



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

**Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών
δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης
κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

των

ΜΑΡΙΝΑΚΗ ΙΩΑΝΝΗ και ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ

Επιβλέπων : Επ. Καθηγητής Σκούτας Δημήτριος

Μέλη εξεταστικής επιτροπής: Καθ. Σκιάνης Χαράλαμπος, Καθ. Βουγιούκας Δημοσθένης

Σάμος, Μάρτιος 2020

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

Δήλωση Πνευματικής Ιδιοκτησίας

Δηλώνουμε ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της διπλωματικής εργασίας και κάθε βοήθεια την οποία είχαμε για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχουμε αναφέρει τις πηγές από τις οποίες κάναμε χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης βεβαιώνουμε ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμάς προσωπικά ειδικά για τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.

Μαρινάκης Ιωάννης
Νικολάου Δημήτριος

© 2020 των

ΜΑΡΙΝΑΚΗ ΙΩΑΝΝΗ και ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να εκφράσουμε τις θερμές ευχαριστίες μας στον επιβλέποντα καθηγητή μας κ. Δημήτριο Σκούτα για την ανάθεση του θέματος, το ενδιαφέρον του αλλά και τον χρόνο που διέθεσε για την διεκπεραίωση τόσο του θεωρητικού όσο και του πρακτικού μέρους της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα θέλαμε να απευθύνουμε στον υποψήφιο διδάκτωρ κ. Βασίλειο Τάτση για την πολύτιμη βοήθεια του, τις συμβουλές και τις γνώσεις του που συνέβαλαν στο τελικό αποτέλεσμα, καθώς και τον χρόνο που αφιέρωσε κατά την συγγραφή της εργασίας.

Τέλος θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειες μας για την για την στήριξη που μας έδειξαν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μας.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως σκοπό την καταγραφή, μέσω μετρήσεων, των δυνατοτήτων των δικτύων LTE των παρόχων κινητής τηλεφωνίας που δραστηριοποιούνται στην χώρα μας σε τρία διαφορετικά σενάρια χρήσης: σε αστική, ημιαστική και αγροτική περιοχή. Για την καταγραφή των μετρήσεων έγινε υλοποίηση εφαρμογής σε λειτουργικό σύστημα Android, δημιουργία βάσης δεδομένων στην υπηρεσία Cloud Service Okeanos καθώς και υλοποίηση ιστοσελίδων ώστε οι μεταβλητές να αναλύονται και να απεικονίζονται σε χάρτες. Η εργασία αυτή χωρίζεται στο θεωρητικό μέρος και στο σκέλος ανάλυσης των καταγεγραμμένων μετρήσεων.

Αρχικά, στο θεωρητικό κομμάτι γίνεται μία σύντομη επισκόπηση των ασύρματων δικτύων πρώτης έως τρίτης γενιάς και έπειτα γίνεται αναφορά στα πρότυπα που αφορούν τα δίκτυα τέταρτης και πέμπτης γενιάς. Ακολουθεί η ανάλυση της αρχιτεκτονικής του δικτύου 4G καθώς και των τεχνολογιών και μεθόδων όπου εφαρμόστηκαν στα δίκτυα αυτά με σκοπό την επίτευξη υψηλότερων ταχυτήτων και γενικότερα καλύτερης εμπειρίας χρήσης. Στο κεφάλαιο ανάλυσης των μετρήσεων γίνεται επεξήγηση των μεταβλητών τις οποίες συλλέγει η εφαρμογή και βοηθούν να εξάγουμε τα συμπεράσματα μας. Στη συνέχεια, μέσω διαγραμμάτων και χαρτών απεικόνισης που δημιουργήσαμε ξεχωριστά για το κάθε σενάριο, καταλήγουμε σε μια σειρά συμπερασμάτων σχετικά με την μελλοντική χρήση των δικτύων 5^{ης} γενιάς στις 3 περιοχές μελέτης.

Abstract

The purpose of this thesis is to study the capabilities of LTE network deployments in Greece in three different use case scenarios namely in urban, semi-urban and rural areas. In order to obtain the required RF measurements, we implemented an Android application that stores the data in a database located on the Cloud Service Okeanos. Furthermore, the gathered data are analyzed and displayed spatially on maps through a web site specifically designed for this purpose. This thesis consists of an introductory theoretical part and a second, experimental, part where the data collection process is described followed by analysis of the gathered data per use case.

More specifically, the theoretical section provides initially a brief overview of the first to third generation of cellular mobile networks followed by a more detailed presentation of the fourth-generation networks. Specifically, an architectural analysis of the 4G network is presented as well as the technologies and methods applied to these networks to achieve higher data rates and better overall user experience. Finally, the experimental section describes the data collection process and provides a detailed description of each of the measured variables. Subsequently, the data collected for different use cases are presented and analyzed to extract a conclusion for the future use of 5G networks in the 3 areas.

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract	6
Περιεχόμενα	7
Πίνακας Ορολογίας.....	10
Κατάλογος Εικόνων.....	13
Κατάλογος Γραφημάτων.....	16
Κατάλογος Πινάκων.....	20
1. Επισκόπηση των Δικτύων Κινητής Τηλεφωνία.....	22
1.1 Δίκτυα Πρώτης Γενιάς (1G).....	22
1.2 Δίκτυα Δεύτερης Γενιάς (2G).....	22
1.3 Μεταβατικά Δίκτυα (2.5G).....	23
1.4 Δίκτυα Τρίτης Γενιάς (3G).....	24
1.5 Η ανάγκη για το LTE.....	24
2. LTE και LTE-ADVANCED.....	25
2.1. Χαρακτηριστικά και πεδίο εφαρμογής των δικτύων 4G.....	25
2.2. Προτυποποίηση Δικτύων Τέταρτης γενιάς.....	26
2.2.1 3GPP Release 8 (LTE).....	26
2.2.2 3GPP Release 10-13 (LTE-A).....	27
3. Αρχιτεκτονική δικτύου 4G.....	32
3.1. Δίκτυο κορμού (Core Network).....	32
3.2. Radio Access Network.....	34
3.3. Στρώματα πρωτοκόλλου ραδιοεπαφής.....	35
4. Τεχνολογίες στο LTE και LTE –Advanced.....	37
4.1 Διαχωρισμός ζεύξεων FDD - TDD - Φάσμα LTE.....	37
4.1.1 Ορισμοί της ζώνης συχνοτήτων LTE.....	38
4.1.2 Πολυπλεξία στην κατερχόμενη ζεύξη (OFDMA).....	44
4.1.3 Πολυπλεξία στην ανερχόμενη ζεύξη (SC-FDMA).....	44
4.2 Συστήματα μετάδοσης.....	45
4.2.1 SISO, SIMO, MISO, MIMO.....	45

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

4.2.2	Massive MIMO	51
4.3	Σχήματα Διαμόρφωσης και Κωδικοποίησης	54
4.3.1	Binary phase-shift keying (BPSK).....	54
4.3.2	Quadrature phase-shift keying (QPSK)	55
4.3.3	Quadrature Amplitude Modulation (QAM)	56
4.4	Carrier aggregation	58
4.4.1	Τύποι Carrier aggregation.....	58
4.4.2	Εφαρμογές	59
5.	Ανάλυση Δεδομένων	60
5.1	Περιγραφή εφαρμογής.....	60
5.2	Ανάλυση Μεταβλητών.....	62
5.3	Αστική Περιοχή	69
5.3.1	Μετρήσεις Παρόχου Α'	72
5.3.2	Μετρήσεις Παρόχου Β'	80
5.3.3	Μετρήσεις Παρόχου Γ'	86
5.3.4	Συμπεράσματα κάλυψης LTE σε αστική περιοχή	95
5.4	Ημιαστική Περιοχή	101
5.4.1	Μετρήσεις Παρόχου Α'	103
5.4.2	Μετρήσεις Παρόχου Β'	109
5.4.3	Μετρήσεις Παρόχου Γ'	114
5.4.4	Συμπεράσματα κάλυψης LTE σε Ημιαστική περιοχή	116
5.5	Αγροτική Περιοχή	120
5.5.1	Μετρήσεις Παρόχου Α'	122
5.5.2	Μετρήσεις Παρόχου Β'	129
5.5.3	Μετρήσεις Παρόχου Γ'	133
5.5.4	Συμπεράσματα κάλυψης LTE σε Αγροτική περιοχή	138
6.	Συμπεράσματα.....	143
	Αναφορές-References.....	148

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

Πίνακας Ορολογίας

3GPP	3rd Generation Partnership Project
ARFCN	Absolute Radio-Frequency Channel Number
CDMA	Code Division Multiple Access
CoMP	Coordinated Multi-Point
CP-OFDM	Cyclic Prefix Orthogonal frequency-division multiplexing
CSI	Channel State Information
dB	Decibel
dBm	decibel-milliwatts
DFT	Discrete Fourier Transform
DSL	Digital Subscriber Line
EARFCN	E-UTRA Absolute Radio-Frequency Channel Number
EHF	Extremely High Frequency
E-UTRA	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
Gbps	Gigabits per second
GHz	GigaHertz
gNB	gNodeB
GSM	Global System for Mobile communications
HSOPA	High Speed OFDM Packet Access
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LTE	Long Term Evolution

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

LTE-A	LTE Advanced
MAN	Metropolitan Area Network
Mbps	Megabits per second
MBWA	Mobile Broadband Wireless Access
MHz	MegaHertz
MIMO	Multiple Input – Multiple Output
MISO	Multiple Input – Single Output
MTC	Machine Type Communication
MU-MIMO	Multi-Users MIMO
OFDM	Orthogonal frequency-division multiplexing
OFDMA	Orthogonal frequency-division multiple access
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
QoS	Quality of service
RF	Radio Frequency
RSRP	Reference Signals Received Power
RSRQ	Reference Signal Received Quality
RSSI	Received signal strength indication
SC-FDMA	Single-carrier Frequency-division multiple access
SHF	Super High Frequency
SIMO	Single Input - Multiple Output
SISO	Single Input – Single Output
SNR	Signal-to-noise ratio
TDD	Time Division Duplex

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

TDMA	Time Division Multiple Access
TD-SCDMA	Time Division Synchronous Code Division Multiple Access
UARFCN	UMTS Absolute Radio-Frequency Channel Number
UHF	Ultra High Frequency
UMB	Ultra Mobile Broadband
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VoIP	Voice over Internet Protocol
DSB-SC	Double-Sideband Suppressed-Carrier Transmission
SON	Self-Organizing Networks

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1	5G Radio Access Network gNB [5]
Εικόνα 2	Αναπαράσταση OFDM για το 5G [5]
Εικόνα 3	Σχηματική αναπαράσταση χρήσης Beamforming στο 5G NR [5]
Εικόνα 4	Αρχιτεκτονική δικτύου LTE [6]
Εικόνα 5	Δίκτυο κορμού LTE [7]
Εικόνα 6	Δίκτυο E-UTRAN [8]
Εικόνα 7	Στρώματα πρωτοκόλλου ραδιοεπαφής [10]
Εικόνα 8	Σχηματική αναπαράσταση των τεχνολογιών FDD και TDD ως προς την συχνότητα και τον χρόνο [11]
Εικόνα 9	Δομή των πρωτοκόλλων OFDMA και SC-FDMA σε συνάρτηση με τον χρόνο [15]
Εικόνα 10	Αλληλουχία τεχνολογιών ασύρματων δικτύων βάση των συστημάτων μετάδοσης που πρωτοεφάρμοσαν καθώς και των μέγιστων ταχυτήτων κατερχόμενης ζεύξης όπου μπορούν να επιτύχουν [17]
Εικόνα 11	Αναπαράσταση του συστήματος μετάδοσης SISO μεταξύ πομπού και δέκτη [18]
Εικόνα 12	Αναπαράσταση του συστήματος μετάδοσης SIMO μεταξύ πομπού και δέκτη [18]
Εικόνα 13	Αναπαράσταση του συστήματος μετάδοσης MISO μεταξύ πομπού και δέκτη [18]
Εικόνα 14	Αναπαράσταση του συστήματος μετάδοσης MIMO μεταξύ πομπού και δέκτη [18]
Εικόνα 15	Εξέλιξη των συστημάτων MIMO [20]
Εικόνα 16	Εικονική αναπαράσταση της κάλυψης και της χρήσης 4G και 5G στο μέλλον [21]
Εικόνα 17	Διάγραμμα Grey για διαμόρφωση BPSK [23]
Εικόνα 18	Διάγραμμα Grey για διαμόρφωση QPSK [23]
Εικόνα 19	Αλληλουχία bit για σήμα 16-QAM [24]
Εικόνα 20	Σχηματική αναπαράσταση των intra-band contiguous carrier aggregation, non-contiguous και inter-band carrier aggregation [26]

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

Εικόνα 21	Σχηματική αναπαράσταση 5CC με χρήση inter-band carrier aggregation [27]
Εικόνα 22	Αρχική σελίδα εφαρμογής με διαθέσιμες για προβολή τις πληροφορίες που συλλέγονται
Εικόνα 23	2η καρτέλα εφαρμογής με την απεικόνιση της διαδρομής που συλλέγονται τα δεδομένα
Εικόνα 24	Δομή του Public Land Mobile Network Identifier [32]
Εικόνα 25	Χρονισμός σημάτων συγχρονισμού του FDD [35]
Εικόνα 26	Χρονισμός σημάτων συγχρονισμού του TDD [35]
Εικόνα 27	Εικόνα των λαμβανόμενων σημάτων που συλλέχθηκαν, κατά την διάρκεια μίας διαδρομής στην αστική περιοχή μελέτης, μέσω της ιστοσελίδας απεικόνισης των μετρήσεων
Εικόνα 28	Χάρτης κάλυψης δημιουργημένος σύμφωνα με τις τιμές RSSI του παρόχου Α' με απεικόνιση των κεραιών λήψης [61]
Εικόνα 29	Χάρτης κάλυψης δημιουργημένος σύμφωνα με τις τιμές RSRP του παρόχου Α' με απεικόνιση των κεραιών λήψης [61]
Εικόνα 30	Χάρτης απεικόνισης του υπολογισμένου throughput του παρόχου Α' με απεικόνιση των κεραιών λήψης [61]
Εικόνα 31	Χάρτης κάλυψης δημιουργημένος σύμφωνα με τις τιμές RSRP του παρόχου Β' με απεικόνιση των κεραιών λήψης [61]
Εικόνα 32	Χάρτης κάλυψης δημιουργημένος σύμφωνα με τις τιμές RSSI του παρόχου Β' με απεικόνιση των κεραιών λήψης [61]
Εικόνα 33	Χάρτης απεικόνισης του υπολογισμένου throughput του παρόχου Β' με απεικόνιση των κεραιών λήψης [61]
Εικόνα 34	Χάρτης κάλυψης δημιουργημένος σύμφωνα με τις τιμές RSSI του παρόχου Γ' με απεικόνιση των κεραιών λήψης [61]
Εικόνα 35	Χάρτης κάλυψης δημιουργημένος σύμφωνα με τις τιμές RSSP του παρόχου Γ' με απεικόνιση των κεραιών λήψης [61]
Εικόνα 36	Χάρτης απεικόνισης του υπολογισμένου throughput του παρόχου Γ' με απεικόνιση των κεραιών λήψης [61]
Εικόνα 37	Εικόνα των λαμβανόμενων σημάτων που συλλέχθηκαν, κατά την διάρκεια μίας διαδρομής στην ημιαστική περιοχή μελέτης, μέσω της ιστοσελίδας απεικόνισης των μετρήσεων

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

Εικόνα 38	Χάρτης κάλυψης δημιουργημένος σύμφωνα με τις τιμές RSRP του παρόχου Α' με απεικόνιση των κεραιών λήψης [61]
Εικόνα 39	Χάρτης απεικόνισης του υπολογισμένου throughput του παρόχου Α'
Εικόνα 40	Χάρτης κάλυψης δημιουργημένος σύμφωνα με τις τιμές RSRP του παρόχου Β' με απεικόνιση των κεραιών λήψης [61]
Εικόνα 41	Χάρτης απεικόνισης του υπολογισμένου throughput του παρόχου Β'
Εικόνα 42	Εικόνα των λαμβανόμενων σημάτων που συλλέχθηκαν, κατά την διάρκεια μίας διαδρομής στην αγροτική περιοχή μελέτης, μέσω της ιστοσελίδας απεικόνισης των μετρήσεων
Εικόνα 43	Χάρτης κάλυψης βάση του RSRP
Εικόνα 44	Χάρτης κάλυψης βάση του RSSI
Εικόνα 45	Χάρτης απεικόνισης του υπολογισμένου throughput του παρόχου Α'
Εικόνα 46	Χάρτης κάλυψης βάση του RSRP
Εικόνα 47	Χάρτης κάλυψης βάση του RSSI
Εικόνα 48	Χάρτης κάλυψης της βάση του RSRP
Εικόνα 49	Χάρτης κάλυψης βάση του RSSI
Εικόνα 50	Αναπαράσταση της Nokia σε χάρτη της κάλυψης της πόλης του Μονάχου από τις 3 ζώνες φασμάτων που είναι διαθέσιμες και στην χώρα μας [47].
Εικόνα 51	Αναπαράσταση SU-MIMO και MU-MIMO σε σενάρια αστικής-ημιαστικής και αγροτικής περιοχής [8]

Κατάλογος Γραφημάτων

Γράφημα 1	Γράφημα RSSI αστικής περιοχής Α΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας
Γράφημα 2	Γράφημα RSSP αστικής περιοχής Α΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας
Γράφημα 3	Γράφημα RSSQ αστικής περιοχής Α΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας
Γράφημα 4	Γράφημα SNR αστικής περιοχής Α΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας
Γράφημα 5	Διάγραμμα μέσου όρου κάλυψης διαθέσιμων ζωνών συχνοτήτων Α΄ παρόχου
Γράφημα 6	Διάγραμμα ποσοστού μέσου όρου κάλυψης με Carrier Aggregation Α΄ παρόχου
Γράφημα 7	Διάγραμμα ποσοστού χρήσης των 2 τύπων 2CC του Α΄ παρόχου
Γράφημα 8	Γράφημα RSSI αστικής περιοχής Β΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας
Γράφημα 9	Γράφημα RSSP αστικής περιοχής Β΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας
Γράφημα 10	Γράφημα RSSQ αστικής περιοχής Β΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας
Γράφημα 11	Γράφημα SNR αστικής περιοχής Β΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας
Γράφημα 12	Διάγραμμα μέσου όρου κάλυψης διαθέσιμων ζωνών συχνοτήτων Β΄ παρόχου
Γράφημα 13	Γράφημα RSSI αστικής περιοχής Γ΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας
Γράφημα 14	Γράφημα RSSP αστικής περιοχής Γ΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας
Γράφημα 15	Γράφημα RSSQ αστικής περιοχής Γ΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας
Γράφημα 16	Γράφημα SNR αστικής περιοχής Γ΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας
Γράφημα 17	Διάγραμμα ποσοστού μέσου όρου κάλυψης με Carrier Aggregation Γ΄ παρόχου
Γράφημα 18	Διάγραμμα ποσοστού χρήσης των 2 τύπων 2CC του Γ΄ παρόχου
Γράφημα 19	Διάγραμμα μέσου όρου κάλυψης διαθέσιμων ζωνών συχνοτήτων Γ΄ παρόχου
Γράφημα 20	Διάγραμμα μέσου όρου κάλυψης διαθέσιμων ζωνών συχνοτήτων 1ης κ΄2ης διαδρομής Γ΄ παρόχου
Γράφημα 21	Διάγραμμα μέσου όρου κάλυψης διαθέσιμων ζωνών συχνοτήτων 3ης κ΄4ης διαδρομής Γ΄ παρόχου

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

Γράφημα 22	Συνοπτικοί μέσοι όροι RSSI και από τις 4 διαδρομές της αστικής περιοχής για κάθε πάροχο
Γράφημα 23	Συνοπτικοί μέσοι όροι RSSI με χρήση κινητού μέσου όρου περιόδου 10 και από τις 4 διαδρομές της αστικής περιοχής για κάθε πάροχο
Γράφημα 24	Συνοπτικοί μέσοι όροι RSRP και από τις 4 διαδρομές της αστικής περιοχής για κάθε πάροχο
Γράφημα 25	Συνοπτικοί μέσοι όροι RSRP με χρήση κινητού μέσου όρου περιόδου 10 και από τις 4 διαδρομές της αστικής περιοχής για κάθε πάροχο
Γράφημα 26	Συνοπτικοί μέσοι όροι RSRQ και από τις 4 διαδρομές της αστικής περιοχής για κάθε πάροχο
Γράφημα 27	Συνοπτικοί μέσοι όροι RSRQ με χρήση κινητού μέσου όρου περιόδου 10 και από τις 4 διαδρομές της αστικής περιοχής για κάθε πάροχο
Γράφημα 28	Συνοπτικοί μέσοι όροι SNR και από τις 4 διαδρομές της αστικής περιοχής για κάθε πάροχο
Γράφημα 29	Συνοπτικοί μέσοι όροι SNR με χρήση κινητού μέσου όρου περιόδου 10 και από τις 4 διαδρομές της αστικής περιοχής για κάθε πάροχο
Γράφημα 30	Γράφημα RSSP ημιαστικής περιοχής Α΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας
Γράφημα 31	Γράφημα RSSQ ημιαστικής περιοχής Α΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας
Γράφημα 32	Γράφημα SNR ημιαστικής περιοχής Α΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας
Γράφημα 33	Διάγραμμα μέσου όρου κάλυψης διαθέσιμων ζωνών συχνοτήτων Α΄ παρόχου
Γράφημα 34	Διάγραμμα ποσοστού μέσου όρου κάλυψης με Carrier Aggregation Α΄ παρόχου
Γράφημα 35	Διάγραμμα ποσοστού χρήσης των 3 τύπων 2CC του Α΄ παρόχου
Γράφημα 36	Γράφημα RSSP ημιαστικής περιοχής Β΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας
Γράφημα 37	Γράφημα RSSQ ημιαστικής περιοχής Β΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας
Γράφημα 38	Γράφημα SNR ημιαστικής περιοχής Β΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας
Γράφημα 39	Διάγραμμα μέσου όρου κάλυψης διαθέσιμων ζωνών συχνοτήτων Β΄ παρόχου
Γράφημα 40	Διάγραμμα ποσοστού μέσου όρου κάλυψης με Carrier Aggregation Β΄ παρόχου

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

Γράφημα 41	Γράφημα RSSP ημιαστικής περιοχής Γ΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας
Γράφημα 42	Γράφημα RSSQ ημιαστικής περιοχής Γ΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας
Γράφημα 43	Γράφημα SNR ημιαστικής περιοχής Γ΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας
Γράφημα 44	Συνοπτικοί μέσοι όροι RSRP και από τις 4 διαδρομές της ημιαστικής περιοχής για κάθε πάροχο
Γράφημα 45	Συνοπτικοί μέσοι όροι RSRP με χρήση κινητού μέσου όρου περιόδου 10 και από τις 4 διαδρομές της ημιαστικής περιοχής για κάθε πάροχο
Γράφημα 46	Συνοπτικοί μέσοι όροι RSRQ και από τις 4 διαδρομές της ημιαστικής περιοχής για κάθε πάροχο
Γράφημα 47	Συνοπτικοί μέσοι όροι RSRQ με χρήση κινητού μέσου όρου περιόδου 10 και από τις 4 διαδρομές της ημιαστικής περιοχής για κάθε πάροχο
Γράφημα 48	Συνοπτικοί μέσοι όροι SNR και από τις 4 διαδρομές της ημιαστικής περιοχής για κάθε πάροχο
Γράφημα 49	Συνοπτικοί μέσοι όροι SNR με χρήση κινητού μέσου όρου περιόδου 10 και από τις 4 διαδρομές της ημιαστικής περιοχής για κάθε πάροχο
Γράφημα 50	Γράφημα RSSI αγροτικής περιοχής Α΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας
Γράφημα 51	Γράφημα RSSP αγροτικής περιοχής Α΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας
Γράφημα 52	Γράφημα RSSQ αγροτικής περιοχής Α΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας
Γράφημα 53	Γράφημα SNR αγροτικής περιοχής Α΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας
Γράφημα 54	Διάγραμμα ποσοστού μέσου όρου κάλυψης με Carrier Aggregation Α΄παρόχου
Γράφημα 55	Διάγραμμα μέσου όρου κάλυψης διαθέσιμων ζωνών συχνοτήτων Α΄ παρόχου
Γράφημα 56	Γράφημα RSSI αγροτικής περιοχής Β΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας
Γράφημα 57	Γράφημα RSSP αγροτικής περιοχής Β΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας
Γράφημα 58	Γράφημα RSSQ αγροτικής περιοχής Β΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας
Γράφημα 59	Γράφημα SNR αγροτικής περιοχής Β΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας
Γράφημα 60	Γράφημα RSSI αγροτικής περιοχής Γ΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

Γράφημα 61	Γράφημα RSSP αγροτικής περιοχής Γ' Παρόχου κινητής τηλεφωνίας
Γράφημα 62	Γράφημα RSSQ αγροτικής περιοχής Γ' Παρόχου κινητής τηλεφωνίας
Γράφημα 63	Γράφημα SNR αγροτικής περιοχής Γ' Παρόχου κινητής τηλεφωνίας
Γράφημα 64	Συνοπτικοί μέσοι όροι RSSI και από τις 4 διαδρομές της αγροτικής περιοχής για κάθε πάροχο
Γράφημα 65	Συνοπτικοί μέσοι όροι RSSI με χρήση κινητού μέσου όρου περιόδου 10 και από τις 4 διαδρομές της αγροτικής περιοχής για κάθε πάροχο
Γράφημα 66	Συνοπτικοί μέσοι όροι RSRP και από τις 4 διαδρομές της αγροτικής περιοχής για κάθε πάροχο
Γράφημα 67	Συνοπτικοί μέσοι όροι RSRP με χρήση κινητού μέσου όρου περιόδου 10 και από τις 4 διαδρομές της αγροτικής περιοχής για κάθε πάροχο
Γράφημα 68	Συνοπτικοί μέσοι όροι RSRQ και από τις 4 διαδρομές της αγροτικής περιοχής για κάθε πάροχο
Γράφημα 69	Συνοπτικοί μέσοι όροι RSRQ με χρήση κινητού μέσου όρου περιόδου 10 και από τις 4 διαδρομές της αγροτικής περιοχής για κάθε πάροχο
Γράφημα 70	Συνοπτικοί μέσοι όροι SNR και από τις 4 διαδρομές της αγροτικής περιοχής για κάθε πάροχο
Γράφημα 71	Συνοπτικοί μέσοι όροι SNR με χρήση κινητού μέσου όρου περιόδου 10 και από τις 4 διαδρομές της αγροτικής περιοχής για κάθε πάροχο
Γράφημα 72	Μέσος όρος ποσοστού κάλυψης ανά ζώνη συχνότητας της αστικής διαδρομής μελέτης
Γράφημα 73	Μέσος όρος ποσοστού κάλυψης ανά ζώνη συχνότητας της ημιαστικής διαδρομής μελέτης
Γράφημα 74	Μέσος όρος ποσοστού κάλυψης ανά ζώνη συχνότητας της αγροτικής διαδρομής μελέτης

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1	Βασικά στοιχεία τεχνολογιών 1G,2G και 3G [1]
Πίνακας 2	Πίνακας στοιχείων με LTE ζώνες συχνοτήτων FDD [12]
Πίνακας 3	Πίνακας στοιχείων με LTE ζώνες συχνοτήτων TDD [12]
Πίνακας 4	Δέσμευση συχνοτήτων FDD LTE των ελληνικών παρόχων κινητής για τις ζώνες συχνοτήτων 1,3,7,8,20,22 [13][67]
Πίνακας 5	Δέσμευση συχνοτήτων TDD LTE των ελληνικών παρόχων κινητής για τις ζώνες συχνοτήτων 33,38 [13]
Πίνακας 6	Κύριες διαφορές μεταξύ MU-MIMO και SU-MIMO [18]
Πίνακας 7	Καινοτόμες υλοποιήσεις Massive MIMO [66][68][69]
Πίνακας 8	Συνοπτικός πίνακας ρυθμών μετάδοσης bit διαφόρων μορφών QAM και PSK
Πίνακας 9	Πίνακας αντιστοίχισης αναφερόμενης τιμής RSRP και πραγματικής σε κινητές συσκευές και χαρακτηρισμός ισχύος
Πίνακας 10	Πίνακας αντιστοίχισης χρώματος- ισχύος στην εφαρμογή Android που υλοποιήσαμε
Πίνακας 11	Πίνακας αντιστοίχισης αναφερόμενης τιμής RSRQ και πραγματικής σε κινητές συσκευές και χαρακτηρισμός ισχύος
Πίνακας 12	Πίνακας αντιστοίχισης καναλιών EARFCN, UARFCN και ARFCN ανά πάροχο [31]
Πίνακας 13	Πίνακας μέσων όρων τιμών RSSI,RSRP,RSRQ,SNR ανά ημέρα του Α΄ Παρόχου στην αστική περιοχή
Πίνακας 14	Πίνακας μέσων όρων τιμών RSSI,RSRP,RSRQ,SNR ανά ημέρα του Β΄ Παρόχου στην αστική περιοχή
Πίνακας 15	Πίνακας μέσων όρων τιμών RSSI,RSRP,RSRQ,SNR ανά ημέρα του Γ΄ Παρόχου στην αστική περιοχή
Πίνακας 16	Μέσος όρος RSRP,RSRQ,SNR από κεραίες Παρόχου Α στις οποίες δεν έχει εγγραφεί το τερματικό μας
Πίνακας 17	Αντιστοίχιση χρώματος – μέγιστου throughput για την δημιουργία χάρτη
Πίνακας 18	Μέσος όρος RSRP,RSRQ,SNR από κεραίες Παρόχου Β στις οποίες δεν έχει εγγραφεί το τερματικό μας
Πίνακας 19	Αντιστοίχιση χρώματος – μέγιστου throughput για την δημιουργία χάρτη

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

Πίνακας 20	Αντιστοίχιση χρώματος – τιμής RSRP για την δημιουργία χάρτη
Πίνακας 21	Αντιστοίχιση χρώματος – τιμής RSSI για την δημιουργία χάρτη
Πίνακας 22	Μέσος όρος RSRP,RSRQ,SNR από κεραιές Παρόχου Γ στις οποίες δεν έχει εγγραφεί το τερματικό μας
Πίνακας 23	Συνολικοί μέσοι όροι ανά πάροχο στην αστική περιοχή
Πίνακας 24	Πίνακας μέσων όρων τιμών RSSI,RSRP,RSRQ,SNR ανά ημέρα του Α΄ Παρόχου στην ημιαστική περιοχή
Πίνακας 25	Πίνακας μέσων όρων τιμών RSSI,RSRP,RSRQ,SNR ανά ημέρα του Β΄ Παρόχου στην ημιαστική περιοχή
Πίνακας 26	Πίνακας μέσων όρων τιμών RSSI,RSRP,RSRQ,SNR ανά ημέρα του Γ΄ Παρόχου στην ημιαστική περιοχή
Πίνακας 27	Μέσος όρος RSRP,RSRQ,SNR από κεραιές Παρόχου Α στις οποίες δεν έχει εγγραφεί το τερματικό μας
Πίνακας 28	Μέσος όρος RSRP,RSRQ,SNR από κεραιές Παρόχου Β στις οποίες δεν έχει εγγραφεί το τερματικό μας
Πίνακας 29	Συνολικοί μέσοι όροι ανά πάροχο στην ημιαστική περιοχή
Πίνακας 30	Πίνακας μέσων όρων τιμών RSSI,RSRP,RSRQ,SNR ανά ημέρα του Α΄ Παρόχου στην αγροτική περιοχή
Πίνακας 31	Πίνακας μέσων όρων τιμών RSSI,RSRP,RSRQ,SNR ανά ημέρα του Β΄ Παρόχου στην αγροτική περιοχή
Πίνακας 32	Πίνακας μέσων όρων τιμών RSSI,RSRP,RSRQ,SNR ανά ημέρα του Γ΄ Παρόχου στην αγροτική περιοχή
Πίνακας 33	Συνολικοί μέσοι όροι για Α΄ Πάροχο στην αγροτική περιοχή
Πίνακας 34	Αντιστοίχιση χρώματος – μέγιστου throughput για την δημιουργία χάρτη
Πίνακας 35	Συνολικοί μέσοι όροι για Β΄ Πάροχο στην αγροτική περιοχή
Πίνακας 36	Συνολικοί μέσοι όροι ανά πάροχο στην αγροτική περιοχή

1. Επισκόπηση των Δικτύων Κινητής Τηλεφωνίας

Στο παρόν κεφάλαιο θα δοθεί μια σύντομη ιστορική αναδρομή των δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Θα δοθεί έμφαση στις δυνατότητες τους που σχετίζονται κυρίως με, την ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων που προσφέρουν στον χρήστη.

1.1 Δίκτυα Πρώτης Γενιάς (1G)

Το 1980 γίνεται μια πρώτη γνωριμία με τα δίκτυα πρώτης γενιάς, τα οποία χρησιμοποιούνται μόνο για την μετάδοση της φωνής. Πρόκειται για αναλογικά συστήματα που είχαν την δυνατότητα να χωρίζουν την περιοχή κάλυψης σε μικρές κυψέλες. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα ίδιες συχνότητες να χρησιμοποιούνται πολλές φορές χωρίς να παρατηρείται έντονα το φαινόμενο της παρεμβολής. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιήθηκαν για να αναπτυχθούν αυτά τα δίκτυα ήταν οι τεχνολογίες FM (Frequency Modulation), FDD (Frequency Division Duplexing) και FDMA (Frequency Division Multiplexing Access).

Δυο ήταν κυρίως τα πιο διαδεδομένα συστήματα που υιοθέτησαν χαρακτηριστικά τέτοιου τύπου. Το πρώτο δημιουργήθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και ονομάστηκε AMPS (Advanced Mobile Phone System), για την μετάδοση του σήματος χρησιμοποιεί FM και FDMA. Στην Ευρώπη αναπτύχθηκε το ETACS (European Total Access Communication System) χρησιμοποιώντας παρόμοιες τεχνολογίες [1], **Error! Reference source not found..**

1.2 Δίκτυα Δεύτερης Γενιάς (2G)

Το 1991 κάνουν την εμφάνιση τους στον τηλεπικοινωνιακό χώρο τα δίκτυα δεύτερης γενιάς. Πρόκειται για δίκτυα που βασίστηκαν σε ψηφιακές τεχνικές, η βασική διαφορά ανάμεσα στα δίκτυα πρώτης και δεύτερης γενιάς, είναι ο διαχωρισμός αναλογικού - ψηφιακού συστήματος. Μια σημαντική υπηρεσία που παρείχαν στους χρήστες ήταν η δυνατότητα αποστολής και λήψης μηνυμάτων (SMS).

Τα δίκτυα δεύτερης γενιάς έχουν καλύτερες δυνατότητες σε σχέση με τα δίκτυα πρώτης γενιάς. Ο διαχωρισμός των χρηστών για ταυτόχρονη σύνδεση στο ασύρματο δίκτυο στα δίκτυα πρώτης γενιάς γινόταν με την τεχνική FDMA ενώ αντίθετα στα δίκτυα δεύτερης γενιάς ο διαχωρισμός του ψηφιακού σήματος γίνεται μέσω των τεχνικών TDMA (Time Division Multiple Access) ή CDMA (Code Division Multiple Access) [1].

Υπάρχουν τρία κύρια πρότυπα για τα κινητά δίκτυα δεύτερης γενιάς:

- **GSM (Global System for Mobile communications):** Με αυτόν τον όρο αναφερόμαστε σε ένα ευρωπαϊκό ψηφιακό σύστημα κινητής τηλεφωνίας. Αυτό το σύστημα βασίζεται σε ένα δίκτυο κελιών σε κυψελοειδή μορφή όπου ο διαχωρισμός των χρηστών για ταυτόχρονη σύνδεση στο ασύρματο δίκτυο γίνεται με την τεχνική TDMA. Παρέχει στους χρήστες μεταφορά δεδομένων, επιτρέποντας τους να στέλνουν και να λαμβάνουν δεδομένα με ταχύτητες έως 9,6 kbps. Επιπλέον δίνεται η δυνατότητα για αποστολή και λήψη σύντομων μηνυμάτων (SMS), ενώ οι χρήστες μπορούν να έχουν αναγνώριση κλήσεων στα κινητά τους. Επιπλέον υποστηρίζει μέχρι 8 χρήστες

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

για κάθε κανάλι 200KHz. Τέλος το εύρος ζώνης που υποστηρίζει είναι 25MHz, ενώ η ζώνες συχνότητας που χρησιμοποιεί για την επικοινωνία του χρήστη με τον σταθμό βάσης είναι 935-960 MHz, ενώ για την αντίστροφη επικοινωνία χρησιμοποιεί την ζώνη συχνοτήτων 890-915 MHz [1], **Error! Reference source not found..**

- **IS-136 (Interim Standard-136):** Πρόκειται για ένα αμερικανικό ψηφιακό σύστημα κινητής τηλεφωνίας. Υποστηρίζει μέχρι 3 χρήστες για κάθε κανάλι 30KHz. Χρησιμοποιεί TDMA και εύρος ζώνης 60MHz, ενώ η ζώνες συχνότητας που χρησιμοποιεί για την επικοινωνία του χρήστη με τον σταθμό βάσης είναι 1930MHz-1990MHz. Για την αντίστροφη επικοινωνία χρησιμοποιεί την ζώνη συχνοτήτων 1850 MHz-1910 MHz [1], **Error! Reference source not found..**
- **IS-95 (Interim Standard-95):** Πρόκειται για το ένα σύστημα δεύτερης γενιάς το οποίο χρησιμοποιεί CDMA και οι ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων που υποστηρίζει είναι 4,8 και 14,4 Kbps[1], **Error! Reference source not found..**

Πάρα την καλή ποιότητα σε υπηρεσία φωνής που έδινε το GSM, εμφανίστηκε γρήγορα η ανάγκη για ανάπτυξη προτύπων που θα δίνουν στους χρήστες υψηλότερες ταχύτητες στην μετάδοση των δεδομένων. Έρχονται, συνεπώς, στο προσκήνιο τα 2.5G δίκτυα τα οποία αποτελούν την ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ των 2G και 3G συστημάτων κινητής τηλεφωνίας.

1.3 Μεταβατικά Δίκτυα (2.5G)

Με την ονομασία 2,5G αναφερόμαστε στο σύνολο των βελτιώσεων που έγιναν πάνω στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών 2^{ης} γενιάς λόγω της ψηφιακής εξέλιξης. Πολλές από αυτές τις βελτιώσεις παρέχουν σχεδόν τις ίδιες δυνατότητες με αυτές των κινητών δικτύων τρίτης γενιάς. Τα πρότυπα που χαρακτηρίζουν την 2,5G είναι:

- **HSCSD (High-Speed Circuit- Switched Data):** Αυτό το πρότυπο δημιουργήθηκε για να αντιμετωπίσει τους χαμηλούς ρυθμούς του GSM, οι οποίοι ήταν 9,6kbps και κατόρθωσε να φτάσει ρυθμό μετάδοσης μέχρι και 14,4Kbps. Για να υλοποιηθεί αυτό χρησιμοποιήθηκε η τεχνική μεταγωγής κυκλώματος, δίνοντας την δυνατότητα στον χρήστη να χρησιμοποιήσει μέχρι και τέσσερις διαδοχικές χρονοθυρίδες του GSM προτύπου. Ένα σημαντικό μειονέκτημα σε αυτό το πρότυπο είναι ότι οι χρονοθυρίδες δέσμευαν εύρος ζώνης του δικτύου, ακόμη και όταν δεν χρησιμοποιούνταν [1], **Error! Reference source not found..**
- **GPRS (General Packet Radio Services):** Αυτό το πρότυπο δημιουργήθηκε για να καλύψει την αδυναμία που είχε το πρότυπο HSCSD δίνοντας την δυνατότητα δέσμευσης χρονοθυρίδων, μόνο όταν αυτές χρειάζονται για την μεταφορά των δεδομένων. Κατόρθωσε να φτάσει ρυθμό μετάδοσης μέχρι και 171,2 kbps [1], **Error! Reference source not found..**
- **EDGE (Enhanced Data Rates for Global Evolution):** Με αυτό το πρότυπο εισάγεται μια καινούργια μέθοδος διαμόρφωσης η 8-PSK. Ο χρήστης έχει πρόσβαση και στις οχτώ χρονοθυρίδες ταυτόχρονα, φτάνοντας με αυτό τον τρόπο ρυθμό μετάδοσης έως και 547,2 kbps [1], **Error! Reference source not found..**

1.4 Δίκτυα Τρίτης Γενιάς (3G)

Τα δίκτυα τρίτης γενιάς δημιουργήθηκαν για να ικανοποιήσουν τις ανάγκες των χρηστών που ήθελαν να έχουν πρόσβαση στο διαδίκτυο από οπουδήποτε και κάθε στιγμή, αλλά και να έχουν καλύτερη ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων τους. Δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να έχει πρόσβαση σε υπηρεσίες που αφορούν εικόνες και βίντεο σε ψηφιακό περιβάλλον και σε υψηλές ταχύτητες. Το πρότυπο που κυριάρχησε στην Ευρώπη ήταν το UMTS (Universal Mobile Telecommunications System).

Τα κύρια χαρακτηριστικά του 3G είναι:

- Ταχύτεροι ρυθμοί δεδομένων
- Υποστηρίζει εφαρμογές πολυμέσων όπως μετάδοση βίντεο και εικόνες.
- Υπηρεσίες με προστιθέμενη αξία όπως κανάλια τηλεόρασης, GPS (παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης), βίντεο κλήσεις
- Γρήγορη πρόσβαση στο διαδίκτυο
- Αυξημένη χωρητικότητα

Στον πίνακα 1 θα δούμε μερικά χαρακτηριστικά των τριών πρώτων ασυρμάτων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

Πίνακας 1 Βασικά στοιχεία τεχνολογιών 1G, 2G και 3G [1]

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ	ΕΜΦΑΝΙΣΤΗΚΕ	ΕΦΑΡΜΟΣΤΗΚΕ	ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ	ΡΥΘΜΟΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	ΔΙΚΤΥΟ
1G	1970	1981	ΑΝΑΛΟΓΙΚΕΣ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΦΩΝΗΣ	ΔΕΝ ΕΧΕΙ	PSTN
2G	1980	1991	ΨΗΦΙΑΚΕΣ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΦΩΝΗΣ, SMS	14.4 Kbps	PSTN
3G	1990	2001	ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ, ΡΥΘΜΟΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕΧΡΙ 2Mbps	2Mbps	ΠΑΚΕΤΑ ΔΙΚΤΥΟ Υ

1.5 Η ανάγκη για το LTE

Για πολλά χρόνια, οι φωνητικές κλήσεις ήταν το κυρίαρχο χαρακτηριστικό για τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας με το πέρασμα των χρόνων όμως ώθησε τους χρήστες να έχουν καινούργιες απαιτήσεις από τις καινούργιες γενιές δικτύων. Ένα ακόμη παράδειγμα είναι και η ανάγκη των χρηστών για να έχουν καλύτερη ταχύτητα όταν χρησιμοποιούν εφαρμογές όπως το skype (τηλεφωνία μέσω διαδικτύου). Καθώς με τις προηγούμενες τεχνολογίες δεν είχαμε τόσο υψηλές ταχύτητες παρατηρούνταν συχνά το φαινόμενο να παγώνει η εικόνα, να γίνονται διακοπές στην σύνδεση

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

και να έχουμε αξιόλογη καθυστέρηση κατά την μετάδοση των αρχείων. Σημαντικό ρολό για το LTE έπαιξε και η ανάγκη για μεγαλύτερη ταχύτητα δεδομένων κυρίως στην κατερχόμενη ζεύξη (DownLink) οπότε μια καινούργια τεχνολογία που θα έχει την δυνατότητα να παρέχει υψηλές ταχύτητες δεδομένων ήταν απαραίτητη.

2. LTE και LTE-ADVANCED

Λόγω της ανάπτυξης των τεχνολογιών στα συστήματα κινητών επικοινωνιών, κρίθηκε αναγκαίο να δημιουργηθεί μια νέα γενιά δικτύων που να συνδυάζει όλες τις υπάρχουσες τεχνολογίες δικτύων σε μια ενιαία τεχνολογία. Αυτόν τον ρολό κλήθηκε να πραγματοποιήσει η τέταρτη γενιά δικτύων (4G). Αυτά τα δίκτυα έχουν τα χαρακτηριστικά ενός ευέλικτου και αυτόνομου συστήματος, που να μπορεί να υποστηρίξει ένα πλήθος υφιστάμενων και νέων υπηρεσιών που αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους.

2.1. Χαρακτηριστικά και πεδίο εφαρμογής των δικτύων 4G

Τα 4G δίκτυα έχουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- **Δίκτυο με βάση IP (Internet Protocol address):** Βασίζεται σε IPv6 που έχει σαν αποτέλεσμα να είναι πιο αποτελεσματικό σε μεγάλο αριθμό χρηστών και να μπορεί να ικανοποιήσει πιο πολύ την κινητικότητα των χρηστών από ότι στα προηγούμενα δίκτυα [1].
- **Συμβατότητα συσκευών:** Οι τεχνολογίες αυτές είναι τόσο διαφορετικές από τις προηγούμενες που πρέπει να δημιουργηθούν νέες συσκευές για να έχουν πρόσβαση στο δίκτυο. Οι ασύρματες δυνατότητες που έχουν ενσωματωθεί πλέον στις συσκευές είναι τέτοιες που στα πρώτα έτη των ασυρμάτων δικτύων δεν υπήρχαν καν ως φαντασία. Αυξημένες δυνατότητες έχουν όχι μόνο οι προσωπικές συσκευές όπως τα τηλέφωνα, οι φορητοί υπολογιστές, αλλά και αισθητήρες, ενσωματωμένοι ελεγκτές και άλλος εξειδικευμένος εξοπλισμός [1].
- **Καλύτερη κάλυψη υπηρεσιών:** Ο χρήστης θα έχει την δυνατότητα να απολαμβάνει οποιαδήποτε υπηρεσία θέλει οπουδήποτε [1].
- **Βελτιωμένη συνδεσιμότητα:** Δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να είναι συνδεδεμένος συνέχεια στα δίκτυα πρόσβασης, ώστε ανά πάσα στιγμή να μπορεί να χρησιμοποιήσει τους πόρους που του διαθέτει το δίκτυο, με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η εξασφάλιση της ζητούμενης ποιότητας υπηρεσιών (QoS) [1].
- **Συνεχής σύνδεση:** Ο χρήστης έχει την δυνατότητα να είναι πάντοτε συνδεδεμένος στο δίκτυο. Για όσο διάστημα το τερματικό του θα είναι σε λειτουργία, μπορεί να συνδέεται στο δίκτυο και να τυγχάνει πολύ μικρής καθυστέρησης στην πρόσβαση [1].

2.2. Προτυποποίηση Δικτύων Τέταρτης γενιάς

2.2.1 3GPP Release 8 (LTE)

Το LTE με την πρώτη του έκδοση, 3GPP Release 8 [58], εισήγαγε πρωτοποριακές τεχνολογίες σε σύγκριση με τα προηγούμενα κυψελοειδή συστήματα. Οι αλλαγές αυτές επέτρεψαν στην πρώτη έκδοση του LTE να είναι σε θέση να λειτουργεί πιο αποτελεσματικά όσον αφορά τη χρήση του φάσματος (φασματική απόδοση) και να παρέχει τα πολύ υψηλότερα data rates που απαιτούνται.

Η τεχνολογία OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) χρησιμοποιήθηκε από την αρχή του LTE επειδή επέτρεψε αποτελεσματικά την χρήση υψηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, παρέχοντας ταυτόχρονα υψηλό βαθμό ανθεκτικότητας σε παρεμβολές. Το OFDM έχει την δυνατότητα να αντιμετωπίζει αποτελεσματικά τις παρεμβολές, να έχει μικρό ρυθμό σφαλμάτων ακόμα και σε υψηλές ταχύτητες. Αυτό βοήθησε ώστε ακόμη και αν κάποια πακέτα χάνονταν λόγω παρεμβολών, το σύστημα ήταν ακόμα σε θέση να το αντιμετωπίσει.

Τα συστήματα πρόσβασης διαφέρουν μεταξύ της ανερχόμενης ζεύξης και της κατερχόμενης ζεύξης: Το OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) χρησιμοποιείται στην κατερχόμενη ζεύξη ενώ το SC-FDMA (Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access) χρησιμοποιείται στην ανερχόμενη ζεύξη. Το SC-FDMA παρουσιάζει μικρότερο λόγω μέγιστης προς μέση ισχύ και για αυτό προτιμάται στο Uplink όπου η ισχύς εκπομπής είναι μικρότερη. Ο χαμηλότερος λόγος μέγιστης προς μέση ισχύς επιτρέπει την επίτευξη καλύτερων επιπέδων τελικού ενισχυτή ισχύος RF και συμβάλει στην αύξηση διάρκειας ζωής της μπαταρίας του φορητού τερματικού (UE-User Equipment).

Δεύτερη αλλαγή ήταν η είσοδος του MIMO (Multiple-Input and Multiple-Output). Η τεχνολογία MIMO χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραιές για την λήψη και για την εκπομπή. Συνεπώς, μπορούν να χρησιμοποιηθούν συστήματα που χρησιμοποιούν διατάξεις κεραιών 2 x 2, 4 x 2 ή 4 x 4. Ενώ είναι σχετικά εύκολο να προστεθούν και άλλες κεραιές στο σταθμό βάσης, δεν ισχύει το ίδιο για κινητά τηλέφωνα, όπου οι διαστάσεις του εξοπλισμού χρήστη περιορίζουν τον αριθμό των κεραιών που πρέπει να τοποθετηθούν. Η πρώτη έκδοση του προτύπου LTE (3GPP Release 8) υποστηρίζει 2 x 2 MIMO τόσο στην κατερχόμενη όσο και στην ανερχόμενη ζεύξη

Με τις πολύ υψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων και τις απαιτήσεις χαμηλής καθυστέρησης για το LTE, ήταν απαραίτητο να εξελιχθεί η αρχιτεκτονική του συστήματος ώστε να επιτευχθεί βελτιωμένη απόδοση. Με αυτόν τον τρόπο οι χρόνοι καθυστέρησης μπορούσαν να μειωθούν και τα δεδομένα να κατευθύνονται πιο άμεσα στον προορισμό τους. Μία ακόμα αλλαγή ήταν η μεταφορά δεδομένων με χρήση IP. Το GSM (Global System for Mobile Communications) όρισε το πρότυπο για τη φωνητική συνδεσιμότητα, το VoLTE (Voice over LTE). Το VoLTE απαιτούσε την υλοποίηση ενός πυρήνα IMS (IP Multimedia Subsystem) κάτι που επιβράδυνε την εξέλιξη των δυνατοτήτων του VoLTE λόγω των αυξημένων οικονομικών απαιτήσεων. Για να βοηθηθούν οι παροχή εκμετάλλευσης να ξεπεράσουν αυτό το γεγονός, αναπτύχθηκε μια περιορισμένη εφαρμογή του IMS κάτι που μείωσε σημαντικά τις οικονομικές δαπάνες των παροχών [1], **Error! Reference source not found..**

2.2.2 3GPP Release 10-13 (LTE-A)

Στην έκδοση 10 [59] περιλαμβάνονται σημαντικά χαρακτηριστικά και βελτιώσεις για την υλοποίηση των απαιτήσεων της ITU (International Telecommunication Union) και της IMT-Advanced (International Mobile Telecommunications-Advanced) που πλέον θέτουν ως στόχο υψηλότερες ταχύτητες από ό, τι μπορεί να επιτύχει το UE στις προδιαγραφές της έκδοσης 3GPP Rel.8. Οι βασικές απαιτήσεις που καθορίστηκαν από την IMT-Advanced ήταν:

- Max DownLink 3 Gbps /Max UpLink 1.5 Gbps
- Μεγαλύτερη φασματική απόδοση, από 16bps/Hz στην έκδοση 8 σε έως 30 bps/Hz στην έκδοση 10
- Παγκόσμια περιαγωγή

Οι σημαντικότερες προσθήκες που έγιναν στις εκδόσεις 11, 12 και 13 [60] όπου αφορούν το LTE-Advanced είναι οι ακόλουθες:

- **Ενισχυμένη πολλαπλή πρόσβαση Uplink:** Η έκδοση 10 εισήγαγε την ομαδοποιημένη SC-FDMA στην ανερχόμενη ζεύξη. Η έκδοση 8 επέτρεπε εφαρμογή του SC-FDMA μόνο σε συνεχές φάσμα, ενώ το LTE-Advanced επέτρεψε την χρήση συχνοτήτων επιλεκτικά στην ανερχόμενη ζεύξη.
- **MIMO:** Το LTE-Advanced επέτρεψε διάταξη μέχρι 8x8 MIMO στη κατερχόμενη ζεύξη και 4x4 MIMO στην ανερχόμενη ζεύξης. Η τελευταία μελέτη στην έκδοση 13 εξέτασε συστήματα MIMO υψηλής απόδοσης με έως και 64 κεραιές.
- **Κόμβοι αναμετάδοσης (Release):** Προκειμένου να μειωθούν οι περιοχές χωρίς κάλυψη, οι κόμβοι αναμετάδοσης (release) είναι ένα από τα χαρακτηριστικά που προτάθηκαν στην έκδοση 10. Οι κόμβοι αναμετάδοσης επεκτείνουν την κάλυψη του κύριου eNB(eNodeB) σε περιβάλλον χαμηλής κάλυψης.
- **Συντονισμός μεταξύ κυψελών (eICIC):** Το eICIC (Inter-Cell Interference Coordination) εισήχθη στην έκδοση 3GPP 10 για την αντιμετώπιση προβλημάτων παρεμβολών στα ετερογενή δίκτυα (HetNet). Το eICIC μετριάζει τις παρεμβολές στα κανάλια μεταφοράς και ελέγχου. Το eICIC ανταλλάσσει πληροφορίες αναμεσα στους σταθμούς βάσεις και τροποποιεί τα χαρακτηριστικά μεταδώσεις (ισχύς, συχνότητα ,χρόνος) για να μετριάσει τις παρεμβολές.
- **Carrier Aggregation (CA):** Το CA που εισήχθη στην έκδοση 10 είναι ένας οικονομικά αποδοτικός τρόπος για τους χειριστές να χρησιμοποιούν την κατανομή φάσματος τους σε διαφορετικές ή ίδιες ζώνες, προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση των τελικών χρηστών όπως απαιτείται από την IMT-Advanced. Η παραγωγικότητα του χρήστη αυξάνεται με ταυτόχρονη αποστολή δεδομένων σε δύο ή περισσότερα φέροντα σήματα. Ο στόχος στην έκδοση 13, τελευταία έκδοση του LTE-A, ήταν να υποστηρίξει τη συναθροισή μέχρι 32 CC (component carriers).

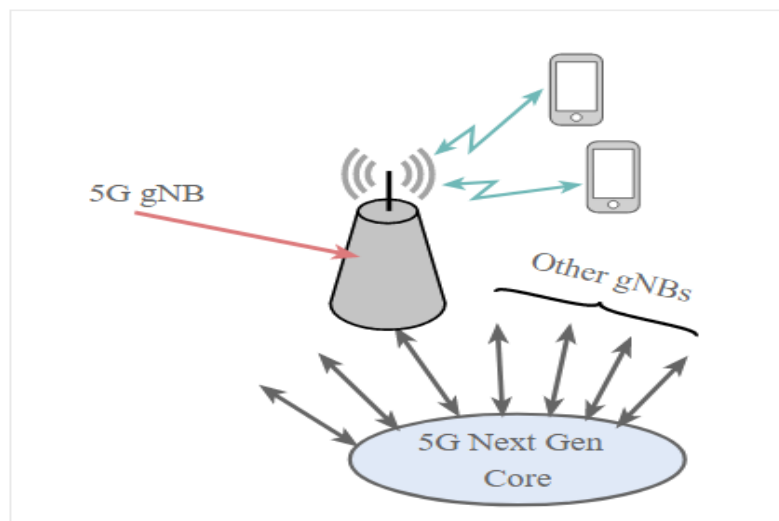
Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

- **Coordinated multipoint transmission and reception (CoMP):** Με τον όρο COMP αναφερόμαστε στην συντονισμένη προσπάθεια που γίνεται μεταξύ γειτονικών κυψελών, με στόχο την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης στα όρια της κυψέλης και την μείωση των παρεμβολών. Χρησιμοποιείται για την παροχή βελτιωμένων επιδόσεων, ιδιαίτερα στις άκρες των κυψελών.
- **ePDCCH (Enhanced Physical Downlink Control Channel):** Νέο PDCCH που εισήχθη στην έκδοση 3GPP 11 για την αύξηση της χωρητικότητας του καναλιού ελέγχου. Το ePDCCH χρησιμοποιεί τους πόρους PDSCH για τη μετάδοση πληροφοριών ελέγχου σε αντίθεση με την έκδοση 8 όπου το PDCCH χρησιμοποιούσε μόνο συγκεκριμένα subframes.
- **Επικοινωνία τύπου μηχανής (MTC- Machine Type Communication):** Η ήδη τεράστια ανάπτυξη στην επικοινωνία μεταξύ μηχανών αναμένεται τα επόμενα χρόνια να αυξηθεί ακόμα περισσότερο. Αναμένεται δε να οδηγήσει σε τεράστια αύξηση της σηματοδοσίας στο δίκτυο και προβλήματα χωρητικότητας. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, ορίζεται μια νέα κατηγορία UE για βελτιστοποιημένες λειτουργίες MTC.
- **Έλεγχος υπερφόρτωσης για επικοινωνία MTC:** Για συσκευές τύπου μηχανής καθορίστηκε νέος μηχανισμός στην έκδοση 11 όπου το δίκτυο σε περίπτωση μαζικής επικοινωνίας από συσκευές μπορεί να αποκλείσει ορισμένες συσκευές από το να σύνδεθούν στο δίκτυο.
- **Τεχνολογία εξοικονόμησης μπαταρίας σε Smartphone:** Πολλές εφαρμογές σε smartphones παράγουν κίνηση στο παρασκήνιο, η οποία καταναλώνει την ενέργεια μπαταρίας. Στην έκδοση 11 καθορίστηκε μια μέθοδος όπου το UE μπορεί να ενημερώνει το δίκτυο εάν πρέπει να λειτουργεί σε λειτουργία εξοικονόμησης μπαταρίας ή σε κανονική λειτουργία και με βάση τα αιτήματα του δικτύου το UE μπορεί να τροποποιήσει τις παραμέτρους DRX (Discontinuous Reception).
- **Wifi integration with LTE:** Με την ενοποίηση LTE και Wifi, οι πάροχοι απέκτησαν μεγαλύτερο έλεγχο στη διαχείριση WiFi. Στην έκδοση 12, προσδιορίστηκε ακόμη ο μηχανισμός για τη διαχείριση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης και της επιλογής δικτύου μεταξύ LTE και WiFi.
- **LTE σε μη αδειοδοτημένο φάσμα:** Η λειτουργία LTE σε μη αδειοδοτημένο φάσμα είναι ένα από τα στοιχεία της μελέτης στην έκδοση 12. Οι λειτουργίες μη αδειοδοτημένου φάσματος εύρους ζώνης προσέφεραν πολλά οφέλη για τους παρόχους, όπως η αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου και η απόδοση.
- **Εύρεση τοποθεσίας:** Στην έκδοση 13 προτάθηκε μέθοδος που βελτιώνει τις υπάρχουσες μεθόδους προσδιορισμού θέσης και διερευνά νέες μεθόδους προσδιορισμού θέσης ειδικά για τη βελτίωση της ακρίβειας[3], [4].

2.2.3 3GPP Release 14-16 (5G)

Με τις απαιτήσεις που τίθενται στο νέο πρότυπο κινητών επικοινωνιών 5G, αναπτύχθηκε μια εντελώς νέα διασύνδεση ασύρματης πρόσβασης. Το σύστημα 5G NR (New Radio) [62] παρέχει λύσεις στις αυξανόμενες ανάγκες συνδεσιμότητας. Η ανάπτυξη του 5G NR είναι το κλειδί για να λειτουργήσουν τα συστήματα πέμπτης γενιάς και παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με το 4G. Το 5G NR έχει αναπτυχθεί από το μηδέν λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις και εκμεταλλευόμενο τις τεχνολογίες και τεχνικές που θα είναι διαθέσιμες όταν αρχίσει να αναπτύσσεται το δίκτυο 5G. Το 5G NR χρησιμοποιεί διαμόρφωση, κυματομορφές και τεχνολογίες πρόσβασης που θα επιτρέψουν στο σύστημα να ανταποκριθεί στις ανάγκες των υπηρεσιών υψηλής ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων, εκείνων που χρειάζονται low latency και εκείνων που χρειάζονται μικρές ταχύτητες δεδομένων και μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

Η πρώτη εμφάνιση του 5G NR γίνεται στην έκδοση 3GPP 15 [63]. Τα σχέδια προδιαγραφών για την έκδοση 15 εγκρίθηκαν τον Δεκέμβριο του 2017 και οριστικοποιήθηκαν στα μέσα του 2019. Η έκδοση 15 αποτελεί τη πρώτη φάση ενός προτύπου κινητής επικοινωνίας 5G. Η έκδοση 16 [64] παρέχει προδιαγραφές για τη δεύτερη φάση και αναμένεται να οριστικοποιηθεί τον Ιούνιο του 2020.



Εικόνα 1 5G Radio Access Network gNB[5]

Η νέα έκδοση 5G έχει σχεδιαστεί για να προσφέρει σημαντικές βελτιώσεις σε τομείς όπως η ευελιξία και η αποδοτικότητα, τόσο από την άποψη της χρήσης ενέργειας όσο και του φάσματος. Το 5G είναι σε θέση να παρέχει ευρυζωνικές επικοινωνίες (π.χ. μετάδοση βίντεο συνεχούς ροής), επικοινωνίες χαμηλού latency (π.χ. επικοινωνία οχημάτων), καθώς και μεταδόσεις μικρού εύρους ζώνης για επικοινωνίες τύπου μηχανής.

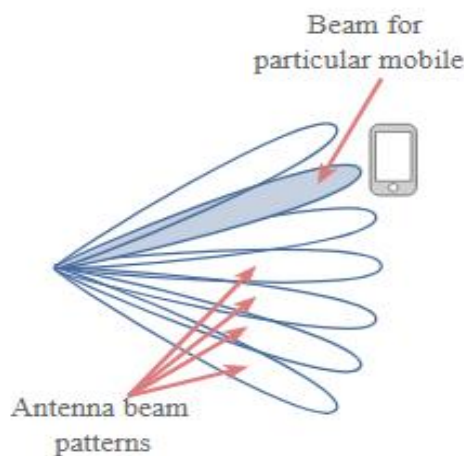
Οι νέες βάσεις όπου θα χρησιμοποιηθούν για το 5G:

- **Νέο φάσμα ραδιοσυχνότητας:** Με την χρήση των κινητών επικοινωνιών να αυξάνεται ραγδαία, η εισαγωγή του 5G θα επιταχύνει αυτή την τάση με πολλές ακόμη εφαρμογές που θα

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

καλύπτονται από την νέα αυτή τεχνολογία. Ενώ οι βελτιώσεις στην απόδοση του φάσματος που γίνονται βοηθούν, δεν θα είναι σε θέση να ικανοποιήσουν τις τεράστιες αυξήσεις στη χρήση του, συνεπώς χρειάζεται περισσότερο φάσμα. Η σχεδίαση ζωνών συχνοτήτων του 5G είναι πολύ πιο σύνθετη, καθώς το φάσμα συχνοτήτων για το sub-6GHz 5G εκτείνεται από 450 MHz έως τα 6 GHz, οι συχνότητες 5G χιλιοστομετρικού κύματος(mmWave) κυμαίνονται από 24.250 GHz έως 52.600 GHz ενώ περιλαμβάνεται επίσης και μη αδειοδοτημένο φάσμα. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί φάσμα 5G στην περιοχή από 5925MHz έως 7150 MHz και στα 64 GHz έως 86 GHz. Ένας από τους κύριους λόγους για τους οποίους διατίθεται πρόσθετο φάσμα για χρήσεις 5G είναι οι φυσικοί περιορισμοί που συνδέονται με την απόδοση (throughput) και το εύρος ζώνης. Οι ζώνες συχνοτήτων του 4G αντιστοιχούσαν σε εύρος ζώνης μεταξύ 5 MHz και 20 MHz ανά κανάλι, όπου το πρότυπο 5G FR1 (Frequency Range 1), που περιλαμβάνει τις sub-6GHz συχνότητες, επιτρέπει εύρος ζώνης μεταξύ 5 MHz και 100 MHz ανά κανάλι. Καθώς το εύρος ζώνης είναι ανάλογο με τη μέγιστη απόδοση, η 5πλάσια αύξηση του εύρους ζώνης σημαίνει με περίπου 5 φορές αύξηση της απόδοσης [50].

- **Βελτίωση Beamforming:** Η μορφοποίηση δέσμης (Beamforming) χρησιμοποιεί προηγμένο αλγόριθμο που παρακολουθεί διάφορες παραμέτρους, όπως τη θέση του τερματικού, την ταχύτητα, την απόσταση, το επίπεδο QoS που απαιτείται και τα επίπεδα SNR. Αυτό δίνει τις κατάλληλες πληροφορίες για την διαμόρφωση δέσμης, που σκοπό έχει την βελτίωση του σήματος προς την κατεύθυνση του δέκτη. Το σύστημα κεραιών χρησιμοποιεί πολλές κεραιές που εκπέμπουν ακριβώς το ίδιο σήμα, ωστόσο, κάθε μία από αυτές διαμορφώνεται ειδικά. Ένας αλγόριθμος εφαρμόζεται σε κάθε μετάδοση και τα διάφορα μεταδιδόμενα σχήματα που εκπέμπονται διαμορφώνονται στον αέρα σχηματίζοντας έτσι μια εικονική δέσμη που στοχεύει τον δέκτη. Αν η δέσμη μετακινηθεί σε ανεπιθύμητες θέσεις (θέσεις διαφορετικές από τον προοριζόμενο δέκτη), θα δημιουργήσει προβλήματα παρεμβολών. Θεωρητικά, η αύξηση του αριθμού των κεραιών που χρησιμοποιούνται στη συστοιχία κεραιών MIMO έχει ως αποτέλεσμα ένα πολύ ισχυρότερο σχηματισμό δέσμης [49].

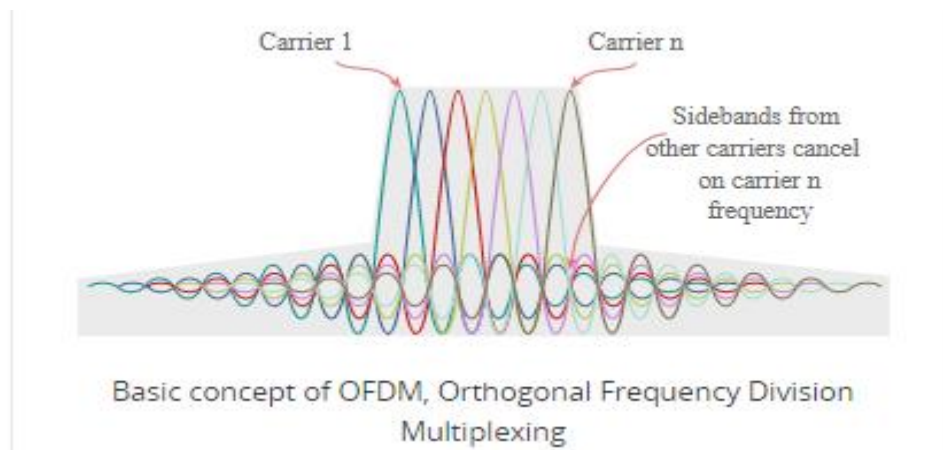


Εικόνα 3 Σχηματική αναπαράσταση χρήσης Beamforming στο 5G NR[5]

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

Η μετάβαση σε υψηλότερες συχνότητες θα επιτρέπει την χρήση πολύ μικρότερων κεραιών και δυνατότητα προγραμματιζόμενων υψηλών επιπέδων κατευθυντικότητας. Στις συχνότητες άνω των 24 GHz, όπου οι κεραιές είναι μικρότερες, υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιούνται κεραιές υψηλών επιδόσεων, οι οποίες είναι ικανές να κατευθύνουν με ακρίβεια την ισχύ και να παρέχουν καλύτερη απόδοση προς την κατεύθυνση του δέκτη[48].

- **Βελτιστοποιημένο OFDM:** Για το 5G πάρθηκε απόφαση να χρησιμοποιηθεί μια μορφή του OFDM. Το OFDM έχει χρησιμοποιηθεί στα 4G δίκτυα, τα πιο πρόσφατα πρότυπα Wi-Fi και πολλά άλλα συστήματα και θεωρείται ως ο βέλτιστος τύπος κυματομορφής για την ποικιλία διαφορετικών εφαρμογών του 5G. Με την πρόσθετη διαθέσιμη επεξεργαστική ισχύ στο 5G, μπορούν να εφαρμοστούν διάφορες μορφές βελτιστοποίησης του OFDM.



Εικόνα 2 Αναπαράσταση OFDM για το 5G[5]

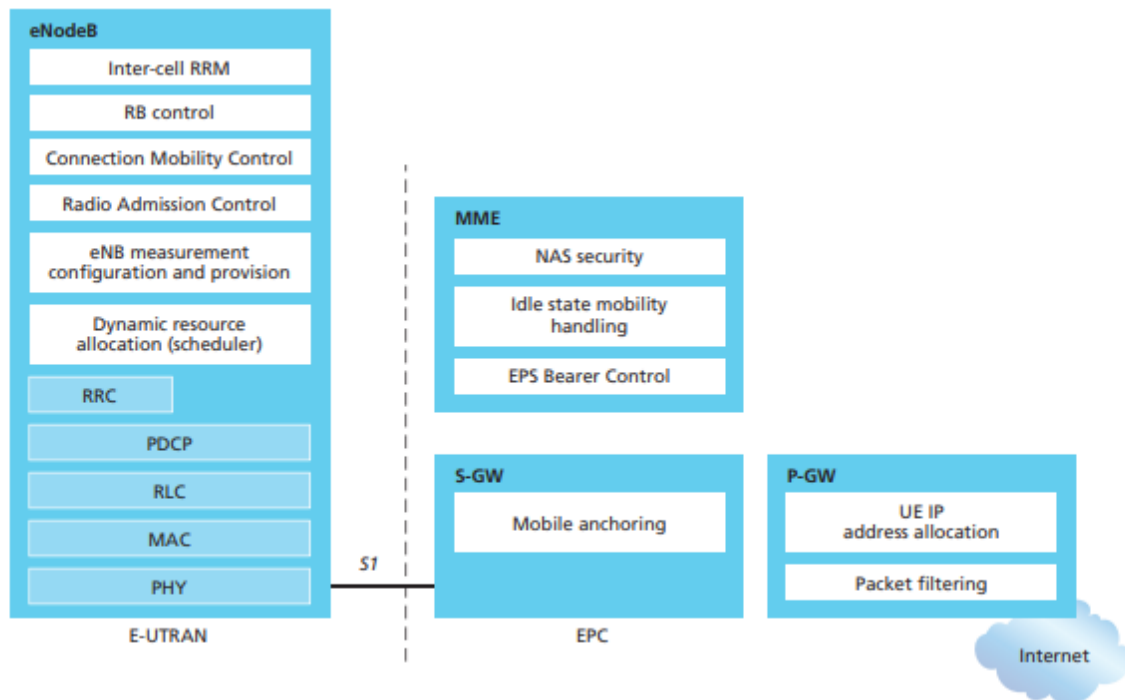
Η έκδοση του OFDM που χρησιμοποιείται στο downlink 5GNR χρησιμοποιεί κυκλικό πρόθεμα CP-OFDM (Cyclic Prefix – Orthogonal Frequency Division Multiplexing) και είναι παρόμοια με αυτή που είχε υιοθετήσει το LTE για το σήμα κατερχόμενης ζεύξης [2].

- **Χρήση μικρών κελιών(Small-Cells):** Για να μπορέσει να υπάρχει η απαιτούμενη κάλυψη με χρήση συχνοτήτων άνω των 6GHz, η οποία προορίζεται κυρίως για το κέντρο πόλεων, έχει προταθεί η χρήση μικρών κυψελών (small-cells). Ένα δίκτυο μικρών κυψελών είναι μια ομάδα σταθμών βάσης που μεταδίδουν χαμηλή ισχύ και οι οποίες χρησιμοποιούν mmWave για να ενισχύσουν τη συνολική χωρητικότητα του δικτύου. Το δίκτυο μικρών κυψελών 5G λειτουργεί με το συντονισμό μιας ομάδας μικρών κυψελών να μοιράζονται το φορτίο και να μειώνουν κυρίως τις δυσκολίες των φυσικών εμποδίων που προκύπτουν από την χρήση millimeter-wave συχνοτήτων, συχνότητες δηλαδή άνω των 30GHz.

Με τη χρήση αυτών των τεχνικών, το 5G New Radio θα είναι σε θέση να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση, την ευελιξία, την επεκτασιμότητα και την αποδοτικότητα των σημερινών δικτύων κινητών επικοινωνιών [48].

3. Αρχιτεκτονική δικτύου 4G

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούμε στην αρχιτεκτονική των δικτύων τέταρτης γενιάς και θα περιγράψουν τα συστατικά του στοιχεία. Η αρχιτεκτονική των δικτύων 4^{ης} γενιάς αποτελείται από δυο τμήματα, το δίκτυο κορμού (E-UTRAN) και το δίκτυο πρόσβασης (Evolved Packet Core) τα οποία απαρτίζουν το EPS (Evolved Packet System). Στην εικόνα 4 παρουσιάζονται τα κύρια μέρη του δικτύου LTE που θα αναλύσουμε.



Εικόνα 4 Αρχιτεκτονική δικτύου LTE[6]

3.1. Δίκτυο κορμού (Core Network)

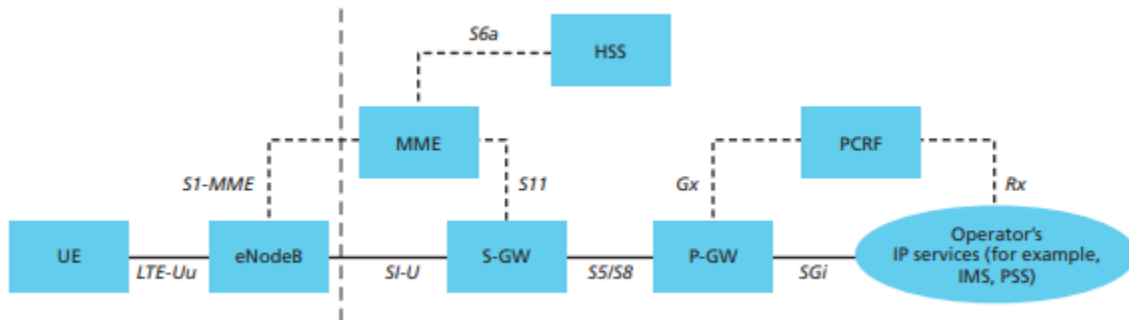
Το δίκτυο κορμού είναι υπεύθυνο και την εγκατάσταση των κόμβων και τον έλεγχο του UE (User Equipment). Οι κύριοι λογικοί κόμβοι του EPC είναι

- **PDN Gateway (P-GW)**
- **Serving Gateway (S-GW)**
- **Mobility Management Entity (MME)**

Εκτός από αυτούς του κόμβους το EPC συμπεριλαμβάνει και άλλους κόμβους όπως τον Home Subscriber Server (HSS) και το Policy Control and Charging Rules Function (PCRF). Μέσω του EPC δίνεται η δυνατότητα να δημιουργηθεί μια διαδρομή για την επίτευξη ενός συγκεκριμένου QoS. Ο έλεγχος

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

εφαρμογών πολυμέσων όπως (VoIP) παρέχεται από το IP Multimedia Subsystem (IMS), το οποίο θεωρείται ότι βρίσκεται εκτός του ίδιου του EPC. Στην εικόνα 7 θα παρουσιάσουμε τα συστατικά του δικτύου:

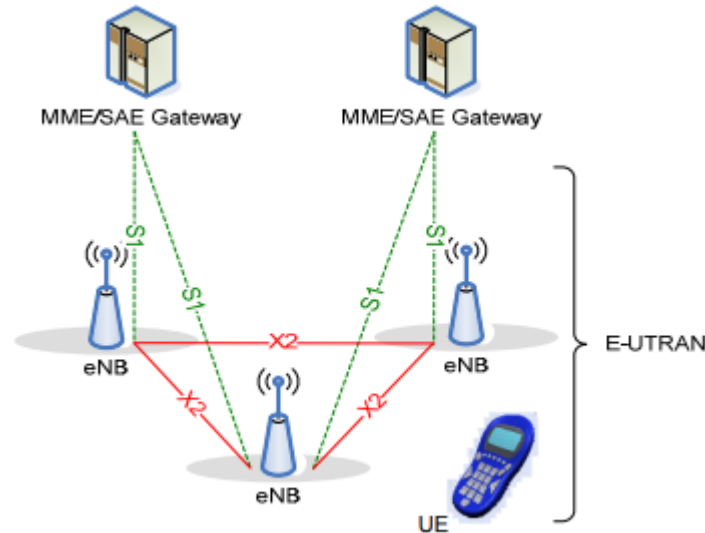


Εικόνα 5 Δίκτυο κορμού LTE[7]

- **The Policy Control and Charging Rules Function (PCRF):** Είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο και για την λήψη αποφάσεων, καθώς και για τον έλεγχο των λειτουργιών χρέωσης βάσει του πως λειτουργούν οι υπηρεσίες όσον αφορά το QoS και στην συνέχεια παρέχει πληροφορίες στο PCEF (Policy Control Enforcement Function), που βρίσκεται στο P-GW, ώστε να ενημερωθούν οι κατάλληλοι κόμβοι και να οριστεί μια σωστή πολιτική. Οι πληροφορίες που παρέχει το PCRF στην PCEF ονομάζονται κανόνες PCC.
- **Home Subscription Server (HSS):** Είναι μια βάση δεδομένων που έχει τα στοιχεία για όλους τους χρήστες. Πρόκειται για μια βάση δεδομένων που είναι αποθηκευμένη ξεχωριστά για κάθε πάροχο. Η δουλειά που έχει να κάνει το HSS αφορά στο να έχει αντίγραφα για κάποια στοιχεία που αφορούν τις υπηρεσίες των χρηστών και που μπορούν αυτοί να έχουν πρόσβαση ή όχι.
- **PDN Gateway (P-GW):** Είναι υπεύθυνη για σύνδεση του EPC με το διαδίκτυο, καθώς και για το απαιτούμενο QoS και τη χρέωση σύμφωνα με τους κανόνες της PCRF. Φιλτράρει τα πακέτα IP του χρήστη και τα κατευθύνει σε διαφορετικούς κόμβους ανάλογα με το QoS, βάσει των πρότυπων Traffic Flow Templates (TFT) [7].
- **Serving Gateway(S-GW):** Όλα τα πακέτα IP του χρήστη μεταφέρονται μέσω της υπηρεσίας S-GW, η οποία χρησιμεύει ως συνδετικός κρίκος κινητικότητας όταν τα τεμαχικά κινούνται μεταξύ eNodeBs, καθώς και μεταξύ άλλων τεχνολογιών (3GPP, GSM).
- **Mobility Management Entity (MME):** Αποτελεί το επίπεδο ελέγχου του EPC, είναι υπεύθυνο για την παρακολούθηση των συσκευών που βρίσκονται σε αδράνεια σε ένα δίκτυο. Ακόμη παίζει ενεργό ρόλο στην ενεργοποίηση / απενεργοποίηση των διαθέσιμων φορέων σε ένα τεμαχικό. Τέλος είναι υπεύθυνο να κάνει είναι η επιλογή S-GW για ένα UE κατά την αρχική σύνδεση[7].

3.2. Radio Access Network

Το δίκτυο πρόσβασης του LTE E-UTRAN είναι ένα δίκτυο που αποτελείται από κόμβους eNodeBs. Τα eNodeBs είναι υπεύθυνα για όλες τις λειτουργίες που σχετίζονται με μια ή περισσότερες κυψέλες. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 6 τα eNodeB συνδέονται μεταξύ τους μέσω της διεπαφής X2. Στην συνέχεια βλέπουμε από το παρακάτω σχήμα ότι η σύνδεση του δικτύου πρόσβασης με τον πυρήνα του δικτύου γίνεται με S1 για την σύνδεση με το MME και με S1 για την σύνδεση με το Service- Gateway (S-GW).



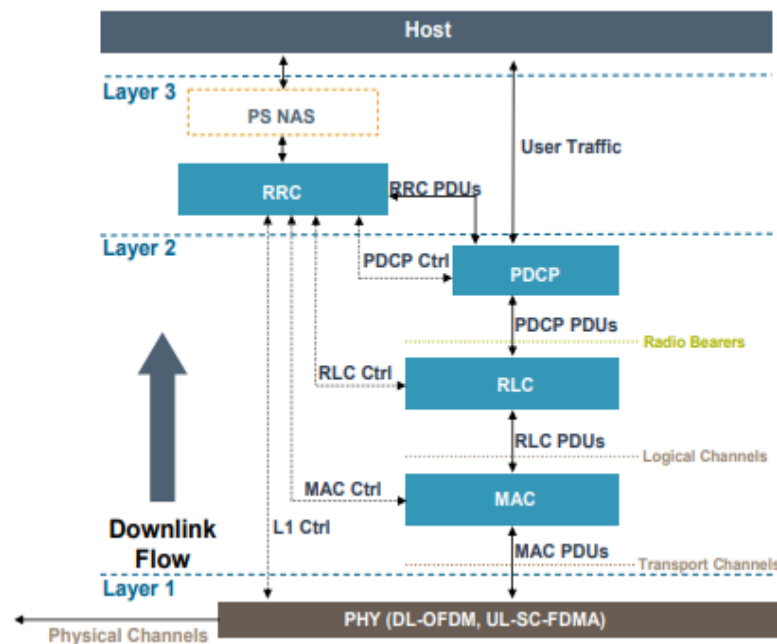
Εικόνα 6 Δίκτυο E-UTRAN[8]

Το E-UTRAN είναι υπεύθυνο για παρακάτω λειτουργίες:

- **Security:** Όλες οι πληροφορίες στέλνονται με κρυπτογραφημένη ράδιο επαφή.
- **Radio Resource Management (RRM):** Αυτό μας προσφέρει όλες τις λειτουργίες σχετικά με τον έλεγχο των διαθέσιμων πόρων, όπως ο έλεγχος αποδοχής, έλεγχος κινητικότητας και για την δυναμική κατανομή των πόρων για την ανερχόμενη και την κατερχόμενη σύνδεση στους χρήστες.
- **Header Compression:** Συμβάλλει στην αποτελεσματική χρήση των διαθέσιμων πόρων συμπιέζοντας τις κεφαλίδες των IP πακέτων που αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό κόστος, ειδικά για μικρά πακέτα όπως του VoIP [8].

3.3.Στρώματα πρωτοκόλλου ραδιοεπαφής

Η στοίβα πρωτοκόλλου ραδιοεπαφής ορίζει τρία επίπεδα: το φυσικό επίπεδο Physical layer (επίπεδο 1), το επίπεδο σύνδεσης δεδομένων και πρόσβασης (επίπεδο 2), καθώς και το λογισμικό επιπέδου εφαρμογής (επίπεδο 3). Στην εικόνα 7 φαίνονται τα επίπεδα:



Εικόνα 7 Στρώματα πρωτοκόλλου ραδιοεπαφής[10]

Physical layer: Το φυσικό επίπεδο παρέχει τη βασική λειτουργικότητα της μετάδοσης bit στον αέρα. Στο LTE το φυσικό επίπεδο υλοποιείται από το OFDMA στην κατερχόμενη ζεύξη και το SC-FDMA στην ανερχόμενη ζεύξη. Οι λειτουργίες FDD και TDD μπορούν να συνδυαστούν (ανάλογα με τις δυνατότητες UE) στο ίδιο φυσικό επίπεδο. Το φυσικό επίπεδο χρησιμοποιεί φυσικά κανάλια για τη μετάδοση δεδομένων μέσω του ασύρματου καναλιού. Τα φυσικά κανάλια αντιστοιχίζονται δυναμικά στους διαθέσιμους πόρους (μπλοκ φυσικών πόρων και θύρες κεραίας). Σε ανώτερα επίπεδα, προσφέρει τη λειτουργικότητα μετάδοσης δεδομένων μέσω διαύλων μεταφοράς. Όπως και στο UMTS, ένα κανάλι μεταφοράς είναι μια υπηρεσία μετάδοσης υλοποιημένη με μπλοκ με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά όσον αφορά την ποσότητα των δεδομένων bit, την καθυστέρηση, τον κίνδυνο σύγκρουσης και την αξιοπιστία.

MAC (Medium Access Control): Οι κυρίες λειτουργίες του υποστρώματος είναι η διόρθωση λαθών μέσω του μηχανισμού HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request) και η αντιστοίχιση μεταξύ των λογικών καναλιών και των καναλιών μεταφοράς. Ακόμη μέσω του δυναμικού προγραμματισμού του, δίνεται η δυνατότητα να παρέχει προτεραιότητα μεταξύ διαφορετικών UE. Επίσης, το υποστρώμα MAC είναι υπεύθυνο για την επιλογή του τρόπου μετάδοσης των κινητών τερματικών, η οποία περιλαμβάνει την

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

επιλογή του τύπου διαμόρφωσης, του ρυθμού κωδικοποίησης, της τάξης MIMO και του επιπέδου ισχύος[9].

RLC (Radio Link Control): Οι βασικές λειτουργίες που εκτελεί είναι: η διόρθωση λαθών μέσω του ARQ (Automatic Repeat ReQuest) και η μεταφορά των PDUs που έχουν ληφθεί από υψηλότερα επίπεδα.

Οι τρόποι λειτουργίας του είναι :

- **Transparent Mode (TM):** Είναι η πιο απλή λειτουργία διότι δεν διαθέτει προσθήκη κεφαλίδας RLC, ούτε επιτρέπει τον κατακερματισμό των δεδομένων [9].
- **Unacknowledged Mode (UM):** Σε αυτήν την λειτουργία ανακαλύπτονται τα χαμένα πακέτα και γίνεται η ανασύνταξη τους [9].
- **Acknowledged Mode (AM):** Πρόκειται για την πιο περιπλοκή λειτουργία του RLC, έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπει την αναμετάδοση των χαμένων PDUs [9].

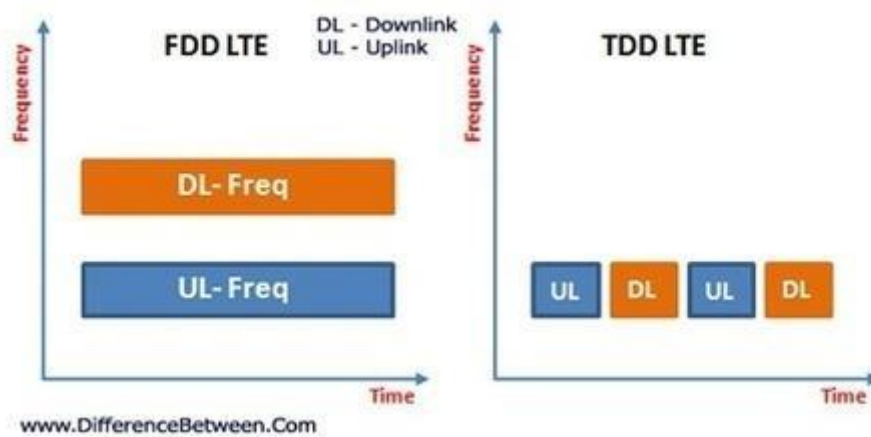
RRC (Radio Resource Control): Το RRC ελέγχει την πρόσβαση στο δίκτυο κορμού. Παρέχει τα απαιτούμενα μηνύματα για τη διαχείριση των καναλιών, τον έλεγχο των μετρήσεων και την αποστολή αναφορών κ.λπ.

NAS Protocols: Το πρωτόκολλο NAS λειτουργεί μεταξύ UE και MME και χρησιμοποιείται για τη διαχείριση και την διατήρηση συνεχούς επικοινωνίας καθώς μετακινείται ο χρήστης [9].

4. Τεχνολογίες στο LTE και LTE –Advanced

4.1 Διαχωρισμός ζεύξεων FDD - TDD - Φάσμα LTE

Το LTE υποστηρίζει τόσο το Frequency Division Duplex (FDD) όσο και το Time Division Duplex (TDD). Το LTE FDD χρησιμοποιεί ένα συζευγμένο φάσμα όπως και στο δίκτυο 3G, ενώ το TDD LTE χρησιμοποιεί μη συζευγμένο φάσμα. Το TDD-LTE δεν απαιτεί συζευγμένο φάσμα δεδομένου ότι η εκπομπή και η λήψη λαμβάνουν χώρα στο ίδιο κανάλι αλλά σε διαφορετικό χρόνο. Στο FDD-LTE αντίθετα, απαιτείται ένα συζευγμένο φάσμα με διαφορετικές περιοχές συχνοτήτων. Για τον λόγο αυτό το TDD-LTE προτιμάται από το FDD-LTE, διότι στο πρώτο δεν υπάρχει ανάγκη για duplexer για την απομόνωση της μετάδοσης εκπομπής και λήψης. Επιπρόσθετα, στο TDD-LTE, είναι δυνατό να αλλάξει δυναμικά η αναλογία χωρητικότητας ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου, που σημαίνει ότι είναι αποτελεσματικότερο στη χρήση του φάσματος.



Εικόνα 8 Σχηματική αναπαράσταση των τεχνολογιών FDD και TDD ως προς την συχνότητα και τον χρόνο [11]

Αντίθετα, στο FDD-LTE, η χωρητικότητα καθορίζεται από την κατανομή συχνότητας από τις ρυθμιστικές αρχές, γεγονός που δυσχεραίνει τη δυναμική αλλαγή. Όσον αφορά την κάλυψη, το FDD-LTE θεωρείται ότι είναι ανώτερο από το TDD-LTE λόγω της καλύτερης ενεργειακής απόδοσής του.

Οι απαιτήσεις φάσματος και συνεπώς οι κατανομές της ζώνης συχνοτήτων για το LTE είναι διαφορετικές για τα FDD και TDD.

- **Ζώνες FDD LTE:** Το φάσμα FDD απαιτεί ζώνες ζεύγους, μία για την ανερχόμενη και μία για την κατερχόμενη ζεύξη. Είναι επίσης σημαντικό να υπάρχει επαρκής απόσταση μεταξύ του άνω ορίου της κατώτερης συχνότητας και του κάτω ορίου της ανώτερης συχνότητας ώστε να

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

επιτρέπεται επαρκής διαχωρισμός. Έτσι, η απόσταση μεταξύ καναλιού κατερχόμενης και ανερχόμενης ζεύξης πρέπει να είναι πάνω από ένα όριο.

- **Ζώνες TDD LTE:** Οι μεταδόσεις TDD απαιτούν μόνο μία ζώνη και έτσι δεν απαιτείται συζευγμένο φάσμα.

Κάθε ζώνη συχνοτήτων διαθέτει έναν αριθμό έτσι ώστε να μπορεί να οριστεί εύκολα και τα όριά της να είναι γνωστά. Σήμερα οι ζώνες LTE μεταξύ 1 και 31 καθώς και μεταξύ 65 και 70 είναι για το συζευγμένο φάσμα δηλαδή FDD και οι LTE ζώνες μεταξύ 33 και 48 είναι για το μη συζευγμένο φάσμα, δηλ. TDD [11].

4.1.1 Ορισμοί της ζώνης συχνοτήτων LTE

Οι ζώνες συχνοτήτων FDD LTE συνδυάζονται για να επιτρέπουν ταυτόχρονη μετάδοση σε δύο συχνότητες. Οι ζώνες έχουν επίσης επαρκή διαχωρισμό για να επιτρέψουν στα μεταδιδόμενα σήματα να μην επηρεάζουν αρνητικά την απόδοση του δέκτη. Εάν τα σήματα είναι πολύ κοντά μπορεί να έχουμε μειωμένη απόδοση. Στους δύο ακόλουθους πίνακες παρουσιάζονται κάποια βασικά στοιχεία σχετικά με τις ζώνες συχνοτήτων τόσο για το FDD όσο και για το TDD. Τα στοιχεία αυτά είναι η συχνότητα της ζώνης, το όνομα που έχει δοθεί στην ζώνη συχνοτήτων, το εύρος ανερχόμενης ζεύξης, το εύρος κατερχόμενης ζεύξης, η φασματική απόσταση μεταξύ της ανερχόμενης και της κατερχόμενης ζεύξης, τα υποστηριζόμενα bandwidth των καναλιών που μπορεί να έχει η ζώνη, το bandwidth του downlink/uplink και τέλος σε ποια έκδοση του LTE έγινε διαθέσιμη προς χρήση η κάθε μία.

Πίνακας 2 Πίνακας στοιχείων με LTE ζώνες συχνοτήτων FDD [12]

Band	f (MHz)	Common name	Uplink (MHz)	Downlink (MHz)	Duplex spacing (MHz)	Channel bandwidths (MHz)	Bandwidth DL/UL (MHz)	3GPP Release
1	2100	IMT	1920 – 1980	2110 – 2170	190	5, 10, 15, 20	60	8
2	1900	PCS	1850 – 1910	1930 – 1990	80	1.4, 3, 5, 10, 15, 20	60	8
3	1800	DCS	1710 – 1785	1805 – 1880	95	1.4, 3, 5, 10, 15, 20	75	8
4	1700	AWS-1	1710 – 1755	2110 – 2155	400	1.4, 3, 5, 10, 15, 20	45	8
5	850	Cellular	824 – 849	869 – 894	45	1.4, 3, 5, 10	25	8
7	2600	IMT-E	2500 – 2570	2620 – 2690	120	5, 10, 15, 20	70	8
8	900	Extended GSM	880 – 915	925 – 960	45	1.4, 3, 5, 10	35	8

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

10	1700	Extended AWS-1		1710 – 1770	2110 – 2170	400	5, 10, 15, 20	35	8
11	1500	Lower PDC		1427.9 1447.9	– 1475.9 – 1495.9	48	5, 10	60	8
12	700	Lower SMH		699 – 716	729 – 746	30	1.4, 3, 5, 10	17	8.4
13	700	Upper SMH		777 – 787	746 – 756	–31	5, 10	10	8
14	700	Upper SMH		788 – 798	758 – 768	–30	5, 10	10	8
17	700	Lower SMH		704 – 716	734 – 746	30	5, 10	12	8.3
18	850	Lower (Japan)	800	815 – 830	860 – 875	45	5, 10, 15	15	9
19	850	Upper (Japan)	800	830 – 845	875 – 890	45	5, 10, 15	15	9
20	800	Digital Dividend (EU)		832 – 862	791 – 821	–41	5, 10, 15, 20	30	9
21	1500	Upper PDC		1447.9 1462.9	– 1495.9 – 1510.9	48	5, 10, 15	15	9
22	3500	C-Band		3410 – 3490	3510 – 3590	100	5, 10, 15, 20	80	10.4
24	1600	Upper L-Band (US)		1626.5 1660.5	– 1525 – 1559	–101.5	5, 10	34	10.1
252	5200	U-NII-1		N/A	5150 – 5250	N/A	20	100	LTE-U
255	5800	U-NII-3		N/A	5725 – 5850	N/A	20	125	LTE-U
25	1900	Extended PCS		1850 – 1915	1930 – 1995	80	1.4, 3, 5, 10, 15, 20	65	10

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

26	850	Extended Cellular	814 – 849	859 – 894	45	1.4, 3, 5, 10, 15	35	11
27	800	SMR	807 – 824	852 – 869	45	1.4, 3, 5, 10	17	11.1
28	700	APT	703 – 748	758 – 803	55	3, 5, 10, 15, 20	45	11.1
29	700	Lower SMH	N/A	717 – 728	N/A	3, 5, 10	11	11.3
30	2300	WCS	2305 – 2315	2350 – 2360	45	5, 10	10	12
31	450	NMT	452.5 – 457.5	462.5 – 467.5	10	1.4, 3, 5	5	12
65	2100	Extended IMT	1920 – 2010	2110 – 2200	190	5, 10, 15, 20	90	13.2
66	1700	Extended AWS (AWS-1–3)	1710 – 1780	2110 – 2200 ^[2]	400	1.4, 3, 5, 10, 15, 20	90/70	13.2
67	700	EU 700	N/A	738 – 758	N/A	5, 10, 15, 20	20	13.2
68	700	ME 700	698 – 728	753 – 783	55	5, 10, 15	30	13.3
69	2600	IMT-E	N/A	2570 – 2620	N/A	5	50	14
70	2000	AWS-4	1695 – 1710	1995 – 2020	295 – 300 ^[3]	5, 10, 15	25/15	14
71	600	Digital Dividend (US)	663 – 698	617 – 652	-46	5, 10, 15, 20	35	15
72	450	PMR (EU)	451 – 456	461 – 466	10	1.4, 3, 5	5	15
73	450	PMR (APT)	450 – 455	460 – 465	10	1.4, 3, 5	5	15
74	1500	Lower L-Band (US)	1427 – 1470	1475 – 1518	48	1.4, 3, 5, 10, 15, 20	43	15

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

75	1500	L-Band(EU)	N/A	1432-1517	N/A	5,10,15,20	85	15
76	1500	Extended Band(EU)	L- N/A	1427-1432	N/A	5	5	15
85	700	Extended Lower SMH	698-716	728-746	30	5,10	18	15.2

Πίνακας 3 Πίνακας στοιχείων με LTE ζώνες συχνοτήτων TDD [12]

Band	f (MHz)	Common Name	Uplink/Downlink (MHz)	Channel bandwidths (MHz)	Bandwidth DL/UL (MHz)	3GPP Release
33	2100	IMT	1900 – 1920	5, 10, 15, 20	20	8
34	2100	IMT	2010 – 2025	5, 10, 15	15	8
35	1900	PCS (UL)	1850 – 1910	1.4, 3, 5, 10, 15, 20	60	8
36	1900	PCS (DL)	1930 – 1990	1.4, 3, 5, 10, 15, 20	60	8
37	1900	PCS	1910 – 1930	5, 10, 15, 20	20	8
38	2600	IMT-E	2570 – 2620	5, 10, 15, 20	50	8
39	1900	DCS-IMT Gap	1880 – 1920	5, 10, 15, 20	40	8
40	2300	S-Band	2300 – 2400	5, 10, 15, 20	100	8
41	2500	BRS	2496 – 2690	5, 10, 15, 20	194	10
42	3500	CBRS (EU, Japan)	3400 – 3600	5, 10, 15, 20	200	10
43	3700	C-Band	3600 – 3800	5, 10, 15, 20	200	10

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

44	700	APT	703 – 803	3, 5, 10, 15, 20	100	11.1
45	1500	L-Band (China)	1447 – 1467	5, 10, 15, 20	20	13.2
46	5200	U-NII	5150 – 5925	10, 20	775	13.2
47	5900	U-NII-4	5855 – 5925	10, 20	70	14.1
48	3500	CBRS (US)	3550 – 3700	5, 10, 15, 20	150	14.2
49	3500	C-Band	3550 – 3700	10, 20	150	15.1
50	1500	L-Band (EU)	1432 – 1517	3, 5, 10, 15, 20	85	15
51	1500	Extended L-Band	1427 – 1432	3, 5	5	15
52	3300	C-Band	3300 – 3400	5, 10, 15, 20	100	15.2
53	2400	S-Band	2483.5 – 2495	1.4, 3, 5, 10	11.5	16

Από τις παραπάνω ζώνες συχνοτήτων οι 3 ελληνικοί πάροχοι κινητής τηλεφωνίας όπου μελετήσαμε, έχουν δεσμεύσει για την χώρα μας συγκεκριμένες FDD και TDD συχνότητες. Από τις FDD είναι οι ζώνες συχνοτήτων 1, 3, 7, 8, 20, 22 και από τις TDD οι ζώνες 33 και 38. Πιο αναλυτικά οι διαθέσιμες συχνότητες κατανέμονται στους 3 παρόχους όπως φαίνεται στους παρακάτω πίνακες [13], [14]:

Στον Πίνακα 4 με **“Έντονα γράμματα”** αναφερόμαστε στον Πάροχο Α΄, με **“Πλάγια γράμματα”** στον Πάροχο Β΄ και με υπογραμμισμένα στον Πάροχο Γ΄.

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

Πίνακας 4 Δέσμευση συχνοτήτων FDD LTE των ελληνικών παρόχων κινητής για τις ζώνες συχνοτήτων 1, 3, 7, 8, 20, 22 [13] [67]

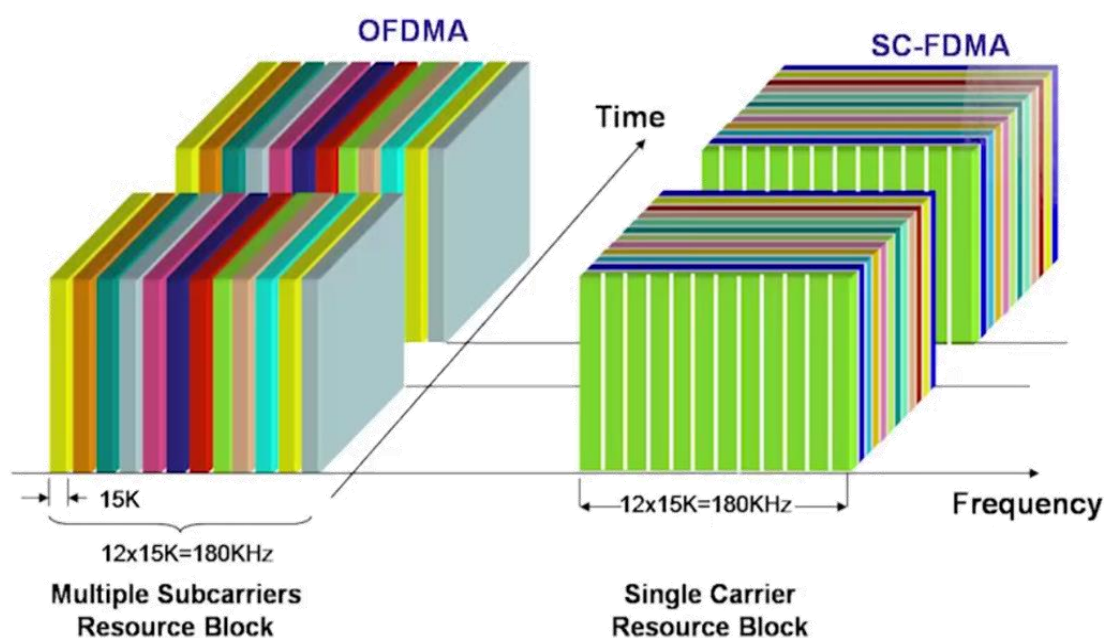
	Uplink (MHz)				Downlink (MHz)			
Band 1 : 2100	<u>1920-1940</u> 20 MHz	<u>1940-1950</u> 10 MHz	1950-1965 15 MHz	1965-1980 15 MHz	<u>2110-2130</u> 20 MHz	<u>2130-2140</u> 10 MHz	2140-2155 15 MHz	2155-2170 15 MHz
Band 3 : 1800	<u>1710-1725</u> 15 MHz	1725-1750 25 Mhz	1750-1785 35 MHz		<u>1805-1820</u> 15 MHz	1820-1845 25 MHz	1845-1880 35 MHz	
Band 7 : 2600	<u>2500-2520</u> 20 MHz	2520-2550 30 MHz	<u>2550-2570</u> 20 MHz		<u>2620-2640</u> 20 MHz	2640-2670 30 MHz	<u>2670-2690</u> 20 MHz	
Band 8 : 900	880-890 10 MHz	<u>890-900</u> 10 MHz	<u>900-915</u> 15 MHz		925-935 10 MHz	<u>935-945</u> 10 MHz	<u>945-960</u> 15 MHz	
Band 20: 800	<u>791-801</u> 10 MHz	<u>801-811</u> 10 MHz	811-821 10 MHz		<u>832-842</u> 10 MHz	<u>842-852</u> 10 MHz	852-862 10 MHz	
Band 22 : 3500	3400-3440 40 MHz	3440-3470 30 MHz	3470-3500 30 MHz		3500-3540 40 MHz	3540-3570 30 MHz	3570-3600 30 MHz	

Πίνακας 5 Δέσμευση συχνοτήτων TDD LTE των ελληνικών παρόχων κινητής για τις ζώνες συχνοτήτων 33,38 [13]

	Uplink /Downlink (MHz)				
Band 33 : 1900	1900-1905 5 MHz	1905-1910 5 MHz	<u>1910-1915</u> 5 MHz	<u>1915-1920</u> 5 MHz	2010-2025 15 MHz
Band 38 : 2600	2570-2575 5 MHz	2575-2595 20 MHz	<u>2595-2615</u> 20 MHz	<u>2615-2620</u> 5 MHz	

4.1.2 Πολυπλεξία στην κατερχόμενη ζεύξη (OFDMA)

Η ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing - OFDM) είναι μια μέθοδος κωδικοποίησης ψηφιακών δεδομένων σε πολλαπλά υπο-φέροντα (sub-carriers). Η πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας επιτυγχάνεται με την εκχώρηση διαφορετικών υπό-καναλιών OFDM σε διαφορετικούς χρήστες. Το OFDMA υποστηρίζει την παροχή διαφοροποιημένης ποιότητας εξυπηρέτησης, αναθέτοντας διαφορετικούς αριθμούς υπό-φορέων σε διαφορετικούς χρήστες. Το OFDM έχει εξελιχθεί σε ένα δημοφιλές σχήμα για την ευρυζωνική ψηφιακή επικοινωνία που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπως η ψηφιακή τηλεόραση, η μετάδοση φωνής, η πρόσβαση στο διαδίκτυο, ασύρματα δίκτυα Η/Υ (IEEE 802.11 (WiFi) από την έκδοση 802.11b και έπειτα) και 4G, 5G κινητές επικοινωνίες [16].



Εικόνα 9 Δομή των πρωτοκόλλων OFDMA και SC-FDMA σε συνάρτηση με τον χρόνο [15]

4.1.3 Πολυπλεξία στην ανερχόμενη ζεύξη (SC-FDMA)

Το FDMA απλού φέροντος (Single Carrier-FDMA) είναι ένα σύστημα πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση συχνότητας και έχει υιοθετηθεί στην ανερχόμενη ζεύξη του 3GPP LTE. Ονομάζεται επίσης γραμμικά προ-κωδικοποιημένο OFDMA (LP-OFDMA, Linearly Precoded OFDMA). Το SC-FDMA μπορεί να ερμηνευτεί ως ένα γραμμικό προ-κωδικοποιημένο σχήμα OFDMA, με την έννοια ότι έχει ένα πρόσθετο βήμα επεξεργασίας DFT (Discrete Fourier Transform) που προηγείται της συμβατικής επεξεργασίας OFDMA.

Το SC-FDMA έχει προσελκύσει μεγάλη προσοχή καθώς είναι μία ελκυστική εναλλακτική λύση του OFDMA, ειδικά στις επικοινωνίες ανερχόμενης ζεύξης, όπου ο χαμηλότερος λόγος μέγιστης προς τη μέση

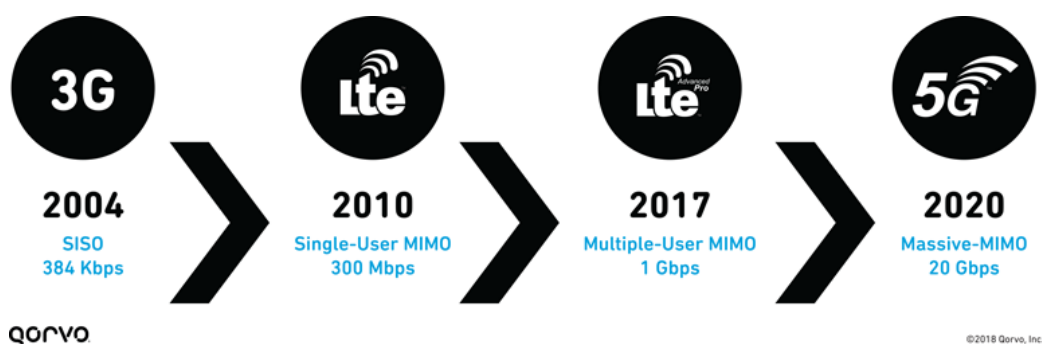
Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

ισχύ (lower Peak-to-Average Power Ratio - PAPR) ωφελεί σε μεγάλο βαθμό το κινητό τερματικό από την άποψη της απόδοσης ισχύος εκπομπής και του μειωμένου κόστους του ενισχυτή εκπομπής.

Το χαμηλό PAPR, το μεγάλο πλεονέκτημα του FDMA, καθιστά την τεχνολογία αυτή επιθυμητή στην ανερχόμενη ασύρματη μετάδοση και ιδίως σε συστήματα κινητών επικοινωνιών, όπου η απόδοση ισχύος του πομπού είναι υψίστης σημασίας [16].

4.2 Συστήματα μετάδοσης

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η αλληλουχία τεχνολογιών ασύρματων δικτύων βάση των συστημάτων μετάδοσης που πρώτο-εφάρμοσαν καθώς και των μέγιστων ταχυτήτων κατερχόμενης ζεύξης όπου μπορούν να επιτύχουν [17]:



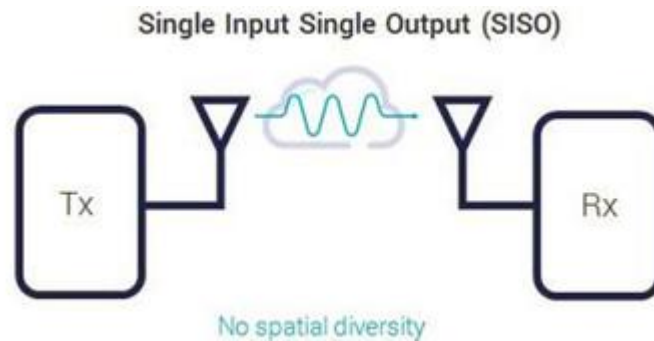
Εικόνα 10 Αλληλουχία τεχνολογιών ασύρματων δικτύων [17]

4.2.1 SISO, SIMO, MISO, MIMO

Κατάταξη συστημάτων μετάδοσης με βάση τον αριθμό των κεραιοστοιχείων πομπού – δέκτη.

- SISO (Single Input-Single Output):

Η απλούστερη μορφή ραδιοσύνδεσης ορίζεται ως SISO - Single Input Single Output και πρόκειται για ένα τυπικό κανάλι στο οποίο ο πομπός λειτουργεί με μία κεραία όπως και ο δέκτης. Το βασικό πλεονέκτημα ενός συστήματος SISO αποτελεί η απλότητα του. Ωστόσο, το κανάλι SISO είναι περιορισμένο στην απόδοσή του. Οι παρεμβολές και η εξασθένιση επηρεάζουν το σύστημα περισσότερο από ότι σε ένα σύστημα MIMO, το εύρος ζώνης του καναλιού περιορίζεται από το νόμο του Shannon δηλαδή η απόδοση εξαρτάται από το εύρος ζώνης του καναλιού και από τον λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR) [52].



Εικόνα 11 Αναπαράσταση του συστήματος μετάδοσης SISO μεταξύ πομπού και δέκτη[18]

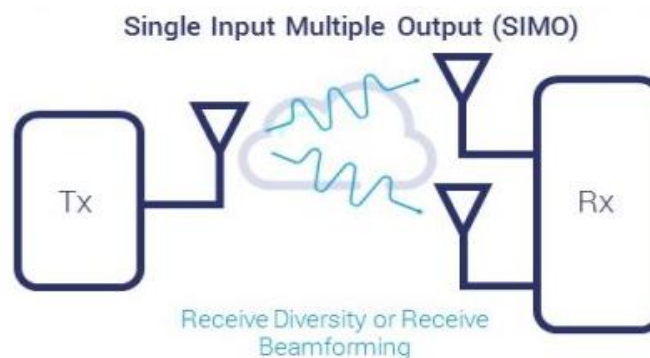
- **SIMO (Single Input –Multiple Output):**

Στην Single Input Multiple Output έκδοση του MIMO ο πομπός έχει μία μόνο κεραία και ο δέκτης έχει πολλαπλές. Συχνά χρησιμοποιείται για την καταπολέμηση των επιπτώσεων της εξασθένησης του σήματος σε ένα σύστημα δέκτη που λαμβάνει σήματα από μια σειρά από ανεξάρτητες πηγές. Έχει χρησιμοποιηθεί εδώ και πολλά χρόνια σε μικροκυματικούς σταθμούς λήψης για την καταπολέμηση των επιπτώσεων της εξασθένησης και παρεμβολών από την ιονόσφαιρα.

Το SIMO έχει το πλεονέκτημα της ευκολότερης εφαρμογής αν και έχει κάποια μειονεκτήματα επειδή η επεξεργασία απαιτείται να γίνεται στον δέκτη. Η χρήση SIMO μπορεί να είναι αρκετά αποδεκτή σε πολλές εφαρμογές, αλλά όταν ο δέκτης βρίσκεται σε κινητή συσκευή, όπως για παράδειγμα σε κινητό τηλέφωνο, τα επίπεδα επεξεργασίας ενδέχεται να περιορίζονται από το μέγεθος, το κόστος καθώς και από την μεγάλη κατανάλωση ενέργειας.

Υπάρχουν δύο μορφές SIMO που μπορούν να χρησιμοποιηθούν:

- **Switched diversity SIMO:** Αυτή η μορφή SIMO αναζητά το ισχυρότερο σήμα και μεταβαίνει σε αυτή την κεραία.
- **Maximum ratio combining SIMO:** Αυτή η μορφή SIMO λαμβάνει τα δύο σήματα και τα αθροίζει για να δώσει το συνδυασμό. Με αυτόν τον τρόπο, τα σήματα και από τις δύο κεραίες συμβάλλουν στο συνολικό σήμα [52].



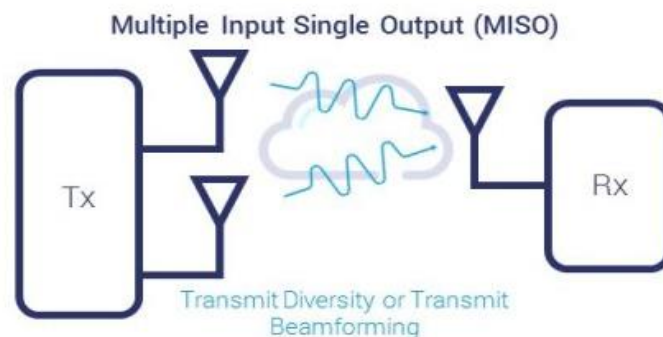
Εικόνα 12 Αναπαράσταση του συστήματος μετάδοσης SIMO μεταξύ πομπού και δέκτη[18]

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

- **MISO (Multiple Input – Single Output):**

Στην περίπτωση του MISO ο πομπός μεταδίδει τα ίδια δεδομένα από δύο ή περισσότερες κεραιές. Ο δέκτης στη συνέχεια είναι σε θέση να επιλέξει το βέλτιστο σήμα.

Το πλεονέκτημα της τεχνολογίας MISO είναι ότι οι πολλαπλές κεραιές και η κωδικοποίηση/επεξεργασία γίνονται από τον πομπό αντί από τον δέκτη. Σε περιπτώσεις όπως UEs (User Equipment) κινητής τηλεφωνίας, αυτό είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα όσον αφορά τον χώρο για τις κεραιές και τη μείωση του επιπέδου επεξεργασίας που απαιτείται στον δέκτη για την κωδικοποίηση. Αυτό έχει πλεονέκτημα στο μέγεθος, το κόστος και τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, καθώς το χαμηλότερο επίπεδο επεξεργασίας απαιτεί λιγότερη κατανάλωση ενέργειας.



Εικόνα 13 Αναπαράσταση του συστήματος μετάδοσης MISO μεταξύ πομπού και δέκτη[18]

- **MIMO (Multiple Input – Multiple Output):**

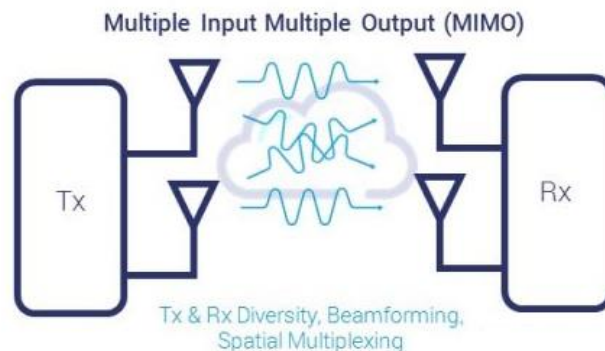
Το MIMO είναι η πιο σύγχρονη μορφή τεχνολογίας πολλαπλών κεραιών, σε σύγκριση με τις τρεις προηγούμενες. Χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραιές για να επιτρέπεται ο διαχωρισμός των σημάτων που εκπέμπονται μέσω διαφορετικών διαδρομών. Η τεχνολογία αυτή βελτιώνει τη μετάδοση δεδομένων ή τον λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR) βελτιώνοντας έτσι τις συνολικές επιδόσεις του συστήματος. Το MIMO χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο σε πολλές τεχνολογίες υψηλού ρυθμού δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων των Wi-Fi και άλλων ασύρματων και κυψελωδών τεχνολογιών για την παροχή βελτιωμένων επιπέδων απόδοσης. Ουσιαστικά, το MIMO χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραιές τόσο στον πομπό όσο και στον δέκτη για να χρησιμοποιήσει τις πολλαπλές διαδρομές για τη μετάδοση πρόσθετων δεδομένων. Η χρήση της τεχνολογίας MIMO εισήχθη από την πρώτη κιάλας έκδοση του LTE.

Το MIMO εφαρμόζεται στο LTE με διάφορους τρόπους όπως αναφέρεται και παρακάτω.

- **Χωρική πολυπλεξία ανοιχτού βρόχου:** Αυτή η μορφή του MIMO που χρησιμοποιείται στο σύστημα LTE περιλαμβάνει την αποστολή δύο ή περισσότερων ροών πληροφοριών που μπορούν να μεταδοθούν σε δύο ή περισσότερες κεραιές. Ωστόσο, δεν υπάρχει ανατροφοδότηση από το UE.

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

- **Χωρική πολυπλεξία κλειστού βρόχου:** Αυτή η μορφή LTE MIMO είναι παρόμοια με την προηγούμενη πολυπλεξία, αλλά όπως το όνομα δείχνει, έχει ενσωματωθεί η ανατροφοδότηση με σκοπό να κλείσει ο βρόχος. Ο PMI, Pre-coding Matrix Indicator, αποστέλλεται από το UE στο σταθμό βάσης. Ο τρόπος αυτός επιτρέπει στον πομπό να κωδικοποιήσει τα δεδομένα για να βελτιστοποιήσει τη μετάδοση και επιτρέπει στον δέκτη να διαχωρίσει πιο εύκολα τις διάφορες ροές δεδομένων που δέχεται.
- **Κλειστός βρόχος με προ-κωδικοποίηση:** Αυτή είναι μια άλλη μορφή LTE MIMO, όπου οι ροές δεδομένων κωδικοποιούνται από τον πομπό με συγκεκριμένο κώδικα. Ο τρόπος αυτός μπορεί χρησιμοποιηθεί ως εφεδρική λειτουργία για τη χωρική πολυπλεξία κλειστού βρόχου και μπορεί επίσης να συσχετιστεί και με τη μορφοποίηση δέσμης (Beamforming).
- **MIMO πολλαπλών χρηστών, MU-MIMO (Multi Users MIMO):** Αυτή η μορφή LTE MIMO επιτρέπει στο σύστημα να στοχεύει διαφορετικές χωρικές ροές σε διαφορετικούς χρήστες.
- **Μορφοποίηση δέσμης και MIMO (Beamforming):** Αυτή είναι η πιο σύνθετη από τις λειτουργίες MIMO και χρησιμοποιεί συστοιχίες κεραιών για να επιτρέψει στην δέσμη εκπομπής να εστιάσει σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Αυτό μειώνει τις παρεμβολές και αυξάνει την χωρητικότητα καθώς ο συγκεκριμένος UE θα έχει μια δέσμη στοχευμένη στην κατεύθυνση του. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται ειδικό σήμα αναφοράς με το οποίο το τερματικό εκτιμά την ποιότητα του καναλιού από τα σήματα αναφοράς των κεραιών.



Εικόνα 14 Αναπαράσταση του συστήματος μετάδοσης MIMO μεταξύ πομπού και δέκτη[18]

Μέσω της κωδικοποίησης στον πομπό και της επεξεργασίας σήματος στον δέκτη, ένα σύστημα MIMO μπορεί να επωφεληθεί από πολύπλοκα περιβάλλοντα ραδιοζεύξης. Συνεπώς, μπορούν να εφαρμοστούν διάφορες τεχνικές:

- Η **χωρική ποικιλομορφία** εκμεταλλεύεται την εξασθένιση διαφόρων σημάτων κατά την διαδρομή μεταξύ των διαφόρων κεραιών εκπομπής και λήψης για να βελτιώσει την αξιοπιστία ενός συνδέσμου επικοινωνίας. Η ίδια ροή σήματος μεταδίδεται από κάθε κεραία αλλά με διαφορετική κωδικοποίηση και επιτρέπει στον δέκτη να ωφεληθεί από την διαφοροποίηση των λαμβανομένων σημάτων. Αυτή η τεχνική είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για κανάλια ελέγχου συστήματος καθώς και για βελτιωμένη σύνδεση σε συνθήκες όπου το σήμα είναι πολύ κακής ποιότητας, όπως για παράδειγμα κοντά στην άκρη των κυψελών.

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

- Η **χωρική πολυπλεξία** εκμεταλλεύεται την πολλαπλή διάδοση για να δημιουργήσει έναν αριθμό ανεξάρτητων διαύλων μετάδοσης μεταξύ του πομπού και του δέκτη, που επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση δύο ή περισσότερων διαφορετικών ροών σήματος. Με εφαρμογή κατάλληλης κωδικοποίησης και επεξεργασίας σήματος αυτά μπορούν να εξαχθούν ανεξάρτητα στον δέκτη. Αυτή η τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αυξήσει η χωρητικότητα που είναι διαθέσιμη σε έναν μεμονωμένο χρήστη ή για να πολυπλέξει δεδομένα από διαφορετικούς χρήστες (συνήθως αναφέρεται ως MU-MIMO). Ο μέγιστος αριθμός πολυπλεγμένων καναλιών που μπορούν να υποστηριχθούν αντιστοιχεί στο μικρότερο από τον αριθμό των κεραιών του πομπού και του δέκτη. Για παράδειγμα, η διάταξη MIMO που παρουσιάστηκε παραπάνω στην εικόνα 14 θα μπορούσε να παρέχει δύο ανεξάρτητα κανάλια μετάδοσης εάν οι συνθήκες ραδιοσυχνότητας ήταν κατάλληλες. Αυτό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να διπλασιαστεί ο ρυθμός δεδομένων που είναι διαθέσιμος σε ένα χρήστη ή να μεταφέρονται δύο ανεξάρτητες μεταξύ τους ροές δεδομένων.
- Η **ανατροφοδότηση κλειστού βρόχου** επιτρέπει στον πομπό να εκμεταλλευτεί τις πληροφορίες σχετικά με το κανάλι μετάδοσης που παρέχεται από τον δέκτη. Αν υπάρχει διαθέσιμη ανατροφοδότηση, ο πομπός μπορεί να τροποποιήσει την κωδικοποίησή του για τα μεταδιδόμενα σήματα, λαμβάνοντας υπόψη τα κυρίαρχα χαρακτηριστικά του καναλιού, για να απλοποιήσει την επεξεργασία σήματος που απαιτείται στον δέκτη και να επιτρέψει πιθανώς καλύτερη απόδοση.

Η αποτελεσματικότητα του MIMO σε ένα πραγματικό δίκτυο εξαρτάται από έναν αριθμό παραγόντων, μεταξύ των οποίων ο διαχωρισμός κεραιάς στις συσκευές εκπομπής και λήψης, το επίπεδο διάχυσης, ο λόγος σήματος προς θόρυβο των ληφθέντων σημάτων και η ταχύτητα του κινητού τερματικού (UE). Το MIMO είναι πιο αποτελεσματικό όταν υπάρχει σημαντική πολλαπλή διάδοση, όπως ένα αστικό περιβάλλον όπου τα σήματα διασκορπίζονται λόγω κτιρίων και άλλων αντικειμένων. Σε μια ανοιχτή, αγροτική περιοχή, όπου η διαδρομή μετάδοσης μεταξύ του πομπού και του δέκτη είναι ελεύθερη από εμπόδια, το MIMO είναι λιγότερο χρήσιμο.

Οι διαφορετικοί τρόποι λειτουργίας MIMO ταιριάζουν σε διαφορετικές συνθήκες. Για παράδειγμα, η λειτουργία κλειστού βρόχου λειτουργεί καλά με ένα τερματικό που είναι σχετικά στατικό με υψηλή ισχύ σήματος. Ωστόσο, η απόδοσή του θα είναι χαμηλή με ένα κινητό τερματικό που κινείται γρήγορα και αντιμετωπίζει χαμηλή ισχύ σήματος, εξαιτίας καθυστερήσεων και ανακρίβειας στην παροχή ανατροφοδότησης καναλιών στον πομπό. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι προτιμότερη η χρησιμοποίηση μια απλούστερης μορφής MIMO.

Όπως έχουμε αναφέρει και στο κεφάλαιο 2 το MIMO αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο του σχεδιασμού του συστήματος LTE και η πρώτη έκδοση του προτύπου LTE (3GPP Release 8) υποστηρίζει 2×2 MIMO τόσο στην κατερχόμενη όσο και στην ανερχόμενη ζεύξη. Οι επόμενες εξελίξεις επέκτειναν την ικανότητα αυτή και στο πρότυπο LTE-Advanced (3GPP Release 11) υποστηρίζεται 8×8 MIMO στην κατερχόμενη και 4×4 MIMO στην ανερχόμενη ζεύξη. Το πρότυπο εκμεταλλεύεται την ευελιξία του MIMO καθώς συμπεριλαμβάνει πολλούς διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας, συμπεριλαμβανομένης της χωρικής διαφοροποίησης, της πολυπλεξίας ανοιχτού και κλειστού βρόχου και του MU-MIMO κλειστού βρόχου. Έτσι, το σύστημα είναι σε θέση να αλλάζει μεταξύ των λειτουργιών ανάλογα με τις διαφορετικές

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

συνθήκες λειτουργίας. Οι αλγόριθμοι για τη λήψη τέτοιων επιλογών δεν είναι τυποποιημένοι, γεγονός που παρέχει την ευκαιρία στους κατασκευαστές εξοπλισμού και στους παρόχους δικτύων να διαφοροποιούν τις υλοποιήσεις τους [53].

- **Βασικές διαμορφώσεις MIMO**

Τα ραδιοσυστήματα MIMO χρησιμοποιούν πολλαπλές κεραιές για να στέλνουν και να λαμβάνουν πολλαπλές ροές δεδομένων. Ο αριθμός των κεραιών που απαιτούνται καθορίζεται από τον κατασκευαστή και τον φορέα ώστε να έχει τη βέλτιστη μετάδοση και λήψη με το συγκεκριμένο υλικό και λογισμικό.

Σε γενικές γραμμές, οι κεραιές για χρήση MIMO μπορούν να αναλυθούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- **Διπολικές κεραιές κατακόρυφης πόλωσης:** Αυτές είναι οι ίδιες κεραιές που χρησιμοποιούνται και στα SISO συστήματα, με τη μόνη διαφορά ότι το σύστημα MIMO θα χρησιμοποιεί δύο ή περισσότερες από τις κεραιές αυτές. Στην πράξη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σχεδόν οποιαδήποτε διπολική κεραιά εφόσον καλύπτει τις απαιτήσεις για τις ζώνες συχνοτήτων, τη διαχείριση ισχύος RF και τις υπόλοιπες παραμέτρους του συστήματος.
- **Cell Sites:** Κεραιές τέτοιου είδους τοποθετούνται σε κορυφές κτηρίων ή σε πυλώνες για την κάλυψη περιοχών. Τις περισσότερες φορές συναντάμε παραπάνω από ένα sector το οποίο περιέχει, σε διάταξη πίνακα, την μορφή του MIMO (2x2, 4x4,...) που θα προτιμήσει ο πάροχος. Μία συνηθισμένη διάταξη κεραιών είναι ανά διαστήματα 120° δηλαδή με χρήση τριών sectors.
- **Multi-User MIMO vs Single-User MIMO**

Και τα δύο συστήματα MIMO μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Κάθε μορφή MIMO έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της:

Πίνακας 6 Κύριες διαφορές μεταξύ MU-MIMO και SU-MIMO [18]

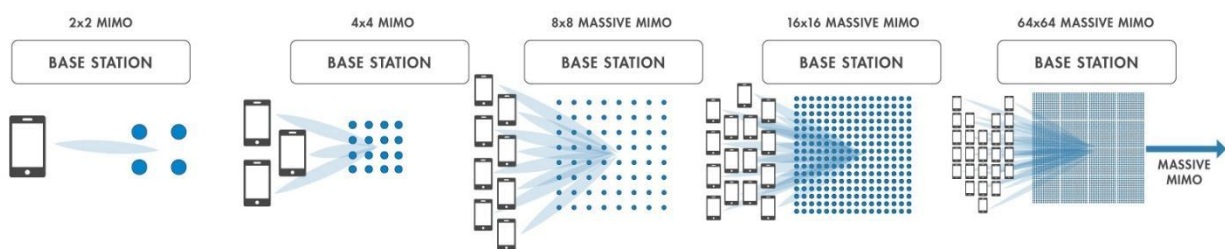
ΣΥΣΤΗΜΑ	MU-MIMO	SU-MIMO
Κύριο Χαρακτηριστικό	Ο σταθμός βάσης έχει την δυνατότητα να επικοινωνεί ταυτόχρονα και ξεχωριστά με πολλούς χρήστες.	Ο σταθμός βάσης έχει την δυνατότητα να επικοινωνεί μόνο με ένα χρήστη κάθε χρονική στιγμή
Στόχος	Μεγάλη αύξηση χωρητικότητας	Παρέχει μεγάλο ρυθμό δεδομένων για τον ίδιο χρήστη.
Πλεονέκτημα	Κέρδος Πολυπλεξίας	Μείωση παρεμβολών
Data throughput	Παρέχει υψηλότερη απόδοση όταν το SNR είναι υψηλό.	Παρέχει υψηλή απόδοση ακόμα και όταν το SNR είναι χαμηλό.
Channel State Information	Χρειάζεται τέλειο CSI	Δεν απαιτείται CSI

4.2.2 Massive MIMO

Τα 5G ασύρματα δίκτυα αναμένεται να λειτουργούν με τάξεις μεγέθους υψηλότερη απόδοσης από τις τρέχουσες εφαρμογές 4G. Η ζήτηση υψηλότερων ρυθμών δεδομένων οδηγεί στην αναγκαιότητα εξεύρεσης νέων τεχνικών για την αύξηση της φασματικής απόδοσης και στην αναζήτηση νέων ζωνών συχνοτήτων άνω των 6 GHz.

Έχει αποδειχθεί ότι από την UHF (Ultra High Frequency, 300MHz-3GHz) μέχρι τη ζώνη C (4-8GHz), μπορεί να επιτευχθεί μια σημαντική αύξηση της φασματικής απόδοσης του συστήματος μέσω διαφόρων τεχνικών όπως Coordinated Multi-Point (CoMP), Massive Multiple Input-Multiple-Output (MIMO). Οι επιδόσεις όμως που προκύπτουν δεν θα μπορέσουν να ανταποκριθούν στις πλήρεις προσδοκίες των απαιτήσεων IMT-2020 και 5G-PPP (5G-Public Private Partnership) για τα δίκτυα 5G, κυρίως όσον αφορά την παροχή μέγιστων ταχυτήτων δεδομένων 10 Gbps με πυκνότητα σύνδεσης 10^5 - 10^6 συσκευές / km². Για να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός, η μελλοντική αρχιτεκτονική τέτοιων δικτύων 5G θα βασιστεί σε μικρά κελιά και στη χρησιμοποίηση ζωνών υψηλότερης συχνότητας, όπως Super High Frequency (SHF, 3-30 GHz) ή Extremely High Frequency (EHF, 30-300 GHz).

Το Massive MIMO αποτελεί την πιο αποτελεσματική σημερινή τεχνολογία φυσικού επιπέδου για την μελλοντική ασύρματη πρόσβαση. Είναι μια επέκταση του MU-MIMO, στον οποίο ένας πομπός του σταθμού βάσης επικοινωνεί ταυτόχρονα με πολλαπλούς δέκτες κινητών τερματικών χρησιμοποιώντας τους ίδιους πόρους χρόνου και συχνότητας, βελτιώνοντας έτσι την φασματική απόδοση. Η κύρια ιδέα είναι η χρήση μεγάλων συστοιχιών κεραιών στους σταθμούς βάσης για την ταυτόχρονη εξυπηρέτηση πολλών αυτόνομων τερματικών, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 15.



Εικόνα 15 Εξέλιξη των συστημάτων MIMO [20]

Το Massive MIMO προσφέρει τα δύο πλέον επιθυμητά οφέλη:

- **Εξαιρετική φασματική απόδοση**, που επιτυγχάνεται με την ανάπτυξη μεγάλων συστοιχιών κεραιών στους σταθμούς βάσης. Η αποτελεσματική πολυπλεξία απαιτεί διαφορετικά κανάλια σε διαφορετικά τερματικά, τα οποία έχουν αποδειχθεί ότι διατηρούνται τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά, σε διαφορετικά περιβάλλοντα διάδοσης. Συγκεκριμένα, είναι γνωστό ότι το

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

Massive MIMO λειτουργεί το ίδιο καλά τόσο σε οπτική επαφή (LOS) με τον πομπό όσο και σε κανάλια N-LOS.

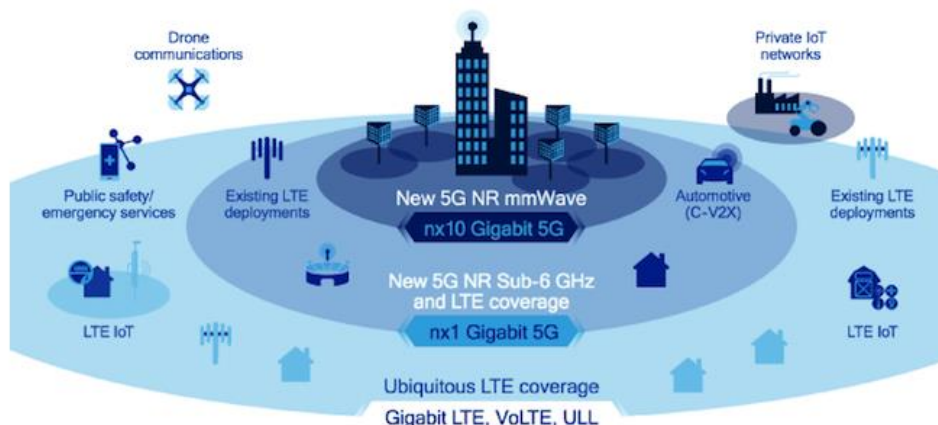
- **Εξαιρετική ενεργειακή απόδοση**, χάρη στο κέρδος συστοιχίας, που επιτρέπει τη μείωση της ακτινοβολούμενης ισχύος. Πιο συγκεκριμένα σε ένα πείραμα με 100 κεραίες των 10mW η καθεμία, υπήρχε συνολική κατανάλωση 1W η οποία είναι κατά πολύ χαμηλότερη από τα 40W που καταναλώνει μια κεραία προηγούμενης τεχνολογίας. Επιπλέον, η δυνατότητα επίτευξης εξαιρετικής απόδοσης και ταυτοχρόνως περαιτέρω οικονομίας, μπορεί να γίνει με χρήση της τεχνολογίας beamforming [22]. Η ανάγκη να υπάρχει μια ειδική μονάδα εκπομπής/λήψης για κάθε στοιχείο κεραίας σε τέτοια συστήματα αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας και το κόστος του συστήματος. Με την ανάπτυξη του υβριδικού beamforming τα προβλήματα κατανάλωσης ενέργειας ειδικά των συστημάτων Massive MIMO γίνονται μικρότερα, συνδυάζοντας πολλαπλά στοιχεία συστοιχιών πίνακα σε υπο-ομάδες. Έτσι απαιτούνται λιγότερες μονάδες εκπομπής / λήψης, μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας και συνολικά το κόστος του συστήματος [20].

Τα βασικά τεχνολογικά χαρακτηριστικά του Massive MIMO είναι:

- **Πλήρης ψηφιακή επεξεργασία**. Κάθε κεραία έχει τη δική της αλυσίδα RF και ψηφιακή βάση. Οι υπολογιστικές λειτουργίες και η επεξεργασία των σημάτων από τις κεραίες διεξάγονται σε κάθε σταθμό βάσης και επεξεργάζονται όλα μαζί. Η πολυπλοκότητα της ψηφιακής επεξεργασίας ήταν ένα πρόβλημα που αντιμετώπιζαν οι παλαιότεροι τύποι κεραίων, όπου λύθηκε με το Massive MIMO. Τα πλεονεκτήματα της επεξεργασίας αυτής είναι η μείωση παρεμβολών στο κανάλι διάδοσης, η δυνατότητα μέτρησης της πλήρους απόκρισης του καναλιού στην ανερχόμενη ζεύξη και η άμεση ανταπόκριση στις αλλαγές στο κανάλι. Ακόμη, εκτιμήσεις και έρευνες δείχνουν ότι η πλήρης ψηφιακή επεξεργασία μπορεί όχι μόνο να προσφέρει καλύτερες επιδόσεις αλλά και καλύτερη ενεργειακή απόδοση, μια τάση που μπορεί να ενισχυθεί από τη συνεχιζόμενη ανάπτυξη κυκλωμάτων χαμηλής ισχύος [54].
- **Χρήση αλγορίθμων χαμηλού υπολογιστικού κόστους κωδικοποίησης/αποκωδικοποίησης** οι οποίοι χρησιμοποιούνται κυρίως στις τεχνολογίες Conjugate Beamforming και Zero-Forcing εξαλείφοντας ταυτόχρονα τις παρεμβολές μεταξύ χρηστών (inter-user interference).
- **Κέρδος συστοιχίας (Array Gain)**, που καταλήγει σε ενίσχυση ανάλογη με τον αριθμό των κεραίων στους σταθμούς βάσης.
- **Ενίσχυση καναλιών**, που απομακρύνει αποτελεσματικά τις επιπτώσεις της γρήγορης εξασθένισης. Πρακτικά, κάθε τερματικός σταθμός βάσης γίνεται ένας κανάλι διαβάθμισης του οποίου το κέρδος σταθεροποιείται σε μία, ανεξάρτητη από τη συχνότητα, σταθερά. Αυτό ελαχιστοποιεί σημαντικά τα προβλήματα κατανομής πόρων.
- **Η παροχή εξίσου καλού Quality of Service σε όλους τους τερματικούς σταθμούς** σε μία κυψέλη που μας δίνεται από τη βελτίωση που προσφέρεται από το κέρδος συστοιχιών. Τυπικά οι αλγόριθμοι ελέγχου ισχύος επιτυγχάνουν την μέγιστη δυνατή κατανομή μεταξύ των τερματικών.
- **Αυτόνομη λειτουργία των σταθμών βάσης**, χωρίς να χρειάζεται η συλλογή του CSI(Channel State Information) από τις κυψέλες [65] και χωρίς να απαιτείται συνεχής και ακριβής συγχρονισμός [22], [55].

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

Pioneering technologies to advance the digital economy
LTE advancements are essential to 5G



Εικόνα 16 Εικονική αναπαράσταση της κάλυψης και της χρήσης 4G και 5G στο μέλλον [21]

Για να είναι το Massive MIMO αποδοτικό στην κάλυψη μεγάλων περιοχών, πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε συχνότητες κάτω των 6GHz, μία περιοχή συχνοτήτων όπου το φάσμα είναι πολύτιμο και δυσεύρετο. Ωστόσο, και συστήματα που λειτουργούν σε υψηλότερες συχνότητες μπορούν να επωφεληθούν από την εφαρμογή του Massive MIMO, εκμεταλλευόμενοι την δυνατότητα του να εξυπηρετεί ταυτόχρονα ένα μεγάλο πλήθος χρηστών συγκεντρωμένων σε μια μικρή περιοχή.

Η άφιξη του Massive MIMO έχει έρθει αυτή τη στιγμή για δύο λόγους: Το Massive MIMO εφαρμόζεται αρχικά διότι η προγενέστερη τεχνολογία έχει αποδειχθεί ότι δεν ήταν σε θέση να αποδώσει τη φασματική απόδοση που ζητούν οι εφαρμογές 5G. Δεύτερον, η τεχνολογία αυτή κέρδισε την εμπιστοσύνη και εξαπλώθηκε γρήγορα, καθώς τα πρωτότυπα της έδειξαν μία πρωτοφανής φασματική απόδοση χρησιμοποιώντας αλγορίθμους χαμηλής πολυπλοκότητας. Ενδεικτικά παραθέτουμε κάποιες υλοποιήσεις που έχουν γίνει.

Πίνακας 7 Καινοτόμες υλοποιήσεις Massive MIMO [66] [68] [69]

	Κεραίες	Τερματικά ανά κεραία	Φασματική απόδοση
Bristol University / Lund University	128	12	80-145 bps/Hz
Facebook “Project ARIES”	96	24	70-100 bps/Hz
Rice University & Bell Labs – “ArgosV2”	96	32	85 bps/Hz
Google	32	32	20 bps/Hz

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

Σε ένα πείραμα που διεξήγαγαν ερευνητές του Πανεπιστημίου του Μπρίστολ για την εύρεση των λειτουργικών ορίων του Massive MIMO επιτεύχθηκε υψηλότερη φασματική απόδοση των 145,6 bps/Hz με 100 κεραιές στο σταθμό βάσης. Αυτή η επίδειξη δείχνει μία βελτίωση πάνω από 20 φορές σε σύγκριση με συστήματα 4G, αλλά επιτεύχθηκε σε ελεγχόμενο εργαστηριακό περιβάλλον. Η προσθήκη περισσότερων κεραιών στο σταθμό βάσης και η ανάπτυξη πιο εξειδικευμένου υλικού θα μπορούσε να υποστηρίξει περισσότερους ταυτόχρονους χρήστες καθώς στο πείραμα αυτό υπήρχε το όριο των 22 χρηστών ανά κεραία [66].

Το Massive MIMO μπορεί να προσφέρει βελτιωμένες ευρυζωνικές υπηρεσίες στο μέλλον ενώ μπορεί να προσαρμοστεί για να υποστηρίξει την μαζική επικοινωνία τύπου μηχανής (MTC) ενός τεράστιου αριθμού συσκευών [22].

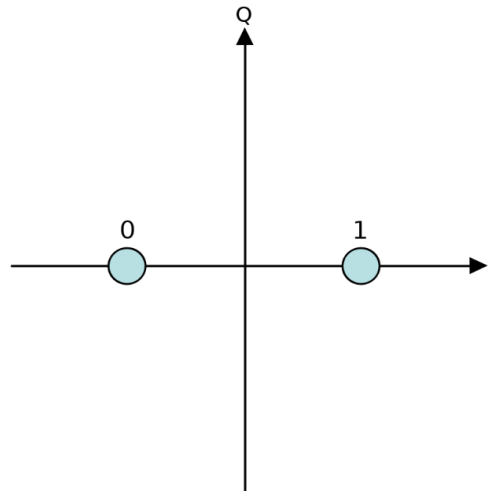
4.3 Σχήματα Διαμόρφωσης και Κωδικοποίησης

Τα κινητά συστήματα πέμπτης γενιάς (5G) αναπτύσσονται παγκοσμίως με στόχο να αυξήσουν την χωρητικότητα του δικτύου και τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, επιτυγχάνοντας χαμηλή καθυστέρηση μετάδοσης, βελτιώνοντας την ρυθμοαπόδοση των χρηστών, και υποστηρίζοντας τις υπηρεσίες "Διαδικτύου των πραγμάτων". Τα συστήματα αυτά αναμένεται να παρέχουν ταχύτητες μέχρι 20 Gbps και 100 φορές υψηλότερες ταχύτητες δεδομένων ανά χρήστη. Τα κινητά συστήματα τέταρτης γενιάς (LTE και LTE Advanced) εφαρμόζουν διαμορφώσεις QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), 16 QAM (Quadrature Amplitude Modulation), και 64-QAM σε συνδυασμό με πολυπλεξία OFDM. Αν και το υψηλότερο σχήμα διαμόρφωσης στο 3GPP Release 8 ήταν 64-QAM για LTE, στο 3GPP Release 12 συζητήθηκε η εφαρμογή του 256-QAM, και πιο πρόσφατα, το 3GPP Release 15 εισήγαγε υποστήριξη 1024-QAM. Παρόλα αυτά, η εφαρμογή για τα συστήματα πάνω από 64-QAM είναι προς το παρόν πολύ περιορισμένη.

4.3.1 Binary phase-shift keying (BPSK)

Το BPSK ή επίσης γνωστό ως 2PSK είναι η απλούστερη μορφή phase shift keying (PSK). Χρησιμοποιεί δύο φάσεις οι οποίες χωρίζονται κατά 180° γι' αυτό τον λόγο και ονομάζεται και 2-PSK. Δεν έχει ιδιαίτερη σημασία ακριβώς πού βρίσκονται τα σημεία ως προς του άξονες και στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται στον πραγματικό άξονα στις 0° και στις 180° . Για τον λόγο αυτό μπορεί να λειτουργήσει σε υψηλό επίπεδο θορύβου ή παραμόρφωσης χωρίς λάθη στην αποδιαμόρφωση. Ωστόσο, είναι ικανό να διαμορφώνει μόνο σε 1 bit / σύμβολο (όπως φαίνεται στο σχήμα) και έτσι είναι ακατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ταχύτητα δεδομένων [23].

Το BPSK είναι λειτουργικά ισοδύναμο με τη διαμόρφωση 2-QAM (Quadrature Amplitude Modulation).



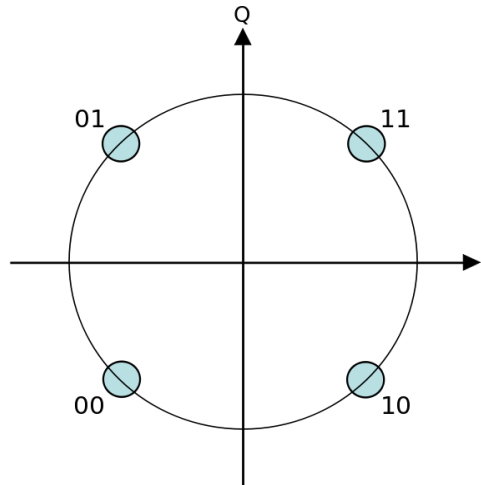
Εικόνα 17 Διάγραμμα IQ για διαμόρφωση BPSK [23]

4.3.2 Quadrature phase-shift keying (QPSK)

Το QPSK είναι επίσης γνωστό ως 4-PSK ή 4-QAM αν και μεταξύ τους τα QPSK και 4-QAM είναι διαφορετικά, τα προκύπτοντα διαμορφωμένα ραδιοκύματα είναι ακριβώς τα ίδια. Το QPSK χρησιμοποιεί τέσσερα σημεία στο διάγραμμα των I Q αξόνων. Με τέσσερις φάσεις, το QPSK μπορεί να κωδικοποιεί δυο δυαδικά ψηφία ανά σύμβολο, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα με κωδικοποίηση Grey, για να ελαχιστοποιήσει τον ρυθμό εμφάνισης σφαλμάτων (BER - Bit Error Rate).

Η μαθηματική ανάλυση δείχνει ότι το QPSK είναι αποδοτικό να χρησιμοποιηθεί είτε για να διπλασιάσει τον ρυθμό δεδομένων σε σύγκριση με ένα σύστημα BPSK διατηρώντας παράλληλα το ίδιο εύρος ζώνης σήματος είτε για να διατηρήσει το ρυθμό δεδομένων του BPSK αλλά μειώνοντας κατά το ήμισυ το απαιτούμενο εύρος ζώνης. Στην τελευταία αυτή περίπτωση, το BER του QPSK είναι ακριβώς το ίδιο με του BPSK [23].

Το πλεονέκτημα του QPSK έναντι του BPSK είναι εμφανές. Το QPSK μεταδίδει διπλάσιο ρυθμό δεδομένων σε ένα συγκεκριμένο εύρος ζώνης σε σύγκριση με το BPSK. Το μειονέκτημα βέβαια είναι ότι οι πομποί και οι δέκτες QPSK είναι πιο περίπλοκοι από αυτούς για το BPSK. Ωστόσο, με τη σύγχρονη τεχνολογία ηλεκτρονικών, η αύξηση του κόστους είναι πολύ μικρή [56].



Εικόνα 18 Διάγραμμα IQ για διαμόρφωση QPSK [23]

4.3.3 Quadrature Amplitude Modulation (QAM)

Το QAM χρησιμοποιεί τόσο στοιχεία πλάτους όσο και φάσης για να παρέχει μια μορφή διαμόρφωσης που είναι σε θέση να παρέχει υψηλή αποδοτικότητα στην χρήση του ραδιο-φάσματος. Η QAM είναι μια εξαιρετικά αποτελεσματική μορφή διαμόρφωσης δεδομένων και ως εκ τούτου χρησιμοποιείται στην κινητή τηλεφωνία, στο WiMAX, Wi-Fi 802.11 και σχεδόν κάθε μορφή συστήματος επικοινωνίας που παρέχει δεδομένα με υψηλή ταχύτητα.

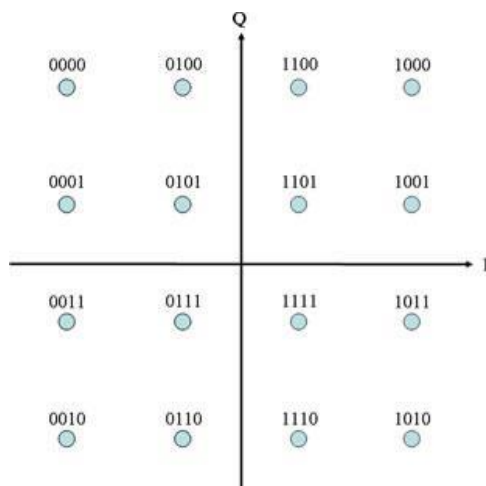
Η QAM είναι ένα σήμα στο οποίο δύο φορείς μετατοπισμένοι σε φάση κατά 90 μοίρες διαμορφώνονται και συνδυάζονται. Συχνά το ένα σήμα ονομάζεται σήμα In-phase ή "I" και το άλλο "Q". Το προκύπτον συνολικό σήμα που αποτελείται από τον συνδυασμό αμφότερων των φορέων I και Q εμφανίζει μεταβολές πλάτους και φάσης.

Χρησιμοποιώντας το QAM υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί συνδυασμοί πλάτους και φάσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, για την μετάδοση ψηφιακών δεδομένων και με αυτό τον τρόπο προκύπτει το αντίστοιχο διάγραμμα αστερισμού. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, τα σημεία είναι συνήθως διατεταγμένα σε τετράγωνο πλέγμα με ομοιόμορφη οριζόντια και κατακόρυφη απόσταση. Οι πιο συνηθισμένες μορφές QAM, είναι εκεί όπου έχουμε αριθμό των σημείων ίσο με μια δύναμη 2 όπως 4, 16, 64. . . ., δηλαδή 16-QAM, 64-QAM, κλπ.

Το πλεονέκτημα της μετάβασης στις μορφές υψηλότερης τάξης είναι ότι είναι δυνατή η μετάδοση περισσότερων δυαδικών ψηφίων ανά σύμβολο. Το πρόβλημα βέβαια είναι ότι τα σημεία είναι πιο κοντά και συνεπώς είναι πιο ευαίσθητα σε αλλοιώσεις μετάδοσης. Για τον λόγο αυτό, σε πολλά συστήματα μετάδοσης δεδομένων επιστρατεύονται διαφορετικά είδη QAM ανάλογα με τις συνθήκες σύνδεσης. Εάν υπάρχουν καλές συνθήκες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν υψηλότερες τάξεις QAM για να επιτευχθεί ταχύτερος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, αλλά εάν η σύνδεση επιδεινωθεί, οι χρησιμοποιούνται χαμηλότερες τάξεις για τη διατήρηση ενός χαμηλού ρυθμού σφάλματος.

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

Συνεπώς, υπάρχει μια ισορροπία μεταξύ της ταχύτητας μεταφοράς δεδομένων της διαμόρφωσης QAM, του SINR και του αποδεκτού ποσοστού σφάλματος BER.



Εικόνα 19 Αλληλουχία bit για σήμα 16-QAM [24]

Τα συστήματα επικοινωνίας που έχουν σχεδιαστεί για να επιτυγχάνουν πολύ υψηλά επίπεδα φασματικής απόδοσης συνήθως χρησιμοποιούν πολύ πυκνούς αστερισμούς QAM. Για παράδειγμα, οι τρέχουσες συσκευές Ethernet Homeplug AV2 500-Mbit Powerline Ethernet χρησιμοποιούν 1024-QAM και 4096-QAM [57]. Ο παρακάτω πίνακας παρέχει μια σύνοψη των ρυθμών μετάδοσης bit των διαφόρων μορφών QAM και PSK.

Πίνακας 8 Συνοπτικός πίνακας ρυθμών μετάδοσης bit διαφόρων μορφών QAM και PSK

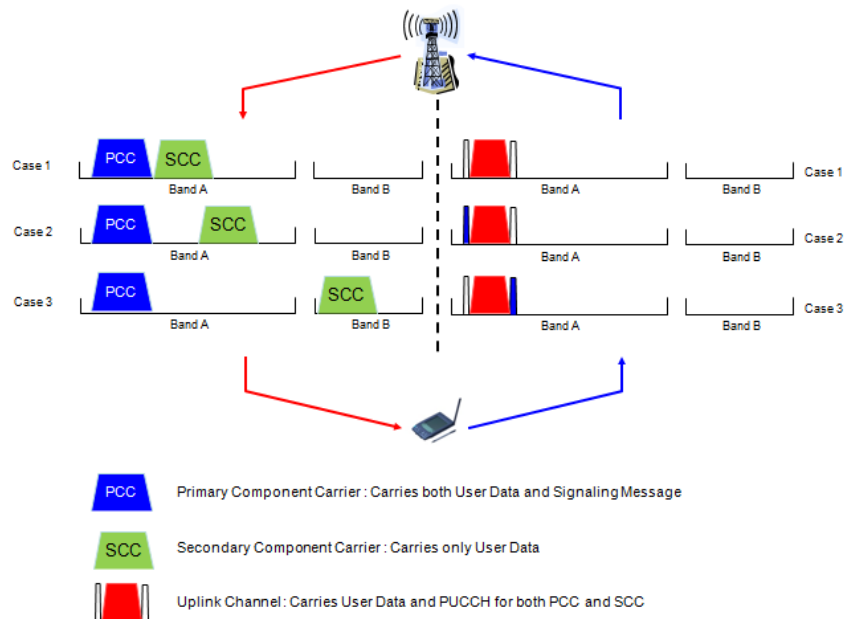
Διαμόρφωση	Bits/σύμβολο	Ρυθμός Μετάδοσης
BPSK	1	x1
QPSK	2	x2
8QAM	3	x3
16QAM	4	x3
32QAM	5	x5
64QAM	6	x6
128QAM	7	x7
256QAM	8	x8

4.4 Carrier aggregation

Η συνάθροιση φορέων (Carrier Aggregation) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται στις ασύρματες επικοινωνίες για την αύξηση του ρυθμού δεδομένων ανά χρήστη. Κάθε φορέας αναφέρεται ως στοιχειώδης φορέας (CC - Component Carrier). Με αυτό τον τρόπο εκχωρούνται πολλαπλά μπλοκ συχνότητας (component carriers) σε κάθε χρήστη και αυξάνεται ο μέγιστος δυνατός ρυθμός δεδομένων ανά χρήστη σε αναλογία με τα μπλοκ συχνότητας που του ανατίθενται. Ακόμη συνολικά αυξάνεται η ρυθμοαπόδοση ενός κελιού λόγω της καλύτερης χρήσης πόρων και είναι δυνατή η καλύτερη εξισορρόπηση φορτίου. Στο FDD ο αριθμός των συναθροισμένων φορέων μπορεί να είναι διαφορετικός σε κατερχόμενη και ανερχόμενη ζεύξη. Ωστόσο, ο αριθμός των στοιχειωδών φορέων της ανερχόμενης ζεύξης είναι πάντα ίσος ή μικρότερος από τον αριθμό των στοιχειωδών φορέων της κατερχόμενης ζεύξης. Για το TDD ο αριθμός των CC καθώς και το εύρος ζώνης κάθε CC είναι το ίδιο για κατερχόμενη και ανερχόμενη ζεύξη.

4.4.1 Τύποι Carrier aggregation

Ανάλογα με τις θέσεις των στοιχειωδών φορέων διακρίνονται τρεις περιπτώσεις συνάθροισης φορέων οι οποίες είναι:



Εικόνα 20 Σχηματική αναπαράσταση των *intra-band contiguous carrier aggregation*, *non-contiguous* και *inter-band carrier aggregation* [26]

- Η περίπτωση όπου **οι φορείς συνιστωσών είναι γειτονικοί** στην ίδια ζώνη συχνοτήτων και ονομάζεται *intra-band contiguous carrier aggregation*.
- Δεύτερη περίπτωση είναι όταν **οι φορείς συνιστωσών βρίσκονται στην ίδια ζώνη συχνοτήτων** αλλά χωρίζονται από ένα κενό, και ονομάζεται *intra-band non-contiguous*.

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

- Τρίτη και πιο σύνθετη περίπτωση είναι όταν **οι φορείς των συνιστωσών βρίσκονται σε διαφορετική ζώνη συχνοτήτων**. Η περίπτωση αυτή ονομάζεται *inter-band carrier aggregation*.

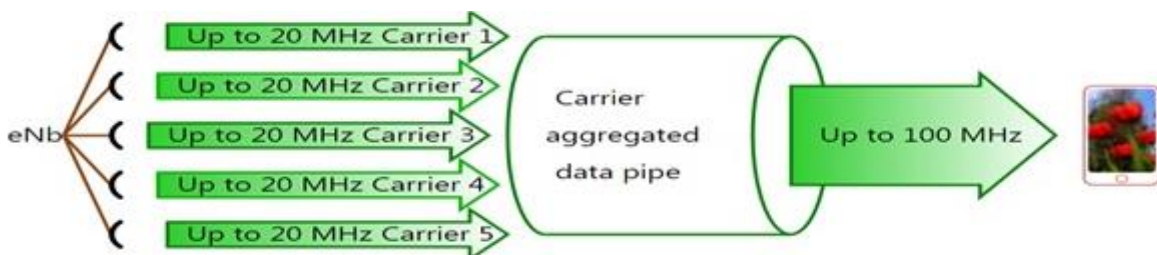
Δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ αυτών των τριών περιπτώσεων από την άποψη του διαθέσιμου εύρους ζώνης ωστόσο, η πολυπλοκότητα στην περίπτωση *inter-band carrier aggregation*. Στην χώρα μας βάση των σημερινών δεσμεύσεων συχνοτήτων οι πάροχοι έχουν την δυνατότητα να κάνουν χρήση της τεχνολογίας *intra-band contiguous carrier aggregation* καθώς και της *inter-band carrier aggregation* [26].

4.4.2 Εφαρμογές

Από την έκδοση 10 του LTE-Advanced και έπειτα, δυο κανάλια (πιθανώς διαφορετικού εύρους ζώνης) μπορούν να ενοποιηθούν και να αποδοθούν σε ένα μόνο χρήστη. Μια διαφορά μεταξύ δύο ενοποιημένων συνιστωσών των 10 MHz και ενός απλού καναλιού 20 MHz είναι ότι στην περίπτωση συνάθροισης φορέα οι πληροφορίες ελέγχου μεταδίδονται σε δύο φορείς οπότε η διαδικασία είναι ταχύτερη.

Το LTE Advanced με την ενοποίηση φορέων “έφερε” το Gigabit LTE. Αυτό έγινε δυνατό μέσω διαμόρφωσης υψηλότερης τάξης (256QAM), *carrier aggregation* και 4x4 MIMO. Δεδομένου ότι το LTE μπορεί να ενοποιήσει μέχρι και 5 φορείς, επιτρέποντας εύρος ζώνης μετάδοσης μέχρι 100 MHz, την χρήση MIMO και 256QAM επιτρέπουν θεωρητικές ταχύτητες δεδομένων έως και 2 gigabit ανά δευτερόλεπτο [4].

Στην χώρα μας η ανώτερη θεωρητική ταχύτητα που μπορεί να επιτευχθεί κάνοντας χρήση 3CC, δηλαδή την ενοποίηση της ζώνης 3,7 και 20, είναι 1,2 Gbps με ένα συνολικό φάσμα 60MHz (3 × 20MHz), 4x4 MIMO και 256 QAM[57].



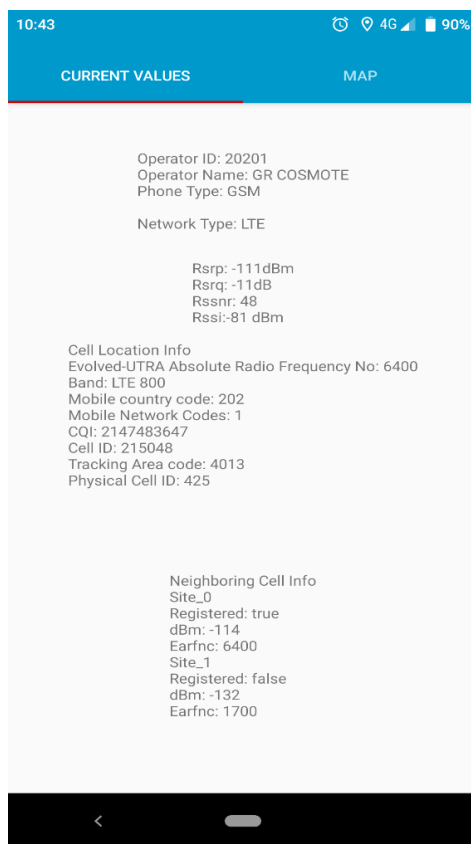
Εικόνα 21 Σχηματική αναπαράσταση 5CC με χρήση *inter-band carrier aggregation*[27]

5. Ανάλυση Δεδομένων

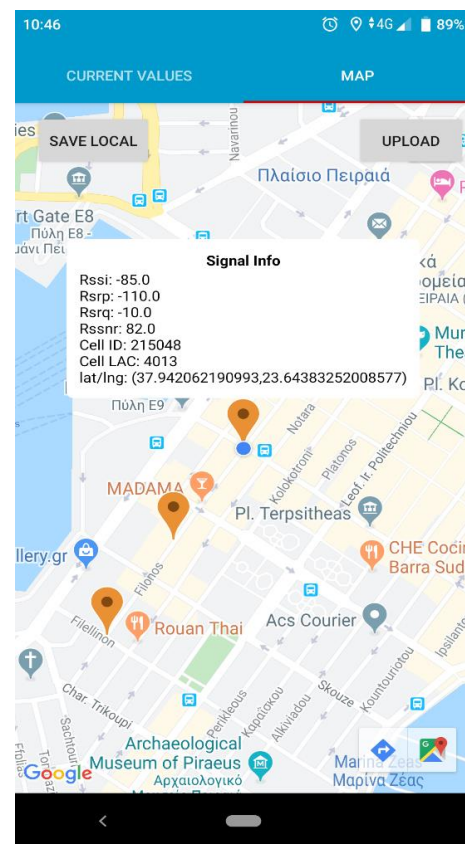
5.1 Περιγραφή εφαρμογής

Για την καταγραφή των δυνατοτήτων των δικτύων LTE και LTE-Advanced υλοποιήθηκε εφαρμογή σε λειτουργικό σύστημα Android μέσω του Android Studio με χρήση βιβλιοθηκών του Android. Η εφαρμογή μας είναι συμβατή με api 22 και ανώτερο δηλαδή με Android 5.1 και άνω. Με την εφαρμογή αυτή συλλέχθηκαν οι μεταβλητές, για τις οποίες ακολουθούν οι ορισμοί τους, και έπειτα αναλύθηκαν ώστε να δημιουργηθούν τα κατάλληλα γραφήματα και χάρτες κάλυψης και γενικότερα μία εικόνα της μέγιστης διαθέσιμης ταχύτητας όπου μπορεί να παρέχεται στον χρήστη από τους 3 παρόχους κινητής τηλεφωνίας που μελετήθηκαν. Οι κινητές συσκευές στις οποίες εγκαταστάθηκε και μέσω αυτών πάρθηκαν οι μεταβλητές ήταν κατηγορίας LTE- A Category 12 και μεγαλύτερης.

Οι μεταβλητές αυτές μεταφορτώνονταν σε μία βάση δεδομένων η οποία είναι εγκατεστημένη στην υπηρεσία Cloud Service Okeanos. Παράλληλα στον διακομιστή αυτόν έχουν δημιουργηθεί ιστοσελίδες στις οποίες οποιοσδήποτε μπορεί να έχει πρόσβαση ώστε να δει τις τιμές που συλλέχθηκαν πάνω σε χάρτη και ιστοσελίδα όπου δημιουργεί μέσω συναρτήσεων έναν χάρτη κάλυψης αναλόγως των δεδομένων όπου δίνουμε.



Εικόνα 22



Εικόνα 23

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

Στις εικόνες 22 και 23 μπορούμε να δούμε την εφαρμογή που υλοποιήσαμε καθώς και τις πληροφορίες που συλλέγει και μας απεικονίζει. Στην πρώτη καρτέλα της έχουμε την δυνατότητα να δούμε την ποιότητα του σήματος μας μέσω τιμών καθώς και πληροφορίες σχετικά την κεραία και την ζώνη που έχουμε εγγραφεί. Ακόμα μας παρέχονται πληροφορίες σχετικά με τις κεραίες όπου εκπέμπουν γύρω μας αλλά το τερματικό μας δεν έχει εγγραφεί λόγω χαμηλότερης ισχύος. Βέβαια από τις κεραίες αυτές παίρναμε χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με το αν είχαμε δυνατότητα να έχουμε Carrier Aggregation για μεγαλύτερες ταχύτητες κατερχόμενης, κυρίως, ζεύξης.

Όλα τα δεδομένα όπου συλλέχτηκαν συντέλεσαν στην καλύτερη εξαγωγή αποτελεσμάτων. Στην επόμενη καρτέλα (Εικόνα 23) γίνεται η απεικόνιση της τοποθεσίας συλλογής δεδομένων μέσω marker με σκοπό την δημιουργία μίας διαδρομής. Πατώντας τον κάθε marker μπορούμε να δούμε τις τιμές, σχετικές με την ισχύ σήματος και την θέση, που συλλέχτηκαν στο σημείο αυτό. Βέβαια επειδή παρατηρήθηκε μία μεγάλη δέσμευση μνήμης RAM (Random Access Memory) στην συσκευή όταν ο αριθμός των markers αυξανόταν, προτιμήσαμε να απεικονίζουμε 1 ανά 3 markers για εξοικονόμηση πόρων. Στο τέλος κάθε διαδρομής ο χρήστης έχει την δυνατότητα είτε να αποθηκεύσει τοπικά στην συσκευή του τα δεδομένα που συνέλλεξε είτε να τα ανεβάσει στην βάση δεδομένων ώστε να μπορέσει να τα επεξεργαστεί αναλυτικότερα και μέσω των ιστοσελίδων που έχουν δημιουργηθεί.

Όπως προαναφέρθηκε η εφαρμογή αναπτύχθηκε στο περιβάλλον του Android Studio και για την υλοποίηση της δημιουργήθηκαν επτά κλάσεις. Για την υλοποίηση της πρώτης καρτέλας με όνομα "CURRENT VALUES" έχουμε 2 κλάσεις την Tab1Values και την Tab1Signal οι οποίες επικοινωνούν ώστε να γίνει λήψη των μεταβλητών που απεικονίζονται στην οθόνη από την κεραία του κινητού. Από την κλάση Tab1Signal μέσω της βιβλιοθήκης telephony.SignalStrength συλλέγονται τα δεδομένα για 4G,3G και 2G και αποστέλλονται μέσω κλήσης συνάρτησης στην Tab1Values που χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη PhoneStateListener.

Για την δεύτερη καρτέλα με όνομα "MAP" έχουμε την κλάση Tab2Map στην οποία υλοποιείται ένας FragmentMap Η κλάση αυτή για να εκτελέσει όλες τις ενέργειες της επικοινωνεί με την Tab2Signal, την DBConnection, την Signal, την CustomInfoWindow Adapter και την DatabaseHelper. Όπως και στην 1 καρτέλα έτσι και εδώ η κλάση Tab2Map επικοινωνεί με την Tab2Signal ώστε να πάρει τις τιμές σήματος και γενικά τα δεδομένα όπου παίρνουμε από την κεραία. Τα δεδομένα αυτά λαμβάνονται έπειτα από κλήση συνάρτησης η οποία βάση του GPS ζητά να ανανεώσει τα δεδομένα της είτε κάθε 25 μέτρα απόστασης είτε κάθε 5 δευτερόλεπτα, όποιο από αυτά έρθει πρώτο. Τα δεδομένα του marker που θα δημιουργηθεί συλλέγονται κάθε 25 μέτρα και στον marker δίνεται χρωματισμός ανάλογα με την τιμή RSRP που έχει στην τοποθεσία αυτή. Αναλυτικότερα σχετικά με τον χρωματισμό των markers μπορούμε να δούμε στον πίνακα 11. Πατώντας τον κάθε marker όπως έχουμε αναφέρει έχουμε την δυνατότητα να δούμε τα δεδομένα της συγκεκριμένης τοποθεσίας. Για την εμφάνιση του παραθύρου διαλόγου αυτού χρησιμοποιούμε την κλάση CustomInfoWindowAdapter.

Με το άνοιγμα της 2^{ης} καρτέλας ξεκινά αυτόματα η εγγραφή δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά τοποθετούνται σε μία ArrayList που ονομάζεται Signal και στο τέλος της κάθε διαδρομής μας έχουμε την δυνατότητα είτε να τα κάνουμε upload στην βάση δεδομένων μας είτε να τα αποθηκεύσουμε τοπικά στην κινητή συσκευή μας. Για την διαδικασία αποθήκευσης στην βάση πατάμε τον κουμπί "UPLOAD" που

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

είναι στο πάνω δεξί άκρο του χάρτη όπου με την βοήθεια της κλάσης DBConnection και χρησιμοποιώντας το Java API JDBC, αρχικά γίνεται έλεγχος της κατάστασης της σύνδεσης μας με την βάση και έπειτα είτε θα εμφανιστεί μήνυμα αδυναμίας σύνδεσης με την βάση, "Please check your Internet Connection" είτε αν η σύνδεση είναι επιτυχής θα εμφανιστεί αρχικά μήνυμα "Loading" μέχρι να γίνει το upload του αρχείου και έπειτα μήνυμα επιτυχούς εγγραφής στην βάση, "Register Successful". Για την αποθήκευση στον τοπικό χώρο της συσκευής μας επιλέγουμε στο πάνω δεξί μέρος του χάρτη το κουμπί "Save Local". Με το πάτημα του γίνεται κλήση της κλάσης DatabaseHelper και η διαθέσιμη ArrayList αποθηκεύεται σε αρχείο txt με όνομα την ημερομηνία και ώρα δημιουργίας του. Τέλος στο αρχείο Manifest ορίζουμε τα ανάλογα permissions ώστε να ζητηθεί από τον χρήστη να δοθεί άδεια χρήσης τους. Οι άδειες αυτές που απαιτούνται είναι οι : ACCESS_FINE_LOCATION, ACCESS_COARSE_LOCATION όπου από τον χρήστη θα ζητηθεί άδεια για χρήση τοποθεσίας, οι άδειες READ_EXTERNAL_STORAGE και WRITE_EXTERNAL_STORAGE όπου από τον χρήστη θα ζητηθεί άδεια για χρήση εσωτερικού χώρου της συσκευής. Ακόμη γίνεται χρήση της άδειας INTERNET καθώς και των αδειών ACCESS_NETWORK_STATE και CHANGE_NETWORK_STATE.

5.2 Ανάλυση Μεταβλητών

Σε κυψελοειδή δίκτυα, όταν ένα κινητό τερματικό μετακινείται από κυψέλη σε κυψέλη, διενεργεί cell selection/reselection και handover με σκοπό να επιλέξει τον σταθμό που θα συνδεθεί. Για τον σκοπό αυτό μετράται η ισχύς και η ποιότητα του σήματος των γειτονικών κελιών. Το δίκτυο LTE έχει ένα UE που μετρά δύο παραμέτρους του σήματος αναφοράς: το RSRP (Reference Signal Received Power) και το RSRQ (Reference Signal Received Quality).

- **Reference Signal Received Power (RSRP)**

Το RSRP είναι μια τιμή που σχετίζεται με την ισχύ του σήματος για το συγκεκριμένο κυψέλη που χρησιμοποιείται ως τιμή αναφοράς για τις αποφάσεις cell selection και cell reselection και handover. Για ένα συγκεκριμένο κυψέλη, το RSRP ορίζεται ως η μέση ισχύς (σε Watts) των Resource Elements (REs) που φέρουν σήματα αναφοράς συγκεκριμένων κυψελών (RSs) εντός του εύρους ζώνης. Η μέτρηση RSRP, που εκφράζεται σε dBm (decibel-milliwatts), χρησιμοποιείται κυρίως για να κατατάσσει μεταξύ διαφορετικών υποψήφιων κελιών σύμφωνα με την ισχύ του σήματος. Βέβαια η μέτρηση του RSRP δίνει την ένδειξη για την στάθμη του σήματος αναφοράς της κυψέλης γενικότερα, αλλά δεν είναι το απόλυτο μέτρο για να καθορίσει την ποιότητα σήματος, διότι μπορεί το τερματικό να έχει καλή στάθμη σήματος αλλά κακή ποιότητα λόγω παρεμβολών [29]. Οι τιμές του RSRP ορίζονται από -140 dBm έως -44 dBm με βήμα 1 dB όπως φαίνεται στον πίνακα παρακάτω.

Πίνακας 9 Πίνακας αντιστοίχισης αναφερόμενης τιμής RSRP και πραγματικής σε κινητές συσκευές και χαρακτηρισμός ισχύος

Αναφερόμενη Τιμή	Τιμή(dBm)	Χαρακτηρισμός Σήματος
RSRP_00	RSRP<-140	Ασθενές σήμα
RSRP_01	-140<RSRP<-139	Ασθενές σήμα
...		Ασθενές σήμα
RSRP_21	-120<RSRP<-119	Μέτριο σήμα

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

...		Μέτριο σήμα
RSRP_24	-106<RSRP<-105	Μέτριο σήμα
RSRP_25	-105<RSRP<-104	Καλό σήμα
...		Καλό σήμα
RSRP_38	-91<RSRP<-90	Καλό σήμα
RSRP_39	-90<RSRP<-89	Εξαιρετικό σήμα
...		Εξαιρετικό σήμα
RSRP_96	-45<RSRP<-44	Εξαιρετικό σήμα
RSRP_97	-44<RSRP	Εξαιρετικό σήμα

Η παραπάνω κατηγοριοποίηση έχει χρησιμοποιηθεί στους markers της εφαρμογής αλλά και του site ώστε να είναι πιο εύκολο να δούμε με μία ματιά την ισχύς που έχει το σήμα στην περιοχή όπου βλέπουμε. Συγκεκριμένα η αντιστοιχία είναι:

Πίνακας 10 Πίνακας αντιστοίχισης χρώματος- ισχύος στην εφαρμογή Android που υλοποιήσαμε

Ασθενές σήμα LTE - 3G σήμα - 2G σήμα	Κόκκινος marker
Μέτριο σήμα LTE	Πορτοκαλί marker
Καλό σήμα LTE	Κίτρινος marker
Εξαιρετικό σήμα LTE	Πράσινος marker

- **Reference Signal Received Quality (RSRQ)**

Το RSRQ είναι μια μέτρηση που αφορά την ποιότητα σήματος της συγκεκριμένης κυψέλης. Όμοια με το RSRP, η μέτρηση αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για την κατάταξη μεταξύ διαφορετικών υποψήφιων κυψελών σύμφωνα με την ποιότητα του σήματος τους. Αυτή η μέτρηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δεδομένο ώστε να παρθεί η απόφαση για cell reselection και handover σε περιπτώσεις τις οποίες το RSRP δεν επαρκεί για την πραγματοποίηση αξιόπιστων αποφάσεων επανελέγχου / μεταβίβασης σε άλλη κυψέλη. Μια μαθηματική έκφραση του RSRQ φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση, δεδομένου των RSRP και RSSI [28]:

$$RSRQ = RB \frac{RSRP}{RSSI} \quad (1)$$

Όπου RB είναι ο αριθμός των Resource Blocks.

Οι τιμές του RSRQ ορίζονται από -19.5 dB έως -3 dB με βήμα 0.5 dB όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 11 Πίνακας αντιστοίχισης αναφερόμενης τιμής RSRQ και πραγματικής σε κινητές συσκευές και χαρακτηρισμός ισχύος

Αναφερόμενη Τιμή	Τιμή (dB)	Χαρακτηρισμός Σήματος
RSRQ_00	RSRQ > -19.5	Ασθενές σήμα
RSRQ_01	-19.5 < RSRQ < -19	Ασθενές σήμα
...		Ασθενές σήμα
RSRQ_16	-12 < RSRQ < -11.5	Μέτριο σήμα
...		Μέτριο σήμα
RSRQ_21	-9.5 < RSRQ < -9	Μέτριο σήμα
RSRQ_22	-9 < RSRQ < -8.5	Καλό σήμα
...		Καλό σήμα
RSRQ_29	-5.5 < RSRQ < -5	Καλό σήμα
RSRQ_30	-5 < RSRQ < -4.5	Εξαιρετικό σήμα
...		Εξαιρετικό σήμα
RSRQ_34	-3 <= RSRQ	Εξαιρετικό σήμα

- **Receive Strength Signal Indicator (RSSI)**

Το RSSI μετρά τη μέση συνολική λαμβανόμενη ισχύ που παρατηρείται μόνο σε σύμβολα OFDM που περιέχουν σύμβολα αναφοράς για τη θύρα της κεραίας 0 σε εύρος ζώνης μέτρησης N μπλοκ πόρων. Η συνολική λαμβανόμενη ισχύς του φορέα RSSI περιλαμβάνει την ισχύ από τα κύτταρα που εξυπηρετούν και δεν εξυπηρετούν το κανάλι, τις παρακαίμενες παρεμβολές του καναλιού, τον θερμικό θόρυβο κλπ. [29].

- **Signal to Noise Ratio (SNR)**

Στις αναλογικές και ψηφιακές επικοινωνίες, ο λόγος σήματος προς θόρυβο, συχνά γραμμένος S / N ή SNR, είναι ένα μέτρο της έντασης σήματος σε σχέση με το θόρυβο του περιβάλλοντος και συνήθως μετριέται σε ντεσιμπέλ (dB). Εάν η ένταση του εισερχόμενου σήματος σε micro Volt είναι V_s , και το επίπεδο θορύβου, επίσης σε micro Volt, είναι V_n , τότε ο λόγος σήματος προς θόρυβο, S / N, σε ντεσιμπέλ δίνεται από τον παρακάτω τύπο.

$$SNR = 20 \log_{10} \frac{V_s}{V_n} \quad (2)$$

Οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές στις μετρήσεις μας καθορίζονταν από -20dB έως +30dB.

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

- Evolved Absolute Radio Frequency Channel Number (EARFCN)

Από την τεχνολογία LTE και μετά, η συχνότητα φορέα στην ανερχόμενη και κατερχόμενη ζεύξη ορίζεται από το EARFCN, του οποίου οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0-65535. Το EARFCN προσδιορίζει με μοναδικό τρόπο τη ζώνη LTE και τη συχνότητα φορέα. Για παράδειγμα, τα Band-1 και Band-4 μπορούν να έχουν την ίδια συχνότητα Rx 2110-2170 MHz, αλλά το EARFCN τους είναι διαφορετικό. Το EARFCN είναι ανεξάρτητο από το εύρος ζώνης του καναλιού.

DOWNLINK

Η σχέση μεταξύ EARFCN κατερχόμενης ζεύξης (N_{DL}) και της συχνότητας φερουσών κατερχόμενης ζεύξης (F_{DL}) δίνεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$F_{DL} = F_{DL_low} + 0.1(N_{DL} - N_{Offs-DL}) \quad (3)$$

Όπου,

F_{DL_low} Η χαμηλότερη συχνότητα κατερχόμενης ζεύξης του φορέα σε συγκεκριμένη ζώνη.

$N_{Offs-DL}$ EARFCN Downlink offset. Αυτό εξαρτάται από τον αριθμό ζώνης.

UPLINK

Η σχέση μεταξύ EARFCN ανερχόμενης ζεύξης (N_{UL}) και της συχνότητας φερουσών ανερχόμενης ζεύξης (F_{UL}) δίνεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$F_{UL} = F_{UL_low} + 0.1(N_{UL} - N_{Offs-UL}) \quad (4)$$

Όπου,

F_{UL_low} Η χαμηλότερη συχνότητα ανερχόμενης ζεύξης του φορέα σε συγκεκριμένη ζώνη.

$N_{Offs-UL}$ EARFCN Downlink offset. Αυτό εξαρτάται από τον αριθμό ζώνη [30].

Στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται συγκεκριμένα κανάλια συχνοτήτων ανά πάροχο τα οποία έχουν το αντίστοιχο μοναδικό δικό τους EARFCN για το LTE, UARFCN (UMTS Absolute Radio-Frequency Channel Number) για το UMTS και ARFCN (Absolute Radio-Frequency Channel Number) για το GSM. Βέβαια κατά την διαδικασία καταγραφής των μετρήσεων δεν κατεγράφησαν όλα τα EARFCN που αναφέρονται

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

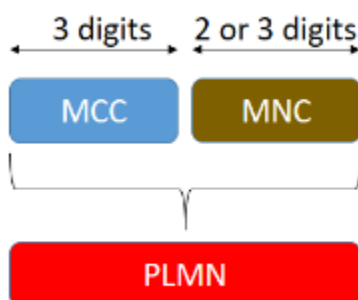
παρακάτω διότι οι μετρήσεις έγιναν σε 3 συγκεκριμένες περιοχές. Στον παρακάτω πίνακα βλέπουμε την αντιστοιχία ανά πάροχο [31].

Πίνακας 12 Πίνακας αντιστοίχισης καναλιών EARFCN, UARFCN και ARFCN ανά πάροχο [31]

	Πάροχος 1	Πάροχος 2	Πάροχος 3
GSM 900	0,975-1023	51-124	1-50
GSM 1800	761-885	586-710	512-585
UMTS 900	2938	3062	-
UMTS 2100	10764,10739,10714	10564,10589,10614,10639	10664,10689
LTE 800	6400	6300	6200
LTE 1800	1650, 1675, 1700	1401, 1426, 1451	1326
LTE 2600	3050	2850	3350

- **Mobile Country Codes (MCC) και Mobile Network Codes (MNC)**

Οι κωδικοί χωρών κινητής τηλεφωνίας (MCC) χρησιμοποιούνται σε ασύρματα τηλεφωνικά δίκτυα (GSM, CDMA, UMTS, LTE κ.λπ.), προκειμένου να προσδιοριστεί η χώρα στην οποία ανήκει ένας συνδρομητής κινητής τηλεφωνίας. Για να αναγνωρίσουμε με μοναδικό τρόπο ένα δίκτυο συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας, το MCC συνδυάζεται με έναν Κώδικα δικτύου κινητής τηλεφωνίας (MNC). Ο συνδυασμός του MCC και του MNC ονομάζεται Public Land Mobile Network Identifier (PLMN) και είναι ο συνδυασμός και των δύο σε μία συμβολοσειρά. Για παράδειγμα η Ελλάδα κατέχει το MCC 202 και υπάρχουν 8 εν λειτουργία MNC σε αυτή. Εάν συνδυάσει το HNI με τον MSIN (Mobile Subscriber Identification Number), το αποτέλεσμα είναι το λεγόμενο IMSI (Integrated Mobile Subscriber Identify) ή διεθνής ταυτότητα συνδρομητή κινητής τηλεφωνίας και είναι ένας αριθμός που αναγνωρίζει με μοναδικό τρόπο κάθε χρήστη ενός κυψελοειδούς δικτύου. Αποθηκεύεται ως πεδίο 64-bit και αποστέλλεται από την κινητή συσκευή στο δίκτυο [32].



Εικόνα 24 Δομή του Public Land Mobile Network Identifier[32]

- **Cell ID (CID)**

Το Cell ID αποτελεί έναν μοναδικό αριθμό που χρησιμοποιείται για την αναγνώριση κάθε σταθμού βάσης κινητής τηλεφωνίας (Base Transceiver Station - BTS) ή τομέα ενός BTS. Σε ορισμένες περιπτώσεις, το πρώτο ή το τελευταίο ψηφίο του CID αντιπροσωπεύει τα αναγνωριστικά στοιχεία του τομέα:

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

- η τιμή 0 χρησιμοποιείται για την πολυκατευθυντικές κεραίες,
- οι τιμές 1, 2, 3,... χρησιμοποιούνται για τομείς κατευθυντικών κεραιών

Ένα CID κυμαίνεται από 0 έως 65535 ($2^{16}-1$) σε δίκτυα GSM και CDMA και από 0 έως 268.435.455 ($2^{28}-1$) σε δίκτυα UMTS και LTE [33].

- **Tracking Area Code (TAC)**

Η περιοχή εξυπηρέτησης ενός κυψελοειδούς τηλεφωνικού δικτύου χωρίζεται σε περιοχές. Σε κάθε περιοχή παρέχεται ένας μοναδικός αριθμός εντός του δικτύου, ο κωδικός περιοχής όπου στα LTE δίκτυα ονομάζεται TAC ενώ στις προηγούμενες γενιές ονομάζεται LAC (Location Area Code). Αυτός ο κωδικός χρησιμοποιείται ως μοναδική αναφορά για την τοποθεσία ενός συνδρομητή κινητής τηλεφωνίας και είναι απαραίτητος ώστε να εντοπιστεί ο συνδρομητής και να του μεταβιβαστεί μία ενδεχόμενη εισερχόμενη κλήση. Ο TAC έχει εύρος από 0 έως 65535 ($2^{16}-1$). Άμα συνδυάσουμε το PLMN, που αναφέραμε παραπάνω, με τον TAC ο αριθμός που προκύπτει ονομάζεται Tracking Area Identity ή TAI [34].

- **Physical cell identifier (PCI)**

Τα PCIs χρησιμοποιούνται για συγχρονισμό σήματος. Κάθε σύγχρονο δίκτυο επείγεια μετάδοσης E-UTRAN διαθέτει PCI. Αυτή την στιγμή υπάρχουν συνολικά 504 PCIs στο σύστημα LTE. Κάθε PCI χωρίζεται σε 168 ομάδες, καθεμία από τις οποίες περιέχει 3 PCI.

$$PCI = 3 * SSS + PSS$$

Τα PSS και SSS είναι δύο σήματα συγχρονισμού που μεταδίδονται κάθε 5 ms.

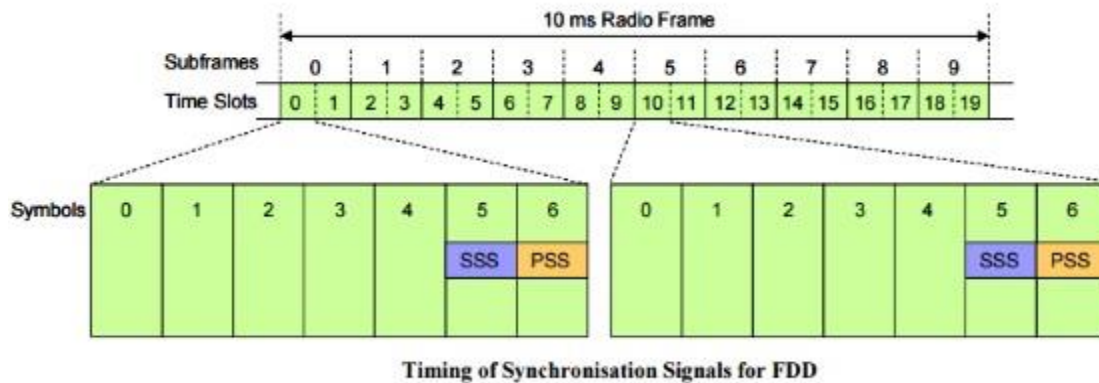
Ο UE χρησιμοποιεί τα σήματα συγχρονισμού για :

- Να επιτύχει συγχρονισμό των διαθέσιμων πόρων
- Να προσδιορίσει το κέντρο του εύρους ζώνης του καναλιού ως προς την συχνότητα

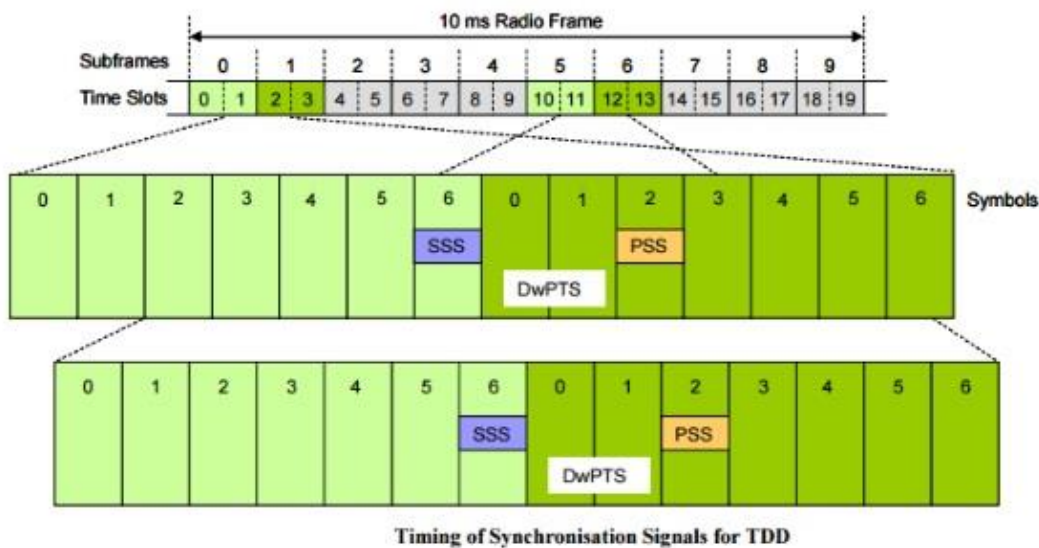
- **Primary Synchronization Signals (PSS):**

Τα πρωτεύοντα σήματα συγχρονισμού αποτελούνται από μία από τις τρεις αλληλουχίες Zadoff-chu των 62 συμβόλων σε ένα κελί. Το PSS εκπέμπεται δύο φορές σε κάθε frame και οι δύο μεταδόσεις είναι ίδιες. Στην περίπτωση του FDD το PSS μεταδίδεται χρησιμοποιώντας τους κεντρικούς 62 subcarriers που ανήκουν στο τελευταίο σύμβολο των χρονικών θυρίδων 0 και 10. Στην περίπτωση του TDD το PSS μεταδίδεται χρησιμοποιώντας τους κεντρικούς 62 subcarriers που ανήκουν στο τρίτο σύμβολο της χρονικής θυρίδας 2 (υποπλαίσιο 1) και το τρίτο σύμβολο της χρονικής θυρίδας 12 (υποπλαίσιο 6) όπως βλέπουμε στα παρακάτω σχήματα [35]].

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



Εικόνα 25 Χρονισμός σημάτων συγχρονισμού του FDD [35]



Εικόνα 26 Χρονισμός σημάτων συγχρονισμού του TDD [35]

○ **Secondary Synchronization Signals (SSS):**

Μετά την λήψη του κύριου σήματος συγχρονισμού, ο UE προσπαθεί να ανιχνεύσει το δευτερεύον σήμα συγχρονισμού. Τα δευτερεύοντα σήματα συγχρονισμού είναι ένας από τους 168 κωδικούς που είναι σε ακολουθίες των 62 bit. Το SSS μεταδίδεται δύο φορές μέσα σε κάθε frame. Οι δύο μεταδόσεις του SSS είναι διαφορετικές έτσι ώστε ο UE να μπορεί να ανιχνεύσει ποιο είναι το πρώτο και ποιο είναι το δεύτερο.

Στην περίπτωση του FDD το SSS μεταδίδεται χρησιμοποιώντας τους κεντρικούς 62 subcarriers που ανήκουν στο δεύτερο στο τελευταίο σύμβολο των χρονικών θυρίδων 0 και 10

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

Στην περίπτωση του TDD το SSS μεταδίδεται χρησιμοποιώντας τους κεντρικούς 62 subcarriers που ανήκουν στο τελευταίο σύμβολο της χρονικής θυρίδας 1 (υποπλαίσιο 0) και το τελευταίο σύμβολο της χρονικής θυρίδας 11 (υποπλαίσιο 5).

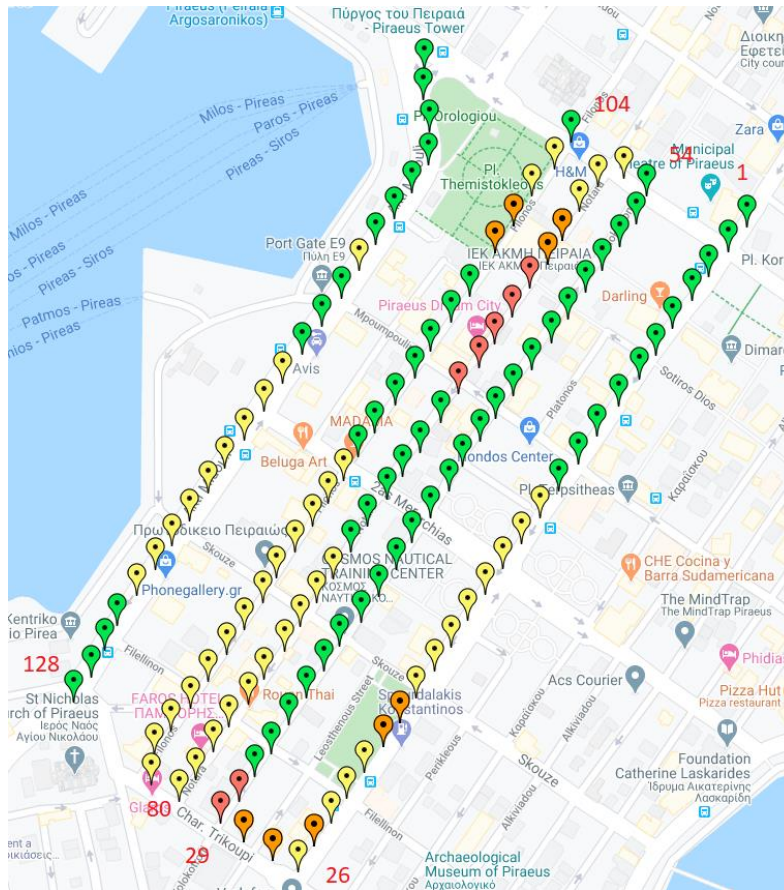
Ένα πρόβλημα που δημιουργείται από την τεχνολογία των PCI οι συγκρούσεις μεταξύ γειτονικών PCI. Από την στιγμή που υπάρχουν πολλά κελιά σε ένα σύστημα LTE, ορισμένα από αυτά πρέπει να μοιράζονται ένα PCI. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα, η Huawei ανέπτυξε τη δυνατότητα ανίχνευσης σύγκρουσης των PCI και αυτόματης βελτιστοποίησης. Βοηθά στην ανίχνευση και επίλυση της σύγκρουσης μεταξύ PCI γειτονικών κελιών, στη διάθεση βελτιστοποιημένων PCI σε αντικρουόμενες κυψέλες και επομένως στη μείωση της έλλειψης υπηρεσιών [35], [36].

5.3 Αστική Περιοχή

Για την μελέτη αυτή αναλύσαμε τρεις τύπους κατοικήσιμων περιοχών. Την αστική περιοχή του κέντρου του Πειραιά, την ημιαστική περιοχή της Θήβας και την αγροτική περιοχή του Χωριού Κιμώλου. Και στις 3 περιπτώσεις πραγματοποιήθηκαν σε μία καθορισμένη περιοχή 4 ίδιες διαδρομές ώστε τα δεδομένα μας να έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια και να μελετηθεί εάν το δίκτυο του κάθε παρόχου κινητής παρείχε αξιόπιστο σήμα χωρίς ιδιαίτερες μεταβολές μεταξύ των 4 ημερών.

Στην περίπτωση της αστικής περιοχής μελετήσαμε ένα τμήμα του Πειραιά και συγκεκριμένα την διαδρομή που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Οι μετρήσεις έγιναν στις 24/6-25/6 και 27-28/6 κατά τις μεσημβρινές ώρες και για τους 3 παρόχους κινητής ακολουθώντας την ίδια διαδρομή. Τα αποτελέσματα και τα γραφήματα που ακολουθούν δημιουργήθηκαν έπειτα από την συλλογή περίπου 500, κατά μέσο όρο, μετρήσεων για κάθε πάροχο κινητής τηλεφωνίας. Η διαδρομή αυτή επιλέχθηκε διότι ξεκινά από το κέντρο του Πειραιά και διέρχεται από σημεία που φιλοξενούνται πολλές εταιρίες με μεγάλο αριθμό εργαζομένων, ξενοδοχεία καθώς και αρκετά μαγαζιά εστίασης και καταστήματα. Η διαδρομή τελειώνει στο ανατολικό τμήμα του λιμανιού. Από τα δεδομένα που συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν εξαγάγαμε κάποια αποτελέσματα σχετικά με την κάλυψη, την ποιότητα σήματος καθώς και την θεωρητική δυνατότητα μέγιστης ταχύτητας της κατερχόμενης ζεύξης.

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



Εικόνα 27 Εικόνα των λαμβανόμενων σημάτων που συλλέχθηκαν, κατά την διάρκεια μίας διαδρομής στην αστική περιοχή μελέτης, μέσω της ιστοσελίδας απεικόνισης των μετρήσεων

Αρχικά, μέσω γραφημάτων μελετήσαμε αν η ισχύς και η ποιότητα του σήματος για κάθε πάροχο είναι σταθερή στην συνολική διάρκεια των 4 ημερών. Οι ακόλουθοι πίνακες περιέχουν τους μέσους όρους της κάθε μεταβλητής όπου συλλέγαμε από την κάθε διαδρομή.

Πάροχος Α΄

Πίνακας 13 Πίνακας μέσω των όρων τιμών *RSSI, RSRP, RSRQ, SNR* ανά ημέρα του Α΄ Παρόχου στην αστική περιοχή

Ημερομηνία	RSSI (dBm)	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	SNR (dB)
24/6	-60.2846	-87.1789	-9.78862	12.36098
25/6	-59.9593	-86.0732	-9.53659	12.42602
27/6	-64.2195	-82.0407	-7.64228	11.13008
28/6	-62.6585	-81.8943	-7.79675	11.29268
Απόκλιση	6.634 %	6.062 %	22 %	10.429 %

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

Όπως παρατηρούμε η ισχύς του σήματος μπορεί να μειώθηκε κατά 6% αλλά υπήρξε μια μεγάλη βελτίωση στην ποιότητα του σήματος της τάξης του 22% ή αλλιώς σχεδόν διπλασιασμός της ποιότητας. Ακόμη, το RSSI που μας δίνει μια καλύτερη εικόνα για την ποιότητα του σήματος, έχει μία πτώση περίπου 6%. Η συνολική εικόνα του μέσου όρου σημάτων είναι πολύ καλή σε όλες τις μεταβλητές μέτρησης.

Πάροχος Β'

Πίνακας 14 Πίνακας μέσων όρων τιμών RSSI,RSRP,RSRQ,SNR ανά ημέρα του Β' Παρόχου στην αστική περιοχή

Ημερομηνία	RSSI (dBm)	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	SNR (dB)
24/6	-59	-85.3538	-9.70769	101.9538
25/6	-58.69	-86.0078	-9.87597	101.3488
27/6	-59.397	-84.3571	-8.75397	138.4921
28/6	-59.156	-84.8594	-8.82813	127.4375
Απόκλιση	1.19 %	1.919 %	11.361 %	26.82 %

Στην περίπτωση του δεύτερου παρόχου κινητής, η ισχύς και το RSSI είχαν πολύ μικρή απόκλιση κατά την διάρκεια των μετρήσεων της τάξης του 1-2%. Σημαντική διαφορά υπήρξε στα επίπεδα του θορύβου, αφού η ισχύς ήταν σταθερή, στα οποία υπήρξε διαφορά πάνω από 26 %. Τέλος η ποιότητα του σήματος είχε και αυτή μια διαφορά 11 % ανάμεσα στην μικρότερη και την μεγαλύτερη τιμή των μέσων όρων.

Πάροχος Γ'

Πίνακας 15 Πίνακας μέσων όρων τιμών RSSI,RSRP,RSRQ,SNR ανά ημέρα του Γ' Παρόχου στην αστική περιοχή

Ημερομηνία	RSSI (dBm)	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	SNR (dB)
24/6	-68.390625	-95.1094	-10.2578	11.525
25/6	-68.0313	-95.0469	-9.90625	11.70625
27/6	-67.8	-92.6796875	-8.5078125	15.75625
28/6	-67.21	-94.66141732	-8.3937	16.4937
Απόκλιση	1.7263 %	2.555 %	18.173 %	30.125 %

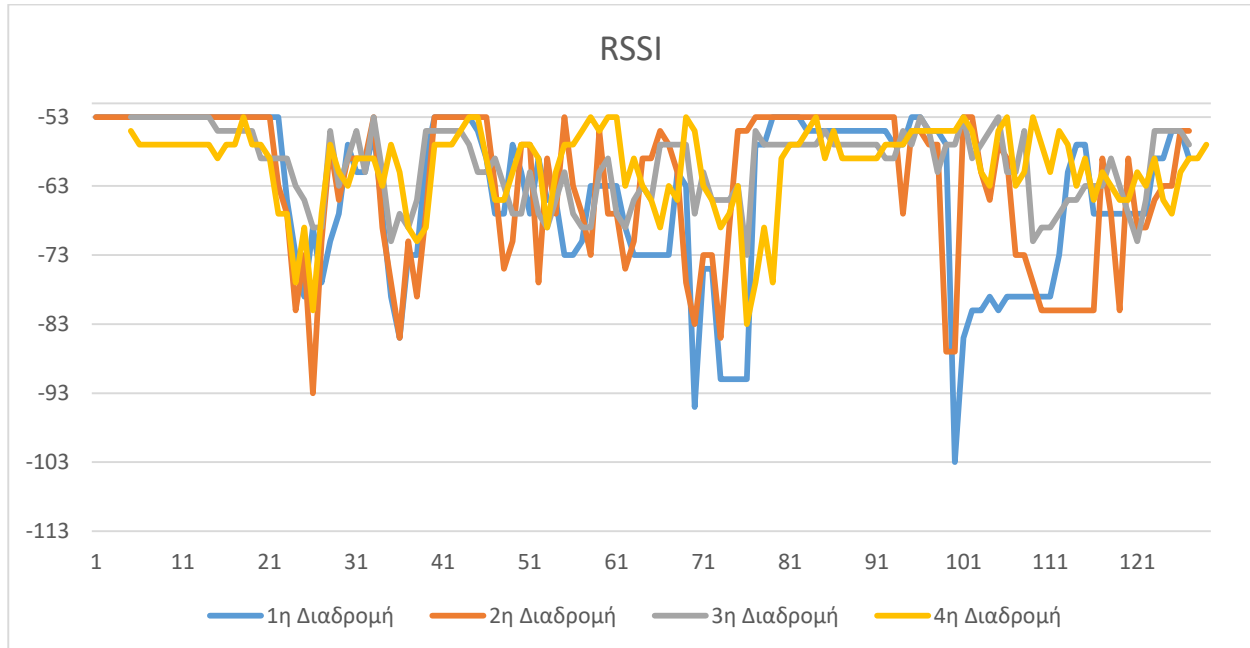
Στην τελευταία περίπτωση του τρίτου παρόχου, όμοια με την προηγούμενη, οι διαφορές τόσο στο RSSI όσο και στο RSRP ήταν μικρές με μία διαφορά του μέγιστου από τον ελάχιστο μέσο όρο 1,72 % και 2,55% αντίστοιχα. Μεγάλη διαφορά μεταξύ των μετρήσεων και στον πάροχο αυτό είχαν το RSRQ και SNR όπου ήταν 18.1 % και 30.1 % οι μέγιστες διαφορές αντίστοιχα.

Ως προς την σταθερότητα της ισχύς και την ποιότητας κατά την διάρκεια των 4 διαδρομών απεικονίζεται καλύτερα στα παρακάτω γραφήματα.

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

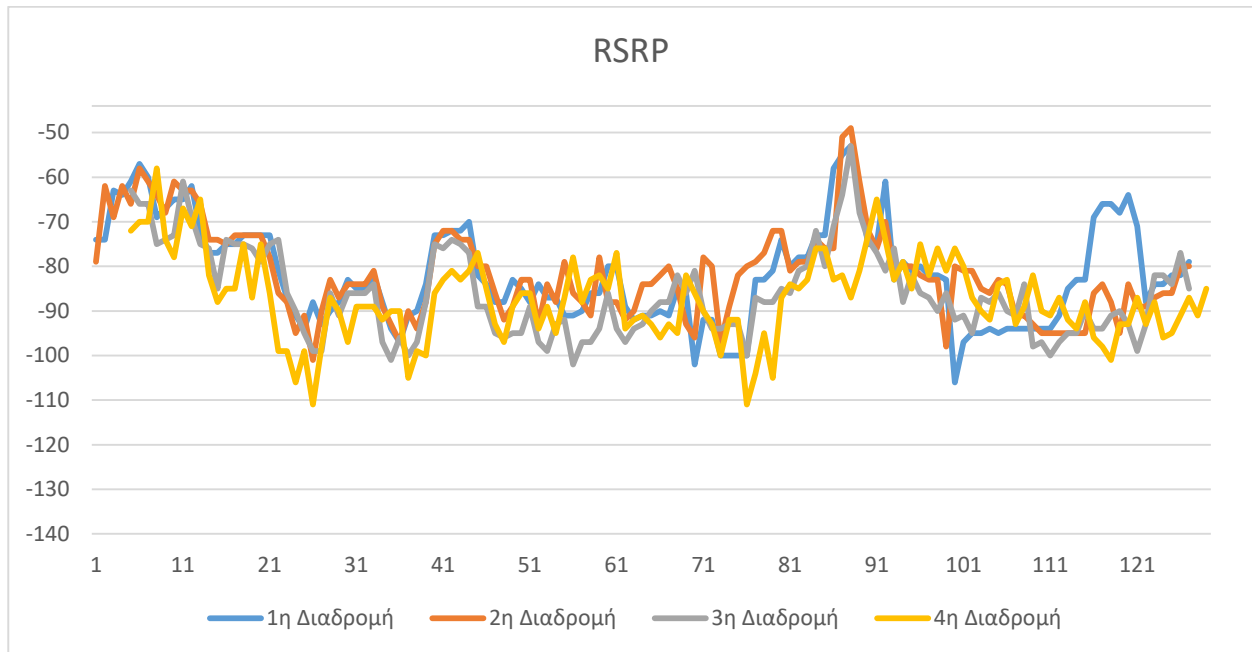
5.3.1 Μετρήσεις Παρόχου Α΄

Σε όλα τα διαγράμματα RSSI, RSRP, RSRQ και SNR που ακολουθούν έχουμε τις τιμές μέτρησης στον κάθετο άξονα και τον αριθμό του marker της διαδρομής όπως εικονίζεται στις εικόνες 27, 37 και 42 για την αστική, ημιαστική και αγροτική περιοχή αντίστοιχα.

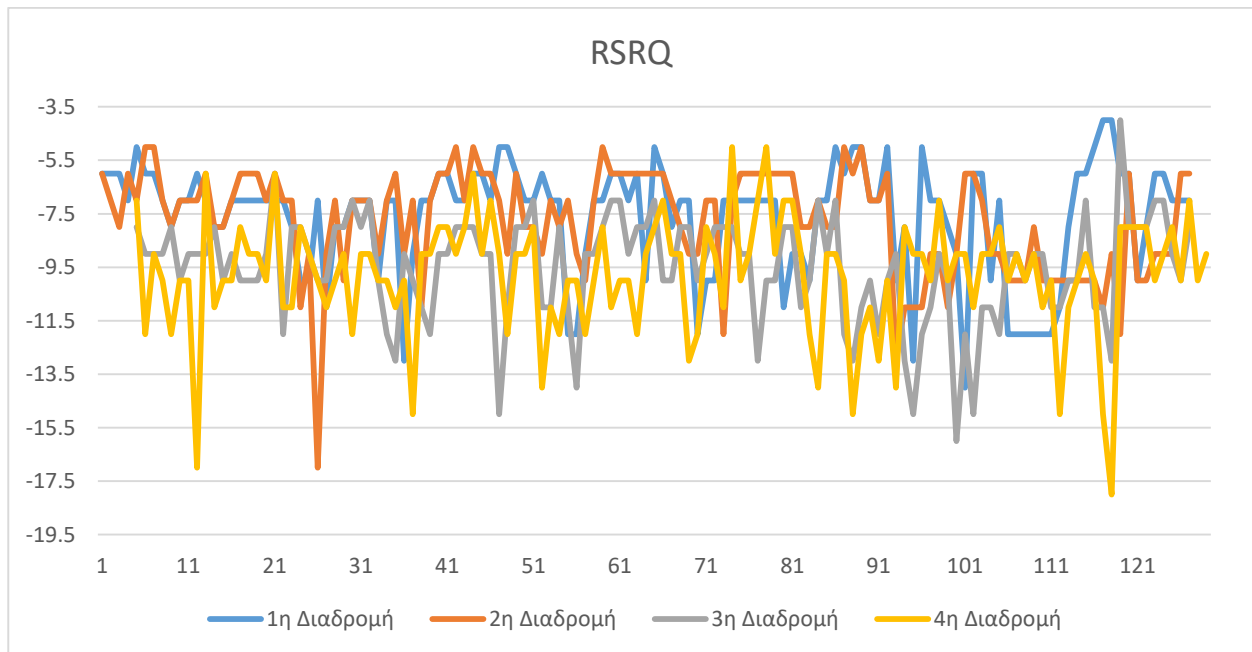


Γράφημα 1 Γράφημα RSSI αστικής περιοχής Α΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

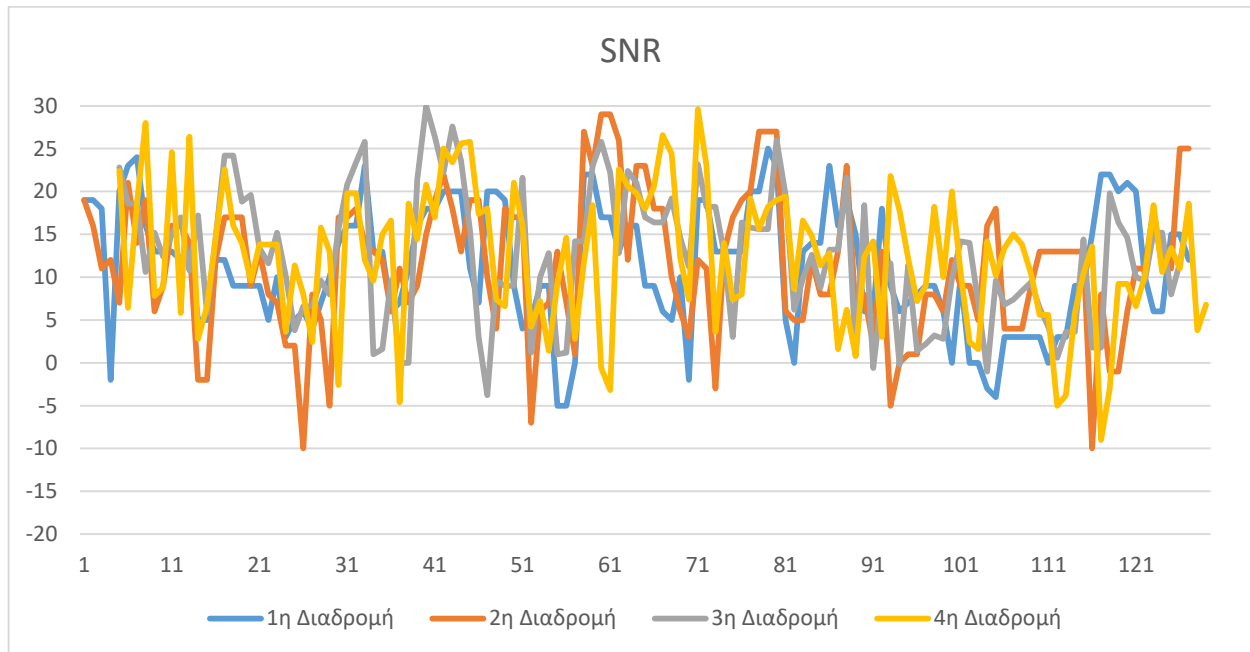


Γράφημα 2 Γράφημα RSRP αστικής περιοχής Α' Παρόχου κινητής τηλεφωνίας



Γράφημα 3 Γράφημα RSRQ αστικής περιοχής Α' Παρόχου κινητής τηλεφωνίας

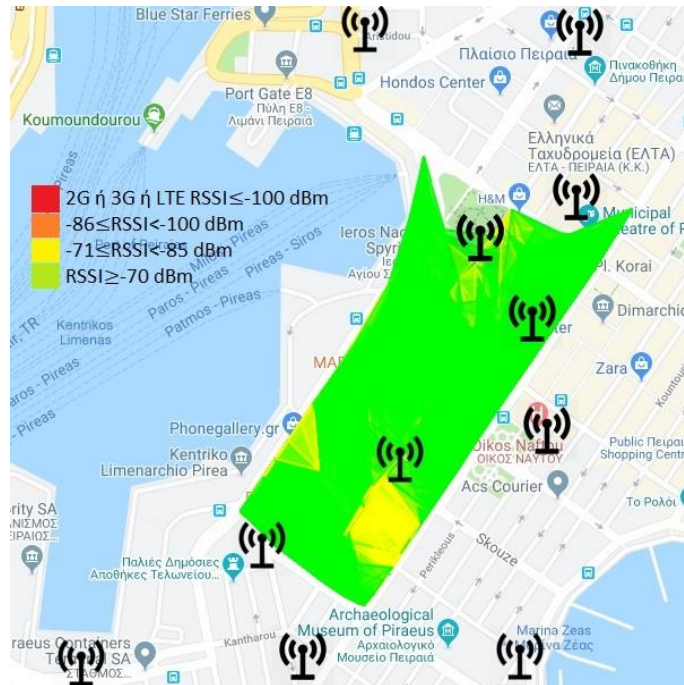
Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



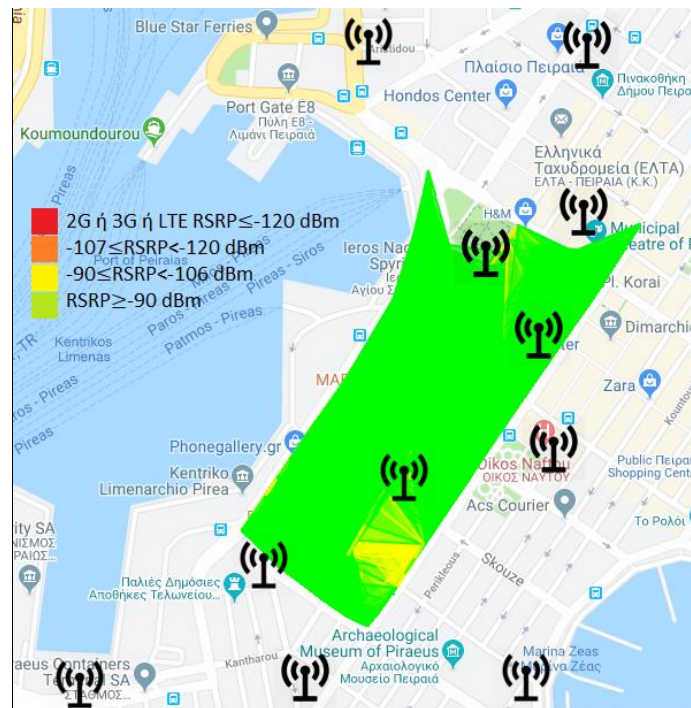
Γράφημα 4 Γράφημα SNR αστικής περιοχής Α' Παρόχου κινητής τηλεφωνίας

Όπως παρατηρούμε το RSRP καθ' όλη την διάρκεια παρουσιάζει μία σταθερότητα μεταξύ των 4 λήψεων χωρίς να υπάρχουν διαφοροποιήσεις μεταξύ των σημάτων. Αντίθετα το RSRQ έχει απότομες εναλλαγές τιμών χωρίς αυτές να γίνονται σε όλες τις περιπτώσεις επηρεάζοντας με τον τρόπο αυτό και την ταχύτητα download. Βέβαια η μέση τιμή RSRQ, όπως είδαμε παραπάνω ήταν η καλύτερη μεταξύ των τριών. Τέλος, το RSSI παρουσιάζει πολλές μεταβολές χωρίς βέβαια αυτό να σημαίνει ότι το συνολικό αποτέλεσμα δεν είναι καλό καθώς το 80% των τιμών ήταν μικρότερες από -70 dBm όπου μέχρι το όριο αυτό το σήμα LTE χαρακτηρίζεται εξαιρετικό. Στους ακόλουθους χάρτες κάλυψης τα χρώματα έχουν δοθεί σύμφωνα με τον προαναφερθέντα πίνακα στο κεφάλαιο 5.1. Ακόμη σε όλους τους χάρτες έχουν προστεθεί οι θέσεις των κεραιών[61] από τις οποίες λαμβανόταν το σήμα κατά την διαδρομή.

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



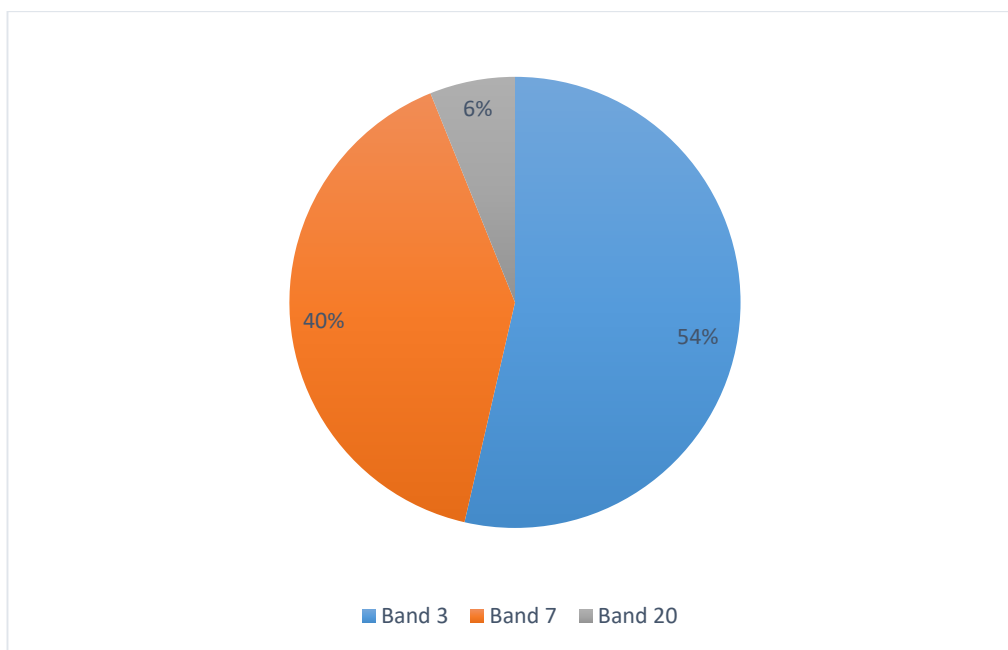
Εικόνα 28 Χάρτης κάλυψης δημιουργημένος σύμφωνα με τις τιμές RSSI του παρόχου Α' με απεικόνιση των κεραιών λήψης [61]



Εικόνα 29 Χάρτης κάλυψης δημιουργημένος σύμφωνα με τις τιμές RSRP του παρόχου Α' με απεικόνιση των κεραιών λήψης [61]

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

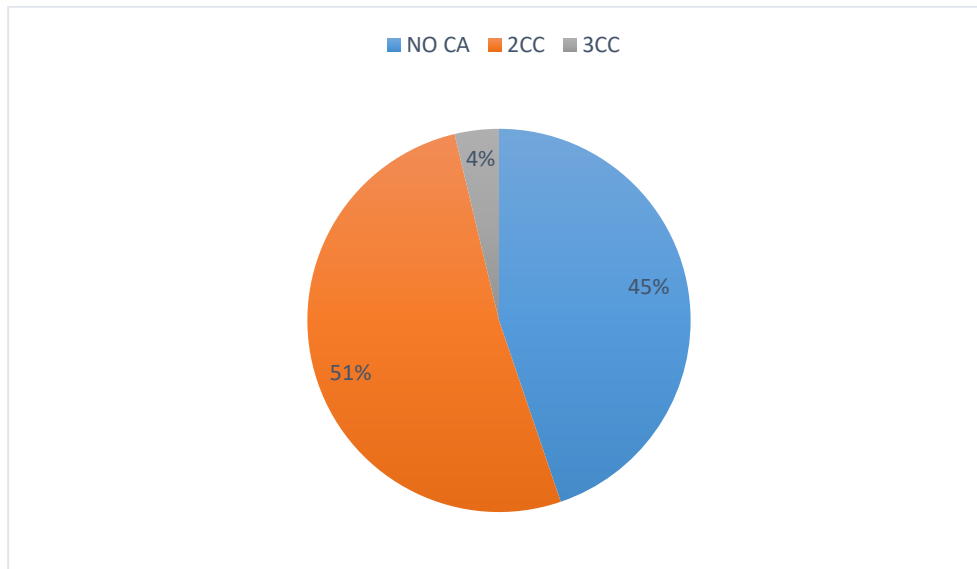
Στο παρακάτω διάγραμμα αποτυπώνεται σε ποσοστά σε ποια ζώνη συχνοτήτων ήταν εγγεγραμμένο το κινητό τερματικό κατά μέσο όρο κατά την διάρκεια της προδιαγεγραμμένης διαδρομής. Στις 4 διαφορετικές διαδρομές που έγιναν δεν υπήρχε μεγάλη απόκλιση στις εγγεγραμμένες ζώνες συγκριτικά με τα αποτελέσματα που βλέπουμε στο ακόλουθο σχήμα εκτός από μία διαδρομή όπου είχαμε μείωση 13% στην ζώνη 3 και εγγραφή στην ζώνη 7. Όπως παρατηρούμε ο πάροχος αυτός αξιοποιεί περισσότερο τις ζώνες συχνοτήτων 3 και 7 για να έχουν καλύτερη απόδοση ώστε να εγγραφεί ένα τερματικό.



Γράφημα 5 Διάγραμμα μέσου όρου κάλυψης διαθέσιμων ζωνών συχνοτήτων Α' παρόχου

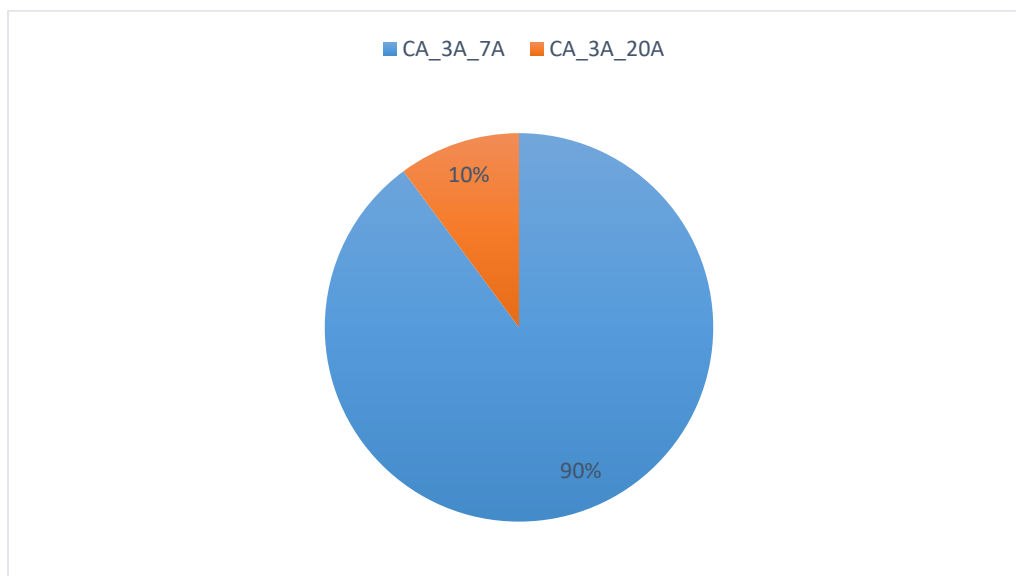
Στο παρακάτω διάγραμμα έχουμε τα ποσοστά της διαδρομής κατά τα οποία έχουμε διαθέσιμο Carrier Aggregation ή όχι. Συγκεκριμένα στο 45% της διαδρομής είχαμε μία μόνο ζώνη διαθέσιμη, στο 51% 2 ζώνες (2CC) και μόνο στο 4% είχαμε 3 ζώνες συχνοτήτων διαθέσιμες (3CC) που μας προσφέρουν πλήρη ταχύτητα download.

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



Γράφημα 6 Διάγραμμα ποσοστού μέσου όρου κάλυψης με Carrier Aggregation Α'παρόχου

Στο 51% που βλέπουμε στο γράφημα 6 όπου είχαμε 2 ζώνες συχνοτήτων διαθέσιμες, όπως βλέπουμε και στο παρακάτω σχήμα στο 90% του είχαμε διαθέσιμες τις ζώνες 3 και 7 ενώ στο 10% τις ζώνες 3 και 20. Η μεγάλη διαφορά αυτή έχει πλεονέκτημα στην ταχύτητα κατερχόμενης ζεύξης καθώς η ζώνη 20 έχει μικρότερη ταχύτητα από την ζώνη 7 λόγω του χαμηλότερου bandwidth της. Ειδικότερα στη ζώνη 7 στην Ελλάδα ο συγκεκριμένος πάροχος έχει δυνατότητα bandwidth 20MHz ενώ στην ζώνη 20 έχει 10MHz το οποίο σημαίνει πως με την ίδια ακριβώς εγκατάσταση θα έχει τουλάχιστον σε θεωρητικό επίπεδο την μισή ταχύτητα.



Γράφημα 7 Διάγραμμα ποσοστού χρήσης των 2 τύπων 2CC του Α' παρόχου

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

Φυσικά κύριο ρόλο για την καλύτερη ταχύτητα download έχουν και το RSRP, RSRQ και SNR τα οποία όπως βλέπουμε και στον παρακάτω πίνακα είναι πάρα πολύ καλά και σχεδόν ίδια με τον μέσο όρο των τιμών από τις μεταβλητές που έχουμε από την κεραίες που εγγράφεται στο κινητό δηλαδή του πίνακα 15. Οι παρακάτω τιμές αποτελούν τους μέσους όρους των σημάτων που υπήρχαν από άλλες κεραίες και όχι από αυτή στην οποία είχε εγγραφεί η συσκευή.

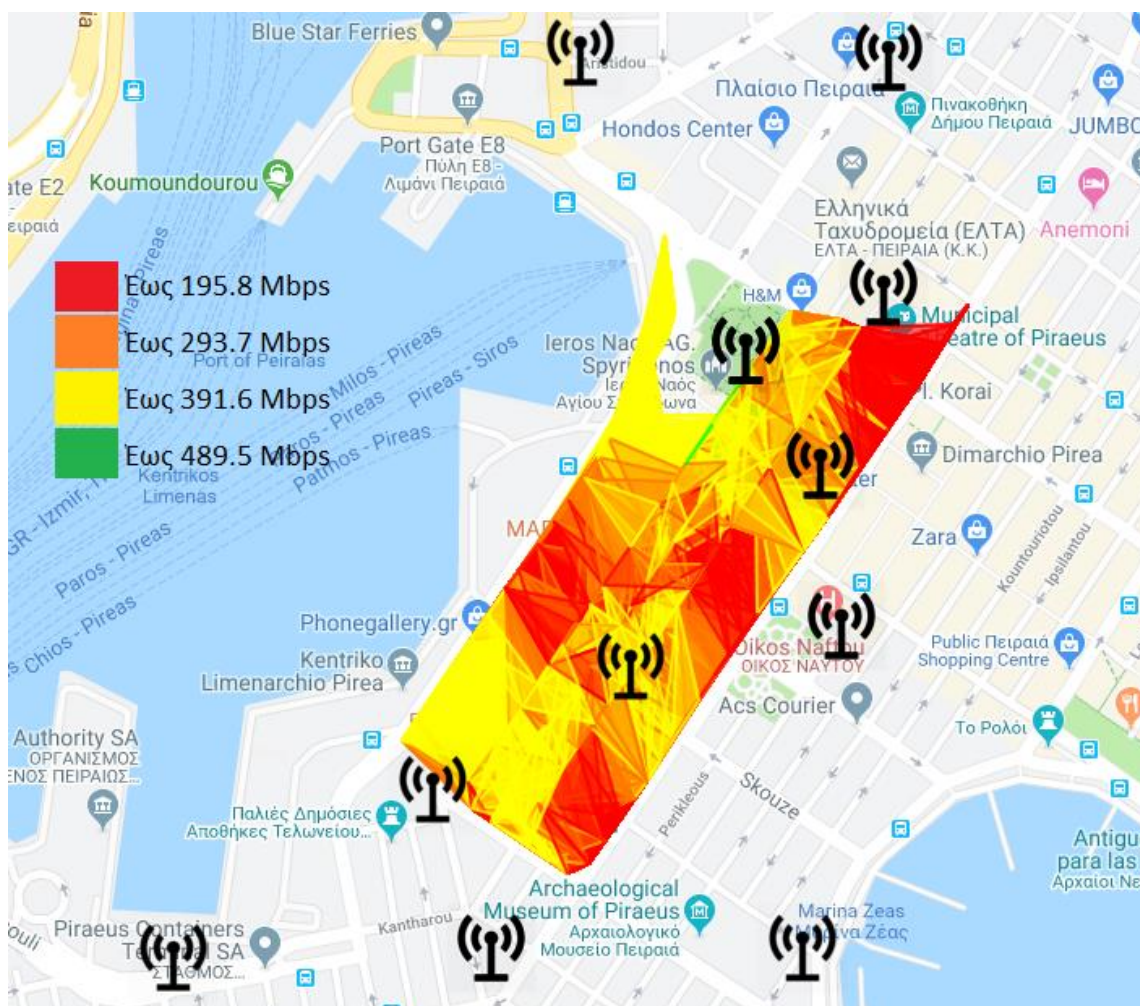
Πίνακας 16 Μέσος όρος RSRP,RSRQ,SNR από κεραίες Παρόχου A στις οποίες δεν έχει εγγραφεί το τερματικό μας

Band/EARFCN	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	SNR (dB)
3/1700	-84.169	-7.84702	8.212299
7/3050	-92.36	-8.611	8.55854
20/6400	-84.143	-9.8571	10.625

Από τα αποτελέσματα που έχουν προηγηθεί και γνωρίζοντας ότι ο πάροχος αυτός χρησιμοποιεί μέγιστη διαμόρφωση QAM-256, MIMO 2x2 και έχοντας bandwidth 20MHz, 20MHz, 10MHz στις ζώνες συχνοτήτων 3,7 και 20 αντίστοιχα έχουμε τα ακόλουθα:

- Στο 1.8% της κάλυψης έχουμε Downlink throughput έως 97.9 Mbps μέσω της ζώνης 20.
- Στο 43.2% της κάλυψης έχουμε Downlink throughput έως 195.8 Mbps μέσω είτε της ζώνης 3 είτε της ζώνης 7.
- Στο 5.1% της κάλυψης έχουμε μέσω Carrier Aggregation στις ζώνες 3 και 20, downlink throughput έως 293.7 Mbps
- Στο 46% της κάλυψης έχουμε μέσω Carrier Aggregation στις ζώνες 3 και 7, downlink throughput έως 391.6 Mbps
- Τέλος στο 4% της κάλυψης έχουμε μέσω Carrier Aggregation στις ζώνες 3, 7 και 20, downlink throughput έως 489.5 Mbps

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



Εικόνα 30 Χάρτης απεικόνισης του υπολογισμένου throughput του παρόχου Α' με απεικόνιση των κεραίων λήψης [61]

Στον παραπάνω χάρτη, γίνεται σχηματισμός τριγώνων τα οποία έχουν κορυφές markers σημάτων και δημιουργούν μία εικόνα κάλυψης ανάλογα με το throughput που είναι διαθέσιμο στην περιοχή. Τα χρώματα έχουν δοθεί ανάλογα με τον μέσο όρο, για παράδειγμα στην περίπτωση όπου έχουμε στο τρίγωνο 2 σήματα 1 ζώνης και ένα 2CC θα του δοθεί κόκκινο χρώμα. Στην περίπτωση όπου έχουμε 1 σήμα 3CC και 2 2CC θα του δοθεί πράσινο. Αναλυτικά :

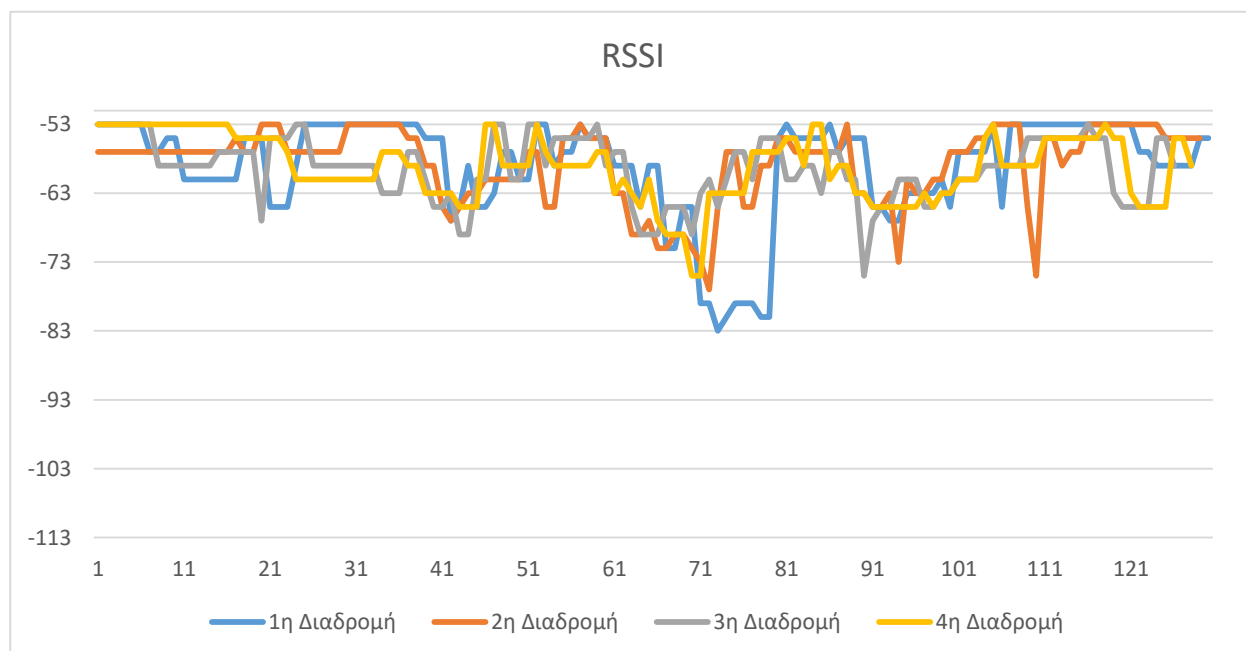
Πίνακας 17 Αντιστοίχιση χρώματος – μέγιστου throughput για την δημιουργία χάρτη

Χρώμα	Throughput
Κόκκινο	Έως 195.8 Mbps
Πορτοκαλί	Έως 293.7 Mbps
Κίτρινο	Έως 391.6 Mbps
Πράσινο	Έως 489.5 Mbps

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

Όπως μπορούμε να διακρίνουμε στον τελευταίο χάρτη αρκετές εκ των κεραιών στις οποίες εγγραφόμεστε βρίσκονται εντός της περιμέτρου του ορθογωνίου που δημιουργείται από την διαδρομή. Αυτό συμβάλει ώστε να έχουμε τις πολύ καλές τιμές σε ισχύ και ποιότητα σήματος και φυσικά την δυνατότητα για αξιόλογο 2CC και 3CC.

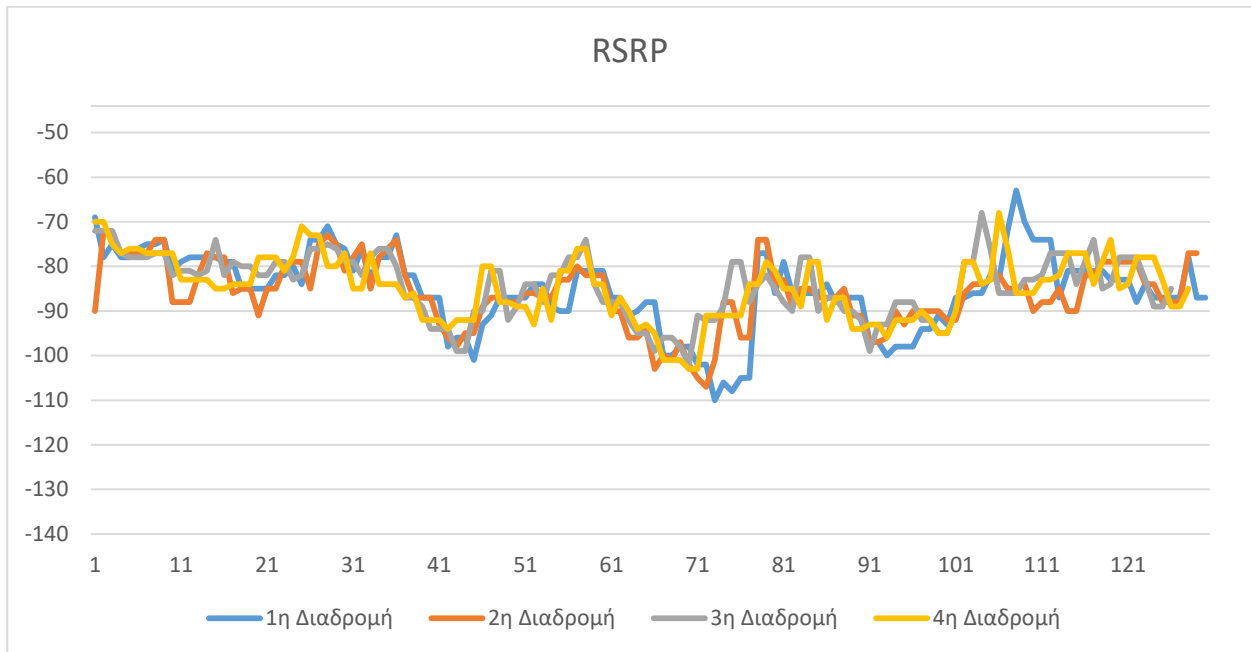
5.3.2 Μετρήσεις Παρόχου Β'



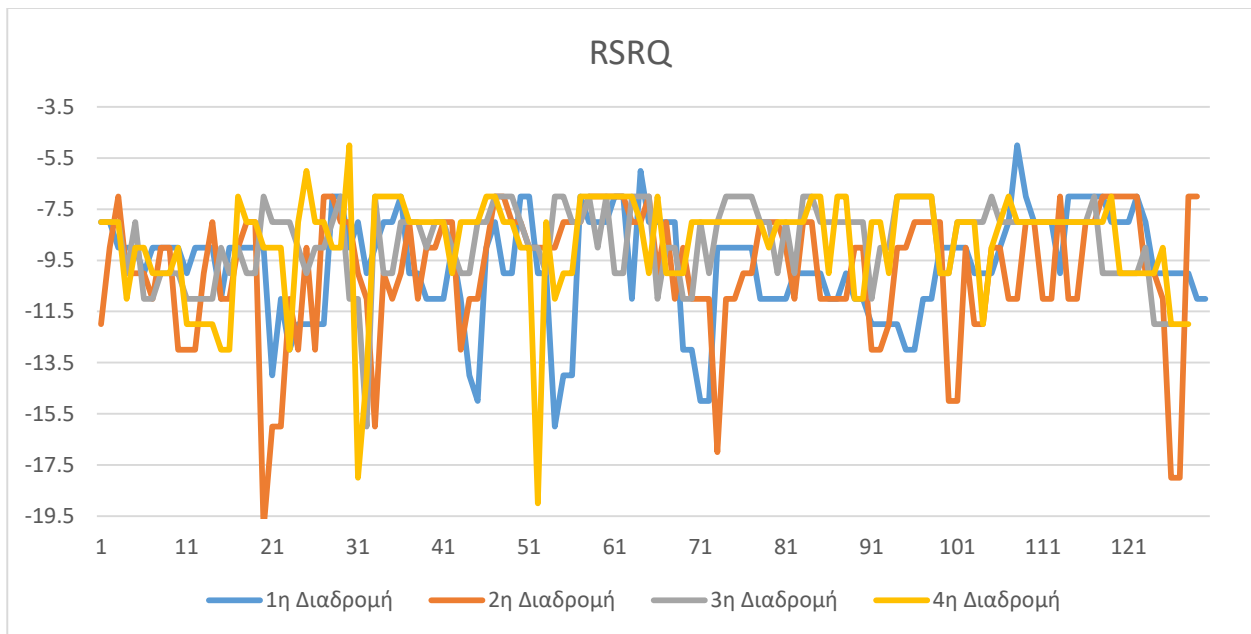
Γράφημα 8 Γράφημα RSSI αστικής περιοχής Β' Παρόχου κινητής τηλεφωνίας

Οι μετρήσεις μας του παρόχου Β' έδειξαν τις μεγαλύτερες τιμές RSSI σε σύγκριση με τους άλλους 2 καθώς το 94% των τιμών βρίσκονται πάνω από τα -70 dBm.

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

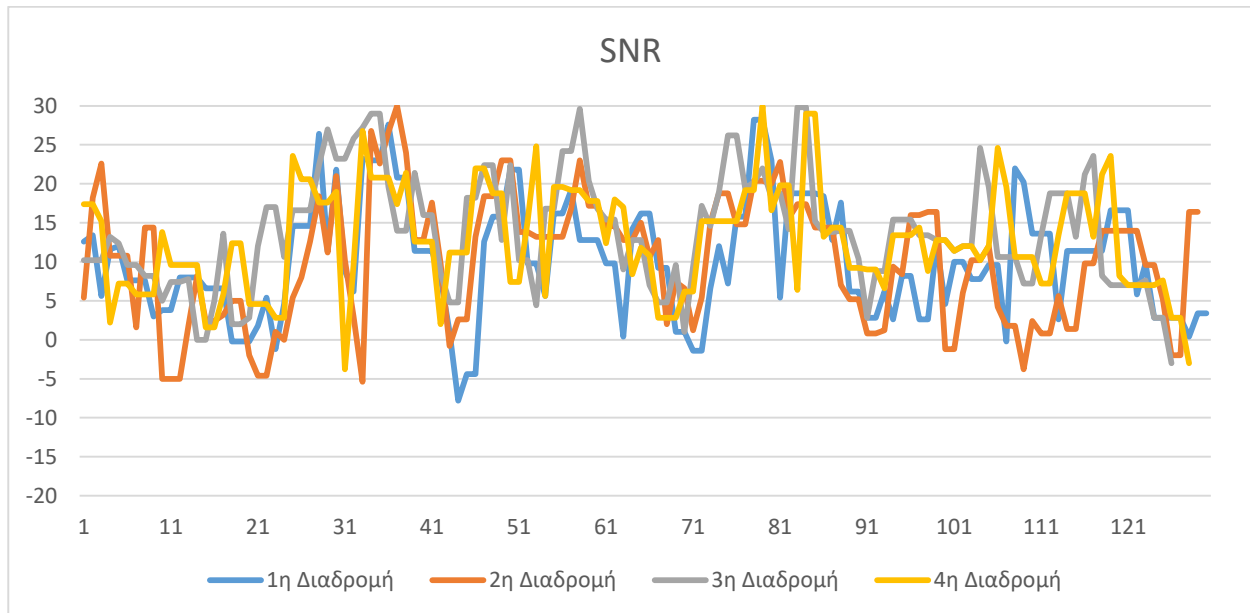


Γράφημα 9 Γράφημα RSRP αστικής περιοχής Β' Παρόχου κινητής τηλεφωνίας



Γράφημα 10 Γράφημα RSSQ αστικής περιοχής Β' Παρόχου κινητής τηλεφωνίας

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



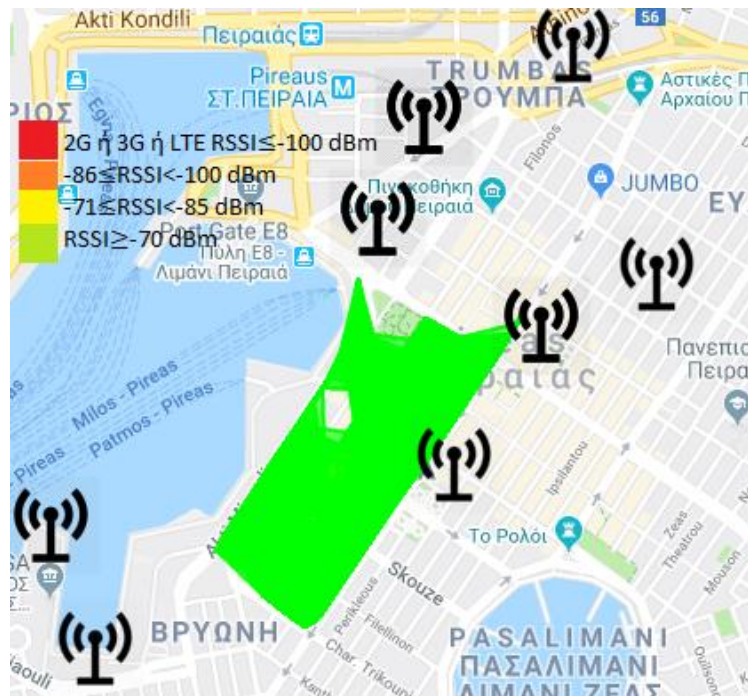
Γράφημα 11 Γράφημα SNR αστικής περιοχής Β' Παρόχου κινητής τηλεφωνίας

Στα παραπάνω 3 σχεδιαγράμματα έχουμε τις συγκρίσεις RSRP,RSRQ και SNR μεταξύ των 4 διαδρομών για τον Β' Πάροχο κινητής. Στα διαγράμματα για το RSRP και SNR παρατηρούμε μια ομοιομορφία η οποία είναι απόλυτα εμφανής στην ισχύ του σήματος. Όσον αναφορά το RSRQ υπάρχει μία ομοιομορφία με το γράφημα του Α' Παρόχου.

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

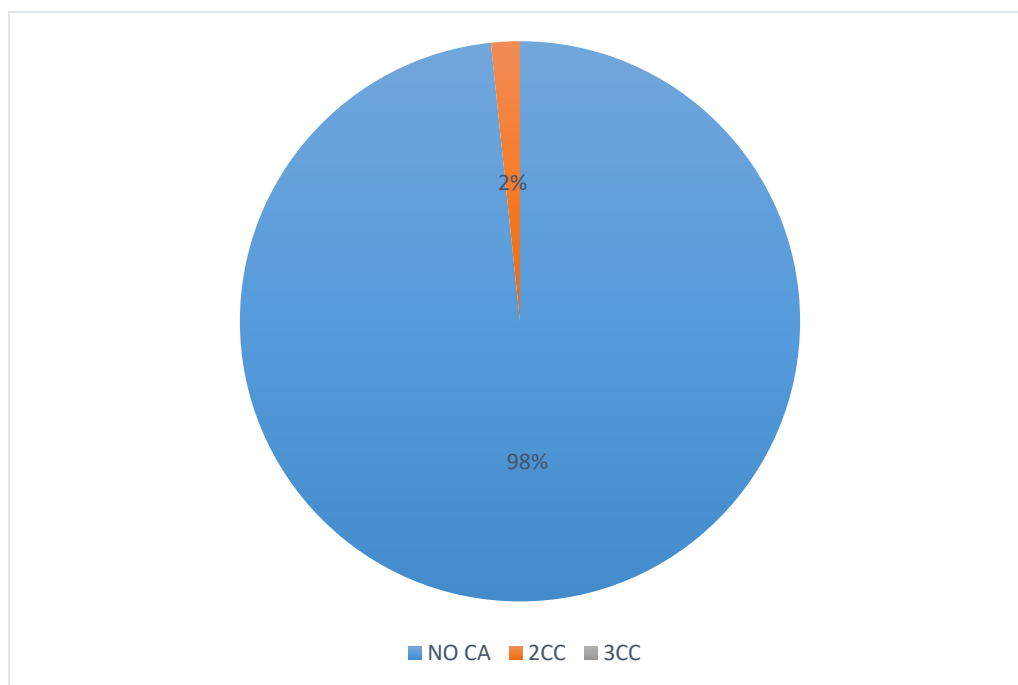


Εικόνα 31 Χάρτης κάλυψης δημιουργημένος σύμφωνα με τις τιμές RSRP του παρόχου Β' με απεικόνιση των κεραιών λήψης [61]



Εικόνα 32 Χάρτης κάλυψης δημιουργημένος σύμφωνα με τις τιμές RSSI του παρόχου Β' με απεικόνιση των κεραιών λήψης [61]

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



Γράφημα 12 Διάγραμμα μέσου όρου κάλυψης διαθέσιμων ζωνών συχνοτήτων B' παρόχου

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι στο 98% της διαδρομής μας ο πάροχος B' είχε κάλυψη μόνο από μία ζώνη το οποίο περιορίζει αρκετά την δυνατότητα να υπάρχει μεγάλη ταχύτητα download. Οι συνδυασμοί συχνοτήτων για να επιτευχθεί το 2CC ήταν μεταξύ των Band 3 + Band 20 όπου όπως στον A' πάροχο η ζώνη 20 έχει διαθέσιμο bandwidth 10 MHz. Όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε το throughput θα είναι αρκετά χαμηλότερο σε σχέση με την περίπτωση του παρόχου A'.

Σε κάθε μία από τις 4 διαδρομές που διεξήγαμε κατά 98% η συσκευή ήταν εγγεγραμμένη σε κεραιά με την ζώνη 3 ενώ από 1% ήταν στις ζώνες συχνοτήτων 7 και 20.

Πίνακας 18 Μέσος όρος RSRP,RSRQ,SNR από κεραιές Παρόχου B στις οποίες δεν έχει εγγραφεί το τερματικό μας

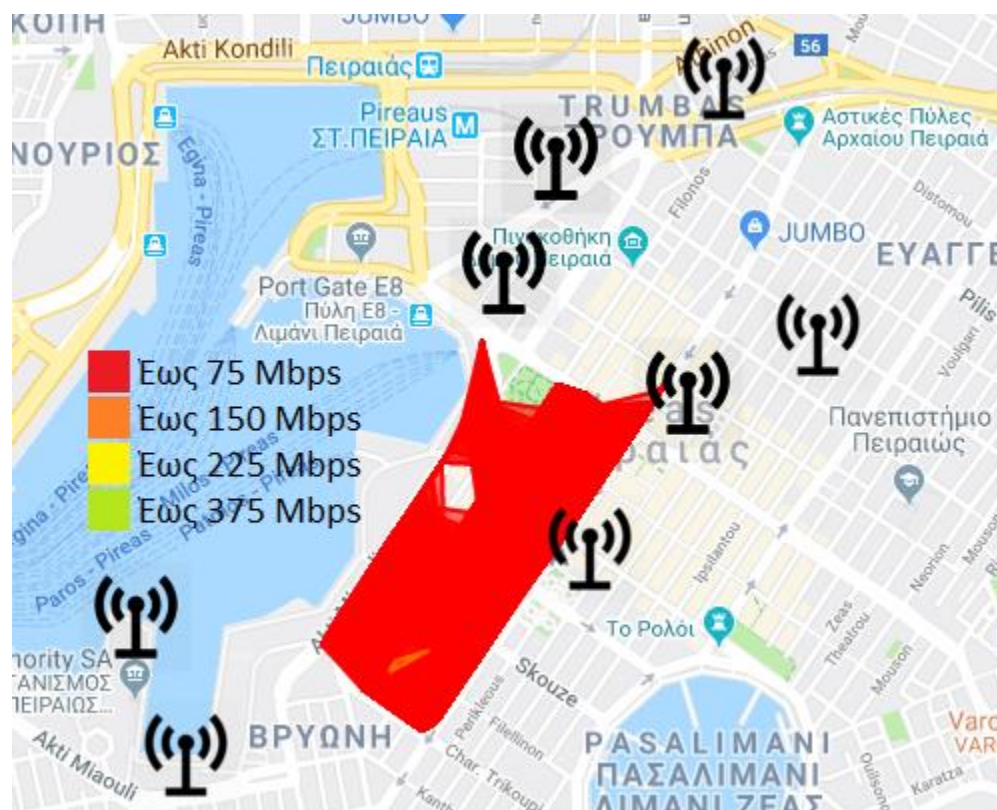
Band/EARFCN	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)
3/1451	-88	-11.5
20/6300	-107	-7

Από τα αποτελέσματα που αναλύσαμε προηγουμένως και γνωρίζοντας ότι ο πάροχος αυτός χρησιμοποιεί μέγιστη διαμόρφωση QAM-64 και MIMO 2x2 και έχοντας bandwidth 20MHz, 20MHz, 10MHz στις ζώνες συχνοτήτων 3,7 και 20 αντίστοιχα έχουμε τα ακόλουθα:

- Στο 96% της κάλυψης έχουμε Downlink throughput έως 150 Mbps μέσω της ζώνης 3.
- Στο 1% της κάλυψης έχουμε Downlink throughput έως 150 Mbps μέσω της ζώνης 7.

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

- Στο 1% της κάλυψης έχουμε Downlink throughput έως 75 Mbps μέσω της ζώνης 20.
- Στο 2% της κάλυψης έχουμε μέσω Carrier Aggregation στις ζώνες συχνοτήτων 3 και 20, downlink throughput έως 225 Mbps

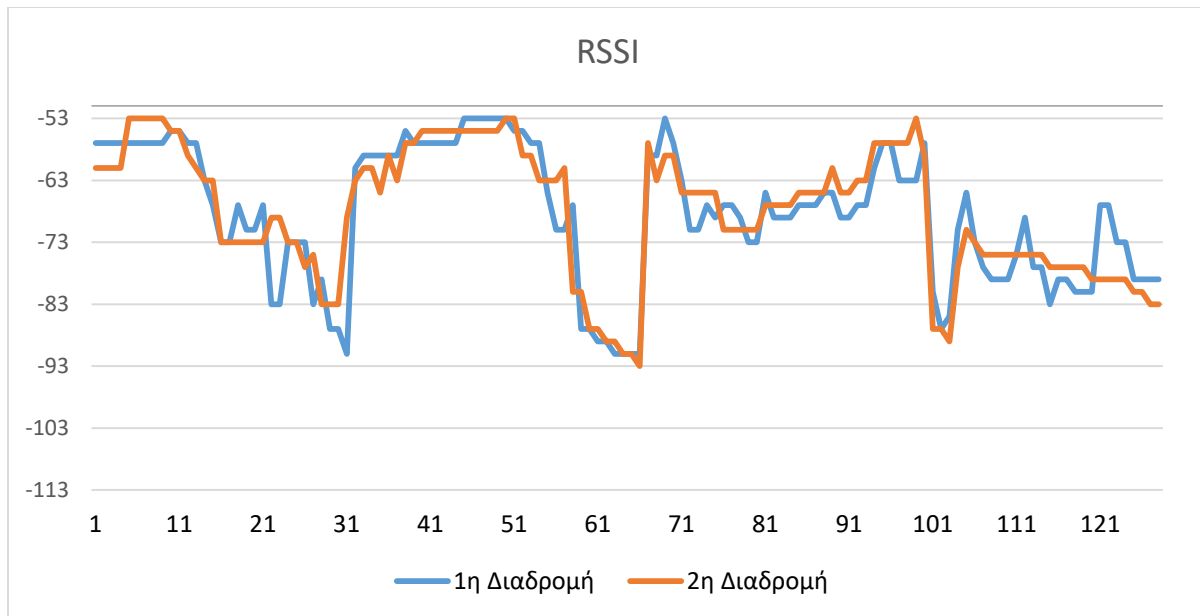


Εικόνα 33 Χάρτης απεικόνισης του υπολογισμένου throughput του παρόχου Β΄ με απεικόνιση των κεραιών λήψης [61]

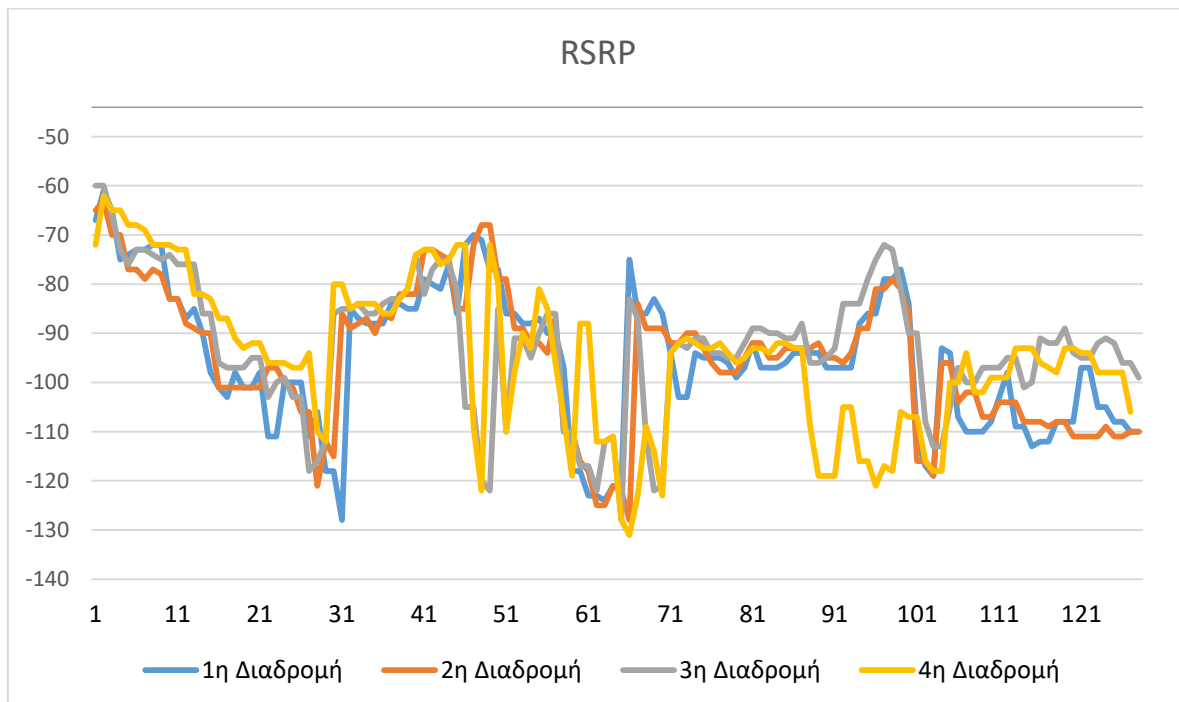
Πίνακας 19 Αντιστοίχιση χρώματος – μέγιστου throughput για την δημιουργία χάρτη

Χρώμα	Throughput
Κόκκινο	Έως 75 Mbps
Πορτοκαλί	Έως 150 Mbps
Κίτρινο	Έως 225 Mbps
Πράσινο	Έως 375 Mbps

5.3.3 Μετρήσεις Παρόχου Γ'

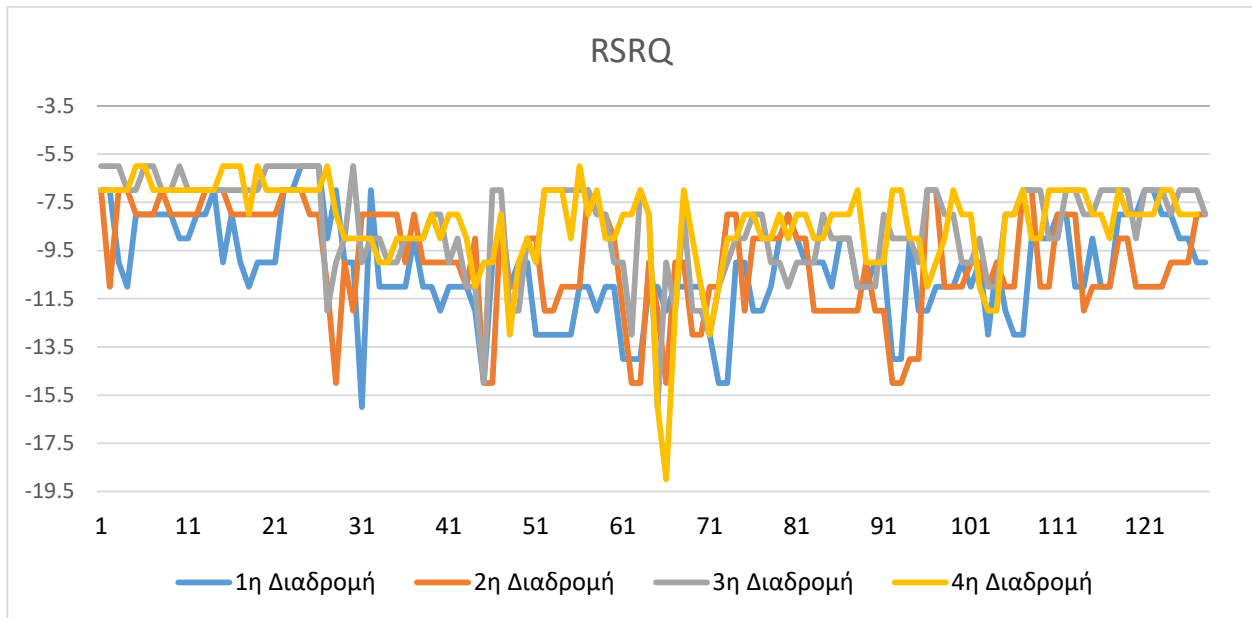


Γράφημα 13 Γράφημα RSSI αστικής περιοχής Γ' Παρόχου κινητής τηλεφωνίας

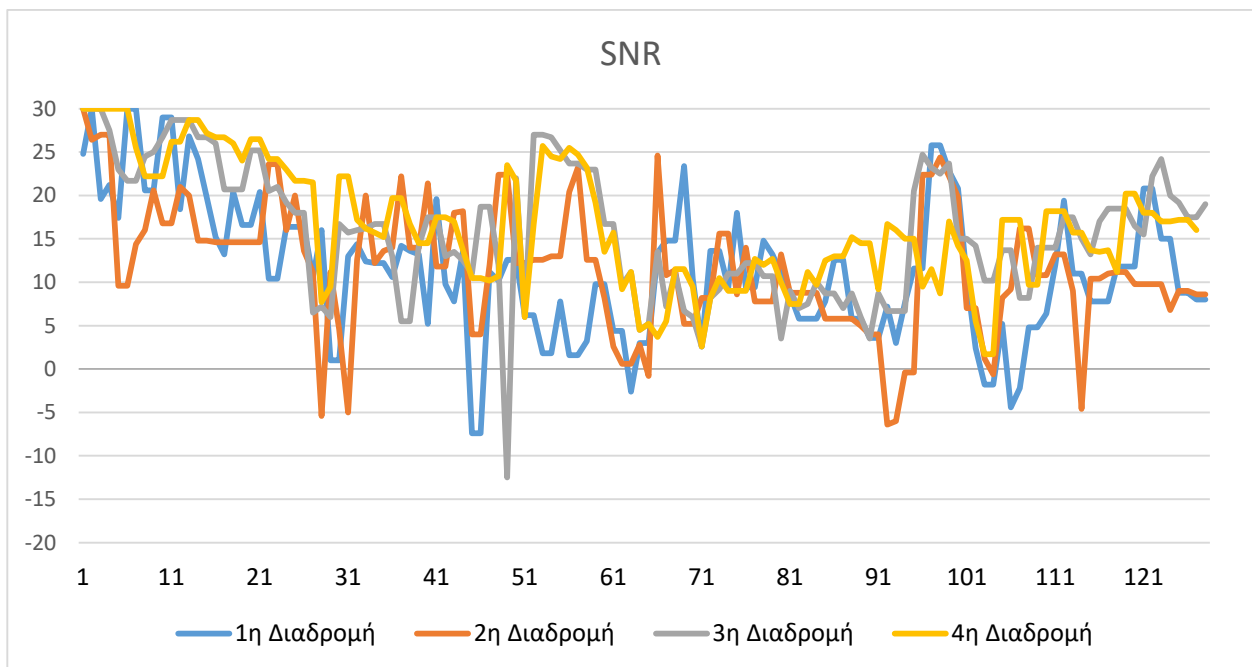


Γράφημα 14 Γράφημα RSRP αστικής περιοχής Γ' Παρόχου κινητής τηλεφωνίας

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



Γράφημα 15 Γράφημα RSRQ αστικής περιοχής Γ' παρόχου κινητής τηλεφωνίας

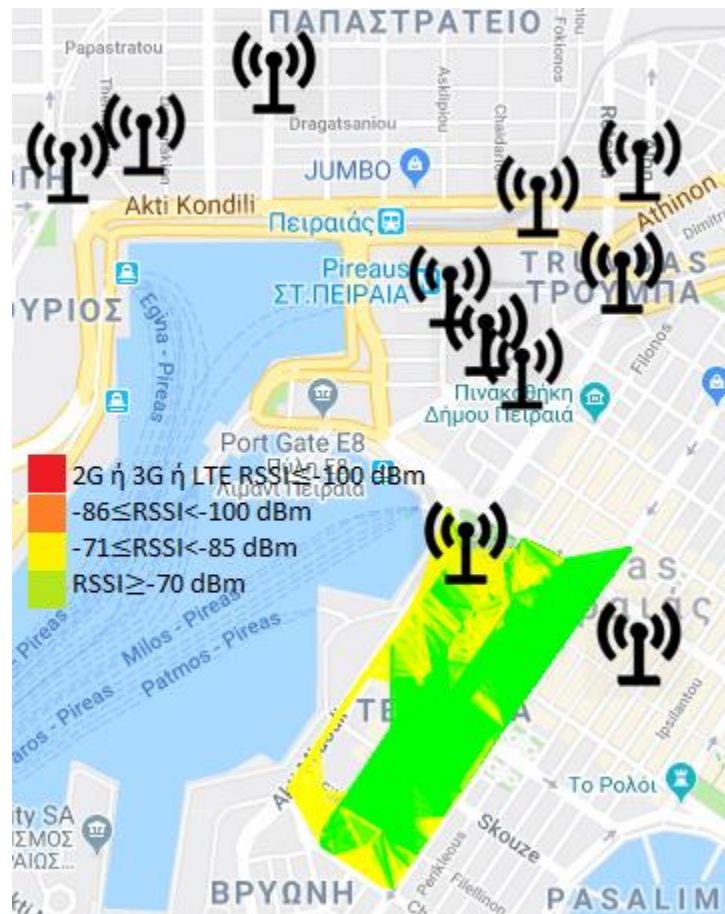


Γράφημα 16 Γράφημα SNR αστικής περιοχής Γ' παρόχου κινητής τηλεφωνίας

Από τα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι οι μετρήσεις του RSSI και του RSRP έχουν όμοια αποτελέσματα, το οποίο σημαίνει ότι ανεξάρτητα από την ημέρα, το σήμα τουλάχιστον έχει μια σταθερότητα. Βέβαια όπως είδαμε και στους πίνακες παραπάνω ο Γ' Πάροχος σε σύγκριση με τους άλλους 2 είχε κατά μέσο όρο 10 φορές μικρότερη ισχύ σήματος (≈ 10 dBm) ενώ η διαφορά στο RSSI ήταν

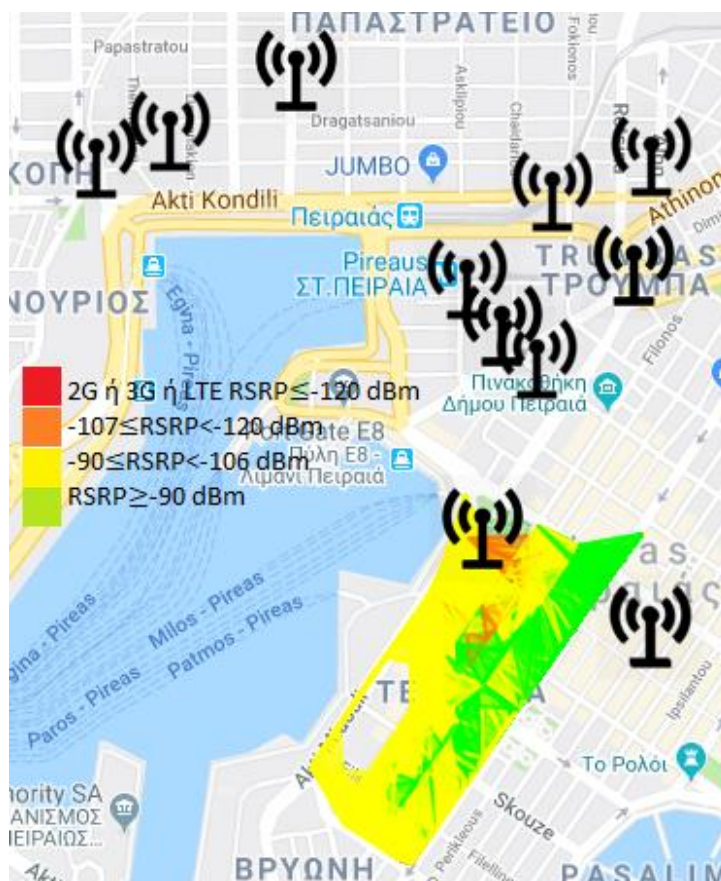
Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

και αυτή περίπου 8 φορές μικρότερη. Παρόλα αυτά το RSRQ βρίσκεται σε ίδια επίπεδα με τις άλλες δύο ενώ το SNR είναι σχεδόν 1.5 καλύτερο ($\approx 2\text{dB}$).



Εικόνα 34 Χάρτης κάλυψης δημιουργημένος σύμφωνα με τις τιμές RSSI του παρόχου Γ' με απεικόνιση των κεραιών λήψης [61]

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



Εικόνα 35 Χάρτης κάλυψης δημιουργημένος σύμφωνα με τις τιμές RSRP του παρόχου Γ' με απεικόνιση των κεραιών λήψης [61]

Πίνακας 20 Αντιστοίχιση χρώματος – τιμές RSRP για την δημιουργία χάρτη

Ασθενές σήμα LTE - 3G σήμα - 2G σήμα ($RSRP \leq -120\text{ dBm}$)	Κόκκινο
Μέτριο σήμα LTE ($-107 \leq RSRP < -120\text{ dBm}$)	Πορτοκαλί
Καλό σήμα LTE ($-90 \leq RSRP < -106\text{ dBm}$)	Κίτρινο
Εξαιρετικό σήμα LTE ($RSRP \geq -90\text{ dBm}$)	Πράσινο

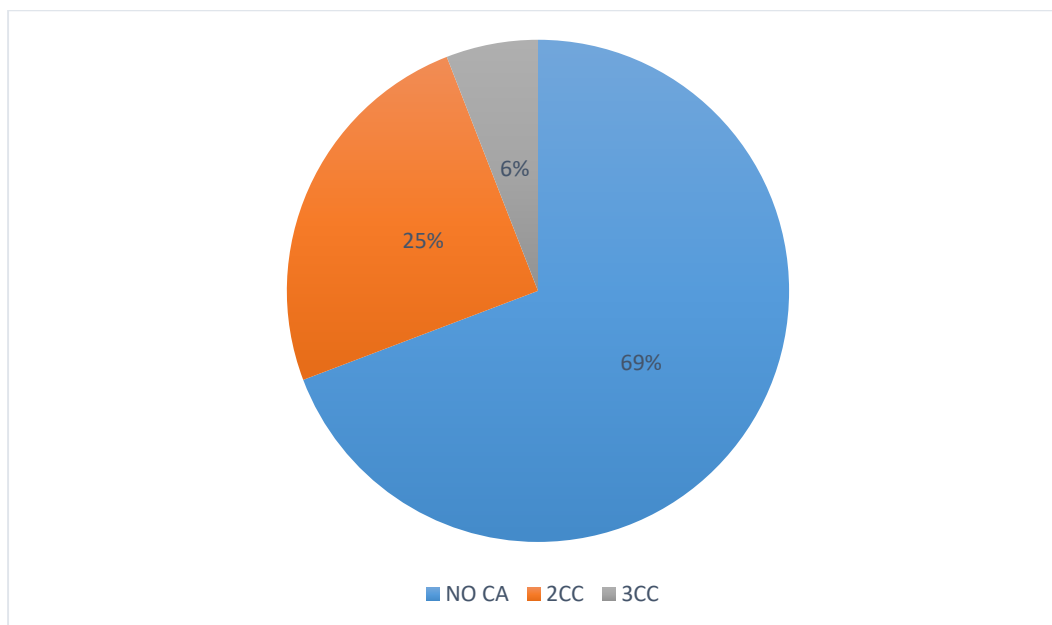
Πίνακας 21 Αντιστοίχιση χρώματος – τιμές RSSI για την δημιουργία χάρτη

Ασθενές σήμα LTE - 3G σήμα - 2G σήμα ($RSSI \leq -100\text{ dBm}$)	Κόκκινο
Μέτριο σήμα LTE ($-86 \leq RSSI < -100\text{ dBm}$)	Πορτοκαλί
Καλό σήμα LTE ($-71 \leq RSSI < -85\text{ dBm}$)	Κίτρινο
Εξαιρετικό σήμα LTE ($RSSI \geq -70\text{ dBm}$)	Πράσινο

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

Ακόμη μελετήθηκαν οι ζώνες συχνότητων στις οποίες ήταν εγγεγραμμένη η συσκευή καθώς και αυτές που ανιχνεύονταν στις υπόλοιπες κεραιές από τις οποίες λαμβάναμε σήμα μαζί με το RSRP, RSRQ και SNR τους. Με τον τρόπο αυτό ανιχνεύτηκε άμα θα είχαμε Carrier Aggregation και σε τι ποσοστό της διαδρομής ώστε να επιτευχθούν ακόμα υψηλότερες ταχύτητες.

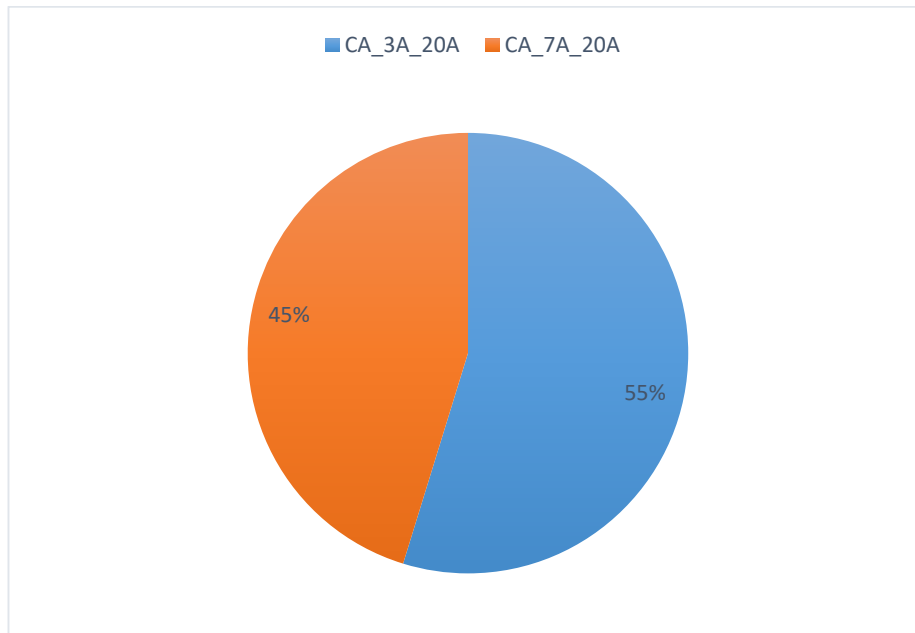
Στον τρίτο και τελευταίο πάροχο έχουμε 69% κάλυψη μόνο από μία συχνότητα, 25% κάλυψη από 2 και 3CC έχουμε στο 6% της συνολικής διαδρομής.



Γράφημα 17 Διάγραμμα ποσοστού μέσου όρου κάλυψης με Carrier Aggregation Γ' παρόχου

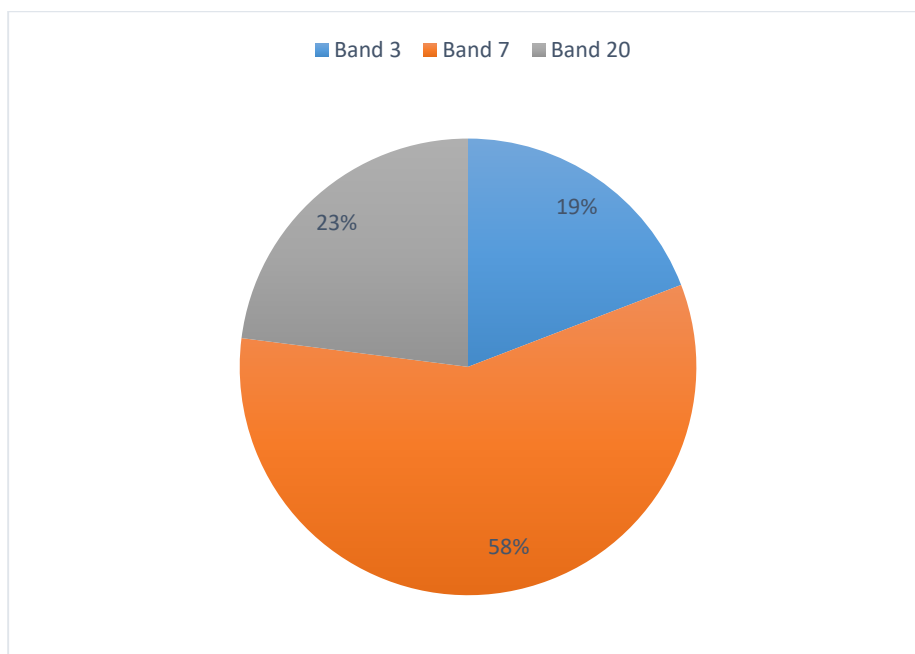
Όταν έχουμε 2CC οι 2 διαθέσιμες συχνότητες είναι κατά 55% οι ζώνες συχνότητων 3 και 20 και κατά 45% οι ζώνες 7 και 20. Όπως έχουμε προαναφέρει ο συνδυασμός με την ζώνη 20 δεν έχει τόσο καλό αποτέλεσμα στην συνολική ταχύτητα κατερχόμενη ζεύξης αν και είναι καλύτερη λύση για να επιτευχθεί από μία κεραιά μεγαλύτερη ισχύς σήματος σε μεγαλύτερη απόσταση λόγω της χαμηλότερης συχνότητας λειτουργίας.

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



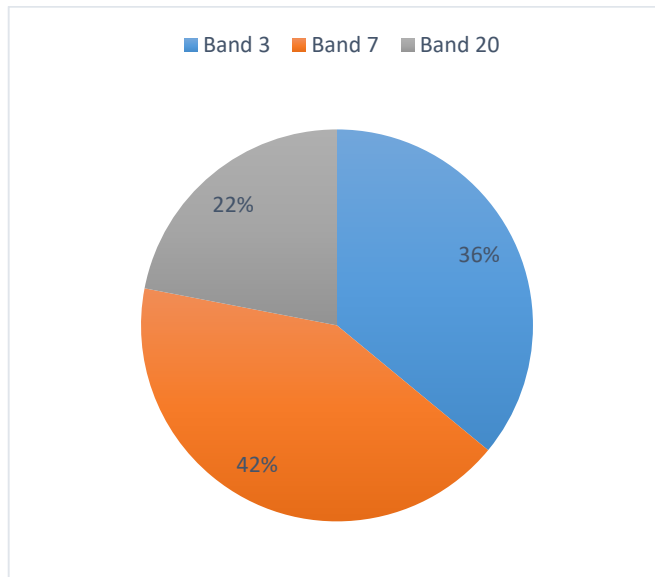
Γράφημα 18 Διάγραμμα ποσοστού χρήσης των 2 τύπων 2CC του Γ' παρόχου

Όσον αναφορά τις ζώνες στις οποίες εγγραφόταν η κινητή συσκευή μας, κατά 19% ήταν η ζώνη 3, κατά 58% η ζώνη 7 και κατά 23% η ζώνη 20. Βέβαια τα παρακάτω αποτελέσματα αποτελούν μέσο όρο. Οι 2 πρώτες διαδρομές και οι 2 τελευταίες είχαν μεγάλη διαφοροποίηση μεταξύ τους το οποίο αποτυπώνεται καλύτερα στα γραφήματα 20 και 21.

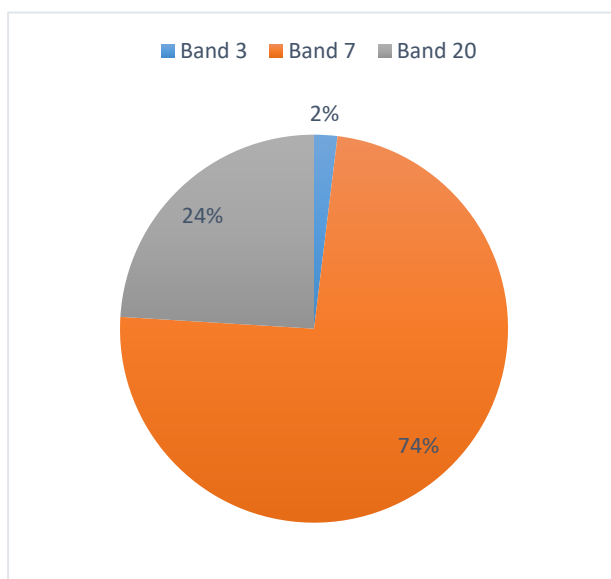


Γράφημα 19 Διάγραμμα μέσου όρου κάλυψης διαθέσιμων ζωνών συχνοτήτων Γ' παρόχου

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



Γράφημα 20 Διάγραμμα μέσου όρου κάλυψης διαθέσιμων ζωνών συχνοτήτων 1ης κ' 2ης διαδρομής Γ' παρόχου



Γράφημα 21 Διάγραμμα μέσου όρου κάλυψης διαθέσιμων ζωνών συχνοτήτων 3ης κ' 4ης διαδρομής Γ' παρόχου

Φυσικά κύριο ρόλο για την καλύτερη ταχύτητα download έχουν όπως προαναφέραμε και το RSRP και RSRQ τα οποία όπως βλέπουμε και στον παρακάτω πίνακα είναι πάρα πολύ καλά στην ζώνη 20 ενώ στις άλλες 2 είναι μέτρια.

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

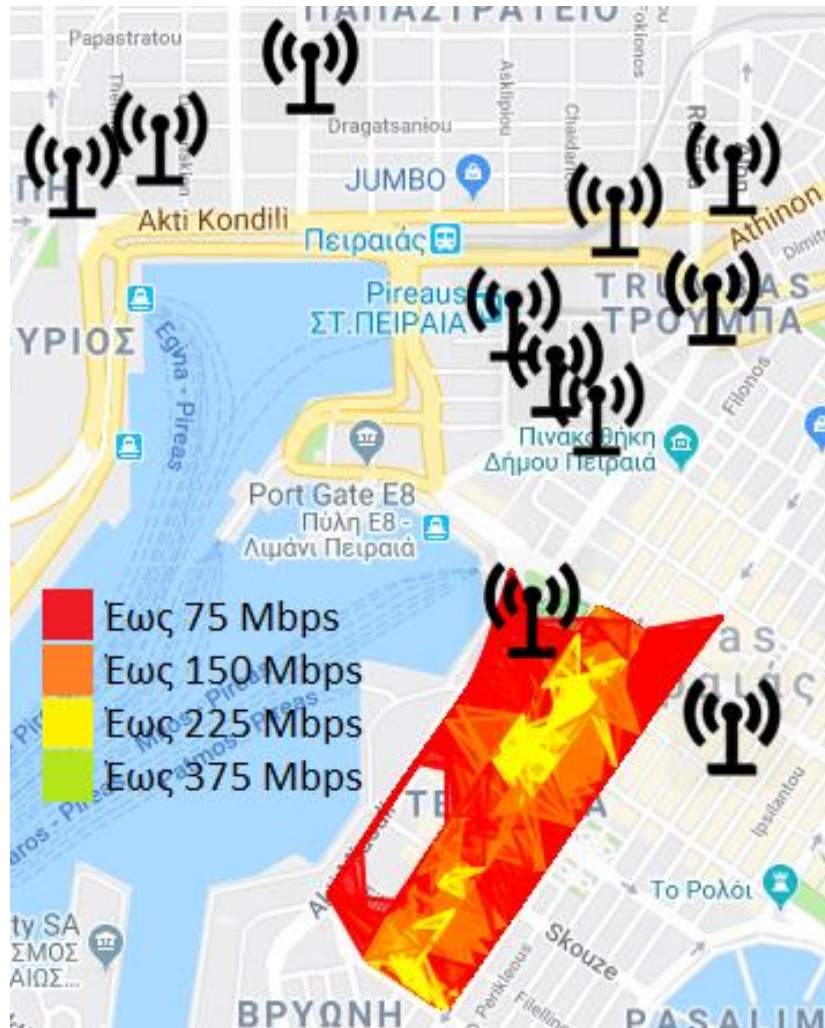
Πίνακας 22 Μέσος όρος RSRP,RSRQ,SNR από κεραίες Παρόχου Γ' στις οποίες δεν έχει εγγραφεί το τερματικό μας

Band/EARFCN	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)
3/1301	-108	-12
7/3350	-113.1	-9.681
20/6200	-85.42	-9.339

Από τα αποτελέσματα που αναλύσαμε προηγουμένως και γνωρίζοντας ότι ο πάροχος αυτός χρησιμοποιεί μέγιστη διαμόρφωση QAM-64 και MIMO 2x2 και έχοντας bandwidth 15MHz, 20MHz, 10MHz στις ζώνες συχνοτήτων 3,7 και 20 αντίστοιχα έχουμε τα ακόλουθα:

- Στο 15,87% της κάλυψης έχουμε Downlink throughput έως 75 Mbps μέσω της ζώνης 20.
- Στο 13.11% της κάλυψης έχουμε Downlink throughput έως 112.5 Mbps μέσω της ζώνης 3.
- Στο 40.02% της κάλυψης έχουμε Downlink throughput έως 150 Mbps μέσω της ζώνης 7.
- Στο 11.25% της κάλυψης έχουμε μέσω Carrier Aggregation στις ζώνες συχνοτήτων 7 και 20, downlink throughput έως 225 Mbps
- Στο 13.75% της κάλυψης έχουμε μέσω Carrier Aggregation στις ζώνες 3 και 20, downlink throughput έως 187.5 Mbps
- Τέλος στο 6% της κάλυψης έχουμε μέσω Carrier Aggregation στις ζώνες συχνοτήτων 3, 7 και 20, downlink throughput έως 337.5 Mbps

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



Εικόνα 36 Χάρτης απεικόνισης του υπολογισμένου *throughput* του παρόχου Γ' με απεικόνιση των κεραιών λήψης [61]

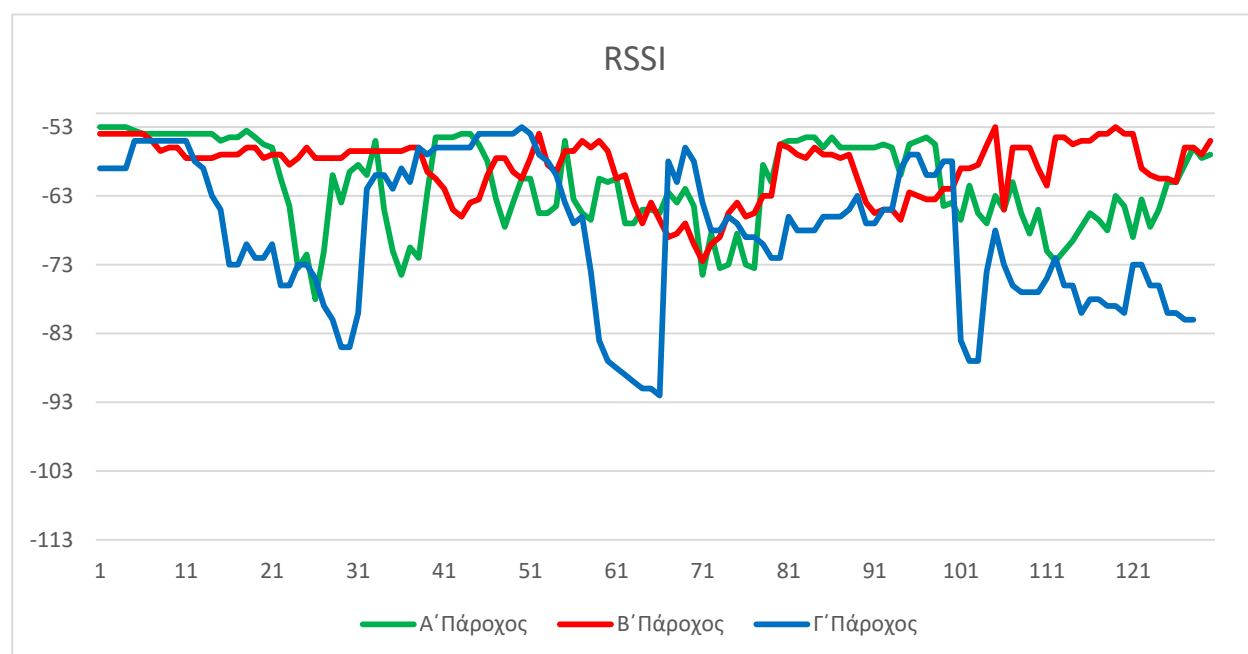
Όμοια με τα προηγούμενα παραδείγματα και εδώ ο χρωματισμός έχει γίνει σύμφωνα με τον πίνακα 20. Στην περίπτωση τρίτου παρόχου στην αστική περιοχή παρατηρούμε πως αρκετές κεραιές, στις οποίες εγγραφόταν η κινητή συσκευή, βρίσκονταν σε μεγάλη απόσταση από την περιοχή που διεξάχθηκε η καταγραφή των τιμών.

5.3.4 Συμπεράσματα κάλυψης LTE σε αστική περιοχή

Πίνακας 23 Συνολικοί μέσοι όροι ανά πάροχο στην αστική περιοχή

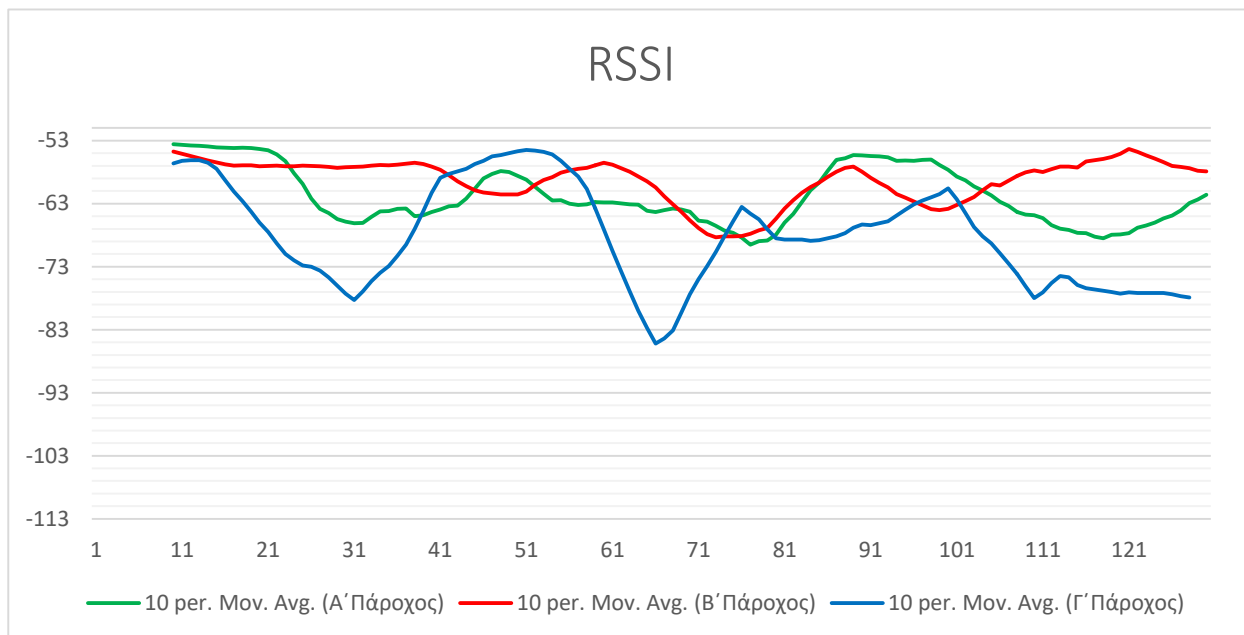
Πάροχος	RSSI (dBm)	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	SNR (dB)
Πάροχος Α'	-61.7381	-84.3353	-8.69907	11.75106
Πάροχος Β'	-59.059	-85.1199	-9.29744	11.68885
Πάροχος Γ'	-68.2109	-94.3971	-9.26693	13.86126

Στα διαγράμματα που ακολουθούν απεικονίζονται συνοπτικά οι μέσοι όροι των μετρήσεων κάθε παρόχου στο ίδιο διάγραμμα.



Γράφημα 22 Συνοπτικοί μέσοι όροι RSSI και από τις 4 διαδρομές της αστικής περιοχής για κάθε πάροχο

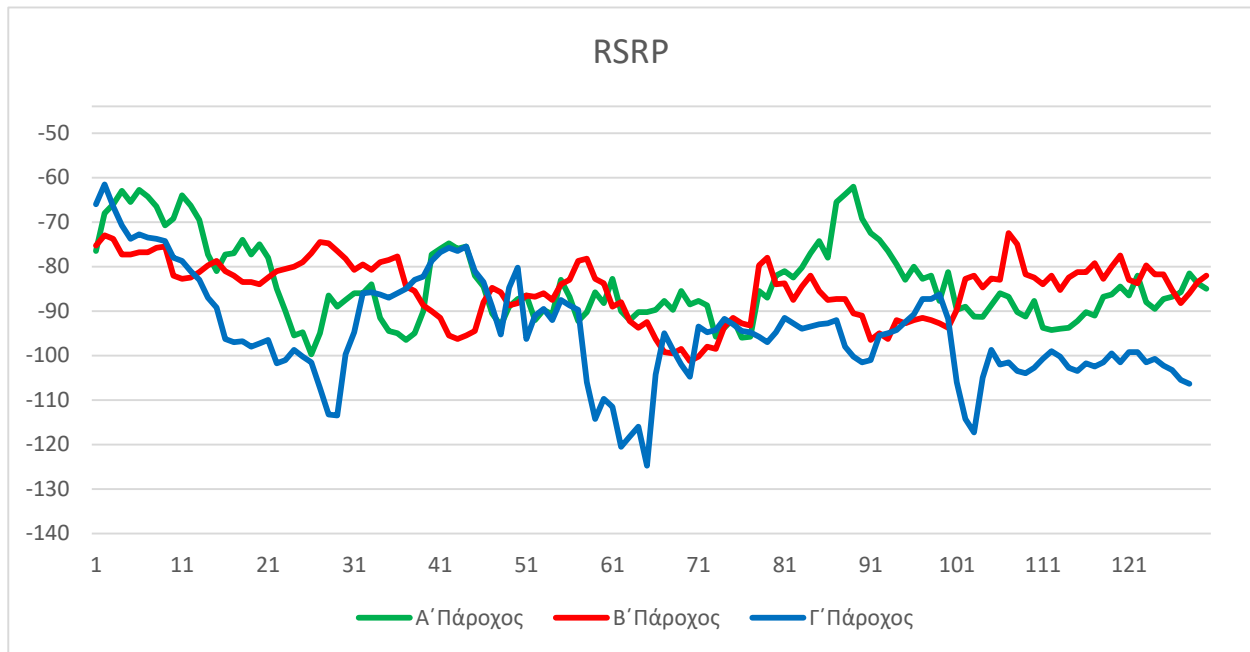
Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



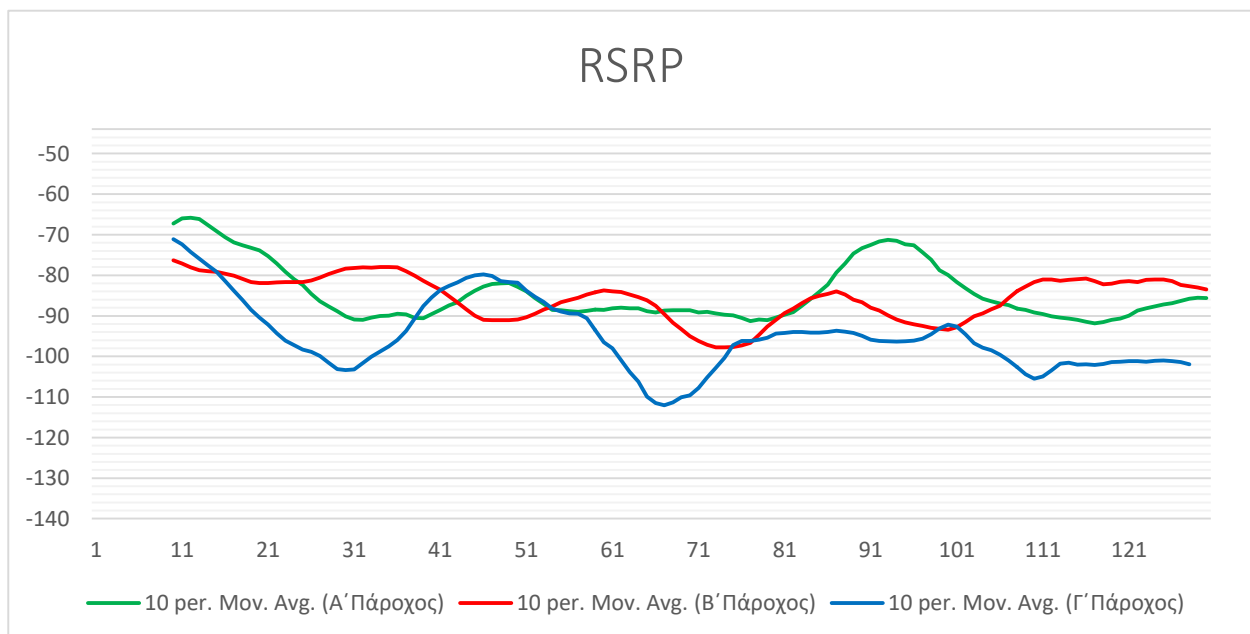
Γράφημα 23 Συνοπτικοί μέσοι όροι RSSI με χρήση κινητού μέσου όρου περιόδου 10 και από τις 4 διαδρομές της αστικής περιοχής για κάθε πάροχο

Στα διαγράμματα RSSI παρατηρούμε ότι οι πάροχοι Α και Β έχουν μικρότερες διακυμάνσεις τιμών κατά μέσο όρο με την 2^η να είναι πιο σταθερή σε συνολική εικόνα και να έχει την καλύτερη απόδοση και μέγιστη τιμή RSSI. Τέλος ο Γ' Πάροχος, όπως παρατηρούμε έχει έντονες πτώσεις και διακυμάνσεις στο signal strength κάτι το οποίο θα επηρεάζει την συνολική απόδοση ενός κινητού τερματικού.

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



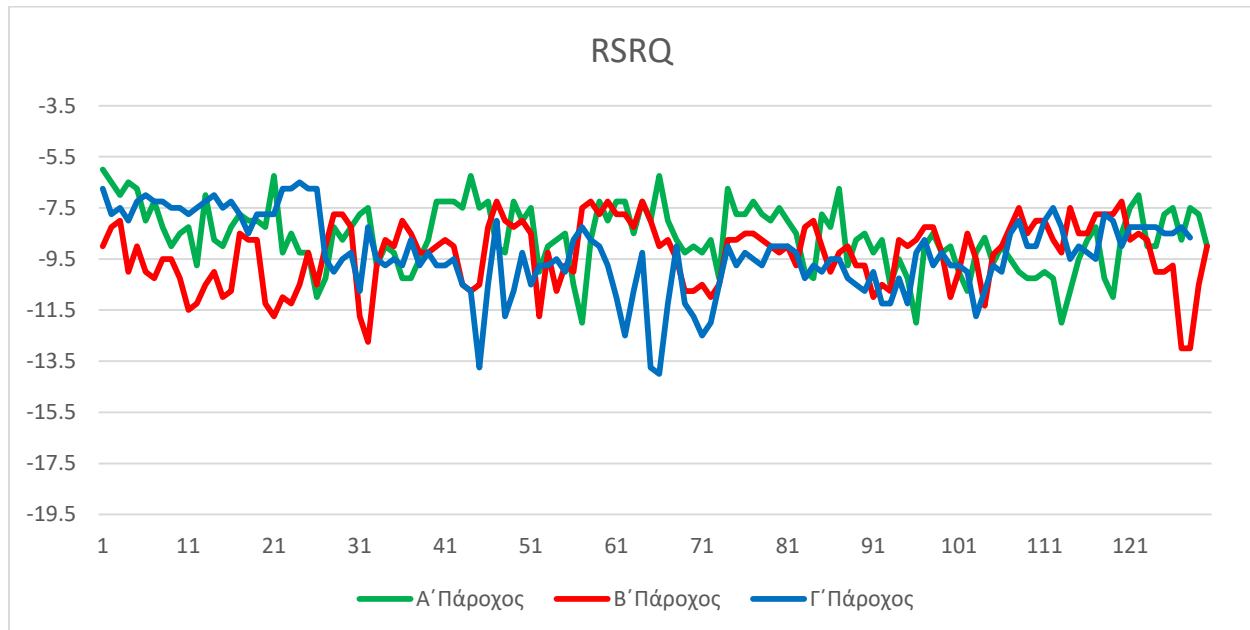
Γράφημα 24 Συνοπτικοί μέσοι όροι RSRP και από τις 4 διαδρομές της αστικής περιοχής για κάθε πάροχο



Γράφημα 25 Συνοπτικοί μέσοι όροι RSRP με χρήση κινητού μέσου όρου περιόδου 10 και από τις 4 διαδρομές της αστικής περιοχής για κάθε πάροχο

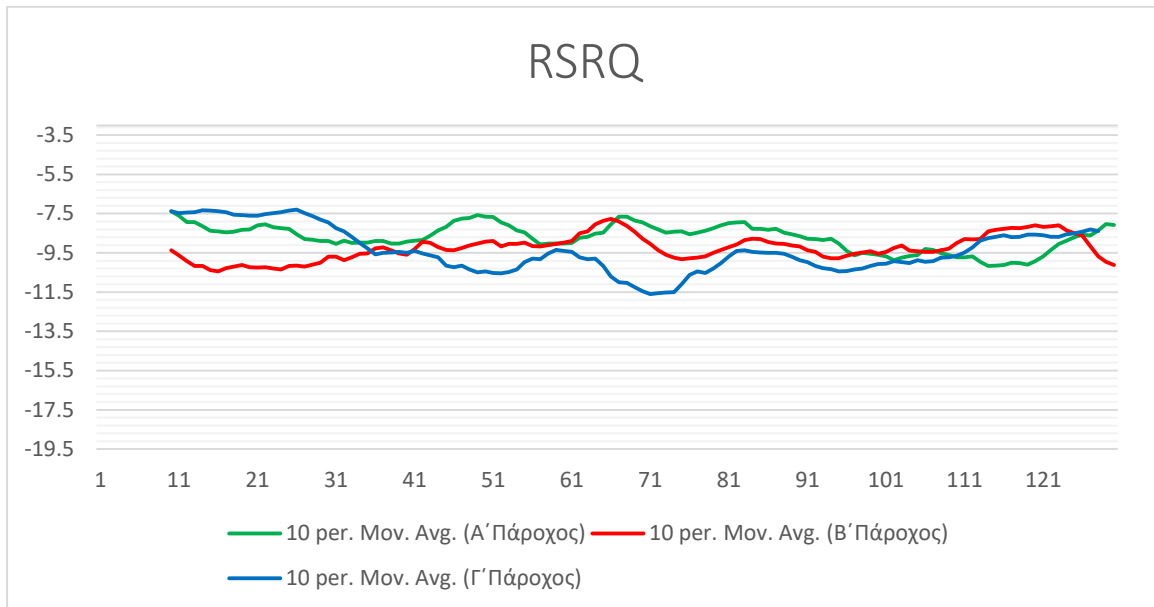
Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

Καθώς το Rssi είναι αναλογικό του Rsrp στην περίπτωση του Γ' παρόχου βλέπουμε και στα σχήματα τις έντονες πτώσεις και τις μεγάλες διακυμάνσεις στην ισχύ του σήματος οι οποίες επηρεάζουν τον συνολικό μέσο όρο. Στο γράφημα του Α' και του Β' παρόχου έχουμε και εδώ ένα πιο σταθερό γράφημα με τον Α' να έχει διαφορές ως προς τις μέγιστες τιμές αλλά λόγω του πιο σταθερού γραφήματος του Β' Παρόχου οι μέσοι όροι του RSRP να είναι πολύ κοντά. Όπως παρατηρούμε οι πτώσεις ισχύς του σήματος συμβαίνουν σε διαφορετικά σημεία για κάθε παρόχο το οποίο συμβαίνει λόγω των θέσεων των κεραιών και της κατευθυντικότητας τους.



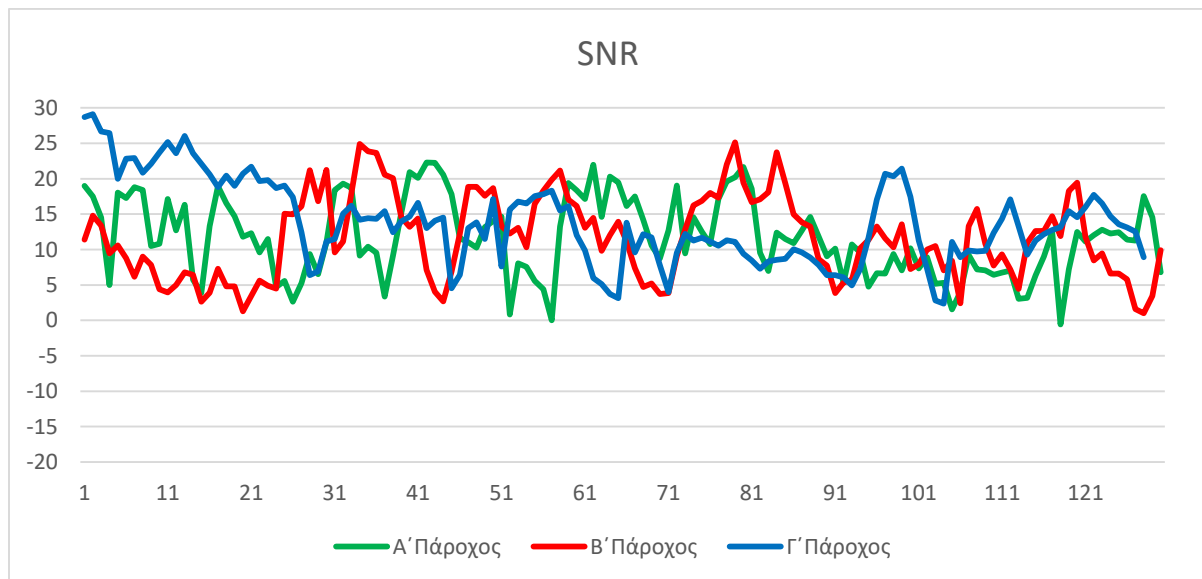
Γράφημα 26 Συνοπτικοί μέσοι όροι RSRQ και από τις 4 διαδρομές της αστικής περιοχής για κάθε πάροχο

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



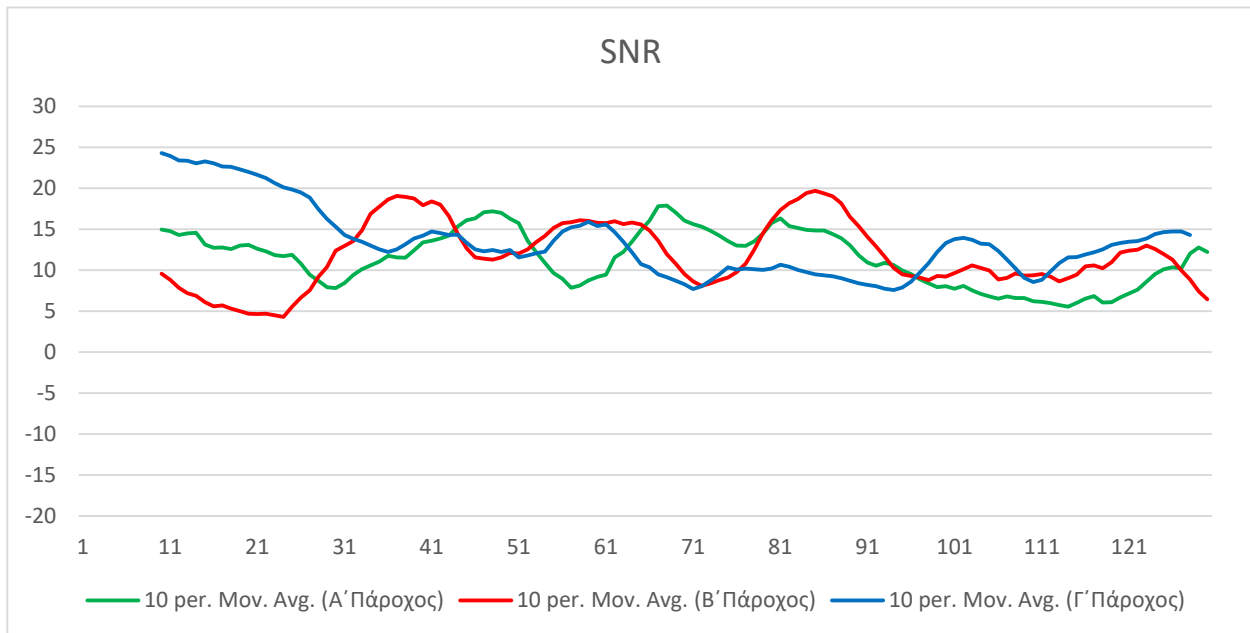
Γράφημα 27 Συνοπτικοί μέσοι όροι RSRQ με χρήση κινητού μέσου όρου περιόδου 10 και από τις 4 διαδρομές της αστικής περιοχής για κάθε πάροχο

Ως προς την ποιότητα του σήματος που μας την παρουσιάζει καλύτερα το RSRQ παρατηρούμε τόσο από τα γραφήματα όσο και από τους μέσους όρους τιμών πως ο Πάροχος Α' έχει την καλύτερη απόδοση και οι Πάροχοι Β' και Γ' έχουν παρόμοια απόδοση.



Γράφημα 28 Συνοπτικοί μέσοι όροι SNR και από τις 4 διαδρομές της αστικής περιοχής για κάθε πάροχο

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



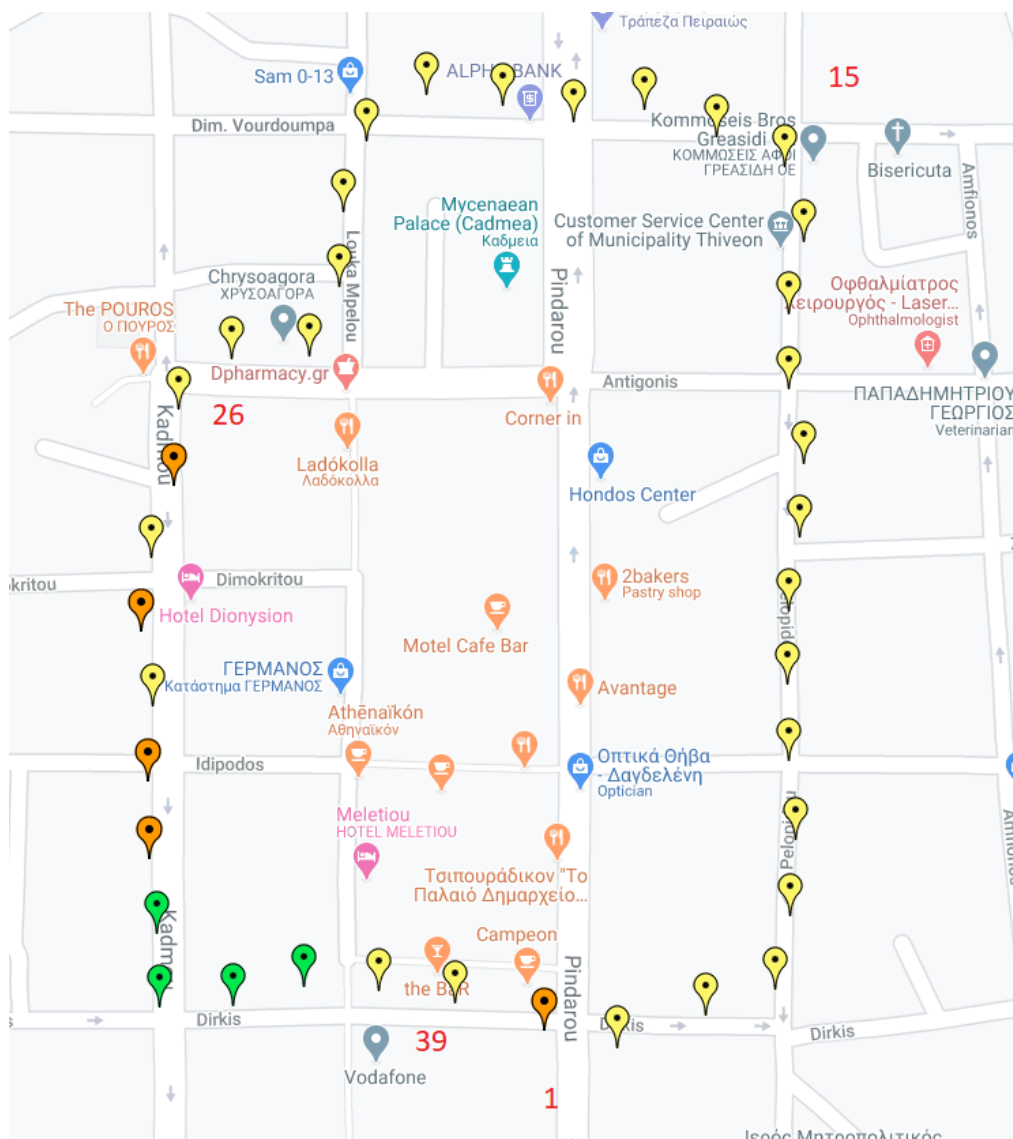
Γράφημα 29 Συνοπτικοί μέσοι όροι SNR με χρήση κινητού μέσου όρου περιόδου 10 και από τις 4 διαδρομές της αστικής περιοχής για κάθε πάροχο

Στα δύο τελευταία διαγράμματα SNr, η μοναδική έντονη διαφορά είναι η πολύ καλή απόδοση ως προς το SNR του Γ' Παρόχου στο κέντρο του Πειραιά, το οποίο είναι στην αρχή των διαγραμμάτων διατηρώντας κατά μέσο όρο τιμών μία μεγάλη διαφορά της τάξης των 2 dB έναντι των άλλων 2 παρόχων που έχουν παρόμοια απόδοση.

Συμπερασματικά ο Α' πάροχος καλύπτει το μικρότερο ποσοστό της διαδρομή με μια μόνο ζώνη συχνοτήτων με ποσοστό 45%, το οποίο ποσοστό για τον Β' και Γ' πάροχο είναι 98% και 69% αντίστοιχα. Στον αντίποδα τη μεγαλύτερη κάλυψη με 3 διαθέσιμες ζώνες συχνοτήτων ταυτόχρονα έχει ο Γ' πάροχος με ποσοστό 6% και ακολουθεί ο Α' με ποσοστό 4%, με την πρώτη βέβαια να έχει χαμηλότερη θεωρητική ταχύτητα λόγω του μικρότερου bandwidth στα κανάλια εκπομπής της.

5.4 Ημιαστική Περιοχή

Στην περίπτωση της ημιαστικής περιοχής μελετήσαμε ένα τμήμα της Θήβας, η διαδρομή που κάναμε την μέτρηση φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν της μεσημβρινές ώρες και κατά την περίοδο 1/7- 4/7 όπου πραγματοποιήθηκε η ίδια διαδρομή και για τους τρεις παρόχους κινητής τηλεφωνίας. Η διαδρομή που επιλέχθηκε για να γίνει η μέτρηση αφορά τους πιο κεντρικούς δρόμους της Θήβας καθώς σε αυτή υπάρχουν τα ξενοδοχεία και τα μαγαζιά της πόλης, όπως και στέγαση πολλών εταιρειών.



Εικόνα 37 Εικόνα των λαμβανόμενων σημάτων που συλλέχθηκαν, κατά την διάρκεια μίας διαδρομής στην ημιαστική περιοχή μελέτης, μέσω της ιστοσελίδας απεικόνισης των μετρήσεων

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

Η παραπάνω εικόνα προέρχεται από την ιστοσελίδα που έχει κατασκευαστεί ώστε να απεικονίζονται οι μετρήσεις που πήραμε.

Αρχικά, μέσω γραφημάτων μελετήσαμε αν η ισχύς και η ποιότητα του σήματος για κάθε πάροχο είναι σταθερή στην συνολική διάρκεια των 4 ημερών.

Α΄ πάροχος κινητής τηλεφωνίας

Πίνακας 24 Πίνακας μέσων όρων τιμών RSSI,RSRP,RSRQ,SNR ανά ημέρα του Α΄ Παρόχου στην ημιαστική περιοχή

Ημερομηνία	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	SNR (dB)
1/7	-92.975	-6.525	12.45
2/7	-91.4595	-6.21622	12.56757
3/7	-94.2683	-7.14634	10.7561
4/7	-92.85	-6.175	12.4
Απόκλιση	2.98%	4.88%	10.42 %

Όπως παρατηρούμε η ισχύς του σήματος μπορεί να μειώθηκε κατά 2.98% αλλά υπήρξε μια βελτίωση στην ποιότητα του σήματος της τάξης του 4.88% ή αλλιώς σχεδόν διπλασιασμός της ποιότητας. Ακόμη, Η συνολική εικόνα του μέσου όρου σημάτων είναι πολύ καλή σε όλες τις μεταβλητές μέτρησης.

Β΄ πάροχος κινητής τηλεφωνίας

Πίνακας 25 Πίνακας μέσων όρων τιμών RSSI,RSRP,RSRQ,SNR ανά ημέρα του Β΄ Παρόχου στην ημιαστική περιοχή

Ημερομηνία	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	SNR (dB)
1/7	-98.8889	-7.22222	13.52778
2/7	-101.086	-7.91429	12.4
3/7	-100.828	-7.31429	12.65714
4/7	-98.176	-8.02941	12.05882
Απόκλιση	2.87%	10.5%	10.8%

Όπως παρατηρούμε η ισχύς του σήματος μπορεί να μειώθηκε κατά 2.87% αλλά υπήρξε μια βελτίωση στην ποιότητα του σήματος της τάξης του 10.5% ή αλλιώς σχεδόν διπλασιασμός της ποιότητας. Ακόμη, Η συνολική εικόνα του μέσου όρου σημάτων είναι πολύ καλή σε όλες τις μεταβλητές μέτρησης.

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

Γ' πάροχος κινητής τηλεφωνίας

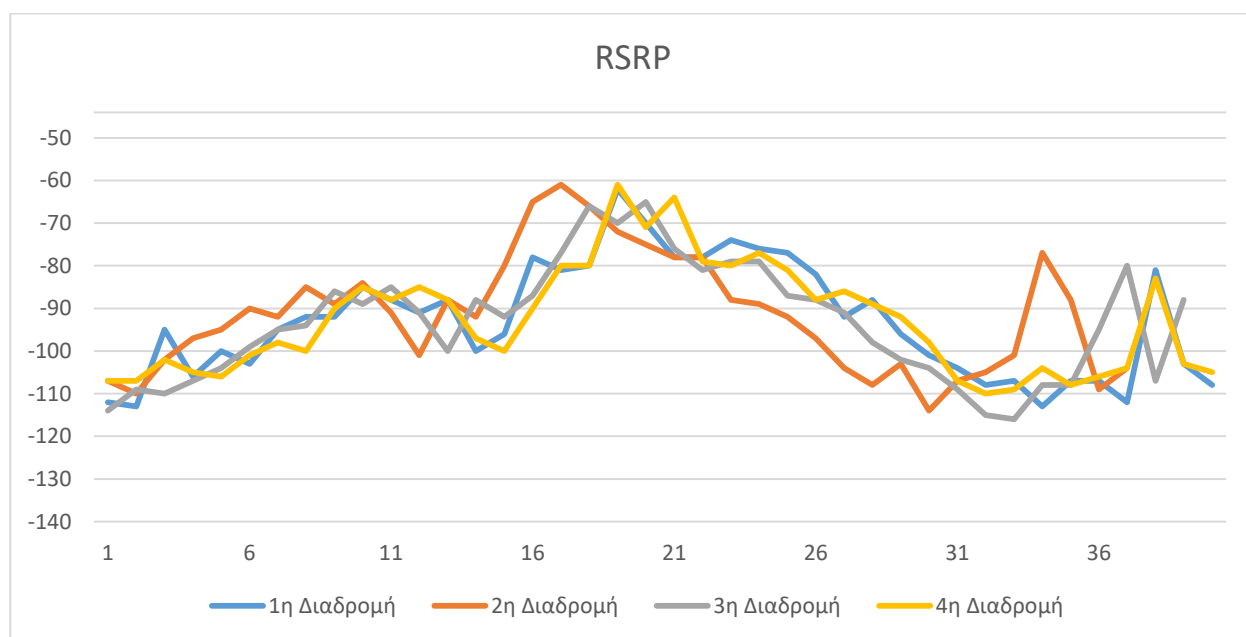
Πίνακας 26 Πίνακας μέσω των όρων τιμών *RSSI,RSRP,RSRQ,SNR* ανά ημέρα του Γ' Παρόχου στην ημιαστική περιοχή

Ημερομηνία	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	SNR (dB)
1/7	-93.2439	-7.07317	12.60976
2/7	-93.6829	-7.2439	12.02439
3/7	-108.317	-8.90244	4.756098
4/7	-110.732	-6.90244	6.341463
Απόκλιση	18.75%	22.4%	8.6%

Όπως παρατηρούμε η ισχύς του σήματος μπορεί να μειώθηκε αρκετά κατά 18.75% αλλά υπήρξε μια βελτίωση στην ποιότητα του σήματος της τάξης του 22.4%. Ακόμη, Η συνολική εικόνα του μέσου όρου σημάτων είναι πολύ καλή σε όλες τις μεταβλητές μέτρησης.

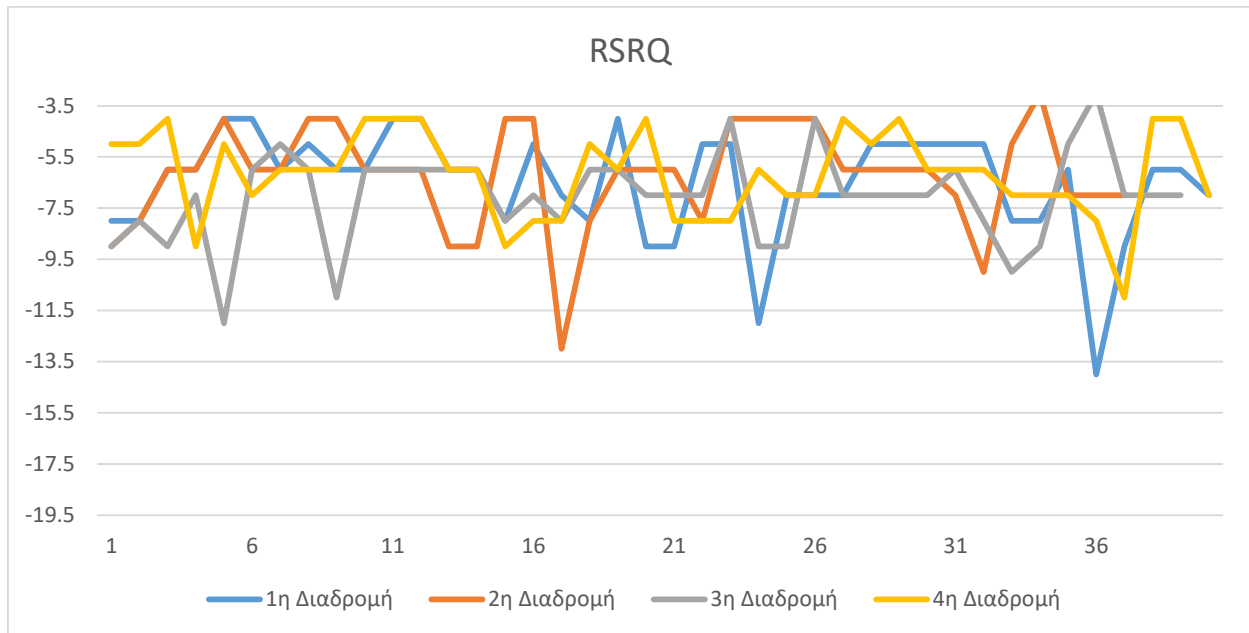
Ως προς την σταθερότητα της ισχύς και την ποιότητας κατά την διάρκεια των 4 διαδρομών απεικονίζεται καλύτερα στα παρακάτω γραφήματα.

5.4.1 Μετρήσεις Παρόχου Α'

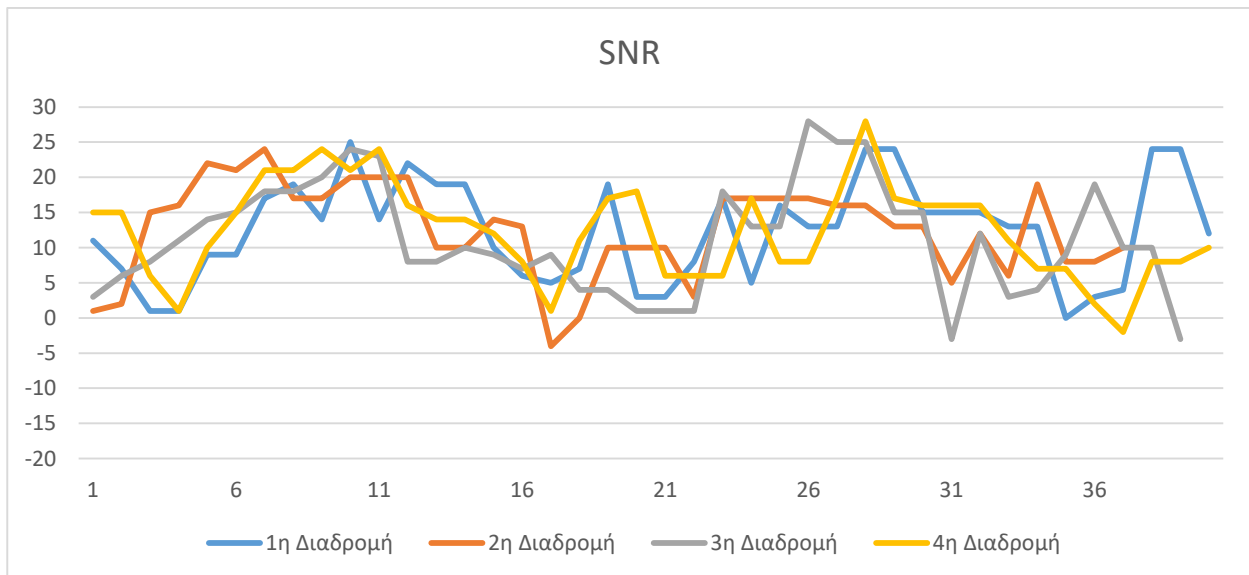


Γράφημα 30 Γράφημα *RSSP* ημιαστικής περιοχής Α' Παρόχου κινητής τηλεφωνίας

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



Γράφημα 31 Γράφημα RSRQ ημιαστικής περιοχής Α' Παρόχου κινητής τηλεφωνίας

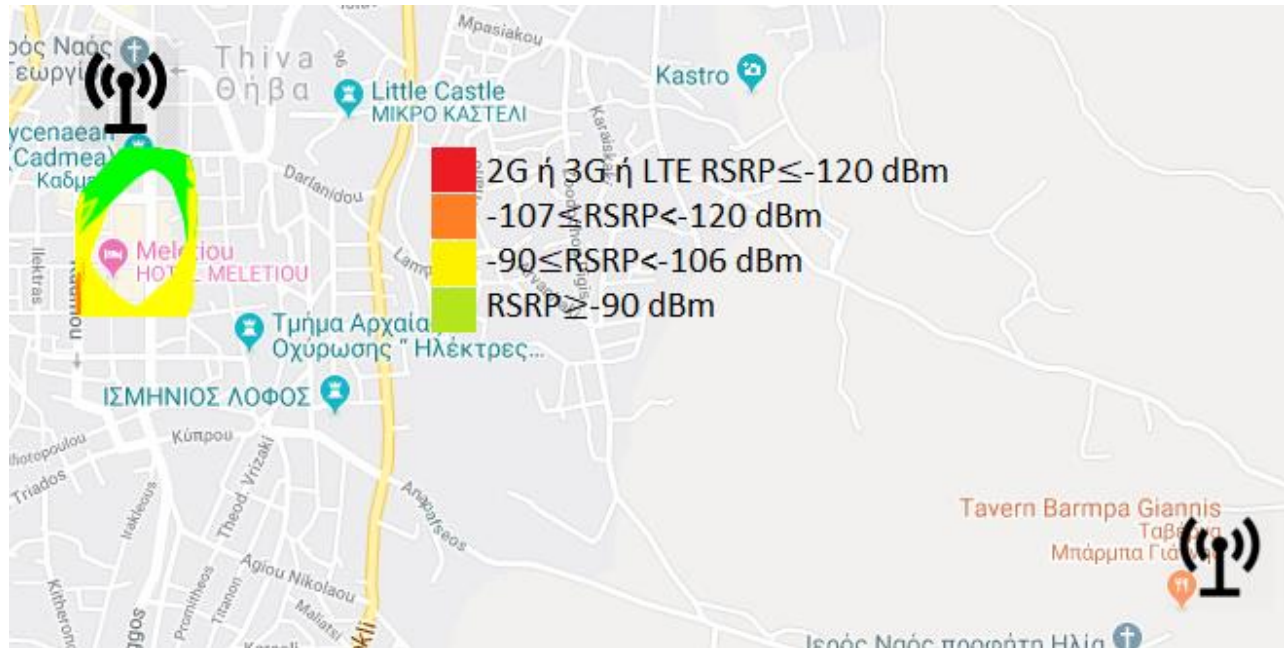


Γράφημα 32 Γράφημα SNR ημιαστικής περιοχής Α' Παρόχου κινητής τηλεφωνίας

Όπως παρατηρούμε το RSRP καθ' όλη την διάρκεια παρουσιάζει μία σταθερότητα μεταξύ των 4 λήψεων χωρίς να υπάρχουν διαφοροποιήσεις μεταξύ των σημάτων. Αντίθετα το RSRQ έχει απότομες εναλλαγές τιμών χωρίς αυτές να γίνονται σε όλες τις περιπτώσεις επηρεάζοντας με τον τρόπο αυτό και την ταχύτητα download. Βέβαια η μέση τιμή RSRQ, όπως είδαμε παραπάνω ήταν η καλύτερη μεταξύ των τριών. Στους ακόλουθους χάρτες κάλυψης τα χρώματα έχουν δοθεί σύμφωνα με τον προαναφερθέντα πίνακα στο

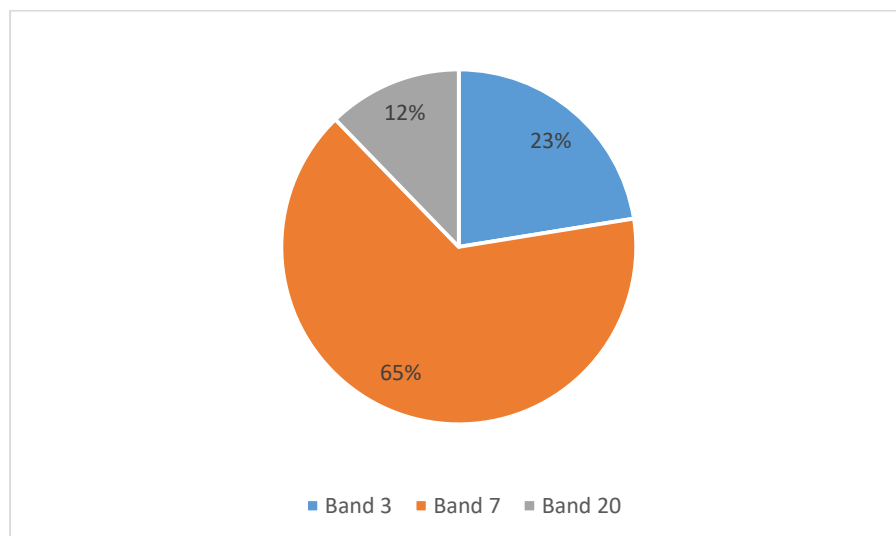
Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

κεφάλαιο 5.2. Ακόμα έχουν προστεθεί οι θέσεις των κεραιών από τις οποίες λαμβανόταν το σήμα κατά την διαδρομή.



Εικόνα 38 Χάρτης κάλυψης δημιουργημένος σύμφωνα με τις τιμές RSRP του παρόχου Α' με απεικόνιση των κεραιών λήψης σήματος [61]

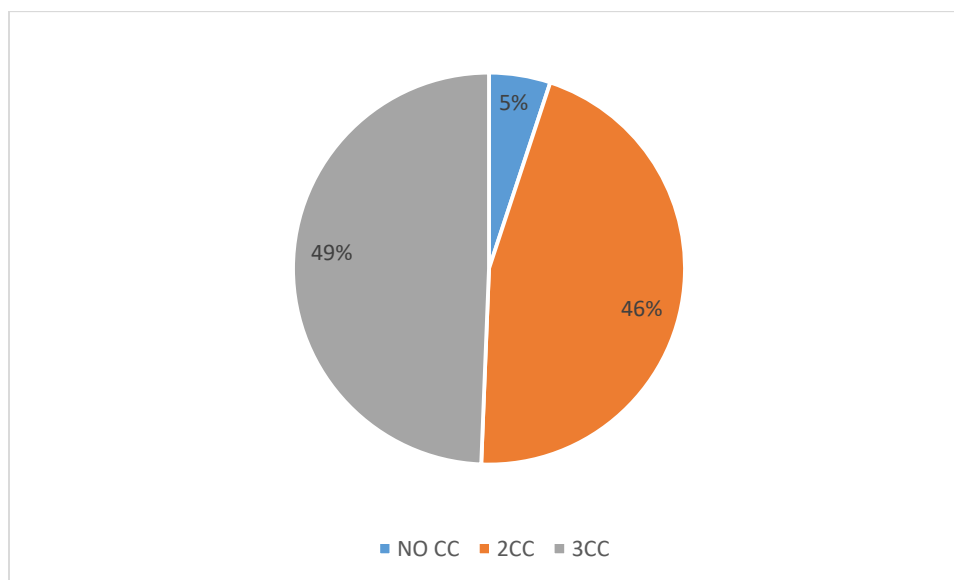
Στο παρακάτω διάγραμμα αποτυπώνεται σε ποσοστά σε ποια ζώνη ήταν εγγεγραμμένο το κινητό τηλεκάρτα κατά μέσο όρο κατά την διάρκεια της προδιαγεγραμμένης διαδρομής. Όπως παρατηρούμε το κινητό τηλεκάρτα μας χρησιμοποίησε κυρίως την ζώνη 7 στις διαδρομές σε ποσοστό 65%.



Γράφημα 33 Διάγραμμα μέσου όρου κάλυψης διαθέσιμων ζωνών συχνοτήτων Α' παρόχου

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

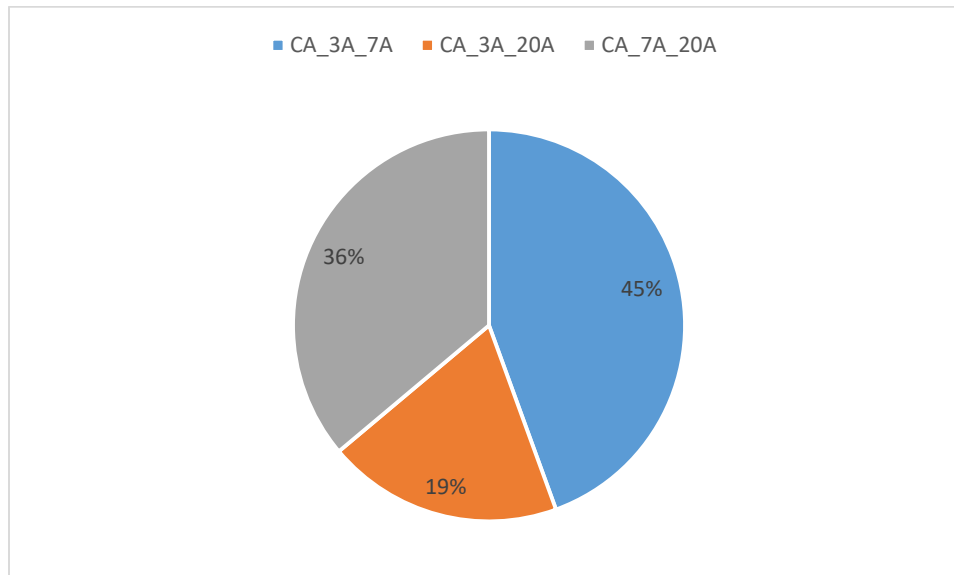
Στο παρακάτω διάγραμμα έχουμε τα ποσοστά της διαδρομής κατά τα οποία έχουμε διαθέσιμο Carrier Aggregation ή όχι. Συγκεκριμένα στο 5% της διαδρομής είχαμε μία μόνο ζώνη διαθέσιμη, στο 46% 2 ζώνες συχνοτήτων (2CC) και μόνο στο 49% είχαμε 3 ζώνες διαθέσιμες (3CC) που μας προσφέρουν πλήρη ταχύτητα download. Αυτό σημαίνει ότι κατά την διάρκεια της μισής διαδρομής είχαμε την μέγιστη ικανή ταχύτητα download, φυσικά όμως εξαρτώμενη με την ισχύ και την ποιότητα που μας παρείχαν οι άλλες 2 ζώνες συχνοτήτων πλην της βασικής.



Γράφημα 34 Διάγραμμα ποσοστού μέσου όρου κάλυψης με Carrier Aggregation Α' παρόχου

Στο 46% όπου όπως βλέπουμε στο παραπάνω σχήμα είχαμε 2CC (Carrier Aggregation) στο 45% του ήταν συνδυασμός των bands 3 και 7, στο 19% των bands 3 και 20 και στο 36% των bands 7 και 20. Όπως έχουμε αναφέρει και στο προηγούμενο σενάριο της αστικής περιοχής οι συνδυασμοί παίζουν ρόλο καθώς όταν περιέχεται η ζώνη 20 η ταχύτητα θα είναι μειωμένη στο μισό σε σχέση με τις ζώνες συχνοτήτων 3 και 7 εάν όμως οι δύο διαφορετικές επιλογές έχουν ακριβώς την ίδια ισχύ και ποιότητα σήματος.

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



Γράφημα 35 Διάγραμμα ποσοστού χρήσης των 3 τύπων 2CC του Α' παρόχου

Στις παρακάτω τιμές μπορούμε να δούμε τους μέσους όρους των σημάτων που υπήρχαν από τις διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, όπου ήταν διαθέσιμες, και όχι από αυτή στην οποία είχε εγγραφεί η συσκευή. Μέσω των τιμών αυτών μπορούμε να έχουμε μια καλύτερη εικόνα σχετικά με την καλύτερη απόδοση του Carrier Aggregation.

Πίνακας 27 Μέσος όρος RSRP,RSRQ,SNR από κεραιές Παρόχου Α στις οποίες δεν έχει εγγραφεί το τερματικό μας

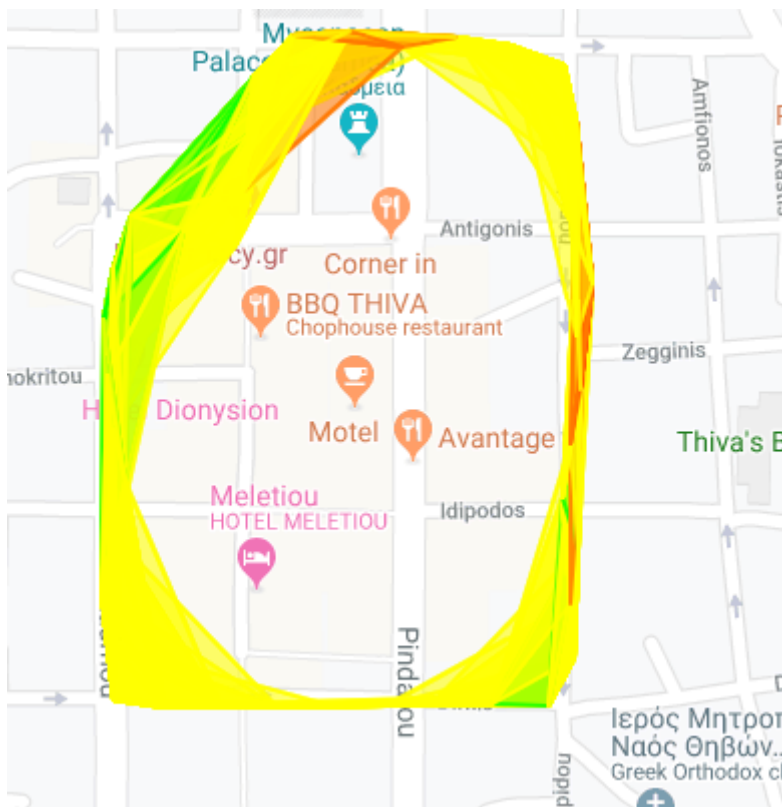
Band/EARFCN	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)
3/1700	-93.639	-7.99143
7/3050	-97	-6.01705
20/6400	-91.061	-8.67809

Όπως παρατηρούμε οι μεσαίες τιμές και των τριών bands είναι σε πολύ καλά επίπεδα. Από τα αποτελέσματα που έχουν προηγηθεί και γνωρίζοντας ότι ο πάροχος αυτός χρησιμοποιεί μέγιστη διαμόρφωση QAM-256, MIMO 2x2 και έχοντας bandwidth 20MHz, 20MHz, 10MHz στις ζώνες συχνοτήτων 3,7 και 20 αντίστοιχα έχουμε τα ακόλουθα:

- Στο 0.6% της κάλυψης έχουμε Downlink throughput έως 97.9 Mbps χωρίς Carrier Aggregation μέσω της ζώνης 20
- Στο 4.4% της κάλυψης έχουμε Downlink throughput έως 195.8 Mbps μέσω είτε της ζώνης 3 είτε της ζώνης 7
- Στο 25.3% της κάλυψης έχουμε μέσω Carrier Aggregation είτε στις ζώνες συχνοτήτων 3 και 20 είτε στις ζώνες 7 και 20,downlink throughput έως 293.7 Mbps
- Στο 20.7% της κάλυψης έχουμε μέσω Carrier Aggregation στις ζώνες 3 και 7, downlink throughput έως 391.6 Mbps

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

- Τέλος στο 49% της κάλυψης έχουμε μέσω Carrier Aggregation στις ζώνες συχνοτήτων 3, 7 και 20, downlink throughput έως 489.5 Mbps



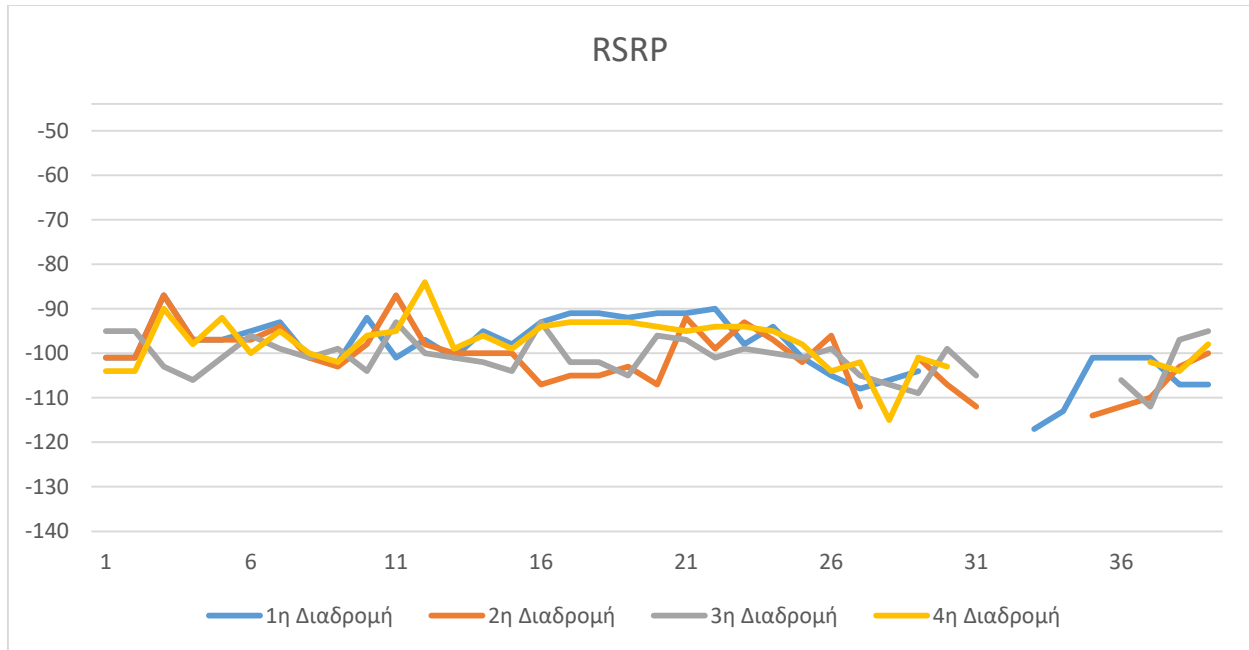
Εικόνα 39 Χάρτης απεικόνισης του υπολογισμένου *throughput* του παρόχου Α΄

Όπως και στην αστική περιοχή έτσι και στην ημιαστική ο χάρτης για τον Πάροχο Α΄ έχει δημιουργηθεί σύμφωνα με τον Πίνακα 18

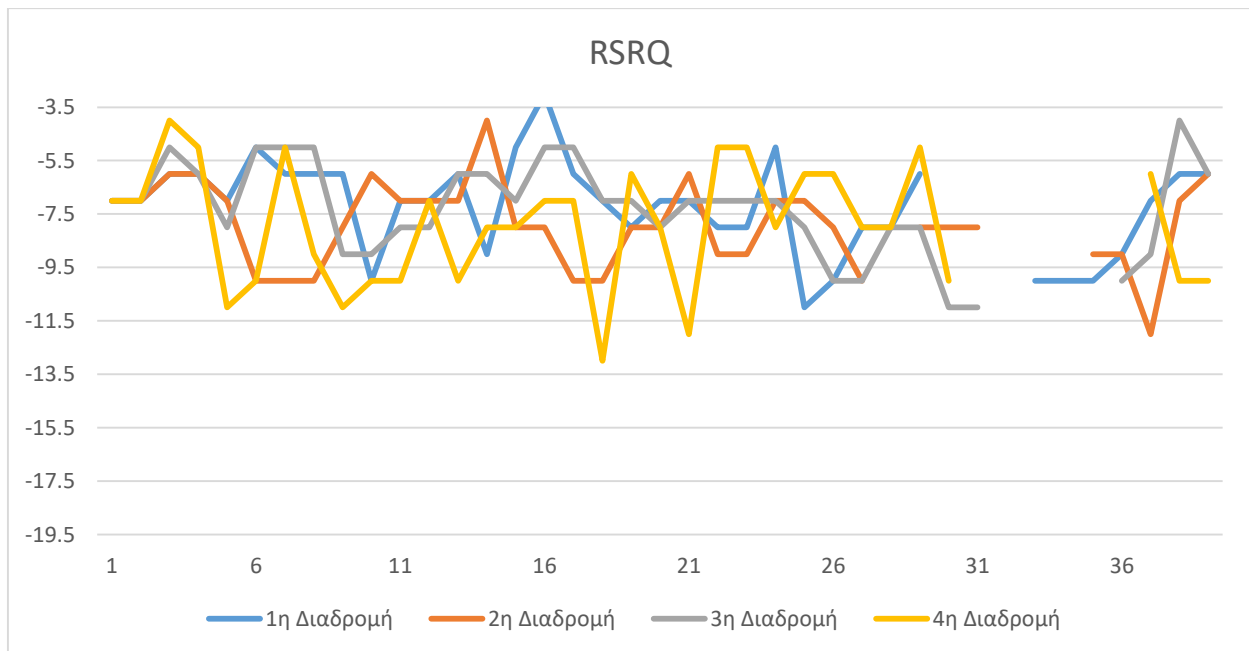
Πίνακας 18 Αντιστοίχιση χρώματος – μέγιστου *throughput* για την δημιουργία χάρτη

Χρώμα	Throughput
Κόκκινο	Έως 195.8 Mbps
Πορτοκαλί	Έως 293.7 Mbps
Κίτρινο	Έως 391.6 Mbps
Πράσινο	Έως 489.5 Mbps

5.4.2 Μετρήσεις Παρόχου Β'

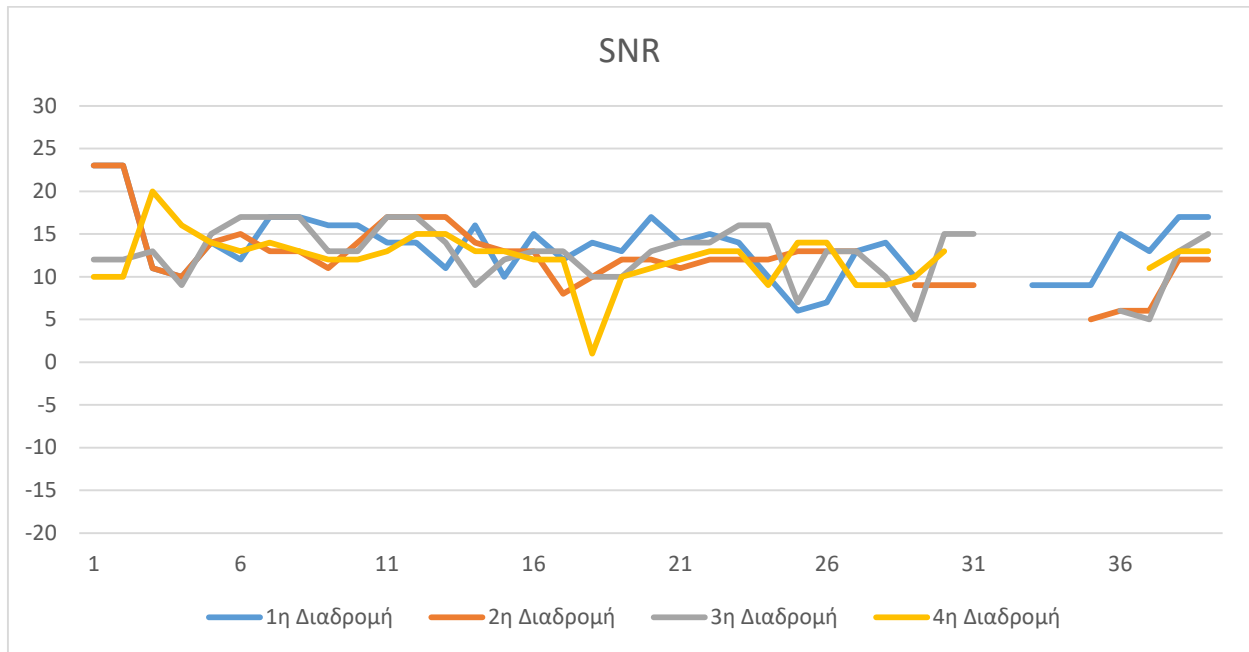


Γράφημα 36 Γράφημα RSRP ημιαστικής περιοχής Β' Παρόχου κινητής τηλεφωνίας



Γράφημα 37 Γράφημα RSSQ ημιαστικής περιοχής Β' Παρόχου κινητής τηλεφωνίας

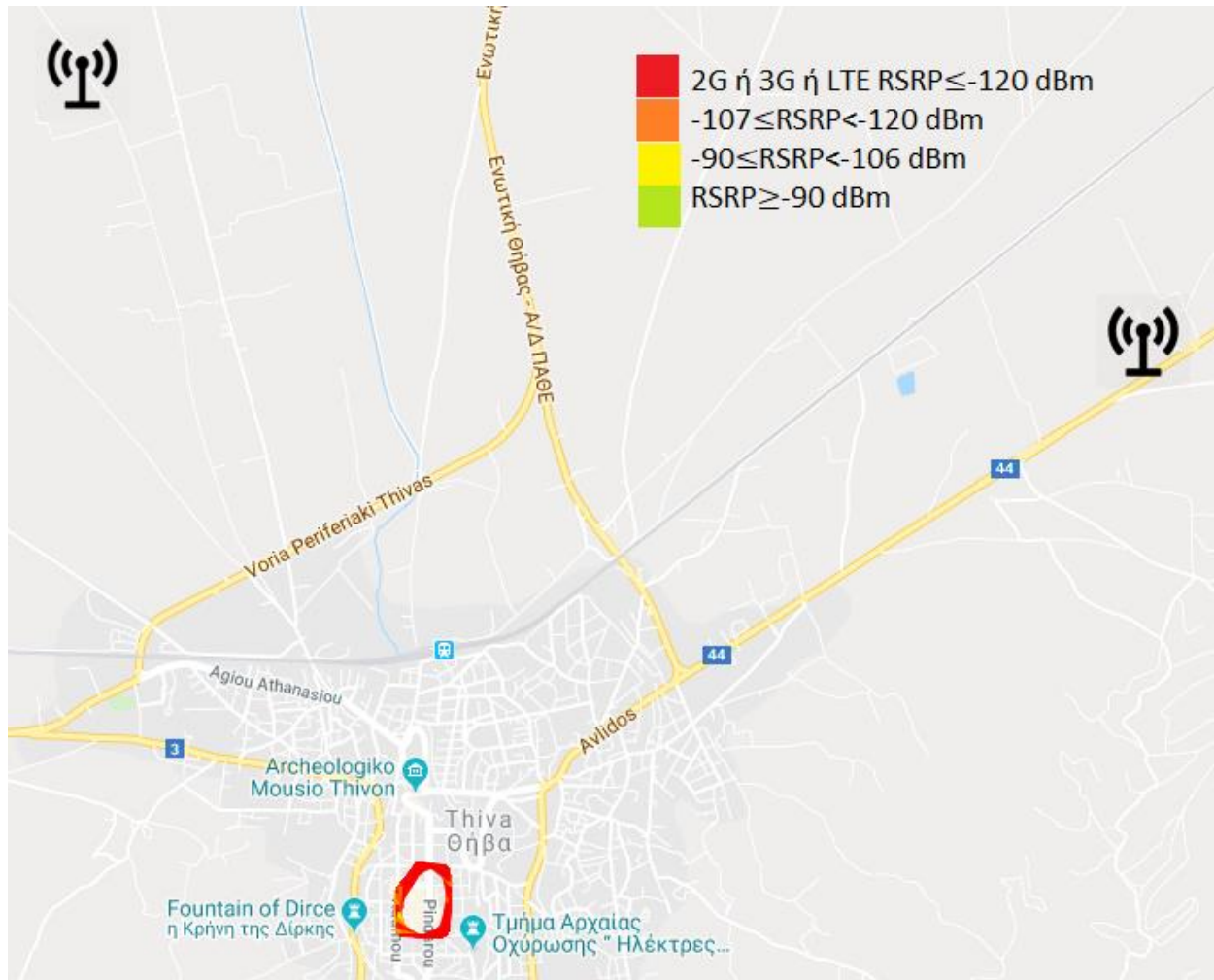
Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



Γράφημα 38 Γράφημα SNR ημιαστικής περιοχής Β' Παρόχου κινητής τηλεφωνίας

Στα παραπάνω 3 σχεδιαγράμματα έχουμε τις συγκρίσεις RSRP,RSRQ και SNR μεταξύ των 4 διαδρομών του Β' Παρόχου. Στα διαγράμματα για το RSRP και SNR παρατηρούμε μια ομοιομορφία η οποία είναι απόλυτα εμφανής στην ισχύ του σήματος. Κατά την διάρκεια και των 4 διαδρομών μας βέβαια παρατηρούμε να διακόπτονται τα διαγράμματα. Στις περιπτώσεις αυτές το σήμα μας υποβιβάζοταν από 4G σε 3G.

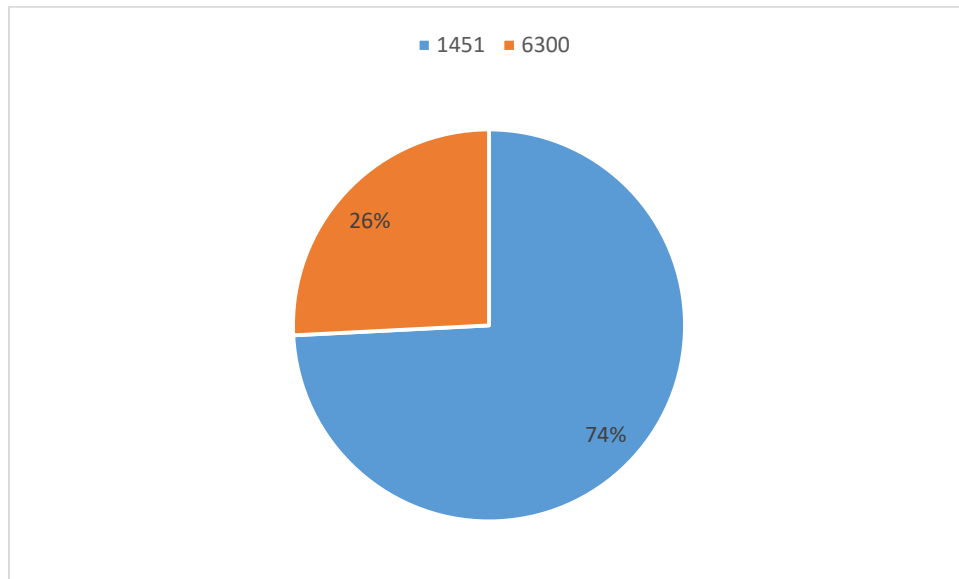
Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



Εικόνα 40 Χάρτης κάλυψης δημιουργημένος σύμφωνα με τις τιμές RSRP του παρόχου Β' με απεικόνιση των κεραιών λήψης [61]

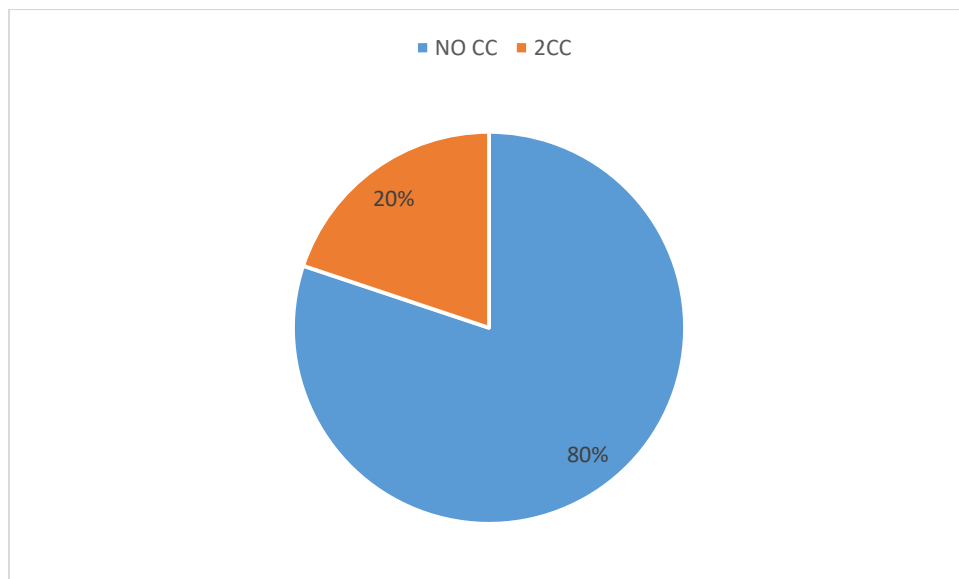
Στον δεύτερο πάροχο όπου μελετήσαμε, υπήρχαν μεγάλες διακυμάνσεις μεταξύ των bands στις οποίες εγγραφόταν το τερματικό μας ως κύρια ζώνη. Οι διακυμάνσεις αυτές ανάμεσα στις ζώνες συχνοτήτων 3 και 20 ήταν από 98% - 2% έως 51.5%-48.5%. Ο μέσος όρος και από τις 4 διαδρομές αποτυπώνεται στο παρακάτω διάγραμμα.

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



Γράφημα 39 Διάγραμμα μέσου όρου κάλυψης διαθέσιμων ζωνών συχνοτήτων Β' παρόχου

Στον πάροχο αυτό είχαμε στο 80% της διαδρομής κάλυψη μόνο από μία ζώνη ενώ στο υπόλοιπο 20% είχαμε κάλυψη από 2 ζώνες. Κάλυψη από 3 ζώνες δεν είχαμε καθόλου στην διαδρομή όπου πραγματοποιήσαμε. Στα σημεία όπου είχαμε 2CC η κάλυψη γινόταν από τις ζώνες 3 και 20.



Γράφημα 40 Διάγραμμα ποσοστού μέσου όρου κάλυψης με Carrier Aggregation Β' παρόχου

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

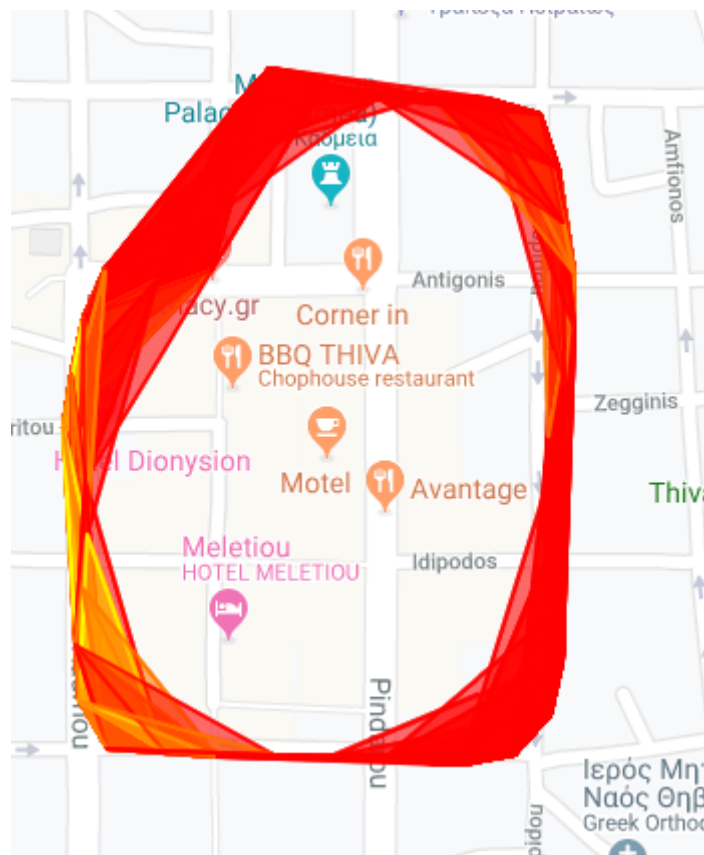
Στις παρακάτω τιμές μπορούμε να δούμε τους μέσους όρους των σημάτων που υπήρχαν από τις διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, όπου ήταν διαθέσιμες.

Πίνακας 28 Μέσος όρος RSRP,RSRQ,SNR από κεραιές Παρόχου Β στις οποίες δεν έχει εγγραφεί το τερματικό μας

Band/EARFCN	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)
3/1451	-109.854	-8.79167
20/6300	-113.748	-9.67917

Οι τιμές ισχύος και ποιότητας μεσαίας προς χαμηλής αποδοτικότητας. Από τα αποτελέσματα που αναλύσαμε προηγουμένως και γνωρίζοντας ότι ο πάροχος αυτός χρησιμοποιεί μέγιστη διαμόρφωση QAM-64 και MIMO 2x2 και έχοντας bandwidth 20MHz, 20MHz, 10MHz στις ζώνες συχνοτήτων 3,7 και 20 αντίστοιχα έχουμε τα ακόλουθα:

- Στο 20.8% της κάλυψης έχουμε Downlink throughput έως 75 Mbps μέσω της ζώνης 20.
- Στο 59.2% της κάλυψης έχουμε Downlink throughput έως 150 Mbps μέσω της ζώνης 3.
- Στο 20% της κάλυψης έχουμε μέσω Carrier Aggregation στις ζώνες 3 και 20, downlink throughput έως 225 Mbps



Εικόνα 41 Χάρτης απεικόνισης του υπολογισμένου throughput του παρόχου Β'

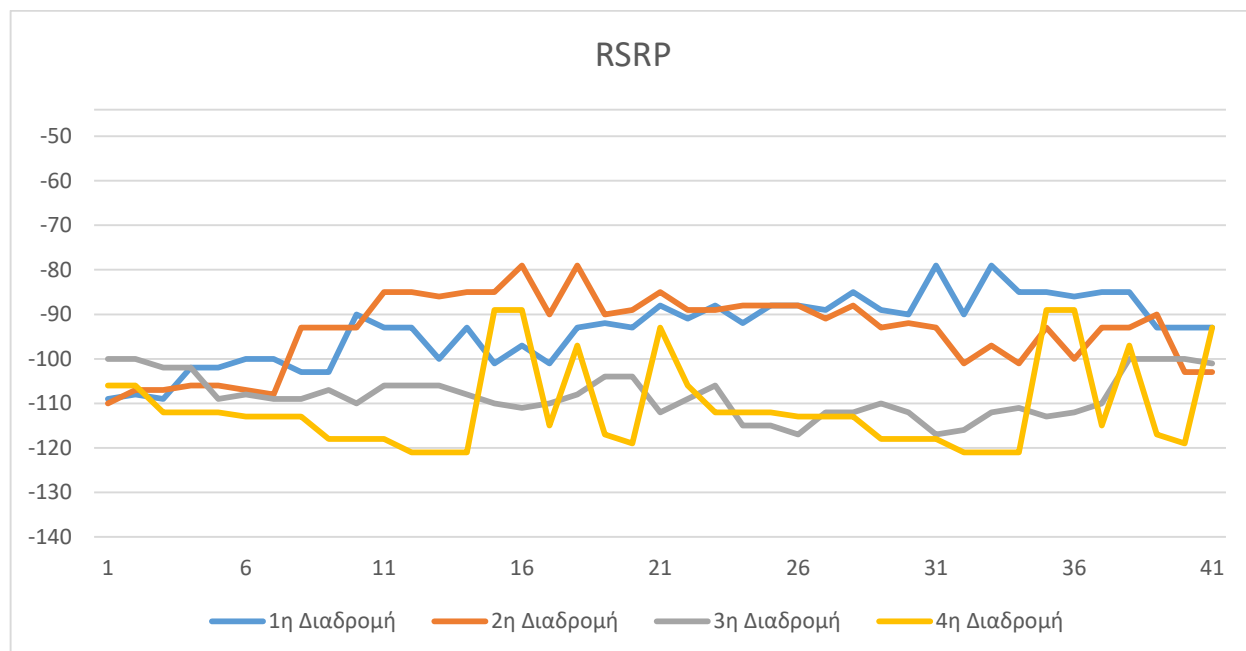
Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

Όπως και στην αστική περιοχή έτσι και στην ημιαστική ο χάρτης για τον Πάροχο Α' έχει δημιουργηθεί σύμφωνα με τον Πίνακα 20

Πίνακας 20 Αντιστοίχιση χρώματος – μέγιστου throughput για την δημιουργία χάρτη

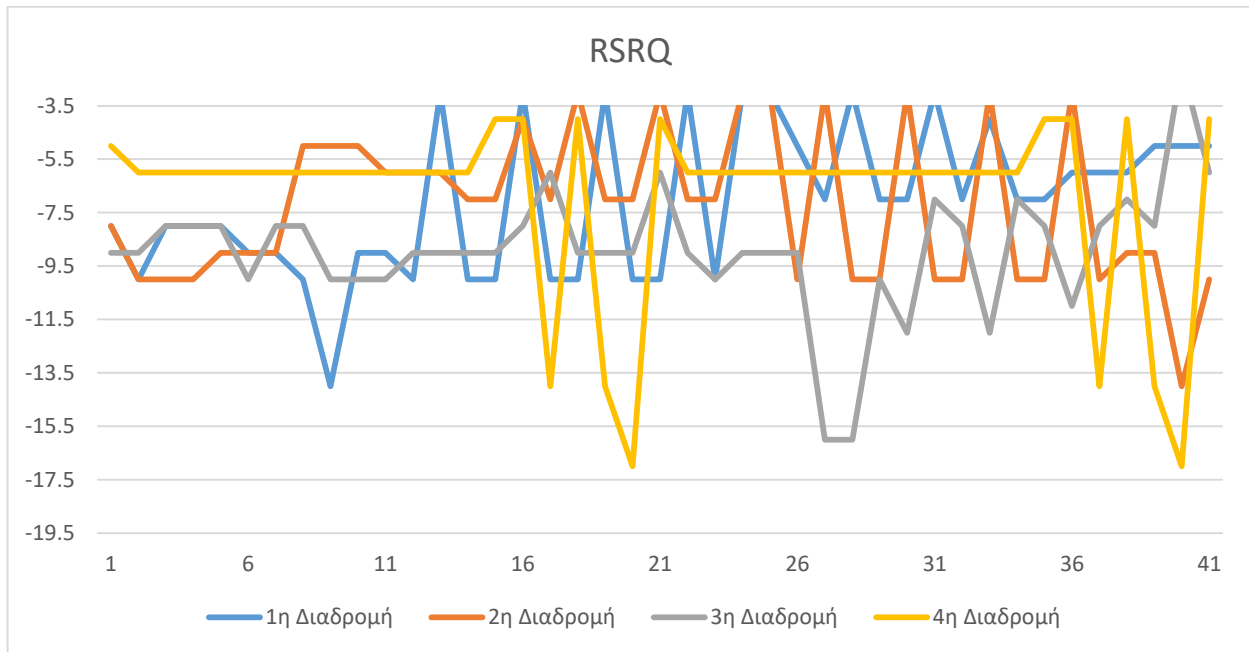
Χρώμα	Throughput
Κόκκινο	Έως 75 Mbps
Πορτοκαλί	Έως 150 Mbps
Κίτρινο	Έως 225 Mbps
Πράσινο	Έως 375 Mbps

5.4.3 Μετρήσεις Παρόχου Γ'

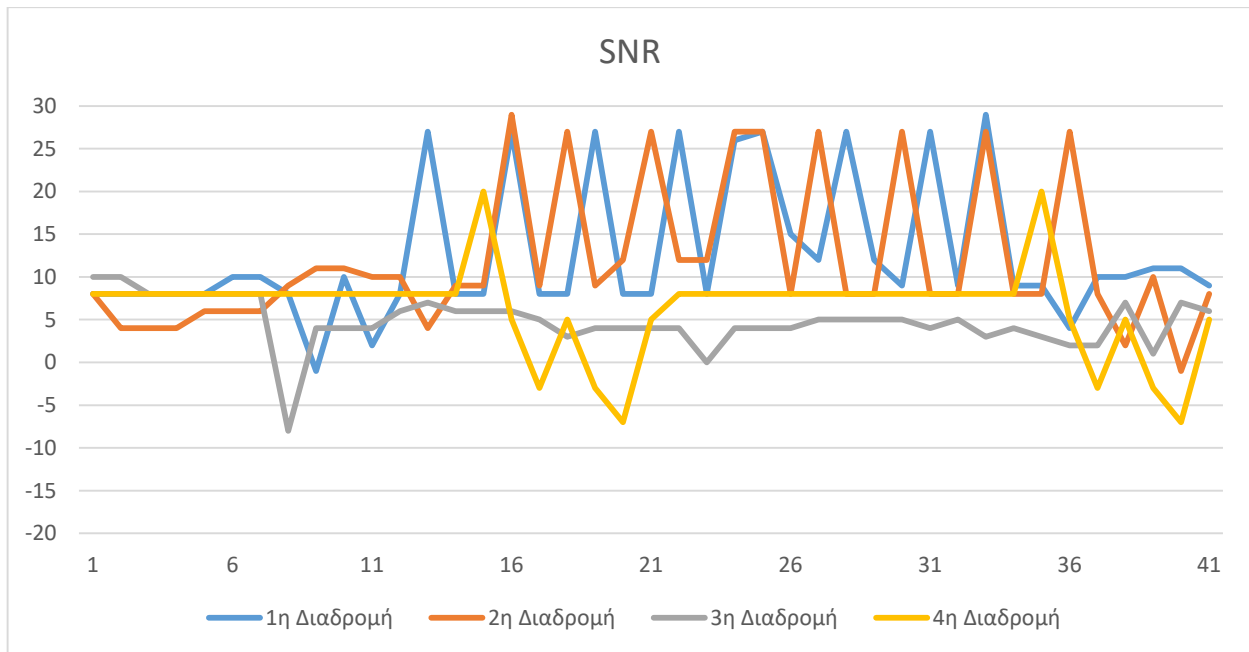


Γράφημα 41 Γράφημα RSRP ημιαστικής περιοχής Γ' Παρόχου κινητής τηλεφωνίας

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



Γράφημα 42 Γράφημα RSRQ ημιαστικής περιοχής Γ' Παρόχου κινητής τηλεφωνίας



Γράφημα 43 Γράφημα SNR ημιαστικής περιοχής Γ' Παρόχου κινητής τηλεφωνίας

Από τα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι οι μετρήσεις του του RSRP έχουν όμοια αποτελέσματα, το οποίο σημαίνει ότι ανεξάρτητα από την ημέρα, το σήμα τουλάχιστον έχει μια σταθερότητα.

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

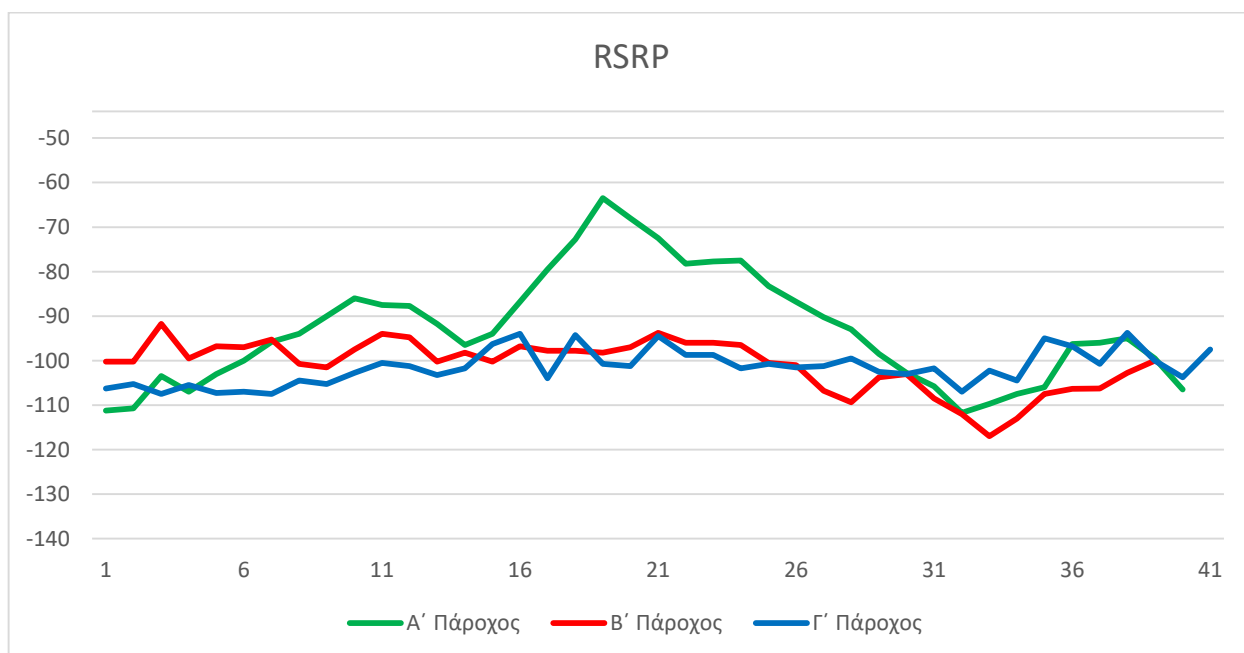
Στον τρίτο πάροχο όπου μελετήσαμε είχαμε κάλυψη αποκλειστικά από μία ζώνη, την 20. Εφόσον γνωρίζουμε ότι ο πάροχος αυτό χρησιμοποιεί μέγιστη διαμόρφωση QAM-64 και MIMO 2x2 και έχοντας bandwidth 10MHz στην ζώνη 20 θα έχουμε μέγιστο δυνατό downlink throughput 75Mbps.

5.4.4 Συμπεράσματα κάλυψης LTE σε Ημιαστική περιοχή

Πίνακας 29 Συνολικοί μέσοι όροι ανά πάροχο στην ημιαστική περιοχή

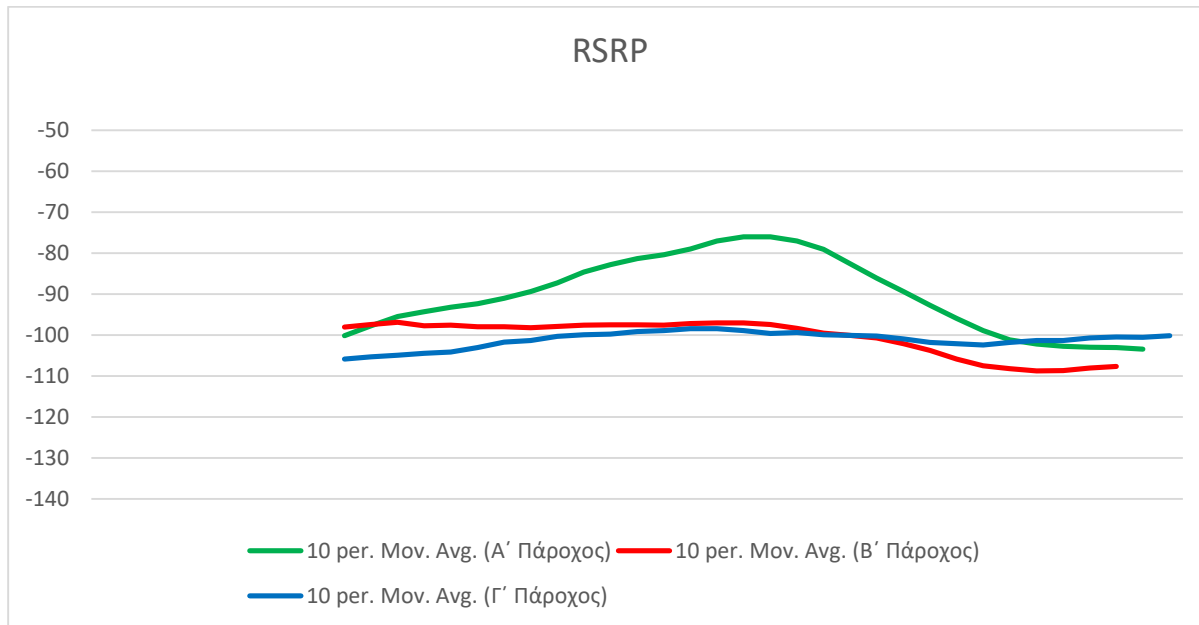
Πάροχος	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	SNR (dB)
Α' πάροχος	-93.0938	-6.5463	12.013
Β' πάροχος	-100.908	-7.84619	11.68885
Γ' πάροχος	-101.494	-7.53049	8.932927

Στα διαγράμματα που ακολουθούν απεικονίζονται τα συνοπτικά οι μέσοι όροι των μετρήσεων κάθε παρόχου στο ίδιο διάγραμμα.



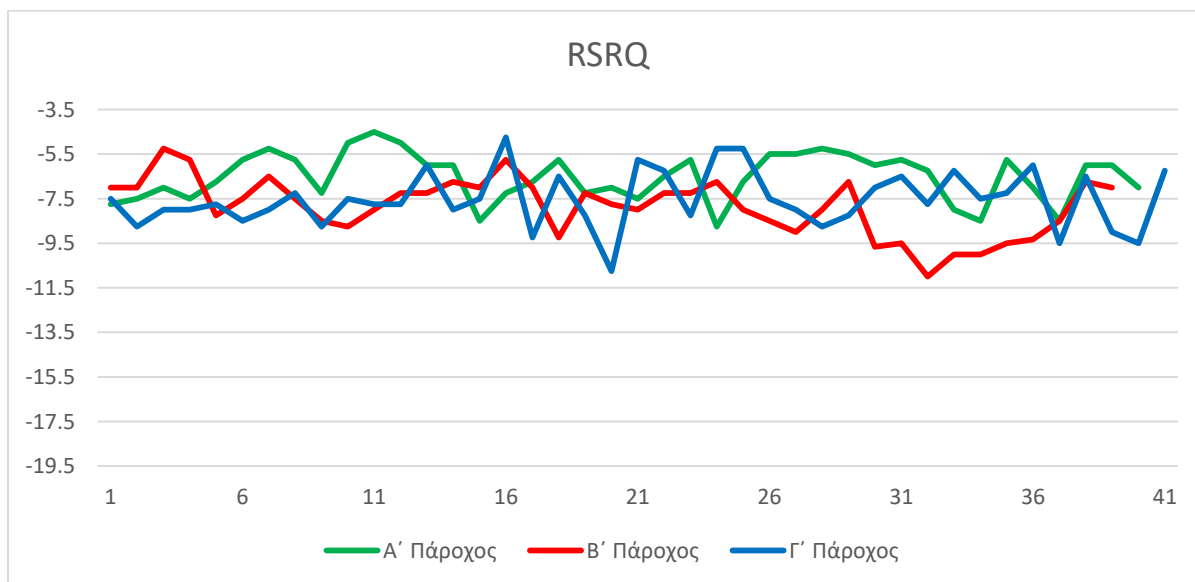
Γράφημα 44 Συνοπτικοί μέσοι όροι RSRP και από τις 4 διαδρομές της ημιαστικής περιοχής για κάθε πάροχο

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



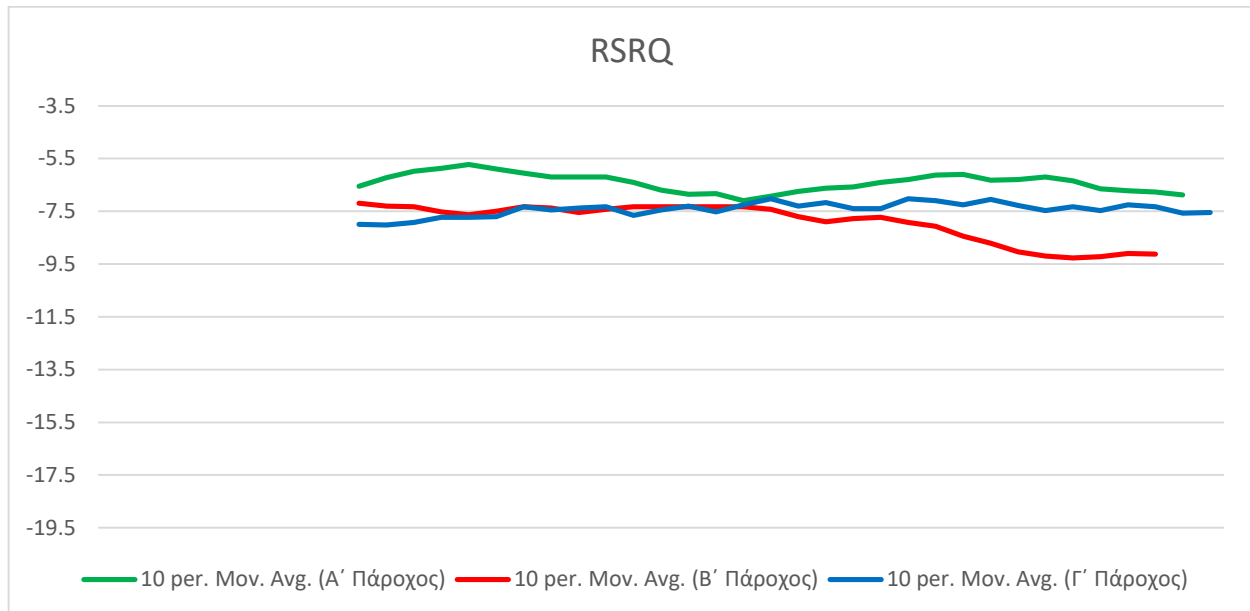
Γράφημα 45 Συνοπτικοί μέσοι όροι RSRP με χρήση κινητού μέσου όρου περιόδου 10 και από τις 4 διαδρομές της ημιαστικής περιοχής για κάθε πάροχο

Ως προς το Rsrp, στον Πάροχο Α' παρατηρούμε, ειδικά στο δεύτερο διάγραμμα, μία συνεχής μεγάλη διαφορά στην ισχύ του σήματος κυρίως στο μέσο της διαδρομής η οποία επηρεάζει και αυξάνει τον συνολικό μέσο όρο του με μία διαφορά 7dB από τον 2°. Στους Παρόχους Β και Γ έχουμε ένα πιο σταθερό γράφημα με τους μέσους όρους των σημάτων να κυμαίνονται σε κοντινές τιμές.



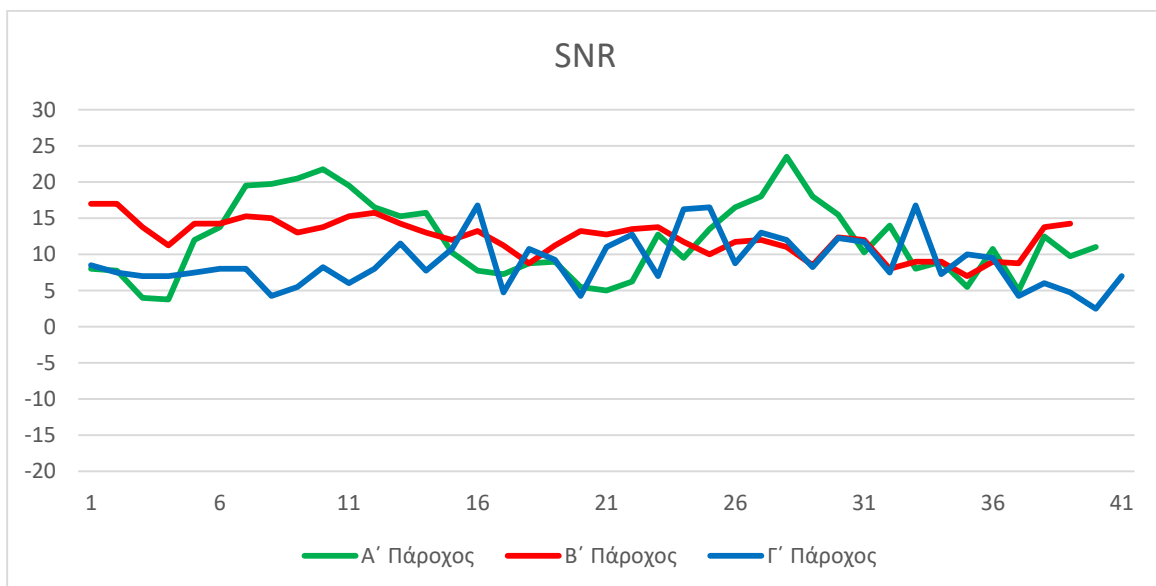
Γράφημα 46 Συνοπτικοί μέσοι όροι RSRQ και από τις 4 διαδρομές της ημιαστικής περιοχής για κάθε πάροχο

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



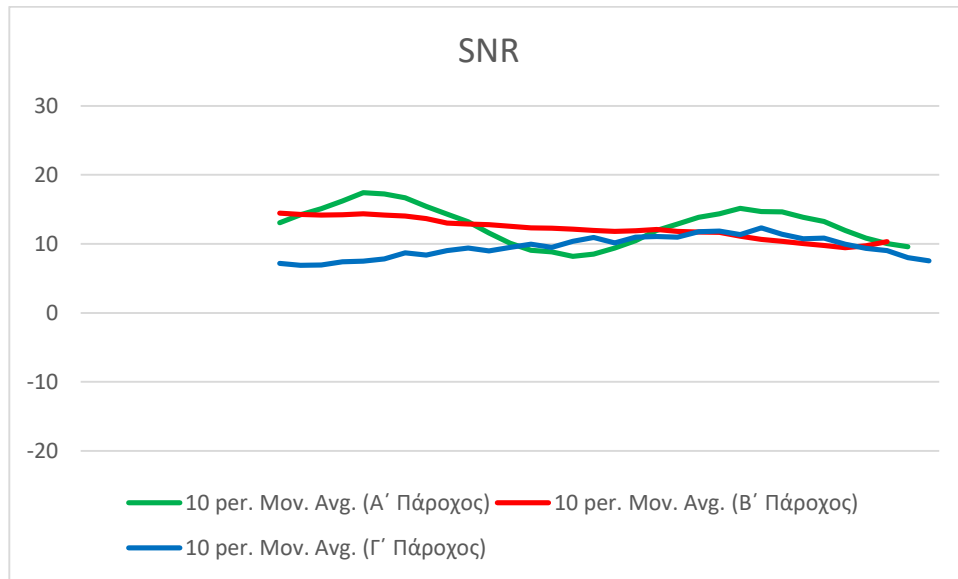
Γράφημα 47 Συνοπτικοί μέσοι όροι RSRQ με χρήση κινητού μέσου όρου περιόδου 10 και από τις 4 διαδρομές της ημιαστικής περιοχής για κάθε πάροχο

Στο δεύτερο διάγραμμα του RSRQ με την χρήση του κινητού μέσου όρου παρατηρούμε πως οι ανώτερες τιμές των παρόχων Β' και Γ' είναι σχεδόν όμοιες με τις κατώτερες τιμές του Α' παρόχου κατί το οποίο βλέπουμε και στους μέσους όρους τιμών. Αρκετά μειωμένη απόδοση παρατηρείται στον Β' Πάροχο καθώς πηγαίνουμε προς το τέλος της διαδρομής μελέτης μας.



Γράφημα 48 Συνοπτικοί μέσοι όροι SNR και από τις 4 διαδρομές της ημιαστικής περιοχής για κάθε πάροχο

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

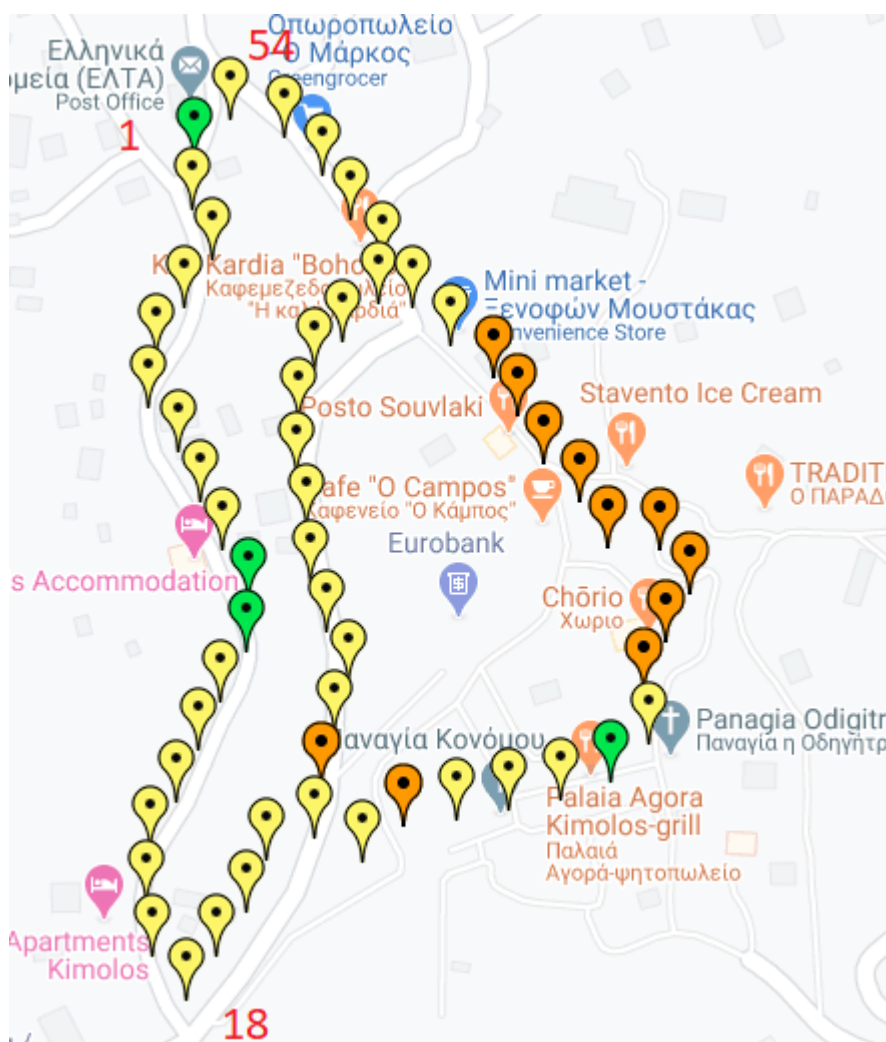


Γράφημα 49 Συνοπτικοί μέσοι όροι SNR με χρήση κινητού μέσου όρου περιόδου 10 και από τις 4 διαδρομές της ημιαστικής περιοχής για κάθε πάροχο

Στα δύο τελευταία γραφήματα του SNR οι τιμές μεταξύ των παρόχων έχουν μεγάλες αυξομειώσεις τις οποίες ξεκαθαρίζει το γράφημα κινητού μέσου όρου. Σε αυτό παρατηρούμε τον Β' πάροχο να έχει ένα πολύ στεθερό γράφημα και τους παρόχους Α και Γ να παρουσιάζουν μικρές διακυμάνσεις. Ως προς τους μέσους όρους ο Α' Πάροχος έχει την καλύτερη τιμή ακολουθώντας με διαφορά 0.3dB ο Β' Πάροχος. Τέλος οι μέσοι όροι του Γ' Παρόχου είναι αρκετά χαμηλότεροι με μία διαφορά 2.7 dB.

5.5 Αγροτική Περιοχή

Οι παρακάτω μετρήσεις διεξήχθησαν για 4 μέρες στο χωριό Κιμώλου, τις ίδιες μεσημβρινές ώρες και στις 3 περιπτώσεις παρόχων κινητής ακολουθώντας την ίδια διαδρομή. Ενδεικτικά να αναφέρουμε ότι η διαδρομή που επιλέχθηκε κάλυπτε ένα μεγάλο μέρος του χωριού και στα σημεία όπου διαμένει ο περισσότερος πληθυσμός του. Στη διαδρομή που βλέπουμε από κάτω, η αριστερή της πλευρά εμπεριέχει και αγροκτήματα επομένως είναι πιο πιθανό να έχει καλύτερο σήμα ενώ όσο πάμε προς τα δεξιά η περιοχή έχει στενά καλντερίμια και δρομάκια.



Εικόνα 42 Εικόνα των λαμβανόμενων σημάτων που συλλέχθηκαν, κατά την διάρκεια μίας διαδρομής στην αγροτικής περιοχή μελέτης, μέσω της ιστοσελίδας απεικόνισης των μετρήσεων

Αρχικά, μέσω γραφημάτων μελετήσαμε αν η ισχύς και η ποιότητα του σήματος για κάθε πάροχο είναι σταθερή στην συνολική διάρκεια των 4 ημερών. Στους παρακάτω 3 πίνακες έχουμε τις μέσες τιμές της κάθε διαδρομής των 4 παραμέτρων όπου συλλέγαμε μαζί με την μέγιστη απόκλιση μεταξύ της

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

μεγαλύτερης και της μικρότερης τιμής. Από τους πίνακες αυτούς μπορούμε να διαπιστώσουμε κατά πόσο σταθερό σήμα προσφέρει κάθε πάροχος στις 4 ημέρες συλλογής.

Α' πάροχος κινητής τηλεφωνίας

Πίνακας 30 Πίνακας μέσω των όρων τιμών RSSI,RSRP,RSRQ,SNR ανά ημέρα του Α' Παρόχου στην αγροτική περιοχή

Ημερομηνία	RSSI (dBm)	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	SNR (dB)
31/7	-82.451	-110.471	-8.47059	14.58431
1/8	-80.8113	-108.571	-8.20408	15.29388
2/8	-81.4444	-108.76	-8.44	14.298
3/8	-83.6275	-111.404	-9.14894	13.91064
Απόκλιση	3.36 %	2.54 %	10.24 %	9.02 %

Β' πάροχος κινητής τηλεφωνίας

Πίνακας 31 Πίνακας μέσω των όρων τιμών RSSI,RSRP,RSRQ,SNR ανά ημέρα του Β' Παρόχου στην αγροτική περιοχή

Ημερομηνία	RSSI (dBm)	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	SNR (dB)
31/7	-72.0741	-96	-7.11111	24.11481
1/8	-74.7407	-100.778	-8.87037	20.56667
2/8	-75.7407	-103.148	-9.25926	17.62593
3/8	-75.6667	-101.037	-8.44444	20.07407
Απόκλιση	4.84%	6.92%	23.13%	26.91%

Γ' πάροχος κινητής τηλεφωνίας

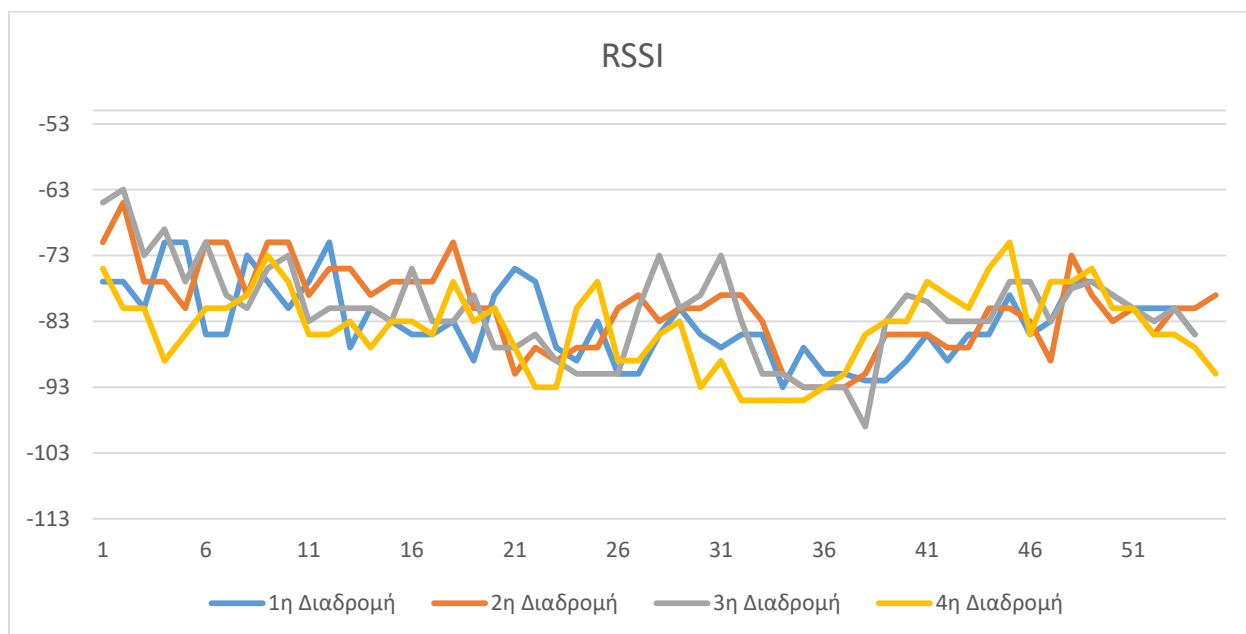
Πίνακας 32 Πίνακας μέσω των όρων τιμών RSSI,RSRP,RSRQ,SNR ανά ημέρα του Γ' Παρόχου στην αγροτική περιοχή

Ημερομηνία	RSSI (dBm)	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	SNR (dB)
31/7	-73.1429	-99.4464	-9.125	20.34286
1/8	-74.6429	-100.179	-8.64286	19.64286
2/8	-72.25	-98.0179	-8.69643	22.17857
3/8	-73.6786	-99.5179	-8.53571	20.70357
Απόκλιση	3.2%	2.15%	6.46%	11.41%

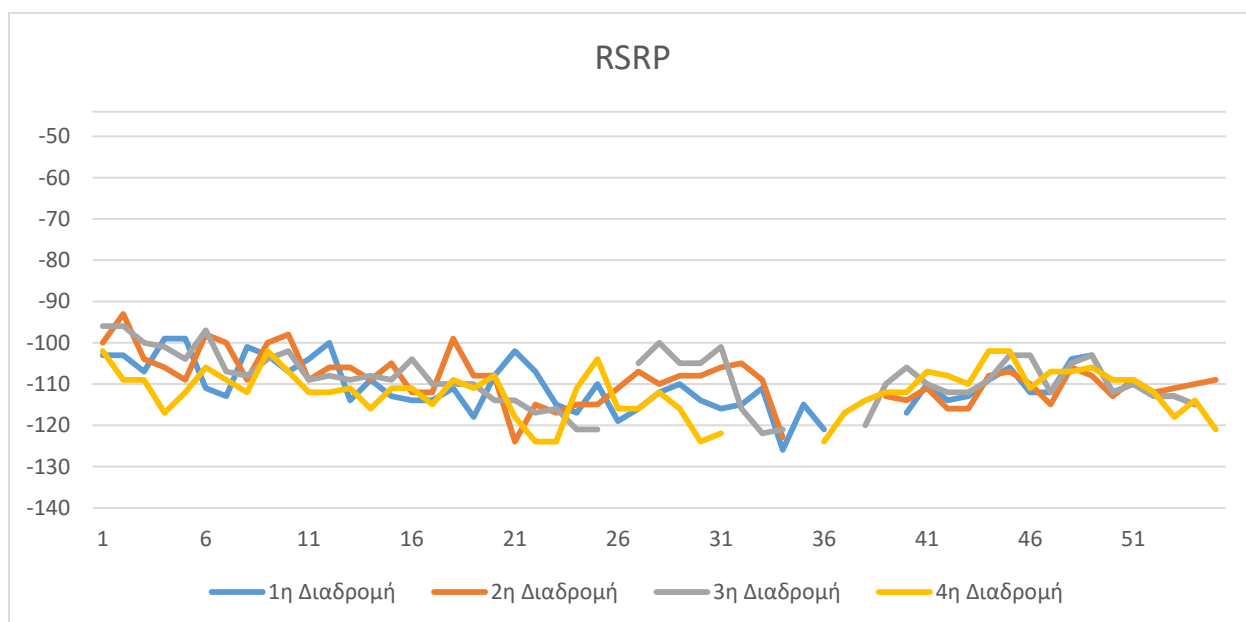
Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

5.5.1 Μετρήσεις Παρόχου Α΄

Τις παραπάνω μεσαίες τιμές μπορούμε να τις δούμε αποτυπωμένες καλύτερα στα παρακάτω διαγράμματα αναλυτικότερα από τις 4 διαδρομές.

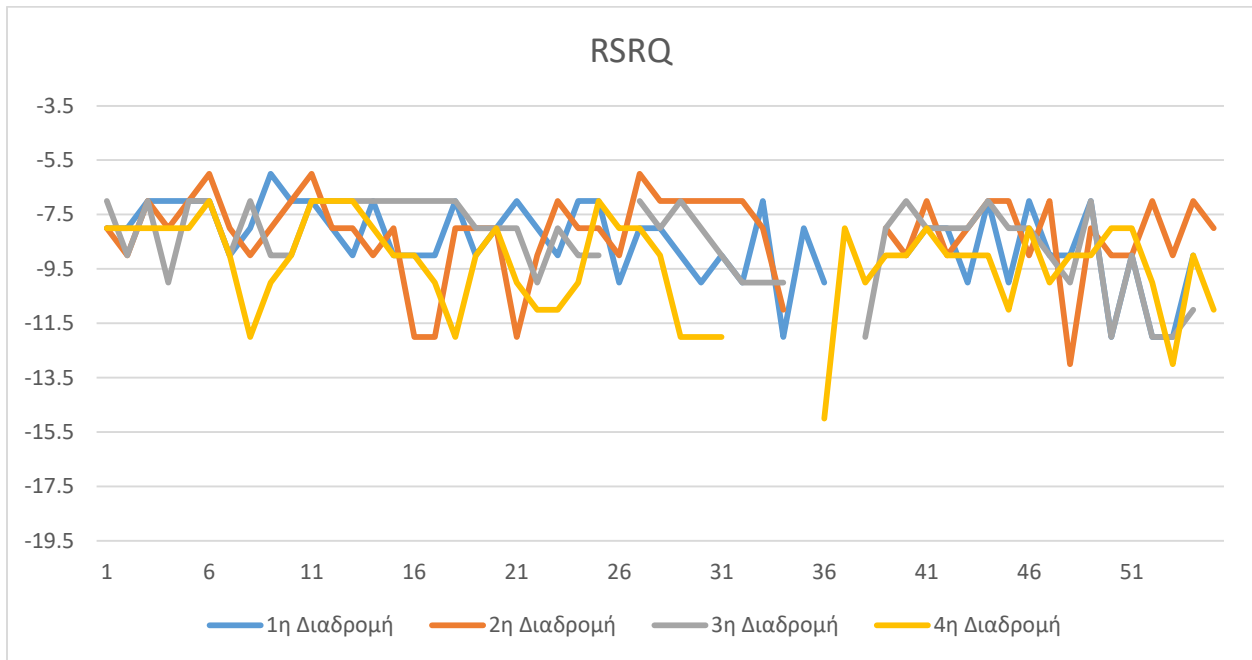


Γράφημα 50 Γράφημα RSSI αγροτικής περιοχής Α΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας

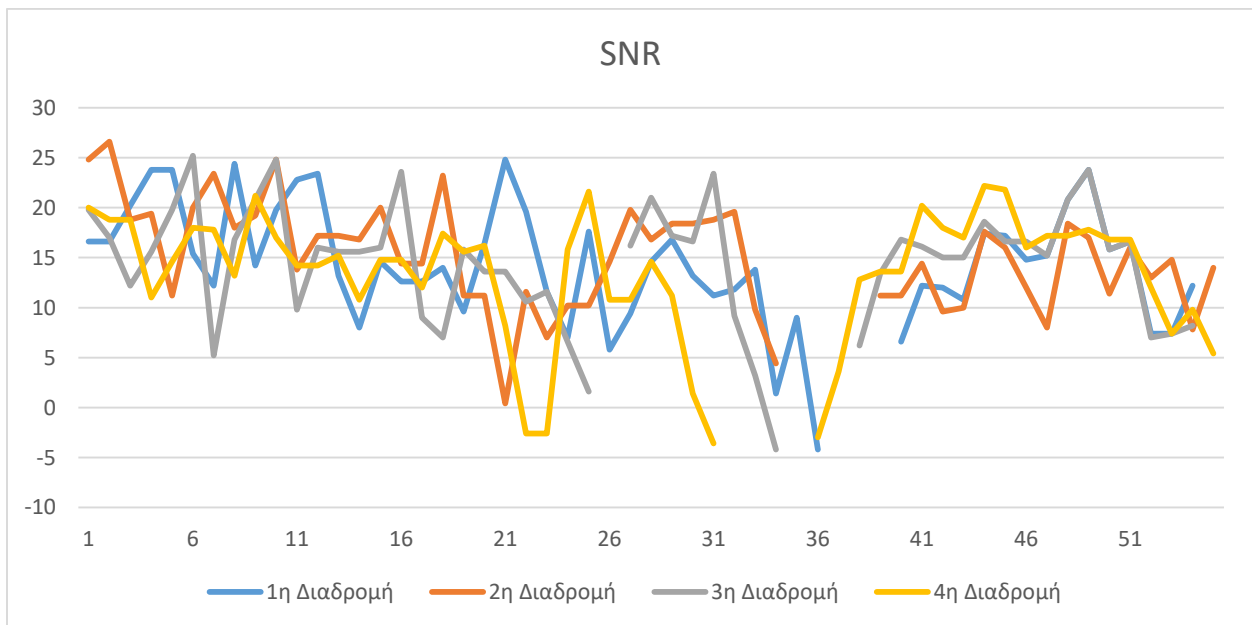


Γράφημα 51 Γράφημα RSRP αγροτικής περιοχής Α΄ Παρόχου κινητής τηλεφωνίας

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



Γράφημα 52 Γράφημα RSRQ αγροτικής περιοχής Α' Παρόχου κινητής τηλεφωνίας

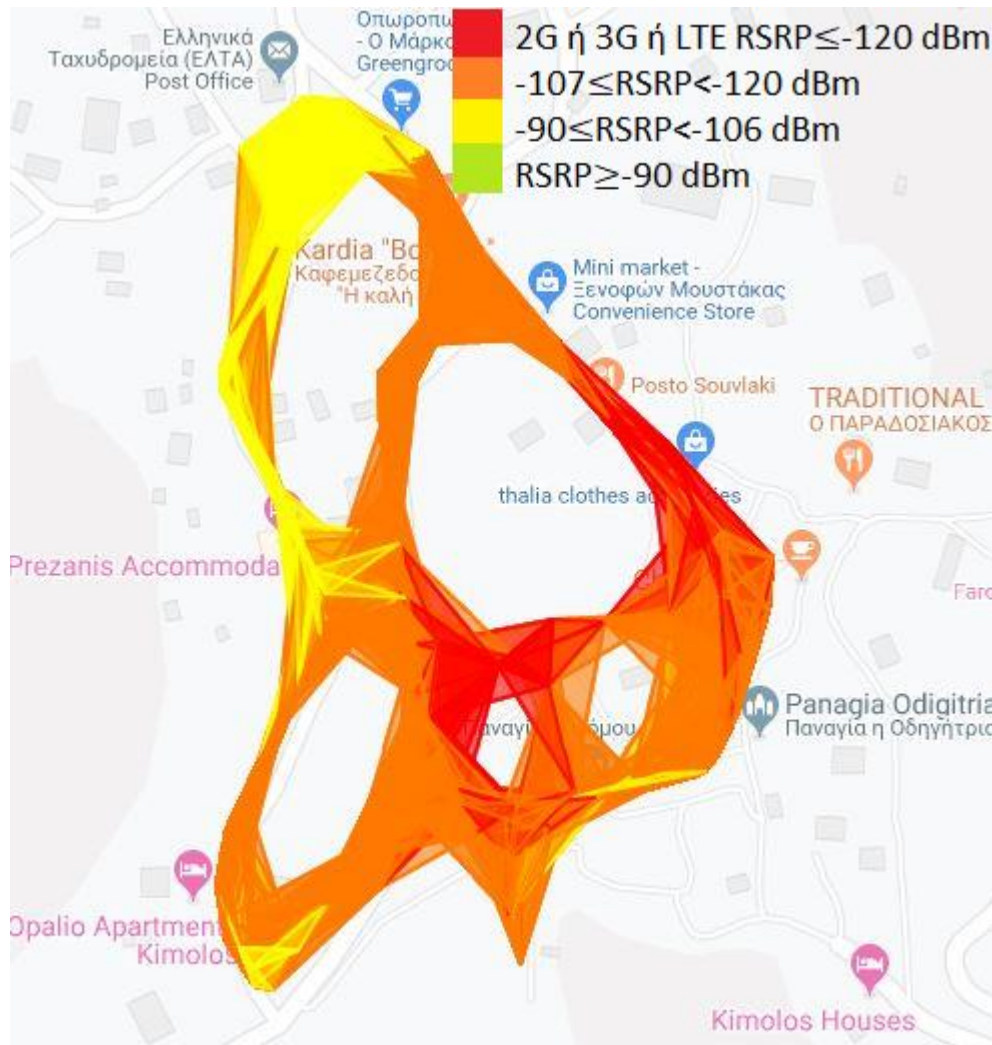


Γράφημα 53 Γράφημα SNR αγροτικής περιοχής Α' Παρόχου κινητής τηλεφωνίας

Στα σημεία στα οποία το διάγραμμα διακόπτεται έχουμε διακοπή κάλυψης 4G και το σήμα γίνεται 3G. Για τον λόγο αυτό παύει η συλλογή μεταβλητών που σχετίζονται αποκλειστικά με το LTE.

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

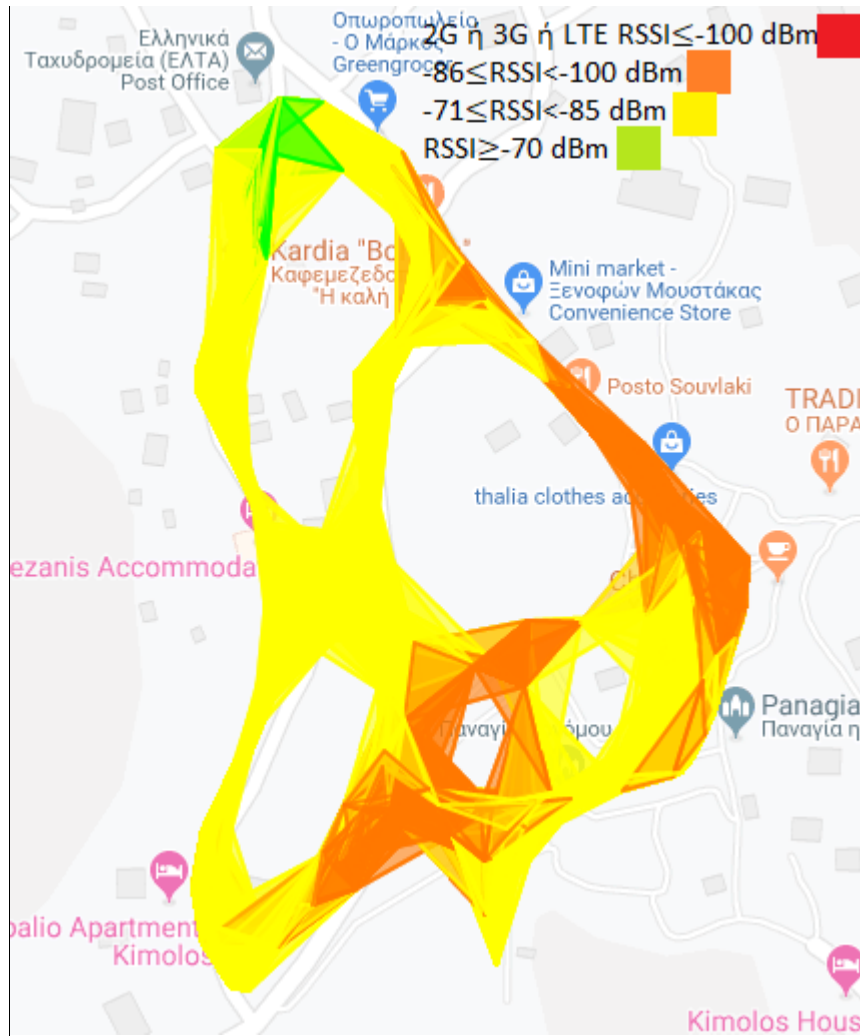
Εξάγοντας ένα μέσο όρο από τις 4 διαδρομές, μπορέσαμε να κατασκευάσουμε χάρτες κάλυψης της περιοχής βάση του RSSI και του RSRP. Οι χάρτες κάλυψης είναι οι ακόλουθοι :



Εικόνα 43 Χάρτης κάλυψης βάση του RSRP

Στον παραπάνω χάρτη ο μέσος όρος του RSRP ήταν -109.802 dBm και όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε υπήρχαν αρκετά σημεία όπου η ισχύς του LTE σήματος ήταν αρκετά ασθενής. Σε λίγα σημεία το σήμα υποβιβάστηκε σε UMTS οπότε στα σημεία αυτά οι ταχύτητες τόσο του downlink όσο και του uplink θα είναι αρκετά χαμηλότερες.

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



Εικόνα 44 Χάρτης κάλυψης βάση του RSSI

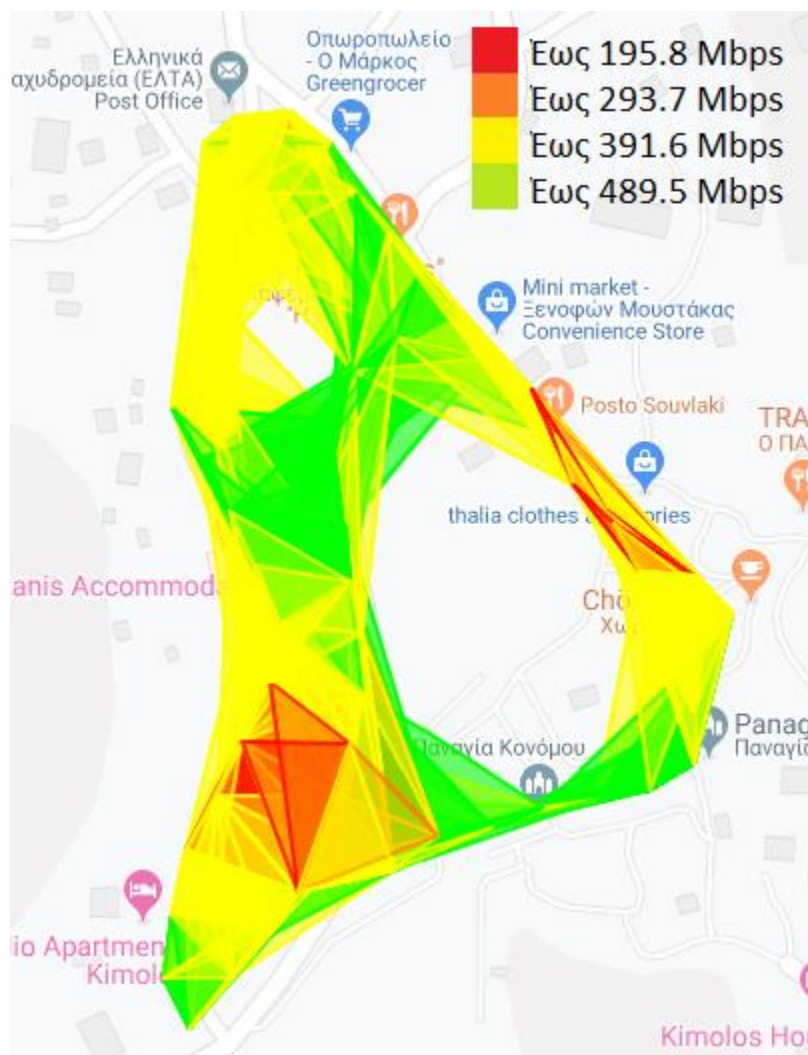
Ο παραπάνω χάρτης έχει δημιουργηθεί με βάση το RSSI το οποίο μας δίνει μια πιο καλή εικόνα για την ποιότητα του σήματος. Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας με τον μέσο όρο τιμών για την ποιότητα του σήματος της διαδρομής του χάρτη.

Πίνακας 33 Συνολικοί μέσοι όροι για Α΄ Πάροχο στην αγροτική περιοχή

Average RSSI	-82.0835 dBm
Average RSRP	-109.802 dBm
Average RSRQ	-8.5659 dB
Average RSSNR	13.69561 dB

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

Παρά την χαμηλότερη ισχύ και ποιότητα σήματος συγκριτικά με τις άλλες ο Α΄ Πάροχος είναι ο μοναδικός ο οποίος κάνει χρήση τριών bands στην περιοχή. Ο παρακάτω χάρτης έχει δημιουργηθεί ώστε να μπορούμε να διακρίνουμε τις τοποθεσίες στις οποίες έχουμε κάλυψη από 1,2 ή 3 ζώνες.



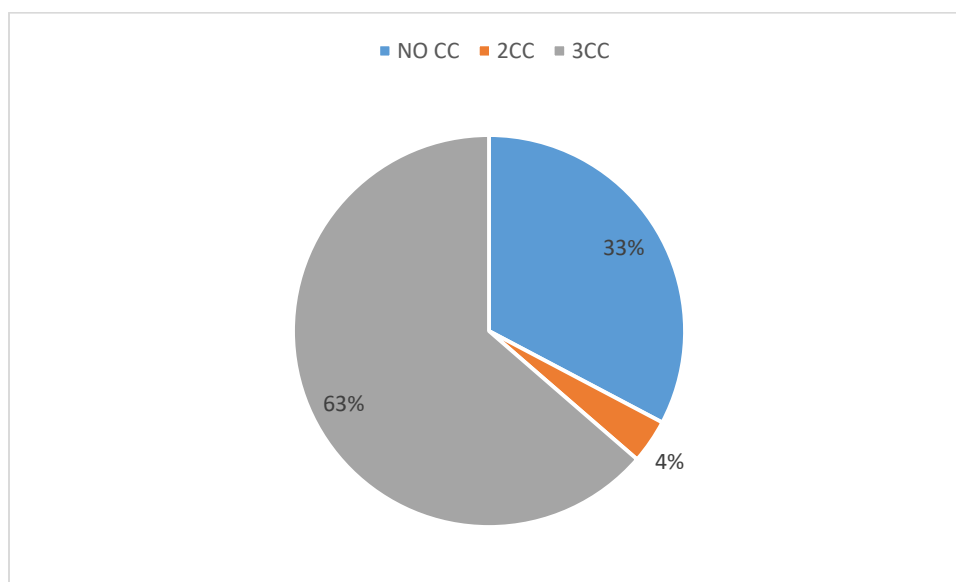
Εικόνα 45 Χάρτης απεικόνισης του υπολογισμένου throughput του παρόχου Α΄

Όπως αναφέραμε και στο υποκεφάλαιο της αστικής περιοχής τα χρώματα έχουν δοθεί ανάλογα με τον μέσο όρο των τριγώνων τα οποία έχουν δημιουργηθεί από κορυφές markers σημάτων. Βέβαια οι παρακάτω τιμές αποτελούν την μέγιστη δυνατή ταχύτητα κατερχόμενης ζεύξης η οποία σαφώς δεν μπορεί να επιτευχθεί καθώς η ισχύς κυρίως του σήματος αλλά και η ποιότητα του βρίσκεται σε αρκετά χαμηλές τιμές όπου δεν επαρκούν ώστε να επιτευχθούν τέτοιες ταχύτητες.

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

Πίνακας 34 Αντιστοίχιση χρώματος – μέγιστου throughput για την δημιουργία χάρτη

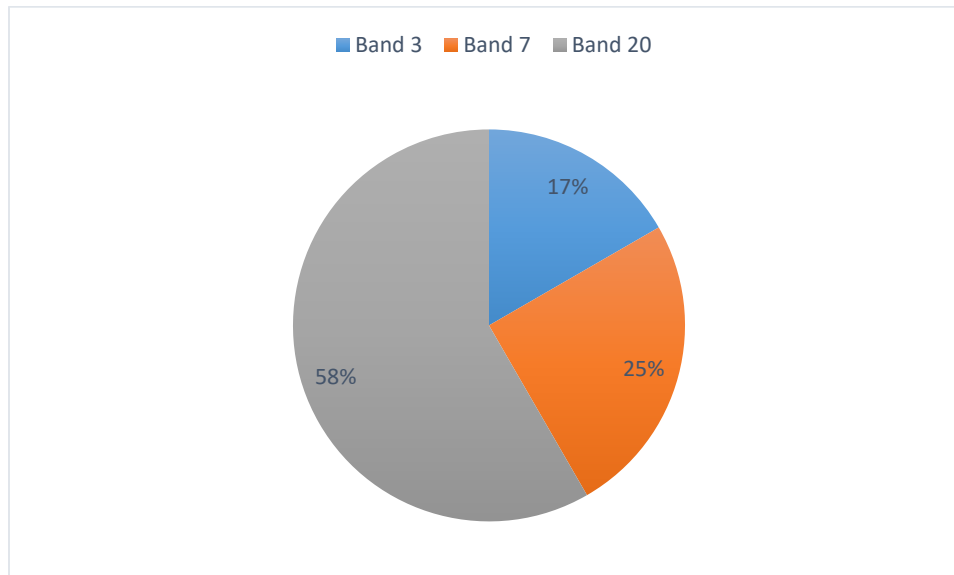
Χρώμα	Throughput
Κόκκινο	Έως 195.8 Mbps
Πορτοκαλί	Έως 293.7 Mbps
Κίτρινο	Έως 391.6 Mbps
Πράσινο	Έως 489.5 Mbps



Γράφημα 54 Διάγραμμα ποσοστού μέσου όρου κάλυψης με Carrier Aggregation A' παρόχου

Μεγάλες διαφορές σε σχέση με την αστική περιοχή έχουμε στην επιλογή των bands όπου έκανε η συσκευή μας κατά το cell selection. Να υπενθυμίσουμε, ότι κατά την διαδικασία επιλογής της κεραιάς από την οποία θα λαμβάνει βασικά σήμα, η συσκευή μας αναζητά και κλειδώνει σε αυτό που βάση των τιμών ισχύος και ποιότητας είναι το καλύτερο. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται συνεχώς από την συσκευή μας με σκοπό να έχουμε πάντα 'κλειδωμένο' το καλύτερο κελί. Συγκεκριμένα η ζώνη 20 όπου στην αστική περιοχή αποτελούσε την βασική ζώνη της συσκευής μόλις στο 6% στην περίπτωση της αγροτικής είναι στο 58%.

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



Γράφημα 55 Διάγραμμα μέσου όρου κάλυψης διαθέσιμων ζωνών συχνοτήτων Α' παρόχου

Όπως παρατηρούμε οι μεσαίες τιμές και των τριών bands είναι σε μέτρια επίπεδα. Από τα αποτελέσματα που έχουν προηγηθεί και γνωρίζοντας ότι ο πάροχος αυτός χρησιμοποιεί μέγιστη διαμόρφωση QAM-256, MIMO 2x2 και έχοντας bandwidth 20MHz, 20MHz, 10MHz στις ζώνες συχνοτήτων 3,7 και 20 αντίστοιχα έχουμε τα ακόλουθα:

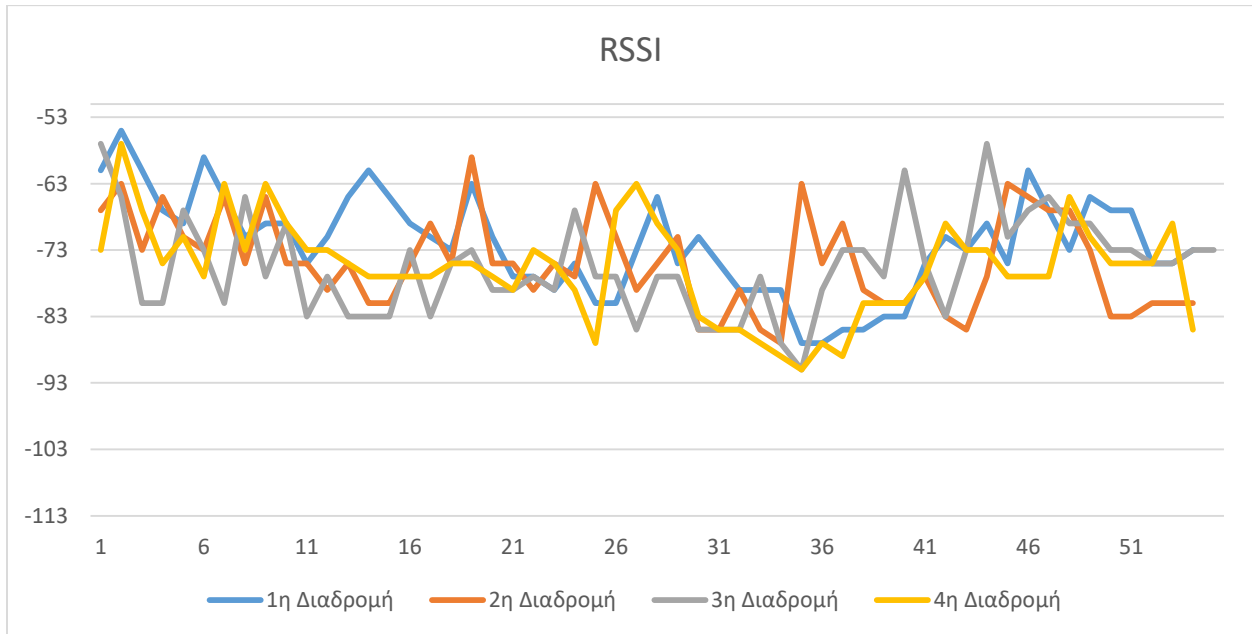
- Στο 19.14% της κάλυψης έχουμε Downlink throughput έως 97.9 Mbps χωρίς Carrier Aggregation μέσω της ζώνης συχνότητας 20
- Στο 13.86% της κάλυψης έχουμε Downlink throughput έως 195.8 Mbps μέσω είτε της ζώνης συχνότητας 3 είτε της 7
- Στο 4% της κάλυψης έχουμε μέσω Carrier Aggregation στις ζώνες συχνοτήτων 3 και 7, downlink throughput έως 391.6 Mbps
- Τέλος στο 63% της κάλυψης έχουμε μέσω Carrier Aggregation στις ζώνες συχνοτήτων 3, 7 και 20, downlink throughput έως 489.5 Mbps

Συγκριτικά με τον Πειραιά (Αστική περιοχή) παρατηρούμε ότι υπάρχει μεγαλύτερη κάλυψη 3CA. Συγκεκριμένα στην αγροτική περιοχή έχουμε 63% της συνολικής περιοχής που μελετήθηκε ταυτόχρονη κάλυψη από 3 ζώνες συχνοτήτων έναντι μόλις 4% στην αστική περιοχή ενώ η κάλυψη από μια μόνο ζώνη συχνότητας γίνεται στο 33% της περιοχής μελέτης έναντι 45% στην αστική.

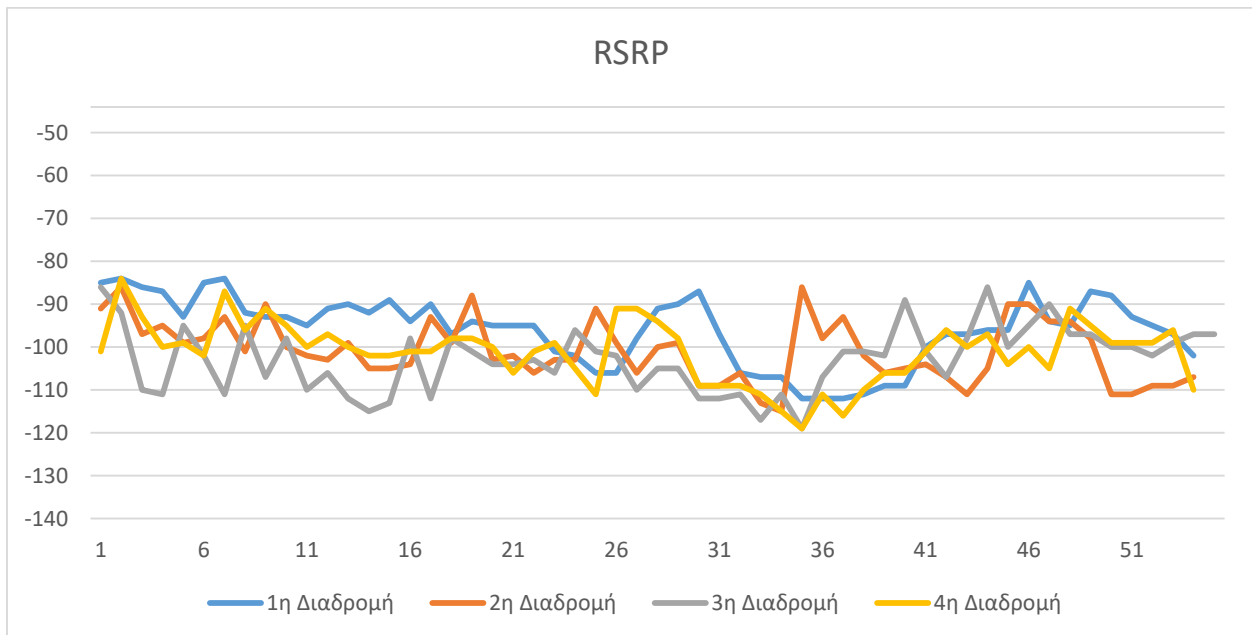
Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

5.5.2 Μετρήσεις Παρόχου Β'

Ακόλουθα έχουμε τα διαγράμματα από τις 4 διαδρομές.

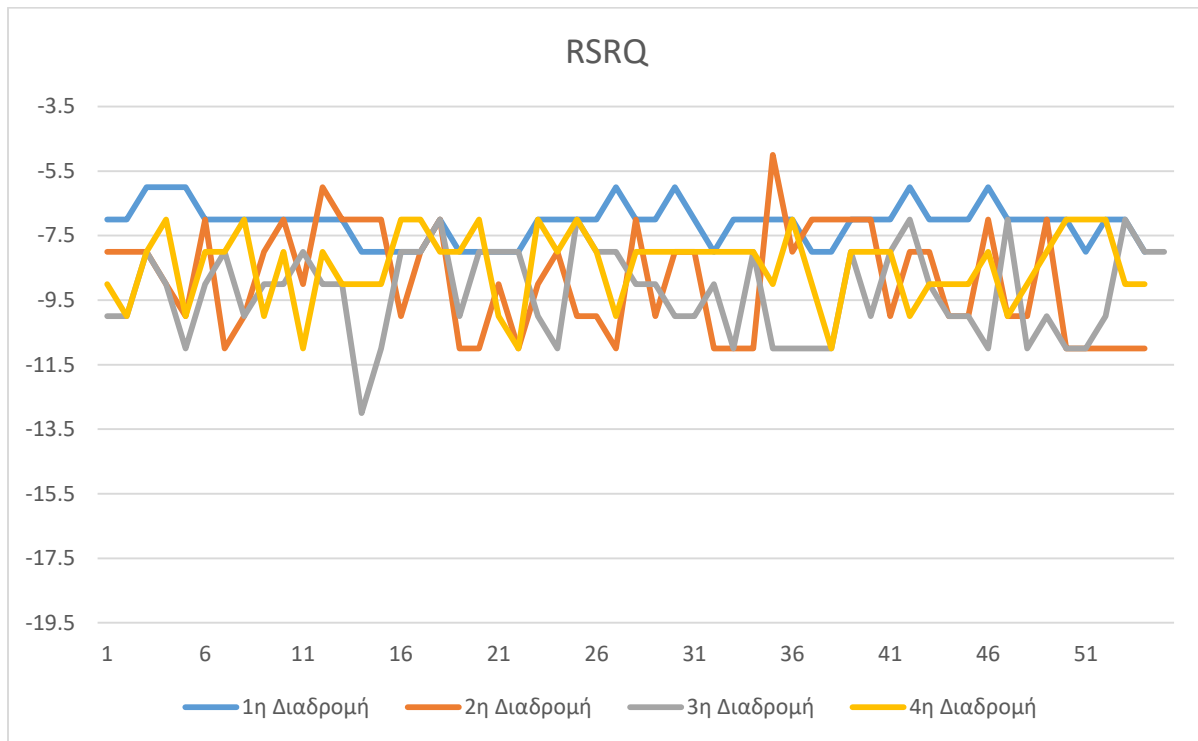


Γράφημα 56 Γράφημα RSSI αγροτικής περιοχής Β' Παρόχου κινητής τηλεφωνίας

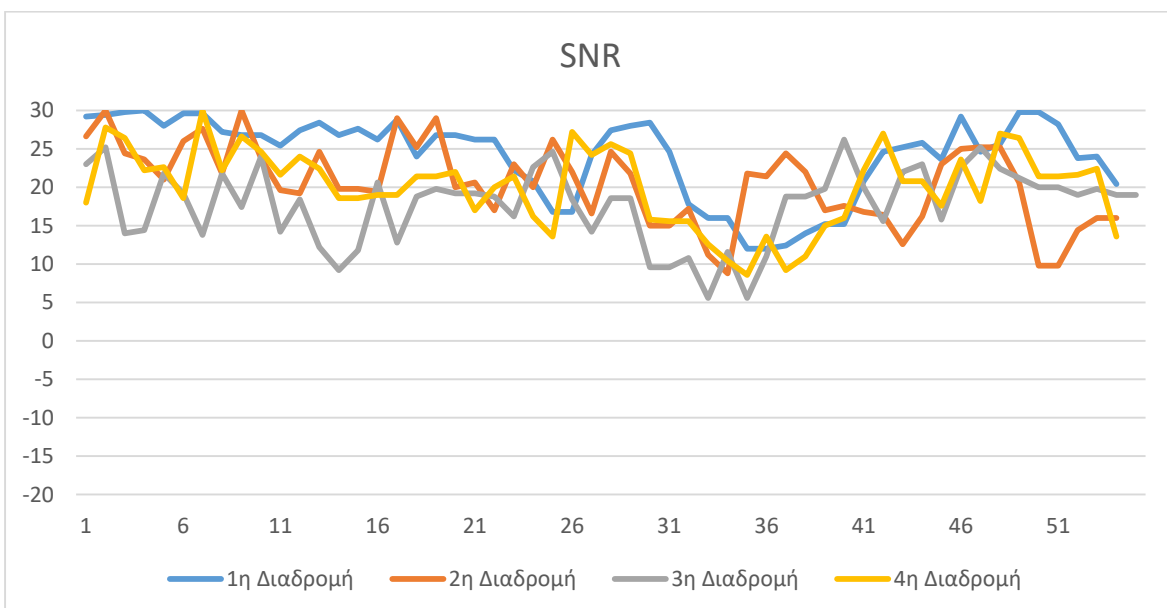


Γράφημα 57 Γράφημα RSRP αγροτικής περιοχής Β' Παρόχου κινητής τηλεφωνίας

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

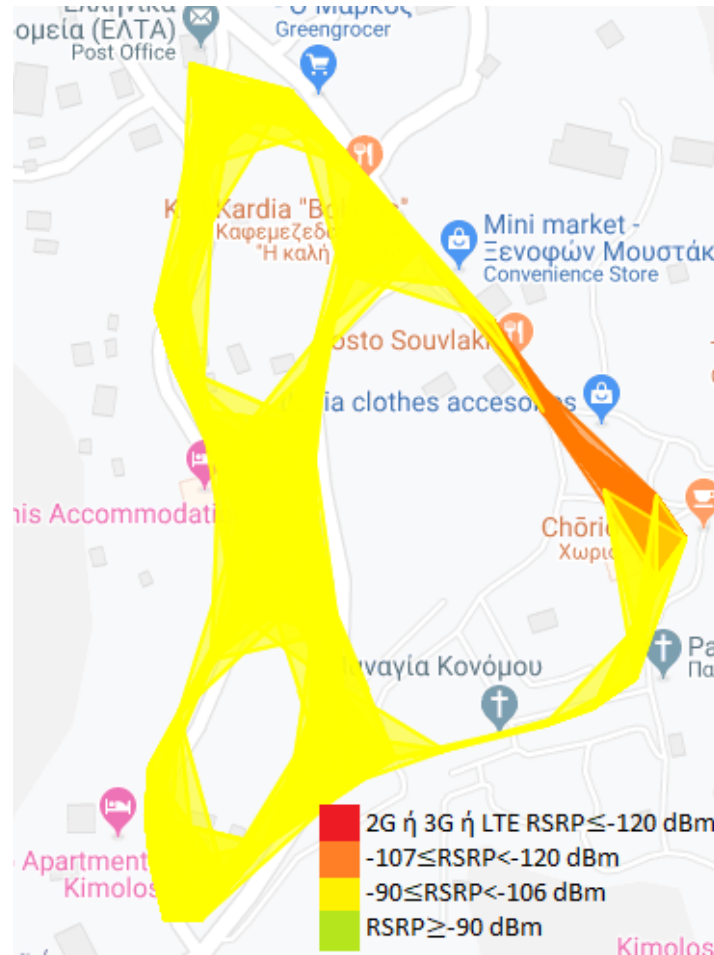


Γράφημα 58 Γράφημα RSSQ αγροτικής περιοχής Β' Παρόχου κινητής τηλεφωνίας



Γράφημα 59 Γράφημα SNR αγροτικής περιοχής Β' Παρόχου κινητής τηλεφωνίας

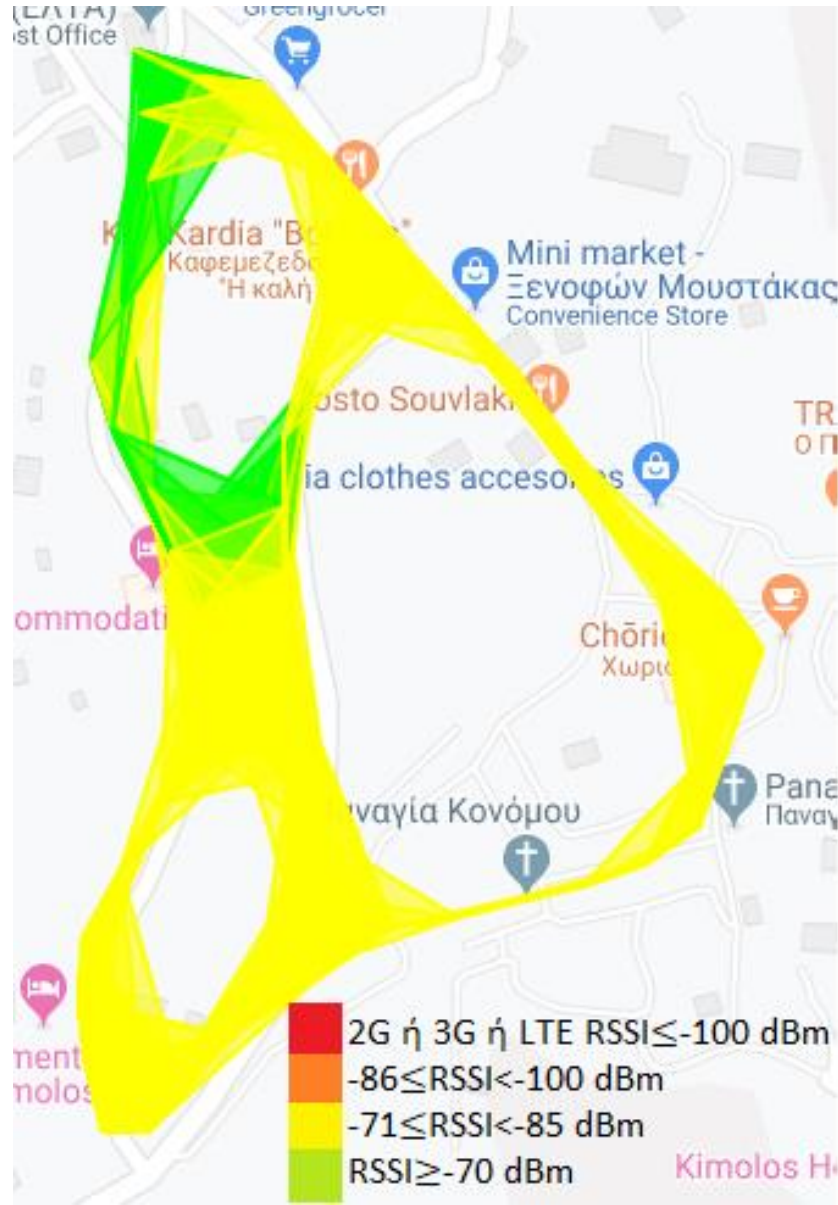
Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



Εικόνα 46 Χάρτης κάλυψης βάση του RSRP

Στον παραπάνω χάρτη παρατηρούμε ότι η ισχύς του σήματος του δεύτερου παρόχου κινητής είναι καλύτερη σε όλη την διάρκεια της διαδρομής και ως γίνεται η κάλυψη της περιοχής μόνο από ένα κελί κεραίας.

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



Εικόνα 47 Χάρτης κάλυψης βάση του RSSI

Πίνακας 35 Συνολικοί μέσοι όροι για Β' Πάροχο στην αγροτική περιοχή

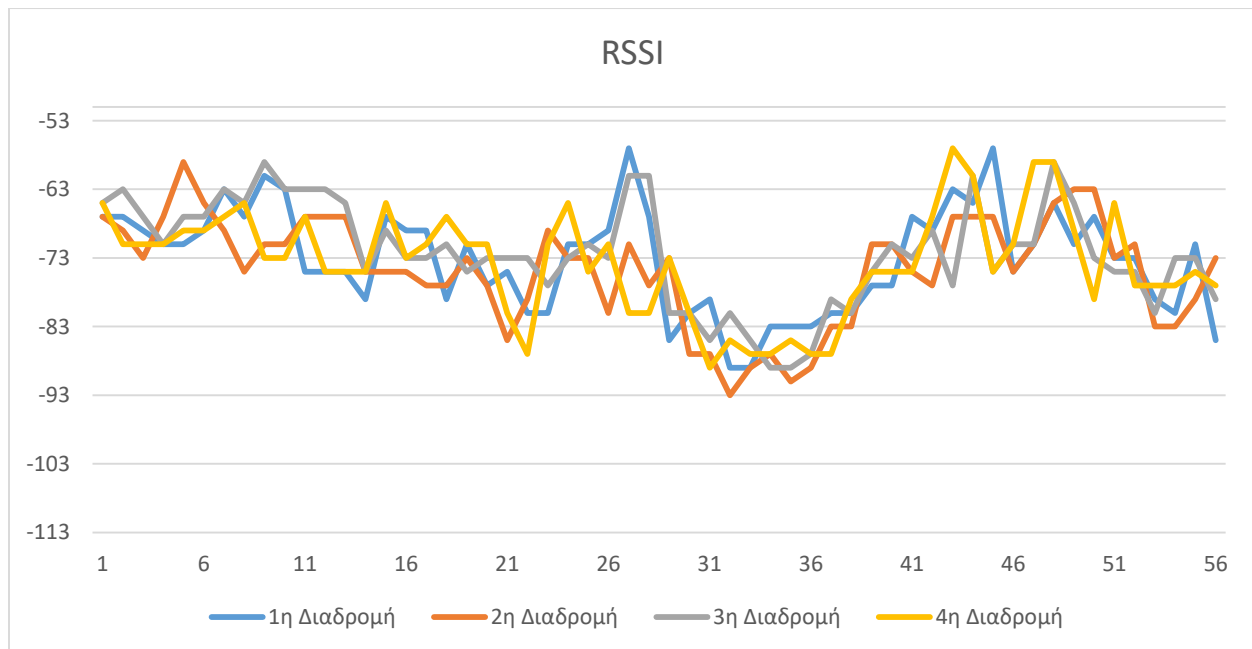
Average RSSI	-74.4815 dBm
Average RSRP	-100.19 dBm
Average RSRQ	-8.43056 dB
Average RSSNR	20.61389 dB

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

Συγκρίνοντας τους παραπάνω μέσους όρους των 2 παρόχων κινητής συμπεραίνουμε ότι ο δεύτερος πάροχος έχει περίπου 10 φορές καλύτερο σήμα (≈ 10 dB), τόσο σε ισχύ σήματος όσο και σε ποιότητα, σε σχέση με την πρώτη.

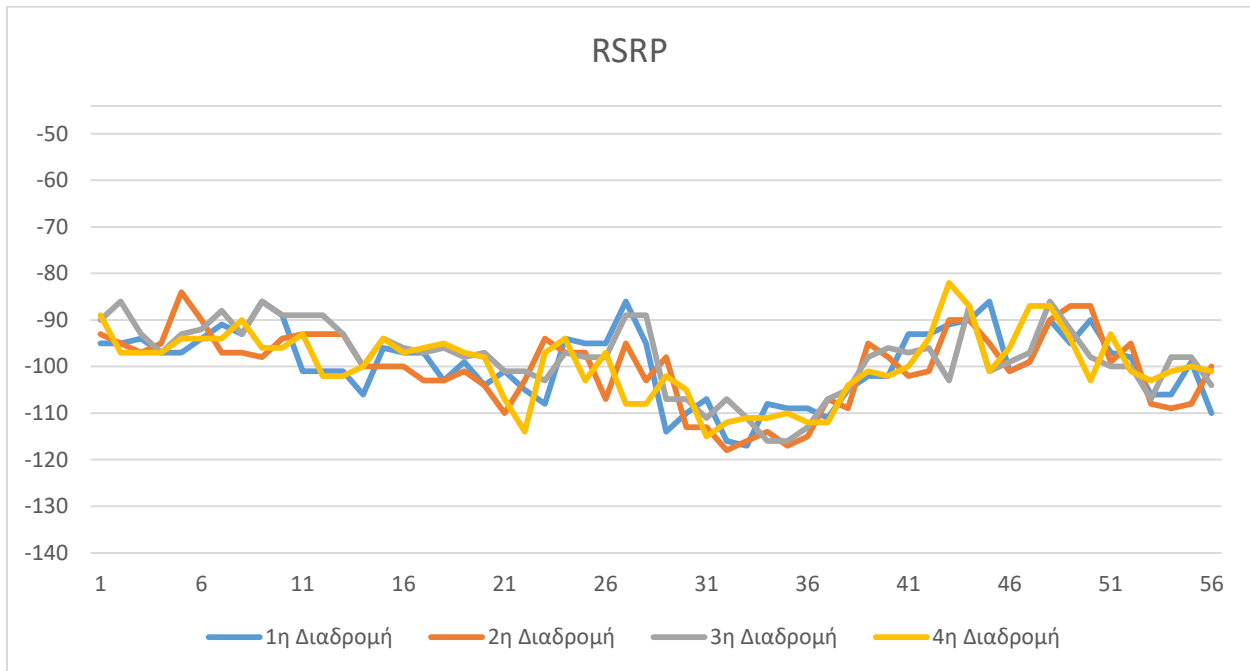
5.5.3 Μετρήσεις Παρόχου Γ'

Ακόλουθα έχουμε τα διαγράμματα από τις 4 διαδρομές όπου ελέγξαμε τον Γ' Πάροχο.

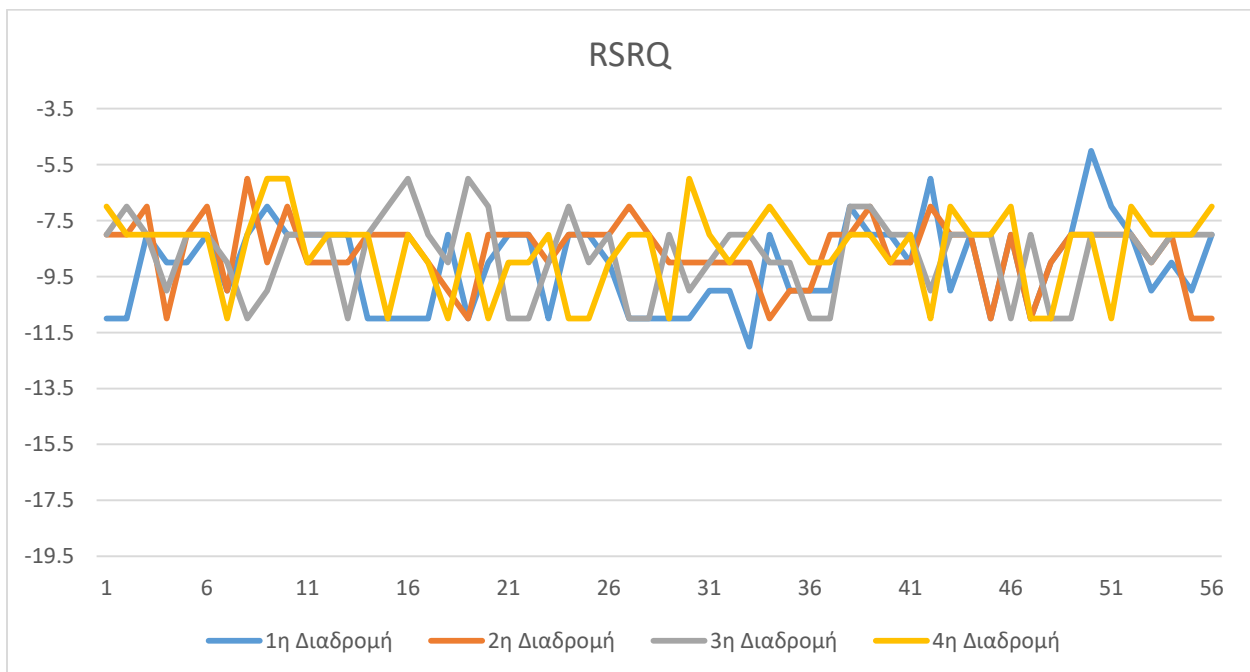


Γράφημα 60 Γράφημα RSSI αγροτικής περιοχής Γ' Παρόχου κινητής τηλεφωνίας

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

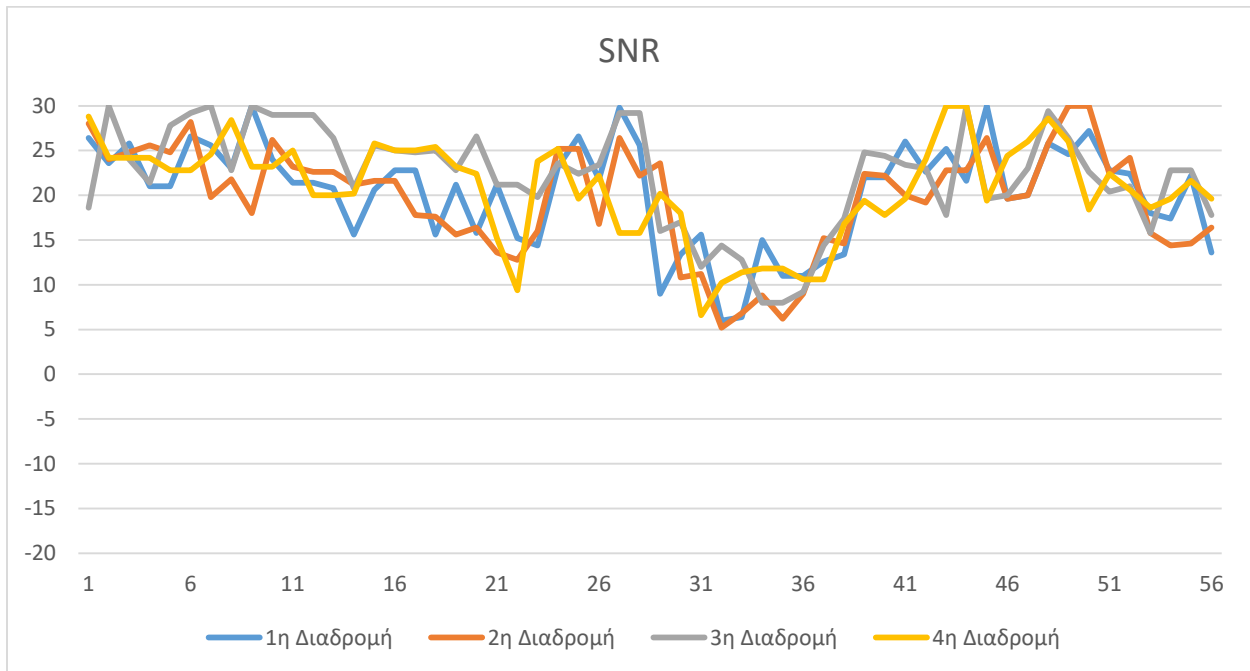


Γράφημα 61 Γράφημα RSRP αγροτικής περιοχής Γ' Παρόχου κινητής τηλεφωνίας



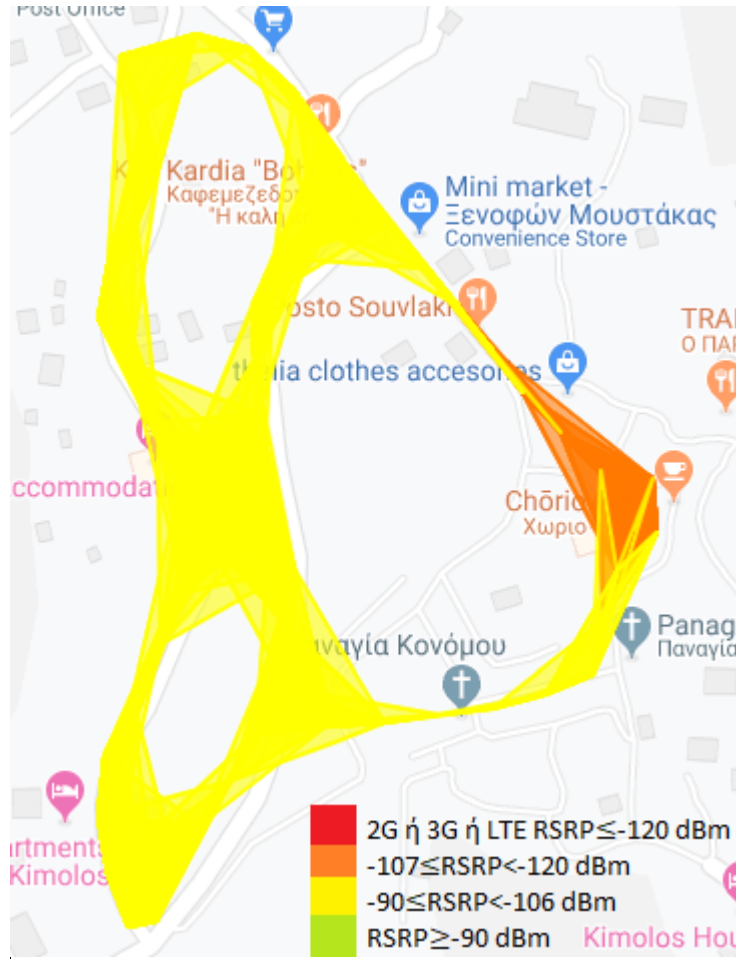
Γράφημα 62 Γράφημα RSRQ αγροτικής περιοχής Γ' Παρόχου κινητής τηλεφωνίας

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



Γράφημα 63 Γράφημα SNR αγροτικής περιοχής Γ' Παρόχου κινητής τηλεφωνίας

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



Εικόνα 48 Χάρτης κάλυψης της βάση του RSRP

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



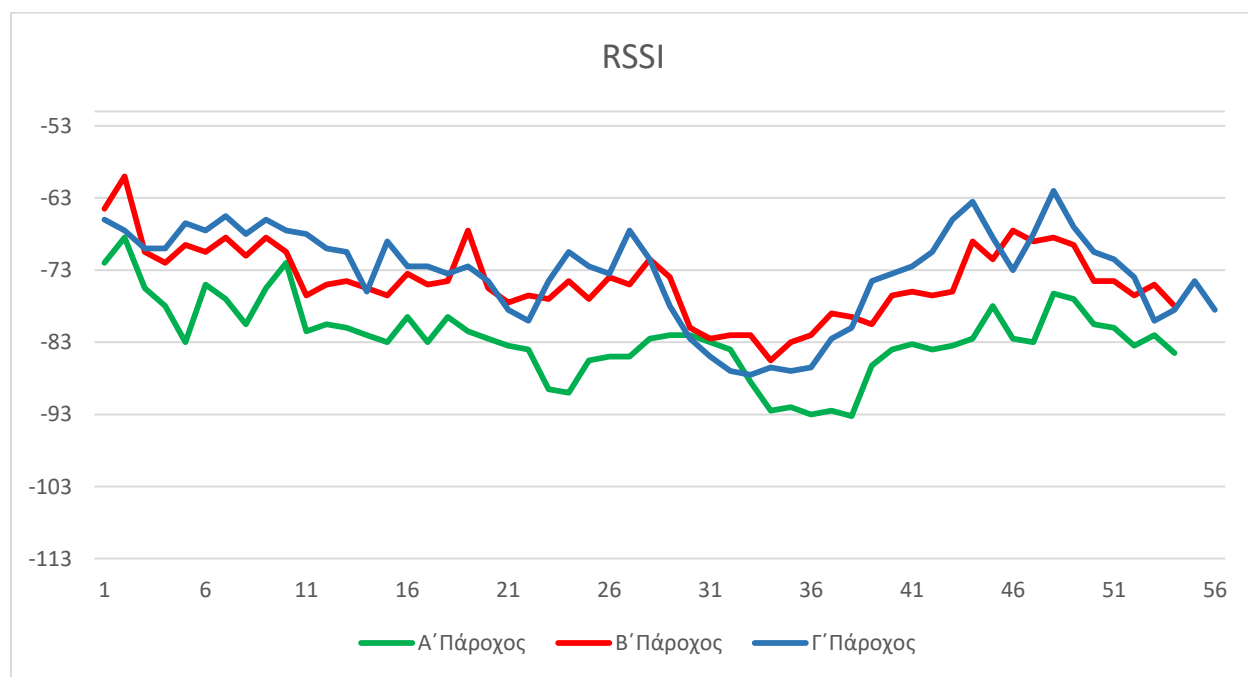
Εικόνα 49 Χάρτης κάλυψης βάση του RSSI

5.5.4 Συμπεράσματα κάλυψης LTE σε Αγροτική περιοχή

Πίνακας 36 Συνολικοί μέσοι όροι ανά πάροχο στην αγροτική περιοχή

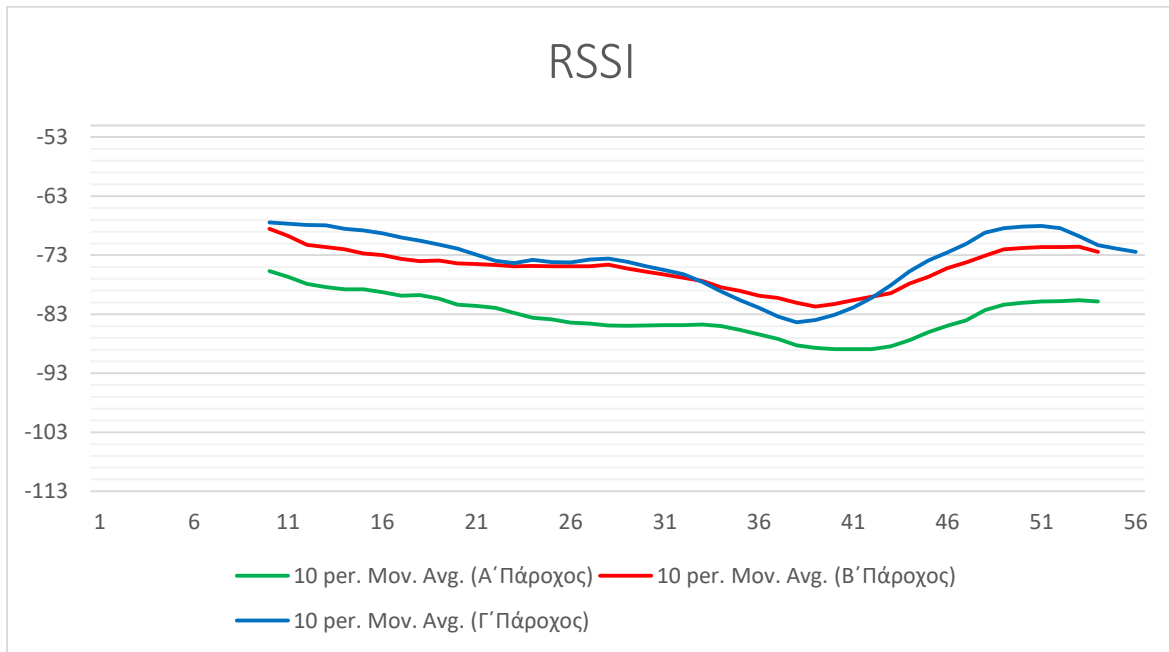
Πάροχος	RSSI (dBm)	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	SNR (dB)
Πάροχος Α'	-82.08355	-109.8015	-8.5659025	14.5217075
Πάροχος Β'	-74.55555	-100.24075	-8.421295	20.59537
Πάροχος Γ'	-73.4286	-99.2903	-8.75	20.716965

Στα παρακάτω 8 γραφήματα αποτυπώνονται συνοπτικά οι μέσοι όροι του κάθε παρόχου κινητής. Έχουν δημιουργηθεί χρησιμοποιώντας πάνω από 600, κοινά και για τους 3 παρόχους, σημεία μέτρησης τα οποία πάρθηκαν ταυτόχρονα κατά την διάρκεια των διαδρομών. Στα 4 γραφήματα απεικονίζονται οι μέσοι όροι για κάθε πάροχο και από τις 4 διαδρομές ενώ στα άλλα 4 με την χρήση κινητού μέσου όρου

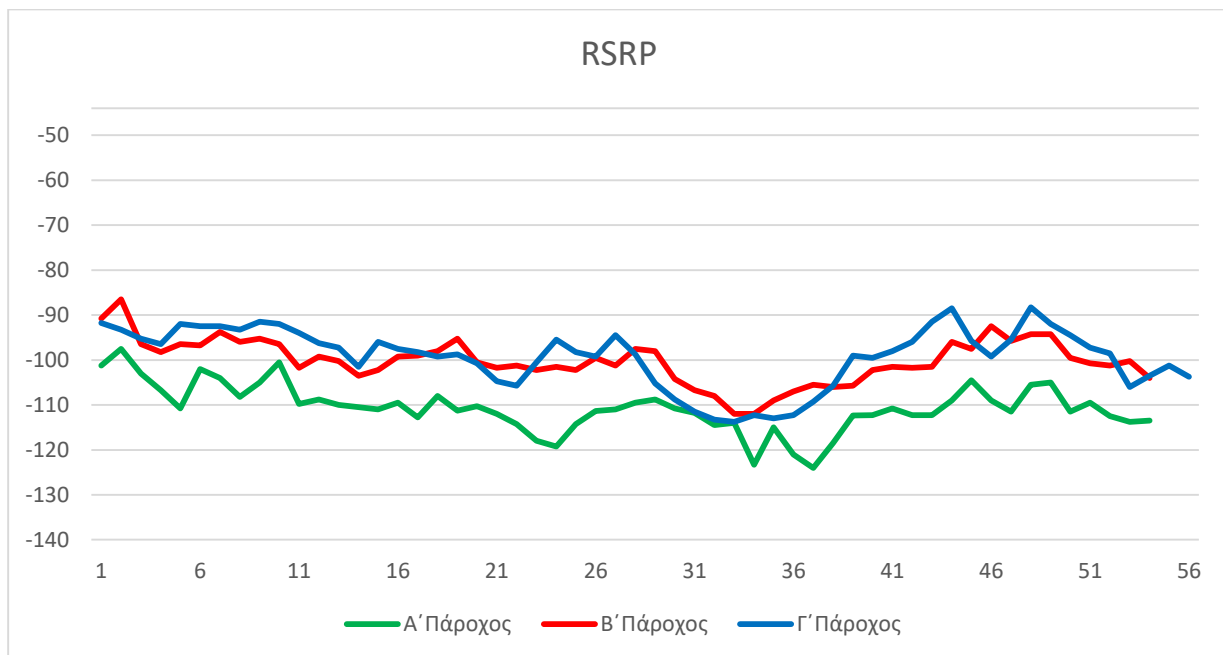


Γράφημα 64 Συνοπτικοί μέσοι όροι RSSI και από τις 4 διαδρομές της αγροτικής περιοχής για κάθε πάροχο

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

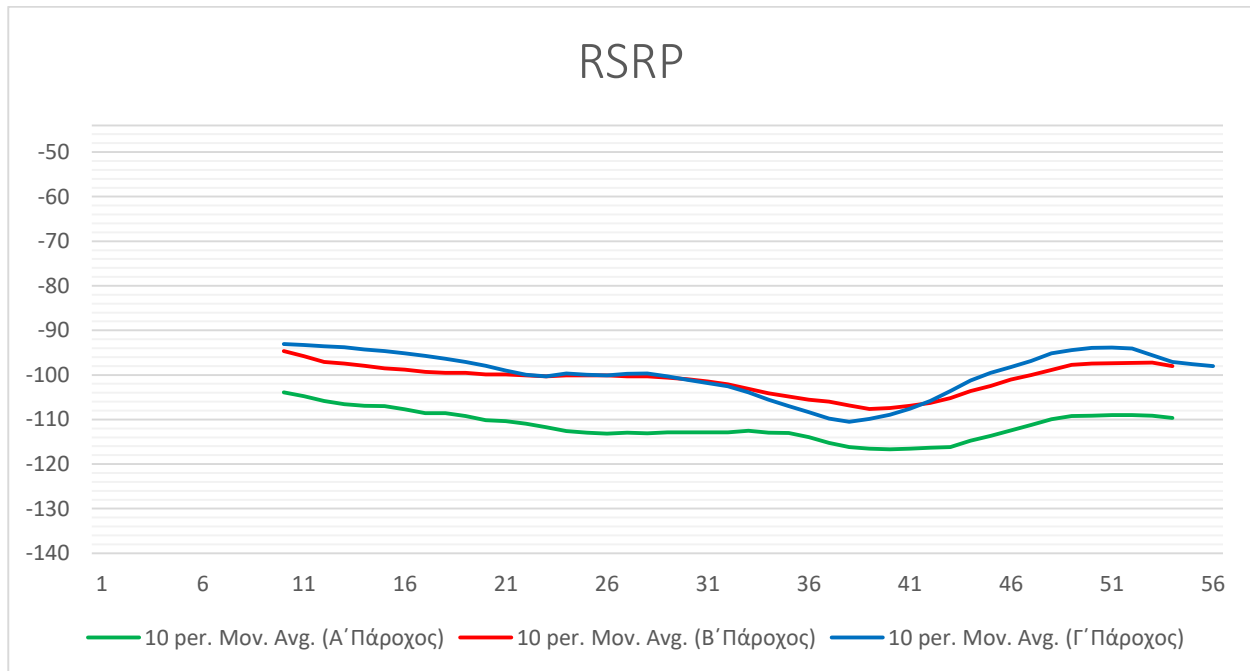


Γράφημα 65 Συνοπτικοί μέσοι όροι RSSI με χρήση κινητού μέσου όρου περιόδου 10 και από τις 4 διαδρομές της αγροτικής περιοχής για κάθε πάροχο

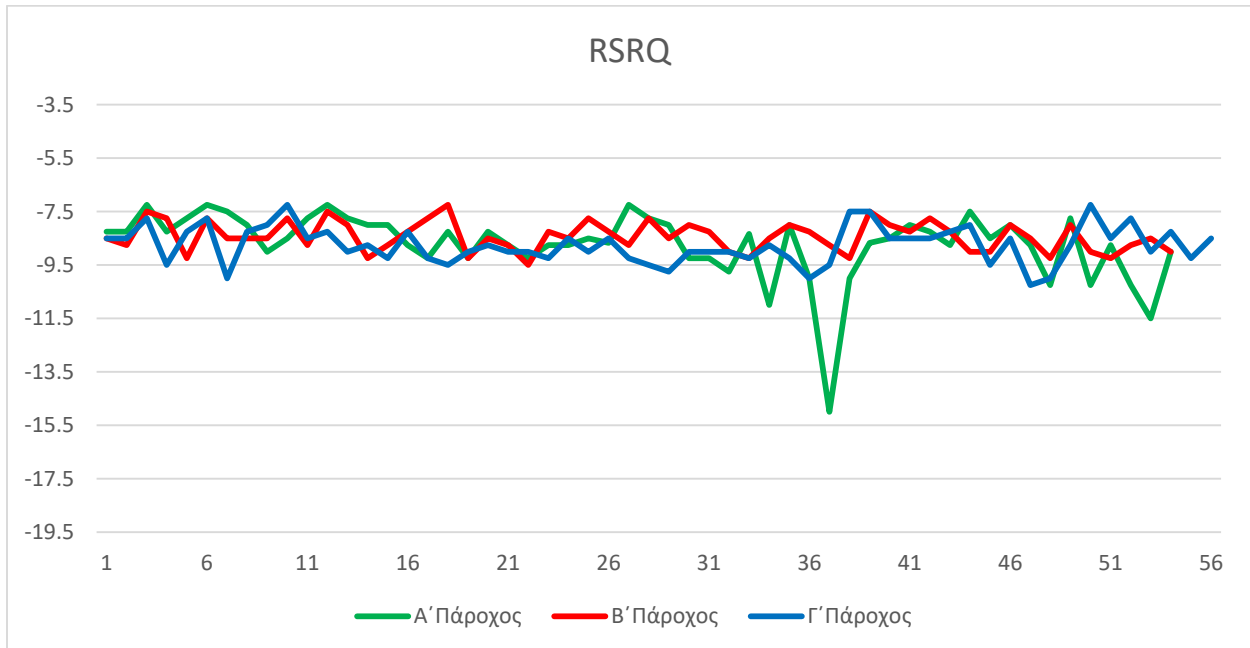


Γράφημα 66 Συνοπτικοί μέσοι όροι RSRP και από τις 4 διαδρομές της αγροτικής περιοχής για κάθε πάροχο

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

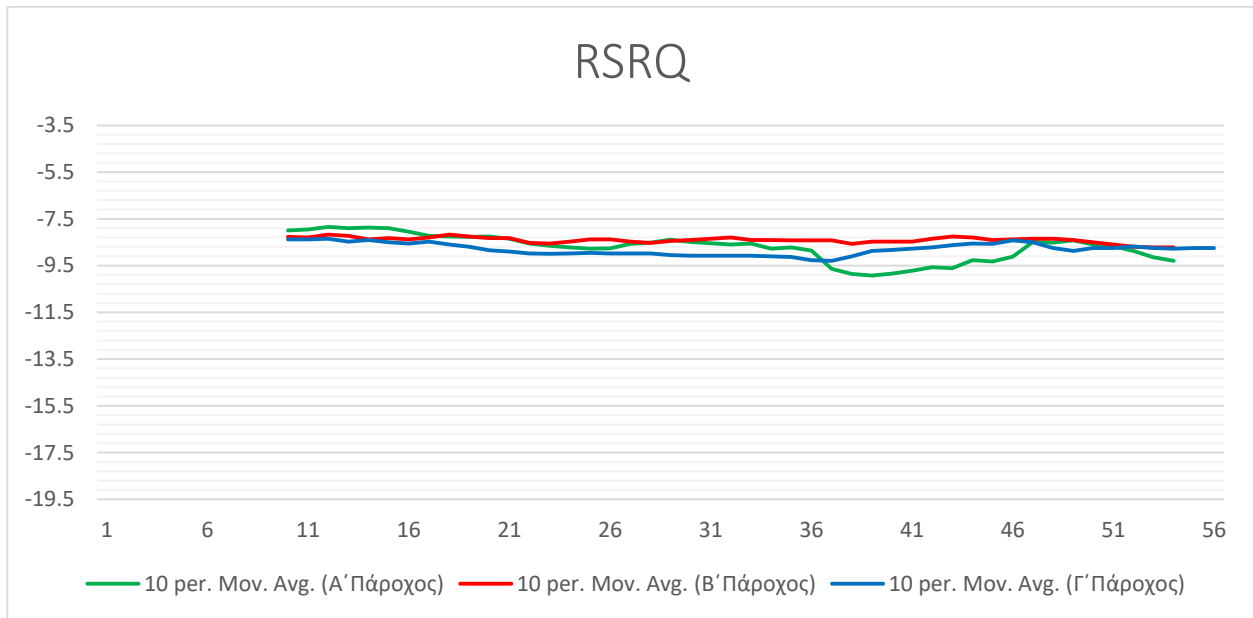


Γράφημα 67 Συνοπτικοί μέσοι όροι RSRP με χρήση κινητού μέσου όρου περιόδου 10 και από τις 4 διαδρομές της αγροτικής περιοχής για κάθε πάροχο

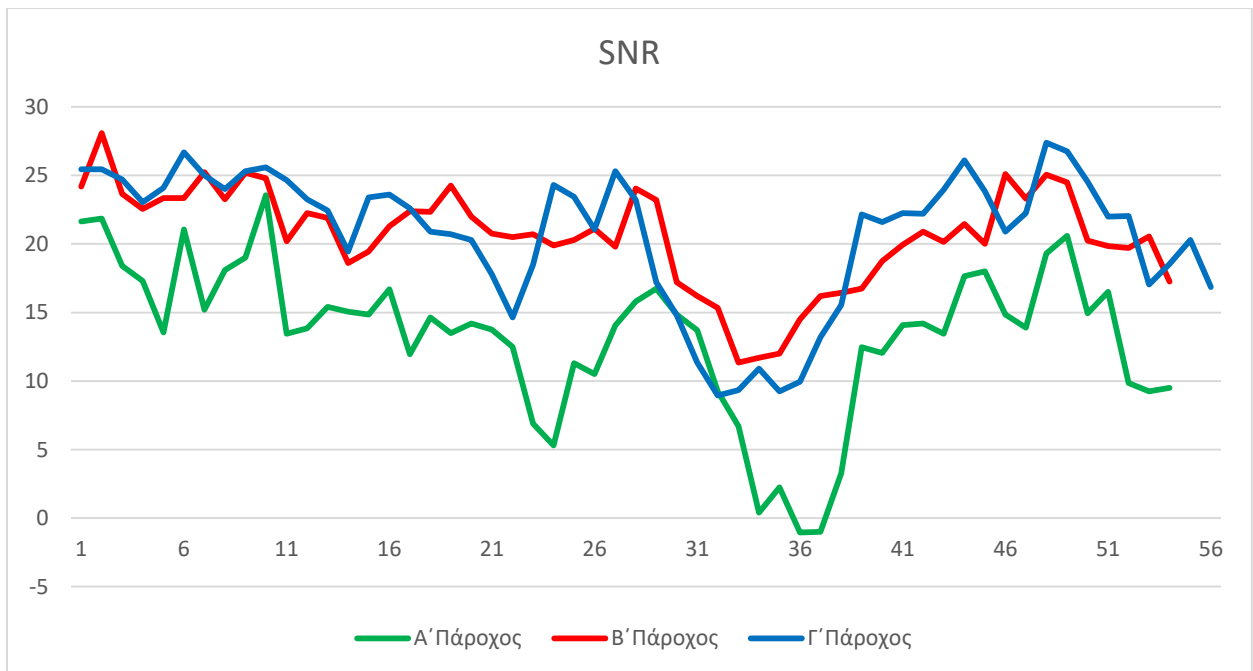


Γράφημα 68 Συνοπτικοί μέσοι όροι RSRQ και από τις 4 διαδρομές της αγροτικής περιοχής για κάθε πάροχο

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

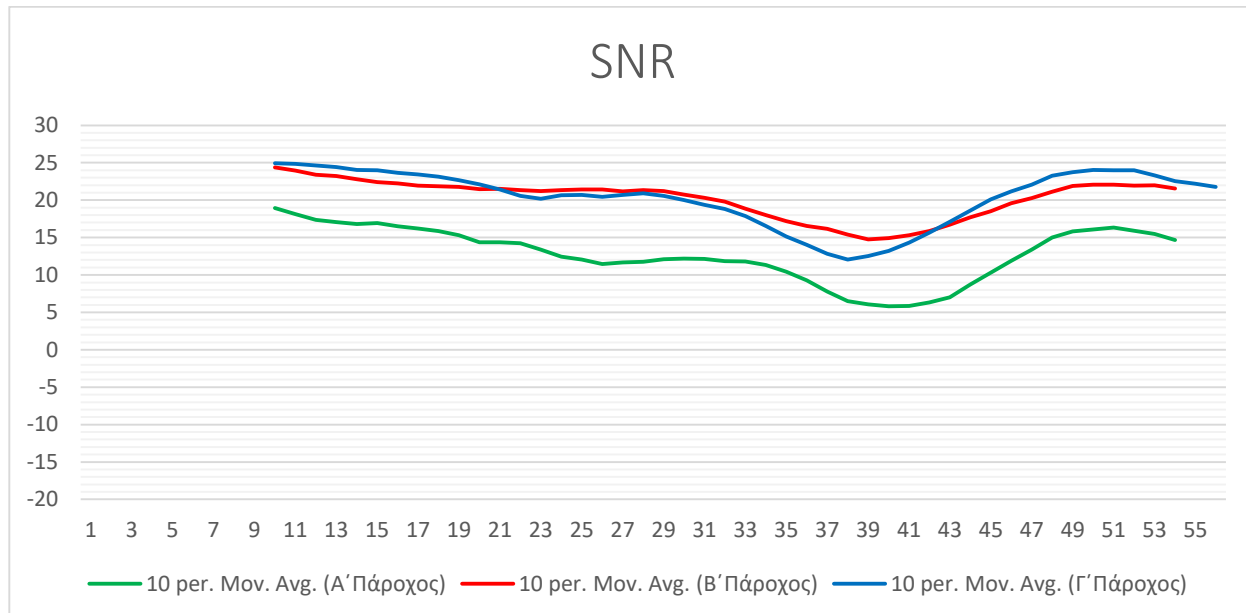


Γράφημα 69 Συνοπτικοί μέσοι όροι RSRQ με χρήση κινητού μέσου όρου περιόδου 10 και από τις 4 διαδρομές της αγροτικής περιοχής για κάθε πάροχο



Γράφημα 70 Συνοπτικοί μέσοι όροι SNR και από τις 4 διαδρομές της αγροτικής περιοχής για κάθε πάροχο

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



Γράφημα 71 Συνοπτικοί μέσοι όροι SNR με χρήση κινητού μέσου όρου περιόδου 10 και από τις 4 διαδρομές της αγροτικής περιοχής για κάθε πάροχο

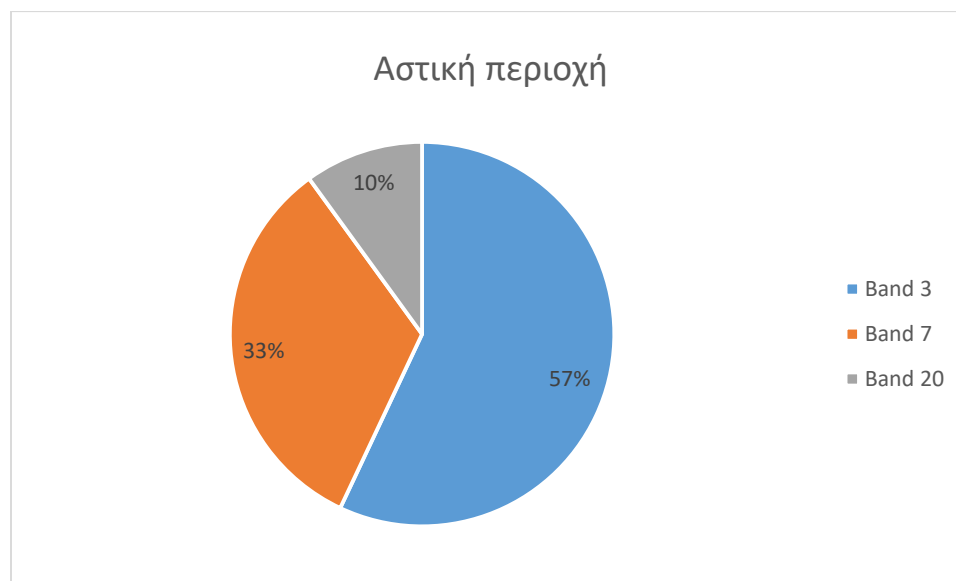
Στα γραφήματα της αγροτικής περιοχής παρατηρήσαμε τις μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις μεταξύ παρόχων. Όπως μπορούμε να δούμε κυρίως στα γραφήματα RSSI, RSRP και SNR οι Πάροχοι Β και Γ έχουν αρκετά όμοιους μέσους όρους χρησιμοποιώντας μόνο μία κεραία για την κάλυψη της περιοχής όπου διανύσαμε και χρησιμοποιώντας μόνο την Band 20. Ο Α' Πάροχος έχει σταθερά μια διαφορά 10 dB χαμηλότερη απόδοση. Όσο αναφορά το RSRQ παρατηρούμε ότι και οι 3 πάροχοι έχουν αρκετά όμοια διαγράμματα.

Τέλος οι Παρόχοι Β και Γ κάνουν χρήση μόνο της ζώνης 20 στην περιοχή αυτή όπου εξετάσαμε, η μέγιστη θεωρητική ταχύτητα κατερχόμενης ζεύξης θα είναι 75 Mbps.

6. Συμπεράσματα

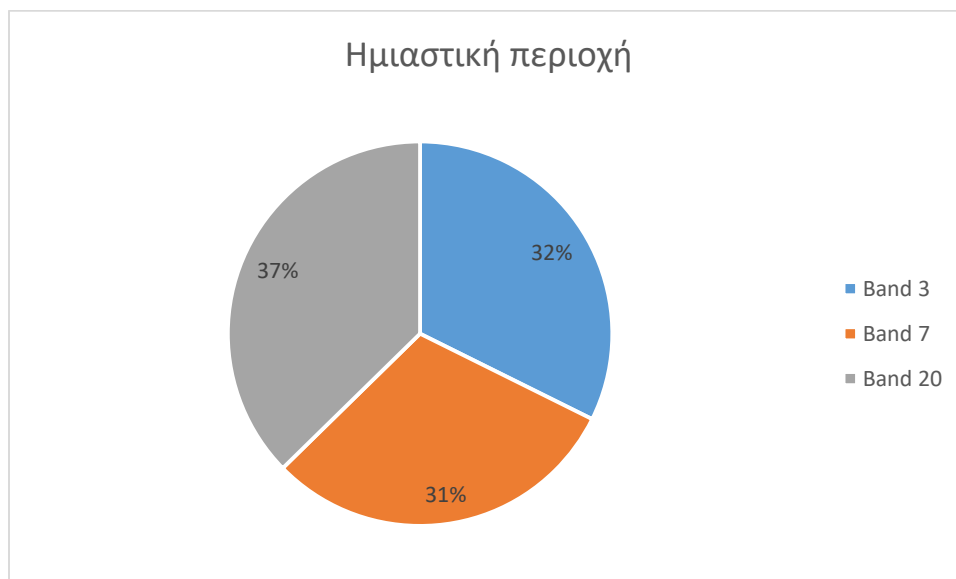
Το 5G έχει ήδη κάνει την εμφάνιση του, έστω και σε πιλοτικό στάδιο στην χώρα μας. Όπως και στα δίκτυα LTE, LTE-A που μελετήσαμε παραπάνω έτσι και στο 5G-NR το έχουν θεσπιστεί ζώνες συχνοτήτων στις οποίες μπορεί να εκπέμπει ο κάθε πάροχος. Προς το παρόν η EETT έχει διαθέσει στους παρόχους για πιλοτική εφαρμογή και διενέργεια δοκιμών τρία φάσματα συχνοτήτων, την ζώνη 3400-3800 MHz, την ζώνη 24,25- 27,5 GHz και τέλος την ζώνη των 1500MHz μόνο για την ανάπτυξη εφαρμογών σχετικά με το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things) [37], [38]. Το πρόβλημα όπου έχει δημιουργηθεί με τα δίκτυα πέμπτης γενιάς και τις υψηλές τους συχνότητες λειτουργίας είναι η κάλυψη. Για να υπάρχει υψηλή κάλυψη χρειάζονται περισσότερες κεραιές ειδικά όσο ανεβαίνουμε σε συχνότητα. Ενδεικτικά να αναφέρουμε πως για κάλυψη με χρήση συχνοτήτων πάνω από το όριο των 6GHz θα χρειαστεί οι κεραιές να τοποθετούνται ανά 500m ή ακόμα και σε απόσταση κάτω από 200m στις περιπτώσεις των πολύ υψηλών συχνοτήτων. Για το λόγο αυτό το 5G θα χρησιμοποιήσει και αυτό χαμηλές συχνότητες, φυσικά με χαμηλότερες ταχύτητες, ώστε να αυξήσει την κάλυψη του ειδικά σε αγροτικές περιοχές. Ειδικότερα στην Ελλάδα αναμένεται μέχρι το τέλος του 2020 να δοθούν οι συχνότητες 703-733 MHz και 758-788MHz ώστε να χρησιμοποιηθούν και αυτές αρχικά σε δοκιμαστικό επίπεδο [39], [40].

Από τις μετρήσεις όπου διεξαγάγαμε, εξήγαμε τα παρακάτω σχήματα στα οποία μπορούμε να δούμε τις ζώνες συχνοτήτων όπου χρησιμοποιούνται στο LTE, LTE-A κατά μέσο όρο και από τους 3 παρόχους κινητής όπου μελετήσαμε στις 3 περιοχές (Αστική, Ημιαστική, Αγροτική).

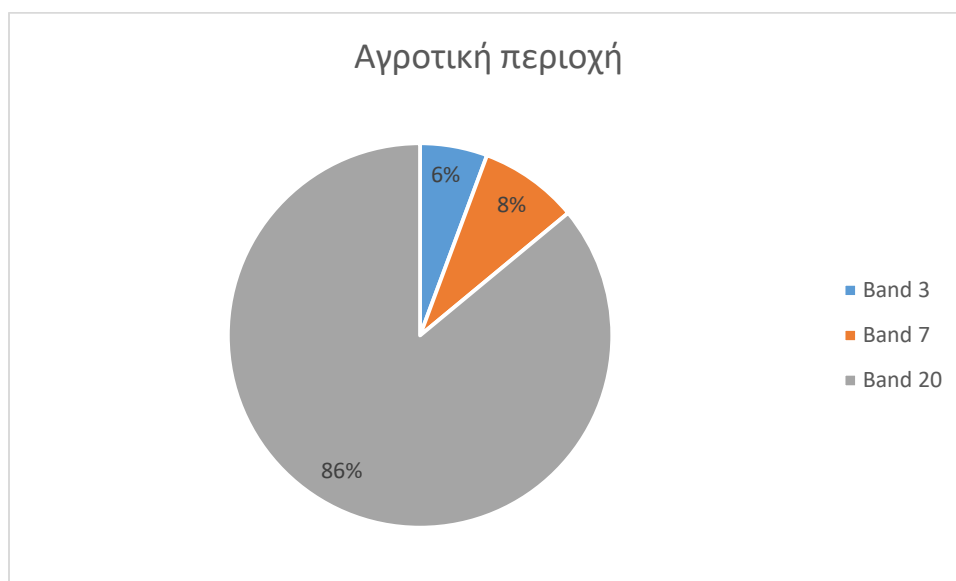


Γράφημα 72 Μέσος όρος ποσοστού κάλυψης ανά ζώνη συχνότητας της αστικής διαδρομής μελέτης

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



Γράφημα 73 Μέσος όρος ποσοστού κάλυψης ανά ζώνη συχνότητας της ημιαστικής διαδρομής μελέτης



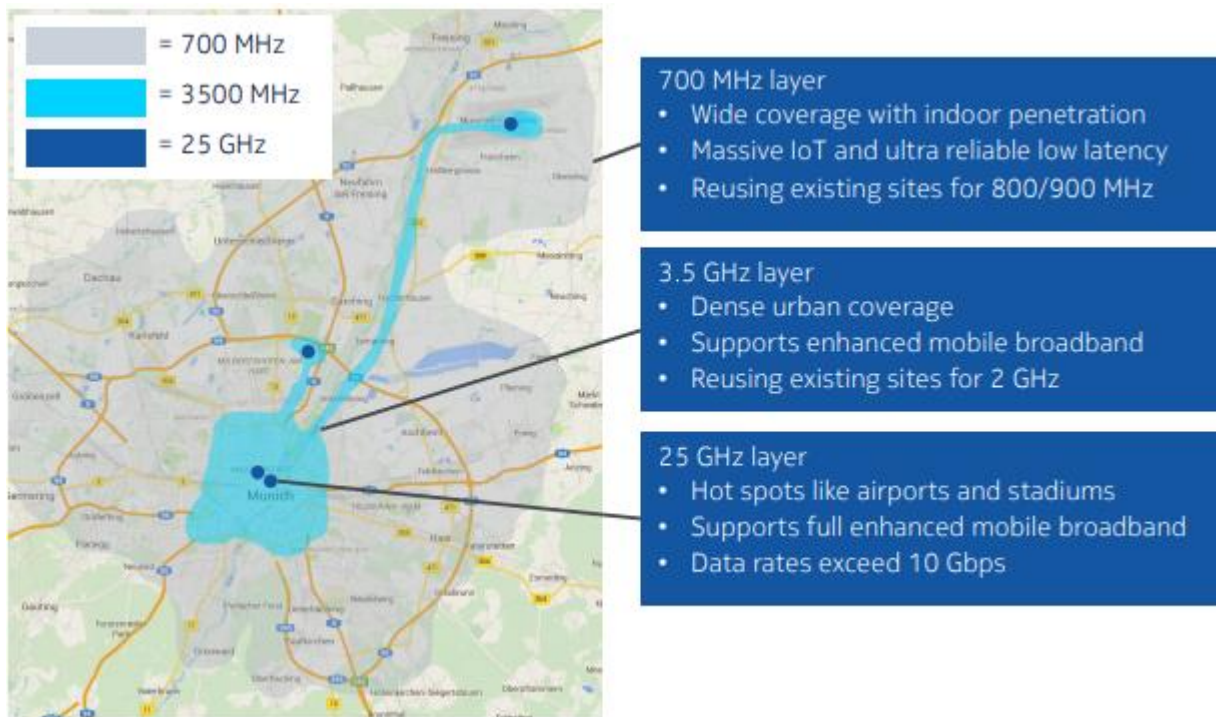
Γράφημα 74 Μέσος όρος ποσοστού κάλυψης ανά ζώνη συχνότητας της αγροτικής διαδρομής μελέτης

Να υπενθυμίσουμε πως το downlink της band 3 είναι στα 1805–1880 MHz, της band 7 στα 2620–2690 MHz και της band 20 στα 791 – 821 MHz.

Από τα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να παρατηρήσουμε αρχικά πως η χρήση των band 3 και band 7 μειώνονται από την αστική προς την αγροτική περιοχή από 90% χρήσης σε μόλις 14%. Η ζώνη συχνοτήτων με την υψηλότερη συχνότητα λειτουργίας από τις 2 και υψηλότερη συχνότητα λειτουργίας του LTE στην Ελλάδα, η 7 δηλαδή όπου λειτουργεί στα 2,6GHz είναι ότι ποιο κοντινό παράδειγμα χρήσης

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

έχουμε σε υψηλή συχνότητα αυτή την στιγμή και σε κοντινό φάσμα συχνοτήτων με την ζώνη 3,4-3,8 GHz του 5G. Η ζώνη αυτή χρησιμοποιείται κατά μέσο όρο στο 33% της αστικής και 31% της ημιαστικής περιοχής. Συνεπώς σε αστικές και ημιαστικές περιοχές, δηλαδή σε μεγάλες πόλεις όπως πρωτεύουσες νομών της χώρας μας, η χρήση του φάσματος 3,4-3,8 GHz είναι πολύ πιθανή υλοποίηση στο κέντρο της κάθε πόλης με ταχύτητες μέχρι και 2Gbps και επιπλέον hotspots mmWaves που θα εκπέμπουν στα 24,25-27,5 GHz εγκατεστημένα σε σημεία ενδιαφέροντος με ταχύτητες μέχρι και 20Gbps. Όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο την κάλυψη θα αναλαμβάνει το φάσμα κάτω του 1GHz το οποίο θα παρέχει ταχύτητες όμοιες με διάταξη MIMO 2x2 του LTE δηλαδή έως 300Mbps. Επιπρόσθετα, η ζώνη των 1500MHz όπου έχει δοθεί για δοκιμαστική χρήση υπηρεσιών Internet of Things βρίσκεται σε πολύ κοντινό φάσμα με την ζώνη 3 του LTE. Στην αστική περιοχή όπου πιθανότατα θα είναι και ο μεγαλύτερος όγκος δεδομένων τέτοιων υπηρεσιών παρατηρούμε από το πρώτο διάγραμμα ότι η ζώνη 3 χρησιμοποιείται στο 57% της διαδρομής που είχαμε πραγματοποιήσει, δηλαδή είχε την μεγαλύτερη κάλυψη ανάμεσα και στις 3 ζώνες συχνοτήτων. Συνεπώς η διαδικασία επέκτασης του δικτύου κάλυψης της ζώνης αυτής δεν θα αποτελεί μεγάλο πρόβλημα. Τέλος η χρήση ζώνης κάτω του 1 GHz απαιτείται για την περίπτωση που χρειαστεί η κάλυψη 5G δικτύου να γίνεται και εντός των σπιτιών και για τις περιοχές γύρω από το κέντρο των πόλεων. Η ζώνη αυτή προσφέρει διαπεραστικότητα όπου οι υψηλότερες συχνότητες δεν είναι σε θέση να καλύψουν [41].



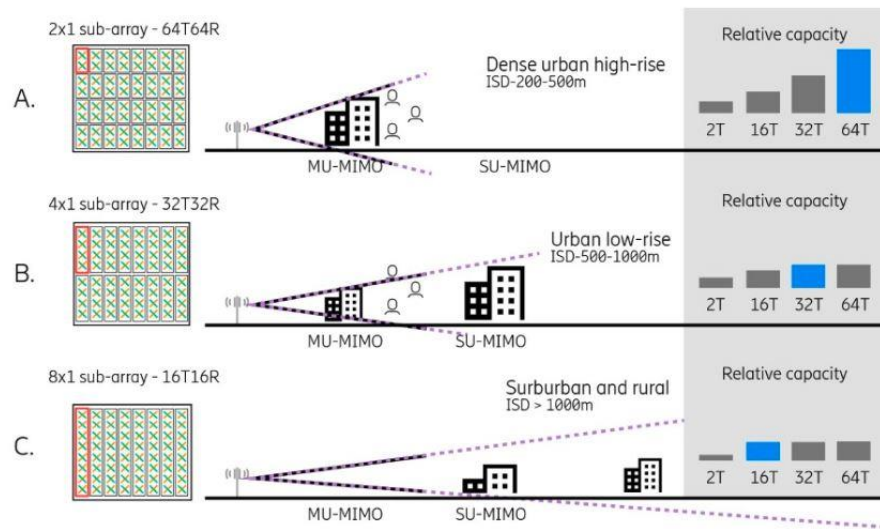
Εικόνα 50 Αναπαράσταση της Nokia σε χάρτη της κάλυψης της πόλης του Μονάχου από τις 3 ζώνες φασμάτων που είναι διαθέσιμες και στην χώρα μας [47].

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

Σύμφωνα με πειραματική έρευνα όπου διεξήγαγε η Ericsson για κάλυψη εντός πυκνοκατοικημένης αστικής περιοχής μέσω της συχνότητας των 3,5GHz έβγαλε το συμπέρασμα πως η μέγιστη δυνατή απόσταση κάλυψης ήταν από 200 έως 380m χωρίς οπτική επαφή με την κεραία και μέχρι τα 700 μέτρα σε ανοιχτή περιοχή με οπτική επαφή με το κελί. Για την δοκιμή αυτή χρησιμοποιήθηκε κεραία massive MIMO 2x1 - 64T64R, με μέγιστο modulation QAM-256 και bandwidth 80MHz. Λαμβάνοντας υπόψη το πείραμα αυτό και τοποθετώντας το στην δική μας περίπτωση αστικής περιοχής όπου καλύψαμε για την καταγραφή ένα νοητό ορθογώνιο διαστάσεων 700m x 250m με 5 παράλληλους δρόμους, θα χρειαζόνταν 2-3 κελιά για κάθε δρόμο για την κάλυψη του δηλαδή συνολικά 10-15 κελιά. Όπως μπορούμε να δούμε στον χάρτη του κεφαλαίου 5.2 στο σύνολο της διαδρομής η κάλυψη μας έγινε από 11 συνολικά κελιά τα οποία είχαν μέγιστη απόσταση, από το σημείο όπου παίρναμε το σήμα του, έως και 450 μέτρα [42].

Όσον αναφορά τις αγροτικές περιοχές, όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, η χρήση της ζώνης 20, η οποία χρησιμοποιείται για την δυνατότητα της να προσφέρει πολύ μεγάλη κάλυψη, αυξάνεται από την αστική προς την αγροτική περιοχή από το 10% και φτάνει στο 86% χρήσης σαν μέσος όρος και των 3 παρόχων. Στην αγροτική περιοχή που μελετήσαμε οι κεραίες βρίσκονταν σε απόσταση 1-1,5km από την διαδρομή όπου πραγματοποιήσαμε χωρίς να υπάρχει παντού οπτική επαφή. Με την εικόνα αυτή που έχουμε συλλέξει και χωρίς αλλαγή θέσης των κεραιών, πρώτη υπόθεση είναι ότι στις αγροτικές περιοχές η κυρίως κάλυψη θα γίνεται από χαμηλές συχνότητες (Sub-1GHz), ώστε να μπορεί να ανταπεξέρχεται στην απόσταση, και ίσως αν απαιτηθεί σε κάποια κεντρικά σημεία να υπάρχουν κελιά όπου θα παρέχουν υψηλότερες ταχύτητες με χρήση υψηλότερων συχνοτήτων. Αυτές οι ζώνες UHF (Ultra High Frequency) θα αποτελέσουν το θεμέλιο της κάλυψης της ευρείας περιοχής της υπαίθρου. Φυσικά δεν είναι σε θέση να παράσχουν την απαιτούμενη υψηλή χωρητικότητα, αλλά ταξιδεύουν καλά πάνω σε κυρτό έδαφος και μπορούν να διεισδύσουν ή να παρακάμψουν πολλά τεχνητά και φυσικά εμπόδια. Επιπλέον, σε ένα σενάριο με πολλαπλούς φορείς όπου ένα δίκτυο χρησιμοποιεί αρκετές διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων για την παράδοση του απαιτούμενου ρυθμού δεδομένων (carrier aggregation), απαιτείται μια ζώνη ως βάση για τον συντονισμό της κίνησης προς και από το κινητό τερματικό στις υψηλότερες συχνότητες. Το 5G όμως δεν είναι μόνο η προσφερόμενη ταχύτητα. Είναι και χωρητικότητα δικτύου η οποία θα αυξηθεί κατακόρυφα ώστε όλοι να απολαμβάνουν υψηλές ταχύτητες, πράγμα βασικό ακόμη και για το IoT, φτάνοντας χωρητικότητα της τάξης των 750Gbps/km² σε πυκνοκατοικημένες περιοχές και του 1Gbps/km² σε αγροτικές [39],[43],[45],[46]

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G



Εικόνα 51 Αναπαράσταση SU-MIMO και MU-MIMO σε σενάρια αστικής-ημιαστικής και αγροτικής περιοχής[44]

Αναφορές-References

- [1] Ασυρματα δικτυα 4^{ης} γενιάς (2014) Available: <http://oceanis.lib2.uniwa.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/2235/AYT635.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [2] ElectronicNotes.com. *What is LTE: Long Term Evolution Tutorial & Overview*. Available: <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/4g-lte-long-term-evolution/what-is-lte-basics-tutorial-overview.php>
- [3] Thien-Toan Tran, Yoan Shin, Oh-Soon Shin, *Wireless Communications and Networking* (2012, Feb.). *MU-MIMO in LTE Systems*. Available: <https://link.springer.com/article/10.1155/2011/496763>
- [4] Jeanette Wannstrom, 3GPP.org (2013, June). *LTE-Advance*. Available: <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced>
- [5] ElectronicNotes.com. *5G NR New Radio, 5G NR or 5G New Radio is the new radio air interface being developed for 5G mobile communications*. Available: https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/5g-mobile-wireless-cellular/5g-nr-new-radio.php?fbclid=IwAR31kigvXHRgmnoeNwlnmMQZ-LVx31jbmO5Z6Zd0bRT75Tnm2rnXi8_6ezo
- [6] Collage of Engineering, University of North Texas and Alcatel Lucent (2013, Autumn). *The LTE Network Architecture, Figure 2*. Available: http://www.cse.unt.edu/~rdantu/FALL_2013_WIRELESS_NETWORKS/LTE_Alcatel_White_Paper.pdf
- [7] Collage of Engineering, University of North Texas and Alcatel Lucent (2013, Autumn). *The LTE Network Architecture, Figure 1*. Available: http://www.cse.unt.edu/~rdantu/FALL_2013_WIRELESS_NETWORKS/LTE_Alcatel_White_Paper.pdf
- [8] NXP Semiconductors Company (2008, Oct.). *Long Term Evolution Protocol Overview Rev. 0, Figure 2.1*. Available: <https://www.nxp.com/docs/en/white-paper/LTEPTCLOVWWP.pdf>
- [9] Teletopix.org-Telecom Techniques Guide Radio. *Protocol Architecture in LTE*. Available: <http://teletopix.org/4g-lte/radio-protocol-architecture-in-lte/>
- [10] NXP Semiconductors Company (2008, Oct.). *Long Term Evolution Protocol Overview Rev. 0, Figure 3.1*. Available: <https://www.nxp.com/docs/en/white-paper/LTEPTCLOVWWP.pdf>
- [11] DifferenceBetween.com (2011, Feb. 16). *Difference Between FDD LTE (FD-LTE) and TDD LTE (TDD-LTE) Networks*. Available: <https://www.differencebetween.com/difference-between-fdd-lte-fd-lte-and-vs-tdd-lte-td-lte-networks/>
- [12] Wikipedia.org (2019, Oct.) *LTE frequency Bands, Frequency bands and channel bandwidths, 1st table*. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/LTE_frequency_bands
- [13] EETT. *Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας στην Ελλάδα*. Available: https://www.eett.gr/opencms/opencms/EETT/Electronic_Communications/Antennas_EMR/health/BaseStationRdt/GRNetworks/
- [14] Wikipedia.org (2019, Oct.) *List of LTE networks in Europe, 1st Table*. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_LTE_networks_in_Europe#cite_ref-gsa_lte_reg_2-0
- [15] Grupo de Teleinformática e Automação (2014, Feb.). *OFDMA and SC-FDMA, Figure: Simplified LTE Architecture*. Available: https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2014_2/rafaelreis/ofdma_scdma.html

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

- [16] Telesystem Innovations(2010). *LTE in a Nutshell: The Physical Layer*. Available: <https://home.zhaw.ch/kunr/NTM1/literatur/LTE%20in%20a%20Nutshell%20-%20Physical%20Layer.pdf>
- [17] David Schnaufer, Bror Peterson, *Microwaves & RF* (2018, Sep. 19). *Realizing 5G Sub-6-GHz Massive MIMO Using GaN, Picture 2*. Available: <https://www.mwrf.com/semiconductors/realizing-5g-sub-6-ghz-massive-mimo-using-gan>
- [18] ElectronicNotes.com. MU-MIMO Multi-User MIMO Available: <https://www.electronic-notes.com/articles/antennas-propagation/mimo/multiuser-mu-mimo.php>
- [19] ElectronicNotes.com. *MIMO Formats - SISO, SIMO, MISO, MU-MIMO*. Available: <https://www.electronic-notes.com/articles/antennas-propagation/mimo/isiso-simo-miso-mimo.php>
- [20] Mathworks. *Massive MIMO, Large-scale antenna systems for 5G wireless systems*. Available: <https://nl.mathworks.com/discovery/massive-mimo.html>
- [21] Qualcomm ONQ blog (2017, Sep. 26) *MWC Americas: EVP Cristiano Amon discusses Gigabit LTE and 5G in the digital economy, The path to 5G starts with Gigabit LTE*. Available: <https://yourstory.com/2017/09/mwc-americas-cristiano-amon-discusses-gigabit-lte-5g>
- [22] Zahra Mokhtari, Maryam Sabbaghian ,Rui Dinis (2019, Jan. 4). *A Survey on Massive MIMO Systems in Presence of Channel and Hardware Impairments* Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6339125/>
- [23] Wikipedia.org (2019, Sept.). *Phase-shift keying*. Available : https://en.wikipedia.org/wiki/Phase-shift_keying
- [24] Mathscinotes, Math Encounters Blog (2012, Nov. 26). *Crest Factors for QAM Signals, Figure 1*. Available: <https://www.mathscinotes.com/2012/11/crest-factors-for-qam-signals/>
- [25] 4gltmall.com(2013-2018). *QAM*. Available: <https://www.4gltmall.com/blog/tag/qam/>
- [26] Sharetechnote.com. *LTE Advanced - Carrier Aggregation*. Available: https://www.sharetechnote.com/html/LTE_Advanced_CarrierAggregation.html#InitialMotivation
- [27] Niviuk.free.fr (2018, Dec. 15). *LTE Carrier Aggregation*. Available: http://niviuk.free.fr/lte_ca_band.php
- [28] Teltonika Wiki knowledge Base(2018, Dec. 7). *RSRP and RSRQ*. Available: https://wiki.teltonika.lt/view/RSRP_and_RSRQ
- [29] CableFree. *LTE RSSI, RSRP and RSRQ Measurement*. Available: <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/4glte/rsrp-rsq-measurement-lte/>
- [30] CableFree (2013, Oct.) *LTE Carrier Frequency and EARFCN*. Available: <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/4glte/lte-carrier-frequency-earfcn/>
- [31] EETT(2016). *ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΤΗΣ 1ης ΜΕΤΡΗΤΙΚΗΣ ΕΚΣΤΡΑΤΕΙΑΣ ΔΕΙΚΤΩΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, Πίνακας 1-2*. Available: <https://www.eett.gr/opencms/export/sites/default/EETT/Consumer/QualityIndicators/Mobile/technicalities-campaign2016.pdf>
- [32] Ziya Akhundov,Telecompedia. *PLMN*. Available: <http://telecompedia.net/plmn/>
- [33] Sharetechnote.com. *LTE Quick Reference- Physical Cell ID*. Available: http://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_PCI.html
- [34] Prashant Panigrahi, 3GLTEInfo (2017, Jun. 22). *LTE Tracking Area Update Call Flow Procedure*. Available: <http://www.3glteinfo.com/lte-tracking-area-update-call-flow-procedure/>
- [35] TechPlayon (2016, Apr. 21). *PSS and SSS (LTE Synchronization)*. Available: <http://www.techplayon.com/pss-and-sss-lte-synchronization/>

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

- [36] Krolinson, rfassurance.com (2015, Aug. 13). *The Value of PCI Planning in LTE*. Available: <http://main.rfassurance.com/?q=node/79>
- [37] EETT (2018, Nov. 5). *Όροι χορήγησης δικαιωμάτων χρήσης ραδιοσυχνοτήτων για τη δοκιμαστική λειτουργία δικτύων 5ης γενιάς στις ζώνες 3400-3800 MHz και 24,25-27,5 GHz*. Available: https://www.eett.gr/opencms/export/sites/default/admin/downloads/telec/apofaseis_eett/kanonistikes_apofaseis_eett/AP871-004.pdf
- [38] EETT (2019, Jan. 23). *Επισκόπηση Ζωνών Συχνοτήτων προς Αξιοποίηση για την Ανάπτυξη Δικτύων 5ης Γενιάς*. Available: https://www.eett.gr/opencms/opencms/admin/News_new/news_0969.html
- [39] Tom Li, itworldcanada.com (2019, Apr. 11). *Everything you need to know about 5G*. Available: <https://www.itworldcanada.com/article/everything-you-need-to-know-about-5g/416498>
- [40] Frédéric PUJOL, Carole MANERO, Tarek JAFFAL, European Commission, IDATE DigiWorld (2019, Jan.) *5G Observatory Quarterly Report 2 Up to December 2018, table 5*. Available: <http://5gobservatory.eu/wp-content/uploads/2019/01/80082-5G-Observatory-Quarterly-report-2-V2.pdf>
- [41] NOKIA (2017). *5G deployment below 6 GHz, Ubiquitous coverage for critical communication and massive IoT*. Available: https://www.rtt.lt/wp-content/uploads/2018/10/Nokia_5G_Deployment_below_6GHz_White_Paper_EN.pdf
- [42] Björn Halvarsson, Arne Simonsson, Anders Elgcrona, Ranvir Chana, Paulo Machado, Henrik Asplund, Ericsson (2018, Jun.) *5G NR Testbed 3.5 GHz Coverage Results*. Available: https://www.ericsson.com/assets/local/publications/conference-papers/5g_nr_sub6_coverage.pdf
- [43] Toon Norp (2018, May 3). *5G Requirements and Key Performance Indicators, table 1*. Available: https://www.riverpublishers.com/journal/journal_articles/RP_Journal_2245-800X_612.pdf
- [44] Ericsson (2018, Nov.). *Advanced antenna systems for 5G networks, figure 4*. Available: https://www.ericsson.com/4ac61a/assets/local/publications/white-papers/10201407_wp_advanced_antenna_system_nov18_181115.pdf
- [45] Tim Brown, Michael Fitch, David Owens, Simon Saunders, Andy Sutton, Stephen Temple, University of Surrey (2016, Feb. 8). *5G Whitepaper: Meeting the Challenge of “Universal” Coverage, Reach and Reliability in the Coming 5G Era*. Available: <https://www.surrey.ac.uk/sites/default/files/2018-03/white-paper-rural-5G-vision.pdf>
- [46] Utilities Technology Council (2019, Mar.). *Cutting Through the Hype: 5G and Its Potential Impacts on Electric Utilities*. Available :https://utc.org/wp-content/uploads/2019/03/Cutting_through_the_Hype_Utilities_5G-2.pdf
- [47] NOKIA (2017). *5G deployment below 6 GHz, Ubiquitous coverage for critical communication and massive IoT, Figure 8*. Available: https://www.rtt.lt/wp-content/uploads/2018/10/Nokia_5G_Deployment_below_6GHz_White_Paper_EN.pdf
- [48] Fredric Kronestedt, Henrik Asplund, Kenneth Wallstedt, Du Ho Kang, Magnus Lundevall, Anders Furuskär (2018,Nov. 5). *High-frequency challenges and opportunities*. Available: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/ericsson-technology-review/articles/the-advantages-of-combining-5g-nr-with-lte>
- [49] Technopedia.com. Available: <https://www.techopedia.com/definition/28945/beamforming>
- [50] Οι Γενιές των Δικτύων Κινητής Τηλεφωνίας και Παρουσίαση των Συστημάτων 4ης Γενιάς LTE και LTE-Advanced. Available: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:832949/FULLTEXT01.pdf>
- [51] Wikipedia.org. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/5G>

Μέτρηση και καταγραφή των δυνατοτήτων των σημερινών δικτύων LTE, LTE-A και προβολή της υφιστάμενης κατάστασης σε μελλοντικά δίκτυα 5G

- [52] Kritika Sengar, Nishu Rani, Ankita Singhal, Dolly Sharma, Seema Verma, Tanya Singh. International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – Volume 9 Number 9 – (2014, March). Available: <http://ijettjournal.org/volume-9/number-9/IJETT-V9P283.pdf>
- [53] MIMO and Smart Antennas for 3G and 4G Wireless Systems (2010, May). Available: <https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2012/03/mimo>
- [54] Emil Bjornson, Luca Sanguinetti, Jakob Hoydis, Merouane Debbah. (2014, Apr. 30) Designing Multi-User MIMO for Energy Efficiency: When is Massive MIMO the Answer? Available: <https://arxiv.org/pdf/1310.3843.pdf>
- [55] Noha Hassan, Xavier Fernando (2017, Sep. 5). Massive MIMO Wireless Networks: An Overview. Available: <https://www.mdpi.com/2079-9292/6/3/63/pdf>
- [56] Advantages of QPSK (2014, Jan. 20). Available: <https://www.slideshare.net/vinaysrichand/advantages-of-qpsk>
- [57] Wikipedia.org. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Quadrature_amplitude_modulation
Ericsson and COSMOTE demonstrate 1.2Gbps in Greece (2017, Feb. 17). Available: <https://www.ericsson.com/en/news/2017/2/ericsson-and-cosmote-demonstrate-1.2gbps-in-greece>
- [58] Release 8. Available: <https://www.3gpp.org/specifications/releases/72-release-8>
- [59] Release 10. Available: <https://www.3gpp.org/specifications/releases/70-release-10>
- [60] 4G Americas Report on 3GPP Release 11 and 12 Standards. Available: https://www.3gpp.org/news-events/partners-news/1582-4g_americas_r11_r12
- [61] Open Cell ID. Available: <https://www.opencellid.org/>
- [62] Release 14 Available: <https://www.3gpp.org/release-14>
- [63] Release 15 Available: <https://www.3gpp.org/release-15>
- [64] Release 16 Available: <https://www.3gpp.org/release-16>
- [65] Marcus Karlsson, Erik G. Larsson (2014, IEEE 15th International Workshop) On the Operation of Massive MIMO with and without transmitter CSI. Available: <https://liu.diva-portal.org/smash/get/diva2:783010/FULLTEXT01.pdf>
- [66] University of Bristol (2016, May 16). Available: <http://www.bristol.ac.uk/news/2016/may/5g-wireless-spectrum-efficiency.html>
- [67] EETT (2017, Nov. 3). Ανακοίνωση Κατακύρωσης Δικαιωμάτων Χρήσης Ραδιοσυχνοτήτων στην ζώνη των 1800 MHz. Available: https://www.eett.gr/opencms/opencms/admin/News_new/news_0731.html
- [68] Facebook Engineering (2016, Apr. 13). Introducing Facebook’s new terrestrial connectivity systems — Terragraph and Project ARIES. Available: <https://engineering.fb.com/connectivity/introducing-facebook-s-new-terrestrial-connectivity-systems-terragraph-and-project-aries/>
- [69] Linglong Dai (2015, Dec.). Tsinghua University -Massive MIMO for 5G: From Theory to Practice. Available: http://oa.ee.tsinghua.edu.cn/dailinglong/resources/ppt/Massive%20MIMO%20for%205G_From%20Theory%20to%20Practice_Tsinghua_Linglong%20Dai.pdf