



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΑ- ΤΜΗΜΑ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΜΣ ΨΗΦΙΑΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ D2D/V2V

ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ LTE ProSe

“Study of D2D/V2V Communications using the LTE ProSe Standard”

Α.ΓΕΩΡΓΑΚΑΚΗΣ

Α.Μ. ΜΕ 14036

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: κ. Α. ΚΑΝΑΤΑΣ

ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της απευθείας επικοινωνίας δύο κινητών συσκευών που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους, μέσω του προτύπου LTE ProSe (3GPP Rel.12). Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική περιγραφή του LTE δίνοντας περισσότερη έμφαση στο φυσικό στρώμα (Physical Layer). Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται η Device to Device (D2D) επικοινωνία μέσω του LTE ProSe και περιγράφεται το physical layer για το sidelink communication. Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στην επέκταση του LTE ProSe για την απευθείας επικοινωνία μεταξύ τερματικών που βρίσκονται σε οχήματα (V2V). Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται η προσομοίωση sidelink επικοινωνίας (D2D και V2V), σε διάφορα περιβάλλοντα αστικής πυκνότητας και ταχυτήτων χρήστη, προκειμένου να μελετηθούν τα βασικά χαρακτηριστικά της επικοινωνίας σε διαφορετικές συνθήκες.

Περιεχόμενα

ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	- 2 -
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	- 6 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	- 7 -
ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΟΥ LTE	- 7 -
1.1.1 Αρχιτεκτονική EPS	- 8 -
1.1.2 Evolved Packet Node (EPC)	- 8 -
1.1.3 Δίκτυο πρόσβασης -Access Network (E-UTRAN)	- 10 -
1.1.4 LTE Protocol Layers	- 11 -
1.2 Γενική περιγραφή του Physical Layer	- 14 -
1.2.1 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM).....	- 14 -
1.2.2 Single Carrier-Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA)	- 16 -
1.2.3 LTE radio frames	- 18 -
1.3 Τύποι καναλιών LTE	- 22 -
1.3.1 Φυσικά κανάλια LTE	- 22 -
1.3.2 Κανάλια μεταφοράς LTE	- 25 -
1.3.3 Λογικά κανάλια LTE	- 26 -
1.4 LTE MIMO.....	- 27 -
1.4.1 LTE MIMO λειτουργίες.....	- 29 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	- 31 -
ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ DEVICE TO DEVICE (D2D).....	- 31 -
2.1 Αρχιτεκτονική συστήματος επικοινωνιών D2D	- 32 -
2.2 Σχεδιαστική δομή του D2D ProSe	- 36 -
2.2.1 ProSe management.....	- 36 -
2.2.2 Συγχρονισμός-SYNCHRONIZATION	- 37 -
2.2.3 Ανίχνευση συσκευών-DEVICE DISCOVERY	- 38 -
2.2.4 Απευθείας επικοινωνία-DIRECT COMMUNICATION	- 39 -
2.3 D2D Physical Layer	- 41 -
2.4 Resource Pools	- 44 -
2.4.1 Ανάθεση των Resource Pools	- 45 -
2.4.2 Υποπλαίσια (Subframes) σε ένα Resource Block.....	- 46 -
2.5 Μετάδοση δεδομένων.....	- 47 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	- 50 -

Connected Vehicles.....	- 50 -
3.1 Είδη εφαρμογών	- 51 -
3.2. Διαθέσιμες τεχνολογίες.....	- 52 -
3.3 LTE BASED-V2X.....	- 54 -
3.3.1 Γενική περιγραφή	- 54 -
3.3.2 Διαφοροποιήσεις σε σχέση με το D2D sidelink.....	- 57 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	- 60 -
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ D2D/V2V SIDELINK COMMUNICATION ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ	- 60 -
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	- 80 -
Βιβλιογραφία-Αναφορές	- 81 -

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ θερμά τον Καθηγητή του Πανεπιστημίου Πειραιά και επιβλέποντά μου κ. Αθανάσιο Κανάτα, όπως επίσης και τον κ. Κωνσταντίνο Μαλιάτσο , για την αμεριστη υποστήριξή τους στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα κυψελωτά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας έχουν αναπτυχθεί ευρέως τις τελευταίες δεκαετίες με σκοπό την απρόσκοπτη και πανταχού παροχή ασύρματων και κινητών τηλεπικοινωνιών. Οι συσκευές κινητής τηλεφωνίας έγιναν ιδιαίτερα δημοφιλείς κατά τα τελευταία χρόνια καταγράφοντας κατακόρυφη αύξηση χρηστών σε παγκόσμια κλίμακα. Τα δίκτυα λοιπόν που αναπτύχθηκαν για να μπορούν να εξυπηρετούν ταυτόχρονα εκατομμύρια χρήστες, στηρίχθηκαν στην «κυψελωτή δομή» όπου κάθε κινητό τηλέφωνο (τερματικό ή UE) συνδέεται σε ένα σταθμό βάσης (Base Station-BS) που δημιουργεί γύρω του μια περιοχή κάλυψης.

Η ιδέα της κυψελωτής δομής αποτέλεσε ορόσημο στην εξέλιξη των κινητών τηλεπικοινωνιών, αφού παρέχει ισχυρή διαχείριση της κινητικότητας όπως και τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης των φασματικών πόρων κάνοντας έτσι δυνατή την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών χρηστών. Παρόλα αυτά όμως, παρουσιάζει κάποιες αδυναμίες στη διαχείριση του φάσματος, την ενεργειακή απόδοση και στο latency στην αναμετάδοση. Αυτή η αναποτελεσματικότητα γίνεται ιδιαίτερα σοβαρή κατά την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ δύο κινητών συσκευών που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση.

Σε πρόσφατες μελέτες, έχει δειχθεί ότι η άμεση ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των δύο κοντινών κινητών συσκευών (χωρίς την παρέμβαση σταθμού βάσης BS) μπορεί να προσφέρει καλύτερη απόδοση από την άποψη του φάσματος, της ενέργειας, και του latency. Κατά συνέπεια, αυτά τα τεχνικά πλεονεκτήματα έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη της λεγόμενης device to device (D2D) επικοινωνίας.

Με τον όρο D2D λοιπόν, αναφερόμαστε στο είδος τηλεπικοινωνιών, όπου δύο ή και περισσότερες κινητές συσκευές (UE) που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση μπορούν να επικοινωνήσουν κατευθείαν μεταξύ τους χωρίς την παρέμβαση σταθμού βάσης. Οι ανάγκες που θα μπορούσε να καλύψει μια τέτοια μορφή τηλεπικοινωνιών ποικίλουν και περιλαμβάνουν από την επέκταση των social networking applications μέχρι την υλοποίηση νέων δικτύων δημόσιας ασφαλείας που θα μπορούν να λειτουργούν όταν τα κεντρικά δίκτυα έχουν καταρρεύσει.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΟΥ LTE

Το LTE είναι ένα τηλεπικοινωνιακό πρότυπο το οποίο αναπτύχθηκε από τη 3GPP με στόχο να αποτελέσει την επόμενη γενιά στις κινητές τηλεπικοινωνίες. Σε αντίθεση με το GSM που χρησιμοποιεί σαν τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης το TDMA (Πολλαπλή Πρόσβαση χρόνου) και το FDMA (Πολλαπλή Πρόσβαση Συχνότητας), και το UMTS που χρησιμοποιεί Πολλαπλή Πρόσβαση Κώδικα (CDMA-Code Division Multiple Access) , το LTE χρησιμοποιεί OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing Access). Ένα άλλο χαρακτηριστικό στοιχείο, είναι η τεχνική χρήσης πολλαπλών κεραιών. Το LTE, είναι το πρώτο παγκοσμίως διαδεδομένο τηλεπικοινωνιακό πρότυπο που χρησιμοποιεί την τεχνολογία MIMO (Multiple-Input Multiple-Output). Η χρήση πολλαπλών κεραιών μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την επίδοση και την ποιότητα της επικοινωνίας λόγω της μεγαλύτερης χωρητικότητας καναλιού.

Στον παρακάτω πίνακα συγκρίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά δύο εκδόσεων του LTE. Το LTE-Advanced είναι αυτό που πληροί τα κριτήρια της 4^{ης} γενιάς δικτύων κινητών τηλεπικοινωνιών, το 4G.

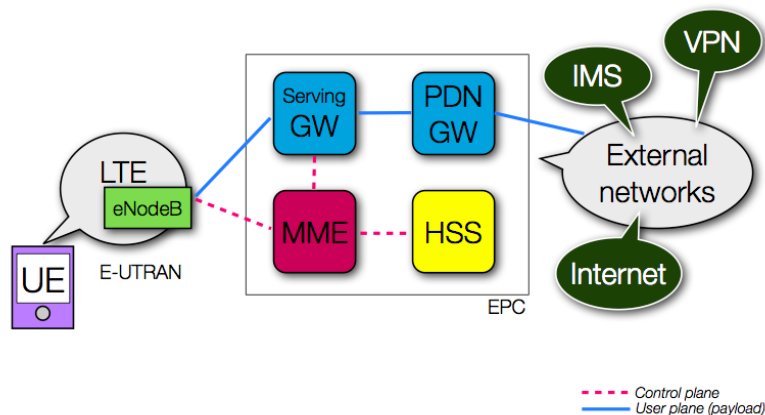
System Performance		LTE-Advanced	LTE
Peak rate	Uplink	100Mbps@100MHz	100Mbps@20MHz
	Downlink	500Mbps@100MHz	50Mbps@20MHz
Control-plane delay	Idle to connected	<50ms	<100ms
	Dormant to active	<10ms	<50ms
User-plane delay (without load)		Lower than that of LTE	<5ms
Spectral efficiency	Peak	Downlink: 30 bps/Hz @ ≤ 8×8, Uplink: 15bps/Hz @ ≤ 4×4	Downlink: 5bps/Hz @ 2×2, Uplink: 2.5bps/Hz @ 1×2
	Average	Downlink: 3.7bps/Hz/cell @ 4×4, Uplink: 2.0 bps/Hz/cell @ 2×4	Downlink: 3 to 4 times of R6 HSPA @ 2×2, Uplink: 2 to 3 times of R6 HSPA @ 1×2
	Cell edge	Downlink: 0.12bps/Hz/cell/user @ 4×4 Uplink: 0.07 bps/Hz/cell/user @ 2×4	N/A
Mobility		≤350km/h, ≤500km/h@freq band	≤350km/h
Flexible bandwidth deployment		Continuous spectrum @>20MHz, Spectral convergence	1.4, 3, 5, 10, 15, 20MHz Support paired spectrum and unpaired spectrum

Πίνακας 1. Βασικά χαρακτηριστικά LTE, LTE-A

Στη συνέχεια, γίνεται μια αναλυτικότερη περιγραφή της αρχιτεκτονικής δομής και του φυσικού επιπέδου (physical layer) του LTE.

1.1.1 Αρχιτεκτονική EPS

Η αρχιτεκτονική του LTE περιλαμβάνει δύο βασικά στοιχεία, το EUTRAN (EUTRA Node) που αποτελεί το ασύρματο δίκτυο πρόσβασης, και το EPC (Evolved Packet Core) που συνιστά αντίστοιχα το δίκτυο κορμού. Αυτοί οι δύο κόμβοι μαζί συνιστούν το Evolved Packet System (EPS). Το EPS δρομολογεί τα πακέτα IP με ένα συγκεκριμένο Quality of Service (QoS), που ονομάζεται φορέας EPS, μέσω του Packet Data Network Gateway (P-GW) στο τερματικό χρήστη (User Equipment -UE).



Σχήμα 1.1 Θεμελιώδης δομή του EPC με πρόσβαση στο E-UTRAN^[22]

1.1.2 Evolved Packet Node (EPC)

Το EPC εισήχθη για πρώτη φορά από τη 3GPP στην 8η έκδοση του προτύπου. Αποφασίστηκε να έχει μια «επίπεδη αρχιτεκτονική». Η ιδέα είναι να χειριστεί το φορτίο (ή την κίνηση δεδομένων) αποτελεσματικά από άποψη επιδόσεων και κόστους. Έτσι, στη διαχείριση της κυκλοφορίας εμπλέκονται λίγοι κόμβοι ενώ αποφεύγεται και η μετατροπή πρωτόκολλου.

Επίσης, αποφασίστηκε να διαχωριστούν τα δεδομένα του χρήστη (user plane) και η σηματοδότηση (control plane) έτσι ώστε η κλιμάκωση (scaling) να είναι ανεξάρτητη. Χάρη σε αυτό το λειτουργικό διαχωρισμό, οι πάροχοι μπορούν να διαστασιοποιήσουν και να προσαρμόσουν το δίκτυο τους ευκολότερα^[27].

Το EPC περιλαμβάνει τα: Packet Data Network Gateway (P-GW), Serving Gateway (S-GW), Mobility Management Entity (MME) και Home Subscriber Service (HSS). Συνδέεται με τα εξωτερικά δίκτυα, όπως το IP Multimedia Δίκτυο Κορμού Subsystem (IMS).

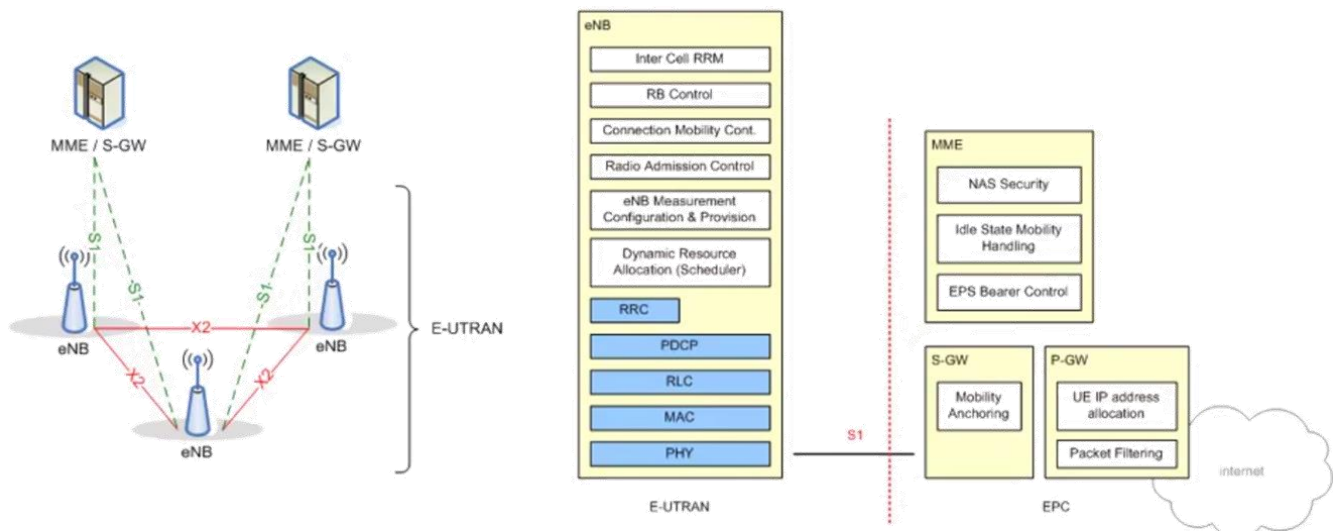
Αναλυτικότερα, ο ρόλος του κάθε στοιχείου του EPC, είναι:

- **P-GW:** διασυνδέει το UE με το εξωτερικό packet data δίκτυο. Επίσης φιλτράρει τα IP πακέτα που χρησιμοποιεί ο χρήστης στο downlink ενώ επιπρόσθετα μπορεί να λειτουργήσει ως σύνδεσμος μεταξύ 3GPP και μη 3GPP τεχνολογιών όπως το WiMAX η το CDMA2000.
- **S-GW:** Τα IP πακέτα χρήστη μεταφέρονται μέσω του S-GW, που αποτελεί ταυτόχρονα και «άγκυρα κινητικότητας» (mobility anchor) όταν το UE μετακινείται μεταξύ διαφορετικών eNodeBs. Ακόμα, διατηρεί πληροφορίες φορέων όταν το UE βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής ενώ χρησιμοποιείται και ως μέσο διασύνδεσης του LTE με άλλα πρότυπα της 3GPP όπως το UMTS και το GPRS.
- **MME:** πραγματοποιεί την ταυτοποίηση του χρήστη αλληλοεπιδρώντας με το HSS, χειρίζεται τη διαχείριση φορέων ενώ, επιλέγει SGW όταν απαιτείται επαναπροσδιορισμός Core Network (CN). Αυτές οι λειτουργίες πραγματοποιούνται από πρωτόκολλα NAS που τρέχουν μεταξύ core network και χρήστη.
- **HSS:** περιέχει πληροφορίες των Packet Data Networks (PDNs) στα οποία ένα UE μπορεί να συνδεθεί, όπως το όνομα του σημείου πρόσβασης (Access Point Name-APN) ή μια διεύθυνση PDN address. Ακόμα, περιλαμβάνει τα στοιχεία συνδρομής του χρήστη όπως επίσης και πληροφορίες για το MME με το οποίο αλληλοεπιδρά το UE.
- **PCRF:** πραγματοποιεί ελέγχους πολιτικής ενώ διαχειρίζεται λειτουργίες χρέωσης

1.1.3 Δίκτυο πρόσβασης -Access Network (E-UTRAN)

Το E-UTRAN στην ουσία περιλαμβάνει έναν και μόνο κόμβο, τον evolved Node B (eNodeB). Ο eNodeB είναι ουσιαστικά ο σταθμός βάσης στον οποίο συνδέεται το UE, στο οποίο προσφέρει το απαιτούμενο network air interface.

Στις αρμοδιότητες του eNodeB περιλαμβάνεται η διαχείριση πόρων που σχετίζονται με το ραδιοδίκτυο πρόσβασης, ο έλεγχος της κινητικότητας, και η ανάθεση πόρων στα UEs. Η ασφάλεια και η κωδικοποίηση της πληροφορίας που μεταδίδεται διαμέσου της ραδιοεπαφής, είναι ακόμα μια διαδικασία που εκτελείται από το eNodeB.



SAE = System Architecture Evolution
eNB = evolved Node B
MME = Mobility Management Entity
E-UTRAN = Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
S-GW = Serving Gateway

EPS = Evolved Packet System
EPC = Evolved Packet Core
P-GW = Packet Data Network Gateway
NAS = Non Access Stratum
RB = Radio Bearer

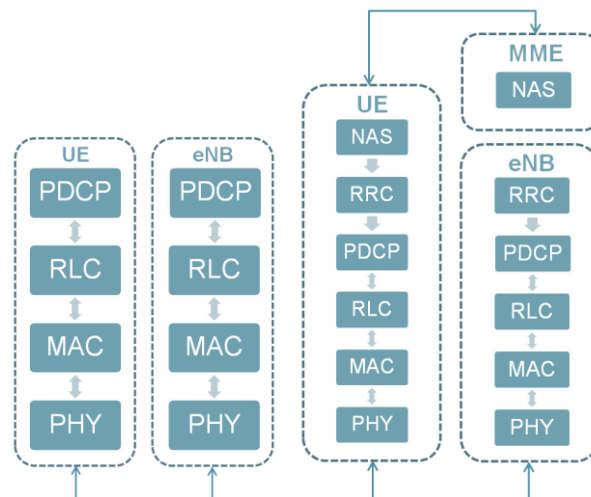
Σχήμα 1.2. Λειτουργικός διαχωρισμός E-UTRAN-EPC^[20]

Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει κάποιος κεντρικός controller στο E-UTRAN. Τα διάφορα στοιχεία του EPS και E-UTRAN δικτύου, διασυνδέονται μεταξύ τους μέσω standard Interfaces. Πιο συγκεκριμένα, η διεπαφή μεταξύ EPC και του eNodeB είναι ένα S1 interface. Το πρωτόκολλο S1 αποτελείται από 5 επίπεδα τα οποία περιλαμβάνουν: physical layer, data link

layer, SCTP, και application layer. Αντίστοιχα, τα πέντε επίπεδα για το πρωτόκολλο χρήστη S1-U (user plane protocol- S1-U) είναι physical layer, data link layer, IPv6/IPv4, UDP και GTP-U. Η διεπαφή αυτή στηρίζεται στο SCTP/IP (stream control transmission protocol/IP) το οποίο είναι αξιόπιστο για τη μεταφορά μηνυμάτων. Η διασύνδεση μεταξύ των eNodeBs πραγματοποιείται μέσω μιας διεπαφής X2 η οποία έχει τα ίδια επίπεδα με την S1, τόσο στο user όσο και στο control plane.

1.1.4 LTE Protocol Layers

Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, η στοίβα πρωτοκόλλων στο επίπεδο χρήστη (user plane) περιλαμβάνει τα: PDCP (Packet Data Coverage Protocol), RLC (Radio Link Control), και MAC (Medium Access Control) υποεπίπεδα, τα οποία καταλήγουν στον eNodeB. Το control plane είναι παρόμοιο με το user plane, εκτός από τη λειτουργία «συμπίεσης κεφαλίδας» (compression header) που δεν περιλαμβάνεται στο τελευταίο. Το επίπεδο ελέγχου περιλαμβάνει επιπλέον το Radio Resource Control layer (RRC), το οποίο είναι υπεύθυνο για τη διαμόρφωση των χαμηλότερων στρωμάτων



Σχήμα 1.3 Στοίβες πρωτοκόλλων user και control plane

Αναλυτικότερα, τα χαρακτηριστικά των επιμέρους στρωμάτων είναι:

- **Radio Resource Control (RRC)**

Το RRC υπάρχει μόνο στο control plane και ο ρόλος του είναι να μεταφέρει ειδικές ή γενικές πληροφορίες NAS (που απευθύνονται δηλαδή μόνο σε ένα UE ή σε όλους τους χρήστες αντίστοιχα). Ακόμα προσφέρει υπηρεσίες όπως είναι η δημιουργία paging, η παροχή φορέων ράδιο-σηματοδοσίας (Signaling Radio Bearers -SRB), όπως και η μεταπομπή (handover). Εκτός από τη δημιουργία της σύνδεσης RRC, αυτό το protocol layer μπορεί να εκτελέσει και την τροποποίηση ή τη διακοπή της. Ακόμα μπορεί να διαχειριστεί την πληροφορία όταν το UE είναι σε κατάσταση RRC-IDLE, όπως η ειδοποίηση εισερχομένων κλήσεων, όπως επίσης και για την κατάσταση RRC-CONNECTED, που μπορεί να περιλαμβάνει πληροφορία για τη διαχείριση καναλιών ή των handover.

- **Packet Data Coverage Protocol (PDCP)**

Αυτό το επίπεδο σχετίζεται τόσο με το control plane όσο και με το user plane. Στο control plane, τα μηνύματα RRC επεξεργάζονται από το PDCP. Στο user plane, το PDCP χειρίζεται IP μηνύματα. Επίσης, αυτό το στρώμα παρέχει διαδικασίες αναμετάδοσης και αναδιάταξης για τη μεταπομπή.

- **Radio Link Control (RLC)**

Η βασική λειτουργία αυτού του επιπέδου είναι η οργάνωση των πακέτων που προέρχονται από τα ανώτερα στρώματα, σε ένα μέγεθος κατάλληλο για τη μετάδοση μέσω του radio interface. Παράλληλα το RLC ανακτά απώλειες πακέτων αναμεταδίδοντας radio bearers για να αποφευχθούν λάθη κατά τη μετάδοση. Ακόμα, αυτό το πρωτόκολλο μπορεί να πραγματοποιήσει αναδιάταξη πακέτων που παρελήφθησαν σε λανθασμένη σειρά.

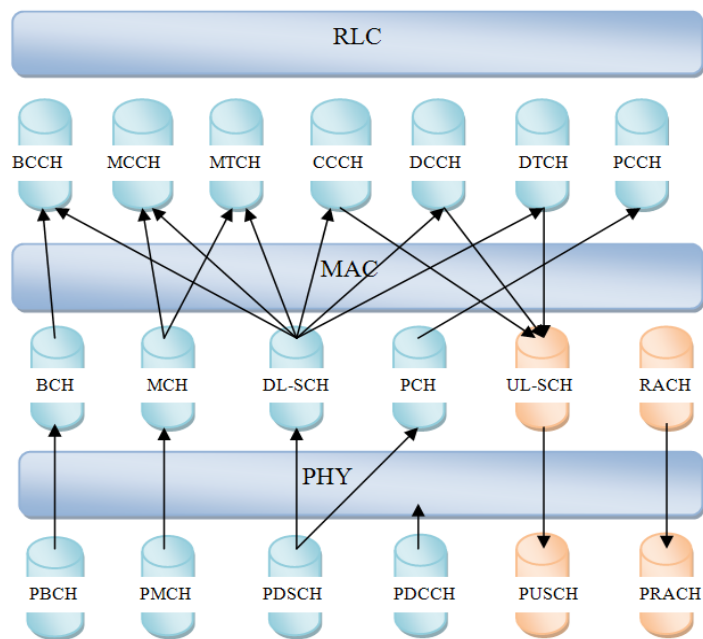
- **Medium Access Control (MAC Layer)**

Το Medium Access Control (MAC) layer είναι υπεύθυνο για την πολυπλεξία και την αποπολυπλεξία δεδομένων μεταξύ του physical layer και του RLC. Αυτό το επίπεδο αποτελείται

από λογικά κανάλια τα οποία συνδέονται με τα φυσικά κανάλια για τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ του physical και του Mac layer.

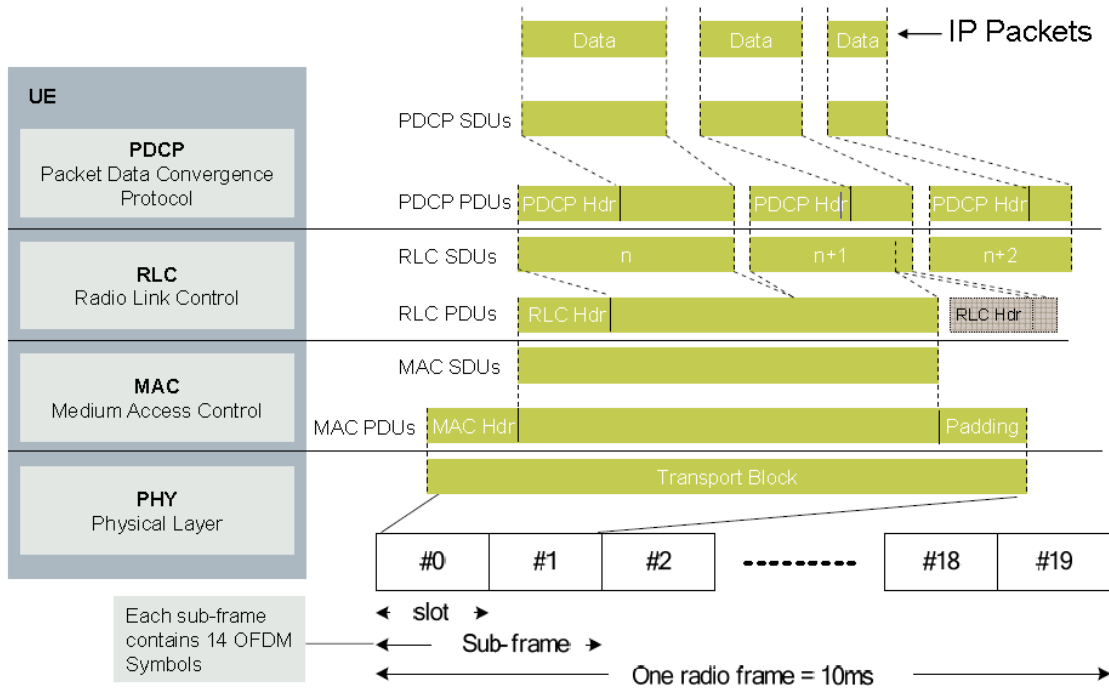
- **Physical Layer**

Στο φυσικό επίπεδο μεταφέρονται όλες οι πληροφορίες από τα κανάλια μεταφοράς MAC μέσω του ραδιοδικτύου (Air interface). Φροντίζει για την προσαρμογή ζεύξης (AMC), τον έλεγχο της ισχύος ,και την αναζήτηση κυψελών (cell) , τόσο για το αρχικό συγχρονισμό όσο και για διαδικασίες μεταπομπής. Η σύνδεση του MAC Layer με το Physical Layer φαίνεται στο σχήμα. Φυσικά κανάλια ανατίθενται σε κανάλια μεταφοράς προκειμένου να μεταφέρουν δεδομένα αλλά και πληροφορίες ελέγχου μεταξύ των στρωμάτων.



Σχήμα 1.4. Διασύνδεση μεταξύ LTE Layers ^[19]

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το λογικό διάγραμμα της ροής δεδομένων μέσα από τα διάφορα στρώματα πρωτοκόλλων του E-UTRAN.



Σχήμα 1.5. Διάγραμμα ροής δεδομένων μέσα από τα protocol layers του E-UTRAN^[17]

Κάθε στρώμα λαμβάνει από το αμέσως ανώτερό του πακέτα που ονομάζονται Service Data Units (SDUs) στέλνει προς το αμέσως κατώτερό του Protocol Data Units (PDUs).

1.2 Γενική περιγραφή του Physical Layer

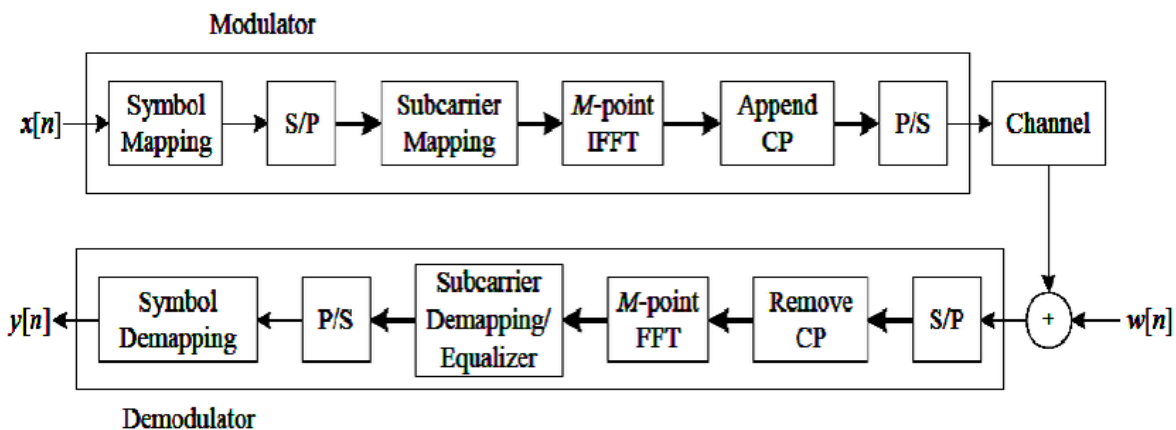
1.2.1 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

Το LTE χρησιμοποιεί το OFDM στο Downlink λόγω της απλότητας της υλοποίησης στο δέκτη αλλά και των υψηλών επιδόσεων. Στο OFDM, ένα συχνο-επιλεκτικό κανάλι ευρείας ζώνης διαιρείται σε δευτερεύοντα, μη συχνο-επιλεκτικά κανάλια (subcarriers) στενής ζώνης που είναι ορθογώνια μεταξύ τους. Κάθε subcarrier διαμορφώνεται μεμονωμένα, βάσει συμβατικών μορφών διαμόρφωσης όπως είναι το QPSK ή το 16-QAM.

Η μετάδοση δεδομένων σε υψηλούς ρυθμούς, όπως και η συχνοεπιλεκτική συμπεριφορά του διαύλου (frequency selective fading) λόγω της πολυδιαδρομικής διάδοσης

(multipath propagation), έχει ως συνέπεια την εμφάνιση του προβλήματος της δια-συμβολικής παρεμβολής (Inter Symbol Interference -ISI). Ως δια συμβολική παρεμβολή, ορίζεται η λήψη στο δέκτη πολλών και ετεροχρονισμένων «αντιγράφων» του αρχικού εκπεμπόμενου σήματος, λόγω ανακλάσεων σε διάφορα αντικείμενα που συναντά κατά τη διάδοσή του. Έτσι το πρόβλημα εμφανίζεται όταν η μέγιστη χρονική διαφορά στην καθυστέρηση μεταξύ των συνιστωσών που οφείλονται σε διαφορετικές διαδρομές, είναι μεγαλύτερη από το ήμισυ, συνήθως, της περιόδου ενός συμβόλου, με αποτέλεσμα το ένα σύμβολο να παρεμβάλλει στο άλλο.

Για να αποφευχθεί η ISI στο OFDM, η σειριακή ροή μετάδοσης δεδομένων διαιρείται σε M παράλληλα subcarriers. Η μετατροπή αυτή εξασφαλίζει ότι η διάρκεια του συμβόλου είναι M φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη διάρκεια για μετάδοση single carrier.



Σχήμα 1.6.block διάγραμμα OFDM πομπού και δέκτη

Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται το block διάγραμμα για έναν πομπό και ένα δέκτη OFDM.Στον πομπό, η σειριακή πληροφορία μετατρέπεται αρχικά σε M παράλληλους subcarrier. Στη συνέχεια κάθε subcarrier διαμορφώνεται ξεχωριστά. Οι διάφοροι subcarrier μπορεί να φέρουν διαφορετικούς ρυθμούς μετάδοσης πληροφορίας από τη στιγμή που η απολαβή του καναλιού επηρεάζεται από τη συχνοεπιλεκτική συμπεριφορά του. Μέσω του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier (IFFT), M σύμβολα πληροφορίας στο πεδίο της συχνότητας μετατρέπονται σε N σύνθετα δείγματα στο πεδίο του χρόνου, όπου $N \geq M$.

Ένα κομβικό σημείο στην παραγωγή του σήματος OFDM, είναι η εισαγωγή του κυκλικού προθέματος (Cyclic Prefix-CP) για την αποφυγή της δια συμβολικής παρεμβολής. Το κυκλικό

πρόθεμα δημιουργείται αντιγράφοντας τα τελευταία K δείγματα του κατά IFFT μετατραπέντος συμβόλου και προσθέτοντάς τα στην αρχή του συμβόλου αυτού. Το μήκος του K πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το maximum excess delay.

Τέλος, τα σύμβολα που προκύπτουν από τον IFFT μετατρέπονται σε μια σειριακή ροή πληροφορίας που μεταφέρεται μέσω του συχνοεπιλεκτικού καναλιού. Στο δέκτη, πραγματοποιείται η αντίστροφη διαδικασία ώστε να ανακτηθούν σύμβολα απαλλαγμένα από τη δια συμβολική παρεμβολή.

Ένα από τα σημαντικά μειονεκτήματα του OFDM είναι υψηλό Peak-to-Average Power Ratio (PAPR). Τα σύμβολα OFDM παρουσιάζουν μια έντονη απόκλιση πλάτους λόγω του ότι τα σύμβολά στο πεδίο του χρόνου μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ακολουθούν την κανονική κατανομή (Gaussian waveform). Έτσι, το σήμα OFDM παραμορφώνεται από μη γραμμικούς ενισχυτές. Για να μειωθεί η παραμόρφωση αυτή, οι ενισχυτές πρέπει να λειτουργούν σε υψηλότερα σημεία λειτουργίας, γεγονός που αυξάνει το κόστος των πομπών.

Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα του OFDM, είναι ότι είναι ευαίσθητο σε μετατόπιση συχνότητας φορέα (carrier frequency Offset) και χρονικά μεταβαλλόμενα κανάλια. Οι διαφορετικές συχνότητες αναφοράς που χρησιμοποιούνται στον πομπό και τον δέκτη, προκαλούν παρεμβολή μεταξύ φορέων (ICI), που συμβάλλει στην απώλεια της ορθογωνιότητας. Τα ηλεκτρονικά στοιχεία (hardware) που χρησιμοποιούνται στο τερματικό χρήστη (UE) είναι συνήθως μικρού κόστους με αποτέλεσμα ο δέκτης να εμφανίζει εντονότερα προβλήματα drifting από τον πομπό. Τέλος, ακόμη και στις περιπτώσεις όπου οι συχνότητες πομπού και δέκτη είναι συγχρονισμένες, η επίπτωση του φαινομένου Doppler μπορεί να προκαλέσει σφάλματα συχνότητας.

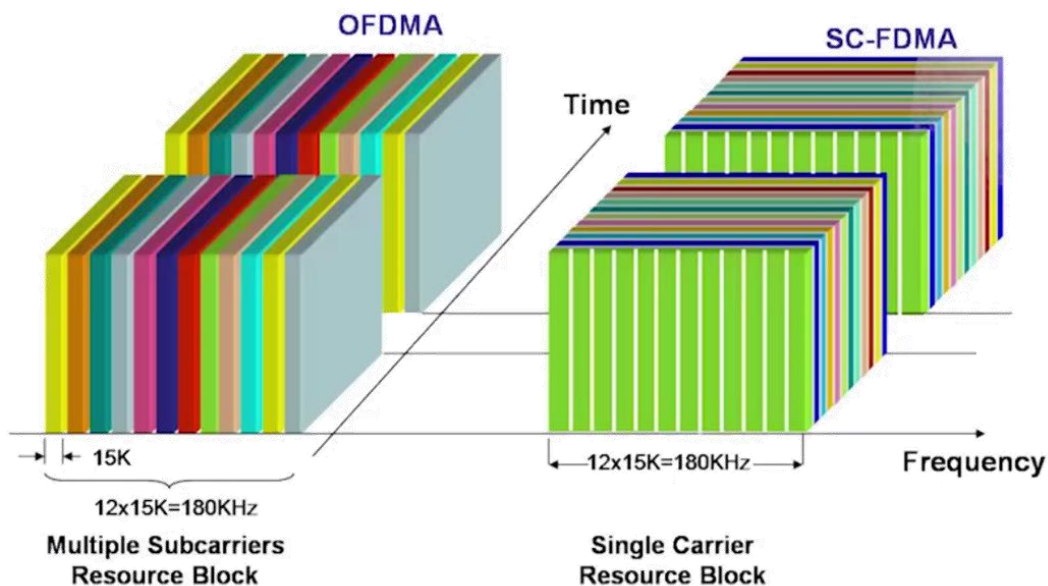
1.2.2 Single Carrier-Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA)

Στο uplink, χρησιμοποιείται το SC-FDMA αντί του OFDMA ή του DS-CDMA (Direct Sequence Code Division Multiple Access). Το DS-CDMA χρησιμοποιείται στο UMTS και ένα από τα μειονεκτήματα του είναι ότι παρουσιάζει δια-κυψελική παρεμβολή, ακόμα και σε συχνοεπιλεκτικά κανάλια, η οποία οδηγεί στη μείωση της χωρητικότητας του καναλιού και στην

αδυναμία χρήσης προσαρμοστικής διαμόρφωσης. Ακόμα ένα πρόβλημα είναι και το σχετικά υψηλό Pick to Average Power Ratio, το οποίο όπως είδαμε εμφανίζεται και στο OFDM.

Το SC-FDMA εμφανίζει όλα τα πλεονεκτήματα του OFDMA έχοντας παράλληλα χαμηλότερο PAPR. Κατ' αντιστοιχία με το OFDM, το bandwidth διαμοιράζεται σε πολλαπλά παράλληλα subcarriers , με ενδιάμεσο κυκλικό πρόθεμα, προκειμένου να εξασφαλισθεί η ορθογωνιότητα και να περιοριστεί η ISI.

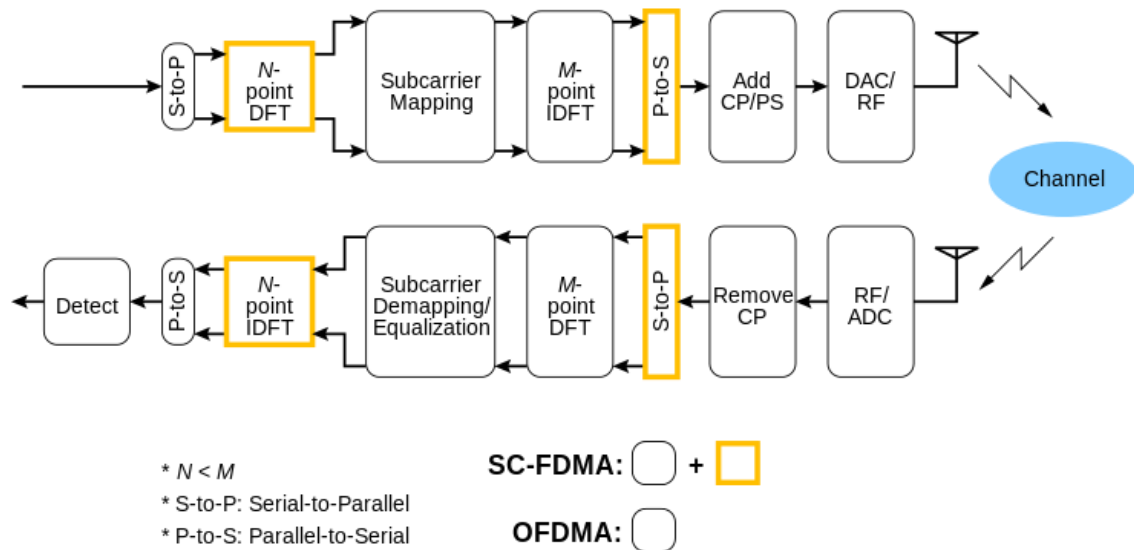
Στο OFDM κάθε subcarrier διαμορφώνεται από σύμβολα πληροφορίας κατά τέτοιο τρόπο, ώστε σε μια δεδομένη στιγμή κάθε σημείο του αστερισμού της ψηφιακής διαμόρφωσης να αναπαριστά το πλάτος κάθε subcarrier. Ωστόσο, στο SC-FDMA, ο γραμμικός συνδυασμός όλων των συμβόλων πληροφορίας που μεταδίδονται την ίδια στιγμή διαμορφώνεται σε ένα δεδομένο. Έτσι σε μία δεδομένη περίοδο συμβόλου, τα μεταδιδόμενα subcarriers του SC-FDMA σήματος, μεταφέρουν ένα μέρος του διαμορφωμένου συμβόλου πληροφορίας .Κατά συνέπεια, η δια συμβολική παρεμβολή θα είναι μειωμένη από τη στιγμή που όλοι οι subcarriers μιας χρονικής περιόδου, αναπαριστούν το ίδιο σύμβολο .Στο παρακάτω σχήμα, μπορούμε να παρατηρήσουμε τις διαφορές μεταξύ του OFDMA και του SC-FDMA.



Σχήμα 1.7. Διαφορές μεταξύ OFDMA και SC-FDMA

Το SC-FDMA μπορεί να υλοποιηθεί τόσο στο πεδίο του χρόνου, όσο και στο πεδίο της συχνότητας. Όμως, στο LTE προτιμάται η υλοποίηση στο πεδίο της συχνότητας εξαιτίας των καλύτερων επιδόσεων, όσον αφορά το bandwidth.

Τέλος, στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται το μπλοκ διάγραμμα πομπού και δέκτη τόσο για το OFDMA όσο και για το SC-FDMA. Στο SC-FDMA πριν την εφαρμογή IFFT τα σύμβολα κωδικοποιούνται με DFT (Discrete Fourier Transform).



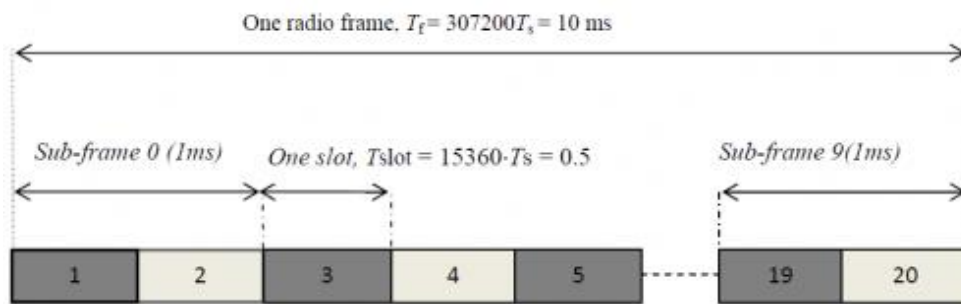
Σχήμα 1.8. Block διάγραμμα πομπού-δέκτη OFDMA/SC-FDMA.

1.2.3 LTE radio frames

Οι παράμετροι μετάδοσης του LTE σχετίζονται με τη συχνότητα, το χώρο και το χρόνο προκειμένου να εξασφαλισθούν οι απαραίτητοι πόροι για τη μεταφορά δεδομένων.

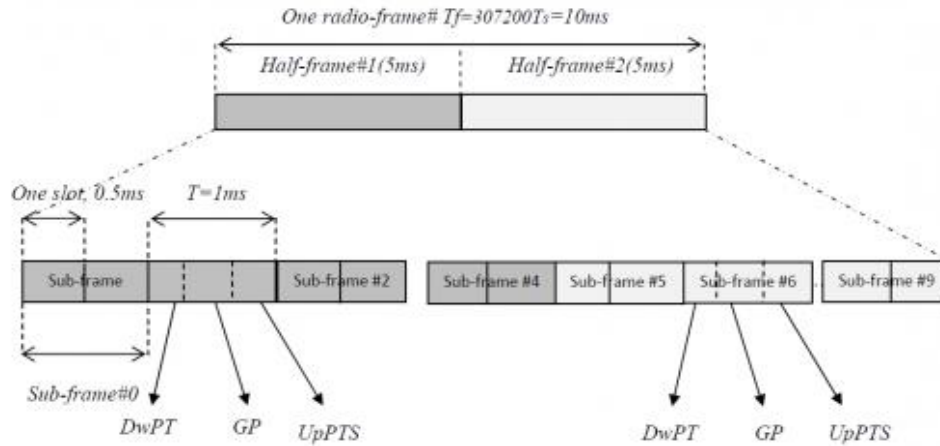
Όλες οι μονάδες χρόνου ορίζονται σαν πολλαπλάσια της ποσότητας $T_s = 1 / (15000 * 2048)$ όπου 2048 το εύρος FFT. Το radio frame του LTE τόσο στο downlink όσο και στο uplink, έχει διάρκεια $307200 * T_s = 10ms$.

Δύο τύποι radio frame έχουν σχεδιαστεί για το LTE: Η δομή τύπου-1 έχει εφαρμογή στο Frequency Division Duplex (FDD), ενώ η τύπου-2 έχει σχέση με το Time Division Duplex (TDD). Η δομή τύπου-1 έχει σχεδιαστεί για διπλεξία διαίρεσης συχνότητας (FDD), και μπορεί να υποστηρίξει τόσο half duplex όσο και full duplex FDD. Το radio frame τύπου-1 έχει διάρκεια 10 ms και αποτελείται από 20 slots ίδιου μεγέθους και διάρκειας 0.5 ms το καθένα. Ένα subframe περιλαμβάνει δύο slots, συνεπώς ένα radio frame αποτελείται από 10 subframes. Κατά τη λειτουργία FDD mode, τα μισά subframes διατίθενται για το downlink, και τα άλλα μισά για το uplink σε κάθε διάστημα 10 ms, όπου η μετάδοση του downlink και του uplink διαχωρίζονται στο πεδίο της συχνότητας.



Σχήμα 1.10 LTE radio frame-δομή τύπου-1^[29]

Η δομή τύπου-2 σχετίζεται με τη διπλεξία διαίρεσης χρόνου, TDD. Κάθε radio frame αποτελείται από δύο πανομοιότυπα half-frames, διάρκειας 5 ms το καθένα. Επιπλέον, κάθε half-frame διαιρείται περαιτέρω σε 5 subframes διάρκειας 1ms. Δύο slots διάρκειας 0.5 ms συνιστούν ένα subframe. Τέτοιου τύπου subframes δεν χαρακτηρίζονται ως special subframes. Τα special subframes, διαμορφώνονται από 3 βασικά πεδία: Το Downlink Pilot Timeslot (DwPTS), το GP (Guard Period) και το Uplink Pilot Timeslot (UpPTS).



Σχήμα 1.11. LTE radio frame-δομή τύπου-2^[29]

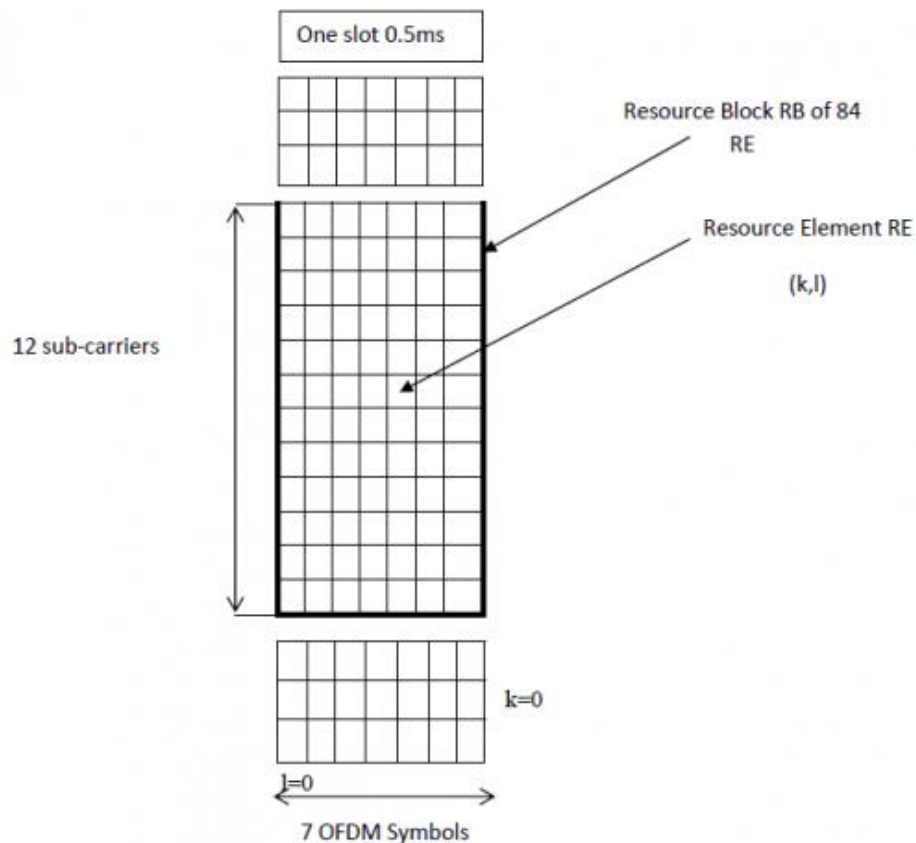
Επτά σχηματισμοί uplink και downlink υποστηρίζονται για τις δύο περιπτώσεις της περιοδικότητας του σημείου εναλλαγής από downlink σε uplink (10 ms και 5 ms). Όταν το σημείο εναλλαγής είναι στα 5 ms, χρησιμοποιείται ειδικός τύπος subframes και στα δύο half-frames, αλλά δεν συμβαίνει το ίδιο στην περίπτωση των 10 ms, όπου χρησιμοποιείται ειδικό πλαίσιο subframe μόνο στο πρώτο half-frame. Για το downlink δεσμεύονται τα subframe 0, 5 και DwPTS, ενώ το UpPTS και το subframe που βρίσκεται δίπλα στο special subframe δεσμεύονται πάντα για το uplink. Η δομή αυτή, απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 1.12)^[29]:

Uplink-Downlink configuration	Downlink-to-uplink Switch-point periodicity	Sub-frame Numbers									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5ms	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5ms	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10ms	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10ms	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10ms	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Σχήμα 1.12^[29]

όπου: D, subframe για αναμετάδοση κατερχόμενης ζεύξης, S "special" subframe για περίοδο επιτήρησης και U subframe για αναμετάδοση ανερχόμενης ζεύξης.

Ο αριθμός των subcarriers καθορίζεται από το εύρος ζώνης μετάδοσης. Για το κανονικό κυκλικό πρόθεμα (CP), κάθε υποδοχή περιέχει επτά σύμβολα OFDM ενώ, σε περίπτωση εκτεταμένου κυκλικού προθέματος, 6 σύμβολα OFDM είναι τοποθετημένα σε κάθε slot.



Σχήμα 1.13. Δομή LTE resource block^[29]

Στην κατερχόμενη ζεύξη (downlink) του LTE, χρησιμοποιείται μια σταθερή απόσταση μεταξύ των subcarriers, εύρους 15 kHz. Στο πεδίο της συχνότητας, 12 subcarriers ομαδοποιούνται μεταξύ τους για να σχηματίσουν ένα Resource Block (RB), το οποίο καταλαμβάνει 180 kHz κατά τη διάρκεια ενός slot. Σε περίπτωση μικρού CP, το μήκος ενός Resource Block περιέχει 84 στοιχεία πόρων (resource elements-RE) ενώ, για μεγάλο CP, ο αριθμός των RE είναι 74. Για όλα τα διαθέσιμα εύρη ζώνης, το μέγεθος των Resource Block είναι το ίδιο.

1.3 Τύποι καναλιών LTE

Τα κανάλια που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά πληροφορίας στο LTE, μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες:

- **Φυσικά κανάλια:** είναι κανάλια μετάδοσης τα οποία μεταφέρουν δεδομένα χρήστη και μηνύματα ελέγχου .
- **Κανάλια μεταφοράς:** Τα κανάλια μεταφοράς του physical layer παρέχουν μεταφορά πληροφορίας στο Medium Access Control (MAC) ή και σε υψηλότερα επίπεδα.
- **Λογικά κανάλια:** Παρέχουν υπηρεσίες για το Medium Access Control (MAC) layer μέσα από τη δομή των πρωτοκόλλων του LTE.

1.3.1 Φυσικά κανάλια LTE

Τα φυσικά κανάλια που χρησιμοποιεί το LTE, διαφοροποιούνται στο uplink και στο downlink από τη στιγμή χαρακτηρίζονται από διαφορετικές απαιτήσεις ενώ, λειτουργούν με διαφορετικό τρόπο.

- **Downlink:**

1. Physical Broadcast Channel (PBCH):

Μεταφέρει πληροφορίες συστήματος για UEs που ζητούν πρόσβαση στο δίκτυο (μηνύματα MIB). Η διαμόρφωση που χρησιμοποιεί είναι πάντα QPSK, ενώ τα δεδομένα κωδικοποιούνται με ένα scrambling sequence συγκεκριμένο για κάθε cell ώστε να αποφεύγεται η σύγχυση πληροφοριών με άλλες κυψέλες. Τα μηνύματα MIB στο PBCH χαρτογραφούνται στους κεντρικούς 72 subcarriers ή στα 6 κεντρικά resource blocks ανεξάρτητα από το συνολικό bandwidth του συστήματος. Ένα μήνυμα PBCH επαναλαμβάνεται κάθε 40 ms, οπότε ένα TTI PBCH περιλαμβάνει τέσσερα radio frames^[28]. Οι μεταδόσεις PBCH αποτελούνται από 14 bits πληροφορίας, 10 εφεδρικά bits, και 16 CRC bits.

2. Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH) :

Πληροφορεί το UE σχετικά με το format του σήματος που λαμβάνεται. Υποδεικνύει τον αριθμό των συμβόλων OFDM που χρησιμοποιούνται για το PDCCH, εάν δηλαδή θα είναι 1, 2, or 3. Η πληροφορία που μεταφέρεται μέσω του PCFICH είναι θεμελιώδης από τη στιγμή που το UE δεν γνωρίζει εκ των προτέρων το μέγεθος της περιοχής ελέγχου. Η μετάδοση PCFICH γίνεται στο πρώτο σύμβολο κάθε sub-frame και φέρει ένα πεδίο γνωστό ως Control Format Indicator, CFI. Το CFI περιλαμβάνει μία λέξη κώδικα 32 bit που αναπαριστά τις τιμές 1, 2, ή 3. Η τιμή CFI 4 κρατείται για πιθανή μελλοντική χρήση. Το PCFICH χρησιμοποιεί κωδικοποίηση 32,2 block, 1/16 coding rate, και διαμόρφωση QPSK για την εξασφάλιση καλύτερης ποιότητας λήψης.

3. Physical Downlink Control Channel (PDCCH) :

Ο βασικός ρόλος αυτού του φυσικού καναλιού, είναι να μεταφέρει πληροφορίες προγραμματισμού για διάφορες περιπτώσεις όπως:

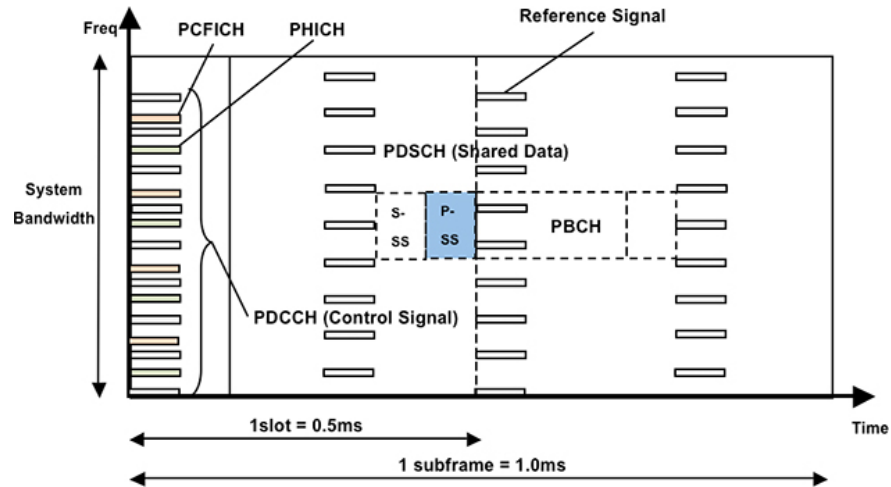
- Προγραμματισμός πόρων για το Downlink
- Οδηγίες για έλεγχο ισχύος στο Uplink
- Παραχώρηση πόρων στο Uplink
- Ενδείξεις paging ή πληροφοριών συστήματος.

Το PDCCH περιλαμβάνει ένα μήνυμα γνωστό ως Downlink Control Information-DCI, το οποίο μεταφέρει την πληροφορία ελέγχου για ένα συγκεκριμένο UE ή για μία ομάδα UEs. Η διαμόρφωση του DCI μπορεί να έχει διάφορους τύπους, οι οποίοι ορίζονται με διαφορετικά μεγέθη. Οι διαφορετικοί τύποι διαμόρφωσης είναι: τύπος 0, 1, 1A, 1B, 1C, 1D, 2, 2A, 2B, 2C, 3, 3A, και 4^[28].

4. Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH) :

Το κανάλι αυτό χρησιμοποιείται για την αναφορά της κατάστασης του Hybrid ARQ s. Μεταφέρει το σήμα HARQ ACK/NACK δείχνοντας πότε ένα block έχει ληφθεί σωστά. Ο δείκτης HARQ έχει διάρκεια ενός bit , για το οποίο η τιμή "0" αντιστοιχεί σε

ACK, και το "1" αντιστοιχεί σε NACK. Το PHICH μεταδίδεται μέσα στην περιοχή ελέγχου ενός subframe και τυπικά μέσα στο πρώτο σύμβολο. Εάν η ποιότητα της ραδιο-ζεύξης είναι χαμηλή, το PHICH εκτείνεται σε ένα αριθμό συμβόλων για περισσότερη σταθερότητα.



Σχήμα 1.14. Φυσικά κανάλια-downlink

- **Uplink:**

1. Physical Uplink Control Channel (PUCCH) :

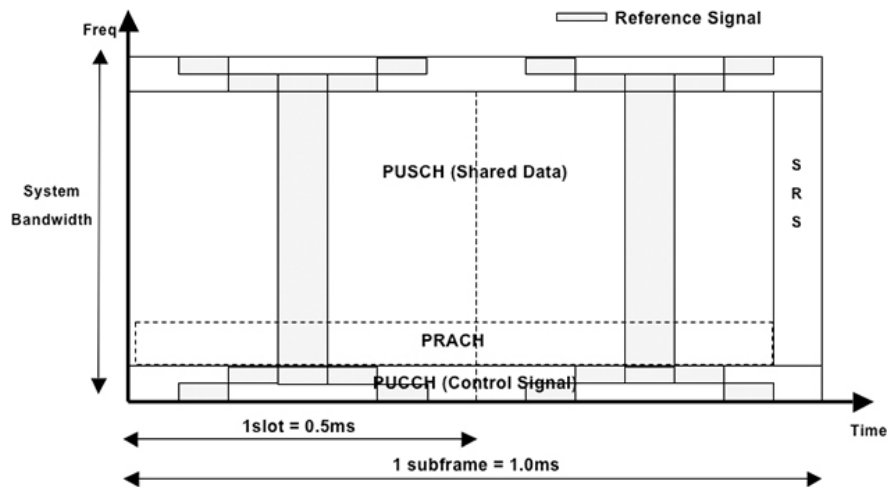
Το PUCCH παρέχει τους απαιτούμενους πόρους ελέγχου σηματοδότησης. Υπάρχουν διάφορες διαμορφώσεις PUCCH που υλοποιούνται σε κάθε περίπτωση ώστε να εξασφαλίσουν ότι το κανάλι θα μεταφέρει την απαιτούμενη πληροφορία με τον καλύτερο τρόπο για τη δεδομένη εφαρμογή. Περιλαμβάνει τη δυνατότητα μεταφοράς Scheduling Requests, SRs.

2. Physical Uplink Shared Channel (PUSCH) :

Αποτελεί το ισοδύναμο του PDSCH για το uplink.

3. Physical Random Access Channel (PRACH) :

Αυτό το φυσικό κανάλι, χρησιμοποιείται για λειτουργίες τυχαίας πρόσβασης (random access). Είναι η μοναδική μη συγχρονισμένη μετάδοση που ένα UE μπορεί να πραγματοποιήσει στο LTE. Αυτό οφείλεται στο ότι τα propagation delays του downlink και του uplink είναι άγνωστα όταν το PRACH χρησιμοποιείται, συνεπώς δεν μπορεί να είναι συγχρονισμένο.



Σχήμα 1.15. Φυσικά κανάλια-uplink

1.3.2 Κανάλια μεταφοράς LTE

Τα κανάλια μεταφοράς του LTE διαφέρουν μεταξύ του uplink και του downlink καθώς υπάρχουν διαφορετικές απαιτήσεις και τρόποι λειτουργίας. Παρέχουν μεταφορά πληροφορίας προς το medium access control (MAC) και τα υψηλότερα στρώματα.

- **Downlink:**

1. **Broadcast Channel (BCH):** χρησιμοποιείται για MIB και χαρτογραφείται στο BCCH.

2. **Downlink Shared Channel (DL-SCH) :**

Αποτελεί το κύριο κανάλι για μεταφορά δεδομένων κατερχόμενης ζεύξης. Χρησιμοποιείται από πολλά λογικά κανάλια.

3. *Paging Channel (PCH)* :

Χρησιμοποιείται για να μεταφέρει το λογικό κανάλι PCCH

4. *Multicast Channel (MCH)* :

Μεταφέρει πληροφορίες MCCH για τη δημιουργία multicast μεταδόσεων.

- **Uplink:**

1. *Uplink Shared Channel (UL-SCH)* :

Αποτελεί το βασικό κανάλι μεταφοράς δεδομένων ανερχόμενης ζεύξης. Χρησιμοποιείται επίσης από πολλά λογικά κανάλια.

2. *Random Access Channel (RACH)*: Χρησιμοποιείται για ανάγκες τυχαίας πρόσβασης.

1.3.3 Λογικά κανάλια LTE

Τα λογικά κανάλια καλύπτουν τα δεδομένα που μεταφέρονται μέσω της διεπαφής ραδιοσυχνοτήτων. Το σημείο πρόσβασης υπηρεσίας-SAP μεταξύ του MAC και του RLC παρέχουν τα λογικά κανάλια.

- **Control channels:** Μεταφέρουν τις πληροφορίες για το control plane:

1. *Broadcast Control Channel (BCCH)* :

Παρέχει πληροφορίες συστήματος σε όλα τα κινητά τερματικά που είναι συνδεδεμένα στο eNodeB.

2. *Paging Control Channel (PCCH)* :

Χρησιμοποιείται για πληροφορίες paging κατά την αναζήτηση μίας μονάδας στο δίκτυο.

3. *Common Control Channel (CCCH)* :

Αυτό το κανάλι χρησιμοποιείται για πληροφορίες τυχαίας πρόσβασης όπως π.χ. ενέργειες που περιλαμβάνουν τη δημιουργία μιας σύνδεσης.

4. *Multicast Control Channel (MCCH)* :

Μεταφέρει πληροφορίες που απαιτούνται για τη λήψη multicast μηνυμάτων.

5. *Dedicated Control Channel (DCCH)* :

Αυτό το κανάλι χρησιμοποιείται για τη μεταφορά πληροφοριών που αφορούν το χρήστη, όπως π.χ. έλεγχος ισχύος, handover, κλπ.

- **Traffic channels**: Μεταφέρουν τα δεδομένα του user-plane και είναι τα εξής:

1. *Dedicated Traffic Channel (DTCH)* :

Μεταφέρει δεδομένα χρήστη

2. *Multicast Traffic Channel (MTCH)* :

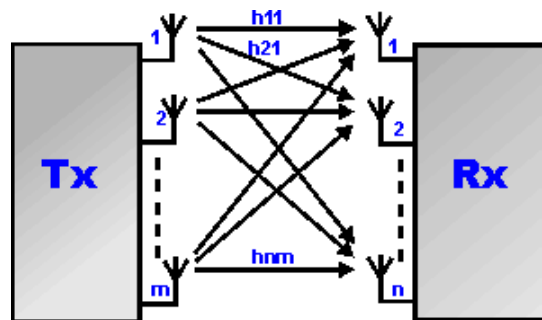
Μεταφέρει δεδομένα multicast.

1.4 LTE MIMO

Η συντομογραφία MIMO, προκύπτει από τη φράση Multiple Input Multiple Output. Αποτελεί μια από τις βασικές τεχνολογικές καινοτομίες του LTE και χρησιμοποιείται για να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος και ειδικότερα στους τομείς του data throughput και της φασματικής απόδοσης.

Αν και το MIMO κάνει το σύστημα πιο σύνθετο όσον αφορά την επεξεργασία αλλά και τον αριθμό των κεραιών, προσφέρει κατά πολύ υψηλότερα data rates. Για αυτό το λόγο συμπεριλαμβάνεται πλέον ως δομικό στοιχείο του LTE.

Η βασική ιδέα της τεχνικής είναι η χρήση της διάδοσης σήματος μέσα από διαφορετικές διαδρομές (multipath signal propagation), που εμφανίζεται σε όλα τα συστήματα επίγειων τηλεπικοινωνιών, ώστε αντί να δημιουργεί παρεμβολές, να χρησιμοποιείται προς βελτίωση της επικοινωνίας. Η πολυδιαδρομική παρεμβολή όπως και οι περιορισμοί του throughput ως αποτέλεσμα του κανόνα του Shannon, αποτελούν δυο βασικά προβλήματα των καναλιών επικοινωνίας. Χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραιές τόσο στον πομπό όσο και στο δέκτη σε συνδυασμό με σύνθετη, ψηφιακή ανάλυση σήματος δίνει τη δυνατότητα στο σύστημα να δημιουργεί πολλαπλά data streams στο ίδιο κανάλι, αυξάνοντας έτσι τη χωρητικότητά του.



Σχήμα 1.16 Σχηματική περιγραφή της τεχνολογίας MIMO

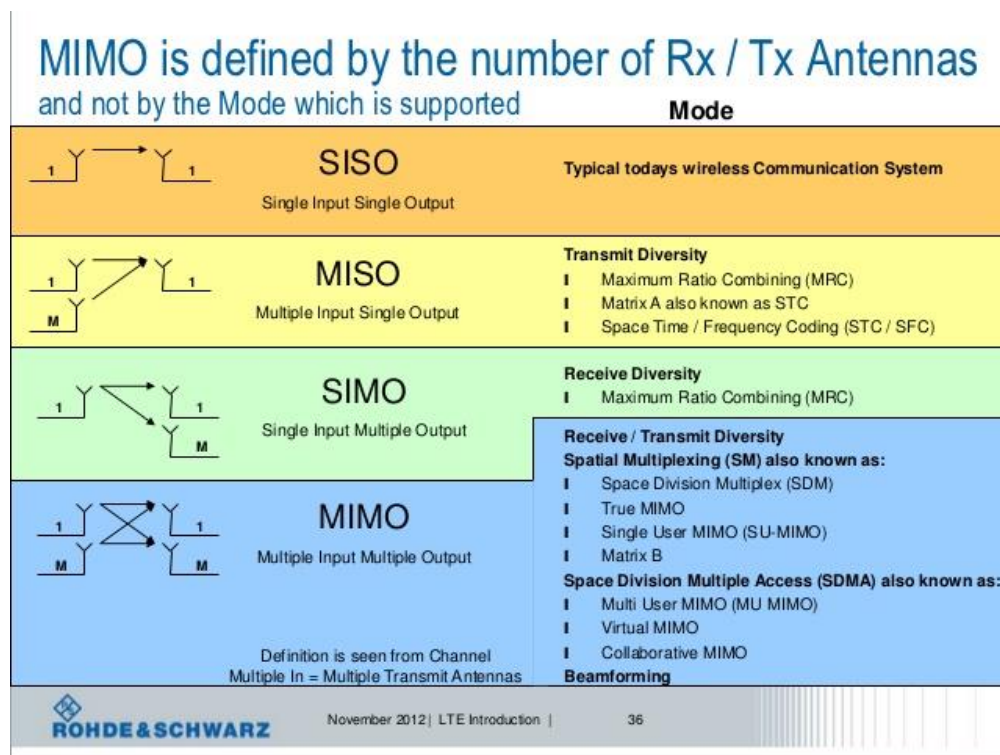
Η χρήση της τεχνολογίας MIMO εισήχθη διαδοχικά στις διάφορες εκδόσεις των προτύπων LTE. Το MIMO υπήρξε ακρογωνιαίος λίθος του προτύπου LTE, αλλά αρχικά, στις εκδόσεις 8 και 9 οι πολλαπλές κεραιές εκπομπής στο UE δεν υποστηρίχτηκαν επειδή, για λόγους μείωσης ισχύος, θεωρήθηκε ότι έπρεπε να χρησιμοποιηθεί ένας μόνο ενισχυτής ισχύος RF. Στη Rel. 10 εισήχθησαν αρκετά νέα στοιχεία όπως η χωρική πολυπλεξία κλειστού βρόχου για το SU-MIMO καθώς και πολλαπλές κεραιές στο UE.

1.4.1 LTE MIMO λειτουργίες

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι υλοποίησης του MIMO στο LTE. Οι διαφοροποιήσεις αυτές έχουν να κάνουν με τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται, τη λειτουργία του καναλιού και τον εξοπλισμό που εμπλέκεται στη σύνδεση.

- **Single antenna:** Αυτή είναι η μορφή ασύρματης επικοινωνίας που χρησιμοποιείται στις περισσότερες βασικές ασύρματες συνδέσεις. Ένα μοναδικό data stream οδηγείται σε μία κεραία στον πομπό και λαμβάνεται από μια ή περισσότερες κεραίες στο δέκτη. Μπορεί να χαρακτηριστεί ως SISO (Single In Single Out) ή SIMO (Single In Multiple Out) ανάλογα με τον αριθμό των κεραιών που χρησιμοποιούνται.
- **Transmit diversity:** Αυτή η μορφή MIMO χρησιμοποιεί τη μετάδοση του ίδιου stream πληροφορίας από πολλαπλές κεραίες (2 ή 4). Η πληροφορία κωδικοποιείται διαφορετικά χρησιμοποιώντας Space Frequency Block Codes. Ο τρόπος αυτός προσφέρει βελτιωμένη ποιότητα σήματος και λήψης αλλά δε βελτιώνει το data rate συνεπώς, χρησιμοποιείται τόσο στα κοινά κανάλια όσο και στα κανάλια ελέγχου και αναμετάδοσης.
- **Open loop spatial multiplexing:** Σε αυτή τη μέθοδο αποστέλλονται δύο stream πληροφορίας που μπορούν να αναμεταδοθούν από δύο ή περισσότερες κεραίες. Ωστόσο, δεν υπάρχει feedback από το UE μολονότι ένας δείκτης κατάταξης TRI, που μεταδίδεται από τον UE, μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τον σταθμό βάσης για τον προσδιορισμό του αριθμού των spatial layers
- **Close loop spatial multiplexing:** Αυτή η μορφή είναι παρόμοια με την έκδοση ανοιχτού βρόχου, αλλά έχει ενσωματωθεί η ανατροφοδότηση για να κλείσει ο βρόχος. Αυτό επιτρέπει στον πομπό να προ-κωδικοποιεί τα δεδομένα για να βελτιστοποιήσει και να επιτρέψει στον δέκτη να διαχωρίσει πιο εύκολα τις διάφορες ροές δεδομένων.
- **Closed loop with pre-coding:** Μία μοναδική λέξη κώδικα μεταδίδεται από ένα χωρικό layer.
- **Multi-User MIMO, MU-MIMO:** Παρέχει στο σύστημα τη δυνατότητα να κατευθύνει διαφορετικά χωρικά streams σε διαφορετικούς χρήστες.

- Beam-forming:** Αυτός είναι ο πιο πολύπλοκος τρόπος λειτουργίας MIMO κατά τον οποίο είναι πιθανό να χρησιμοποιηθούν γραμμικές συστοιχίες που θα επιτρέψουν στην κεραία να εστιάσει σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Αυτό θα μειώσει τις παρεμβολές και θα αυξήσει την χωρητικότητα δεδομένου ότι το συγκεκριμένο UE θα έχει μια δέσμη σχηματισμένη προς την ιδιαίτερη κατεύθυνσή τους. Μια λέξη κώδικα μεταδίδεται σε ένα ενιαίο χωρικό layer. Χρησιμοποιείται ειδικό σήμα αναφοράς για μια πρόσθετη θύρα. Το τερματικό εκτιμά την ποιότητα του καναλιού από τα κοινά σήματα αναφοράς στις κεραίες.



Σχήμα 1.17 Λειτουργίες LTE MIMO

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ DEVICE TO DEVICE (D2D)

Όπως έχει αναφερθεί, ο όρος D2D communications περιγράφει την απευθείας ασύρματη επικοινωνία μεταξύ δύο ή και περισσότερων κινητών συσκευών, χωρίς να είναι απαραίτητη η ύπαρξη σταθμού βάσης (eNodeB για την περίπτωση του LTE). Το ενδιαφέρον για τη μελέτη αλλά και την εφαρμογή τέτοιου είδους τηλεπικοινωνιών, έχει αυξηθεί σημαντικά κατά τα τελευταία χρόνια για διάφορους λόγους όπως είναι η ανάγκη για δίκτυα δημόσιας ασφάλειας υψηλών ταχυτήτων, η αυξανόμενη δημοτικότητα εφαρμογών κοινωνικής δικτύωσης που σχετίζονται με την απόσταση κλπ. Τα περισσότερα δίκτυα δημόσιας ασφάλειας στηρίζονται σε ξεπερασμένες πλέον τεχνολογίες 2G (όπως πχ το P25 και το TETRA) ενώ, στον αντίποδα, τα εμπορικά δίκτυα εξελίσσονται τάχιστα προς την υλοποίηση του LTE. Έτσι, έγινε φανερό η ανάγκη για την αναβάθμιση των δικτύων ασφαλείας προσθέτοντας και τη δυνατότητα της Direct επικοινωνίας τόσο για βελτίωση της απόδοσής όσο και για την εξυπηρέτηση περιπτώσεων όπου η κάλυψη των κυψελωτών δικτύων είναι ελλιπής ή αποτυγχάνει.

Τεχνολογίες για την επικοινωνία D2D έχουν μελετηθεί για αρκετά χρόνια, και κάποια επιτυχή παραδείγματα περιλαμβάνουν τη σύνδεση δεδομένων μέσω υπερθύρων συχνοτήτων (IrDA), το Bluetooth ή το WiFi Direct. Λειτουργώντας σε σχετικά υψηλές συχνότητες και σε μη αδειοδοτημένες ζώνες, οι προαναφερθείσες τεχνολογίες μπορούν να επιτύχουν υψηλότερο εύρος ζώνης και χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης. Ωστόσο, υποφέρουν από χαμηλή αποδοτικότητα φάσματος, χαμηλή απόδοση ισχύος, μικρές αποστάσεις επικοινωνίας, και ευπάθεια σε παρεμβολές. Ως εκ τούτου, η ανάπτυξη μιας τεχνολογίας D2D η οποία θα είναι συμβατή με τα ευρέως ανεπτυγμένα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας είναι απαραίτητη για τη βελτίωση και την εφαρμογή σε μεγαλύτερη κλίμακα των επικοινωνιών D2D.

Τα παραπάνω λοιπόν οδήγησαν στο αυξανόμενο ενδιαφέρον για το LTE. Το LTE αποτελεί τη πιο υποσχόμενη ασύρματη ευρυζωνική τεχνολογία που προσφέρει υψηλό data rate και χαμηλό latency σε κινούμενους χρήστες. Όπως όλα τα κυψελωτά δίκτυα μπορεί να συνδυάσει μεγάλη περιοχή κάλυψης, υψηλή διεισδυτικότητα και υποστήριξη τερματικών κινούμενων με υψηλή ταχύτητα. Η προτυποποίηση του D2D στο LTE πραγματοποιήθηκε στο Release 12 της 3GPP.

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά των βασικότερων τεχνολογιών που έχουν προταθεί για την υλοποίηση D2D επικοινωνιών.

Feature	Wi-Fi	802.11p	UMTS	LTE	LTE-A
Channel width	20 MHz	10 MHz	5 MHz	1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz	Up to 100 MHz
Frequency band(s)	2.4 GHz, 5.2 GHz	5.86-5.92 GHz	700-2600 MHz	700-2690 MHz	450 MHz-4.99 GHz
Bit rate	6-54 Mbps	3-27 Mbps	2 Mbps	Up to 300 Mbps	Up to 1 Gbps
Range	Up to 100 m	Up to 1 km	Up to 10 km	Up to 30 km	Up to 30 km
Capacity	Medium	Medium	Low	High	Very High
Coverage	Intermittent	Intermittent	Ubiquitous	Ubiquitous	Ubiquitous
Mobility support	Low	Medium	High	Very high (up to 350 km/h)	Very high (up to 350 km/h)
QoS support	Enhanced Distributed Channel Access (EDCA)	Enhanced Distributed Channel Access (EDCA)	QoS classes and bearer selection	QCI and bearer selection	QCI and bearer selection
Broadcast/Multicast support	Native broadcast	Native broadcast	Through MBMS	Through eMBMS	Through eMBMS
V2I support	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
V2V support	Native (ad hoc)	Native (ad hoc)	No	No	Potentially, through D2D
Market penetration	High	Low	High	Potentially high	Potentially high

Πίνακας 2.1. Βασικά χαρακτηριστικά τεχνολογιών που έχουν προταθεί για D2D επικοινωνίες. ^[12]

2.1 Αρχιτεκτονική συστήματος επικοινωνιών D2D

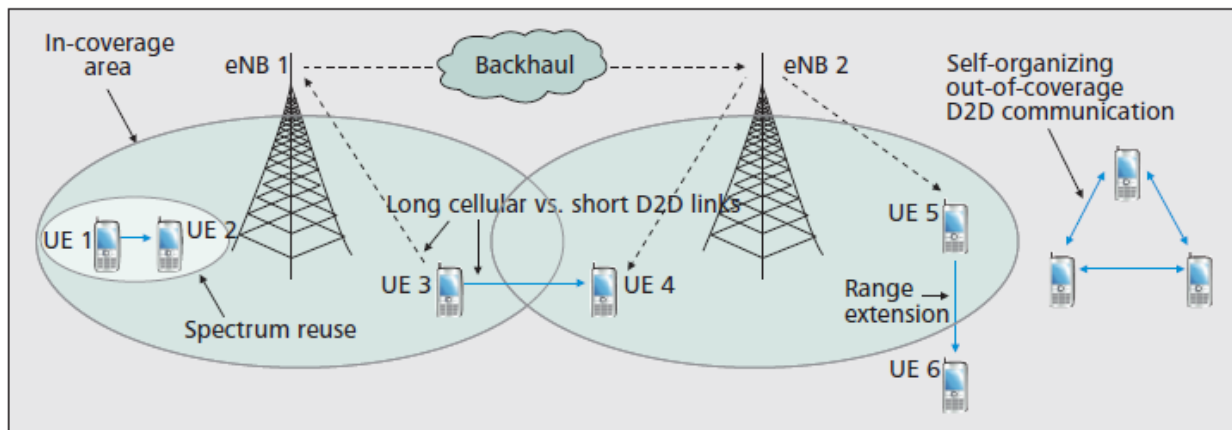
Εκτός από τη δημόσια ασφάλεια, τα σενάρια που θα μπορούσαν να εξυπηρετηθούν από D2D στο μέλλον, μπορεί να περιλαμβάνουν εμπορικές/κοινωνικές εφαρμογές, αποφόρτιση της κυκλοφορίας από τα δίκτυα και την ενσωμάτωση των υφιστάμενων υπηρεσιών υποδομής. Για την υποστήριξη όλων αυτών των σκοπών, μια γενική έννοια των υπηρεσιών εγγύτητας (Proximity services-ProSe-3GPP Rel 12) χρησιμοποιείται για τη δημιουργία της αρχιτεκτονικής του συστήματος των επικοινωνιών D2D. Ωστόσο, το πρότυπο ProSe δίνει

έμφαση στις επικοινωνίες ασφαλείας διαχωρίζοντας την παροχή επειγουσών D2D επικοινωνιών σε τρεις βασικές περιπτώσεις:

- Όλοι οι σταθμοί βάσης είναι διαθέσιμοι
- Ένα μέρος των σταθμών βάσης είναι διαθέσιμοι, ενώ οι υπόλοιποι βρίσκονται εκτός λειτουργίας
- Όλοι οι σταθμοί βάσης βρίσκονται εκτός λειτουργίας.

Για την υποστήριξη των παραπάνω υποθέσεων, η χρήση των D2D επικοινωνιών μπορεί να διαχωριστεί στα τρία ακόλουθα βασικά σενάρια, ανάλογα με την παρουσία κάλυψης από κάποιο δίκτυο:

- **In-coverage.** Το σενάριο αυτό αναφέρεται στην περίπτωση όπου όλα τα UE που πρόκειται να επικοινωνήσουν μέσω D2D, βρίσκονται εντός της περιοχής κάλυψης κάποιου eNodeB.
- **Partial-coverage.** Στην περίπτωση αυτή, κάποια από τα UEs βρίσκονται εντός κάλυψης ενώ κάποια άλλα δεν είναι συνδεδεμένα σε κανένα eNodeB.
- **Out-of-coverage.** Το σενάριο αυτό περιλαμβάνει τις περιπτώσεις εκείνες όπου όλα τα UEs βρίσκονται έξω από την περιοχή κάλυψης κάποιου UE.



Σχήμα 2.1 Σενάρια LTE D2D^[16]

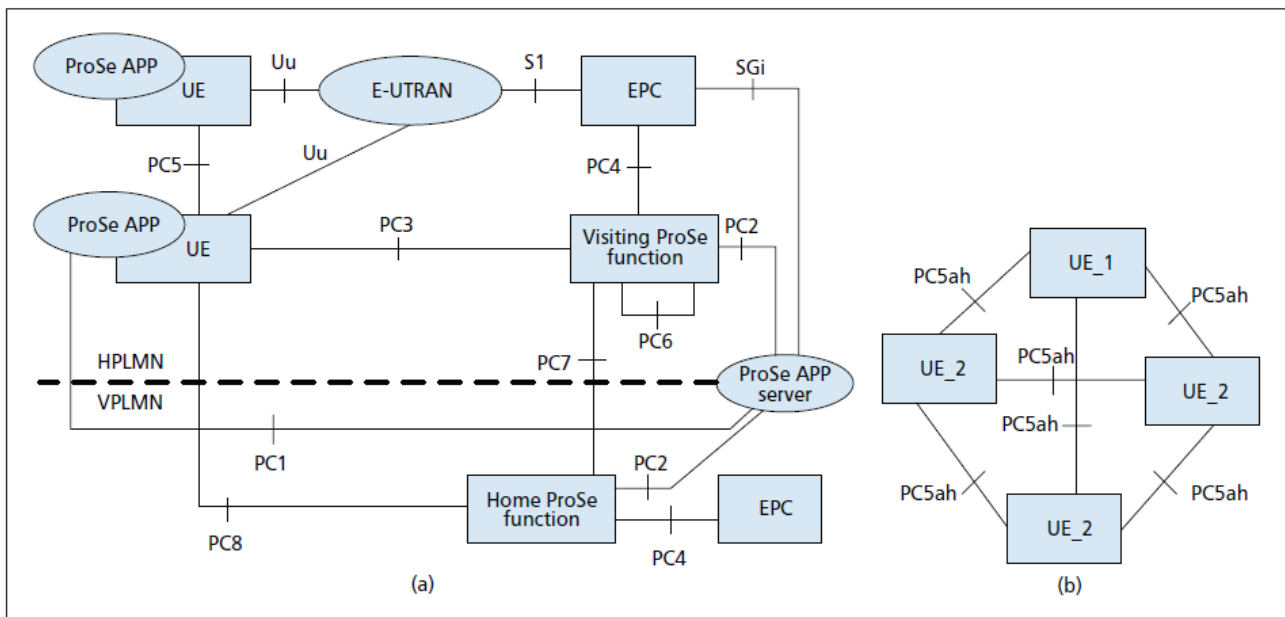
Για να μπορέσουν τώρα να υλοποιηθούν τα παραπάνω σενάρια, η αρχιτεκτονική ProSe εκτός από τη συμβατική διασύνδεση μέσω του interface Uu μεταξύ eNodeB και UE, όπως και το S1 interface μεταξύ του eNodeB και του evolved packet core (EPC), περιλαμβάνει και τα παρακάτω interfaces^[1]:

- **PC5:** Είναι το interface που χρησιμοποιείται για D2D broadcasting επικοινωνίες.
- **PC1:** Για την παροχή διαφόρων ασύρματων υπηρεσιών που έχουν ως βάση τις επικοινωνίες D2D, ένας αριθμός εφαρμογών ProSe (ProSe APPs) μπορούν να εγκατασταθούν σε ένα UE. Αυτές οι εφαρμογές, μπορούν να ανταλλάξουν δεδομένα με τον απομακρυσμένο διακομιστή ProSe APP μέσω του PC1.
- **PC2:** Οι λειτουργίες ProSe που υποστηρίζονται από το EPC αναφέρονται γενικά ως ProSe function. Η διεπαφή PC2 ορίζεται μεταξύ των ProSe APP Server και ProSe function και χρησιμοποιείται από την τελευταία για την ενημέρωση των δεδομένων εφαρμογής από τη βάση δεδομένων ProSe.
- **PC3:** Το PC3 είναι το interface μεταξύ των UE και της ProSe Function, που χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση των λειτουργιών της D2D ανίχνευσης και επικοινωνίας. Το PC3 μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την D2D ανίχνευση μεταξύ τερματικών που μπορεί να είναι εγγεγραμμένα σε διαφορετικά δίκτυα (PLMNs) ή ακόμα και UEs που ανήκουν σε διαφορετικά ραδιοδίκτυα πρόσβασης όπως το LTE-A και το Wi-Fi.
- **PC4:** Το PC4 καθορίζει την αλληλεπίδραση μεταξύ της ProSe Function και του EPC. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξουσιοδότηση των υπηρεσιών ProSe για τη διαχείριση της κινητικότητας
- **PC6:** Είναι το interface μεταξύ πολλαπλών ProSe Functions σε διαφορετικά PLMNs. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για D2D ανίχνευση μεταξύ UEs εγγεγραμμένων σε διαφορετικά PLMNs.
- **PC7:** Χρησιμοποιείται μεταξύ ProSe Functions στο visiting PLMN (VPLMN) και το home PLMN (HPLMN), για την εξουσιοδότηση των υπηρεσιών ProSe.
- **PC8:** Είναι το interface μεταξύ ενός roaming UE και της ProSe Function στο HPLMN.

- **SGi:** Είναι το interface που χρησιμοποιείται για την ανταλλαγή δεδομένων εφαρμογών, όπως επίσης και πληροφορίας ελέγχου στο επίπεδο εφαρμογών.

Στην περίπτωση του out of coverage σεναρίου, κάθε UE που βρίσκεται εκτός κάλυψης κάποιου eNodeB, μπορεί να ανταλλάσσει δεδομένα κατευθείαν με άλλα UE, εφόσον η ισχύς του σήματος είναι ικανοποιητική, σχηματίζοντας έτσι ένα ad-hoc δίκτυο μεταξύ τους. Εδώ, αντί του interface PC5, χρησιμοποιείται ένα lower-layer interface (μόνο στα Layer 1 και Layer 2), το PC5ah.

Στο σχήμα που ακολουθεί, απεικονίζεται η αρχιτεκτονική ProSe (a) με δυνατότητα roaming και (b) με one-to-many επικοινωνία σε ad-hoc mode ενώ, σημειώνονται και τα διάφορα interfaces.



Σχήμα 2.2. Αρχιτεκτονική LTE ProSe (a) με δυνατότητα roaming, (b) σε λειτουργία ad-hoc ^[1]

2.2 Σχεδιαστική δομή του D2D ProSe

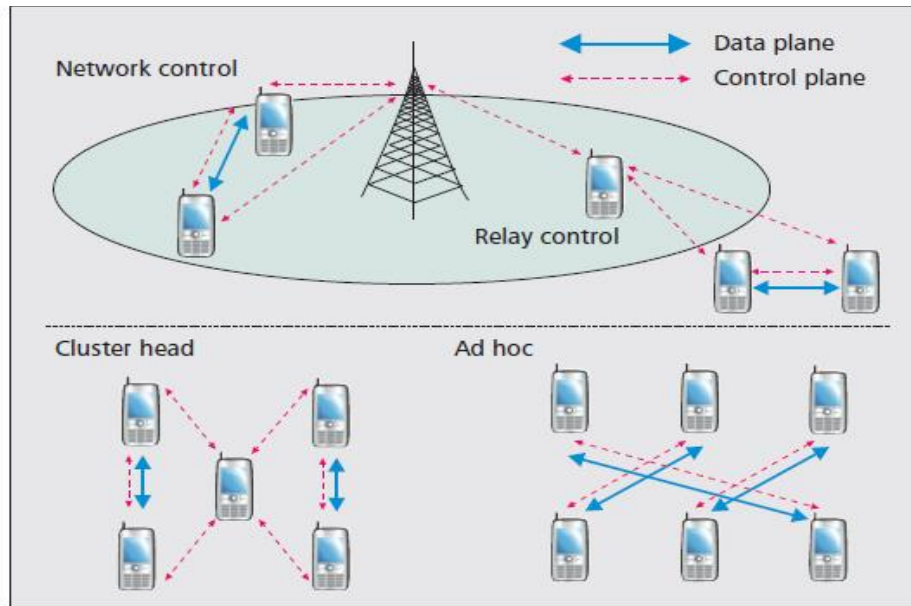
Το D2D ProSe είναι ένα σχετικά νέο αντικείμενο μελέτης οπότε, ο σχεδιασμός του βρίσκεται σε εξέλιξη. Σε γενικές γραμμές, οι σχεδιαστικές επιλογές που έχουν συζητηθεί από τη 3GPP μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες: διαχείριση ProSe (ProSe management), συγχρονισμός-synchronization, ανίχνευση συσκευών (device discovery), και απευθείας επικοινωνία (direct communication).

2.2.1 ProSe management

Στα κυψελωτά δίκτυα τηλεπικοινωνιών, το δίκτυο ελέγχει πλήρως τη λειτουργία των κινητών τερματικών εκτός από κάποια λίγα στοιχεία που σχετίζονται με τους παρόχους. Έτσι όταν τα D2D UEs βρίσκονται εντός κάλυψης, το ProSe θα πρέπει να ελέγχεται και να διαχειρίζεται από το δίκτυο. Αυτός όμως ο πλήρης έλεγχος της D2D λειτουργίας από το δίκτυο ενδέχεται να αποτελεί υπερβολή στο σχεδιασμό. Συνεπώς, η ανάθεση ορισμένων λειτουργιών ελέγχου κατευθείαν στα UEs, μπορεί να μειώσει το φόρτο του δικτύου και να ελαττωθεί έτσι η καθυστέρηση στην ανάδραση. Επιπρόσθετα, είναι πιθανό συσκευές που επικοινωνούν μέσω D2D να βρεθούν σε περιοχές εκτός κάλυψης, όπου το δίκτυο χάνει την ικανότητα ελέγχου.

Έχουν προταθεί δύο εναλλακτικές τοπολογίες ελέγχου, η ad-hoc και η cluster-head^[4]. Στην πρώτη, κάθε συσκευή ελέγχει τη συμπεριφορά της ενώ ο συγχρονισμός των μεταδόσεων γίνεται μέσω πρωτοκόλλων MAC (random medium access control). Η μέθοδος αυτή είναι απλή στην υλοποίησή της, όμως τα MAC πρωτόκολλα δεν είναι τόσο αποτελεσματικά όσο ο έλεγχος από το κεντρικό δίκτυο ενώ, δεν έχουν πλήρη προσαρμογή με την υπάρχουσα αρχιτεκτονική του LTE.

Στην τοπολογία cluster head, ένα UE έχει ρόλο master και δρα ουσιαστικά σαν «επικεφαλής»-cluster head μιας ομάδας UEs. Το cluster head UE μπορούμε να πούμε ότι λειτουργεί σαν eNodeB παρέχοντας μια σειρά λειτουργιών στα slave-UEs, κάνοντας έτσι την τοπολογία του out of coverage σεναρίου παρόμοια με αυτή του E-UTRAN. Το μειονέκτημα είναι ότι λόγω των αυξημένων απαιτήσεων των λειτουργιών ελέγχου που εκτελεί ο cluster head, η μπαταρία του μπορεί να εξαντληθεί πολύ γρήγορα.



Σχήμα 2.3. Μέθοδοι ελέγχου ProSe ^[16]

2.2.2 Συγχρονισμός-SYNCHRONIZATION

Στο in-coverage σενάριο οι D2D μεταδόσεις, σε αντίθεση με άλλα MANETS, είναι συγχρονισμένες με τον eNodeB να παρέχει τη λειτουργία συγχρονισμού. Έτσι, όταν η ανίχνευση συσκευών είναι συγχρονισμένη στο πεδίο του χρόνου, τα UE μπορούν να εξοικονομήσουν μεγάλα ποσά ενέργειας, παραμένοντας ενεργά για σήματα ανίχνευσης μόνο σε προκαθορισμένες χρονοθυρίδες. Το πρώτο βήμα συγχρονισμού στο FDD LTE, όταν όλα τα UEs βρίσκονται εντός κάλυψης, είναι η απόφαση για το αν για τις D2D μεταδόσεις θα χρησιμοποιηθεί το uplink ή το downlink. Αν για παράδειγμα το uplink χρησιμοποιείται για επικοινωνία, η χρήση του uplink timing για το D2D θα μπορούσε να επιφέρει μικρότερη παραμόρφωση.

Εξαιτίας της χρήσης πολλών D2D links, αφού τα διάφορα σήματα μεταδίδονται μεταξύ διαφορετικών UEs, η διαδικασία του συγχρονισμού εμφανίζει ακόμα αρκετές προκλήσεις.

Παράλληλα, ο συγχρονισμός μεταξύ δυο διαφορετικών UEs δεν μπορεί να είναι ποτέ απόλυτα εγγυημένος αφού αυτά μπορεί είτε να είναι συνδεδεμένα σε διαφορετικά eNodeBs, ή ακόμα κι όταν βρίσκονται στην ίδια κυψέλη μπορεί να βρίσκονται σε διαφορετικές αποστάσεις από το eNodeB.

Στην περίπτωση του out of coverage σεναρίου, για το συγχρονισμό των συσκευών που βρίσκονται εκτός κάλυψης, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν περιοδικά μηνύματα συγχρονισμού. Η χρήση των υπάρχοντων σημάτων overhead του LTE όπως είναι τα primary/secondary synchronization signal (PSS/SSS) θα μπορούσε να είναι μια προφανής λύση, που ακόμα όμως είναι υπό διερεύνηση.

2.2.3 Ανίχνευση συσκευών-DEVICE DISCOVERY

Η ανίχνευση συσκευών στο D2D μπορεί να χωριστεί σε δυο μεγάλες κατηγορίες, την απευθείας ανίχνευση και την ανίχνευση σε επίπεδο EPC. Στην περίπτωση της απευθείας ανίχνευσης, κάθε UE ψάχνει αυτόνομα για γειτονικές συσκευές στέλνοντας και λαμβάνοντας περιοδικά σήματα ανίχνευσης. Δυο μηχανισμοί ανίχνευσης χρησιμοποιούνται^[4]:

A)μηχανισμός τύπου push, όπου το UE εκπέμπει broadcast μηνύματα δηλώνοντας την παρουσία του

B)μηχανισμός τύπου pull όπου το UE αναζητά πληροφορίες σχετικά με ανιχνεύσιμες συσκευές

Η απευθείας ανίχνευση λειτουργεί τόσο στο in-coverage όσο και στο out-of-coverage σενάριο ενώ, δεν αποκλείει και τη συμβολή του δικτύου όταν είναι δυνατή.

Στην περίπτωση της ανίχνευσης σε επίπεδο EPC, το EPC είναι αυτό που καθορίζει την εγγύτητα των συσκευών. Έτσι, ένα UE ξεκινά τη διαδικασία ανίχνευσης αφού λάβει από το δίκτυο πληροφορίες σχετικά με το target UE. Με τον τρόπο αυτό το βάρος της παρακολούθησης της θέσης των συσκευών μετατοπίζεται στο δίκτυο, απελευθερώνοντας πόρους από τα UEs.

1. **Σχεδιασμός σημάτων ανίχνευσης**

Και στους δυο τρόπους ανίχνευσης, κάθε UE εκπέμπει σήματα ανίχνευσης, τα οποία μπορούν να ληφθούν από άλλες συσκευές. Τα σήματα αυτά είναι δυνατόν να περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με την ταυτότητα των UEs ή, πληροφορίες που σχετίζονται με διάφορες εφαρμογές. Σε κάθε περίπτωση, το ποσό της πληροφορίας που ανταλλάσσεται κατά την ανίχνευση, καθορίζει και τους απαιτούμενους πόρους της ραδιοζεύξης. Έτσι αν το μέγεθος της πληροφορίας ανίχνευσης είναι μικρό, ένας ορισμένος αριθμός ακολουθιών είναι αρκετός για τα UE προκειμένου να επιτευχθεί ο εντοπισμός. Μπορεί λοιπόν με αυτό τον τρόπο να μεταδίδεται ένα περιορισμένο ποσοστό πληροφορίας, η μετάδοση και η λήψη όμως τέτοιων ακολουθιών δεν είναι περίπλοκη.

2. **Σύγχρονη και ασύγχρονη ανίχνευση.**

Ο συγχρονισμένος εντοπισμός υπερτερεί έναντι του ασύγχρονου τόσο σε επίπεδο κατανάλωσης ενέργειας, όσο και σε φασματική απόδοση ενώ οδηγεί σε πιο αξιόπιστη και γρήγορη ανίχνευση. Ωστόσο, θεωρώντας ότι ο συγχρονισμός πρέπει να προηγείται της ανίχνευσης, θα μπορούσαν να υπάρξουν προβλήματα στην περίπτωση του out-of-coverage σεναρίου. Για το λόγο αυτό, και τουλάχιστον για τις επικοινωνίες δημόσιας ασφάλειας, συμπεραίνουμε ότι τα UEs θα πρέπει να διαθέτουν και λειτουργίες για ασύγχρονο εντοπισμό.

2.2.4 Απευθείας επικοινωνία-DIRECT COMMUNICATION

Η απευθείας επικοινωνία UE-UE, χρησιμοποιεί κάποια από τα υπάρχοντα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του LTE, ωστόσο ορισμένες παράμετροι βρίσκονται ακόμα υπό διερεύνηση.

Αρχικά, ένα ζητούμενο είναι η επιλογή της διαμόρφωσης της κυματομορφής. Το LTE χρησιμοποιεί SCFDMA στο uplink και OFDMA στο Downlink επομένως, κάθε UE διαθέτει ένα πομπό SC-FDMA και ένα δέκτη OFDMA. Εάν για το D2D επιλέξουμε τη χρήση SC-FDMA, τότε κάθε UE θα πρέπει να εξοπλισθεί με ένα επιπρόσθετο δέκτη SC-FDMA (ισχύουν τα αντίστοιχα για την επιλογή OFDMA). Η υλοποίηση ενός ακόμα δέκτη SC-FDMA είναι πιο περίπλοκη σε σχέση με την εγκατάσταση ενός πομπού OFDMA, όμως ένας πομπός SC-FDMA εμφανίζει χαμηλότερο peak-to-average power ratio (PAPR).

3. Έλεγχος ισχύος

Ο έλεγχος ισχύος είναι απαραίτητος στις D2D επικοινωνίες τόσο για την εξοικονόμηση ενέργειας όσο και για τη μείωση των παρεμβολών. Η ισχύς του πομπού στο uplink ελέγχεται πλήρως από το eNodeB. Η δυνατότητα να έχει το UE ένα μερικό έλεγχο της εκπεμπόμενης ισχύος θα μπορούσε να μειώσει το control signaling overhead όπως και την καθυστέρηση. Για παράδειγμα, το eNodeB θα μπορούσε να είναι υπεύθυνο για έλεγχο ισχύος ανοικτού βρόχου, και να θέτει ένα επιτρεπτό εύρος ισχύος μέσα στο οποίο, κάθε UE μπορεί να χειριστεί ένα λεπτομερέστερο έλεγχο ισχύος κλειστού βρόχου και να προσαρμοστεί έτσι πιο αποτελεσματικά στις διακυμάνσεις της ποιότητας καναλιού.

4. Μετρήσεις καναλιού.

Για την αποτελεσματικότερη διαχείριση του ProSe, το δίκτυο πρέπει να γνωρίζει την κατάσταση των καναλιών των D2D links. Ανάλογα με τον τρόπο ελέγχου, τα αποτελέσματα των μετρήσεων μπορεί να αναφέρονται στο δίκτυο ή σε κάποιο UE. Για τη διαδικασία των μετρήσεων θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν τα υπάρχοντα σήματα αναφοράς του LTE ενώ και άλλες εναλλακτικές βρίσκονται ακόμα υπό μελέτη.

5. Λειτουργία HARQ

Η HARQ συνδυάζει forward error correction (FEC) και αναμετάδοση ARQ, και μπορεί να συνεισφέρει στο να γίνουν πιο σταθερές οι επικοινωνίες D2D αντιμετωπίζοντας τις σύνθετες αλλά και δυναμικές συνθήκες παρεμβολής που μπορεί να προκύψουν. Μπορεί να είναι είτε άμεση είτε έμμεση. Στην έμμεση περίπτωση, ένας δέκτης D2D αποστέλλει

αρχικά μια επιβεβαίωση λήψης (επιτυχής λήψη (ACK)/ανεπιτυχής (NACK)) στο eNodeB. Ακολούθως το eNodeB, το αναθέτει σε πομπό D2D. Η έμμεση HARQ επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση των υπαρχόντων καναλιών ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης του LTE με ελάχιστες αλλαγές. Αντίθετα, στην άμεση HARQ ένας D2D δέκτης στέλνει μια ανάδραση ACK ή NACK κατευθείαν σε ένα πομπό D2D. Η περίπτωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο στο in-coverage όσο και στο out-of-coverage σενάριο.

2.3 D2D Physical Layer

Στο physical layer, για τις broadcasting D2D επικοινωνίες επαναχρησιμοποιείται το φυσικό κανάλι ανερχόμενης ζεύξης PUSCH. Ο λόγος που υιοθετείται η χρήση ενός καναλιού του uplink, είναι διττός. Αφενός, στο PUSCH πομπός είναι το UE και δέκτης είναι το eNodeB. Όταν ένα UE στέλνει δεδομένα προς το eNodeB ένα άλλο UE μπορεί να δημιουργήσει D2D επικοινωνίες παράλληλα, με την προϋπόθεση ότι η παρεμβολή της D2D ζεύξης προς το eNodeB είναι περιορισμένη. Αντιθέτως, αν χρησιμοποιηθεί το κανάλι (PDSCH) του downlink για επικοινωνίες D2D, ο πομπός είναι το eNodeB. Έτσι, εάν 2 UE επικοινωνούν με D2D παράλληλα με την εκπομπή του Downlink, το eNodeB μπορεί να γίνει μια πηγή ισχυρής παρεμβολής που μειώνει σημαντικά την απόδοση του D2D. Συνεπώς, η λειτουργία των D2D επικοινωνιών στο PUSCH επιφέρει καλύτερη φασματική απόδοση.

Επιπρόσθετα, όπως έχουμε δει, τόσο το LTE όσο και το LTE-A χρησιμοποιούν στο uplink SC-FDMA και OFDMA στο downlink. Υπολογίζοντας λοιπόν ότι το peak to average power ratio (PAPR) στο SC-FDMA είναι χαμηλότερο από ότι στο OFDMA, η χρήση της PUSCH για D2D, έχει και καλύτερη ενεργειακή επίδοση.

Για την υποστήριξη των επικοινωνιών D2D, τα ακόλουθα φυσικά σήματα και κανάλια χρησιμοποιούνται συμπληρωματικά με την PUSCH. Ο μηχανισμός αυτός, που έχει αναπτυχθεί για την απευθείας επικοινωνία των συσκευών παρακάμπτοντας το eNodeB αναφέρεται και ως Sidelink.

•Sidelink Synchronization Signals and Physical Sidelink Broadcast Channel (PSBCH).

Από τη στιγμή που η συγχρονισμένη λειτουργία μπορεί να παράξει καλύτερες επιδόσεις στη διαχείριση της παρεμβολής, τη χρήση του φάσματος και την κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με την ασύγχρονη, θα πρέπει όλα τα eNodeB και όλα τα UE να έχουν μια κοινή χρονική αναφορά. Για το σκοπό αυτό, ένα eNodeB ή ένα UE, μπορεί να αναμεταδώσει τη χρονική του αναφορά, ώστε άλλα UE να συγχρονιστούν μαζί του, συνιστώντας έτσι την πηγή συγχρονισμού D2D (D2D synchronization source).Είναι δυνατόν να υπάρχουν πολλαπλές παρακείμενες πηγές συγχρονισμού. Τα σήματα που μεταφέρουν την πληροφορία συγχρονισμού αναφέρονται ως sidelink synchronization signals.

Επιπρόσθετα με τα sidelink synchronization signals,μια πηγή συγχρονισμού D2D εκπέμπει επίσης την PSBCH, που μεταφέρει πληροφορία για την υποστήριξη του D2D συγχρονισμού, όπως είναι:

- I. Ο αριθμός των frames για D2D επικοινωνίες.
- II. Το bandwidth του συστήματος
- III. Το ID της πηγής συγχρονισμού
- IV. Ο τύπος της πηγής συγχρονισμού(εάν δηλαδή πρόκειται για eNodeB ή UE)
- V. Ο τύπος πολυπλεξίας που χρησιμοποιείται (FDD ή TDD)
- VI. Το επίπεδο διαστρωμάτωσης (stratum level)

•Discovery Signal and Physical Sidelink Discovery Channel (PSDCH).

Η διαδικασία ανίχνευσης στα ανώτερα στρώματα ξεκινάει από την εφαρμογή που δημιουργεί το μήνυμα ανίχνευσης. Στο layer 1, η ανίχνευση D2D επιτυγχάνεται με την ανταλλαγή μηνυμάτων ανίχνευσης μέσω της PSDCH. Για το σκοπό αυτό, υπάρχουν δύο τύποι διαδικασιών ανίχνευσης που υποστηρίζονται από το Layer 1.

- **Τύπος 1:** Οι πόροι ραδιοζεύξης για την αναμετάδοση των σημάτων ανίχνευσης κατανέμονται ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν από όλα τα UE.

- **Τύπος 2:** Οι πόροι της ραδιοζεύξης ανατίθενται σε ένα μόνο UE και χρησιμοποιούνται μόνο από αυτό για την εκπομπή του σήματος ανίχνευσης.

Η διαδικασία ανίχνευσης τύπου 1 μπορεί να εφαρμοστεί στην περίπτωση του out-of-coverage σεναρίου, όπου η ανάθεση των πόρων ραδιοζεύξης μπορεί να ρυθμιστεί εκ των προτέρων από τους παρόχους. Από την άλλη, η διαδικασία τύπου 2 είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί από UE που βρίσκονται εντός κάλυψης όπου οι ράδιο πόροι προγραμματίζονται από ένα eNodeB.

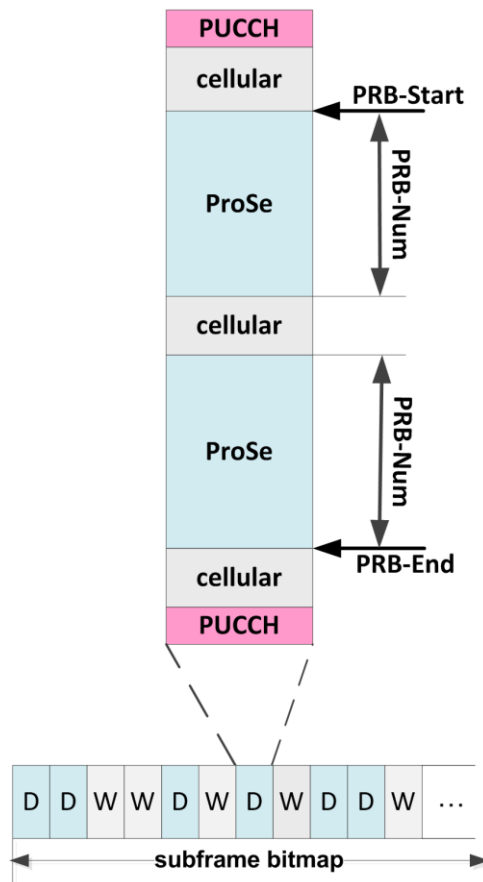
Σήμα αναφοράς. Για τη διευκόλυνση του στην αποκωδικοποίηση των δεδομένων, το UE πομπός μπορεί να εκπέμψει το λεγόμενο σήμα αποδιαμόρφωσης αναφοράς (demodulation reference signal-DMRS) ώστε ο δέκτης να μπορεί να πραγματοποιήσει εκτίμηση καναλιού. Στο LTE, το DMRS δεν παρέχει πληροφορίες καναλιού εκτός του εύρους της μπάντας, οπότε για τον υπολογισμό του CSI εκτός των διατιθέμενων πόρων ραδιοζεύξης, χρησιμοποιείται το sounding reference signal SRS. Ωστόσο, από τη στιγμή που οι πηγές των ράδιο-πόρων για το D2D προγραμματίζονται από το eNodeB ή είναι προ ρυθμισμένες, ο συχνοεπιλεκτικός προγραμματισμός εκτός αυτών των πηγών ράδιο πόρων, δεν είναι επιτρεπτός. Επομένως το SRS αποφεύγεται στις D2D επικοινωνίες.

6. Physical Sidelink Control Channel (PSCCH) and Physical Sidelink Share Channel (PSSCH).

Όπως το PUCCH και το PUSCH χρησιμοποιούνται στο uplink για την αναμετάδοση σημάτων ελέγχου και δεδομένων, έτσι και τα PSCCH και PSSCH χρησιμοποιούνται για τις εκπομπές ελέγχου και δεδομένων στο Layer 1 των D2D επικοινωνιών. Στο PSCCH, ένας πομπός D2D μπορεί να αναμεταδώσει πληροφορίες ελέγχου sidelink (sidelink control information-SCI) διαμόρφωσης 0. Είναι πιθανό, τα παραπάνω σήματα και κανάλια να καταλαμβάνουν τους ίδιους πόρους. Στην περίπτωση αυτή, τα σήματα συγχρονισμού sidelink και η PSBCH έχουν την υψηλότερη προτεραιότητα.

2.4 Resource Pools

Ένα κεντρικό στοιχείο της μετάδοσης και λήψης στη sidelink σύνδεση είναι η έννοια των Resource Pools (RP). Ένα pool πόρων είναι ένα σύνολο πόρων που εκχωρούνται στη λειτουργία sidelink. Αποτελείται από τα υποπλαίσια (subframes) και τα μπλοκ πόρων (Resource Blocks-RB) .



Σχήμα 2.4.Ανάθεση πόρων που θα χρησιμοποιηθούν για sidelink communication ^[15]

Στο παραπάνω σχήμα περιγράφονται οι πόροι για την επικοινωνία SL. Είτε ένα υποπλαίσιο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί είτε όχι για το sidelink, καταδεικνύεται σε ένα

subframe bitmap. Μετά από μια ρυθμιζόμενη περίοδο ελέγχου SL (περίοδος SC), ολόκληρο το σχέδιο επαναλαμβάνεται^[15].

Σε ένα τέτοιο υποπλαίσιο, οι πόροι που χρησιμοποιούνται για SL είναι σε δύο ζώνες, οι οποίες προσδιορίζονται από το καταλαμβανόμενο μπλοκ φυσικών πόρων (PRBs). Η μία μπάντα ξεκινά από το PRB-Start, και η άλλη καταλήγει στο PRB-End, έχοντας κάθε μια ένα εύρος πόρων PRB-Num. Η δομή αυτή επιτρέπει τη δημιουργία πολλών πόρων σε ένα υποπλαίσιο και τη χρήση των υπόλοιπων resource blocks από άλλα UEs, για κυψελοειδή κίνηση. Αξίζει να σημειωθεί ότι ένα UE χρησιμοποιεί ένα υποπλαίσιο σε έναν δεδομένο carrier είτε για κυψελοειδή κίνηση είτε για sidelink επικοινωνία, αλλά όχι και για τα δύο ταυτόχρονα.

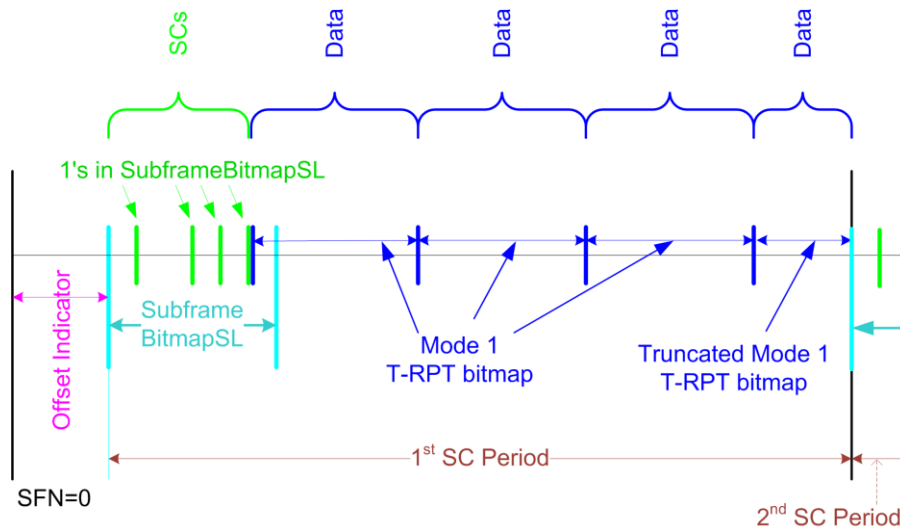
2.4.1 Ανάθεση των Resource Pools.

Υπάρχουν δύο τύποι RPs: Resource Pools λήψης (Rx RPs) και Resource Pools εκπομπής (Tx RPs). Η σηματοδότηση τους γίνεται είτε από το eNodeB στην περίπτωση του in coverage σεναρίου, ή έχει προκαθοριστεί για την περίπτωση εκτός κάλυψης. Φυσικά, για κάθε Tx RP πρέπει να υπάρχει ένα σχετικό Rx RP για να καταστεί δυνατή η επικοινωνία. Ωστόσο, μέσα σε μια κυψέλη μπορεί να υπάρχουν περισσότερα Rx RPs από τα Tx RPs. Με αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατή η λήψη από UEs σε γειτονικά κελιά ή από UEs εκτός κάλυψης.

Υπάρχουν δύο τρόποι αντιστοίχισης πόρων: Στη λειτουργία 1, το eNodeB υποδεικνύει τους πόρους που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για τη μετάδοση, συμπεριλαμβανομένων των πόρων μέσα σε ένα RP. Στη λειτουργία 2, το UE επιλέγει ένα RP και τους αντίστοιχους πόρους μέσα από μία ομάδα pools. Για τη λειτουργία τύπου 1 το UE πρέπει να βρίσκεται στην κατάσταση RRC_CONNECTED ενώ, η λειτουργία τύπου 2 λειτουργεί επίσης για UE είτε σε κατάσταση RRC_IDLE ή ακόμα και σε κατάσταση εκτός κάλυψης.

2.4.2 Υποπλαίσια (Subframes) σε ένα Resource Block

Σύμφωνα με τη δομή PSCCH / PSSCH της επικοινωνίας sidelink, το σύνολο υποπλαισίων, δηλ. το subframe bitmap, διαιρείται σε δύο περιοχές, την περιοχή ελέγχου και την περιοχή δεδομένων. Για τη λειτουργία τύπου 1, η αντιστοίχιση του υποπλαίσιου απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 2.5

Σχήμα 2.5: Παράδειγμα κατανομής subframe για τη λειτουργία 1 ^[15]

Η πρώτη περίοδος SC ξεκινά με μια μετατόπιση από SFN = 0 και επαναλαμβάνεται περιοδικά με ρυθμιζόμενη διάρκεια μεταξύ 40ms και 320 ms. Αρχίζει με την περιοχή ελέγχου που περιέχει το στοιχείο ελέγχου SCI0 το οποίο φέρει το PSCCH. Το Subframe BitmapSL υποδεικνύει τα υποπλαίσια που χρησιμοποιούνται για το PSCCH. Αμέσως μετά το τελευταίο bit του Subframe BitmapSL που έχει οριστεί σε 1, ξεκινά η περιοχή δεδομένων. Αποτελείται από ένα άλλο bitmap, το bitmap T-RPT, το οποίο είναι ένα bitmap που υποδεικνύει τα υποπλαίσια που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση δεδομένων. Αυτό το bitmap επαναλαμβάνεται μέχρι το τέλος της περιόδου SC, όπου η τελευταία εμφάνιση του μπορεί να περικοπεί.

Το bitmap T-RPT είναι δυναμικό και μπορεί ως εκ τούτου να είναι διαφορετικό για κάθε UE και για κάθε SC περίοδο.

Για τη λειτουργία 2 , η δομή είναι σχεδόν παρόμοια. Η κύρια διαφορά είναι ότι η έναρξη του τμήματος των δεδομένων, δεν εξαρτάται από το περιεχόμενο του Subframe BitmapSL, αλλά έχει σταθερή αντιστάθμιση από την αρχή της Περιόδου SC. Επιπλέον, ο αλγόριθμος για τον προσδιορισμό του προτύπου bitmap είναι κάπως διαφορετικός και μπορεί να αποκλείσει ρητά κάποιες διαμορφώσεις.

2.5 Μετάδοση δεδομένων

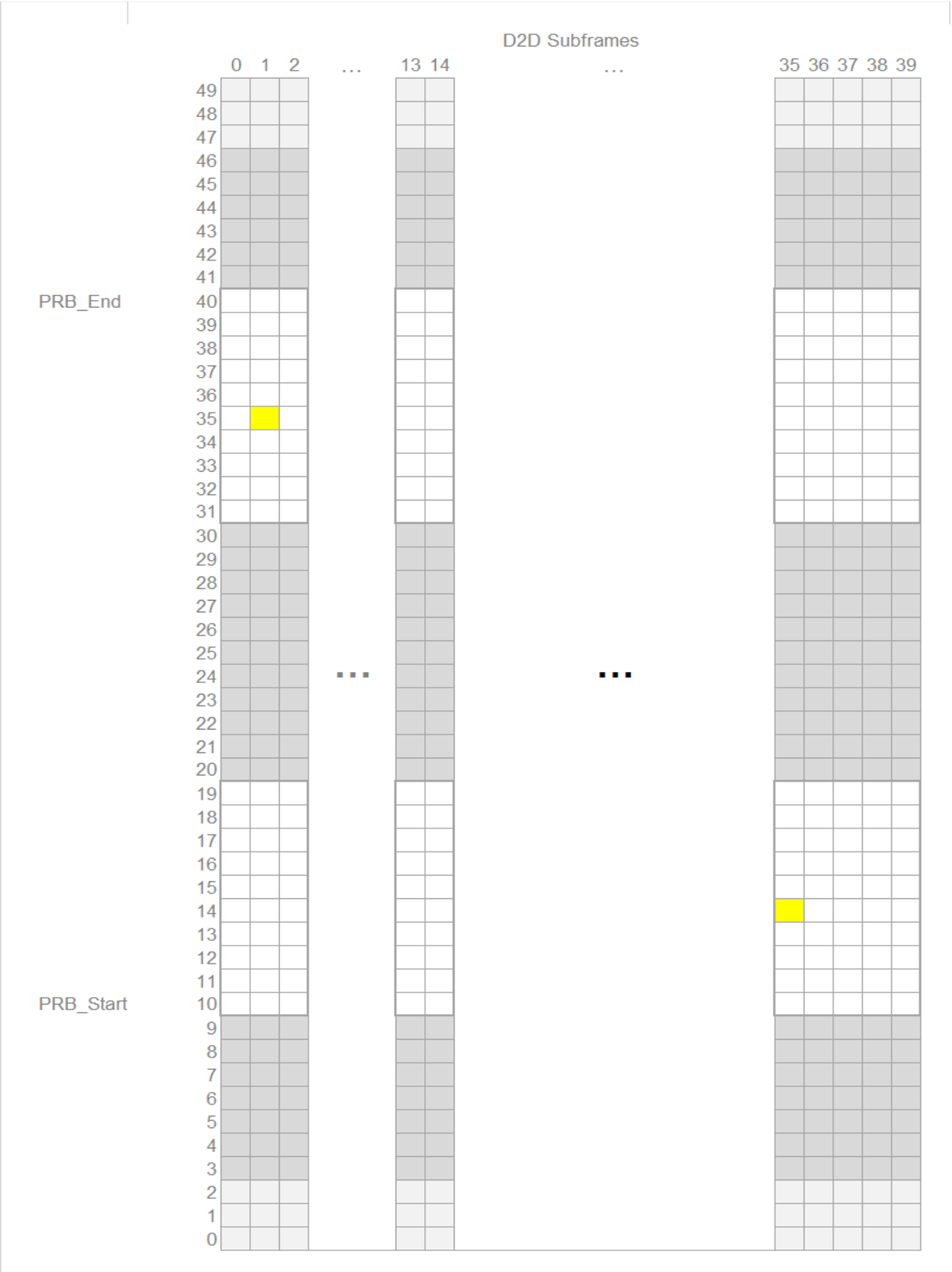
Στη Rel-12 υπάρχει μόνο μία μορφή Sidelink Control Information (SCI), η οποία είναι η SCI τύπου 0. Καθώς δεν υπάρχει διαδικασία HARQ, για να αυξηθεί η πιθανότητα της σωστής αποδιαμόρφωσης του περιεχομένου του SCI τύπου 0, στέλνονται δύο πανομοιότυπα αντίγραφα. Αυτές οι δύο πανομοιότυπες μεταδόσεις καταλαμβάνουν ένα ζεύγος RB αλλά σε διαφορετικά subframes. Με άλλα λόγια, το PSCCH μεταδίδεται δύο φορές, χρησιμοποιώντας πάντοτε διαμόρφωση QPSK.

Η μετάδοση SCI στο PSCCH λαμβάνει χώρα σε διαφορετικούς πόρους χρόνου και συχνότητας που επηρεάζονται από διάφορες παραμέτρους. Τρεις παράμετροι (PRB_Start, PRB_End, PRB_Num) καθορίζουν ποια resource blocks προορίζονται αποκλειστικά για μετάδοση σε subframe που είναι αφιερωμένο στο D2D. Ο συνολικός αριθμός των διαθέσιμων RBs (παράμετρος που ονομάζεται MPSCCH_RB) είναι μια πρώτη παράμετρος που επηρεάζει το ποια υποπλάισια και το ποιο RB σε αυτά τα υποπλάισια φέρει τη μετάδοση PSCCH. Ο πραγματικός αριθμός των subframes (LPSCCH) που χρησιμοποιείται για το D2D, καθορίζεται από τα bits που έχουν οριστεί σε «1» στο SubframeBitmap-SL, που παρέχεται από το SIB18^[15]. Ακόμα, οι πόροι συχνότητας- χρόνου που χρησιμοποιεί μια συσκευή για τη μετάδοση του PSCCH, επηρεάζονται από μια παράμετρο που ονομάζεται nPSCCH, η οποία ορίζεται από το eNodeB (στη λειτουργία 1). Ο σταθμός βάσης αποστέλλει αυτήν την παράμετρο στη συσκευή, ως μέρος των πληροφοριών προγραμματισμού. Τα MPSCCH και LPSCCH καθορίζουν ένα

ορισμένο εύρος που μπορεί να είναι το nPSCCH. Το eNodeB επιλέγει μία τιμή εκτός αυτής της περιοχής παραμέτρων και την αποστέλλει μεταξύ άλλων μέσω του DCI5 στο UE (Resource for PSSCH).

Ακολουθεί ένα παράδειγμα ^[15] όπου για λόγους απλούστευσης, εστιάζουμε μόνο σε μετάδοση τύπου 1 (πόρος προγραμματισμένος από το eNodeB μέσω DCI5) και με εύρος ζώνης σήματος 10 MHz (50 RB) για την ανερχόμενη ζεύξη. Η λειτουργία FDD χρησιμοποιείται ενώ, δύο ομάδες RB είναι διαθέσιμες ανά υποπλαίσιο (ορίζονται από PRB_Start, PRB_End), όπου το PRB_Num έχει οριστεί στο 10. Επομένως, το MPSCCH είναι 20 RB. Το nPSCCH πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 0 και 99 και στο παράδειγμα τίθεται ίσο με 55. Με αυτές τις παραμέτρους θα εμφανιστεί η πρώτη μετάδοση PSCCH χρησιμοποιώντας το 5ο RB στο υποπλαίσιο # 5 της περιόδου SC. Η δεύτερη μετάδοση θα χρησιμοποιήσει το 15ο RB στο υποπλαίσιο # 1. Οι καταλαμβανόμενοι πόροι σημειώνονται με κίτρινο σχήμα στο σχήμα. Ανά UE το eNodeB θα πρέπει να αντιστοιχεί μια διαφορετική τιμή για το nPSCCH, έτσι ώστε τα UE να χρησιμοποιούν διαφορετικούς πόρους, αποφεύγοντας έτσι τις συγκρούσεις.

Χρησιμοποιώντας τη λειτουργία 1, Το UE γνωρίζει τους πόρους χρόνου και συχνότητας για τη μετάδοση του SCI 0 και των δεδομένων. Στη λειτουργία 2, επιλέγει αυτούς τους πόρους από τη διαμορφωμένη ομάδα πόρων με τυχαίο τρόπο. Για την περίπτωση που έχουν ρυθμιστεί διάφορες ομάδες πόρων, το UE πάντα επιλέγει την πρώτη ομάδα πόρων, τουλάχιστον για το Release 12. Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν ότι μια βελτιστοποιημένη έκδοση του αλγόριθμου επιλογής είναι πιθανό να εμφανιστεί στις επόμενες εκδόσεις.



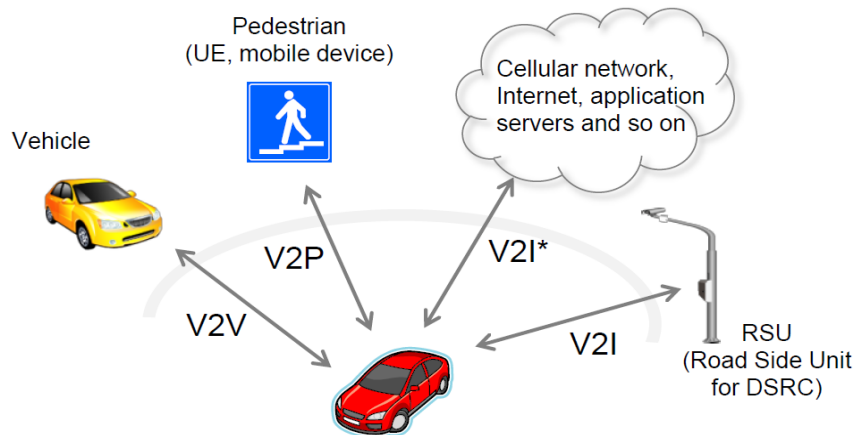
Σχήμα 2.6. Παράδειγμα μετάδοσης δεδομένων^[15]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Connected Vehicles

Με τον όρο Connected Vehicles αναφερόμαστε σε οχήματα που βρίσκονται τηλεπικοινωνιακά διασυνδεδεμένα μεταξύ τους, ανταλλάσσοντας δεδομένα χωρίς να είναι απαραίτητη η ύπαρξη κάποιου κεντρικού δικτύου τηλεφωνίας κυψελωτής δομής. Μια βασική κατηγοριοποίηση αυτής της μορφής τηλεπικοινωνιών, ανάλογα με το είδος των συσκευών που συμμετέχουν είναι η ακόλουθη:

7. V2V: Vehicle-to-Vehicle , όταν οχήματα διασυνδέονται κατευθείαν μεταξύ τους
8. V2I or I2V: Infrastructure-to-Vehicle , όταν οχήματα αλληλοεπιδρούν με δικτυακές υποδομές
9. V2X: Vehicle-to-Device, όταν αναφερόμαστε στην περίπτωση όπου οχήματα επικοινωνούν με οποιαδήποτε είδους ασύρματη συσκευή.

Η βασική ιδέα είναι η διασύνδεση των οχημάτων με τις οδικές δομές και τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, με βασικά πλεονεκτήματα την επέκταση της συνδεσιμότητας, τη βελτίωση της οδηγικής εμπειρίας αλλά και την ενίσχυση της οδικής ασφάλειας. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι επέκταση του IOT (Internet of Things).



Σχήμα 3.1. Connected vehicles (RP-141958 LG Electronics)

3.1 Είδη εφαρμογών

Οι εφαρμογές στις τηλεπικοινωνίες μεταξύ διασυνδεδεμένων οχημάτων μπορούν να διακριθούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

1.Οδική Ασφάλεια.

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται οι εφαρμογές που έχουν ως στόχο την πρόβλεψη ή την παροχή άμεσης βοήθειας σε περιπτώσεις τροχαίων ατυχημάτων. Ενδεικτικά μπορούμε να αναφέρουμε τις εξής: Προειδοποίηση σύγκρουσης προς τα εμπρός, ηλεκτρονικό φως φρένων έκτακτης ανάγκης, προειδοποίηση αλλαγής τυφλού σημείου / λωρίδας, βοήθεια κίνησης σε διασταύρωση, προειδοποίηση απώλειας ελέγχου κ.α.

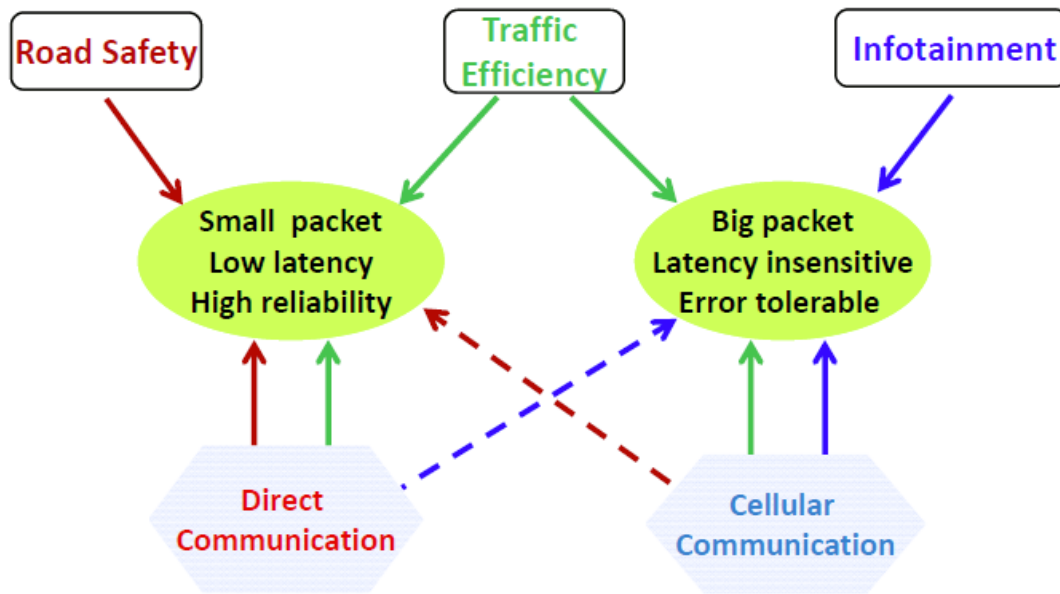
2.Βελτιστοποίηση οδικής κυκλοφορίας

Οι εφαρμογές αυτής της κατηγορίας έχουν ως στόχο τη διευκόλυνση του οδηγού σε συνθήκες καθημερινής κυκλοφορίας και μπορεί να περιλαμβάνουν την ηλεκτρονική πληρωμή διοδίων, πληροφορίες κίνησης οχημάτων κατά τη διαδρομή κλπ.

3.Ψυχαγωγία και ενημέρωση (Infotainment)

Μπορεί να περιλαμβάνει από εφαρμογές κοινωνικής δικτύωσης μέχρι πληροφορίες διαδρομής. Γενικά αποσκοπούν στην επέκταση των καθημερινών δραστηριοτήτων των επιβατών κατά τη διάρκεια του ταξιδιού, κάνοντας το πιο άνετο και ευχάριστο.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται οι τηλεπικοινωνιακές απαιτήσεις που έχει κάθε κατηγορία εφαρμογών καθώς και ο τύπος επικοινωνίας που την υποστηρίζει. Παρατηρούμε ότι η μεγάλη ποικιλία εφαρμογών δημιουργεί αντίστοιχα μεγάλες απαιτήσεις οι οποίες δεν είναι δυνατόν να καλυφθούν από μία μόνο τεχνολογία.



Σχήμα 3.2. Απαιτήσεις εφαρμογών V2V και διαθέσιμες τεχνολογίες για την κάλυψή τους^[13]

3.2. Διαθέσιμες τεχνολογίες.

Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για το V2X, περιλαμβάνουν τις παραδοσιακές WAN (Wireless Access Network) και τις Wi-Fi επικοινωνίες καθώς και την ασύρματη πρόσβαση σε περιβάλλοντα οχήματος (WAVE), η οποία βασίζεται στο DSRC για τα χαμηλότερα επίπεδα OSI και τέλος, στις εξελισσόμενες επικοινωνίες V2X βασισμένες στο LTE. Στην Ευρώπη, ισοδύναμο με το DSRC είναι το πρότυπο ETSI ITS-G5.1^[21]

Ειδικότερα για το V2V, ενώ τα κατώτερα στρώματα μπορεί να διαφέρουν (π.χ. στη κυματομορφή του σήματος που χρησιμοποιείται ή στη κατατομή του φάσματος σε κανάλια), η μεταφορά και ειδικότερα το applications layer, παρουσιάζουν ομοιότητες. Υπάρχουν προσπάθειες για την εναρμόνιση των πρωτοκόλλων μεταφοράς που χρησιμοποιούνται στις Η.Π.Α. με αυτά που αναπτύσσονται στην Ευρώπη. Τα μηνύματα του στρώματος εφαρμογών αναπτύσσονται από κατασκευαστές αυτοκινήτων σε διάφορους οργανισμούς τυποποίησης (π.χ. SAE, ETSI-ITS) με συμβολή από κοινοπραξίες (π.χ. Κοινοπραξία επικοινωνιών αυτοκινήτου) και έχουν πολύ παρόμοια δομή, με τα μηνύματα ασφαλείας.

Το DSRC βασίζεται στο IEEE 802.11p και είναι μια καθιερωμένη τεχνολογία. Σχεδιάστηκε σχεδόν πριν από δύο δεκαετίες ενώ, υποστεί εκτεταμένη τυποποίηση, ανάπτυξη προϊόντων και δοκιμές πεδίου από πολλούς ενδιαφερόμενους. Εταιρείες ημιαγωγών, όπως η Qualcomm, η NXP Semiconductors, η Renesas και η Autotalks, σχεδίασαν και δοκίμασαν προϊόντα συμβατά με DSRC, ενώ μια αυτοκινητοβιομηχανία των ΗΠΑ τοποθετεί μόντεμ DSRC στα νεότερα μοντέλα. Στην Ευρώπη, από το 2011, έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές εκδηλώσεις "plugtest" του ITS που διοργανώνει το ETSI, καθώς και εκτεταμένες δοκιμές πεδίου^[21].

Το IEEE 802.11p είναι το πρότυπο που υποστηρίζει ITS (Intelligent Transportation Systems) εφαρμογές σε Vehicular Ad hoc Networks (VANETs). Τα βασικά του πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν την ευκολία ανάπτυξης, το χαμηλό κόστος, την ώριμη τεχνολογία καθώς και την ικανότητα υποστήριξης V2V επικοινωνιών σε λειτουργία ad-hoc. Εμφανίζει όμως και μειονεκτήματα όπως προβλήματα κλιμάκωσης (scalability) και αξιοσημείωτες καθυστερήσεις. Επιπρόσθετα, λόγω της μειωμένης εμβέλειας, μπορεί να παράξει μόνο ασυνεχή και πρόσκαιρη V2I συνδεσιμότητα.

Το Cellular V2X είναι μια αναδυόμενη τεχνολογία που αξιοποιεί και ενισχύει τις υπάρχουσες λειτουργίες LTE, καθώς και των στοιχείων του δικτύου για να διευκολύνει την ανταλλαγή μηνυμάτων V2X μεταξύ οχημάτων και μεταξύ της υποδομής (infrastructure) και των οχημάτων. Το σύστημα αναπτύσσεται με βελτιώσεις στο radio layer και την αρχιτεκτονική, για την υποστήριξη τόσο των υφιστάμενων όσο και πιο προηγμένων σεναρίων χρήσης. Η ελκυστικότητα αυτής της νέας τεχνολογίας έγκειται στη δυνατότητα υποστήριξης περίπλοκων σεναρίων με αυστηρές απαιτήσεις Latency, αξιοπιστίας και εύρους ζώνης.

3.3 LTE BASED-V2X

3.3.1 Γενική περιγραφή

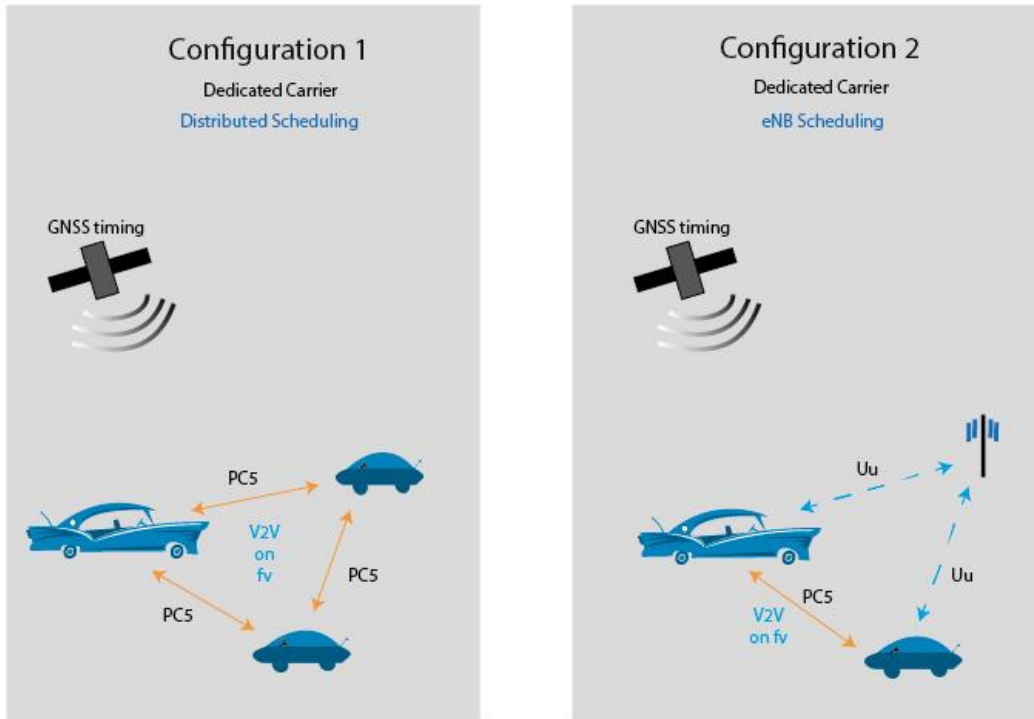
Το πρότυπο Cellular Vehicle-to-Everything (V2X), ολοκληρώθηκε το Σεπτέμβριο του 2016, και συμπεριλήφθηκε στη 3GPP Release 14 (Ιούνιος 2017) . Εστιάζει στην επικοινωνία οχήματος προς όχημα (V2V), με περαιτέρω βελτιώσεις για την υποστήριξη επιπρόσθετων σεναρίων λειτουργίας V2X.

Οι επικοινωνίες V2V βασίζονται στο D2D, με κάποιες τροποποιήσεις του sidelink για περιπτώσεις χρήσης σε οχήματα που κινούνται με υψηλές ταχύτητες ενώ η χωρική κατανομή τους μπορεί να παρουσιάζει υψηλή πυκνότητα.

Υπάρχουν δύο τρόποι λειτουργίας LTE V2X: απευθείας και μέσω του δικτύου.

- Η απευθείας επικοινωνία χρησιμοποιεί το interface LTE PC5, το οποίο βασίζεται στο πρότυπο 3GPP Release 12 ("ProSe" όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο). Έχει επίσης βελτιώσεις για να υποστηρίξει υψηλές ταχύτητες (άρα και επίδραση φαινομένου Doppler), υψηλή πυκνότητα οχημάτων, βελτιωμένο συγχρονισμό και μειωμένη καθυστέρηση μεταφοράς μηνυμάτων. Είναι κατάλληλη για απευθείας επικοινωνίες κοντινής απόστασης (της τάξης κάποιων εκατοντάδων μέτρων), όπως επίσης και για εφαρμογές ασφάλειας V2V που απαιτούν χαμηλό latency. Αυτή η λειτουργία μπορεί να λειτουργήσει τόσο στο in coverage όσο και στο out of coverage σενάριο.
- Η επικοινωνία μέσω δικτύου χρησιμοποιεί τη διεπαφή LTE Uu ,μεταξύ του UE που βρίσκεται στο όχημα και του eNodeB. Τα UE στέλνουν μηνύματα unicast μέσω του eNodeB σε ένα διακομιστή εφαρμογών, ο οποίος με τη σειρά τους αναμεταδίδει μέσω της εξελιγμένης υπηρεσίας Multimedia Broadcast Service (eMBMS) για όλα τα UEs που βρίσκονται στην εγγύς γεωγραφική περιοχή . Αυτός ο τρόπος λειτουργίας χρησιμοποιεί το υπάρχον δίκτυο LTE (WAN) και είναι κατάλληλο για περιπτώσεις με μεγαλύτερη ανοχή στο latency.

Και στις δυο περιπτώσεις ο συγχρονισμός γίνεται μέσω GNSS.



Σχήμα 3.3.V2V Scheduling ^[27]

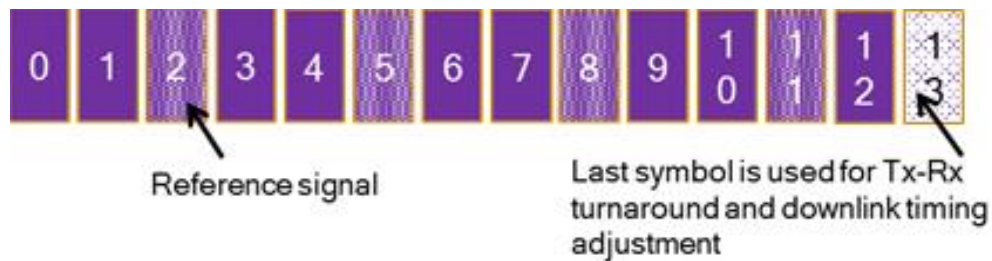
Είναι πιθανό ότι, ενώ το interface Uu χρησιμοποιεί το φάσμα του παρόχου του δικτύου, το interface PC5 να μπορεί να αναπτυχθεί σε ένα ξεχωριστό φάσμα, που προορίζεται για την άμεση επικοινωνία για εφαρμογές V2X.

Το LTE προσφέρει unicast και broadcast φορείς για τη μετάδοση δεδομένων. Μπορεί να συμπληρώσει τη μικρής εμβέλειας επικοινωνία για το V2X που παρέχεται από άλλες τεχνολογίες (π.χ. DSRC / 802.11p). Αυτός ο τύπος μετάδοσης εκπομπής μπορεί ενδεχομένως να προσεγγίσει περισσότερα οχήματα που βρίσκονται σε κάλυψη δικτύου, επειδή το δίκτυο μπορεί να ελέγξει το εύρος εκπομπής. Ως εκ τούτου, είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για τις υπηρεσίες τύπου V2I / V2N. Οι φορείς εκμετάλλευσης κινητής τηλεφωνίας μπορούν να παρέχουν πρόσθετες υπηρεσίες στους συμμετέχοντες στην οδική κυκλοφορία (π.χ. πληροφορίες για κυκλοφοριακή συμφόρηση / μπλοκαρισμένους δρόμους, χάρτες σε πραγματικό χρόνο, ενημερώσεις για την περιοχή, προτεινόμενη ταχύτητα κ.λπ.).

Η 3GPP εισήγαγε το MBMS για το LTE (ως eMBMS) από την έκδοση 9 . Στις Εκδόσεις 12 και 13, ενισχύθηκε για να επιτρέπει σε third party εφαρμογές να αλληλοεπιδρούν με το σύστημα MBMS και να διανέμουν την κυκλοφορία εφαρμογών. Στην έκδοση 14, η 3GPP έχει βελτιστοποιήσει περαιτέρω τον χειρισμό του QoS όπως και τον εντοπισμό διακομιστή για το V2X για να καλύψει τις απαιτήσεις latency 100 ms για ορισμένες υπηρεσίες V2N.

Ο άλλος τομέας βελτίωσης είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ διαφορετικών παρόχων. Οι συσκευές που είναι εγγεγραμμένες σε ένα πάροχο τηλεπικοινωνιών πρέπει να εξακολουθούν να είναι σε θέση να επικοινωνούν και να μοιράζονται πληροφορίες με συσκευές που έχουν εγγραφεί σε άλλο φορέα. Στην περίπτωση κοινού φάσματος για V2V, αυτή η λειτουργία είναι απλή. Αναμένεται ότι θα χρειαστεί κάποια συμφωνία μεταξύ των παρόχων όσον αφορά τη χρήση του ραδιοφάσματος.

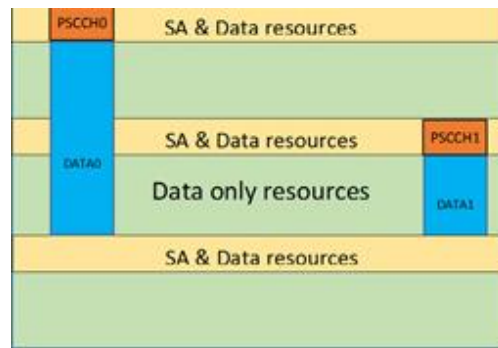
Η άμεση επικοινωνία μεταξύ συσκευών V2V βασίζεται στο D2D / ProSe. Για το σκοπό αυτό, έχουν εισαχθεί ορισμένες θεμελιώδεις τροποποιήσεις του PC5. Έτσι, πρόσθετα σύμβολα DMRS έχουν προστεθεί για να χειριστούν τη σημαντική επίδραση του φαινομένου Doppler που σχετίζεται με υψηλές ταχύτητες και σε υψηλή συχνότητα (5.9GHz). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δομή ενός subframe , παρόμοια με αυτή που απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.4. Subframe V2V στο PC5 interface [27]

Όπως βλέπουμε, το υποπλαίσιο V2V για διεπαφή PC5 έχει 4 σύμβολα DMRS, επιπλέον του συμβόλου περιστροφής Tx-Rx στο τέλος, επιτρέποντας την καλύτερη παρακολούθηση του καναλιού σε υψηλή ταχύτητα.

Ακόμα, συμφωνήθηκε μια νέα ρύθμιση σχετικά με την αντιστοίχιση προγραμματισμού και τους πόρους δεδομένων. Η διάταξη απεικονίζεται στο σχήμα 3.3 και έχει σχεδιαστεί για να βελτιώνει την απόδοση του συστήματος σε συνθήκες υψηλής πυκνότητας ενώ ικανοποιεί τις απαιτήσεις latency του V2V. Οι αναθέσεις προγραμματισμού (SA ή PSCCH) μεταδίδονται σε δευτερεύοντα κανάλια χρησιμοποιώντας συγκεκριμένα RBs στο επίπεδο του χρόνου. Οι μεταδόσεις δεδομένων που σχετίζονται με τις εν λόγω αναθέσεις προγραμματισμού καταλαμβάνουν γειτονικά RBs στο ίδιο subframe^[27].



Σχήμα 3.5.Αντιστοίχιση πόρων προγραμματισμού και δεδομένων ^[27]

3.3.2 Διαφοροποιήσεις σε σχέση με το D2D sidelink

Το sidelink V2X σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό στον τρόπο επικοινωνίας, με το Rel.12 / 13 sidelink. Δύο νέοι τρόποι επικοινωνίας sidelink εισάγονται στα αντίστοιχα 3GPP TSs / TRs, τα Mode-3 και Mode-4 (εκτός από τον υπάρχοντα Mode-1 και Mode-2) για να διακρίνουν το V2X από το "Standard" D2D. Τα παρακάτω νέα χαρακτηριστικά έχουν εφαρμοστεί για την αντιμετώπιση των ιδιαιτέρων χαρακτηριστικών των περιπτώσεων χρήσης των επικοινωνιών σε

οχήματα, δηλαδή τη μεγαλύτερη μεταβλητότητα των καναλιών, τη μικρότερη απαιτούμενη καθυστέρηση και την αυξημένη πυκνότητα των συσκευών:

* Ο αριθμός των σημάτων αναφοράς αποδιαμόρφωσης που μεταφέρονται σε κάθε υποπλαίσιο για τα V2X PSBCH, PSCCH και PSSCH έχει αυξηθεί προκειμένου να καταγραφούν οι συχνές αλλαγές καναλιών. Στο πρότυπο D2D χρησιμοποιούνται δύο DMRSs σε κάθε υποπλαίσιο, ενώ στο V2X PSBCH υπάρχουν τρία DMRS και στο V2X PSCCH / PSSCH υπάρχουν τέσσερα.

* Ο έλεγχος μετάδοσης V2X (PSCCH) και τα δεδομένα (PSSCH) μεταφέρονται στο ίδιο υποπλαίσιο, διαφορετικά από το πρότυπο D2D, όπου οι ομάδες υποπλαisiού ελέγχου και δεδομένων διακρίνονται σαφώς. Αυτή η νέα δυνατότητα επιτρέπει την αποκωδικοποίηση ενός PSSCH αμέσως μετά την ανάκτηση ενός PSCCH.

* Τα PSCCH και PSSCH για τη μετάδοση V2X μπορούν να εκχωρηθούν σε γειτονικά PRBs. Συγκεκριμένα, κάθε PSCCH φορτώνεται σε δύο διαδοχικά PRBs σε ένα μόνο υποπλαίσιο, ενώ στο πρότυπο D2D χρησιμοποιείται ένα PRB και δύο υποπλαίσια.

* Τα PRBs είναι οργανωμένα σε ομάδες που ονομάζονται "subchannels", και η κατανομή πόρων με βάση τη συχνότητα διαμορφώνεται με λεπτομερή διακριτικότητα.

* Το LTE eNodeB ελέγχει την επικοινωνία V2X χρησιμοποιώντας μηνύματα L1 DCI Format 5A, ενώ στο πρότυπο D2D αυτό γίνεται με τη χρήση μηνυμάτων Format 5.

* Εισάγεται ένα νέο μήνυμα ελέγχου, που ονομάζεται SCI τύπου 1 (SCI-1) για την ενημέρωση των ληπτών V2X UEs σχετικά με την επιλεγμένη κατανομή πόρων χρόνου-συχνότητας και τις ρυθμίσεις της μετάδοσης (τύπος διαμόρφωσης / κωδικοποίησης, κ.α.).

* Τα βήματα μεταφοράς και επεξεργασίας φυσικού καναλιού στο SCI τύπου 1 είναι τα ίδια με αυτά του τυποποιημένου D2D (SCI Format 0), εκτός από μια μικρή διαφορά στην παραγωγή ακολουθίας παρεμβολών PUSCH.

* Η επεξεργασία V2X SL-SCH είναι η ίδια με εκείνη του προτύπου D2D εκτός από την παραγωγή ακολουθίας παρεμβολών PUSCH.

* Κάθε μπλοκ μεταφοράς δεδομένων (SL-SCH) δεν χωρίζεται σε 4 υποπλαίσια όπως στο πρότυπο D2D, αλλά καλύπτει ακριβώς ένα υποπλαίσιο. Ακόμα, είναι επιτρεπτή μια αναμετάδοση του ίδιου μπλοκ σε ένα επόμενο υποπλαίσιο που ανήκει στην ομάδα πόρων V2V.

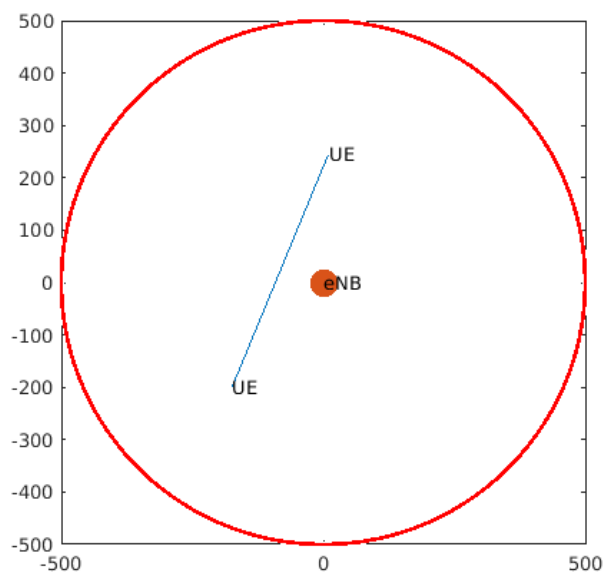
* Επιτρέπεται μόνο το κανονικό μήκος κυκλικού προθέματος στη λειτουργία επικοινωνίας V2X.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ D2D/V2V SIDELINK COMMUNICATION ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ

Στο πρακτικό μέρος της εργασίας προσομοιώθηκε η sidelink επικοινωνία (D2D και V2V) μεταξύ δυο χρηστών σε διάφορα περιβάλλοντα. Η προσομοίωση έγινε σε περιβάλλον MATLAB^{[23],[24],[25],[26]} και περιγράφεται από τα παρακάτω βήματα:

1. Τυχαία τοποθέτηση δύο UEs εντός κυκλικής κυψέλης ακτίνας 500m στο κέντρο της οποίας βρίσκεται το eNodeB και υπολογισμός της ευκλείδειας απόστασης μεταξύ των UEs (Σχήμα 4.1). Η επιλογή της ακτίνας έγινε με βάση το σκεπτικό ότι θεωρητικά το εύρος της απόστασης για το LTE direct κυμαίνεται περίπου στα 500 m, οπότε μέσα στην επιλεγμένη ακτίνα μπορούμε να παρατηρήσουμε πως μεταβάλλεται η επικοινωνία των UEs εντός των προβλεπόμενων αποστάσεων αλλά και σε ποια όρια χάνεται.



Σχήμα 4.1 Τυχαία τοποθέτηση δυο UEs εντός κυκλικής κυψέλης και υπολογισμός της μεταξύ τους απόστασης

2. Για την προσομοίωση του ασύρματου καναλιού επικοινωνίας επιλέχθηκε ένα Rayleigh Fading Channel (flat frequency). Το επιθυμητό BW του καναλιού είναι 5 MHz, με sampling rate

7.68 MHz, οπότε η περίοδος δειγματοληψίας ορίστηκε ως $T_s=13 \cdot 10^{-8}$ s. Για τον υπολογισμό της επίδρασης του φαινομένου Doppler, στην περίπτωση κινούμενων UEs, χρησιμοποιείται εξ ορισμού από το MATLAB το μοντέλο Jakes. Η μέγιστη μετατόπιση συχνότητας f_d λόγω Doppler υπολογίζεται από τη σχέση

$$f_d = \frac{f \cdot v}{c}$$

Όπου f η συχνότητα του σήματος (σε Hz), v η ταχύτητα του UE (σε m/s) και c η ταχύτητα διάδοσης του σήματος που τίθεται ίση με την ταχύτητα του φωτός (σε m/s επίσης).

3. Προσομοίωση της Sidelink επικοινωνίας μεταξύ πομπού και δέκτη σε physical layer. Αφού το σήμα του πομπού δημιουργηθεί, υφίσταται την επίδραση των απωλειών διαδρομής, προστίθεται θόρυβος και διαβιβάζεται στο κανάλι Rayleigh. Για τον υπολογισμό των απωλειών διάδοσης (Path loss-PL), χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο WINNER II^[30] το οποίο για την περίπτωση free space, line of sight περιβάλλοντος περιγράφεται από τη σχέση

$$PL = A \cdot \log_{10}(D) + B + 20 \cdot \log_{10}(f/5)$$

Όπου D η απόσταση σε m, f η συχνότητα σε GHz και A, B, C παράμετροι που εξαρτώνται από τα διάφορα περιβάλλοντα. Το συγκεκριμένο πρότυπο επιλέχθηκε γιατί καλύπτει το απαιτούμενο εύρος συχνοτήτων (2.4 GHz για το D2D και 5.9 GHz για το V2V), όπως επίσης και ταχύτητες μέχρι 350 km/h ανάλογα με την περίπτωση.

Στη συνέχεια το σήμα φθάνει στο δέκτη όπου αποκωδικοποιείται και γίνεται η ανάκτηση των απεσταλμένων δεδομένων. Τέλος στο δέκτη γίνεται ο υπολογισμός του Signal to Noise Ratio (SNR) σε dB και του Bit Error Rate (BER) του ληφθέντος σήματος (σημειώνεται ότι η χρησιμοποιούμενη διαμόρφωση είναι QPSK).

4. Επανάληψη του αλγορίθμου 1000 φορές για κάθε σενάριο και καταγραφή για κάθε τυχαίο ζεύγος UEs της απόστασης, του SNR και του BER. Κατασκευή διαγραμμάτων SNR συναρτήσει της απόστασης, BER συναρτήσει της απόστασης και BER συναρτήσει του SNR για

κάθε περίπτωση και σύγκριση των αποτελεσμάτων. Πρέπει τέλος να σημειωθεί ότι το ελάχιστο BER που μπορεί καταγραφεί από τον αλγόριθμο είναι της τάξης του 10^{-4} .

Η επιλογή των σεναρίων που υλοποιήθηκαν έγινε με βάση το τύπο του περιβάλλοντος αλλά και την ταχύτητα των UEs, και η υλοποίησή τους έγινε ξεχωριστά για το D2D και το V2V. Έτσι, για το D2D έχουμε τις εξής περιπτώσεις

- **Τυπικό αστικό περιβάλλον και ακίνητοι χρήστες (URBAN, $f_d=0$)**

Στην περίπτωση αυτή οι απώλειες διαδρομής δίνονται από τη σχέση

$$PL=22.7*\log_{10}(D)+41+20*\log_{10}(2.4/5)$$

ενώ, η μετατόπιση συχνότητας λόγω Doppler είναι μηδενική.

- **Τυπικό αστικό περιβάλλον και χρήστες κινούμενοι με ταχύτητα 1m/sec (URBAN, $f_d=20\text{Hz}$)**

Οι απώλειες διαδρομής είναι ίδιες με προηγουμένως ενώ, επιλέχθηκε μια τυπική ταχύτητα χρηστών που κινούνται με τα πόδια, ίση με 1m/s. Η μετατόπιση συχνότητας λόγω Doppler στην περίπτωση αυτή υπολογίζεται ίση με $f_d=20\text{Hz}$.

- **Περιβάλλον πυκνοκατοικημένης μητρόπολης και ακίνητοι χρήστες (METROPOL, $f_d=0$)**

Οι απώλειες διαδρομής τώρα δίνονται από τη σχέση

$$PL=26*\log_{10}(D)+39+20*\log_{10}(2.4/5)$$

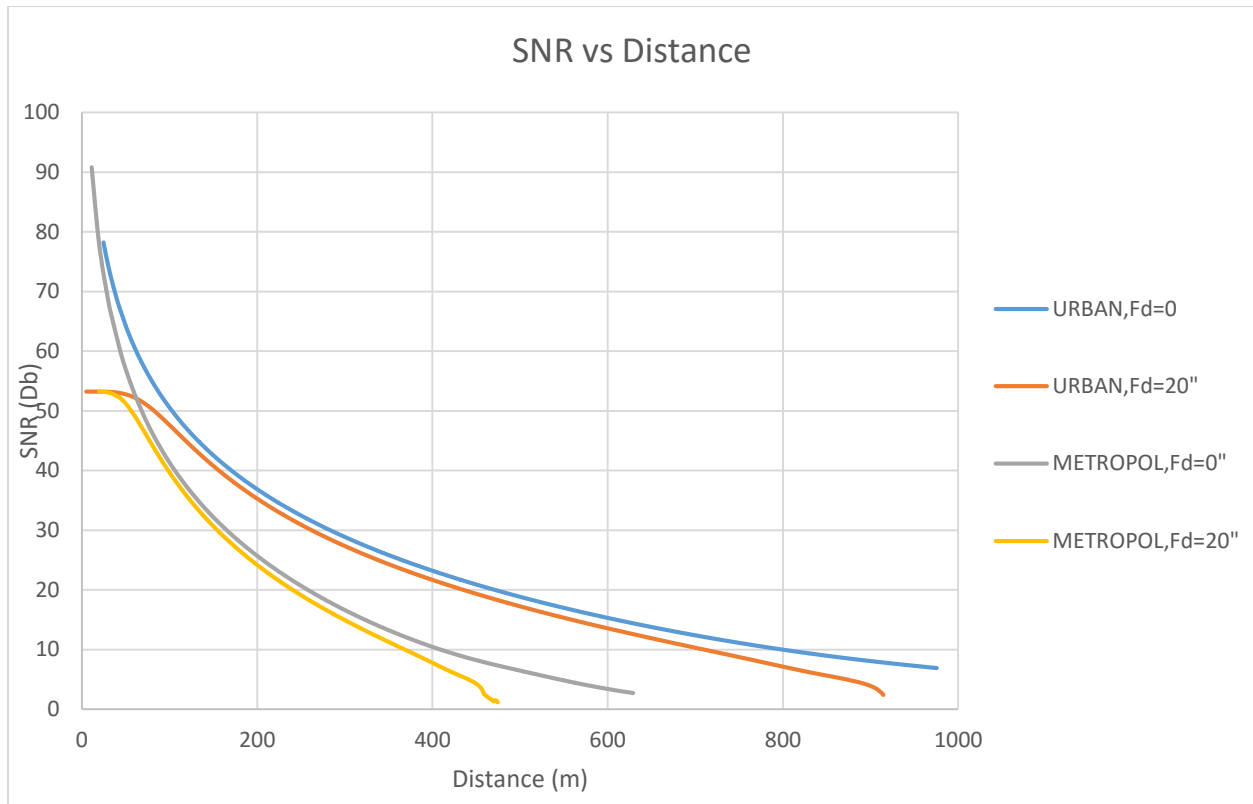
και η μετατόπιση συχνότητας λόγω Doppler είναι μηδενική.

- **Περιβάλλον πυκνοκατοικημένης μητρόπολης και χρήστες κινούμενοι με ταχύτητα 1m/sec (METROPOL, $f_d=20\text{Hz}$)**

Οι απώλειες διαδρομής είναι ίδιες με προηγουμένως και η μετατόπιση συχνότητας λόγω Doppler είναι $f_d=20\text{Hz}$.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συνοψίζονται στα παρακάτω συγκεντρωτικά διαγράμματα:

- Διάγραμμα1: Σχέση SNR-απόστασης (D2D)

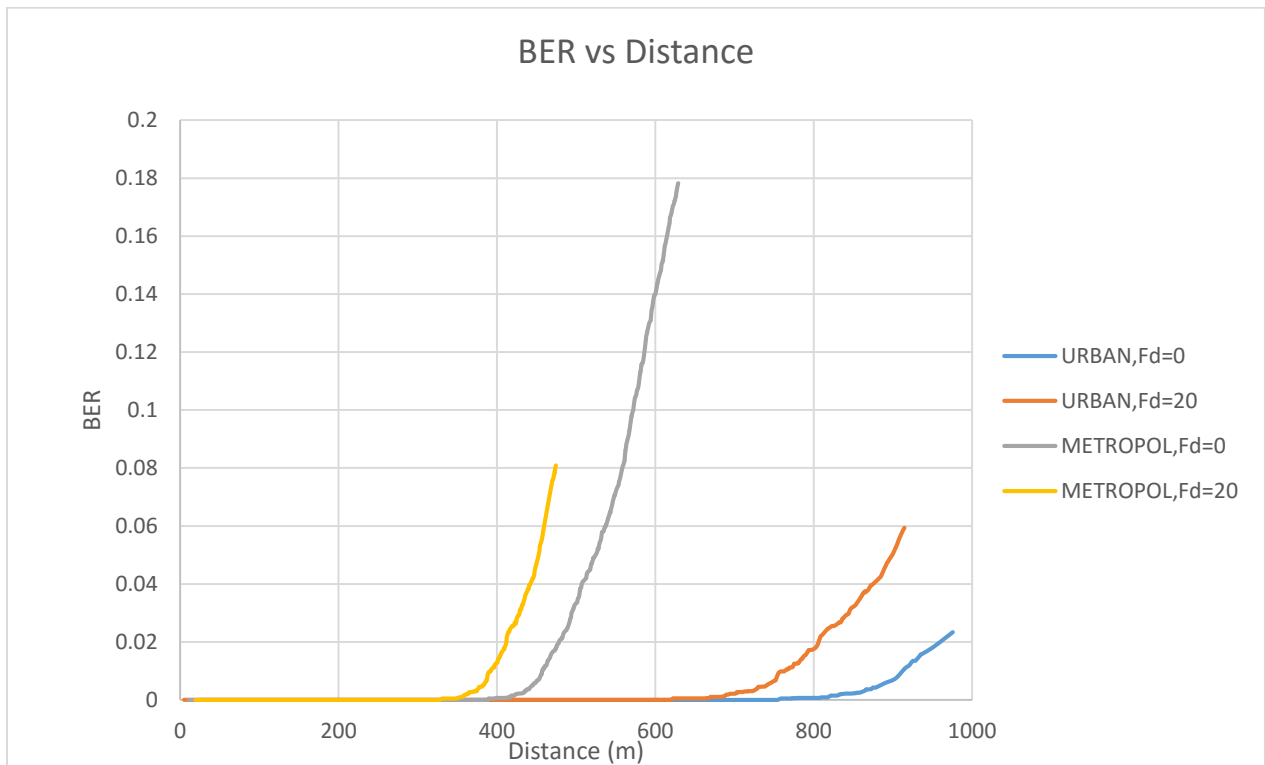


Όπως παρατηρούμε, οι μέγιστες τιμές του SNR είναι παρόμοιες για τους χρήστες που κινούνται με την ίδια ταχύτητα (περίπου 90 dB για μηδενική ταχύτητα και 55 dB για ταχύτητα 1m/s) και στο αστικό και στο μητροπολιτικό περιβάλλον. Όπως αναμένεται ο ρυθμός πτώσης του SNR συναρτήσει της απόστασης είναι μεγαλύτερος στο πιο πυκνοκατοικημένο περιβάλλον.

Η επίδραση της ταχύτητας είναι σημαντική, ακόμα και σε αυτήν την περίπτωση που οι χρήστες κινούνται αργά, αφού το μέγιστο SNR μειώνεται κατά 35 περίπου dB και στις δύο περιπτώσεις. Παράλληλα, αν θεωρήσουμε ότι για μια οριακά ανεκτή επικοινωνία το SNR πρέπει να είναι τουλάχιστον 10 dB, παρατηρούμε ότι η μέγιστη απόσταση κυμαίνεται από τα 800 μέτρα για αστικό περιβάλλον και μηδενική ταχύτητα μέχρι περίπου τα 350 μέτρα για μητροπολιτικό

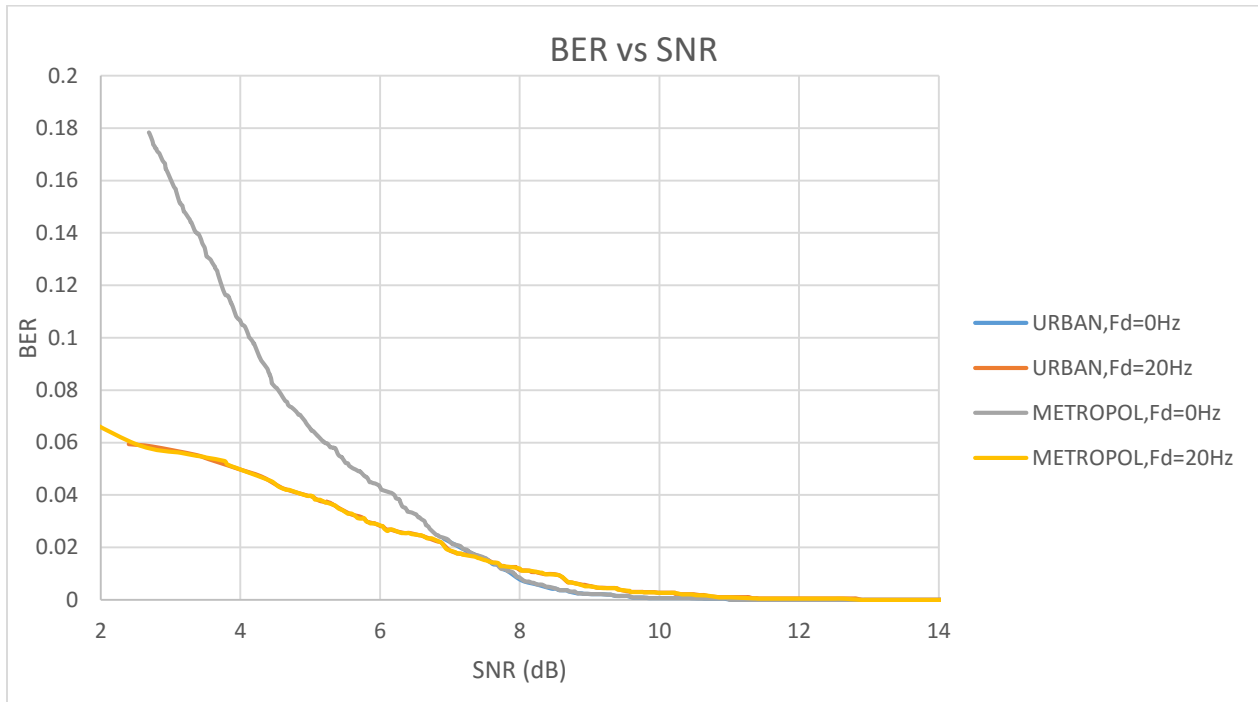
περιβάλλον και ταχύτητα 1m/s παρουσιάζοντας σημαντική μεταβολή. Τέλος βλέπουμε ότι η ύπαρξη ταχύτητας στο ίδιο περιβάλλον, μειώνει τη μέγιστη απόσταση κατά 100 περίπου μέτρα.

- Διάγραμμα 2: Σχέση BER-απόστασης (D2D)



Παρατηρούμε ότι ο ρυθμός αύξησης του BER επηρεάζεται τόσο από το περιβάλλον όσο και από την ταχύτητα. Όσο πιο πυκνό είναι το περιβάλλον, για χρήστες που κινούνται με την ίδια ταχύτητα, η αύξηση του BER ξεκινάει κατά 400 μέτρα νωρίτερα. Έτσι ενώ για ένα χρήστη που βρίσκεται ακίνητος σε αστικό περιβάλλον το BER αρχίζει να αυξάνεται σημαντικά περίπου από τα 800 m, η αντίστοιχη απόσταση είναι περί τα 400 μέτρα. Σε ανάλογα συμπεράσματα καταλήγουμε και για τους κινούμενους χρήστες. Όταν προστεθεί και η επίδραση της ταχύτητας ο ρυθμός της μεταβολής αυξάνεται ελαφρά όπως φαίνεται από τη διαφορά στην κλίση των καμπυλών που αφορούν τα ίδια αστικά περιβάλλοντα.

- Διάγραμμα 3: Σχέση BER-SNR (D2D)



Όπως προκύπτει από το διάγραμμα, το BER αυξάνεται βαθμιαία όταν το SNR πέφτει κάτω από μια τιμή περίπου 10 dB. Οι καμπύλες που αφορούν τις ίδιες ταχύτητες συμπίπτουν και για το αστικό και για το μητροπολιτικό περιβάλλον. Παρατηρούμε ότι μέχρι το SNR να πέσει περίπου στα 7 dB, για τους κινούμενους χρήστες το BER είναι ελαφρώς υψηλότερο, για χαμηλότερες τιμές όμως οι καμπύλες παρουσιάζουν μεγαλύτερη κλίση για την περίπτωση των ακίνητων χρηστών. Καταλαβαίνουμε λοιπόν ότι κάτω από το όριο των 10 dB η ποιότητα της επικοινωνίας είναι προβληματική αφού η μείωση της ποιότητας του σήματος συνοδεύεται από κλιμακούμενη αύξηση του BER.

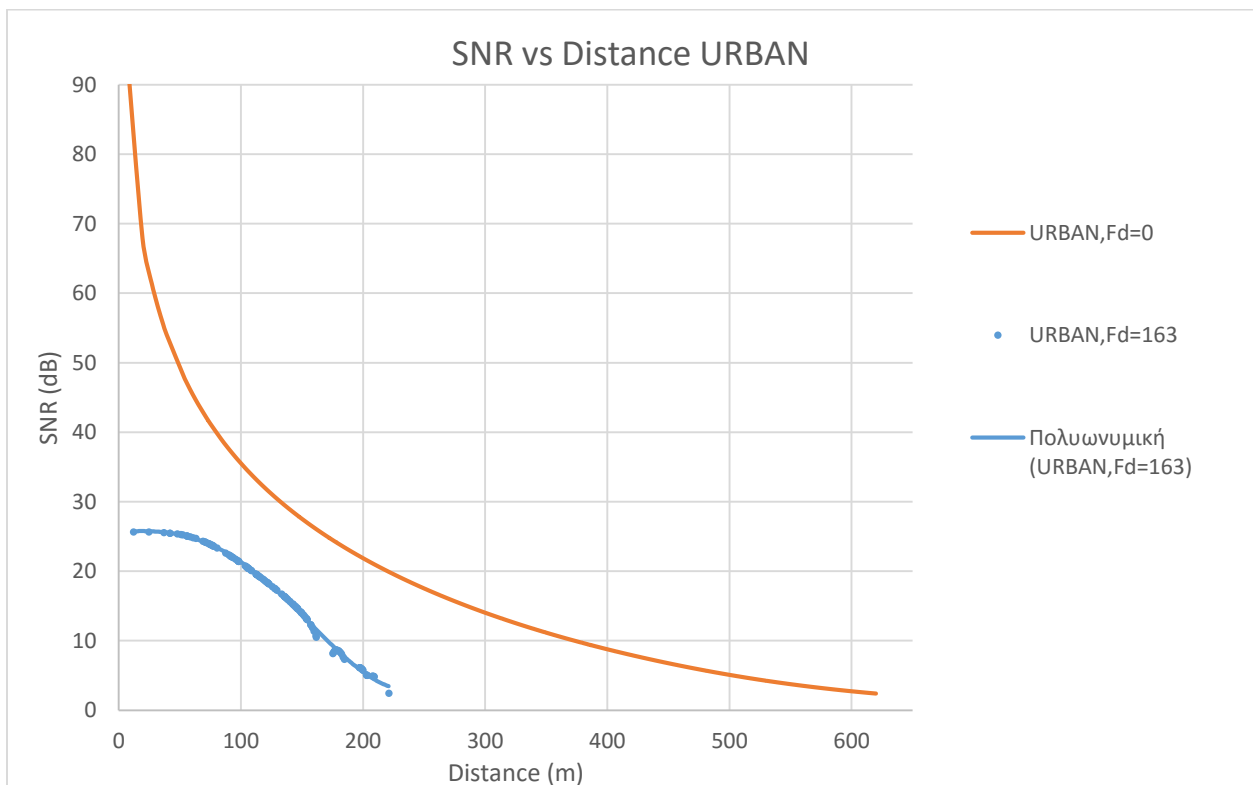
Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι για τους μεν ακίνητους χρήστες τόσο στο αστικό όσο και στο μητροπολιτικό περιβάλλον, η τιμή του SNR για την οποία παρατηρείται $BER > 10^{-4}$ είναι περίπου 11 dB, η αντίστοιχη τιμή για τους κινούμενους χρήστες είναι τα 13 dB.

Η προσομοίωση τώρα του V2V έγινε για τα ίδια αστικά περιβάλλοντα, επιλέγοντας και ως ταχύτητα κίνησης τα 30 km/h που αποτελούν μια μέση ταχύτητα κίνησης οχημάτων εντός πόλης.

- **Τυπικό αστικό περιβάλλον και χρήστες που κινούνται με ταχύτητες 0 και 30 km/h (V2V URBAN)**

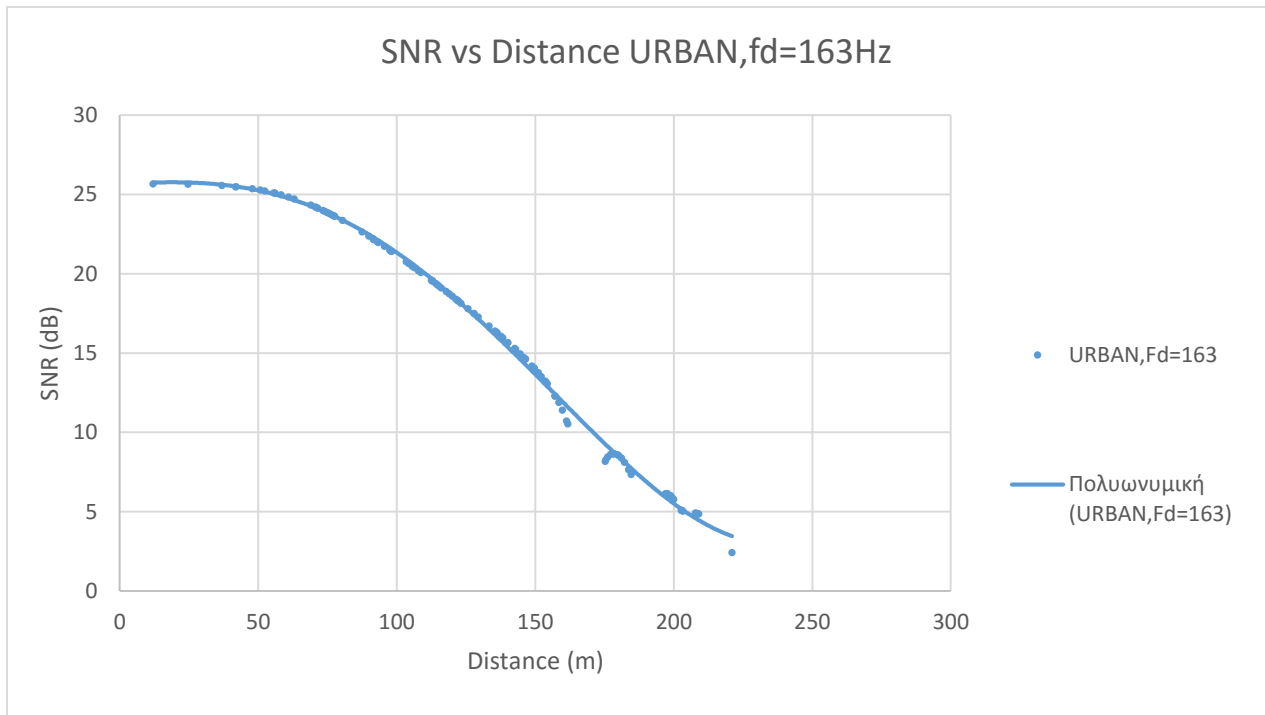
Οι απώλειες διαδρομής δίνονται από τη σχέση $PL=22.7*\log_{10}(D)+41+20*\log_{10}(5.9/5)$, και η μετατόπιση συχνότητας λόγω Doppler υπολογίζεται στα 0 και 163 Hz αντίστοιχα. Από τις μετρήσεις προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα

- Διάγραμμα 4: Σχέση SNR-απόστασης (V2V URBAN)



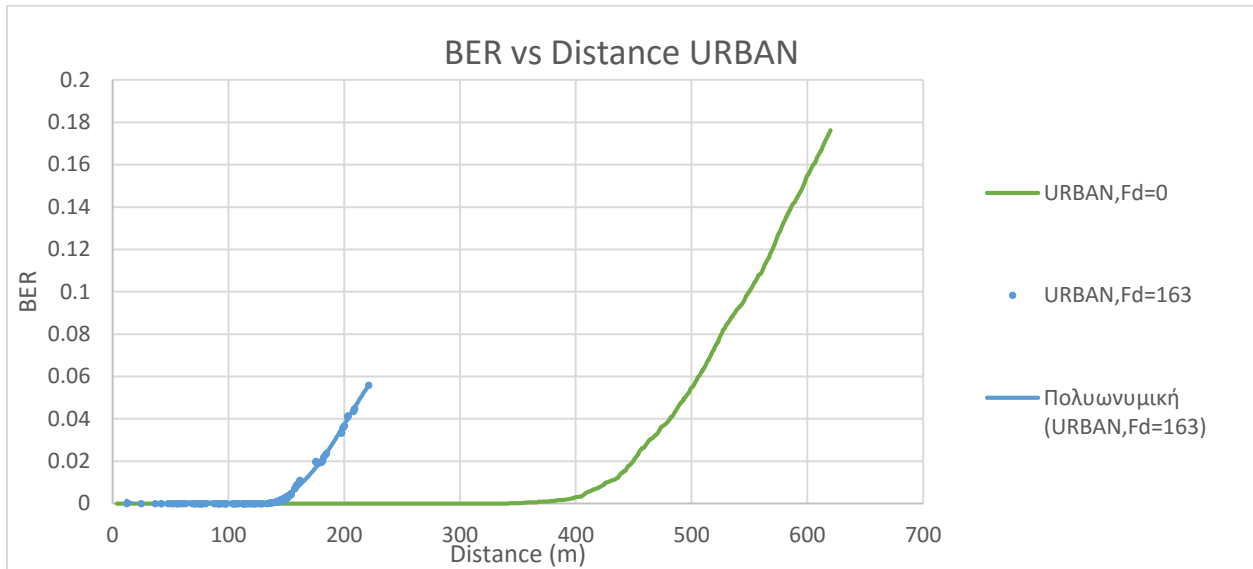
Από το παραπάνω διάγραμμα μπορούμε να επισημάνουμε τα εξής: όσον αφορά τους ακίνητους χρήστες , παρατηρούμε ότι η τιμή του SNR πέφτει κάτω από τα 10 dB από τα 370 περίπου μέτρα, δηλαδή αρκετά νωρίτερα από το αντίστοιχο D2D σενάριο. Αυτό οφείλεται στη διπλάσια συχνότητα του σήματος που από 2.4 GHz για το D2D γίνεται 5.9 GHz στο V2V. Η επίδραση της ταχύτητας είναι πολύ έντονη εδώ ,αφού μειώνεται σημαντικά τόσο η μέγιστη απόσταση, όσο και το μέγιστο SNR.Ακολουθεί το αντίστοιχο διάγραμμα που αφορά μόνο τους κινούμενους χρήστες

- Διάγραμμα 5: Σχέση SNR-απόστασης (V2V URBAN,fd=163Hz)



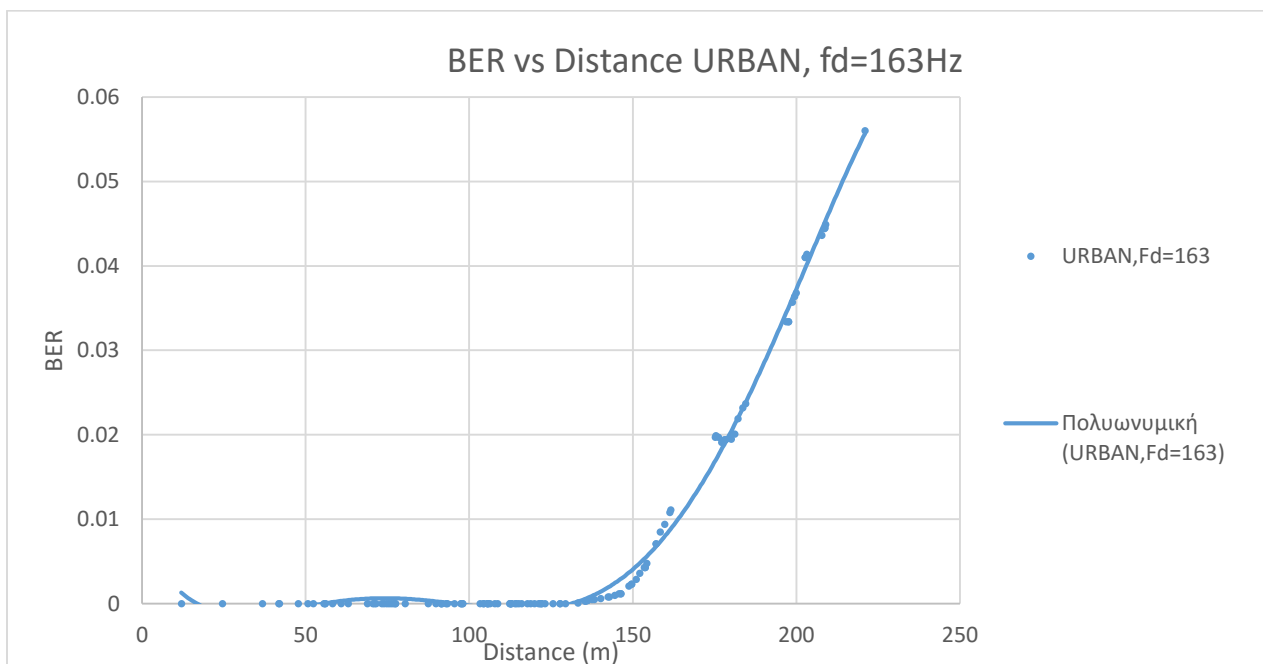
Παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή SNR μόλις ξεπερνά τα 25 dB σημαντικά χαμηλότερη από την αντίστοιχη των ακίνητων UEs (περίπου 70 dB). Η μέγιστη απόσταση SNR>10 dB κυμαίνεται γύρω στα 160 m ενώ, για ακίνητους χρήστες μπορεί να φτάσει τα 370 m

- Διάγραμμα 6: Σχέση BER-απόστασης (V2V URBAN)



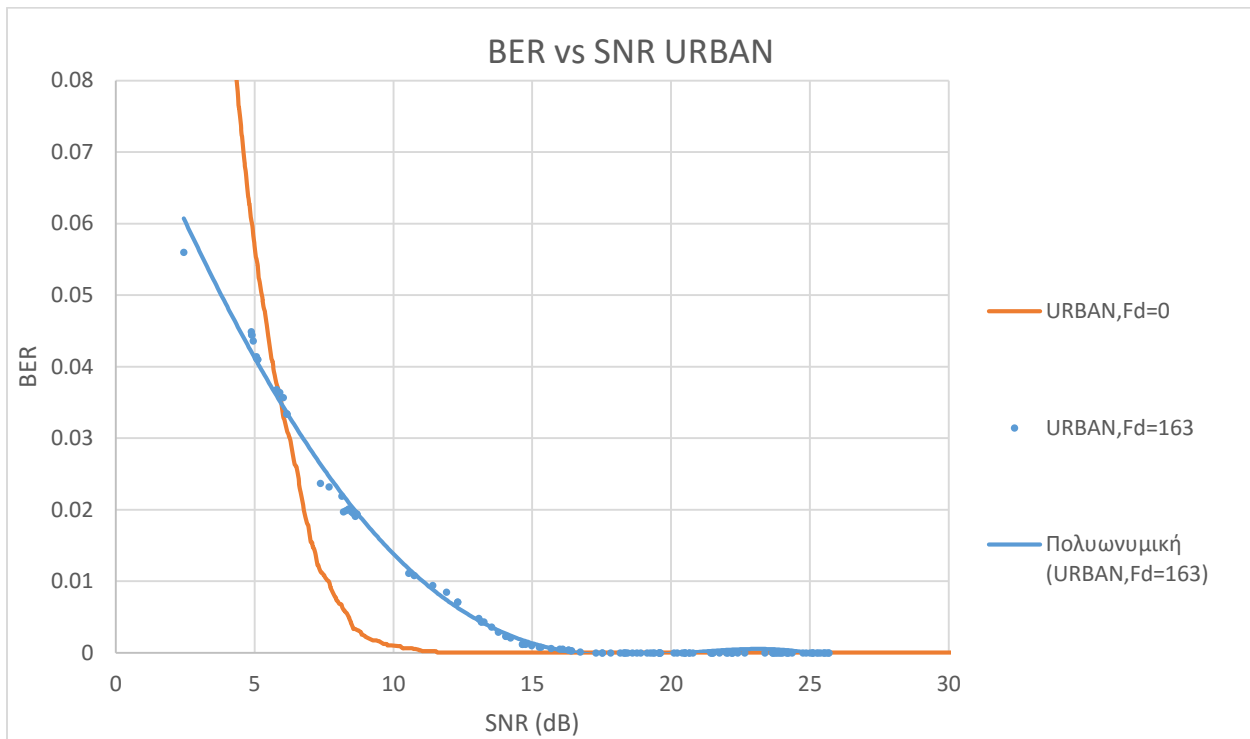
Και πάλι βλέπουμε ότι το bit error rate αρχίζει να αυξάνεται σε μικρότερη απόσταση όσο αυξάνεται η ταχύτητα. Μόνο για κινούμενους χρήστες το αντίστοιχο διάγραμμα είναι:

- Διάγραμμα 7: Σχέση BER-απόστασης (V2V URBAN, $f_d=163$ Hz)



Από τα 130 m, η τιμή του BER είναι μεγαλύτερη του 0,0001 ενώ για ένα ακίνητο χρήστη κάτι τέτοιο συμβαίνει στα 340 m. Η διαφορά είναι σημαντική αφού εκτός από τη μείωση της ισχύος του σήματος υπεισέρχεται και σημαντικό BER σε πολύ μικρότερες αποστάσεις.

- Διάγραμμα 8: Σχέση BER-SNR (V2V URBAN)

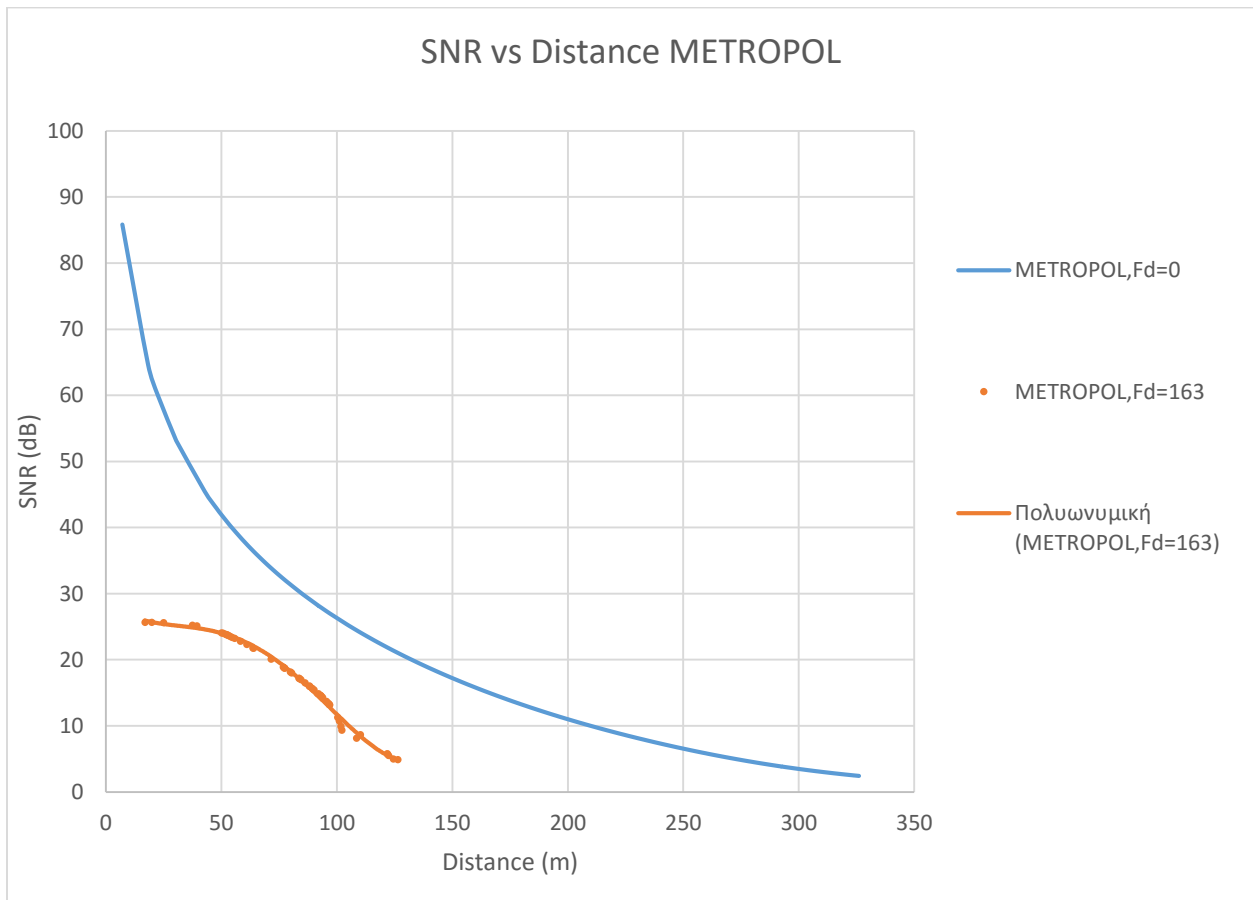


Όπως παρατηρούμε όσο αυξάνεται η ταχύτητα εμφανίζεται μη μηδενικό BER ακόμα και με SNR μεγαλύτερο από 15 dB, γεγονός που γίνεται πιο έντονο στην περιοχή 10-15 dB που θεωρείται και οριακή για την επικοινωνία, και μπορεί να προκαλέσει προβλήματα σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλά data rates. Όπως αναμένεται το BER αυξάνεται βαθμιαία καθώς το SNR πέφτει κάτω από τα 10 dB.

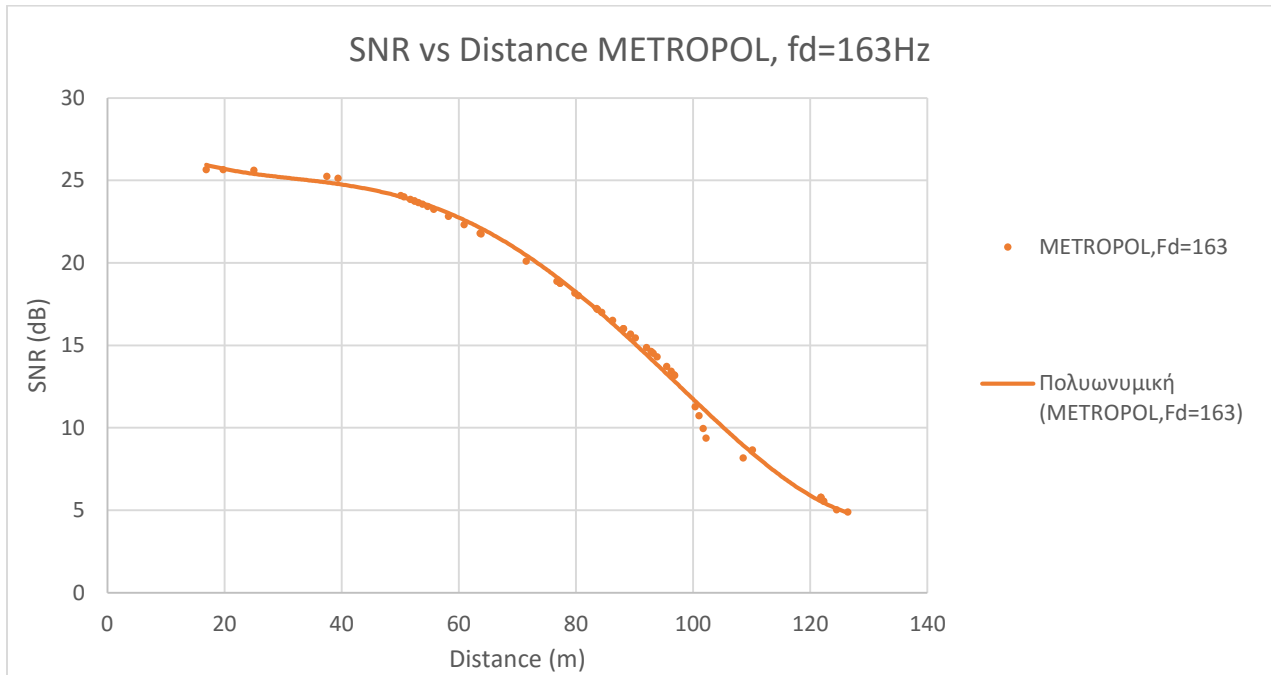
- Περιβάλλον πυκνοκατοικημένης μητρόπολης και χρήστες κινούμενοι με ταχύτητες 0 και 30 km/h (V2V METROPOL)

Οι απώλειες διαδρομής δίνονται από τη σχέση $PL=26*\log_{10}(D)+39+20*\log_{10}(5.9/5)$, ενώ η μετατόπιση συχνότητας λόγω Doppler είναι ίδια με προηγουμένως. Από τις μετρήσεις προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα κατ' αντιστοιχία με το προηγούμενο σενάριο

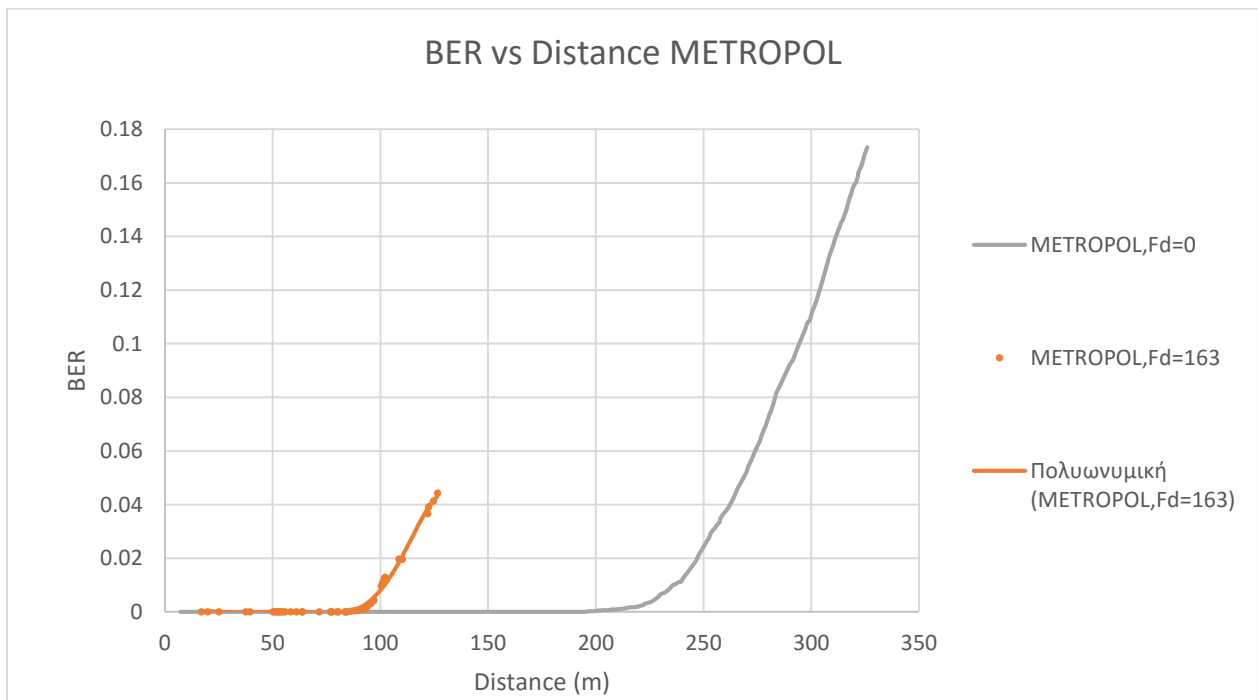
- Διάγραμμα 9: Σχέση SNR-απόστασης (V2V METROPOL)



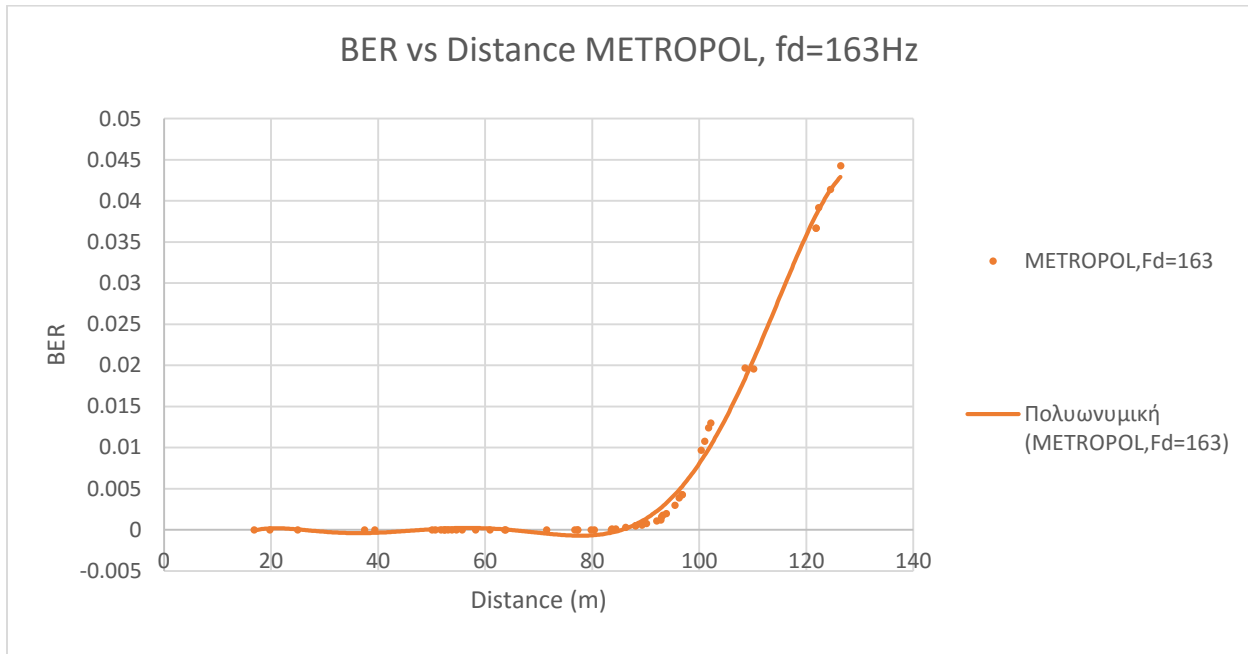
- Διάγραμμα 10: Σχέση SNR-απόστασης (V2V METROPOL, $f_d=163\text{Hz}$)



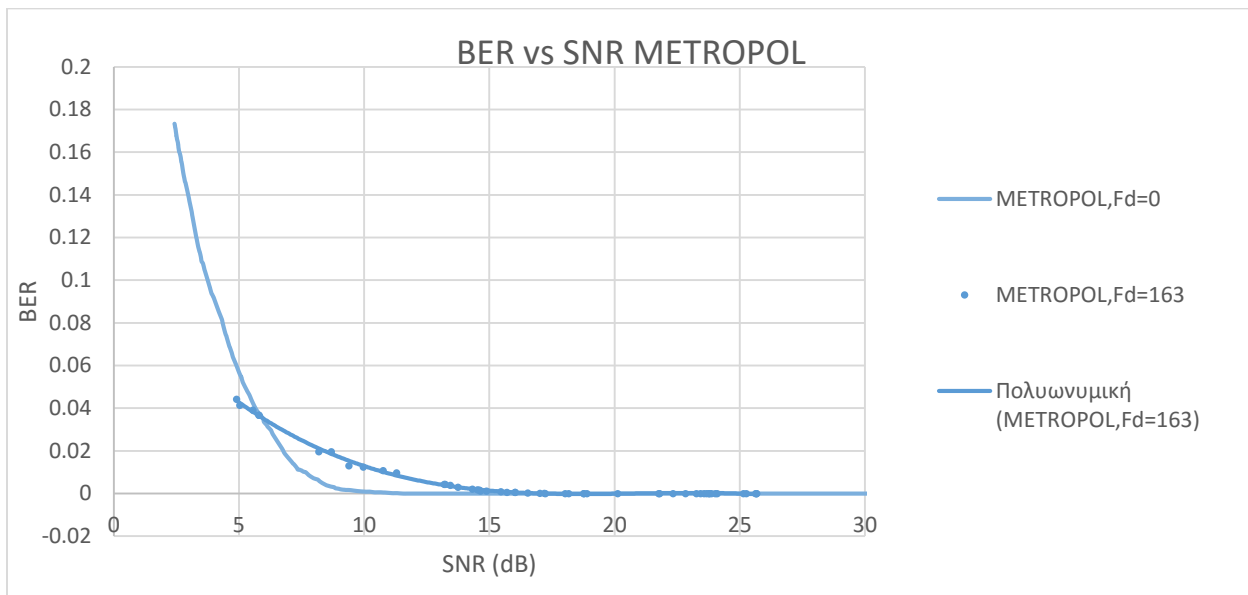
- Διάγραμμα 11: Σχέση BER-απόστασης (V2V METROPOL)



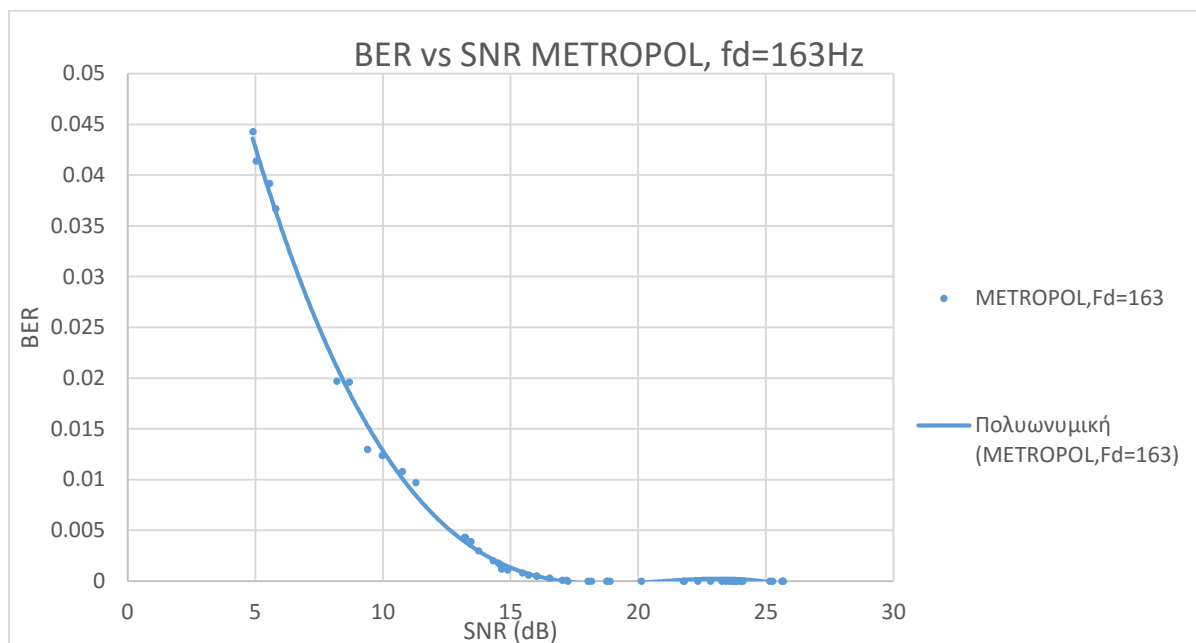
- Διάγραμμα 12: Σχέση BER-απόστασης (V2V METROPOL, $f_d=163\text{Hz}$)



- Διάγραμμα 13: Σχέση BER-SNR (V2V METROPOL)



- Διάγραμμα 14: Σχέση BER-SNR (V2V METROPOL, $f_d=163$)

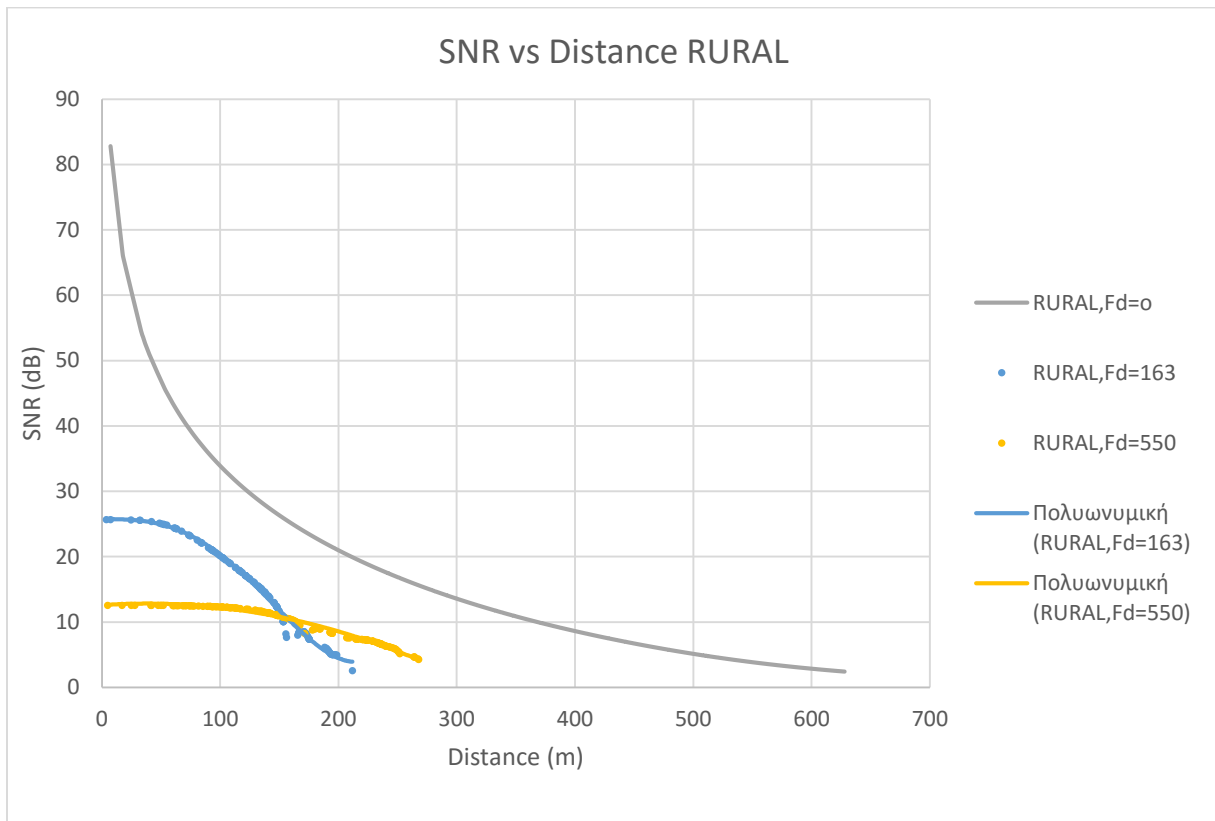


Τα συμπεράσματα που εξάγουμε από τα αποτελέσματα του σεναρίου είναι ανάλογα με αυτά του προηγούμενου, παρατηρώντας επιπρόσθετα ότι στο πιο πυκνό μητροπολιτικό περιβάλλον η εμβέλεια και η ποιότητα της επικοινωνίας μειώνονται περεταίρω. Έτσι, η μέγιστη απόσταση για την οποία καταγράφεται $SNR > 10$ dB μειώνεται αισθητά και για ακίνητους χρήστες μόλις ξεπερνά τα 200 m ενώ, για ταχύτητες 30 km/h φτάνει περίπου τα 100 m. Αντίστοιχα, έχουμε μη μηδενικό BER ακόμα και για τιμές SNR που πλησιάζουν τα 17 dB. Για $SNR < 15$ dB το BER αυξάνεται κατακόρυφα και αγγίζει το 0.01 στα 10 dB. Καταλαβαίνουμε λοιπόν ότι σε συνθήκες πυκνού αστικού περιβάλλοντος, οι επιδόσεις της sidelink επικοινωνίας επηρεάζονται σημαντικά .

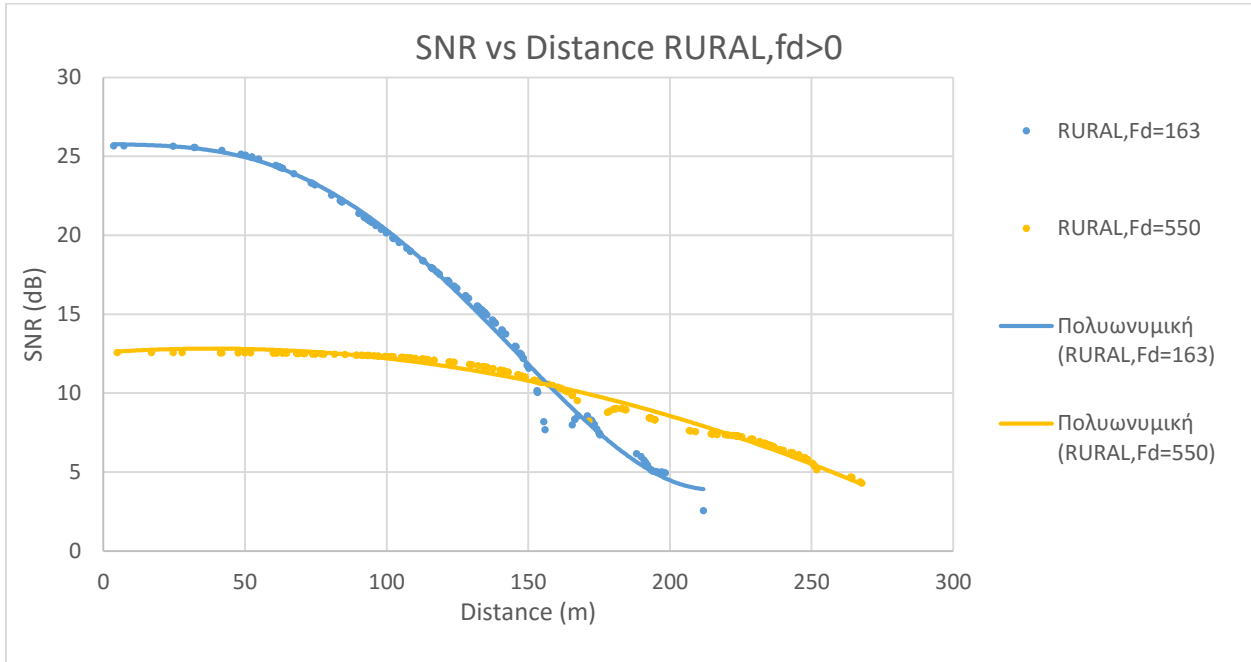
- Περιβάλλον αγροτικής περιοχής και χρήστες κινούμενοι με ταχύτητες 0,30 και 100 km/h (V2V RURAL)

Στο τελευταίο σενάριο οι απώλειες διάδοσης για αγροτική περιοχή υπολογίζονται σύμφωνα με το πρότυπο WINNER II από τη σχέση $PL=21.5 \cdot \log_{10}(D)+44+20 \cdot \log_{10}(5.9/5)$ ενώ πραγματοποιείται και μια επιπλέον μέτρηση σε σχέση με τα προηγούμενα σενάρια για ταχύτητα χρήστη ίση με 100 km/h ($f_d=550$ Hz). Προκύπτουν λοιπόν τα εξής αποτελέσματα:

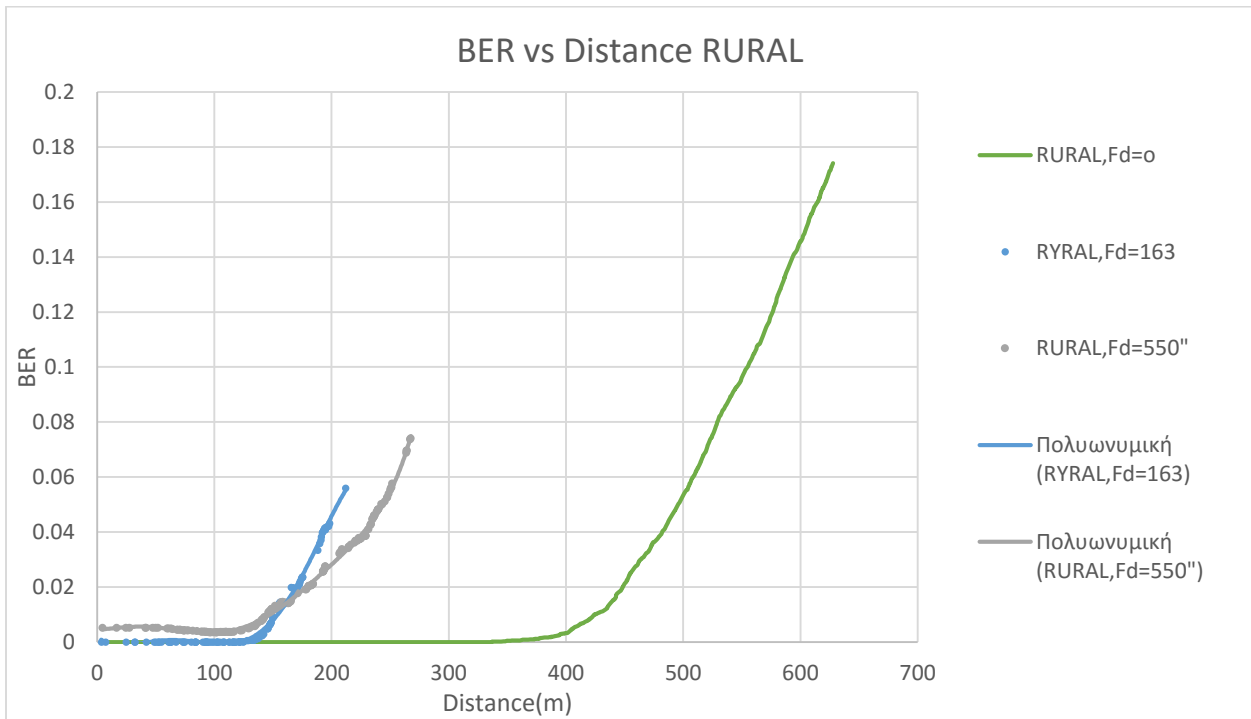
- Διάγραμμα 15: Σχέση SNR-απόστασης (V2V RURAL)



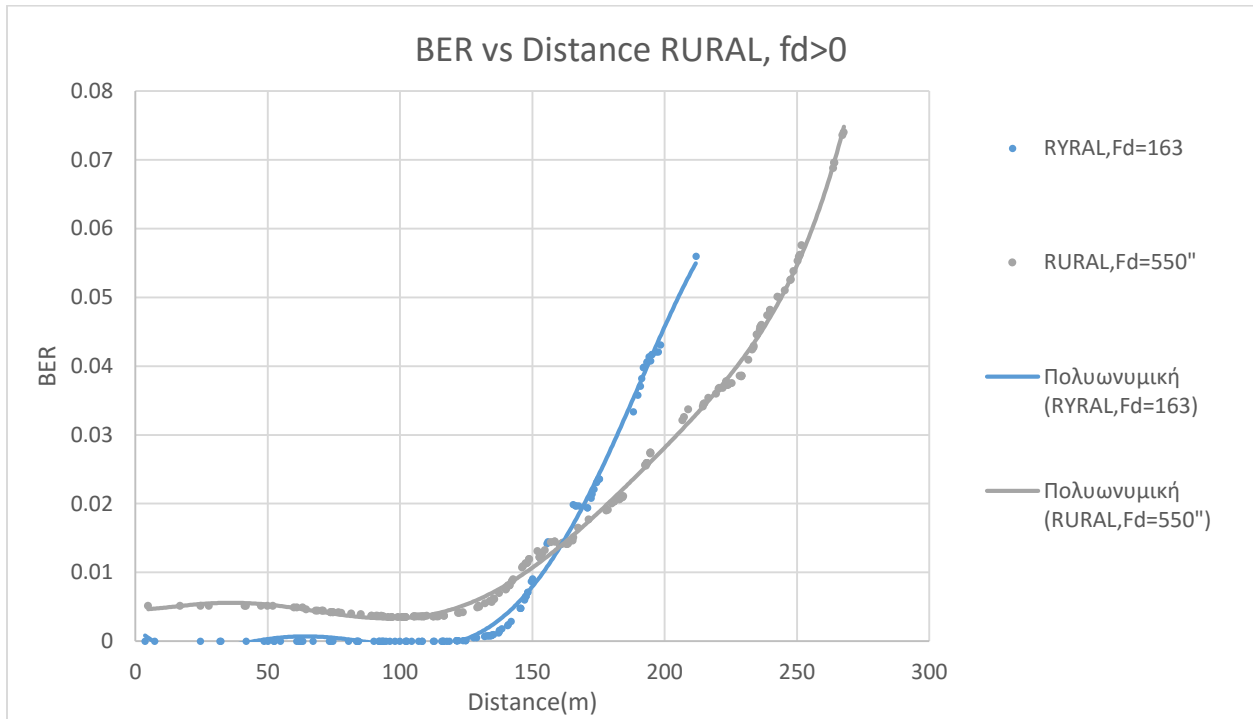
- Διάγραμμα 16: Σχέση SNR-απόστασης (V2V RURAL, $f_d > 0$)



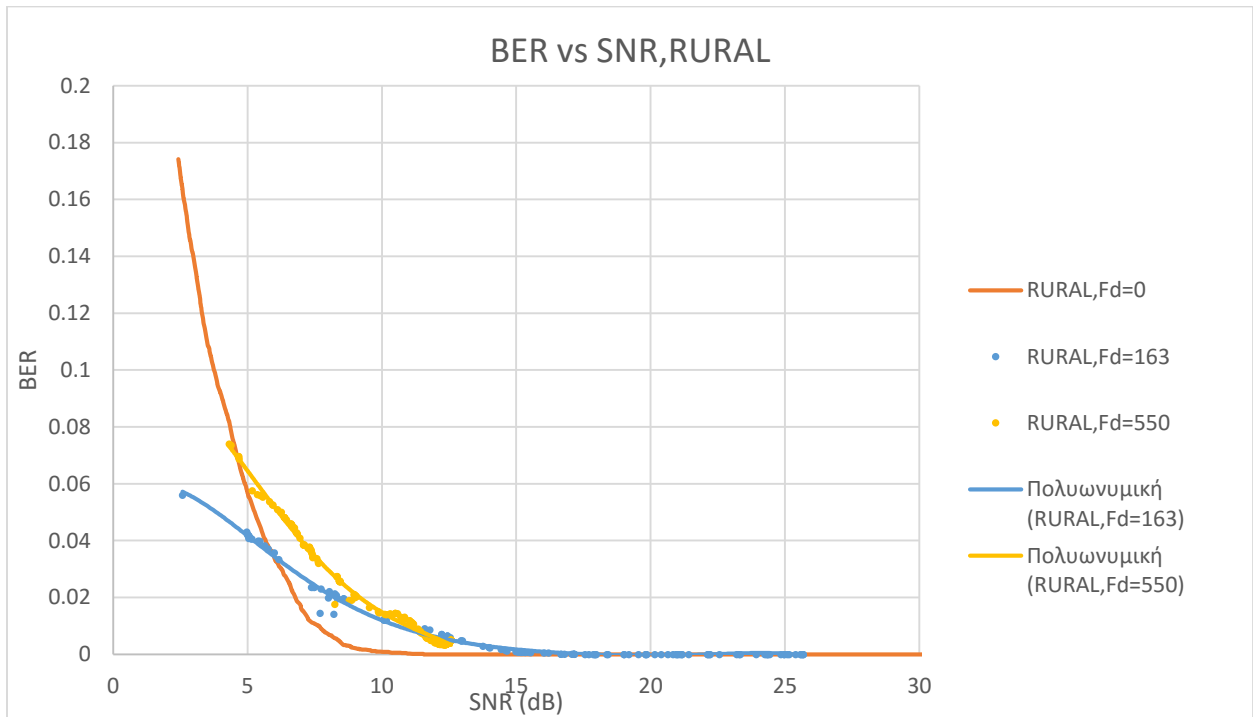
- Διάγραμμα 17: Σχέση BER-απόστασης (V2V RURAL)



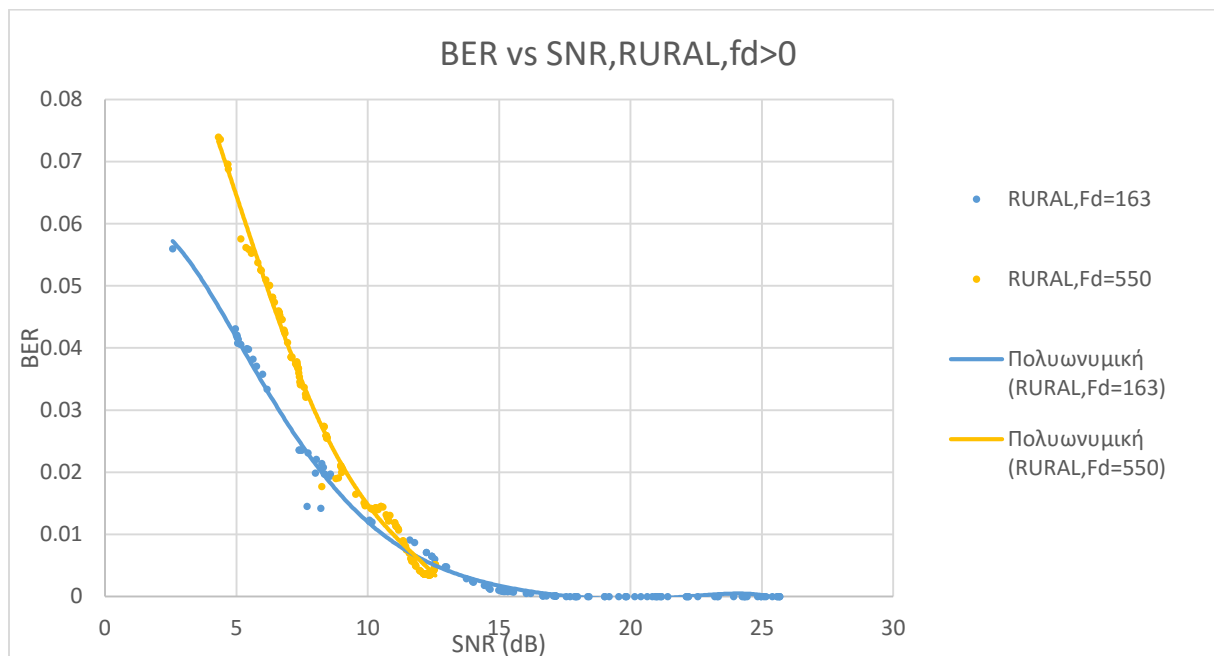
- Διάγραμμα 18: Σχέση BER-απόστασης (V2V RURAL, $f_d > 0$)



- Διάγραμμα 19: Σχέση BER-SNR (V2V RURAL)



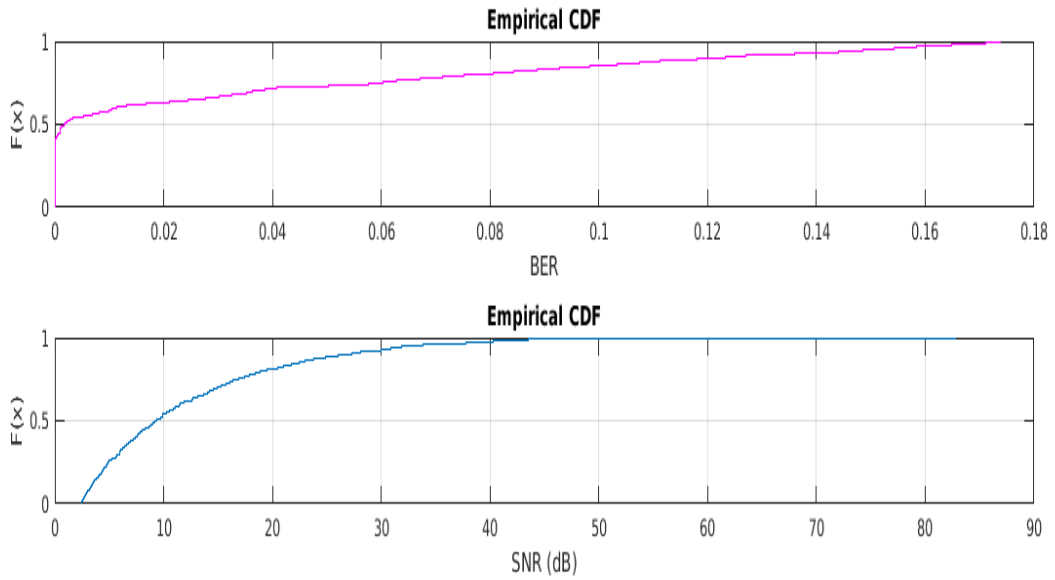
- Διάγραμμα 20: Σχέση BER-SNR (V2V RURAL, $f_d > 0$)



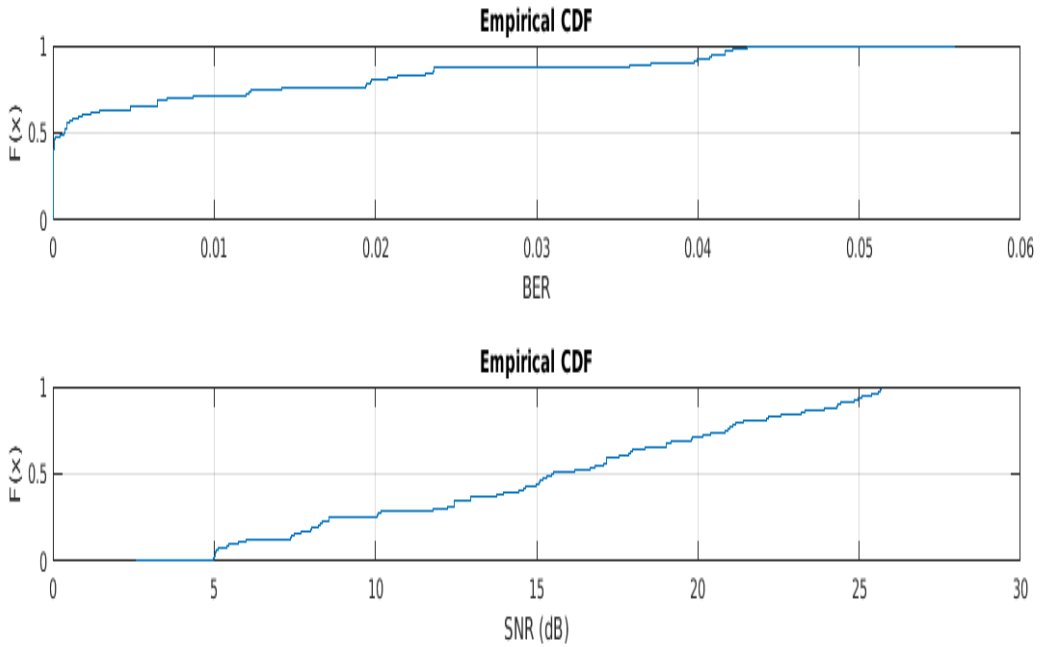
Παρατηρήθηκε, ότι τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου σεναρίου παρουσιάζουν πολύ μεγάλη ομοιότητα με τα αντίστοιχα του σεναρίου αστικού περιβάλλοντος (URBAN). Όσον αφορά την επιπλέον ταχύτητα που μετρήθηκε (100 km/h), η μέγιστη τιμή SNR που σημειώθηκε είναι αρκετά χαμηλή (περίπου 12.5 dB). Η μείωσή της όμως σε σχέση με την απόσταση δεν είναι τόσο απότομη όσο στις μικρότερες ταχύτητες με αποτέλεσμα η μέγιστη απόσταση SNR > 10 dB να είναι περίπου η ίδια με τα 30 km/h (~150 m). Και εδώ, για SNR > 15 dB το BER είναι μηδενικό για τις υψηλότερες ταχύτητες, και μάλιστα η ελάχιστη τιμή BER που σημειώνεται για τα 100 km/h είναι 0.0051. Όταν το SNR κυμαίνεται μεταξύ των 10-15 dB, το BER αυξάνεται σημαντικά και σχεδόν με τον ίδιο τρόπο για όλες τις διαφορετικές ταχύτητες. Κάτω από το όριο των 10 dB το BER αυξάνεται εντονότερα όσο αυξάνεται η ταχύτητα, όπως αναμένεται.

Τέλος για το σενάριο αυτό στο οποίο μελετήθηκαν και περισσότερες περιπτώσεις διαφορετικών ταχυτήτων, παραθέτουμε τα διαγράμματα cdf για το SNR και το BER για κάθε περίπτωση. Προκύπτουν λοιπόν :

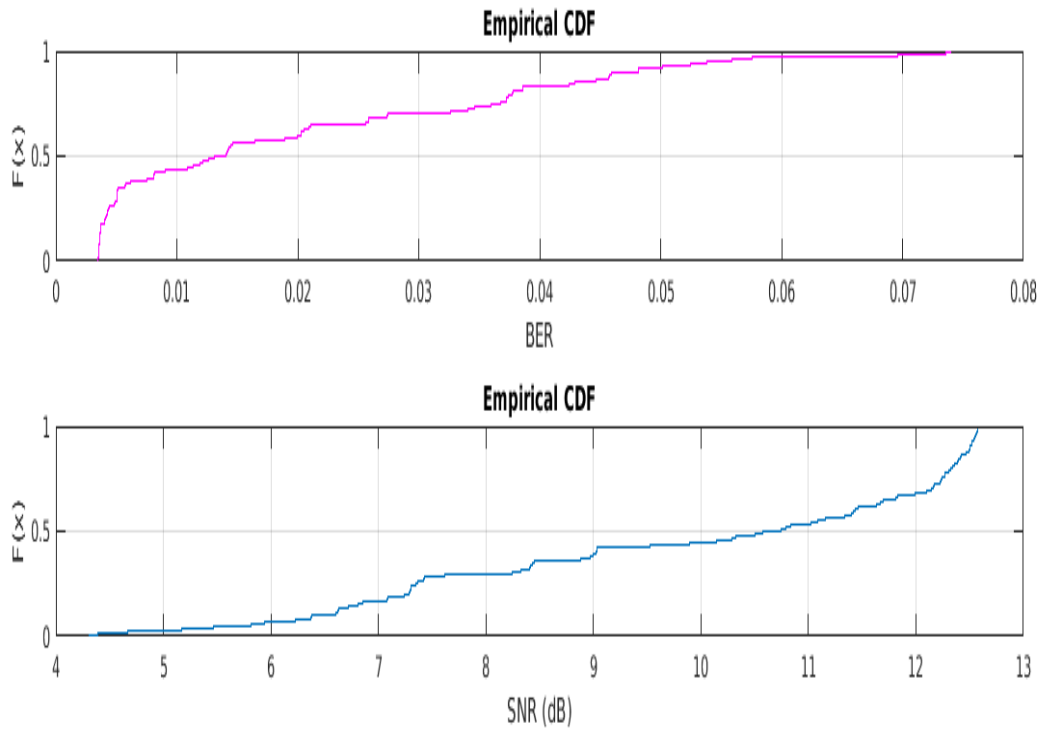
- Διάγραμμα 21:καμπύλη cdf SNR και BER για $f_d = 0$ Hz.



- Διάγραμμα 22:καμπύλη cdf SNR και BER για $f_d = 163$ Hz.



- Διάγραμμα 23:καμπύλη cdf SNR και BER για $f_d = 550$ Hz.



Και πάλι, μπορούμε να παρατηρήσουμε την μείωση της μέγιστης μετρούμενης τιμής του SNR όσο αυξάνεται η ταχύτητα του χρήστη.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η μεταβολή του αστικού περιβάλλοντος μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ποιότητα της sidelink επικοινωνίας, μειώνοντας την εμβέλεια αλλά και την παρεχόμενη ποιότητα. Μεγάλη αλλαγή παρατηρείται στην επίδοση, για την περίπτωση του V2V, με το διπλασιασμό και μόνο της συχνότητας (από 2.4 GHz σε 5.9 GHz). Η ταχύτητα των UEs αποδεικνύεται ο πιο καθοριστικός παράγοντας αφού επηρεάζει όχι μόνο το μέγιστο SNR και την εμβέλεια της επικοινωνίας, αλλά εισάγει και σημαντικό BER από κοντινές αποστάσεις.

Σε γενικές γραμμές μπορούμε να πούμε ότι τα αποτελέσματά μας συμφωνούν με τις θεωρητικές προβλέψεις που θέλουν την μέση εμβέλεια του sidelink communication περίπου στα 500 m για το D2D και στα 100 m για το V2V. Σίγουρα, η χρήση αυτής της μορφής επικοινωνίας για ανάγκες δημόσιας ασφάλειας (όπως προβλέπει αρχικά η 3GPP Rel.12) μπορεί να υποστηριχθεί πιο αποτελεσματικά. Η επέκταση της χρήσης σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλά data rates (infotainment, audio-video streaming κ.λπ.) αντιμετωπίζει περισσότερες προκλήσεις για περαιτέρω βελτίωση ειδικά όσο αυξάνονται οι ταχύτητες των χρηστών και γίνεται πυκνότερο το περιβάλλον μέσα στο οποίο βρίσκονται.

Βιβλιογραφία-Αναφορές

- 1. 3GPP Device-to-Device Communications for Beyond 4G Cellular Networks**
Shao-Yu Lien, Chun-Che Chien, Fan-Min Tseng, and Tien-Chen Ho
- 2. On the Design of D2D Synchronization in 3GPP Release-12**
Mark J. Cannon
- 3. D2D COMMUNICATIONS _ SAN**
- 4. An Overview of 3GPP Device-to-Device Proximity Services**
Xingqin Lin, Jeffrey G. Andrews, Amitabha Ghosh, and Rapeepat Ratasuk
- 5. An overview of D2D in 3GPP LTE standard**
Sofia Martinez Lopez
- 6. EXPANDING YOUR HORIZONS WITH LTE DIRECT**
Signals Research Group-Qualcomm
- 7. Recent Advances in 3GPP Rel-12 Standardization related to D2D and Public Safety Communications**
Dorin Panaitopol, Christian Mouton, Benoit Lecroart, Yannick Lair and Philippe Delahaye*
- 8. LTE – Fit for critical communications?!- Virginia Tech Wireless Symposium 2014**
Andreas Roessler
- 9. LTE- Advanced (3GPP Rel.12) Technology Introduction**
A. Roessler, J. Schlienz, S. Merkel, M. Kottkamp
- 10. Device-to-Device Discovery Based on 3GPP System Level Simulations**
Meryem Simsek†, Arvind Merwaday†, Neiyer Correal‡, and 'Ismail G"uvenc, †
- 11. D2D Neighbor Discovery Interference Management for LTE Systems**
Yuxin Zhao, Benoit Pelletier, Paul Marinier, Diana Pani
- 12. LTE for Vehicular Networking: A Survey**
G. Araniti, C. Campolo, M. Condoluci, A. Iera, A. Molinaro
- 13. LTE-V Solution for Connected Vehicles**
Zhang Ying
- 14. Mobile Edge Computing Technology for V2X**
Xuan HE
- 15. rohde-schwarz-Device to Device Communication in LTE-Whitepaper**
- 16. IEEE Communications Magazine April 2014**

17. freescale semiconductor “Long Term Evolution Protocol Overview white paper”,
October 2008
18. MIMO technologies in 3GPP LTE and LTE-Advanced journal on wireless communications
and networking, 2009.
J. lee, j. han, j. zhang
19. A COMPREHENSIVE ANALYSIS OF LTE PHYSICAL LAYER
Fahimeh Rezaei
20. 3GPP TS 36.300, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (EUTRA); Overall
Description” (Release 8)
21. 5G Americas V2X Cellular solutions.
22. <https://awanetwork.blogspot.gr>
23. [https://www.mathworks.com/help/lte/examples/lte-sidelink-resource-pools-and-pscch-
period.html](https://www.mathworks.com/help/lte/examples/lte-sidelink-resource-pools-and-pscch-period.html)
24. [https://www.mathworks.com/help/lte/examples/release-12-sidelink-pscch-and-pssch-
throughput.html](https://www.mathworks.com/help/lte/examples/release-12-sidelink-pscch-and-pssch-throughput.html)
25. [https://www.mathworks.com/help/lte/examples/release-14-v2x-sidelink-pssch-
throughput.html](https://www.mathworks.com/help/lte/examples/release-14-v2x-sidelink-pssch-throughput.html)
26. <https://github.com/feron-tech/lte-sidelink>
27. www.3gpp.org
28. www.radio-electronics.com
29. <https://communities.theiet.org>
30. <http://www.raymaps.com/index.php/winner-ii-path-loss-model>

