διαδικασία ανίχνευσης είναι πολύ πιθανόν να προσπαθήσει να ανιχνεύσει όλα τα UE στην ευρύτερη κοντινή περιοχή. Τα σήματα που λαμβάνονται από πολλαπλά UE διαχωρίζονται με βάση τον χρόνο, την συχνότητα και τον κωδικό πολυπλεξίας.

3.1.1 Αλγόριθμος Ανακάλυψης ύστερα από Αίτημα (request-based discovery algorithm) για Ανίχνευση Συσκευής στο Δίκτυο LTE

Ο πρώτος αλγόριθμος χρησιμοποιεί τη συγκεντρωτική προσέγγιση. Η όλη διαδικασία ξεκινάει και ελέγχεται πλήρως από τον σταθμό βάσης. Πλήρως ελεγχόμενη σημαίνει ότι κάθε μετάδοση μηνυμάτων ορίζεται αποκλειστικά από τον σταθμό βάσης.

Ο αλγόριθμος παρουσιάζει κάποια βήματα για να πετύχει την ανίχνευση των συσκευών. Στο πρώτο βήμα έχουμε την αποστολή του πρώτου μηνύματος από την μία συσκευή προς την άλλη, μέσω του σταθμού βάσης έτσι ώστε να εδραιωθεί η επικοινωνία. Στην συνέχεια ο σταθμός βάσης σε συνεργασία με την P-GW πύλη πρέπει να ερευνήσει αν το ζεύγος των συσκευών έχει τις προϋποθέσεις D2D επικοινωνίας. Η P-GW πύλη εντοπίζει την κίνηση μεταξύ των δύο UE που πρόκειται να επικοινωνήσουν και βρίσκονται εντός του ίδιου eNB ή εξυπηρετούνται από διαφορετικά eNB γειτονικών κυψελών. Σε περιπτώσεις όπου τα UE βρίσκονται σε γειτονικές κυψέλες, τα eNB που τα εξυπηρετούν πρέπει να κατευθύνουν τις μετρήσεις D2D και την εγκατάσταση του καναλιού μέσω της διασύνδεσης X2. Εάν η κίνηση ικανοποιεί συγκεκριμένα κριτήρια (π.χ. ρυθμός δεδομένων, ποσοστό παρεμβολής), η P-GW πύλη ορίζει την κίνηση αυτή ως πιθανή κυκλοφορία D2D. Έπειτα τα eNB ζητούν μετρήσεις από τα UE για να ελέγξουν αν η επικοινωνία D2D προσφέρει υψηλότερη απόδοση. Πιο συγκεκριμένα, κάθε eNB ζητά από το UE να πραγματοποιήσει μετρήσεις για να ελέγξει εάν οι συσκευές D2D βρίσκονται σε εγγύτητα και εάν η επικοινωνία D2D προσφέρει στην πραγματικότητα υψηλότερη απόδοση από την κυψελοειδή επικοινωνία. Επαληθεύεται αν οι δύο συσκευές είναι στην κατάλληλη απόσταση έτσι ώστε το μήνυμα ανίχνευσης να γίνει δεκτό από την δεύτερη συσκευή. Αξίζει να σημειωθεί ότι η σωστή λήψη του μηνύματος εξαρτάται από το επίπεδο του SINR της συσκευής που στην συγκεκριμένη περίπτωση ορίζεται ως δέκτης, για τον λόγο αυτό θα πρέπει να οριστεί μια οριακή τιμή για το SINR στην δεύτερη συσκευή. Εάν οι συνθήκες μεταφοράς για την επικοινωνία D2D είναι ευνοϊκές, ως επόμενο βήμα το eNB δημιουργεί ένα D2D κανάλι μεταξύ των δύο UE έτσι ώστε να επικοινωνούν μέσω πόρων επικοινωνίας D2D. Μετά από την εγκαθίδρυση της D2D επικοινωνίας το eNB εξακολουθεί να είναι υπεύθυνο για τη διατήρηση της επικοινωνίας και τον έλεγχο του καναλιού. Επιπλέον, το eNB διατηρεί τον έλεγχο των πόρων τόσο για την κυψελοειδή όσο και για την D2D επικοινωνία. Με αυτόν τον τρόπο, κάθε UE τελικά, θα στέλνει και θα λαμβάνει πακέτα από και προς τη διεύθυνση IP του ομότιμου UE χρησιμοποιώντας μία σύνδεση D2D χωρίς το eNB να συμμετέχει στη δρομολόγηση.

Αυτός ο αλγόριθμος προσφέρει το πλεονέκτημα της συμμετοχής του δικτύου το οποίο είναι πολύ ευεργετικό γιατί προσφέρει την εκτίμηση της κίνησης (traffic) και των παρεμβολών (interference). Επίσης δίνεται η δυνατότητα στο σταθμό βάσης του δικτύου να κάνει παρεμβάσεις και να ρυθμίσει τις παραμέτρους της σύνδεσης ανάλογα με το επίπεδο των παρεμβολών αλλά και άλλων παραμέτρων. Ακόμα η συνολική απόδοση του δικτύου μπορεί να αυξηθεί διότι η επικοινωνία D2D μπορεί επίσης να εξυπηρετήσει την κυψελοειδή κίνηση και να αποφορτίσει τα eNB. Επιπλέον προσφέρει γρήγορη και "ελαφριά" εγκαθίδρυση της επικοινωνίας, χαμηλή καθυστέρηση μεταφοράς και υψηλό στιγμιαίο ρυθμό δεδομένων. Σημαντικό μειονέκτημα αυτού του αλγόριθμου είναι ότι απαιτεί μεγάλο αριθμό μηνυμάτων μεταξύ των οντοτήτων του δικτύου [25].

3.1.2 Αλγόριθμος Απευθείας Ανακάλυψης (direct discovery algorithm) για Ανίχνευση Συσκευής στο Δίκτυο LTE

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η ανίχνευση του UE, είναι μια διαδικασία που περιλαμβάνει μετάδοση μηνυμάτων μεταξύ των συσκευών, καθώς και μεταξύ των συσκευών και του σταθμού βάσης. Είναι σημαντικό να οριστεί το περιεχόμενο αυτών των μηνυμάτων, δηλαδή το μήνυμα ανίχνευσης θα πρέπει να περιλαμβάνει την ταυτότητα μιας οντότητας, κάτι που είναι πολύ σημαντικό κατά την διαδικασία ανταλλαγής μηνυμάτων ώστε να μπορεί να γίνει ο προσδιορισμός και η ταυτοποίηση των συσκευών.

Ο αλγόριθμος αυτός ξεκινάει τη διαδικασία ανίχνευσης από την μια συσκευή και εκτελείται χωρίς να ενημερωθεί ο σταθμός βάσης, με τις συσκευές να ανταλλάσσουν περιοδικά μεταξύ τους μηνύματα (beacon πλαίσια). Ένα UE ελέγχοντας περιοδικά τα πλαίσια beacon μπορεί να σχηματίσει μία λίστα με τα UE που βρίσκονται σε εγγύτητα ώστε να είναι σε θέση να επικοινωνήσει απευθείας με αυτά όταν αυτό χρειαστεί. Τα beacon πλαίσια θα πρέπει να ανιχνεύονται εύκολα και αξιόπιστα, ακόμη και σε περιβάλλοντα όπου ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SINR) είναι χαμηλός. Εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι στον συγκεκριμένο αλγόριθμο γίνεται η υπόθεση ότι οι πόροι που δεσμεύονται για την μετάδοση των beacon πλαισίων είναι ανεξάρτητοι από τους πόρους που χρησιμοποιούν οι χρήστες του κυψελωτού δικτύου ώστε να διασφαλιστεί η απόδοση των κυψελοειδών UE. Όπως έχει ήδη αναφερθεί η ελάχιστη μονάδα beacon είναι το Resource Block (RB) το οποίο φέρει 72 σύμβολα OFDM και μπορεί να έχει χρήσιμες πληροφορίες όπως η ταυτότητα του UE που το στέλνει αλλά και μια λίστα με τις υπηρεσίες που προσφέρει ή ενδιαφέρεται να αποκτήσει. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι η κατανάλωση ενέργειας της μετάδοσης ενός beacon είναι υψηλότερη από τη λήψη του beacon.

Στο πρώτο στάδιο του αλγορίθμου κάθε συσκευή ενεργοποιείται περιοδικά και ξεκινάει την διαδικασία ανίχνευσης στέλνοντας ένα beacon πλαίσιο και λαμβάνοντας άλλα beacons το υπόλοιπο διάστημα της περιόδου T_{pr} . Αφού κάθε συσκευή στείλει το δικό της beacon πλαίσιο, στη συνέχεια παρακολουθεί το Physical Downlink Control Channel (PDCCH) και ελέγχει αν έχει σταλεί κάποιο μήνυμα ζεύξης από κάποια άλλη συσκευή. Μόλις μία συσκευή λάβει ένα beacon πλαίσιο ανίχνευσης, μεταδίδει ένα μήνυμα αίτησης εγκατάστασης σύνδεσης D2D στο eNB της. Στη συνέχεια, το eNB στέλνει αίτημα στο UE που έστειλε το beacon πλαίσιο ανίχνευσης, για τη ρύθμιση μιας σύνδεσης D2D. Μετά από αυτό, το UE αποκρίνεται στο eNB του για εγκατάσταση σύνδεσης D2D. Στο επόμενο βήμα του αλγορίθμου γίνεται η κατανομή των πόρων από το eNB και για τις δυο συσκευές, εφόσον είναι η μοναδική μονάδα που γνωρίζει τους διαθέσιμους πόρους του δικτύου έτσι ώστε να τα διαθέσει κατάλληλα. Εφόσον έχουν πλέον εκχωρηθεί πόροι σε κάθε συσκευή UE, τότε αυτές μπορούν να μεταδώσουν μηνύματα η μία στην άλλη. Έτσι στο επόμενο βήμα το UE που έλαβε το beacon πλαίσιο ανίχνευσης στέλνει ένα αίτημα στο UE που το έστειλε ζητώντας του άδεια για την εγκαθίδρυση της μεταξύ τους σύνδεσης. Τέλος, με το δεύτερο να απαντάει θετικά ολοκληρώνεται και η εγκαθίδρυση της D2D ζεύξης μεταξύ των δύο συσκευών.

Το βασικό πλεονέκτημα αυτού του αλγορίθμου είναι ότι κάθε συσκευή γνωρίζει συνεχώς ποιες συσκευές βρίσκονται σε εγγύτητα και ανά πάσα στιγμή μπορεί να ζητήσει την εγκατάσταση ζεύξης για την μεταξύ τους επικοινωνία. Ένα ακόμα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι δίνοντας αποκλειστικούς πόρους για την μετάδοση beacon πλαισίων αποφεύγεται κάθε πιθανότητα για τη δημιουργία παρεμβολών στους κυψελοειδείς χρήστες. Παρόλο που ο συγκεκριμένος αλγόριθμος εξοικονομεί ενέργεια από τις συσκευές εναλλάσσοντας την κατάσταση τους από ενεργή σε αδρανή, ένα

Βασικό μειονέκτημα είναι ότι μια συσκευή αναγκάζεται να δέχεται τις μεταδόσεις από πολλές συσκευές που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση το οποίο συνεπάγεται με μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με τον πρώτη κατηγορία αλγορίθμων, αλλά και το γεγονός ότι η εγκατάσταση σύνδεσης D2D στην αδρανή κατάσταση RRC IDLE είναι πιο χρονοβόρα από την ενεργή κατάσταση RRC CONNECTED[26].

3.2 Αλγόριθμοι Συσκευής προς Συσκευή για Έλεγχο Ισχύος στο LTE

Ο έλεγχος Ισχύος (Power Control) είναι μια διαδικασία ρύθμισης των επιπέδων ισχύος εκπομπής των σταθμών βάσης στην κατερχόμενη ζεύξη (downlink) αλλά και των κινητών σταθμών στην ανερχόμενη ζεύξη (uplink). Όταν εξετάζουμε έναν ενιαίο σύνδεσμο επικοινωνίας, η υψηλότερη ισχύς μετάδοσης είναι επιθυμητή, διότι θα οδηγήσει σε υψηλότερη λαμβανόμενη ισχύ και κατά συνέπεια σε υψηλότερη ικανότητα σύνδεσης αφού ο δέκτης θα λαμβάνει επιτυχώς τα δεδομένα. Ωστόσο, όταν ένας πομπός χρησιμοποιεί υψηλή ισχύ εκπομπής, θα δημιουργηθούν υψηλές παρεμβολές σε άλλους συνδέσμους που μοιράζονται τον ίδιο πόρο. Με αυτή την έννοια, Ο έλεγχος Ισχύος είναι ένα θέμα εύρεσης του σωστού συμβιβασμού μεταξύ της μεγιστοποίησης της ισχύος μετάδοσης και του περιορισμού της παραγόμενης παρεμβολής. Η κύρια ιδέα του Power control είναι να υπολογίσει τις τιμές της εκπεμπόμενης ισχύος που πληρούν ένα συγκεκριμένο στόχο SINR . Στην πράξη, μπορούν να οριστούν πολλοί διαφορετικοί στόχοι, π.χ. Επιτυγχάνοντας ελάχιστη συνολική ισχύ μετάδοσης ή μέγιστη απόδοση συστήματος. Στην συνέχεια εξετάζονται τρεις αλγόριθμοι ελέγχου ισχύος. Αυτοί οι αλγόριθμοι έχουν σχεδιαστεί ειδικά για κυψελωτά δίκτυα που διαθέτουν ζεύξεις επικοινωνίας D2D [31].

1. Power Control της άνω ζεύξης στο LTE για τα κυψελοειδή και τα D2D UEs.
2. Utility-maximization power control για τα κυψελοειδή και τα D2D UEs.

3.2.1 Αλγόριθμος Ελέγχου Ισχύος στο Δίκτυο LTE

Ο έλεγχος ισχύος του Uplink στο LTE είναι ένας συνδυασμός μηχανισμών ελέγχου ισχύος ανοικτού-βρόχου (open-loop) και κλειστού-βρόχου (closed-loop). Στον μηχανισμό ανοικτού βρόχου, τα UE ρυθμίζουν την ισχύ εκπομπής τους με βάση τις μετρήσεις απώλειας διαδρομής της κατερχόμενης ζεύξης. Ο μηχανισμός κλειστού βρόχου επιτρέπει στους σταθμούς βάσης να προσαρμόζουν την ισχύ εκπομπής των UE αποστέλοντας εντολές ελέγχου ισχύος σε αυτές. Ο έλεγχος ισχύος ανοικτού βρόχου στην ανερχόμενη ζεύξη LTE μπορεί να εκφραστεί στην εξίσωση:

$$P = \min\{P_{max}, P_0 + 10\log_{10}M + \alpha L\}$$

Όπου η P_{max} είναι η μέγιστη ισχύς εκπομπής του UE, η P_0 είναι μια παράμετρος ισχύος εκπομπής που αφορά την εκάστοτε συσκευή UE, η M παράμετρος είναι ο αριθμός των αποδιδόμενων resource blocks, η L είναι η απώλεια διαδρομής της κατερχόμενης ζεύξης και η α είναι ο συντελεστής αντιστάθμισης απώλειας διαδρομής (path loss compensation factor), ο οποίος εκφράζει την παρεμβολή μεταξύ κυψελών (intercells). Το LTE uplink έχει σχεδιαστεί ώστε να μην υπόκειται σε ενδοκυτταρική παρεμβολή όταν βρίσκεται σε μια ιδανική κατάσταση. Στην ανερχόμενη ζεύξη LTE, σε όλα τα UE διατίθενται ορθογώνιοι πόροι, δηλαδή ξεχωριστές συχνότητες. Παρόλα αυτά, οι παρεμβολές μεταξύ των κυψελών μπορούν να παραχθούν από τα UE που βρίσκονται στις άκρες γειτονικών κυψελών και τα οποία χρησιμοποιούν τον ίδιο πόρο. Ο συντελεστής αντιστάθμισης απώλειας διαδρομής μπορεί να ρυθμιστεί κατά τέτοιο τρόπο

ώστε τα UE στην άκρη μιας κυψέλης να μεταδίδουν με χαμηλότερη ισχύ. Συνήθως, όσο πιο μακριά είναι τα UE από το σταθμό βάσης, τόσο υψηλότερος ο συντελεστής αντιστάθμισης απώλειας διαδρομής. Ο έλεγχος ισχύος κλειστού βρόχου στην ανερχόμενη ζεύξη LTE εκφράζεται στην εξίσωση:

$$P = \min\{P_{max}, P_0 + 10\log_{10}M + \alpha L + \Delta\}$$

Το Δ αντιπροσωπεύει το ρυθμιστικό βήμα (tuning step), το οποίο έχει τη δυνατότητα να είναι σταθερό ή δυναμικό. Ένα δυναμικό ρυθμιστικό βήμα που βασίζεται στη διαφορά μεταξύ του SINR που έχει τεθεί ως στόχος και του SINR που επικρατεί τη δεδομένη χρονική στιγμή.

3.2.2 Αλγόριθμος Μεγιστοποίησης-Χρησιμότητας (Utility-Maximization)

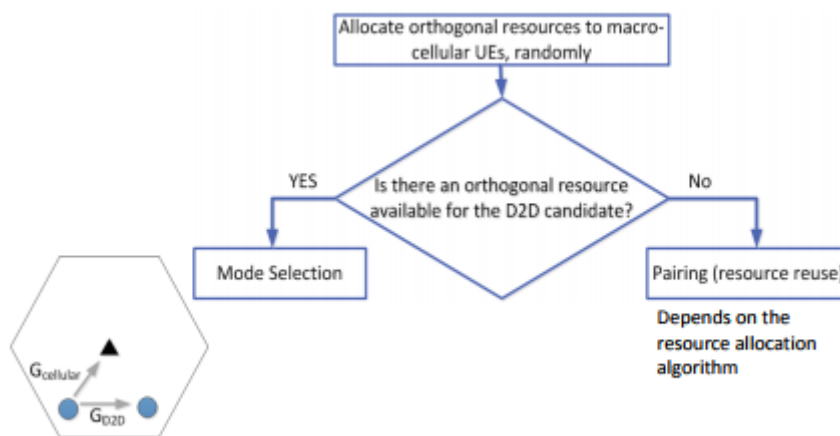
Ελέγχου Ισχύος

Ο έλεγχος ισχύος μεγιστοποίησης χρησιμότητας αναδुकνύεται μέσα από ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης το οποίο στοχεύει στη μεγιστοποίηση της χρησιμότητας όλων των UE, λαμβάνοντας υπόψη τις ισχύεις μετάδοσης. Με τον όρο μεγιστοποίηση της χρησιμότητας νοείται η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης (transmission rate). Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του αλγορίθμου είναι ότι χρησιμοποιεί ένα δυναμικό στόχο SINR ο οποίος προσαρμόζεται και δεν αρχικοποιείται σε μία τιμή που δεν αλλάζει. Δεδομένου ότι ο στόχος είναι η μεγιστοποίηση της χρησιμότητας ολόκληρου του συστήματος και δεν αφορά μόνο ένα UE, είναι προτιμότερο να υπάρχουν υψηλότεροι στόχοι SINR για τις ζεύξεις που προσφέρουν μικρότερες απώλειες και μεγαλύτερα κέρδη. Για τις προβληματικές, η προσαρμογή των στόχων SINR διασφαλίζει ότι οι στόχοι SINR μπορούν πάντα να επιτευχθούν. Ο αλγόριθμος μεγιστοποίησης χρησιμότητας βασίζεται στην επίλυση δύο προβλημάτων. Το πρώτο πρόβλημα αφορά την εύρεση των βέλτιστων στόχων SINR για ένα σύνολο UE που μεταδίδουν με διαφορετικές ισχύεις. Το δεύτερο πρόβλημα σχετίζεται με την εύρεση της βέλτιστης ισχύς μετάδοσης για ένα δεδομένο σύνολο στόχων SINR.

Ο αλγόριθμος utility-maximization power control χρησιμοποιεί μια επαναληπτική λύση διπλού βρόχου για την επίλυση αυτών των προβλημάτων. Το πρώτο πρόβλημα επιλύεται από εξωτερικούς βρόχους (loops) οι οποίοι καθορίζουν τους στόχους SINR σε κάθε επανάληψη μέχρις ότου οι στόχοι SINR να είναι οι βέλτιστοι. Το δεύτερο πρόβλημα επιλύεται από εσωτερικούς βρόχους οι οποίοι ρυθμίζουν τις ισχύεις μετάδοσης του UE σε κάθε επανάληψη μέχρις ότου οι αυτές να είναι οι βέλτιστες. Μετά από αυτή τη διαδικασία ενημερώνονται οι στόχοι SINR. Ο μηχανισμός εσωτερικού βρόχου περιλαμβάνει τη μέτρηση SINR τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη. Έπειτα γίνεται ενημέρωση των τιμών αυτών μέχρι να επιτευχθεί ο στόχος SINR. Δηλαδή, για ένα δεδομένο στόχο SINR, η ενημέρωση ισχύος γίνεται σύμφωνα με την εκάστοτε μέτρηση SINR. Για τον μηχανισμό του εξωτερικού βρόχου, πρέπει αρχικά ο στόχος SINR να ρυθμιστεί σε χαμηλή τιμή. Στη συνέχεια, σε κάθε επανάληψη του εξωτερικού βρόχου, γίνεται η διαδικασία ενημέρωσης. Η ισχύς μετάδοσης που υπολογίζεται κατά την τελευταία επανάληψη του εσωτερικού βρόχου θεωρείται ότι είναι η βέλτιστη. Ομοίως, ο στόχος του SINR που υπολογίζεται στην τελευταία επανάληψη του εξωτερικού βρόχου θεωρείται ότι είναι ο βέλτιστος. Με αυτή την έννοια, ο αριθμός των επαναλήψεων του εξωτερικού βρόχου και του εσωτερικού βρόχου επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την έξοδο του αλγορίθμου.

3.3 Αλγόριθμοι Επικοινωνίας Συσκευής προς Συσκευή για Δέσμευση των Πόρων στο Δίκτυο LTE

Εξετάζονται τέσσερις αλγόριθμοι κατανομής πόρων: αυτοί της τυχαίας κατανομής πόρων, της ισορροπημένης τυχαίας κατανομής, της κατανομής κυψελοειδούς προστασίας και αυτός της ελάχιστης κατανομής παρεμβολών. Είναι σημαντικό να σημειωθεί μια θεμελιώδη παραδοχή. Η κατανομή πόρων σε αυτή την εργασία προϋποθέτει ότι κάθε σύνδεσμος επικοινωνίας, είτε είναι κυψελοειδής είτε D2D, απαιτεί μόνο έναν ραδιοφωνικό πόρο. Συνεπώς, όλοι οι αλγόριθμοι κατανομής πόρων που περιγράφονται σε αυτό το κεφάλαιο λειτουργούν μόνο υπό την υπόθεση αυτή. Η γενική ροή της κατανομής των πόρων που υλοποιείται σε αυτή την εργασία απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα [31].



Σχήμα 6. Αλγόριθμος κατανομής των πόρων

Το σχήμα απεικονίζει ότι το πρώτο βήμα στη διαδικασία της κατανομής πόρων είναι η παροχή ορθογώνιων πόρων για όλα τα κυψελοειδή UE. Στη συνέχεια, για μία συγκεκριμένη υποψήφια D2D ζεύξη, ελέγχεται η διαθεσιμότητα ορθογώνιων πόρων. Εάν είναι δυνατόν να διαθέσουμε έναν ορθογώνιο πόρο σε μια υποψήφια σύνδεση D2D, τότε γίνεται επιλογή λειτουργίας D2D. Έως τώρα, Εάν δεν υπάρχει διαθέσιμος ορθογώνιος ραδιοφωνικός πόρος για τον υποψήφιο D2D, είναι απαραίτητη η επαναχρησιμοποίηση πόρων. Κάθε αλγόριθμος κατανομής πόρων έχει διαφορετικό κριτήριο επαναχρησιμοποίησης πόρων. Με άλλα λόγια, η διαφορά μεταξύ αλγορίθμων κατανομής πόρων μπορεί να παρατηρηθεί μόνο όταν πραγματοποιείται επαναχρησιμοποίηση πόρων.

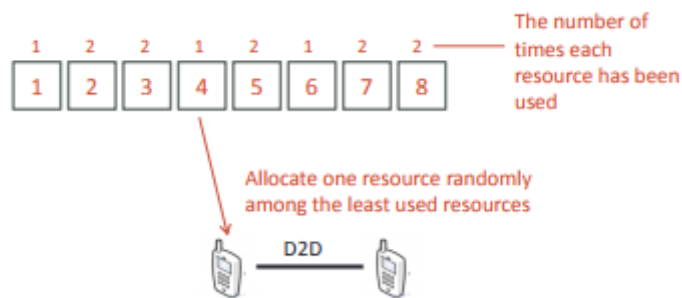
3.3.1 Τυχαία Κατανομή Πόρων (Random Resource Allocation)

Σε περίπτωση που δεν υπάρχουν ορθογώνιοι πόροι, η τυχαία κατανομή πόρων δεν λαμβάνει υπόψη τα κέρδη διαδρομής κατά την κατανομή των πόρων στους συνδέσμους D2D. Όταν απαιτείται επαναχρησιμοποίηση πόρων, ο αλγόριθμος τυχαίας κατανομής επιλέγει απλώς έναν πόρο τυχαία. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η τυχαία κατανομή πόρων είναι ο ευκολότερος αλγόριθμος που μπορεί να εφαρμοστεί.

3.3.2 Ισορροπημένη Κατανομή Πόρων (Balanced Random Allocation)

Ο αλγόριθμος BRA είναι μια βελτίωση του αλγορίθμου τυχαίας κατανομής πόρων. Εξακολουθεί να μην λαμβάνει υπόψη τα οφέλη από τη διαδρομή καθώς αποφασίζει ποιος πόρος πρόκειται να επαναχρησιμοποιηθεί, αλλά εξετάζει το πόσες φορές

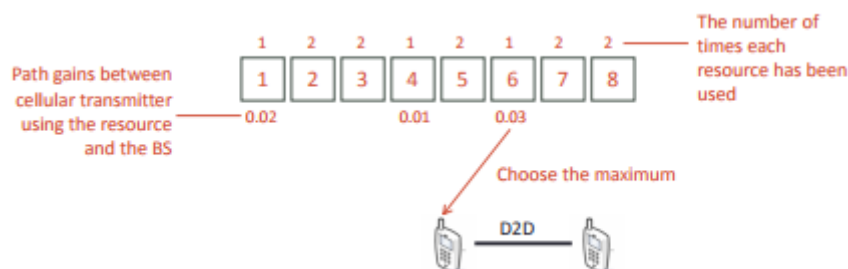
χρησιμοποιήθηκε ένας πόρος. Ο αλγόριθμος BRA εισάγει μια μεταβλητή μέτρησης που υποδεικνύει τον αριθμό των επαναλήψεων όπου χρησιμοποιήθηκε ένας πόρος. Ο BRA προσπαθεί να μην διαθέσει πάρα πολλές συνδέσεις D2D στον ίδιο πόρο - εξ ου και ο όρος "ισορροπημένη κατανομή". Ο συλλογισμός πίσω από αυτό είναι ότι η χρήση ενός πόρου πάρα πολύ φορές μπορεί να προκαλέσει σοβαρές παρεμβολές. Με την ιεράρχηση των πόρων οι οποίοι χρησιμοποιούνται λιγότερο για τη διάθεση των συνδέσεων D2D, δύναται να αναμένονται μικρότερες παρεμβολές και υψηλότερο SINR. Εάν δύο ή περισσότεροι πόροι έχουν την ίδια τιμή, η κατανομή των πόρων γίνεται τυχαία μεταξύ τους.



Εικόνα 5. Ο αλγόριθμος Balanced Random Allocation

3.3.3 Κατανομή Πόρων με Προστασία του Κυψελοειδούς Δικτύου (Cellular Protection Allocation)

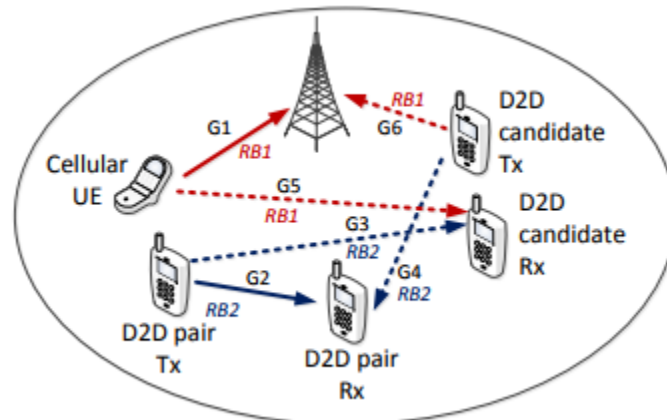
Ο αλγόριθμος CPA βελτιώνει περαιτέρω την κατανομή των πόρων στη λειτουργία επαναχρησιμοποίησης λαμβάνοντας υπόψη τα κέρδη της διαδρομής. Η λογική του CPA είναι η επαναχρησιμοποίηση των πόρων για τους οποίους το κέρδος διαδρομής μεταξύ κυψελοειδούς πομπού ο οποίος χρησιμοποιεί ήδη αυτόν τον πόρο και του σταθμού βάσης είναι το υψηλότερο. Το υψηλό κέρδος διαδρομής μεταξύ του κυψελοειδούς UE και του σταθμού βάσης θα σήμαινε ότι το UE είναι "ισχυρό", επομένως δεν θα υποφέρει πολύ από την επαναχρησιμοποίηση πόρων. Υπό αυτή την έννοια, ο αλγόριθμος CPA προστατεύει τα ασθενέστερα UE. Η παρακάτω εικόνα δείχνει πώς γίνεται η επαναχρησιμοποίηση πόρων στον αλγόριθμο CPA.



Εικόνα 6. Ο αλγόριθμος Cellular Protection Allocation

3.3.4 Κατανομή Πόρων με Ελάχιστες Παρεμβολές (Minimum Interference Allocation)

Ο αλγόριθμος MinInterf υποθέτει ότι είναι γνωστά όλα τα κέρδη διαδρομής (path gains) και για τις κυψελοειδείς αλλά και για D2D ζεύξεις. Χρησιμοποιώντας τα path gains, μπορούν να εκτιμηθούν οι παρεμβολές που δημιουργούνται και λαμβάνονται από άλλους συνδέσμους που μοιράζονται τον πόρο. Οι παρεμβολές που δημιουργούνται σε άλλες ζεύξεις υπολογίζονται ως το άθροισμα των κερδών διαδρομής μεταξύ του πομπού D2D και όλων των δεκτών που μοιράζονται τον ίδιο πόρο. Οι παρεμβολές που λαμβάνονται από άλλες ζεύξεις υπολογίζονται ως το άθροισμα των κερδών διαδρομής μεταξύ του δέκτη D2D και όλων των πομπών που μοιράζονται τον ίδιο πόρο. Ως παράδειγμα εφαρμογής του αλγορίθμου υποθέτουμε ότι σε μία κυψέλη με δύο μπλοκ πόρων που ονομάζεται RB1 και RB2 υπάρχει ένα κυψελοειδές UE που μεταδίδει χρησιμοποιώντας το RB1 και ένα ζευγάρι D2D που μεταδίδει χρησιμοποιώντας το RB2 όπως φαίνεται στην εικόνα 7. Αν εμφανιστεί μία υποψήφια ζεύξη D2D εντοπίζεται στο σύστημα, ο αλγόριθμος κατανομής πόρων πρέπει να αποφασίσει εάν αυτός ο υποψήφιος D2D πρέπει να επαναχρησιμοποιήσει το RB1 ή το RB2. Όπως φαίνεται τα κέρδη διαδρομής στο σύστημα είναι G_1, \dots, G_6 . Εάν η υποψήφια D2D ζεύξη χρησιμοποιήσει το RB1, ο πομπός της υποψήφιας ζεύξης θα δημιουργήσει παρεμβολές στον σταθμό βάσης και ο δέκτης της θα λάβει παρεμβολές από το κυψελοειδές UE. Εάν από την άλλη μεριά χρησιμοποιήσει το RB2, ο πομπός της υποψήφιας ζεύξης θα δημιουργήσει παρεμβολή στον δέκτη του υπάρχοντος ζεύγους D2D και ο δέκτης της θα λάβει παρεμβολές από τον πομπό του υπάρχοντος ζεύγους D2D.



Εικόνα 7. Παρεμβολές που προκύπτουν από μία υποψήφια σύνδεση D2D σε κυψέλη με μία ζεύξη D2D και μία κυψελοειδή ζεύξη

3.4 D2D Επιλογή Λειτουργίας (Mode Selection)

Η επικοινωνία D2D μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο βασικούς τρόπους: κάτω από ένα κυψελωτό δίκτυο (underlay) ή πάνω από ένα κυψελωτό δίκτυο (overlay). Πιο συγκεκριμένα οι χρήστες D2D μοιράζονται το φάσμα με τον κυτταρικό χρήστη (cellular user), δηλαδή το χρήστη που χρησιμοποιεί το κυψελωτό δίκτυο, με ορθογώνιο ή μη ορθογώνιο τρόπο. Η πιο γοητευτική όψη της επικοινωνίας D2D είναι ότι μπορεί να προωθήσει σημαντικά τη χωρητικότητα του δικτύου με επαναχρησιμοποίηση του φάσματος μεταξύ των D2D χρηστών και των χρηστών του κυψελοειδούς δικτύου (underlay) με τέτοιο τρόπο, ώστε να μην δημιουργούνται παρεμβολές μεταξύ τους. Έτσι οι φασματικοί πόροι πρέπει να διατίθενται για επικοινωνίες D2D με αποτελεσματικό τρόπο.

Επί του παρόντος, υπάρχουν τρεις τρόποι λειτουργίας D2D:

- **Λειτουργία Επαναχρησιμοποίησης πόρων (Reuse Mode):** Ο ίδιος πόρος φάσματος μοιράζεται μεταξύ των D2D και των κυτταρικών χρηστών. Οι συσκευές D2D μεταδίδουν απευθείας δεδομένα χρησιμοποιώντας πόρους που ήδη χρησιμοποιούνται από κυτταρικούς χρήστες. Η επαναχρησιμοποίηση του φάσματος μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε σε ανερχόμενη ζεύξη είτε σε κατερχόμενη ζεύξη.
- **Αποκλειστική Λειτουργία (Dedicated Mode):** Το κυψελοειδές δίκτυο δεσμεύει ένα τμήμα από τους διαθέσιμους πόρους αποκλειστικά για την απευθείας επικοινωνία των συσκευών D2D.
- **Κυψελοειδής Λειτουργία (Cellular Mode):** Η κυκλοφορία D2D πραγματοποιείται μέσω του σταθμού βάσης με τον παραδοσιακό τρόπο, δηλαδή χωρίς απευθείας ζεύξη μεταξύ των D2D συσκευών όπως ακριβώς επικοινωνούν και οι κυτταρικοί χρήστες.

Οι αλγόριθμοι που υπάρχουν στη βιβλιογραφία αφορούν τα κριτήρια σύμφωνα με τα οποία γίνεται η επιλογή του τρόπου λειτουργίας της D2D επικοινωνίας. Τέτοιου είδους κριτήρια είναι η επιλογή της λειτουργίας με το μέγιστο throughput, η επιλογή λειτουργίας στο σενάριο full-buffer κίνησης όπου όλοι οι διαθέσιμοι πόροι έχουν δεσμευτεί ή στο σενάριο που δεν χρειάζεται να γίνει επαναχρησιμοποίηση πόρων επειδή οι διαθέσιμοι πόροι είναι αδρανείς (στην ανερχόμενη ζεύξη για παράδειγμα). Η απόδοση της D2D επικοινωνίας σε κάθε λειτουργία εξαρτάται επίσης από τις καταστάσεις κίνησης (traffic states) την απο-σε-άκρο καθυστέρηση (end-to-end delay), την πιθανότητα κατάρρευσης της ζεύξης και την απόδοση του δικτύου.

- **Αθόρυβη Λειτουργία (Silent Mode):** Όταν οι διαθέσιμοι πόροι δεν επαρκούν για την υποστήριξη της επικοινωνίας D2D και η επαναχρησιμοποίηση φάσματος δεν είναι δυνατή λόγω του προβλήματος παρεμβολών, οι συσκευές D2D δεν μπορούν να μεταδώσουν δεδομένα και πρέπει να παραμείνουν αδρανείς στην αθόρυβη λειτουργία.

3.4.1 Αλγόριθμος επιλογής λειτουργίας σύμφωνα με την κατανάλωση ισχύος στο δίκτυο LTE

Ο στόχος του συγκεκριμένου αλγορίθμου είναι να ελαχιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας ενώ ταυτόχρονα ικανοποιούνται οι απαιτήσεις που αφορούν τον ρυθμό δεδομένων όσο αφορά το χρήστη. Στις D2D επικοινωνίες, μια μονάδα UE μπορεί να μεταδώσει πιθανώς ένα σήμα με μειωμένη στάθμη ισχύος, ώστε να μπορεί να μειωθεί η κατανάλωση της ενέργειας και ταυτόχρονα να είναι επιτυχής η λήψη του σήματος αυτού στο δέκτη. Επιπλέον, η δέσμευση των καναλιών πρέπει να γίνεται αποδοτικά και η εκπεμπόμενη ισχύς (ανά κανάλι) να ορίζεται με προσοχή. Έτσι ο αλγόριθμος αυτός

καθορίζει την επιλογή λειτουργίας αλλά και του καναλιού με βάση την ισχύ και μπορεί να ενσωματωθεί σε ασύρματα δίκτυα που είναι βασισμένα στην τεχνική OFDMA όπως το LTE. Αυτός ο αλγόριθμος, εφαρμόζει μια γραμμική αναζήτηση στους δείκτες κέρδους των D2D καναλιών (channel gain ratios) και κάνει μία ταξινόμηση σε αυτά προκειμένου να επιλέξει ποια λειτουργία θα χρησιμοποιηθεί για την επικοινωνία, χρησιμοποιώντας πρώτα ως κριτήριο την κατανάλωση ενέργειας και κάνοντας στη συνέχεια την ανάθεση των πόρων και της ισχύος. Στον συγκεκριμένο αλγόριθμο λαμβάνονται υπόψη η κυψελοειδής και η αποκλειστική λειτουργία για την επικοινωνία των συσκευών.

Στο πρώτο βήμα ο αλγόριθμος κάνει μία ταξινόμηση όλων των ζεύξεων D2D σε αύξουσα σειρά σύμφωνα με το δείκτη $g(i)$ και αποθηκεύει τις τιμές σε ένα πίνακα. Ο δείκτης $g(i)$ είναι ο λόγος του μέσου κέρδους του D2D καναλιού ως προς το μέσο κέρδος του κέρδους του καναλιού στην κυψελοειδή λειτουργία. Όσο υψηλότερος είναι αυτός ο λόγος, τόσο προτιμότερο είναι η επικοινωνία να πραγματοποιηθεί στη λειτουργία D2D. Στο επόμενο βήμα γεμίζει ένα άλλο πίνακα ο οποίος έχει καταχωρημένη τη λειτουργία στην οποία πραγματοποιείται η επικοινωνία σε κάθε ζεύξη, αρχικοποιώντας όλες τις ζεύξεις σε D2D (δηλαδή γεμίζοντας τον πίνακα με 1). Έπειτα έχοντας αρχικοποιημένο ως μηδενικό τον ρυθμό δεδομένων, ο αλγόριθμος αυξάνοντας σταδιακά τον ρυθμό δεδομένων, προσπαθεί να βρει την χαμηλότερη αύξηση της ισχύος για τις ζεύξεις αυτές και η οποία ταυτόχρονα προσφέρει αυτόν το συγκεκριμένο ρυθμό δεδομένων. Δηλαδή ο αλγόριθμος συνεχίζει να επιλέγει την εκάστοτε ζεύξη αυξάνοντας σε κάθε βήμα τον ρυθμό δεδομένων μέχρι να ικανοποιηθεί η απαίτηση που έχει οριστεί ως προς το ρυθμό δεδομένων. την ελάχιστη τιμή της ισχύος της κάθε D2D ζεύξης για το δοσμένο κατώφλι του ρυθμού δεδομένων. Στη συνέχεια ο αλγόριθμος για κάθε ζεύξη υπολογίζει την συνολική ισχύ της κυψελοειδούς λειτουργίας και αν επιτευχθεί μεγαλύτερος ρυθμός δεδομένων τότε εκχωρεί την συγκεκριμένη λειτουργία ως ιδανική και ορίζει το κατώφλι στις τιμές της συγκεκριμένης λειτουργίας. Τέλος, ο αλγόριθμος επιστρέφει της χαμηλότερες τιμές των ισχύων με τους υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων και τη λειτουργία στην οποία αυτές πραγματοποιήθηκαν.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων όπου χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος αυτός φαίνεται ότι μπορεί να επιτύχει πάνω από 57% εξοικονόμηση ενέργειας, σε σύγκριση με άλλες μεθόδους, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι πετυχαίνει το στόχο του ο οποίος είναι κάθε D2D ζεύξη να πραγματοποιείται σε μία λειτουργία με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Παρόλαυτα ως μειονέκτημα του αλγορίθμου θα μπορούσε να χαρακτηρίσει κανείς το γεγονός ότι δεν διαθέτει ως λειτουργία την επαναχρησιμοποίηση των πόρων που είναι ένα από τα πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα των D2D επικοινωνιών, προκειμένου να μην συνυπολογίσει το φαινόμενο των παρεμβολών[29].

3.4.2 Αλγόριθμος επιλογής λειτουργίας σύμφωνα με την τιμή του SINR στο δίκτυο LTE

Σε αντίθεση με τον προηγούμενο αλγόριθμο, αυτός ο αλγόριθμος επιλέγει τον τρόπο λειτουργίας της επικοινωνίας D2D λαμβάνοντας υπόψη του το φαινόμενο των παρεμβολών και υποστηρίζεται και αυτός στο LTE δίκτυο. Διαθέτει την λειτουργία της επαναχρησιμοποίησης των πόρων αφού όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι πόροι είναι πολύτιμοι και η επαναχρησιμοποίησή τους αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα των D2D επικοινωνιών. Όμως, στην λειτουργία επαναχρησιμοποίησης των πόρων δημιουργούνται παρεμβολές στο κυψελοειδές δίκτυο, οι οποίες πρέπει να περιοριστούν προκειμένου να διατηρηθεί το επίπεδο απόδοσης του κυψελοειδούς δικτύου που έχει τεθεί ως στόχος. Κατά τη διάρκεια του downlink, όταν δηλαδή στέλνει ο σταθμός βάση προς στις συσκευές, οι κυψελοειδείς συσκευές μπορεί να υποφέρουν

από παρεμβολές οι οποίες προέρχονται από τις συσκευές D2D που μεταδίδουν. Από την άλλη μεριά, ο σταθμός βάσης μπορεί να γίνει «θύμα» παρεμβολών από μια συσκευή D2D που μεταδίδει στο uplink αλλά και ένας δέκτης D2D μπορεί να δεχτεί παρεμβολές από τις κυψελοειδείς συσκευές που μεταδίδουν στο uplink. Αν η απόσταση μεταξύ των D2D συσκευών είναι πολύ μεγάλη, η επικοινωνία D2D θα απαιτήσει υψηλή ισχύ. Και σε αυτή τη περίπτωση, το κυψελοειδές δίκτυο θα υποφέρει από παρεμβολές. Γι αυτό το λόγο ο αλγόριθμος απορρίπτει την επικοινωνία D2D μεταξύ συσκευών που έχουν απόσταση μεγαλύτερη των 25 μέτρων. Επίσης γίνεται η υπόθεση ότι και τα δύο UEs πρέπει να είναι στην ίδια κυψέλη προκειμένου να πραγματοποιήσουν μία σύνδεση D2D. Στο συγκεκριμένο paper παρουσιάζεται ο ίδιος αλγόριθμος στην περίπτωση που γίνει δέσμευση των πόρων της ανερχόμενης ζεύξης και στην περίπτωση που γίνει δέσμευση των πόρων της κατερχόμενης ζεύξης για την απευθείας επικοινωνία των συσκευών [30]. Για λόγους αποφυγής πλεονάζουσας πληροφορίας θα περιγραφεί ο αλγόριθμος στην περίπτωση της ανερχόμενης ζεύξης.

Αρχικά ο αλγόριθμος ταξινομεί σε φθίνουσα σειρά μία λίστα που περιέχει τους δείκτες CQI όλων των καναλιών του uplink. Στη συνέχεια εφόσον υπάρχουν συσκευές που μπορούν να πραγματοποιήσουν D2D επικοινωνία ή η χωρητικότητα των πόρων έχει καλυφθεί, ο αλγόριθμος διαλέγει τα RB που ήδη χρησιμοποιούν οι κυψελοειδείς χρήστες αλλά έχουν την υψηλότερη τιμή CQI. Αυτό συμβαίνει διότι πρακτικά υψηλό CQI σε ένα κανάλι σημαίνει ισχυρό σήμα το οποίο δύσκολα θα επηρεαστεί από παρεμβολές. Στο επόμενο βήμα διαλέγει τη D2D συσκευή της οποίας το gain του καναλιού με την κυψελοειδή συσκευή που ήδη χρησιμοποιεί τους πόρους, είναι το μικρότερο, το οποίο πρακτικά σημαίνει καλύτερο σήμα και λιγότερο θόρυβο, δηλαδή καλύτερο SINR. Μετά υπολογίζει το SINR της σύνδεσης των D2D συσκευών (Uplink SINR) και το SINR του κυψελοειδούς χρήστη που χρησιμοποιεί τους ίδιους πόρους το οποίο επίσης αφορά το λόγο σήματος προς θόρυβο του cellular UE που στέλνει δεδομένα στο σταθμό βάσης (Uplink SINR). Έπειτα ελέγχει τα παραπάνω SINR είναι μεγαλύτερα από εκείνα που έχουν οριστεί ως κατώφλια, διότι σε αντίθετη περίπτωση δεν θα ικανοποιηθούν οι περιορισμοί που αφορούν το QoS αλλά και τον ρυθμό των δεδομένων. Στην περίπτωση που ικανοποιείται ο παραπάνω έλεγχος το δίκτυο εκχωρεί τους uplink πόρους στην ζεύξη D2D και την αφαιρεί από τη λίστα με τις D2D ζεύξεις που είναι προς εξυπηρέτηση. Ως επόμενο αυξάνει το δείκτη της λίστας που περιέχει τους δείκτες CQI όλων των καναλιών του uplink διότι το συγκεκριμένο κανάλι έχει ήδη χρησιμοποιηθεί δύο φορές (μία για cellular και μία για D2D επικοινωνία). Στην περίπτωση που δεν ικανοποιείται η συνθήκη που ελέγχει τις προϋποθέσεις που πρέπει να ικανοποιούν τα υπολογισμένα SINR το δίκτυο δεν εκχωρεί τους πόρους για την D2D επικοινωνία. Τότε οι δύο συσκευές μπορούν είτε να επικοινωνήσουν σε αποκλειστική λειτουργία, είτε σε απλή κυψελοειδή λειτουργία, περιπτώσεις τις οποίες δεν καλύπτει ο συγκεκριμένος αλγόριθμος.

Ο αλγόριθμος αυτός βελτιώνει την απόδοση του δικτύου βελτιώνοντας το συνολικό throughput των κυψελοειδών και των D2D επικοινωνιών, χωρίς να προκαλέσει προβλήματα στο κυρίως δίκτυο του οποίου οι επικοινωνίες έχουν προτεραιότητα σε σχέση με τις D2D. Ως μειονέκτημα αυτού του αλγορίθμου θα μπορούσε κανείς να πει ότι είναι το γεγονός ότι δεν υποστηρίζει τις υπόλοιπες λειτουργίες D2D κι επομένως δεν διαθέτει κάποια κριτήρια προκειμένου να επιλέξει την αποκλειστική λειτουργία ή την αθόρυβη λειτουργία.

3.4.3 Αλγόριθμος επιλογής λειτουργίας σύμφωνα με τα αποτελέσματα μιας πληθώρας παραμέτρων στο δίκτυο LTE

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος επιλογής λειτουργίας προτείνει τις διαδικασίες και τα κριτήρια σύμφωνα με το οποία θα γίνει η επιλογή του τρόπου λειτουργίας ανάμεσα σε αυτούς που αναφέρθηκαν προηγουμένως για ένα κυψελωτό δίκτυο. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης του αλγορίθμου δείχνουν ότι αυτός επιτρέπει μια πολύ πιο αξιόπιστη επικοινωνία συσκευής προς συσκευή με περιορισμένες παρεμβολές στο κυψελωτό δίκτυο σε σχέση με πιο απλές διαδικασίες επιλογής λειτουργίας ακριβώς επειδή λαμβάνει υπόψιν του ένα πλήθος παραμέτρων. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος επιλογής τρόπου λειτουργίας δεν βασίζεται μόνο στην επιλογή με βάση την ποιότητα της D2D ζεύξης και της ποιότητας της ζεύξης μεταξύ των συσκευών και του σταθμού βάσης, αλλά λαμβάνει υπόψιν και τις παρεμβολές που προκύπτουν από την κάθε πιθανή λειτουργία. Τέτοιου είδους παρεμβολές μπορεί να είναι η θέση του D2D δέκτη σε σχέση με τους χρήστες του κυψελωτού δικτύου όταν γίνεται επαναχρησιμοποίηση των πόρων της ανερχόμενης ζεύξης ή της κατερχόμενης ζεύξης από τους D2D χρήστες, όπως επίσης και οι παρεμβολές από άλλες κυψέλες. Στα πραγματικά δίκτυα η επιλογή μεταξύ της απευθείας επικοινωνίας και της κυψελοειδούς λειτουργίας εξαρτάται επίσης από το πόσο φορτωμένη η κυψέλη. Πιο συγκεκριμένα, η επιτευχθείσα απόδοση της επικοινωνίας D2D σε κυψελοειδή λειτουργία θα είναι χαμηλότερη όταν η κυψέλη είναι πλήρως φορτωμένη και το eNB θα διαθέσει λιγότερους πόρους στην επικοινωνία D2D λόγω του ότι η κυψελοειδής επικοινωνία έχει προτεραιότητα σε σχέση με την απευθείας επικοινωνία. Επομένως, αυτός είναι ένας εξίσου σημαντικός παράγοντας που ο αλγόριθμος υπολογίζει για την επιλογή της λειτουργίας επικοινωνίας ανάμεσα στις συσκευές. Τα αποτελέσματά της χρήσης του αλγορίθμου σε ένα τοπικό σενάριο έδειξαν ότι ο συνολικός ρυθμός του δικτύου βελτιώθηκε κατά 50% σε σύγκριση με την καθαρή κυψελοειδή επικοινωνία και το ποσοστό των επιτυχημένων D2D επικοινωνιών υπερδιπλασιάστηκε.

Στο πρώτο βήμα οι ακροδέκτες D2D στέλνουν σήματα με ισχύ η οποία έχει οριστεί από το eNB και ταυτόχρονα κάνουν μία εκτίμηση της ισχύος των λαμβανόμενων σημάτων από τους άλλους ακροδέκτες. Στη συνέχεια, οι ακροδέκτες D2D υπολογίζουν την ισχύ του θορύβου και των παρεμβολών με το eNB τους να μεταδίδει στο downlink και χωρίς το eNB τους να μεταδίδει στο downlink. Στο τρίτο βήμα οι ακροδέκτες D2D υπολογίζουν την ισχύ θορύβου και των παρεμβολών αρχικά με τις συσκευές να μεταδίδουν στο uplink και στη συνέχεια χωρίς αυτές να μεταδίδουν στην κυψέλη τους. Έπειτα, οι ακροδέκτες D2D στέλνουν τις αυτές πληροφορίες στο eNB. Εκείνο με τη σειρά του αποφασίζει το ποσοστό των πόρων του uplink και του downlink που θα διαθέσει στις συσκευές D2D για την αποκλειστική λειτουργία καθώς και το ποσοστό που θα διαθέσει για την κυψελοειδή λειτουργία σύμφωνα με τις πληροφορίες που έχει σχετικά με τον φόρτο της κυψέλης. Μετά ο σταθμός βάσης αποφασίζει το επίπεδο της ισχύος με την οποία θα μεταδίδουν οι συσκευές στην ανερχόμενη και στην κατερχόμενη ζεύξη στις λειτουργίες απευθείας επικοινωνίας των συσκευών, δηλαδή στην λειτουργία επαναχρησιμοποίησης πόρων αλλά και στην αποκλειστική λειτουργία. Ακόμα, το eNB εκτιμά το αναμενόμενο SINR για κάθε λειτουργία (dedicated, reuse, cellular) στο uplink και στο downlink και τους διαθέσιμους πόρους για κάθε μία από αυτές. Στο τέλος επιλέγει τη λειτουργία επικοινωνίας με το υψηλότερο throughput.

Ο παραπάνω αλγόριθμος είναι ιδιαίτερα αποδοτικός διότι εξασφαλίζει αξιόπιστη επικοινωνία D2D με περιορισμένες παρεμβολές στο κυψελοειδές δίκτυο. Αυτό συμβαίνει επειδή υιοθετεί μια διαδικασία επιλογής λειτουργίας που λαμβάνει υπόψη την ποιότητα της ζεύξης D2D και τις παρεμβολές που προκύπτουν από την κοινή χρήση

Μελέτη και προσομοίωση αλγοριθμικών διαδικασιών για επικοινωνίες συσκευής-προς-συσκευή σε δίκτυα 4^{ης} γενιάς

των πόρων του uplink ή του downlink. Επιπλέον, λαμβάνει υπόψη την ποιότητα της ζεύξης στην κυψελοειδή λειτουργία για τους ακροδέκτες D2D[28].

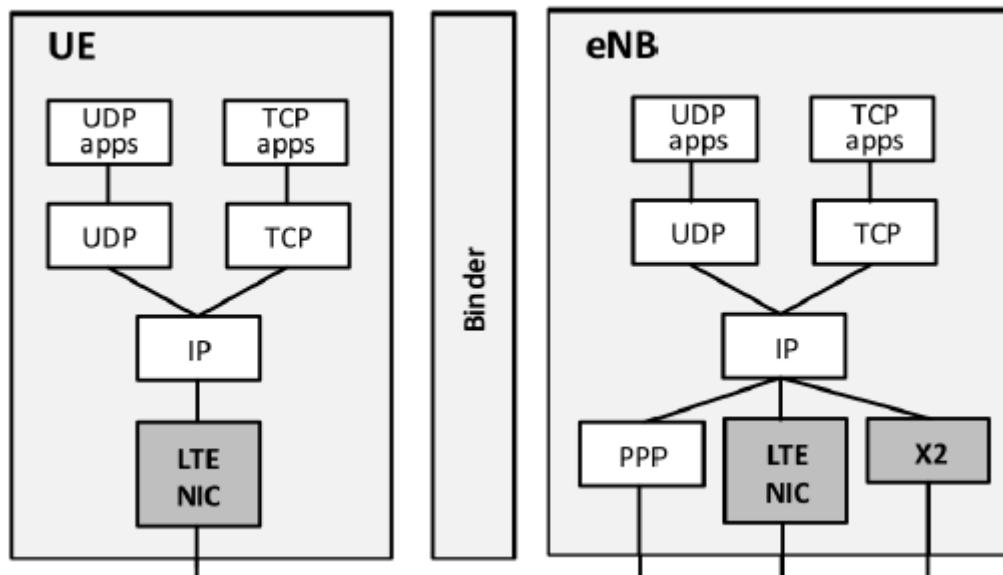
4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ MODE SELECTION ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

4.1 Περιβάλλον Προσομοίωσης

Η Προσομοίωση, ώστε να παρουσιαστούν τα σενάρια του Mode Selection Αλγόριθμου, έγινε στο εργαλείο OMNeT++ 5.0 το οποίο είναι εγκατεστημένο σε Ubuntu 16.04. Το OMNeT++ είναι ένα εργαλείο αναφοράς όσο αφορά την εκτέλεση προσομοιώσεων, ειδικά στον τομέα των δικτύων. Η βασική ιδέα του OMNeT++ είναι ότι οι προσομοιώσεις κατασκευάζονται από τη σύνθεση διαφορετικών ενοτήτων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας μηνύματα (Modularity) . Αρκετά μοντέλα βασισμένα στο OMNeT++ είναι διαθέσιμα για να βοηθήσουν τους ερευνητές στην αξιολόγηση της απόδοσης των συστημάτων δικτύωσης, όπως είναι για παράδειγμα το INET. Το INET παρέχει ένα μεγάλο αριθμό οντοτήτων και πρωτοκόλλων που προσομοιώνουν τόσο τα ενσύρματα όσο και τα ασύρματα δίκτυα. Πιο συγκεκριμένα, παρέχει την έννοια της κάρτας διασύνδεσης δικτύου (Network Interface Card - NIC) και ενότητες που υλοποιούν τις λειτουργίες της. Αυτό ως οντότητα (module) μπορεί να ενσωματωθεί σε άλλες οντότητες έτσι ώστε να μοντελοποιηθούν διαφορετικά πρωτόκολλα επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών του δικτύου. Για παράδειγμα, σε μια συσκευή όπως ένα UE, μπορούν να ενσωματωθεί το Wi-Fi ή το Point-to-Point Protocol (PPP) ή και τα δύο. Το SimuLTE είναι επίσης ένα από αυτά τα μοντέλα, τα οποία παρέχουν ένα πλαίσιο προσομοίωσης των δικτύων LTE-Advanced (LTE-A). Δηλαδή το SimuLTE είναι ένα εργαλείο που επιτρέπει προσομοιώσεις δικτύων LTE / LTE-Advanced εντός του OMNeT ++. Έχει σχεδιαστεί ως μια πρόσθετη κάρτα διασύνδεσης δικτύου (NIC) σε αυτά που παρέχονται ήδη από το πλαίσιο INET. Το SimuLTE εκμεταλλεύεται αυτό το χαρακτηριστικό, καθώς είναι σχεδιασμένο ως μία επέκταση ενός ασύρματου NIC module. Αυτό επιτρέπει σε κάποιον να προσθέσει LTE δυνατότητες σε έναν κόμβο που περιλαμβάνεται στην προσομοίωση. Το SimuLTE παρέχει μοντέλα τόσο για τα UE όσο και για τα eNB. Όπως φαίνεται στο σχήμα 7, και οι δύο κόμβοι περιέχουν το LTE NIC, μαζί με ενότητες που υλοποιούν πρωτόκολλα ανώτερου στρώματος, που λαμβάνονται από INET. Επιπλέον, το eNB έχει μια διασύνδεση στο Διαδίκτυο μέσω του PPP πρωτοκόλλου και μπορεί επίσης να συνδεθεί με άλλα eNBs χρησιμοποιώντας τη διεπαφή X2. Το LTE NIC τόσο στο UE όσο και στο eNB υλοποιεί ολόκληρη τη στοίβα πρωτοκόλλων LTE, ως μια υποοντότητα (submodule) ανά στρώμα. Δηλαδή το PDCP, το RLC, το MAC και το PHY αποτελούν μία οντότητα όλα μαζί (module) που είναι το LTE NIC και το καθένα ξεχωριστά αποτελεί μία υποοντότητα (submodule) . Δεδομένου ότι τα UE και τα eNB εκτελούν διαφορετικές λειτουργίες εντός της στοίβας πρωτοκόλλων, το SimuLTE εκμεταλλεύεται τη δυνατότητα της κληρονομικότητας του OMNeT ++ για να ορίσει τόσο τη δομή όσο και τη συμπεριφορά της κάθε υποοντότητας. Ειδικότερα, κάθε υποοντότητα έχει κοινές λειτουργίες, οι οποίες επεκτείνονται με λειτουργίες που αφορούν αποκλειστικά τα UE ή τα eNB. Η επικοινωνία μεταξύ των διαφόρων επιπέδων γίνεται μέσω ανταλλαγής μηνυμάτων, όπως και η μετάδοση δεδομένων μεταξύ των UEs και των eNBs. Από την άλλη μεριά, ο υπολογισμός των πόρων είναι διαχωρισμένος από τη διαβίβαση δεδομένων. Μια ξεχωριστή οντότητα, η οποία ονομάζεται Binder, παρακολουθεί ποιοι πόροι, δηλαδή μπλοκ πόρων (RB), χρησιμοποιούνται τόσο από τα eNB (για μετάδοση downlink) όσο και από τα UEs (για μετάδοση uplink). Όλοι οι LTE κόμβοι μπορούν να έχουν πρόσβαση στο Binder και να μοιράζονται κοινές πληροφορίες μέσω συναρτήσεων. Οι μεταδόσεις της διεπαφής άερα, μεταξύ των LTE NIC διαμορφώνονται από την κλάση ChannelModel, που περιλαμβάνεται στο επίπεδο PHY

της LTE NIC οντότητας. Κατά τη λήψη ενός νέου μηνύματος, το ChannelModel υπολογίζει το λόγο σήμα-προς-θόρυβο (SINR) που λαμβάνεται από τον κόμβο. Για να γίνει αυτό, αποκτά πληροφορίες από το Binder σχετικά με τη χρήση των RBs για όλους τους κόμβους του δικτύου και αποφασίζει αν το μήνυμα μπορεί να αποκωδικοποιηθεί με επιτυχία ή όχι. Το ChannelModel είναι επίσης υπεύθυνο για τον υπολογισμό και την αναφορά της ποιότητας του καναλιού μέσω του CQI (Channel Quality Indicator) των UEs, ο οποίος χρησιμοποιείται για λειτουργίες του eNB. Ακόμη, το SimuLTE προσομοιώνει μέσω του ChannelModel την απώλεια διαδρομής (path loss) και τις επιδράσεις στο σήμα λόγω εξασθένησης (fading effects).

Το SimuLTE ενσωματώνει επίσης τη δυνατότητα να προσομοιώνεται η επικοινωνία συσκευής με συσκευή (D2D). Προκειμένου να υποστηριχθεί η D2D δυνατότητα, στα UE έχει ενσωματωθεί ένα νέο module για κάθε επίπεδο του LTE, το οποίο κληρονομεί τις λειτουργίες του UL και προσθέτει συγκεκριμένες D2D λειτουργικότητες, όπως για παράδειγμα την αναφορά του CQI για το D2D κανάλι (Sidelink) . Στο PDCP επίπεδο οι ροές δεδομένων διαχωρίζονται ανάλογα με το αν πρόκειται για μετάδοση UL, D2D ή D2D_MULTI. Στα χαμηλότερα επίπεδα κάθε ροή δεδομένων υποβάλλεται σε διαφορετικές επεξεργασίες σύμφωνα με την κατεύθυνσή της. Λόγω της έλλειψης εργαλείων για την προσομοίωση και την αξιολόγηση της απόδοσης του D2D σε επίπεδο συστήματος, το SimuLTE μπορεί να διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο, διότι επιτρέπει στους ερευνητές να αξιολογήσουν την απόδοση νέων αλγορίθμων και υπηρεσιών σε πολλά σενάρια και ρυθμίσεις παραμέτρων[23].



Σχήμα 7. Αρχιτεκτονική του SimuLTE

4.2 Σχολιασμός αλγορίθμου και διεξαγωγή πειραμάτων

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει ανάλυση του κώδικα που χρησιμοποιήθηκε για τις εκτελέσεις προσομοίωσης που έγιναν στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Στη συνέχεια, θα γίνει αναλυτική περιγραφή ορισμένων πειραμάτων και το πώς αυτά συσχετίζονται με την αναμενόμενη συμπεριφορά του αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκε.

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται με μορφή ψευδοκώδικα, ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις που ακολουθούν και είναι ένας από τους πιο απλούς αλγορίθμους για την επιλογή της λειτουργίας που θα ακολουθήσει ένα ζεύγος κινητών προκειμένου να επικοινωνήσουν. Ο αλγόριθμος περιγράφεται παρακάτω:

για όλα τα ζευγάρια (i, j) που συνδέονται με LTE D2D τρόπο λειτουργίας, **κάνε**:

αν ο κινητός σταθμός i δεν εξυπηρετείται από το τρέχον eNodeB

αγνόησέ το

τέλος_αν

για όλους τους κόμβους j , **κάνε**:

αν ο κινητός σταθμός j δεν εξυπηρετείται από το τρέχον eNodeB
ή **αν** βρίσκεται σε διαδικασία handover, **τότε**

αγνόησέ το

τέλος_αν

διάβασε το ρυθμό που επιτυγχάνεται μέσω D2D και μέσω Cellular (στην κατεύθυνση του Uplink), έστω ότι ο πρώτος λέγεται bitsUl και ο δεύτερος bitsD2D

αποθήκευσε τον τρέχοντα τρόπο λειτουργίας στη μεταβλητή: παλιός_τρόπος_λειτουργίας

αν bitsUl > bitsD2D, **τότε**

τρόπος_λειτουργίας = cellular

αλλιώς

τρόπος_λειτουργίας = D2D

τέλος_αν

αν παλιός_τρόπος_λειτουργίας != τρόπος_λειτουργίας, **τότε**

δημιουργία νέου γεγονότος (flow) για αλλαγή κατάστασης λειτουργίας

προσθήκη του flow στη λίστα ενεργειών

τέλος_αν

τέλος_για

τέλος_για

Ο τρόπος λειτουργίας του παραπάνω αλγορίθμου είναι απλός, καθώς σε κάθε βήμα της προσομοίωσης ελέγχει αν ο ρυθμός που επιτυγχάνεται από τη λειτουργία Cellular είναι καλύτερη από τη λειτουργία D2D (ή αντίστροφα) και επιλέγεται η καλύτερη λειτουργία σε κάθε περίπτωση. Αν διαπιστωθεί ότι η άλλη λειτουργία (σε σχέση με την τρέχουσα) είναι διαφορετική, τότε δρομολογείται μεταγωγή από την τρέχουσα στην άλλη λειτουργία.

4.3 Περιγραφή των προσομοιώσεων

Στα πλαίσια δημιουργίας πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν, έγιναν 3 διαφορετικές προσομοιώσεις σε κάποια σενάρια που θεωρήθηκαν άξια για μελέτη. Στις επόμενες ενότητες γίνεται αναλυτική περιγραφή καθενός από τα σενάρια αυτά και στο τέλος παρουσιάζεται το συμπέρασμα που προκύπτει από αυτά.

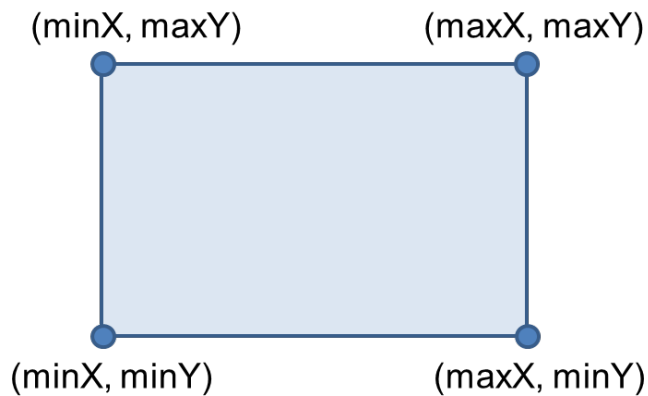
Οι προσομοιώσεις που ακολουθούν έγιναν με τη χρήση του OMNET++, που περιγράφηκε προηγουμένως. Το περιβάλλον αυτό υποστηρίζει αρκετές γλώσσες προγραμματισμού, αλλά η υλοποίηση του αλγορίθμου έγινε σε γλώσσα C++. Για την παραμετροποίηση κάθε πειράματος, τροποποιήθηκε το αρχείο **omnetpp.ini**, στο οποίο βρίσκονται οι πληροφορίες κίνησης και θέσης των κινητών τηλεφώνων και του σταθμού βάσης. Το αρχείο αυτό περιέχει και άλλες επιπλέον πληροφορίες, οι οποίες δε χρίζουν περαιτέρω ανάλυσης στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

Σε κάθε προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το πρωτόκολλο TCP/IP, καθώς θεωρήθηκε ότι είναι από τα πλέον διαδεδομένα πρωτόκολλα στην ανταλλαγή μεγάλου όγκου δεδομένων, χωρίς όμως να παραμερίζεται και η αξία του πρωτοκόλλου UDP που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που απαιτούν streaming. Για τη σωστή περισυλλογή των δεδομένων, δημιουργήθηκε ένα **anf** αρχείο, το οποίο συλλέγει τα αρχεία εξόδου κάθε προσομοίωσης, με σκοπό να παράξει τις γραφικές παραστάσεις που επιθυμεί ο χρήστης. Για την ανάλυση αυτή χρησιμοποιήθηκε το μετρητικό μέγεθος CQI (Channel Quality Indicator), καθώς είναι και ο δείκτης που χρησιμοποιείται και στο **paper** που βασίστηκε η συγκεκριμένη εργασία και κρίθηκε σκόπιμο να διατηρηθεί η χρήση του για χάρην συνέπειας των μετρήσεων και των αποτελεσμάτων που θα σχολιαστούν[27].

Σε κάθε προσομοίωση, χρησιμοποιείται ένα είδος γεωγραφικών συντεταγμένων, που πρακτικά συμβολίζουν την απόσταση κάθε αντικείμενου από την αρχή της εικόνας που τέθηκε σαν «χάρτης». Τα δεδομένα του χάρτη (ύψος κεραιών, διαμόρφωση δρόμων, κτλ.) δεν επηρεάζουν τη διεξαγωγή των συμπερασμάτων, απλά οπτικοποιούν καλύτερα την προσομοίωση στο χρήστη. Λόγω του γεγονότος αυτού, η κίνηση των κινητών τηλεφώνων μπορεί να είναι χωρίς κάποιο περιορισμό λόγω κτηρίων κτλ. Οι γεωγραφικές συντεταγμένες που χρησιμοποιούνται στις προσομοιώσεις, έχουν ως μονάδες μέτρησης τα μέτρα. Π.χ. αν ένα αντικείμενο έχει συντεταγμένες (200, 300), τότε συνεπάγεται ότι έχει απόσταση 200 μέτρων από το κάτω αριστερά σημείο του χάρτη και 300 μέτρα πάνω από το τελευταίο σημείο του χάρτη αντίστοιχα. Αντίστοιχα και οι μονάδες της ταχύτητας που χρησιμοποιήθηκε για τα αντικείμενα, είναι το μέτρο ανά δευτερόλεπτο, διατηρώντας την ίδια φιλοσοφία.

Επιπρόσθετα, στην αρχή κάθε προσομοίωσης ορίζεται η θέση εκκίνησης κάθε κινητού τηλεφώνου και το «παράθυρο» της οριζόντιας και κάθετης κίνησής τους (**minX**, **maxX**, **minY**, **maxY**). Έτσι, με βάση τη γωνία κίνησης που δίνει ο χρήστης σαν είσοδο, το κάθε

κινητό τηλέφωνο διαγράφει τη δική του ξεχωριστή πορεία μέσα στο τετράγωνο που σχηματίζεται από τα παρακάτω σημεία, όπως παρουσιάζεται και στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 8. Σχήμα κίνησης κάθε κινητού τηλεφώνου

Είναι προφανές ότι το σημείο εκκίνησης του κινητού τηλεφώνου θα πρέπει να βρίσκεται μέσα στο παραπάνω παραλληλόγραμμο. Σε κάθε προσομοίωση έχουν απεικονιστεί οι μετρήσεις που προέκυψαν σε κάθε δευτερόλεπτο με αρκετή λεπτομέρεια ώστε να μη χαθεί οποιαδήποτε χρήσιμη πληροφορία.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο μιας προσομοίωσης από το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε (omnetpp).



Εικόνα 8. Στιγμιότυπο προσομοίωσης από το εργαλείο omnetpp

Δεν κρίθηκε σκόπιμο να εισαχθούν επιπλέον στιγμιότυπα, καθώς δε χρίζουν ανάλυση οι εικόνες όσο τα εξαγόμενα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτές. Έτσι, η χρήση επιπλέον τέτοιων εικόνων κρίθηκε ότι θα αποτελούσαν πλεονασμό και θα ήταν περισσότερο κουραστικές για τον αναγνώστη.

4.3.1 Περιγραφή 1^{ης} προσομοίωσης

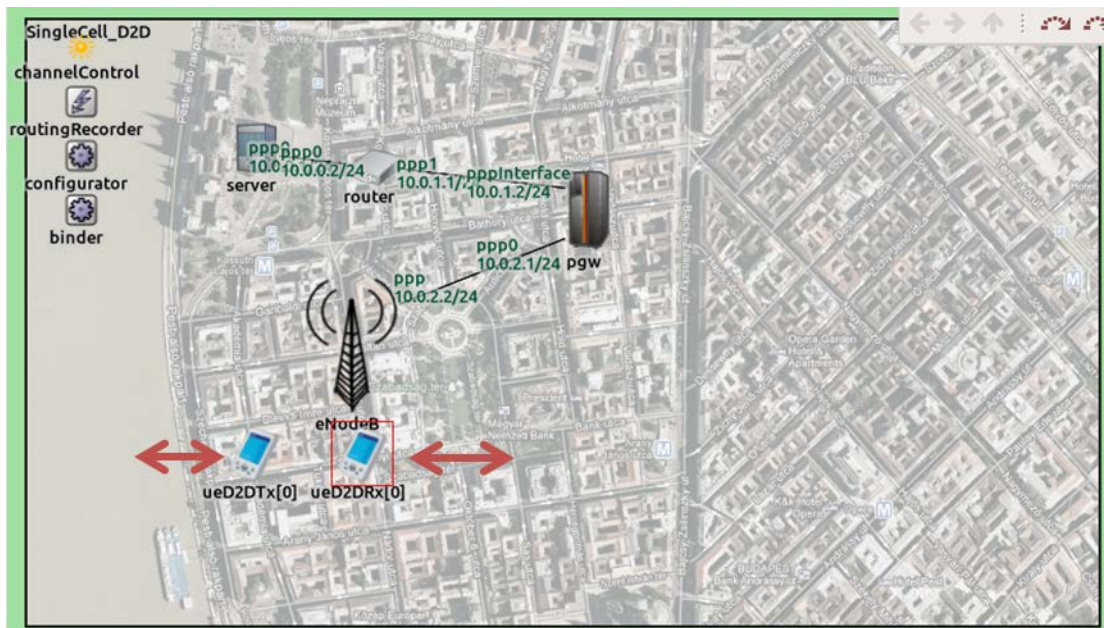
Στο πρώτο πείραμα που διεξήχθη, ο χρόνος προσομοίωσης ήταν 18 δευτερόλεπτα. Το πείραμα διεξήχθη 1 φορά. Η γεωγραφική θέση του eNodeB ήταν το σημείο (300, 300) και η ταχύτητα των κινητών τηλεφώνων ήταν 10 μέτρα/δευτερόλεπτο, δηλαδή 36 χιλιόμετρα/ώρα. Στην προσομοίωση αυτή, το σημείο εκκίνησης του κινητού 1 ήταν το σημείο (290, 400), και του κινητού 2 το σημείο (310, 400). Φαίνεται δηλαδή πολύ εύκολα ότι η απόσταση μεταξύ τους ήταν 20 μέτρα. Τα ακραία σημεία κίνησης του κινητού 1 είναι τα εξής:

- minX: 200
- maxX: 290
- minY: 400
- maxY: 400
- Γωνία κίνησης: 180 μοίρες

Αντίστοιχα, τα ακραία σημεία κίνησης του κινητού 2 είναι τα εξής:

- minX: 310
- maxX: 400
- minY: 400
- maxY: 400
- Γωνία κίνησης 0 μοίρες

Ενδεικτικά, η κίνηση είναι η εξής:



Εικόνα 9. Ενδεικτική κίνηση των κινητών σταθμών στο χώρο της 1^{ης} προσομοίωσης

Είναι ευδιάκριτο από τις παραπάνω παραμέτρους ότι τα δύο κινητά τηλέφωνα κινούνται μόνο κατά μήκος του οριζόντιου άξονα, αφενός γιατί το $\text{minY} = \text{maxY} = 400$ και αφετέρου γιατί η γωνία κίνησης είναι μόνο στον οριζόντιο άξονα.

Στον ακόλουθο πίνακα φαίνονται οι συντεταγμένες κάθε κινητού τηλεφώνου (U1 και U2) σε κάθε βήμα της προσομοίωσης.

Πίνακας 1: Πίνακας κίνησης κινητών τηλεφώνων στην 1η προσομοίωση

t [sec]	U1_x	U1_y	U2_x	U2_y
0	290	400	310	400
1	280	400	320	400
2	270	400	330	400
3	260	400	340	400
4	250	400	350	400
5	240	400	360	400
6	230	400	370	400
7	220	400	380	400
8	210	400	390	400
9	200	400	400	400
10	210	400	390	400
11	220	400	380	400
12	230	400	370	400
13	240	400	360	400
14	250	400	350	400
15	260	400	340	400
16	270	400	330	400
17	280	400	320	400
18	290	400	310	400

Για κάθε ένα από τα παραπάνω βήματα, ο προσομοιωτής αποθηκεύει τα CQI του D2D και του Cellular καναλιού. Ο αλγόριθμος που έχει αναλυθεί στην προηγούμενη ενότητα, επιλέγει αυτόματα ποια από τις δύο μεθόδους θα χρησιμοποιηθεί, ανάλογα με τα κριτήρια που έχει στον κώδικά του. Η στήλη CQI_Best του Πίνακα 2 απεικονίζει τη μεγαλύτερη τιμή των δύο μεγεθών CQI και είναι αυτή που χρησιμοποιείται πρακτικά από το εκάστοτε κινητό τηλέφωνο. Επειδή η τιμή του CQI είναι ίδια στο κινητό 1 και στο κινητό 2, δεν κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστούν και οι δύο τιμές, αλλά μόνο του πρώτου κινητού τηλεφώνου.

Επιπλέον, στο paper που χρησιμοποιήθηκε σαν βιβλιογραφία, υπάρχουν οι τιμές του CQI σε σχέση με την απόσταση. Έτσι, κρίθηκε σκόπιμο να υπολογιστούν οι ακόλουθες αποστάσεις για κάθε βήμα της προσομοίωσης:

- Distance U1U2: Είναι η απόσταση των δύο κινητών τηλεφώνων
- Distance U1 BTS: Είναι η απόσταση του 1^{ου} κινητού τηλεφώνου από το eNodeB

- Distance U2 BTS: Είναι η απόσταση του 2^{ου} κινητού τηλεφώνου από το eNodeB

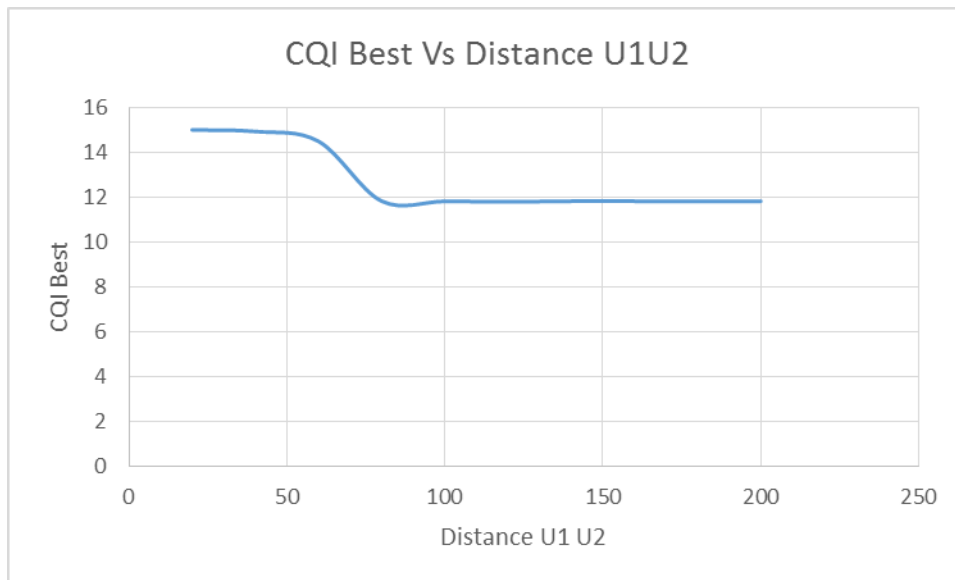
Οι παραπάνω αποστάσεις υπολογίστηκαν με τον τύπο της Ευκλείδειας απόστασης, που ορίζεται ως εξής:

$$Distance = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

Πίνακας 2: Πίνακας των CQI και των αποστάσεων για την 1η προσομοίωση

t [sec]	CQI_D2D	CQI_Cell	CQI_Best	Distance U1U2	Distance U1_BTS	Distance U2_BTS
0	15.00	0	15.00	20	100.50	100.50
1	15.00	0	15.00	40	101.98	101.98
2	15.00	0	15.00	60	104.40	104.40
3	10.00	0	10.00	80	107.70	107.70
4	10.28	0	10.28	100	111.80	111.80
5	10.59	0	10.59	120	116.62	116.62
6	10.89	0	10.89	140	122.07	122.07
7	11.19	0	11.19	160	128.06	128.06
8	11.49	0	11.49	180	134.54	134.54
9	11.82	0	11.82	200	141.42	141.42
10	12.12	0	12.12	180	134.54	134.54
11	12.45	0	12.45	160	128.06	128.06
12	12.75	0	12.75	140	122.07	122.07
13	13.00	0	13.00	120	116.62	116.62
14	13.35	0	13.35	100	111.80	111.80
15	13.65	0	13.65	80	107.70	107.70
16	13.98	0	13.98	60	104.40	104.40
17	14.86	0	14.86	40	101.98	101.98
18	15.00	0	15.00	20	100.50	100.50

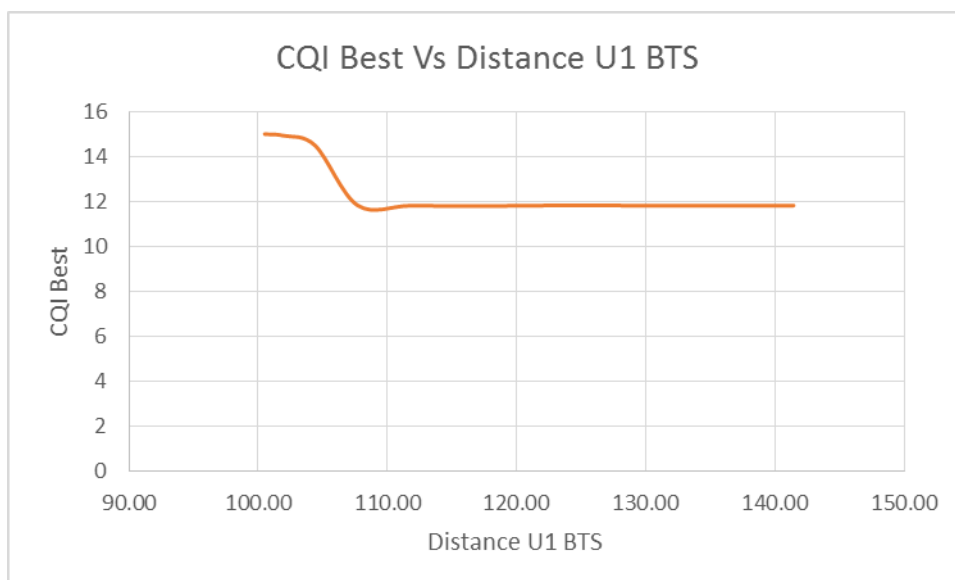
Από τον παραπάνω πίνακα, μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η γραφική παράσταση του CQI_Best ως προς την απόσταση των κινητών τηλεφώνων.



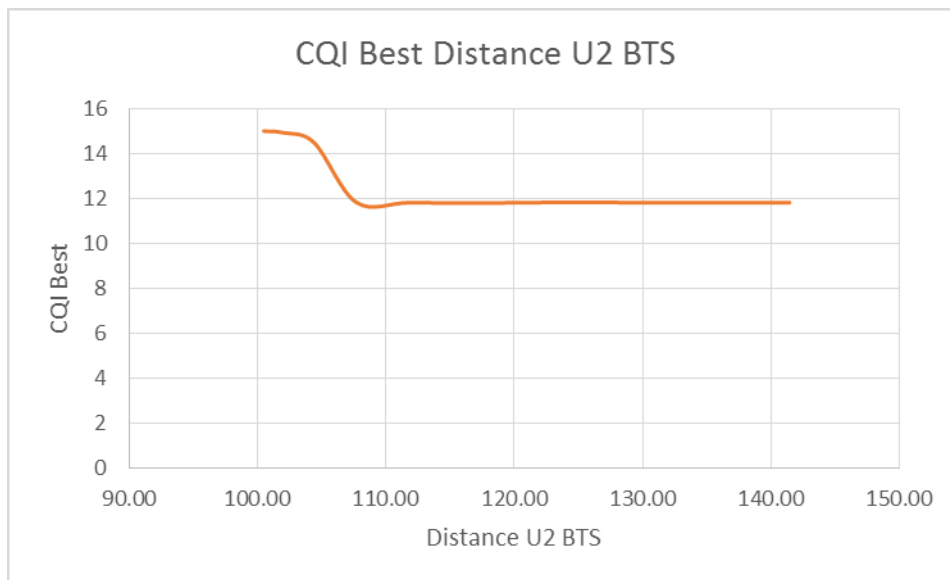
Εικόνα 10. Παράσταση μεταξύ CQI Best και απόστασης κινητών τηλεφώνων της 1^{ης} προσομοίωσης

Από την παράσταση αυτή, φαίνεται ότι όσο αυξάνεται η απόσταση των κινητών τηλεφώνων, τόσο μειώνεται και η τιμή του CQI. Παρόλα αυτά, είναι φανερό ότι η τιμή του CQI δεν πέφτει σημαντικά, ώστε να χρειαστεί να εισέλθει το κινητό σε λειτουργία Cellular και η λειτουργία D2D διατηρείται.

Στις ακόλουθες γραφικές παραστάσεις, απεικονίζεται αντίστοιχα η τιμή του CQI Best σε συνάρτηση με την απόσταση του 1^{ου}/2^{ου} κινητού από το eNodeB. Η κίνηση των κινητών τηλεφώνων είναι «συμμετρική», οπότε οι δύο γραφικές παραστάσεις ταυτίζονται.



Εικόνα 11. Παράσταση μεταξύ CQI Best και απόστασης του 1^{ου} κινητού τηλεφώνου και του eNodeB από την 1^η προσομοίωση



Εικόνα 12. Παράσταση μεταξύ CQI Best και απόστασης του 2^{ου} κινητού τηλεφώνου και του eNodeB από τη 1^η προσομοίωση

Με βάση και τις 2 προηγούμενες γραφικές παραστάσεις είναι εμφανές ότι η απόσταση των κινητών τηλεφώνων (μεταξύ τους) δεν ξεπερνάει τα 200 μέτρα, ενώ αντίστοιχα η απόσταση κάθε κινητού τηλεφώνου από το eNodeB δεν ξεπερνάει τα 142 μέτρα. Σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, η τιμή του CQI παραμένει μεγαλύτερη του 12, ενώ η λειτουργία γίνεται μόνο σε D2D.

4.3.2 Περιγραφή 2^{ης} προσομοίωσης

Στη δεύτερη προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε, το ένα κινητό εκτελεί κατακόρυφη κίνηση, αλλάζοντας το μοτίβο της κίνησης των κινητών τηλεφώνων, αλλά διατηρώντας τα παράλληλα σε παρόμοιες αποστάσεις (τόσο μεταξύ τους όσο και σε σχέση με το eNodeB). Η γεωγραφική θέση του eNodeB ήταν το σημείο (300, 300) και η ταχύτητα των κινητών τηλεφώνων ήταν 10 μέτρα/δευτερόλεπτο. Στην προσομοίωση αυτή, το σημείο εκκίνησης του κινητού 1 ήταν το σημείο (290, 400), και του κινητού 2 το σημείο (310, 400). Τα ακραία σημεία κίνησης του κινητού 1 είναι τα εξής:

- minX: 200
- maxX: 290
- minY: 350
- maxY: 400
- Γωνία κίνησης: 0 μοίρες

Αντίστοιχα, τα ακραία σημεία κίνησης του κινητού 2 είναι τα εξής:

- minX: 310
- maxX: 400
- minY: 350
- maxY: 400
- Γωνία κίνησης 270 μοίρες

Ενδεικτικά, η κίνηση των κινητών σε αυτό το σενάριο είναι η εξής:



Εικόνα 13. Ενδεικτική κίνηση κινητών στη 2^η προσομοίωση

Με βάση τις ρυθμίσεις αυτές, η κίνηση που διαγράφουν τα κινητά τηλέφωνα είναι η εξής:

Πίνακας 3. Πίνακας κίνησης κινητών τηλεφώνων στην 2^η προσομοίωση

t [sec]	U1_x	U1_y	U2_x	U2_y
0	290	400	310	400
1	280	400	310	390
2	270	400	310	380
3	260	400	310	370
4	250	400	310	360
5	240	400	310	350
6	230	400	310	360
7	220	400	310	370
8	210	400	310	380
9	200	400	310	390
10	210	400	310	400
11	220	400	310	390
12	230	400	310	380
13	240	400	310	370
14	250	400	310	360
15	260	400	310	350

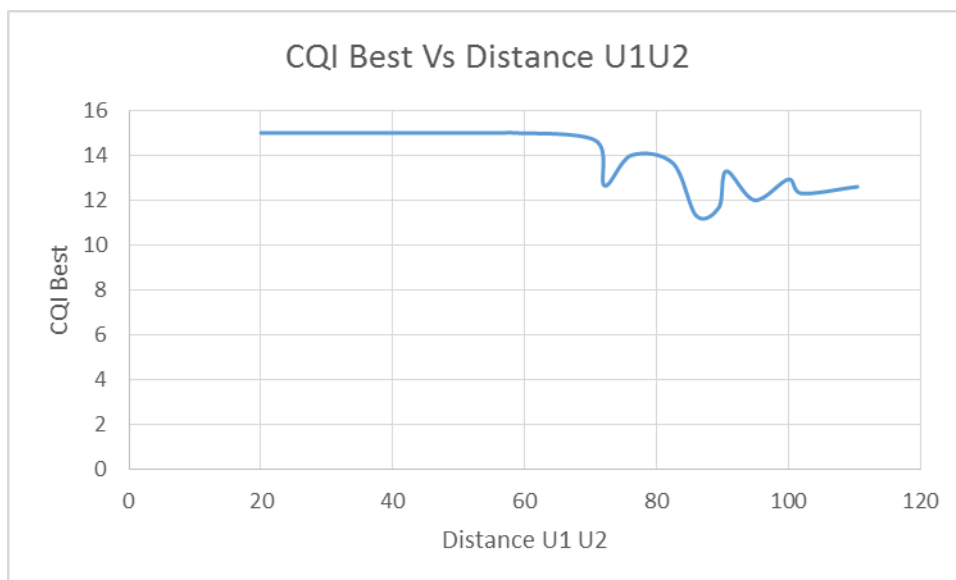
16	270	400	310	360
17	280	400	310	370
18	290	400	310	380

Οι αντίστοιχες τιμές των αποστάσεων και των τιμών του CQI παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

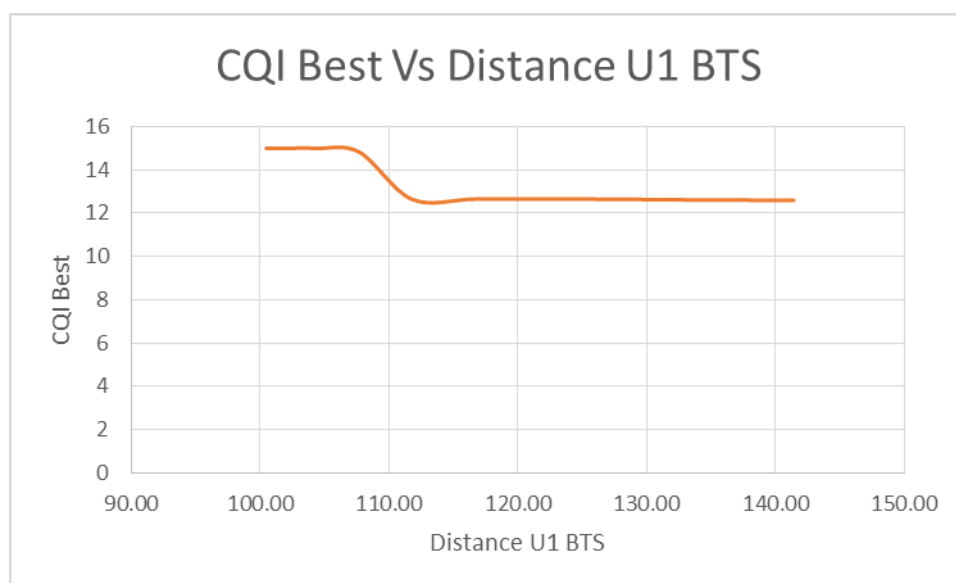
Πίνακας 4. Πίνακας των CQI και των αποστάσεων για την 2^η προσομοίωση

t [sec]	CQI_D2D	CQI_Cell	CQI_Best	Distance U1U2	Distance U1_BTS	Distance U2_BTS
0	15.00	0	15.00	20.00	100.50	100.50
1	15.00	0	15.00	31.62	101.98	90.55
2	15.00	0	15.00	44.72	104.40	80.62
3	15.00	0	15.00	58.31	107.70	70.71
4	11.00	0	11.00	72.11	111.80	60.83
5	11.30	0	11.30	86.02	116.62	50.99
6	11.67	0	11.67	89.44	122.07	60.83
7	12.00	0	12.00	94.87	128.06	70.71
8	12.30	0	12.30	101.98	134.54	80.62
9	12.60	0	12.60	110.45	141.42	90.55
10	12.93	0	12.93	100.00	134.54	100.50
11	13.29	0	13.29	90.55	128.06	90.55
12	13.65	0	13.65	82.46	122.07	80.62
13	14.00	0	14.00	76.16	116.62	70.71
14	14.29	0	14.29	72.11	111.80	60.83
15	14.66	0	14.66	70.71	107.70	50.99
16	15.00	0	15.00	56.57	104.40	60.83
17	15.00	0	15.00	42.43	101.98	70.71
18	15.00	0	15.00	28.28	100.50	80.62

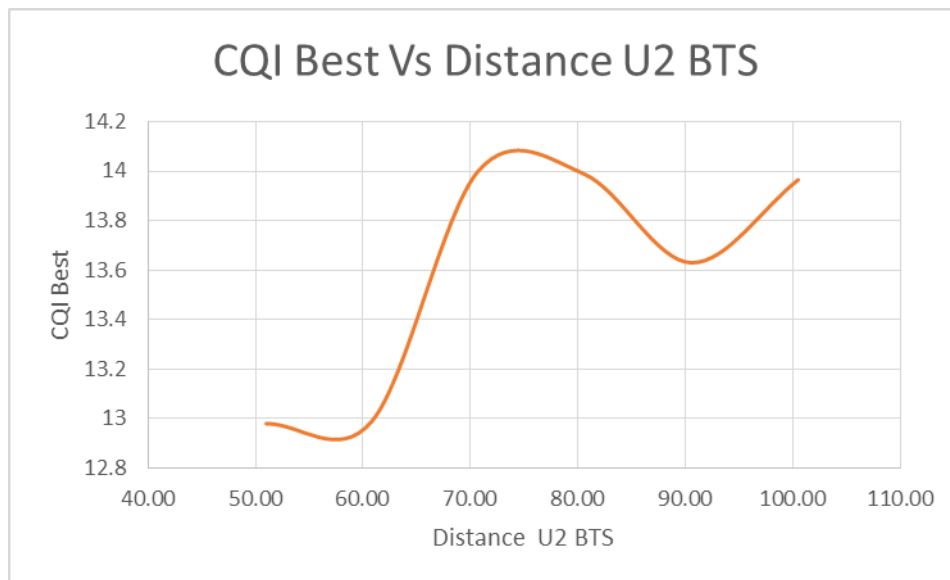
Πρακτικά φαίνεται ότι παρόλο που διαφοροποιήθηκε η κίνηση των κινητών σταθμών, η απόσταση μεταξύ τους δεν ξεπερνάει τα 110 μέτρα, ενώ αντίστοιχα η απόσταση του καθενός από το eNodeB δεν ξεπερνάει τα 142 μέτρα. Αυτό φαίνεται και στις ακόλουθες γραφικές παραστάσεις:



Εικόνα 14. Παράσταση μεταξύ CQI Best και απόστασης κινητών τηλεφώνων της 2^{ης} προσομοίωσης



Εικόνα 15. Παράσταση μεταξύ CQI Best και απόστασης του 1^{ου} κινητού τηλεφώνου και του eNodeB από την 2^η προσομοίωση



Εικόνα 16. Παράσταση μεταξύ CQI Best και απόστασης του 2^{ου} κινητού τηλεφώνου και του eNodeB από την 2^η προσομοίωση

Από τις γραφικές παραστάσεις αλλά και από τα αποτελέσματα του προηγούμενου πίνακα, είναι εμφανές ότι και πάλι τα κινητά τηλέφωνα βρίσκονται μόνο σε λειτουργία D2D, γιατί η απόστασή τους παραμένει κάτω από τα 110 μέτρα.

4.3.3 Περιγραφή 3^{ης} προσομοίωσης

Στην προσομοίωση αυτή, διατηρήθηκαν σταθερά τόσο η θέση του eNodeB όσο και η ταχύτητα των κινητών τηλεφώνων (10 μέτρα / δευτερόλεπτο). Στο σενάριο αυτό, τα κινητά τηλέφωνα έχουν μεγαλύτερο «παραθύρο» κίνησης, ώστε να βγουν και εκτός εμβέλειας του D2D και να επαληθευτεί ότι η μεταγωγή από D2D σε Cellular γίνεται χωρίς να διακοπεί η μετάδοση και ταυτόχρονα χωρίς να υποβιβαστεί η ποιότητα εξυπηρέτησης του καναλιού (το CQI).

Στην προσομοίωση αυτή, τα ακραία σημεία κίνησης του κινητού 1 είναι τα εξής:

- minX: 200
- maxX: 290
- minY: 380
- maxY: 450
- Γωνία κίνησης: 250 μοίρες

Αντίστοιχα, τα ακραία σημεία κίνησης του κινητού 2 είναι τα εξής:

- minX: 310
- maxX: 400
- minY: 380
- maxY: 450
- Γωνία κίνησης 45 μοίρες

Ενδεικτικά, η κίνηση των κινητών στο σενάριο αυτό είναι η εξής:



Εικόνα 17. Ενδεικτική κίνηση κινητών στην 3^η προσομοίωση

Με βάση τις παραπάνω ρυθμίσεις, τα κινητά τηλέφωνα κατέγραψαν την ακόλουθη κίνηση:

Πίνακας 5. Πίνακας κίνησης κινητών τηλεφώνων στην 3^η προσομοίωση

t [sec]	U1_x	U1_y	U2_x	U2_y
0	290.0	400.0	310.0	400.0
1	286.2	389.7	317.8	407.8
2	283.2	381.2	324.1	414.1
3	280.1	387.3	330.5	420.5
4	276.0	398.5	339.0	429.0
5	272.6	407.9	346.1	436.1
6	269.8	415.4	351.7	441.7
7	266.4	424.8	358.8	448.8
8	262.6	435.2	366.6	443.4
9	259.2	444.6	373.6	436.4
10	255.8	446.0	380.7	429.3
11	252.7	437.6	387.1	422.9
12	249.0	427.2	394.9	415.1
13	245.5	417.8	398.1	408.1
14	242.5	409.4	391.7	401.7
15	238.7	399.0	383.9	393.9

16	235.6	390.6	377.6	387.6
17	231.9	380.3	369.8	380.2
18	228.4	389.1	362.7	387.3

Είναι ξεκάθαρο, ότι η κίνηση των κινητών είναι εντελώς «ακαθόριστη», ώστε να προσομοιώνει ένα καθημερινό σενάριο κίνησης συνδρομητών και να ελεγχθεί έτσι η λειτουργία του αλγορίθμου σε πραγματικές συνθήκες.

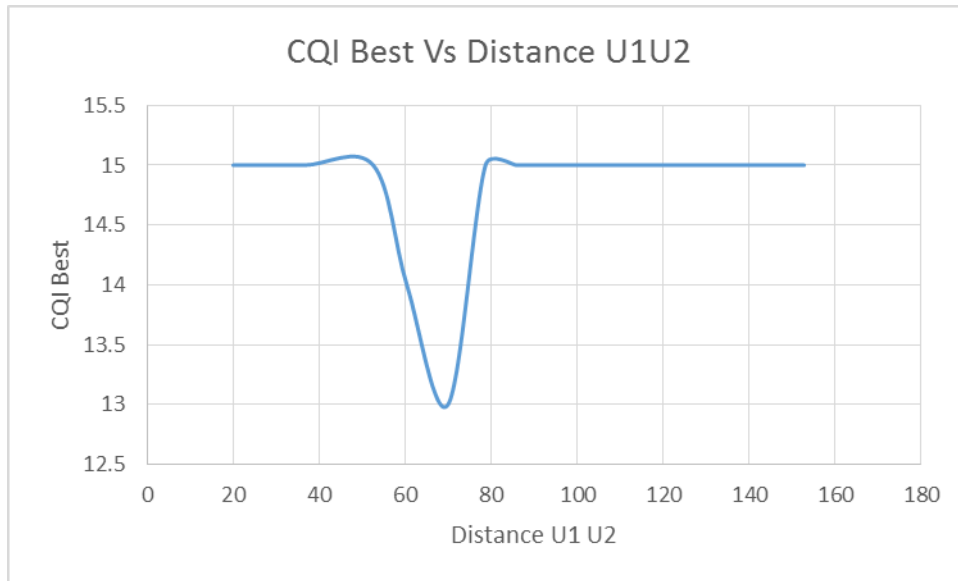
Με βάση τις παραπάνω μετρήσεις, οι τιμές της απόστασης και του CQI είναι οι εξής:

Πίνακας 6. Πίνακας των CQI και των αποστάσεων για την 3^η προσομοίωση

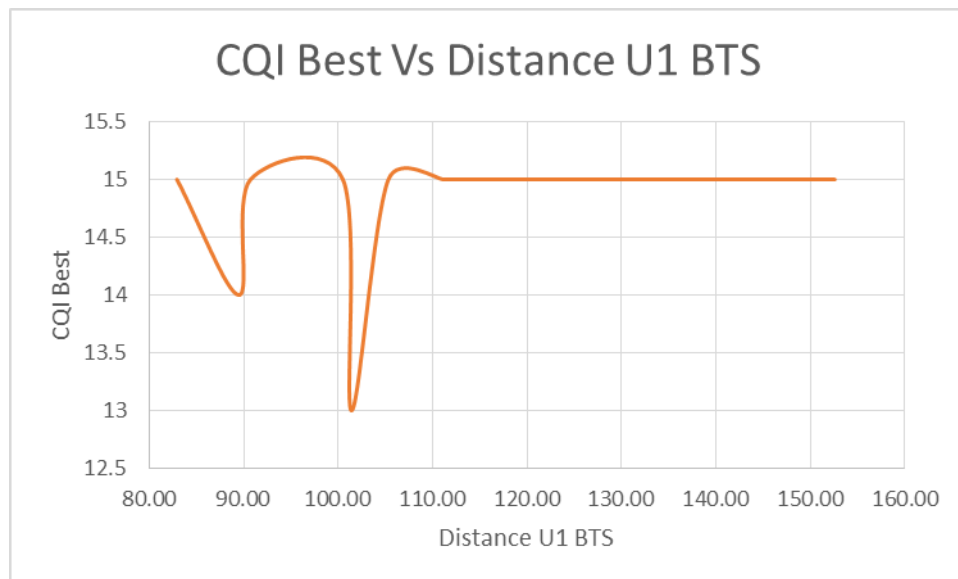
t [sec]	CQI_D2D	CQI_Cell	CQI_Best	Distance U1U2	Distance U1_BTS	Distance U2_BTS
0	15.00	0.00	15.00	20.00	100.50	100.50
1	15.00	0.00	15.00	36.37	90.71	109.24
2	15.00	0.00	15.00	52.58	82.93	116.66
3	14.00	0.00	14.00	60.40	89.50	124.31
4	13.00	0.00	13.00	69.99	101.42	134.75
5	0.00	15.00	15.00	78.70	111.35	143.64
6	0.00	15.00	15.00	86.01	119.32	150.86
7	0.00	15.00	15.00	95.46	129.28	160.00
8	0.00	15.00	15.00	104.26	140.25	158.13
9	0.00	15.00	15.00	114.70	150.22	154.99
10	0.00	15.00	15.00	126.02	152.57	152.41
11	0.00	15.00	15.00	135.20	145.50	150.63
12	0.00	15.00	15.00	146.44	137.06	149.18
13	0.00	15.00	15.00	152.87	129.78	145.98
14	0.00	15.00	15.00	149.44	123.61	136.94
15	0.00	15.00	15.00	145.29	116.44	125.92
16	0.00	15.00	15.00	142.03	111.16	117.03
17	0.00	15.00	15.00	137.94	105.31	106.32
18	0.00	15.00	15.00	134.31	114.30	107.48

Στο παραπάνω σενάριο, τα κινητά τηλέφωνα έχουν απόσταση έως και 153 μέτρα, ενώ η απόστασή τους από το eNodeB φτάνει (στο κινητό 1) τα 153 μέτρα και (στο κινητό 2) τα 160 μέτρα αντίστοιχα. Είναι λοιπόν αναμενόμενο η λειτουργία του D2D να «διακόπτεται» και να μεταβιβάζεται σε Cellular. Ως εκ τούτου, στη χρονική στιγμή 4 είναι

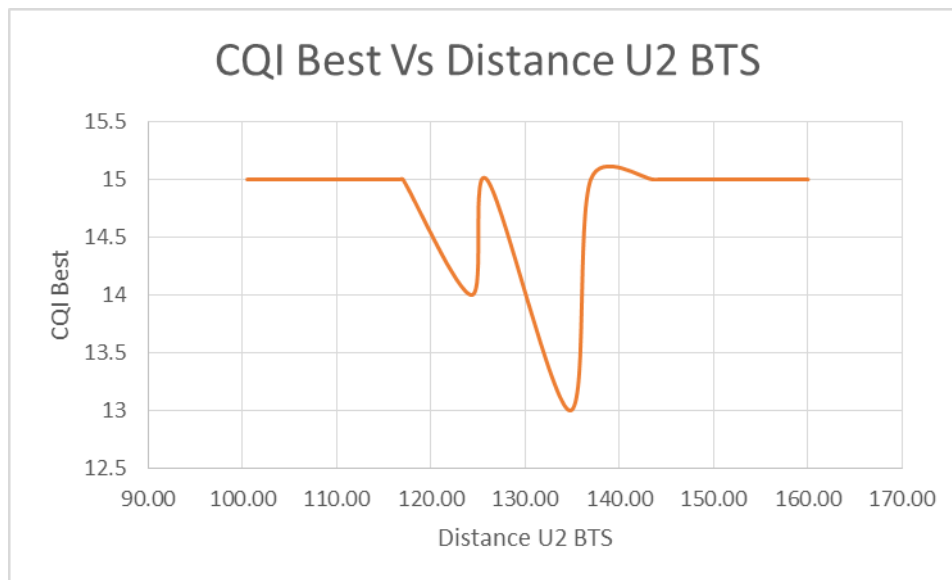
η τελευταία τιμή του CQI_D2D, ενώ στο αμέσως επόμενο βήμα λαμβάνει τιμή το CQI_Cell. Παρόλα αυτά, το CQI Best παραμένει σε πολύ καλά επίπεδα σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.



Εικόνα 18. Παράσταση μεταξύ CQI Best και απόστασης κινητών τηλεφώνων της 3^{ης} προσομοίωσης

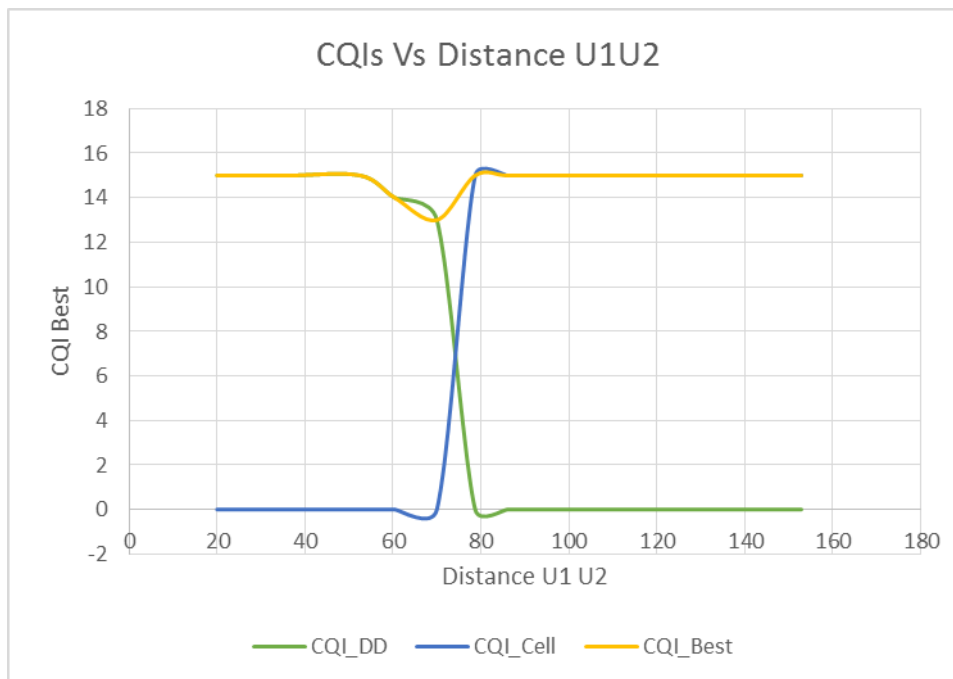


Εικόνα 19. Παράσταση μεταξύ CQI Best και απόστασης του 1^{ου} κινητού τηλεφώνου και του eNodeB από την 3^η προσομοίωση

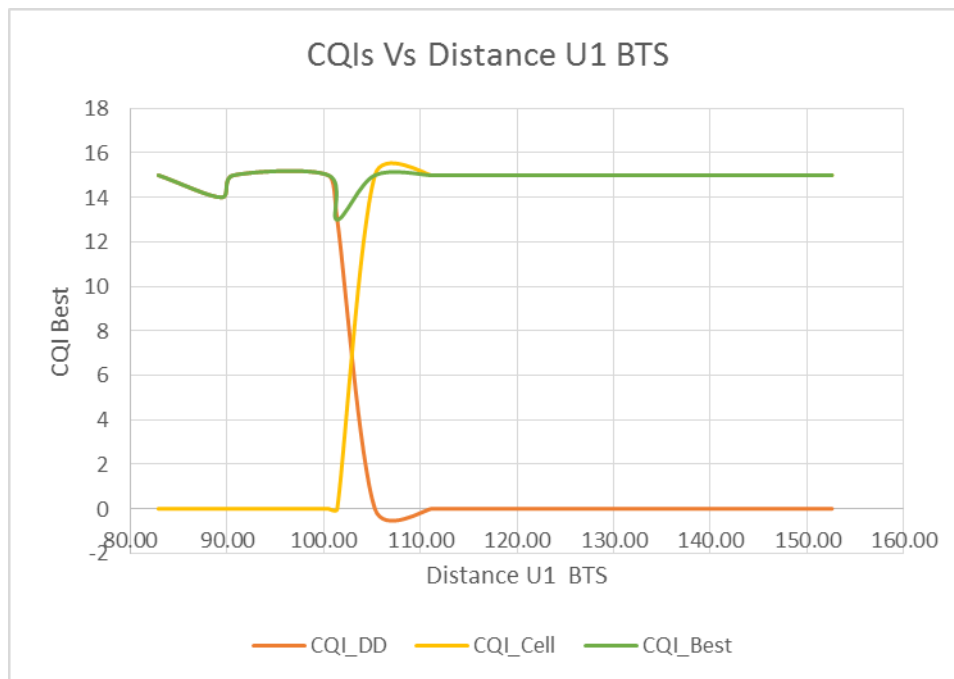


Εικόνα 20. Παράσταση μεταξύ CQI Best και απόστασης του 2^{ου} κινητού τηλεφώνου και του eNodeB από την 3η προσομοίωση

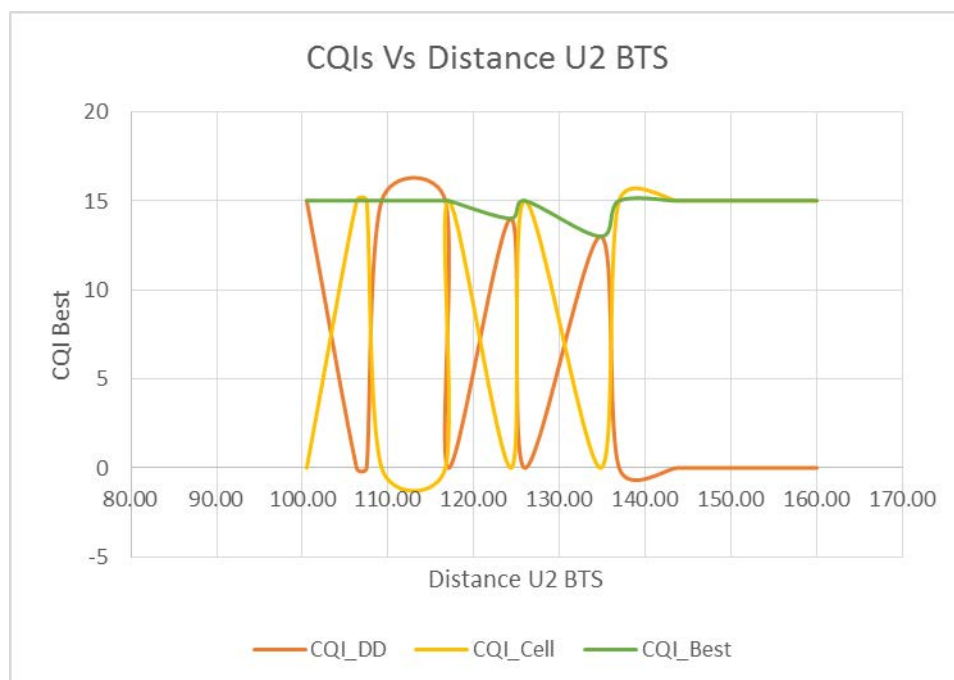
Εφόσον διαπιστώθηκε και επαληθεύτηκε ότι η τιμή του CQI παραμένει σε καλά επίπεδα σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, μπορεί να απεικονιστεί και μια λεπτομερέστερη γραφική παράσταση του CQI, η οποία θα περιέχει το CQI_Best, το CQI_D2D και το CQI_Cell σε συνάρτηση με την απόσταση των κινητών τηλεφώνων. Παρόμοιες αναλυτικές γραφικές παραστάσεις μπορούν να απεικονιστούν και με κριτήριο των παραπάνω CQI σε συνάρτηση με την απόσταση καθενός κινητού τηλεφώνου και του eNodeB.



Εικόνα 21. Αναλυτική παράσταση των CQI και απόστασης κινητών τηλεφώνων της 3^{ης} προσομοίωσης



Εικόνα 22. Αναλυτική παράσταση των CQI και απόστασης του 1^{ου} κινητού τηλεφώνου και του eNodeB από την 3^η προσομοίωση



Εικόνα 23. Αναλυτική παράσταση των CQI και απόστασης του 2^{ου} κινητού τηλεφώνου και του eNodeB από την 3^η προσομοίωση

Στην παραπάνω γραφική παράσταση δεν είναι ευδιάκριτη η μετάβαση από τη λειτουργία D2D σε Cellular, λόγω της αυξημένης εναλλαγής των τιμών του CQI σε κάθε χρονική στιγμή που μελετήθηκε. Είναι όμως ευδιάκριτο ότι το CQI Best είναι σε πολύ καλά επίπεδα (γραμμή με πράσινο χρώμα).

5. Συμπεράσματα

Η επικοινωνία συσκευής προς συσκευή (D2D) θεωρείται μία νέα και πρωτοποριακή τεχνολογία που θα προτυποποιηθεί και θα εφαρμοστεί στις επόμενες γενιές των δικτύων κινητής τηλεφωνίας που παρέχουν υψηλές επιδόσεις στο κυψελοειδές δίκτυο βελτιώνοντας την κάλυψη, παρέχοντας φασματική απόδοση, υψηλές ταχύτητες δεδομένων και προσφέροντας νέες peer-to-peer υπηρεσίες με την εξασφάλιση της ποιότητας υπηρεσιών QoS.

Σε αυτή την εργασία, παρουσιάσαμε μια έρευνα σχετικά με τις αδυναμίες και τα δυνατά σημεία των τεχνικών και των μεθόδων που υπάρχουν ήδη στη βιβλιογραφία και υποστηρίζουν την ενσωμάτωση της επικοινωνίας συσκευής προς συσκευή στο δίκτυο LTE-A. Αυτή η έρευνα έδειξε ότι δεν υπάρχει αρκετή βιβλιογραφία που να εξηγεί τις απαιτούμενες οντότητες και λειτουργίες που πρέπει να προστεθούν στην υπάρχουσα υποδομή LTE-A για την υιοθέτηση της επικοινωνίας D2D, αλλά είναι σε αρκετά θεωρητικό επίπεδο το οποίο επίσης απαιτεί βελτιώσεις προκειμένου να υλοποιηθεί ένα νέο εννιαίο σύστημα που θα ενσωματώνει όλες τις λειτουργίες που απαιτεί η επικοινωνία συσκευής προς συσκευή.

Ακόμη αναδείξαμε ένα πολλά υποσχόμενο ερευνητικό εργαλείο, το OMNET++, στο οποίο ήδη έχει ενσωματωθεί η επικοινωνία συσκευής προς συσκευή μέσω του SimuLTE framework, αλλά είναι σε πολύ αρχικό στάδιο. Η ενσωμάτωση των αλγορίθμων, που αναφέρθηκαν στην παρούσα εργασία, στο SimuLTE framework αποτελεί αντικείμενο για έρευνα προκειμένου να εκτελεστούν προσομοιώσεις και να προκύψουν πολύτιμα συμπεράσματα σχετικά με την αξιολόγηση αλλά και την βελτίωση τους. Αντικείμενο έρευνας αποτελεί και η ενσωμάτωση στο SimuLTE framework νέων ερευνητικών μεθόδων που δεν παρουσιάστηκαν σε αυτήν την εργασία.

Τέλος, πραγματοποιήσαμε προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας το SimuLTE framework και πιο συγκεκριμένα τον αλγόριθμο επιλογής λειτουργίας (mode selection) ο οποίος επιλέγει D2D ή επικοινωνία μέσω του κυψελωτού δικτύου LTE ανάλογα με τον δείκτη ποιότητας καναλιού CQI. Από τις παραπάνω προσομοιώσεις, είναι εμφανές ότι η επαληθεύεται πλήρως η λειτουργία του αλγορίθμου που αναφέρεται στο κεφάλαιο 4.2, αλλά και των ισχυρισμών που έχουν γίνει στην αντίστοιχη βιβλιογραφία. Πράγματι δηλαδή, μέχρι την απόσταση 120 μέτρων η λειτουργία D2D δείχνει να έχει καλύτερη απόδοση ως προς τη λειτουργία Cellular, ενώ πάνω από την απόσταση αυτή το δίκτυο αποφασίζει με βάση τον αλγόριθμο να κάνει μεταγωγή σε Cellular λειτουργία.

Σε όλες τις εκτελέσεις η ποιότητα CQI παρέμεινε σε πολύ καλά επίπεδα, ακόμα και στην περίπτωση που τα κινητά τηλέφωνα πραγματοποιούσαν πιο ακαθόριστες κινήσεις. Σαν μελλοντικά βήματα, θα μπορούσε να γίνει κάποια αντίστοιχη μελέτη με περισσότερους κινητούς σταθμούς στην εμβέλεια του eNodeB ή να γίνει υλοποίηση και χρήση ενός προσαρμοσμένου αλγορίθμου μετάβασης, ώστε η απόφαση μεταγωγής από τη λειτουργία D2D στη λειτουργία Cellular να λαμβάνει υπόψη και άλλα κριτήρια πέρα από το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης που επιτυγχάνει το κινητό τη στιγμή της απόφασης. Οι αλγόριθμοι που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3.3 οι οποίοι αφορούν το LTE είναι μερικές από τις τεχνικές που θα μπορούσαν να υιοθετηθούν σε μελλοντικές υλοποιήσεις.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

Ξενόγλωσσος όρος	Ελληνικός Όρος
Peer to peer network	Δίκτυο ομοτίμων
Spectral Efficiency	Φασματική Απόδοση
Online gaming	Διαδικτυακά παιχνίδια
Video streaming	Βίντεο ζωντανής μετάδοσης μέσω διαδικτύου
Throughput	Διεκπεραιωτική ικανότητα
Project	Ερευνητικό σχέδιο, Μελέτη
Interface	Διεπαφή, Διασύνδεση
Bitrate	Ρυθμός Μετάδοσης Bit

ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

LTE	Long Term Evolution
D2D	Device to Device communications
5G	5 Generation system
ITS	Intelligent Transportation Systems
SAE	Service Evolution Architecture
UE	User Equipment
eNB	Evolved Node B
NGMN	Next Generation Mobile Networks
RAN	Radio Access Network
UTRA	UMTS Terrestrial Radio Access
EUTRA	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
SCFDMA	Single Carrier Orthogonal Frequency Division Multiple Access
EPC	Evolved Packet Core
HSPA	High Speed Packet Access
MME	Mobility Management Entity
PGW	PDN Gateway
SWG	Serving Gateway
UICC	Universal Integrated Circuit Card
USIM	UMTS Subscriber Identity Module
CN	Core Network
NAS	Non Access Stratum
QoS	Quality of Service
PCEF	Policy Control Enforcement Function
PDN	Packet Data Network
ISM	Industrial Scientific and Medical radio bands
ProSe	Proximity-based Services
TSG	Technical Specification Groups
SA	Service and Systems Aspects
WLAN	Wireless Local Area Network
MIMO	Multiple Input and Multiple Output
GTS	GPRS Tunneling Protocol
RRC	Radio Resource Control

RLC	Radio Link Control
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
MAC	Medium Access Control
RRM	Radio Resource Management
PC	Power Control

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] S. Sesia, M. Baker and I. Toufik, *LTE – The UMTS Long Term Evolution : From theory to practice*, 2nd ed. 2013.
- [2] R. Schwarz, "UMTS Long Term Evolution : Technology Introduction", 2012; https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma111/1MA111_4E_LTE_technology_introduction.pdf [Προσπελάστηκε 11/4/17]
- [3] "The LTE Network Architecture, A Comprehensive Tutorial", Alcatel-Lucent, 2009; http://www.cse.unt.edu/~rdantu/FALL_2013_WIRELESS_NETWORKS/LTE_Alcatel_White_Paper.pdf [Προσπελάστηκε 12/4/17]
- [4] "3GPP TR 25.913 v8.0.0, "Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN) (Release 8)", 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network, 2008.
- [5] J. Feng, "Device-to-Device Communications in LTE-Advanced Network", doctoral dissertation, Dept. Signal et Communications European University of Brittany, 2014.
- [6] "3GPP TR 22.803 v12.2.0, "Technical Specification Group Services and System Aspects; Feasibility study for Proximity Services (ProSe) (Release 12)", 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network, 2013.
- [7] J. Kim, D. Kimb and S. Choia, "3GPP SA2 architecture and functions for 5G mobile communication system", *Volume 3, Issue 1, March 2017, Pages 1–8*, 2017; http://ac.els-cdn.com/S240595951730019X/1-s2.0-S240595951730019X-main.pdf?_tid=04226f08-43cc-11e7-a6a3-0000aacb362&acdnat=1495993098_adf78873311527300a1988caf3193e9b. [Προσπελάστηκε 14/4/17]
- [8] M. Zulhasnine, Ch. Huang and A. Srinivasan, "Efficient Resource Allocation for Device-to-Device Communication Underlying LTE Network", *Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), 2010 IEEE 6th International Conference on*, 2010; <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5645039/?reload=true>. [Προσπελάστηκε 14/4/17]
- [9] M. Hicham, N. Abghour and M. Ouzzif, "DEVICE-TO-DEVICE (D2D) COMMUNICATION UNDER LTE-ADVANCED NETWORKS", *International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN) Vol. 8, No. 1, February 2016*, 2016; <http://airconline.com/ijwmn/V8N1/8116ijwmn02.pdf>. [Προσπελάστηκε 30/5/17]
- [10] D. Tsolkas, N. Passas and L. Merakos, "Device discovery in LTE networks: A radio access perspective", *Computer Networks Vol. 106*, pp. 245-259, 2016. http://ac.els-cdn.com/S1389128616302262/1-s2.0-S1389128616302262-main.pdf?_tid=7c1ef12c-5cb6-11e7-a75a-0000aacb360&acdnat=1498732629_88e5d4be8f7ee446dd5c5a303a3c3e9b [Προσπελάστηκε 29/6/17]
- [11] P. Phunchongharn, E. Hossain and D. Kim, "Resource allocation for device-to-device communications underlying LTE-advanced networks", *IEEE Wireless Communications*, vol. 20, no. 4, pp. 91-100, 2013. <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6590055/>. [Προσπελάστηκε 15/4/17]
- [12] K. Won Choi and Z. Han, " Device-to-Device Discovery for Proximity-Based Service in LTE-Advanced System", *IEEE Wireless Communications*, vol. 33, no. 1, pp. 55-66, 2015. <http://ieeexplore.ieee.org/document/6953027/>[Προσπελάστηκε 29/6/17]
- [13] J. Lianghai, A. Klein, N. Kuruvatti and Hans D. Schotten, " System capacity optimization algorithm for D2D underlay operation", *IEEE International Conference on Communications Workshops*, 2014. <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6881177/>. [Προσπελάστηκε 30/6/17]
- [14] M. Belleschi, G. Fodor, M. Johansson, D. D. Demia, A. Pradimi and A. Abrardo, " Benchmarking Practical RRM Algorithms for D2D Communications in LTE Advanced", 2013. <https://arxiv.org/abs/1306.5305>. [Προσπελάστηκε 30/6/17]
- [15] X. Li, W. Zhang, H. Zhang and W. Li, "A combining call admission control and power control scheme for D2D communications underlying cellular networks", *China Communications*, vol. 13, no. 10 , pp. 137-145, 2016.
- [16] Y. Xu, R. Yin, T. Han and G. Yu, "Dynamic resource allocation for Device-to-Device communication underlying cellular networks", *International Journal of Communication Systems*, vol. 27, no. 10, pp. 2408-2425, 2012. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/dac.2485/full> [Προσπελάστηκε 29/6/17]
- [17] H. Tang, Z. Ding and C. Zhu, "Cooperative MIMO precoding for D2D underlay in cellular networks", 2013.
- [18] A. Orsino, M. Gapeyenko, L. Militano, D. Moltchanov, S. Andreev, Y. Koucheryavy and G. Araniti, "Assisted Handover Based on Device-to-Device Communications in 3GPP LTE Systems", *IEEE*, 2015. <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7414095/>. [Προσπελάστηκε 30/6/17]
- [19] L. Huan Tang, "Device-to-Device Communications in Cellular Networks", 1st ed. 2016.

- [20] L. Song, D. Niyato, Z. Han and E. Hossain, *Wireless Device-to-Device Communications and Networks*, 1st ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.
- [21] O. N. C. Yilmaz, Z. Li, K. Valkealahti, M. A. Uusitalo, M. Moisio, P. Lundén and C. Wijting, " Smart mobility management for D2D communications in 5G networks", *IEEE*, 2014. <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6934889/>. [Προσπελάστηκε 30/6/17]
- [22] "LTE; General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access (3GPP TS 23.401 version 10.5.0 Release 10)", 3GPP, 2011. http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/123400_123499/123401/10.05.00_60/ts_123401v100500p.pdf [Προσπελάστηκε 11/4/17].
- [23] G. Nardini, A. Virdis and G. Stea, "Simulating device-to-device communications in OMNeT++ with SimuLTE: scenarios and configurations", 2016. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1609/1609.05173.pdf>. [Προσπελάστηκε 5/7/17]
- [24] "Device to Device Communication in LTE", Rohde & Schwarz ,2015. https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma264/1MA264_0e_D2DComm.pdf. [Προσπελάστηκε 5/7/17]
- [25] K. Doppler, M. Rinne, C. Wijting, C. B. Ribeiro and K. Hug, " Device-to-Device Communication as an Underlay to LTE-Advanced Networks", *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, 2009. <http://ieeexplore.ieee.org/document/5350367/>[Προσπελάστηκε 8/7/17]
- [26] J. Hong, S. Park, H. Kim, S. Choi and K. Bok Lee, " Analysis of Device-to-Device Discovery and Link Setup in LTE Networks", *IEEE 24th International Symposium*, 2013. <http://ieeexplore.ieee.org/document/6666634/> [Προσπελάστηκε 9/7/17]
- [27] A. Virdis, G. Nardini and G. Stea, "Modeling unicast device-to-device communications with SimuLTE", 2016. http://www.iet.unipi.it/a.virdis/publications/D2D_modeling-openAccess.pdf. [Προσπελάστηκε 10/7/17]
- [28] K. Doppler, Chia-Hao Yu, C. B. Ribeiro and P. Janis, "Mode selection for Device-to-Device Communication underlaying an LTE-Advanced Network", *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2010. <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5506248/>. [Προσπελάστηκε 11/7/17]
- [29] J C. Gao, X. Sheng, J. Tang, W. Zhang, S. Zou and M. Guizani, " Joint Mode Selection, Channel Allocation and Power Assignment for Green Device-to-Device Communications", *IEEE International Conference*, 2014. <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6883315/> [Προσπελάστηκε 13/7/17]
- [30] M. Zulhasnine, C. Huang and A. Srinivasan, " Efficient Resource Allocation for Device-to-Device Communication Underlaying LTE Network", *IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing*, 2010. <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5645039/>. [Προσπελάστηκε 13/7/17]
- [31] A. Pradini, "Power Control and Resource Allocation for Device-to-Device Communications in Cellular Networks", master's thesis, KTH, School of Information and Communication Technology (ICT), Stockholm, 2013.
- [32] A. Ghosh, R. Ratasuk, B. Mondal, N. Mangalvedhe and T. Thomas, "LTE-advanced: next-generation wireless broadband technology", *IEEE Wireless Communications*, vol. 17, issue 3, 2010. <http://ieeexplore.ieee.org/document/5490974/>. [Προσπελάστηκε 18/7/17]