



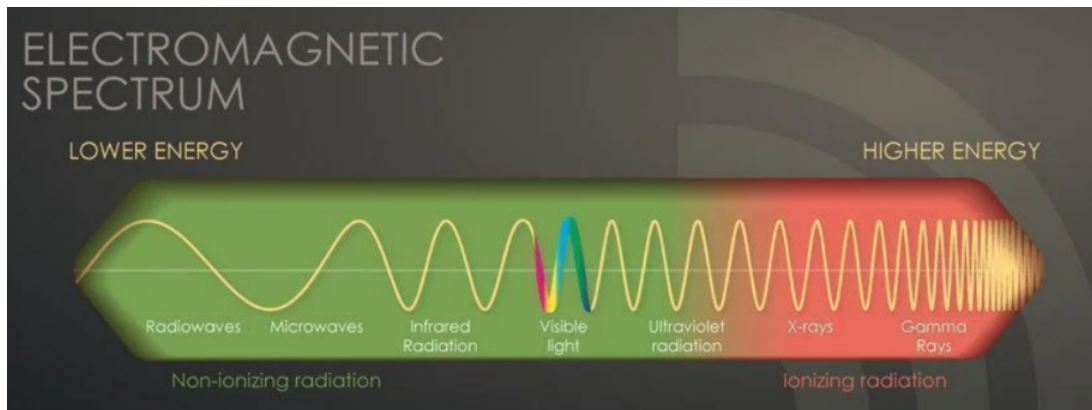
ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη και ανάλυση χιλιοστομετρικών κυμάτων
(millimeter waves) με χρήση διαδικτυακής εφαρμογής



Του φοιτητή
Γουργιώτη Αλέξανδρου
Αρ. Μητρώου: 144177

Επιβλέπουσα
Δρ. Αγάπη Μεσοδιακάκη
Έκτακτο Διδακτικό Προσωπικό

1 Οκτωβρίου 2023

Τίτλος Δ.Ε. Μελέτη και ανάλυση χιλιοστομετρικών κυμάτων (millimeter waves) με χρήση διαδικτυακής εφαρμογής.

Κωδικός Δ.Ε. 23116

Όνοματεπώνυμο φοιτητή/ών: Γουργιώτης Αλέξανδρος

Όνοματεπώνυμο εισηγητή: Μεσοδιακάκη Αγάπη

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 21-02-2023

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 10-09-2023

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως πτυχιακή εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Γουργιώτη Αλέξανδρου που την εκπόνησε/αν. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

«Ηπαρούσα πτυχιακή εργασία είναι αφιερωμένη στους γονείς μου!»

Πρόλογος

Η πτυχιακή αυτή εργασία αποτελεί την κορύφωση των σπουδών μου στο ΔΙ.ΠΑ.Ε Θεσσαλονίκης, και συγκεκριμένα στο τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων και αποτελεί αποτέλεσμα έρευνας και καταγραφής, που περιγράφει τα κύματα χιλιοστόμετρου και τον τρόπο λειτουργίας τους. Επέλεξα αυτό το θέμα πτυχιακής γιατί συνειδητοποίησα πως δεν υπάρχει κάποιο παρόμοιο εργαλείο στα ελληνικά που να υπολογίζει βασικά μεγέθη σε μία ζεύξη χιλιοστομετρικών κυμάτων. Ένα τέτοιο εργαλείο ωστόσο θα μπορούσε να ωφελήσει τόσο τον μηχανικό/ ερευνητή στη λήψη σωστών αποφάσεων για τη βελτιστοποίηση μιας ζεύξης χιλιοστομετρικών κυμάτων, όσο και τον μαθητή/ φοιτητή ώστε να κατανοήσει βασικά μεγέθη που επηρεάζουν την απόδοση μιας ζεύξης όπως π.χ. η συχνότητα λειτουργίας, το κέρδος κεραίας πομπού, η ενεργός ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύς (EIRP), οι συνολικές απώλειες, η λαμβανόμενη ισχύς καθώς επίσης και ο σηματοθορυβικός λόγος (SNR) στον δέκτη. Τέλος, καθώς δεν υπήρχε κάτι παρόμοιο στα ελληνικά ώστε να μπορέσει π.χ. να εκπαιδευτεί ένας φοιτητής, η υλοποίηση του συγκεκριμένου εργαλείου και η διεξαγωγή των σχετικών πειραμάτων στοχεύουν στο να καταστήσουν δυνατό το ευρύ κοινό τον πειραματισμό και την κατανόηση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε μια τηλεπικοινωνιακή ζεύξη χιλιοστομετρικών κυμάτων.

Περίληψη

Το αντικείμενο της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας σχετίζεται με τη μελέτη και ανάλυση των χιλιοστομετρικών κυμάτων (mmWave) και τη δημιουργία και χρήση διαδικτυακής εφαρμογής για το σκοπό αυτό. Αρχικά αναφέρονται τα κυριότερα προβλήματα που συνοδεύουν τα συστήματα κινητής τηλεφωνίας, τα κριτήριά ποιότητάς τους όπως και οι τεχνολογίες κλειδιά. Προς αυτή την κατεύθυνση, αναλύονται τα κύματα χιλιοστόμετρου ως μια από τις βασικές τεχνολογίες κλειδιά για τα δίκτυα επόμενης γενιάς. Παρουσιάζεται το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, όπου διαχωρίζονται τα ραδιοκύματα σε ιονίζουσες και μη ακτινοβολίες, και δίνεται έμφαση στις συχνότητες λειτουργίας των mmWave. Επίσης αναφέρονται οι παράγοντες που επηρεάζουν τα mmWave, συμπεριλαμβανομένου των απωλειών ελεύθερου χώρου, της ατμοσφαιρικής εξασθένησης, και άλλων μεγεθών που συμμετέχουν στον προϋπολογισμό ισχύος και θα αναλυθούν στην πτυχιακή. Ακόμη περιγράφεται αναλυτικά το εργαλείο που δημιουργήθηκε για το σκοπό της πτυχιακής εργασίας, το οποίο έχει ως στόχο να μάθουν και να πειραματιστούν οι φοιτητές/επιστήμονες ώστε να κατανοήσουν καλύτερα τον τρόπο λειτουργίας μίας ζεύξης mmWave, καθώς και τους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται. Συγκεκριμένα, το εργαλείο μπορεί να υπολογίσει τον προϋπολογισμό ισχύος σε μια τηλεπικοινωνιακή mmWave ζεύξη, και δίνει τη δυνατότητα κατάλληλης επιλογής των τιμών των επιμέρους παραμέτρων με στόχο την βελτιστοποίηση της απόδοσης της ζεύξης.

«Study and analysis of millimeter waves using an online application»

«Alexandros Gourgiotis»

Abstract

Due to its potential for multi-gigabit and low latency wireless links, millimeter wave (mmWave) technology is expected to play a key role in 6th generation (6G) cellular systems. Although there has been considerable progress in understanding the mmWave physical layer, innovations will be required at all layers of the protocol stack, in both the access and the core network. Discrete-event network simulation is essential for end-to-end, cross-layer research and development. This thesis provides a thorough study of the mmWave signals, analyzing the main parameters that affect their performance. To that end, a link budget mmWave tool has been developed and integrated into a web-site. The tool includes a number of calculations as well as the ability to incorporate real measurements. The open source code makes it easy to further improve the tool or to compare the frequency results and calculators. This tool can help the Greek students/scientists to experiment with real values, and, in parallel, properly select the parameter values so as to achieve optimal link performance. In addition, the effect of different parameters is displayed and explained, such as the effect of the atmospheric attenuation as well as the impact of the distance.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ πολύ την καθηγήτρια μου κα. Αγάπη Μεσοδιακάκη που με βοήθησε τόσο με το επιστημονικό κομμάτι όσο όμως και για την στήριξη που είχα από αυτήν και την προθυμία να μου απαντήσει ανά πάσα στιγμή σε κάθε μου απορία και να με ενθαρρύνει όταν χρειάζεται! Σίγουρα, ευχαριστώ πολύ την Μητέρα μου που ήταν δίπλα μου σε όλα και έκανε πιο εύκολο τον δρόμο προς την επίτευξη του στόχου μου. Η εισαγωγή μου στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς πανεπιστημίου της Ελλάδος τον Αύγουστο του 2014 μπορώ να πω ότι αυτό ήταν που περίμενα και ευχόμουν. Για την ακρίβεια, το επάγγελμα που ήθελα να γίνω από μικρός. Βέβαια το να γίνω αστροναύτης φάνταζε πιο εφικτό, από το να γίνω προγραμματιστής. Καθώς ήταν ένα από τα αντικείμενα που είχα κλίση από μικρός, αποφάσισα, στα 25 μου χρόνια να ξανά δώσω πανελλήνιες εξετάσεις και να τα κατάφερα το όνειρο έγινε πραγματικότητα. Κάποια στιγμή είχα φύγει στην Αθήνα για να ζήσω εκεί για βιοποριστικούς λόγους και είχα αφήσει για λίγο την σχολή, όμως επέλεξα να συνεχίσω το όνειρο μου με κάθε κόστος έτσι και τα κατάφερα να «μαζέψω τα κομμάτια μου» και να τελειώσω την σχολή. Για εμένα το διάβασμα και το πανεπιστήμιο ήταν το «χόμπι» μου. Μια ευχάριστη ενασχόληση που τους καλοκαιρινούς μήνες αναπολούσα αφάνταστα. Καταλυτικό ρόλο στην αλλαγή της στάσης μου απέναντι στις σπουδές μου διαδραμάτισε το μάθημα Δορυφορικές Επικοινωνίες, το οποίο με ώθησε να ασχοληθώ περαιτέρω με το πεδίο. Η κα. Αγάπη Μεσοδιακάκη όταν το θερινό εξάμηνο του 2023 μου ανέθεσε την εκπόνηση μια εργασίας με θέμα τα χιλιοστομετρικά κύματα, εξεπλάγην από το πόσο πολύ μου άρεσε να διαβάζω άρθρα και να ψάχνω στο διαδίκτυο και να γράφω την εργασία. Ήταν σαν να έπεσε «διάνα», τιμολογώντας τι ακριβώς θα με συνέπαιρνε. Μετά το πέρας του συγκεκριμένου μαθήματος, συμφώνησα ότι θα αναλάμβανα την εκπόνηση μιας πτυχιακής εργασίας σχετικής με τις δορυφορικές επικοινωνίες. Και να, που κατάφερα τελικά να την ολοκληρώσω. Κανονικά, θα ήταν σωστότερο να πω «ολοκληρώσα-με», επειδή δεν θα έπαιρνε την τελική της μορφή ποτέ χωρίς την συμβολή κάποιων ανθρώπων. Πρώτον απ' όλους, οφείλω να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα της εργασίας μου κα. Αγάπη Μεσοδιακάκη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε να αναλάβω ένα τόσο απαιτητικό θέμα. Από την επιλογή του θέματος έως και την τελική διόρθωση, ήταν πάντα εκεί.

Παρ' όλα αυτά, ένα μεγάλο, ένα τεράστιο ευχαριστώ, με όλη μου την ευγνωμοσύνη, αξίζει στην κα. Μεσοδιακάκη Αγάπη. Από την πρώτη στιγμή που ξεκινήσαμε την πτυχιακή καταλάβαμε και οι δύο ότι θα είχαμε στενή επαφή καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Μόνο που δεν ξέρω για ποιο απ' όλα να την ευχαριστήσω: για τις ατέλειωτες skype συζητήσεις μας, για τον χρόνο που «έκλεβε» από τις υποχρεώσεις της - οικογενειακές και επαγγελματικές - ακόμη και μεσάνυχτα απαντούσε προκειμένου να είναι παρούσα σε κάθε μου απορία, για την ηθική της υποστήριξη όποτε την χρειαζόμουν; Για όλα αυτά, λοιπόν, την ευχαριστώ όσο πιο ειλικρινά μπορώ και, ελπίζω κάποια μέρα να μπορέσω να της το ανταποδώσω. Θα ήταν παράλειψη μεγάλη να μην ευχαριστήσω για τους 6 μήνες συμμετοχής στο πρόγραμμα Erasmus έμμισθης πρακτικής άσκησης και το ερευνητικό κέντρο «CTTC» στην Βαρκελώνη. Αυτό το εξάμηνο της καθημερινής τριβής με τον προγραμματισμό και το κομμάτι του δικτύου ήταν η καλύτερη εμπειρία της τετραετούς φοίτησής μου. Για τέλος, άφησα την οικογένειά μου. Είμαι σίγουρος ότι η μητέρα μου και η γιαγιά μου θα έχουν μεγάλη αγωνία να πιάσουν στα χέρια του την εργασία, για να διαβάσουν με τι ασχολούμουν τον τελευταίο χρόνο. Και η περιέργειά τους θα είναι μεγάλη, γιατί είναι ελάχιστες οι φορές που ευκαιρούσα να βγούμε μια βόλτα ή απλώς να κάτσουμε να μιλήσουμε. Τους ζητώ συγνώμη, λοιπόν, για τις ώρες που τους στέρησα την ευχάριστη παρουσία μου, ιδιαίτερα όταν η μητέρα μου το χρειαζόταν. Ένα ιδιαίτερο και μεγάλο ευχαριστώ με όλη μου την αγάπη, δίνω στην μητέρα μου, η οποία με στηρίζει σε κάθε μου βήμα και γνωρίζω πως με ό,τι και να καταπιαστώ εκείνη θα είναι δίπλα μου: Ευχαριστώ μαμά!

Περιεχόμενα

Πρόλογος	iv
Περίληψη	v
Abstract	vi
Ευχαριστίες	vii
Περιεχόμενα	viii
Κατάλογος Σχημάτων	ix
Κατάλογος Πινάκων	x
Συντομογραφίες	xi
1 Εισαγωγή	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Γενιές κινητής τηλεφωνίας από το 0G ως το 5G	1
1.2.1 0.5G	2
1.2.2 1G	3
1.2.3 2G	4
1.2.4 3G	7
1.2.5 4G	10
1.2.6 5G	12
1.3 6η γενιά κινητής τηλεφωνίας	18
1.3.1 Προκλήσεις στο 6G και στόχοι	19
1.3.2 6G τεχνολογίες κλειδιά και προβλήματα	19
1.3.3 Κριτήρια ποιότητας	30
1.4 Δομή πτυχιακής και μεθοδολογία	31
1.5 Επίλογος	32
2 Κύματα χιλιοστόμετρου	33
2.1 Εισαγωγή	33
2.2 Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα	33
2.2.1 Ιονίζουσες και μη ακτινοβολίες	34
2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τα mmWave	35
2.3.1 Απώλειες ελεύθερου χώρου	35
2.3.2 Ατμοσφαιρική εξασθένηση	35
2.4 Προϋπολογισμός Ισχύος	37
2.5 Επίλογος	38
3 Online εργαλείο εκμάθησης	40
3.1 Εισαγωγή	40
3.2 Παρουσίαση εργαλείου	40
3.3 Επίλογος	52
4 Συμπεράσματα ή/και προτάσεις βελτίωσης	53
4.1 Εισαγωγή	53
4.2 Συμπεράσματα	53
4.3 Προτάσεις βελτίωσης	53
4.4 Επίλογος	53
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	54
Α□ΤΙΤΛΟΣ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ	62

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Η συσκευή push-to-talk γνωστή και ως press-to-transmit, είναι μια μέθοδος συνομιλίας ή ομιλίας σε γραμμές επικοινωνίας ημι-αμφίδρομης λειτουργίας.	2
1.2	Κινητό τηλέφωνο που χρησιμοποιούσε το σύστημα 1G TACS.	3
1.3	Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου (TDMA).	5
1.4	Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα (CDMA).	6
1.5	Δομή ενός δικτύου UMTS.	8
1.6	Ορθογωνική Πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση συχνότητας (OFDMA) και Single Carrier-FDMA (SC-FDMA).	12
1.7	Δυνατότητες των δικτύων 5G.	13
1.8	Δομή (NFV) υψηλού επιπέδου σύμφωνα με το ETSI.	14
1.9	Η αυτοματοποιημένη και προγραμματιζόμενη διαμόρφωση των στοιχείων δικτύου στα τρία επίπεδα.	15
1.10	Ο λειτουργικός διαχωρισμός (functional split) του ραδιοδικτύου με διάφορους τρόπους και σε διάφορα επίπεδα.	16
1.11	Έξυπνη πόλη.	17
1.12	Ο τεμαχισμός δικτύου 5G επιτρέπει στους παρόχους υπηρεσιών να δημιουργούν εικονικά δίκτυα από άκρο σε άκρο, προσαρμοσμένα στις απαιτήσεις της εφαρμογής.	18
1.13	Απώλειες λόγω απόστασης, λόγω ατμοσφαιρικών απωλειών κτλ.	20
1.14	IoT.	21
1.15	Ένα σενάριο σύνδεσης σε πανεπιστημιακό περιβάλλον όπου οι συνδέσεις μεταξύ κτιρίων επιτυγχάνονται μέσω υψηλής ταχύτητας συνδέσεων Ελεύθερου Χώρου (Free Space Optics - FSO).	23
1.16	VLC και FSO.	24
1.17	VLC.	25
1.18	Αστικό περιβάλλον που γίνεται χρήση μιας RIS επιφάνειας.	26
1.19	Διαφορετικές δορυφορικές τροχιές.	27
1.20	Παράδειγμα ενοποιημένου επίγειου και δορυφορικού δικτύου 6G.	28
1.21	Γεωστατικός δορυφόρος (GEO).	28
1.22	Constellation από δορυφόρους χαμηλής γήινης τροχιάς.	29
1.23	Διαδικασία ανάλυσης των διαθέσιμων δεδομένων με σκοπό τη λήψη βέλτιστων αποφάσεων.	30
1.24	Επίπεδα δικτύου με υπολογιστικές δυνατότητες.	31
2.1	Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.	34
3.1	Πρώτη οθόνη του εργαλείου όπου καλωσορίζει τον χρήστη, και εμφανίζει το μενού για περαιτέρω λειτουργίες.	41
3.2	Κύρια οθόνη του εργαλείου προϋπολογισμού ισχύος για τα κύματα χιλιοστόμετρου.	42
3.3	Χάρτης διαφορετικών περιοχών βάσει του μέσου ρυθμού βροχόπτωσης.	43
3.4	Μελέτη επίδρασης ατμοσφαιρικών απωλειών σε μία mmWave ζεύξη για διαφορετικές συχνότητες (60, 70 και 80 GHz) και τιμές κερδών κεραίας πομπού (Δεύτερη επιλογή του μενού "Ατμοσφαιρικές απώλειες").	44
3.5	Δεύτερη επιλογή του μενού "Ατμοσφαιρικές απώλειες".	45
3.6	Δεύτερη επιλογή του μενού "Ατμοσφαιρικές απώλειες".	46
3.7	Μελέτη επίδρασης της απόστασης σε μία mmWave ζεύξη για διαφορετικές συχνότητες (60, 70 και 80 GHz) ως προς την απόσταση ($R=$ 18, 22 και 30 dB).	47
3.8	Γραφική αναπαράσταση της λαμβανόμενης ισχύος του δέκτη ως προς τον ρυθμό βροχόπτωσης για διαφορετικές τιμές συχνότητας (60, 70 και 80 GHz).	48
3.9	Γραφική αναπαράσταση του σηματοθορυβικού λόγου του δέκτη ως προς το ρυθμό βροχόπτωσης για διαφορετικές τιμές συχνότητων (60, 70 και 80 GHz).	48
3.10	Γραφική αναπαράσταση της επίδρασης της ατμόσφαιρας ως προς την συχνότητα και το μήκος κύματος.	49
3.11	Γραφική αναπαράσταση της λαμβανόμενης ισχύος του δέκτη ως προς το ρυθμό βροχόπτωσης για διαφορετικές τιμές κερδών της κεραίας πομπού ($G_{tx}=$ 18, 22 και 30 dBi).	49
3.12	Γραφική αναπαράσταση του σηματοθορυβικού λόγου του δέκτη ως προς το ρυθμό βροχόπτωσης για διαφορετικές τιμές κερδών της κεραίας πομπού ($G_{tx}=$ 18, 22 και 30 dBi).	50
3.13	Μελέτη επίδρασης απόστασης σε μία mmWave ζεύξη για διαφορετικές συχνότητες (60, 70 και 80 GHz).	50
3.14	Γραφική αναπαράσταση της λαμβανόμενης ισχύος του δέκτη ως προς την απόσταση για διαφορετικές τιμές συχνότητων (60, 70 και 80 GHz).	51

3.15 Γραφική αναπαράσταση του σηματοθορυβικού λόγου του δέκτη ως προς την απόσταση για διαφορετικές τιμές συχνοτήτων (60, 70 και 80 GHz).	51
---	----

Κατάλογος Πινάκων

1.1 6G ανοικτά προβλήματα και σχετικοί δείκτες ποιότητας.	19
2.1 Πίνακας τιμών r_e για διαφορετικές τιμές e	37

Συντομογραφίες

Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΙΠΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
Π.Ε.	Πτυχιακή Εργασία
AMTS	Advanced Mobile Telephone System
AMPS	Advanced Mobile Phone Service
ARP	Auto radio puhelin
BB	Baseband
BER	Bit Error Rate
BF	Beamforming
B-Netz	mobile radio telephone
CDMA	Code-division multiple access
Cloud-Ran	Radio Access Network
DTMF	Dual tone multi-frequency
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FSO	Free-space optical communication
FCC	Federal Communications Commission
GEO	Geostationary orbit
GWL	Groundwater level
GPP	Generation Partnership Project
GPS	Global Positioning System
GUI	Graphical User Interface
GSM	Second-generation multiple-access
GPRS	General Packet Radio Service
HTML	Hyper Text Markup Language
IDEN	Integrated Digital Enhanced Network
ISL	Inter Satellite Link
IOPS	Operation Per Second
ISO	International Organization for Standardization
IS	Interim Standard 95
IPTV	Internet Protocol television
ITU	International Telecommunication Union
IPv6	Internet Protocol version 6
IMTS	Improved Mobile Telephone System
LFS	free-space loss
LTE	Long-Term Evolution
LEO	Low-Earth-Orbit
MTS	Mobile Telephone System
MTD	Mobile telephony system D)
MIMO	Multiple-input and multiple-output
mmWave	Millimeter wave
MHz	Megahertz radiation
NFV	Network function virtualization
NS	Network Slicing
OLT	Optical Line Terminals
PDC	Personal Digital Cellular
PTT	push to talk
TACS	Transcranial Alternating Current Stimulation
THz	Terahertz radiation
Tbps	TeraBytes Per Second
VLC	Visible light communication
QoS	quality-of-service
OFDMA	Orthogonal frequency-division multiple access
RCA	Radio Corporation of America

RCC	Radio Common Carrier
RTMI	Radio Telefono Mobile Integrato
RIS	Reconfigurable Intelligent Surfaces
SDN	Software Defined Radio Networking
SLA	Service Level Agreement
TDMA	Time Division Multiple Access
WAP	Wireless Application Protocol
WCC	Wireline Common Carriers
WMBA	Wireless Mobile Broadband
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
XAMP	Cross-Platform, Apache, MySQL, PHP, and Perl

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή

Στην ενότητα αυτή γίνεται η παρουσίαση των γενεών κινητής τηλεφωνίας από το 0G μέχρι το 5G, καθώς και των επερχόμενων δικτύων 6G. Αρχικά περιγράφεται η κατάσταση των κινητών επικοινωνιών στη χώρα μας και οι τεχνολογικές τάσεις, συμπεριλαμβανομένου της πορείας προς την υλοποίηση υποδομών δικτύων 5ης γενιάς. Παρουσιάζονται επίσης τα ανοικτά προβλήματα καθώς και τεχνολογίες κλειδιά για την υλοποίηση των δικτύων επόμενης γενιάς (δίκτυα 6G), ενώ έμφαση δίνεται στα κριτήρια ποιότητας των 6G δικτύων. Τέλος, παρουσιάζεται η δομή της πτυχιακής και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, δηλαδή ποιες τεχνολογίες και τεχνικές συντέλεσαν για το τελικό αποτέλεσμα.

1.2 Γενιές κινητής τηλεφωνίας από το 0G ως το 5G

Τα ασύρματα τηλέφωνα ξεκίνησαν χρησιμοποιώντας τηλεπικοινωνιακή υποδομή, την οποία κάποιος θα μπορούσε να αποκαλέσει 0G. Το 0G αναφέρεται στην τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας πριν από το κινητό τηλέφωνο όπως το γνωρίζουμε σήμερα, και περιλάμβανε τα ραδιοφωνικά τηλέφωνα που είχαν ορισμένα αυτοκίνητα πριν από την έλευση των κινητών τηλεφώνων. Τα συστήματα ραδιοτηλεφωνίας προηγούνται της κυψελωτής τεχνολογίας κινητής τηλεφωνίας. Δεδομένου ότι η άφιξή τους ήταν πριν από την πρώτη γενιά, αυτά τα συστήματα ονομάζονται, η μηδενική γενιά. Στο 0G, διάφορες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται περιλαμβανομένου τις PTT (push to talk) (σχήμα 1.1), MTS (Mobile Telephone System), IMTS (Improved Mobile Telephone System), AMTS (Advanced Mobile Telephone System), Νορβηγικό OLT (Offentlig Landmobil Telefoni, Public Land Mobile Telephony) και Σουηδικό MTD (Mobiltelefonisystem D, ή Mobile telephony system D) [1].

Παράλληλα με το IMTS στις Η.Π.Α. έως την κυκλοφορία των κυψελωτιδών συστημάτων AMPS (Advanced Mobile Phone Service) κυψελωτιδών συστημάτων μια ανταγωνιστική τεχνολογία κινητού τηλεφώνου ήταν η υπηρεσία RCC (Radio Common Carrier). Η υπηρεσία ήταν διαθέσιμη από τη δεκαετία του 1960 έως τη δεκαετία του 1980, οπότε και τα κυψελωτιδή συστήματα AMPS κατέστησαν τον εξοπλισμό RCC παρωχημένο. Αυτά τα συστήματα λειτουργούσαν σε ρυθμιζόμενο περιβάλλον ανταγωνιστικά με τα συστήματα MTS και IMTS της Bell. Η υπηρεσία RCC χειρίζεται τηλεφωνικές κλήσεις οι οποίες εξυπηρετούνταν από ιδιωτικές εταιρείες και ιδιώτες. Ορισμένα συστήματα σχεδιάστηκαν για να επιτρέπουν στους πελάτες των γειτονικών RCC να χρησιμοποιούν τις εγκαταστάσεις τους, αλλά γενικά ο χώρος των RCC δεν συμμορφώθηκε με κανένα ενιαίο διαλειτουργικό τεχνικό πρότυπο (μια ικανότητα που ονομάζεται περιαγωγή στα σύγχρονα συστήματα). Για παράδειγμα, το τηλέφωνο μιας υπηρεσίας RCC που βασίζεται σε μια πόλη A δεν θα ήταν σίγουρο ότι μπορεί να λειτουργήσει σε μια πόλη B. Λίγο πριν εγκαταλειφθεί το RCC, οι βιομηχανίες εργάζονταν σε ένα τεχνικό πρότυπο που θα επέτρεπε ενδεχομένως την περιαγωγή και ορισμένοι χρήστες κινητών συσκευών είχαν πολλαπλούς αποκωδικοποιητές για να επιτρέψουν τη λειτουργία με περισσότερες από μία από τις κοινές μορφές σηματοδότησης (600/1500, 2805 και Reach). Η χειροκίνητη λειτουργία ήταν συχνά μια εναλλακτική εφεδρική λύση για τους RCC roamers. Η περιαγωγή δεν υποστηρίχθηκε αρκετά κι αυτό διότι, εν μέρει δεν υπήρχε κεντροποιημένη βάση δεδομένων χρέωσης για τα RCC. Οι μορφές σηματοδότησης δεν ήταν τυποποιημένες. Για παράδειγμα, ορισμένα συστήματα χρησιμοποίησαν τεχνική two-tone sequential paging για να ειδοποιήσουν μια

κινητή ή φορητή συσκευή ότι ένα ενσύρματο τηλέφωνο προσπαθούσε να κάνει κλήση. Άλλα συστήματα χρησιμοποίησαν Dual tone multi-frequency (DTMF). Ορισμένοι χρησιμοποίησαν ένα σύστημα που ονομάζεται Secode 2805 το οποίο μετέδιδε έναν διακοπτόμενο ήχο στα 2805 Hz (με τρόπο παρόμοιο με τη σηματοδότηση IMTS) για να ειδοποιεί τα κινητά για μια προσφερόμενη κλήση. Ορισμένος εξοπλισμός ραδιοκυματοεπικοινωνίας που χρησιμοποιήθηκε με συστήματα RCC ήταν half duplex, εξοπλισμός push-to-talk, όπως οι συσκευές της Motorola ή συμβατικά αμφίδρομα ραδιοκύματα RCA-700. Άλλος εξοπλισμός οχημάτων είχε ακουστικά τηλεφώνου, περιστροφική κλήση ή πλήκτρο, και λειτουργούσε πλήρως αμφίδρομα ως ένα συμβατικό ενσύρματο τηλέφωνο. Τα RCC χρησιμοποίησαν συζευγμένες συχνότητες UHF 454/459 MHz και VHF 152/158 MHz κοντά σε αυτές που χρησιμοποιούνται από το IMTS.



Σχήμα 1.1: Η συσκευή push-to-talk γνωστή και ως press-to-transmit, είναι μια μέθοδος συνομιλίας ή ομιλίας σε γραμμές επικοινωνίας ημι-αμφίδρομης λειτουργίας.

1.2.1 0.5G

Το 0.5G είναι μια ομάδα τεχνολογιών με βελτιωμένα χαρακτηριστικά σε σύγκριση με τις βασικές τεχνολογίες όπως το 0G. Αυτά τα πρώιμα συστήματα κινητής τηλεφωνίας μπορούν να διακριθούν από παλαιότερα κλειστά συστήματα ραδιοτηλεφώνου, καθώς ήταν διαθέσιμα ως εμπορική υπηρεσία που αποτελούσε μέρος του δημόσιου τηλεφωνικού δικτύου, με τους δικούς τους αριθμούς τηλεφώνου, και όχι ως μέρος κλειστού δικτύου, όπως οι ραδιοκυματοεπικοινωνίες που χρησιμοποιούσε η αστυνομία ή το σύστημα επικοινωνίας για τα ταξί. Αυτά τα κινητά τηλέφωνα ήταν συνήθως τοποθετημένα σε αυτοκίνητα ή φορητά. Συνήθως, ο πομποδέκτης (transceiver) ήταν τοποθετημένος στο πορτμπαγκάζ του οχήματος και το καντράν, οθόνη και ακουστικό τοποθετούνταν κοντά στο κάθισμα του οδηγού. Πουλήθηκαν μέσω των WCC (Wireline Common Carriers), δηλαδή των (τηλεφωνικών εταιρειών) και των RCC (Radio Common Carriers). Οι κύριοι χρήστες ήταν καταγραφείς, εργοδηγοί κατασκευών, μεσίτες και διασημότητες. Η χρήση αφορούσε απλώς τη βασική επικοινωνία φωνής. Τα πρώτα παραδείγματα αυτής της τεχνολογίας είναι: Το Auto radio puhelin (ARP) ξεκίνησε το 1971 στη Φινλανδία ως το πρώτο δημόσιο εμπορικό δίκτυο κινητής τηλεφωνίας της χώρας. Το B-Netz ξεκίνησε το 1972 στη Γερμανία ως το δεύτερο δημόσιο εμπορικό δίκτυο κινητής τηλεφωνίας της χώρας, αλλά το πρώτο που δεν απαιτούσε πλέον ανθρώπους-χειριστές για τις συνδέσεις. [2].

1.2.2 1G

Το 1G, το οποίο εισήχθη το 1980, είναι η πρώτη γενιά ασύρματης τηλεφωνικής τεχνολογίας, που περιλάμβανε αναλογικά κινητά τηλέφωνα. Το 1979, το πρώτο κυψελοειδές σύστημα στον κόσμο τέθηκε σε λειτουργία από τη Nippon Telephone και Telegraph (NTT) στο Τόκιο της Ιαπωνίας. Στην Ευρώπη τα δύο πιο δημοφιλή αναλογικά συστήματα ήταν το Nordic Mobile Telephone (NMT) και το TACS (Transcranial Alternating Current Stimulation) Σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2: Κινητό τηλέφωνο που χρησιμοποιούσε το σύστημα 1G TACS.

Παρόλο που όλα τα συστήματα προσέφεραν δυνατότητα παράδοσης και περιαγωγής, τα κινητά δίκτυα δεν ήταν σε θέση να διαλειτουργήσουν μεταξύ των χωρών. Αυτό ήταν το κύριο μειονέκτημα των κινητών δικτύων πρώτης γενιάς. Το 1G είχε αναξιόπιστες μεταπομπές χαμηλής χωρητικότητας, φωνητικές συνδέσεις χαμηλής ποιότητας και καθόλου ασφάλεια λόγω της πραγματοποίησης των κλήσεων μέσω πύργων ραδιοκύματα καθιστώντας τους ανεπιθύμητα ευάλωτες. Στις ΗΠΑ κυκλοφόρησε για πρώτη φορά το πρότυπο 1G AMPS το 1982. Το σύστημα AMPS έλαβε ένα εύρος ζώνης 40 MHz εντός του εύρους συχνοτήτων 800-900 MHz από την ομοσπονδιακή κυβέρνηση Επιτροπή Επικοινωνίας (FCC). Το 1988 διατέθηκε επιπλέον εύρος ζώνης (διευρυμένο φάσμα (ES)) στο AMPS. Η Γαλλία χρησιμοποίησε το RadioComm 2000, ενώ στη Δυτική Γερμανία, τη Πορτογαλία και τη Νότια Αφρική χρησιμοποιήθηκε ένα πρότυπο γνωστό ως C-450.

Συνοψίζοντας, η τεχνολογία 1G αντικατέστησε την τεχνολογία 0G, κάνοντας χρήση για πρώτη φορά κινητών ραδιοτηλεφώνων και τεχνολογιών όπως το Κινητό Τηλεφωνικό Σύστημα (MTS), το Προηγμένο Κινητό Τηλεφωνικό Σύστημα (AMTS), τη βελτιωμένη υπηρεσία κινητής τηλεφωνίας (IMTS) και το Push to Talk (PTT), ενώ χαρακτηρίζεται από τα παρακάτω κύρια γεγονότα:

1. Αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1980 και ολοκληρώθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1990.
2. Παραγωγή αναλογικών κινητών τηλεφώνων με ταχύτητα έως 2,4 kbps.

3. Το Advance Mobile phone system (AMPS) είναι ένα κινητό σύστημα 1G και υπήρξε το πρώτο σύστημα που λανσαρίστηκε από τις ΗΠΑ.

4. Επιτρέπει στους χρήστες να πραγματοποιούν φωνητικές κλήσεις σε 1 χώρα.

1.2.3 2G

Η συντομογραφία “2G” αναφέρεται στη δεύτερη γενιά των κινητών τηλεφώνων, γνωστή και ως “2G cellular technology” (2η γενιά κινητής τηλεφωνίας). Αυτή η τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας αντιπροσώπευε ένα μεγάλο άλμα προόδου από την πρώτη γενιά (1G), και ήταν κυρίως διαδεδομένη στη δεκαετία του 1990 έως και τις αρχές του 2000.

Το 2G παρείχε υπηρεσίες όπως κείμενο, εικονομηνύματα και MMS. Το 2G παρείχε μεγαλύτερη ασφάλεια τόσο για τον αποστολέα όσο και για τον παραλήπτη. Όλα τα μηνύματα κειμένου ήταν ψηφιακά κρυπτογραφημένα, επιτρέποντας τη μεταφορά δεδομένων με τέτοιο τρόπο που μόνο ο προβλεπόμενος δέκτης μπορούσε να τα λάβει και να τα διαβάσει. Το σύστημα 2G χρησιμοποιεί τεχνολογία ψηφιακής πρόσβασης κινητής τηλεφωνίας όπως το TDMA και το CDMA (Code-division multiple access) (σχήματα 1.3 και 1.4, αντίστοιχα).

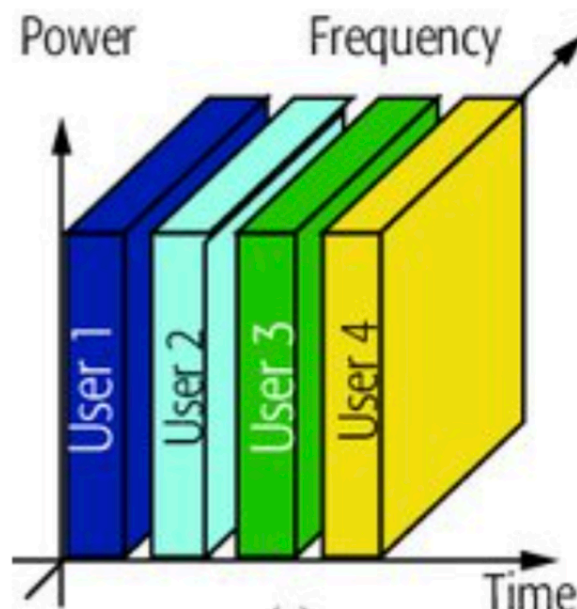
Το 2G, γνωστό και ως Δεύτερη Γενιά στην τηλεπικοινωνιακή τεχνολογία, ήταν ένα μεγάλο βήμα μπροστά στην ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιών. Αυτή η τεχνολογία εισήγαγε την ψηφιακή επικοινωνία και είχε πολλά σημαντικά χαρακτηριστικά:

1. Ψηφιακή Μετάβαση: Το 2G αντιπροσώπευε μια μεγάλη αλλαγή από την αναλογική στην ψηφιακή επικοινωνία. Αυτό σημαίνει ότι αντί να μεταφέρουμε τα ηχητικά μας σήματα με μορφή κύματος, τα μετατρέπαμε σε ψηφιακά δεδομένα. Αυτό βελτίωσε την ποιότητα της φωνητικής επικοινωνίας και επιτρέπει σε πολλούς να χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα καλύτερα.
2. Κύριες Τεχνολογίες του 2G:
 - GSM (Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών): Το GSM ήταν ένα από τα πιο διαδεδομένα συστήματα 2G παγκοσμίως. Χρησιμοποίησε μια συνδυασμένη τεχνική για να επιτρέψει σε πολλούς να μοιράζονται την ίδια συχνότητα αποτελεσματικά και εισήγαγε χαρακτηριστικά όπως τα SMS και τη δυνατότητα διεθνούς ροής κλήσεων.
 - CdmaOne (Code-division multiple access One): Το cdmaOne ήταν άλλο ένα σύστημα 2G που χρησιμοποίησε μια διαφορετική τεχνική για να επιτρέψει την ταυτόχρονη μετάδοση από πολλούς χρήστες στην ίδια συχνότητα με χρήση διαφορετικών κωδικών, γνωστή ως Code-division multiple access (CDMA). Αυτή η τεχνολογία ήταν ευρέως διαδεδομένη, ειδικά στη Βόρεια Αμερική.
3. Υπηρεσίες Δεδομένων: Ενώ το 2G κυρίως επικεντρωνόταν στις φωνητικές κλήσεις, εισήγαγε επίσης βασικές υπηρεσίες δεδομένων όπως τα SMS. Ωστόσο, οι ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων ήταν αρκετά χαμηλές, κυμαινόμενες συνήθως από 9,6 Kbps έως 64 Kbps. Αυτό έκανε το 2G κατάλληλο για υπηρεσίες βασισμένες σε κείμενο αλλά όχι για εφαρμογές που απαιτούν υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων όπως η περιήγηση στο διαδίκτυο ή το streaming βίντεο.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του TDMA είναι τα εξής:

- Χρονοδιακριτική Πολυπλεξία: Ο χρόνος χωρίζεται σε περιοδικά χρονικά διαστήματα, και κάθε χρήστης ή συσκευή είναι επιτρεπτό να μεταδίδει μόνο κατά τη διάρκεια του δικού του χρονικού υποδιαστήματος (time slot).
- Πρόσβαση Πολλαπλών Χρηστών: Με το TDMA, πολλοί χρήστες μπορούν να μοιράζονται το ίδιο φάσμα συχνοτήτων και να μεταδίδουν σε διαφορετικά χρονικά slots, αυξάνοντας τη χωρητικότητα του δικτύου.
- Εξοικονόμηση Ενέργειας: Επειδή οι συσκευές μεταδίδουν μόνο κατά τη διάρκεια του δικού τους time slot, μπορούν να παραμείνουν ανενεργές κατά την υπόλοιπη χρονική περίοδο, εξοικονομώντας ενέργεια.
- Ελαχιστοποίηση Συγκρούσεων: Η χωροχρονική κατανομή των επικοινωνιακών πόρων μειώνει τον κίνδυνο συγκρούσεων, όπου δύο συσκευές προσπαθούν να μεταδώσουν ταυτόχρονα στην ίδια συχνότητα.

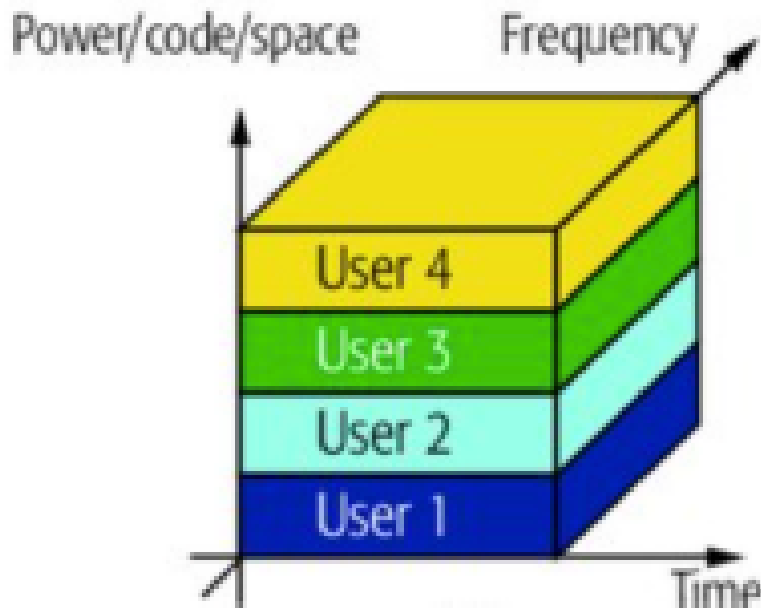
Το TDMA χρησιμοποιείται σε διάφορα ασύρματα δίκτυα, όπως τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (GSM, D-AMPS), τα δίκτυα ασύρματου δικτύου (WiMAX), και άλλα. Αυτή η τεχνική επιτρέπει την αποτελεσματική και αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων σε πολλούς χρήστες σε ένα κοινό κομμάτι του φάσματος συχνοτήτων.



Σχήμα 1.3: Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου (TDMA).

Το TDMA (Time Division Multiple Access), όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3, διαιρεί την πρόσβαση στο μέσο σε χρόνοσχιστές και χρησιμοποιείται σε διάφορα ασύρματα δίκτυα, όπως τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (GSM, D-AMPS, iDEN (Integrated Digital Enhanced Network), IS (Interim Standard)-136), τα δίκτυα ασύρματου δικτύου (WiMAX), και άλλα. Αυτή η τεχνική επιτρέπει την αποτελεσματική και αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων σε πολλούς χρήστες σε ένα κοινό κομμάτι του φάσματος συχνοτήτων.

Το GSM χρησιμοποιεί TDMA για πολυπλεξία έως 8 κλήσεων ανά κανάλι στις ζώνες 900 και 1800 MHz και δε μετέδιδε μόνο φωνή αλλά και δεδομένα μεταγωγής κυκλώματος με ταχύτητα έως 14,4 kbps.



Σχήμα 1.4: Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα (CDMA).

Στις ΗΠΑ η FCC (Federal Communications Commission) δημοπράτησε επίσης ένα νέο μπλοκ φάσματος στη ζώνη των 1900 MHz. Μέσα σε 20 χρόνια η τεχνολογία GSM βελτιωνόταν συνεχώς για να προσφέρει καλύτερες υπηρεσίες στην αγορά. Οι νέες τεχνολογίες αναπτύχθηκαν με βάση το αρχικό σύστημα GSM, οδηγώντας σε ένα προηγμένο σύστημα, γνωστό ως 2.5G.

Δύο βασικά νέα στοιχεία δικτύου εισάγονται με το 2.5G ή αλλιώς GPRS, το SGSN και το GGSN, με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Το SGSN παρακολουθεί την κατάσταση του κινητού σταθμού και παρακολουθεί τις κινήσεις του εντός μιας δεδομένης γεωγραφικής περιοχής. Είναι επίσης υπεύθυνη για τη δημιουργία και τη διαχείριση των συνδέσεων δεδομένων μεταξύ του χρήστη κινητής τηλεφωνίας και του δικτύου προορισμού.
- Το GGSN παρέχει το σημείο σύνδεσης μεταξύ του τομέα GPRS και των εξωτερικών δικτύων δεδομένων, όπως το Διαδίκτυο και τα εταιρικά Intranets. Σε κάθε εξωτερικό δίκτυο δίνεται ένα μοναδικό όνομα σημείου πρόσβασης (APN, Access Point Name) το οποίο χρησιμοποιείται από τον χρήστη κινητής τηλεφωνίας για τη σύνδεση με το απαιτούμενο δίκτυο προορισμού.

Το GSM έχει προσαρμοστεί για να υποστηρίζει το χωρίς σύνδεση GPRS τρόπο λειτουργίας. Ένας νέος λειτουργικός κόμβος που ονομάζεται Packet Control Unit (PCU) έχει εισαχθεί για τον έλεγχο και τη διαχείριση της κατανομής των ραδιοσυχνοτήτων πόρων GPRS σε χρήστες κινητών [3].

1.2.4 3G

Οι συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες των συνδρομητών και οι διάφορες τεχνολογικές εξελίξεις που υπήρχαν στις αρχές της δεκαετίας του 2000 καθιστούσαν τα συστήματα δεύτερης γενιάς ξεπερασμένα. Αυτό οδήγησε την αγορά στην ανάπτυξη της τεχνολογίας τρίτης γενιάς (3G) που επικεντρώθηκε στη βελτίωση των υπηρεσιών φωνής με ορισμένες δυνατότητες για μεταφορά δεδομένων. Αυτά τα συστήματα αναπτύχθηκαν με σκοπό να προσφέρουν σύνδεση υψηλής ταχύτητας δεδομένων και πολυμέσων σε συνδρομητές. Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) έχει ορίσει τα συστήματα 3G ως ικανά να υποστηρίζουν εύρη δεδομένων υψηλής ταχύτητας από 144 kbps έως πάνω από 2 Mbps. Οι τεχνολογίες που μπορούν να ανταποκριθούν σε αυτές τις απαιτήσεις είναι οι CDMA2000 και το UMTS [4].

Τα οφέλη του 3G είναι τα ακόλουθα:

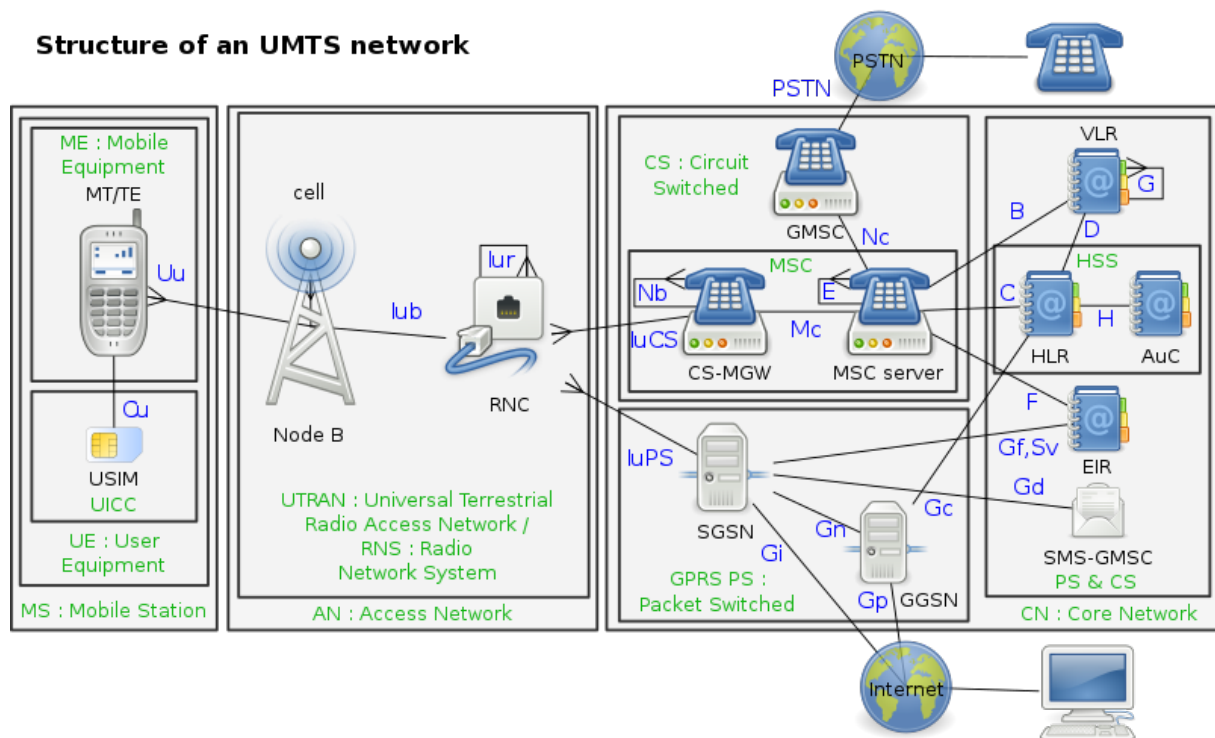
- **Βελτιωμένη Ταχύτητα Δεδομένων:** Μία από τις πρώτες φορές που έγινε δυνατή η πλοήγηση στο διαδίκτυο, η λήψη email και η προβολή βίντεο από το κινητό τηλέφωνο. Σαν αποτέλεσμα, έγινε εφικτή η πρόσβαση στον κόσμο του διαδικτύου ακόμη και όταν ο χρήστης βρίσκεται καθοδόν.
- **Συνδεσιμότητα στο Διαδίκτυο από παντού:** Τώρα ο καθένας μπορεί να χρησιμοποιήσει τη συνδεσιμότητα στο διαδίκτυο. Το κινητό τηλέφωνο έγινε όχημα για την πρόσβαση στον κόσμο των δεδομένων και την ανταλλαγή πληροφοριών. Έτσι ο καθένας επωφελήθηκε από αυτήν την τεχνολογία.
- **Πολυμέσα και Κινητή Τηλεφωνία:** Το 3G επέτρεψε τη δυνατότητα για βίντεο κλήσεις, ροή βίντεο και streaming μουσικής από το κινητό τηλέφωνο. Δόθηκε η δυνατότητα να συνδυαστεί φωνή, εικόνα και ήχος σε ένα μόνο κινητό τηλέφωνο.
- **Υποστήριξη Διεθνούς Περιαγωγής:** Το κινητό τηλέφωνο 3G λειτούργησε σε διάφορες χώρες, καθιστώντας τα ταξίδια και τις διεθνείς επικοινωνίες πολύ πιο εύκολα για τον καθένα.

Συνολικά, το 3G ανοίγει τον δρόμο για νέες δυνατότητες στην κινητή επικοινωνία και στη συνδεσιμότητα, καθιστώντας το κινητό τηλέφωνο πολύ περισσότερο από ένα απλό εργαλείο επικοινωνίας.

Συνοπτικά, το 3G έχει τις ακόλουθες βελτιώσεις σε σχέση με το 2.5G και τα προηγούμενα δίκτυα:

1. Βελτιωμένη ροή ήχου και βίντεο.
2. Αρκετές φορές υψηλότερη ταχύτητα δεδομένων.
3. Υποστήριξη τηλεδιάσκεψης.
4. Περιήγηση στο Web και WAP (Wireless Application Protocol) σε υψηλότερες ταχύτητες.
5. Υποστήριξη IPTV (Internet Protocol television).

Τα βασικά χαρακτηριστικά του UMTS περιλαμβάνουν:



Σχήμα 1.5: Δομή ενός δικτύου UMTS.

- **Υψηλή Ταχύτητα Δεδομένων:** Το UMTS επιτρέπει υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, κάνοντας το κατάλληλο για υπηρεσίες δεδομένων όπως περιήγηση στον ιστό και αποστολή email μέσω κινητών συσκευών.
- **Υποστήριξη Για Φωνή και Δεδομένα:** Εκτός από τις φωνητικές κλήσεις, το UMTS επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων, περιλαμβανομένων κειμένου, εικόνων και βίντεο.
- **Κινητό Internet:** Το UMTS επιτρέπει τη σύνδεση στο διαδίκτυο από κινητές συσκευές, καθιστώντας την περιήγηση στον ιστό και τη λήψη email πιο εύκολη από τα κινητά τηλέφωνα.
- **Σύγχρονη Κινητή Τηλεφωνία:** Το UMTS αντικατέστησε τις προηγούμενες τεχνολογίες όπως το GSM και το GPRS, προσφέροντας βελτιωμένη ποιότητα φωνής και δεδομένων.

Το UMTS αποτέλεσε το βήμα προς την ανάπτυξη των 3G και 4G κινητών δικτύων και άνοιξε τον δρόμο για την εξέλιξη των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών.

Ένα δίκτυο UMTS, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.5, αποτελείται από τρία μέρη: το ME ή τον κινητό εξοπλισμό, το UTRAN που αντιπροσωπεύει το UMTS Terrestrial Radio Access Network και το CN που είναι το Core Network.

- Το UE (Εξοπλισμός χρήστη) ή το ME (Κινητός εξοπλισμός) περιέχει το κινητό τηλέφωνο και την κάρτα SIM (Subscriber Identity Module) που ονομάζεται USIM (Universal SIM), η οποία περιέχει συγκεκριμένα στοιχεία για το συνδρομητή και επιτρέπει την επικυρωμένη είσοδό του στο δίκτυο. Το UMTS UE μπορεί να λειτουργήσει σε τρεις τρόπους: λειτουργία CS (μεταγωγή κυκλώματος), λειτουργία PS (μεταγωγή πακέτου) και λειτουργία CS / PS. Στη λειτουργία CS το UE συνδέεται

μόνο στο κεντρικό δίκτυο. Στη λειτουργία PS, το UE συνδέεται μόνο με τον τομέα PS (αν και μπορεί να προσφερθούν υπηρεσίες CS όπως το VoIP (Voice over Internet Protocol)), ενώ στη λειτουργία CS / PS, το κινητό μπορεί να λειτουργεί ταυτόχρονα για να προσφέρει και τις δύο υπηρεσίες CS και PS.

- Τα στοιχεία του δικτύου πρόσβασης Radio Access Network (RAN) είναι: i) ο Σταθμοί βάσης (Base Stations ή NodeB) των οποίων οι κύριες λειτουργίες είναι έλεγχος ισχύος κλειστού βρόχου, κωδικοποίηση φυσικού καναλιού, διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση, μεταδόσεις διεπαφής αέρα και λήψη και χειρισμός σφαλμάτων, ii) ο Radio Network Controller (RNC) των οποίων οι κύριες λειτουργίες είναι ο έλεγχος και διαχείριση πόρων ραδιοζεύξης, ο έλεγχος ισχύος, η κατανομή καναλιών, ο έλεγχος εισαγωγής, η κρυπτογράφηση, η τμηματοποίηση και η επανασυναρμολόγηση.
- Η κύρια λειτουργία του Core Network (CN) είναι η μεταγωγή, δρομολόγηση και η μεταφορά των δεδομένων των χρηστών. Το CN περιέχει επίσης τις βάσεις δεδομένων και τις λειτουργίες διαχείρισης δικτύου. Η βασική αρχιτεκτονική CN για το UMTS βασίζεται στο δίκτυο GSM με την επέκταση του GPRS. Όλος ο εξοπλισμός πρέπει να τροποποιηθεί για τη λειτουργία και τις υπηρεσίες UMTS. Το CN χωρίζεται στους τομείς CS και PS.

Τα στοιχεία του βασικού δικτύου είναι:

- GMSC ή Gateway Mobile Services Switching Center, το οποίο είναι υπεύθυνο για τη μεταγωγή κυκλώματος και χρησιμοποιείται για τη δρομολόγηση κλήσεων εκτός του δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Συγκεκριμένα κάθε φορά που μια κλήση για έναν συνδρομητή κινητής τηλεφωνίας προέρχεται από εξωτερικό δίκτυο κινητής τηλεφωνίας ή ο συνδρομητής θέλει να πραγματοποιήσει μια κλήση σε κάποιον εκτός του δικτύου κινητής τηλεφωνίας, η κλήση δρομολογείται μέσω του GMSC.
- Το VLR ή το Visitor Location Register, το οποίο είναι επίσης ένα στοιχείο εναλλαγής κυκλώματος, περιέχει πληροφορίες σχετικά με την περιαγωγή των συνδρομητών εντός της περιοχής τοποθεσίας ενός κέντρου μεταγωγής κινητών (MSC). Ο πρωταρχικός ρόλος του VLR είναι η ελαχιστοποίηση του αριθμού των ερωτημάτων που πρέπει να κάνουν οι MSC στο οικείο μητρώο τοποθεσίας (HLR), το οποίο διατηρεί μόνιμα δεδομένα σχετικά με τους συνδρομητές του δικτύου κινητής τηλεφωνίας.
- Το SGSN ή Serving GPRS Support Node, το οποίο αφορά μεταγωγή πακέτου και μεσολαβεί στην πρόσβαση σε πόρους δικτύου για λογαριασμό συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας και εφαρμόζει την πολιτική προγραμματισμού πακέτων μεταξύ διαφορετικών κλάσεων QoS. Είναι υπεύθυνο για τον καθορισμό του περιβάλλοντος του πρωτοκόλλου πακέτων δεδομένων (PDP) με το GGSN (κόμβος υποστήριξης πύλης GPRS).
- Το GGSN ή Gateway GPRS Support Node, το οποίο επίσης αφορά μεταγωγή πακέτου, είναι υπεύθυνο για τη συνεργασία μεταξύ του δικτύου GPRS και των εξωτερικών δικτύων. Από την οπτική των εξωτερικών δικτύων, το GGSN είναι ένας δρομολογητής σε ένα υπο-δίκτυο, επειδή Το GGSN «κρύβει» την υποδομή GPRS από το εξωτερικό δίκτυο. Όταν το GGSN λαμβάνει δεδομένα που απευθύνονται σε συγκεκριμένο χρήστη, ελέγχει εάν ο χρήστης είναι ενεργός. Εάν είναι, το GGSN προωθεί τα δεδομένα στο SGSN που εξυπηρετεί τον κινητό χρήστη, αλλά εάν ο χρήστης κινητής

τηλεφωνίας είναι ανενεργός, τα δεδομένα απορρίπτονται. Από την άλλη πλευρά, τα πακέτα που προέρχονται από κινητό δρομολογούνται στο σωστό δίκτυο από το GGSN. Για να γίνουν όλα αυτά, το GGSN διατηρεί ένα αρχείο ενεργών χρηστών κινητής τηλεφωνίας, ενώ το SGSN στους χρήστες κινητής τηλεφωνίας είναι συνδεδεμένο. Εκχωρεί διευθύνσεις IP σε χρήστες κινητών συσκευών και τελευταίο αλλά όχι λιγότερο σημαντικό, το GGSN είναι υπεύθυνο για τη χρέωση.

- Στοιχεία δικτύου όπως τα EIR, HLR, VLR και AUC είναι κοινόχρηστα και στους δύο τομείς. Ο ασύγχρονος τρόπος μεταφοράς (ATM) ορίζεται για τη μετάδοση στο δίκτυο κορμού του UMTS. Οι κυψέλες UMTS συνεχίζουν να διατηρούν τους πομποδέκτες GSM, GPRS και EDGE προκειμένου να εξυπηρετούν τους χρήστες που δεν έχουν αναβαθμίσει τις συσκευές τους σύμφωνα με τα πρότυπα W-CDMA. Εκτός από αυτό, το UMTS συνεχίζει να χρησιμοποιεί, με μερικές αλλαγές, ωστόσο, την υποδομή των GSM και GPRS. Αυτό γίνεται συμπεριλαμβάνοντας MSC ή Mobile Switching Centers, GPRS routers (SGSNs) και GGSNs [3], [5].

1.2.5 4G

Το 4G, το οποίο ονομάζεται και “Τέταρτη Γενιά” κινητής τηλεφωνίας, αποτελεί ένα πραγματικό άλμα προόδου για την κινητή επικοινωνία, προσφέροντας:

- Υψηλή Ταχύτητα Δεδομένων: Το 4G μας έφερε ακόμη πιο γρήγορη σύνδεση στο διαδίκτυο στα κινητά μας τηλέφωνα. Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να κατεβάζουμε και να ανεβάζουμε αρχεία, να παρακολουθούμε βίντεο σε υψηλή ανάλυση και να περιηγούμαστε στο διαδίκτυο χωρίς προβλήματα.
- Κινητή Συνδεσιμότητα πανταχού παρούσα: Με το 4G, φέραμε τη σύνδεση στο διαδίκτυο μαζί μας παντού. Το κινητό μας τηλέφωνο γίνεται ένα εργαλείο που μας επιτρέπει να είμαστε συνδεδεμένοι στον κόσμο της πληροφορίας και των επικοινωνιών ανά πάσα στιγμή και παντού.
- Προηγμένες Εφαρμογές: Με την υποστήριξη του 4G, είναι πλέον εφικτό να χρησιμοποιούμε προηγμένες εφαρμογές και υπηρεσίες στα κινητά μας τηλέφωνα. Μπορούμε να απολαμβάνουμε παιχνίδια, να παρακολουθούμε ταινίες σε ροή, να κάνουμε βίντεοκλήσεις και να χρησιμοποιούμε τη συσκευή μας για την ψυχαγωγία και την εργασία μας.
- Ευκολία και Ευελιξία: Το 4G μας δίνει την ευκαιρία να είμαστε ευέλικτοι και αποτελεσματικοί. Μπορούμε να επικοινωνούμε, να εργαζόμαστε και να διασκεδάζουμε όπως θέλουμε, ανεξαρτήτως τοποθεσίας.
- Συνδεσιμότητα Κινητής Συσκευής: Με το 4G, η κινητή συσκευή μας γίνεται το κέντρο της ψηφιακής μας ζωής. Μπορούμε να επικοινωνούμε, να ενημερωνόμαστε, και να εξερευνούμε τον κόσμο γύρω μας με ένα απλό άγγιγμα.

Συνολικά, το 4G μεταμορφώνει τον τρόπο με τον οποίο ζούμε, εργαζόμαστε και επικοινωνούμε, προσφέροντάς μας ακόμη περισσότερες ευκαιρίες και δυνατότητες στην κινητή τεχνολογία.

Αν χρησιμοποιείτε 4G, μπορείτε να έχετε πρόσβαση στο δίκτυο μέσω οποιασδήποτε από τις προαναφερθείσες τεχνολογίες ακόμη και όταν μετακινείστε από ένα μέρος σε άλλο. Συνοπτικά το 4G χαρακτηρίζεται από:

1. Θεωρείται ότι ενσωματώνει τη δυνατότητα IP προσφέροντας μεγαλύτερη ασφάλεια καθώς και υψηλούς ρυθμούς αποστολής και λήψης δεδομένων.
2. Είναι δυνατή η λήψη με ρυθμό 100 Mbps από κινητό τηλέφωνο και 1 Gbps για σταθμό βάσης.
3. Αντί για υβριδική τεχνολογία που χρησιμοποιείται στο 3G με το συνδυασμό CDMA και TDMA μια νέα τεχνολογία το OFDMA (Orthogonal frequency-division multiple access) εισάγεται στο 4G, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.6 αριστερά. Με το OFDMA επιτρέπεται η πολλαπλή πρόσβαση στο μέσο αλλά όχι λόγω διαφορετικών χρονοσχημάτων όπως στο TDMA ή κωδίκων όπως στο CDMA.

Συγκεκριμένα, το Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA), είναι μια υψηλά αποδοτική και προηγμένη τεχνολογία που χρησιμοποιείται στα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας. Είναι σαν μία καλά οργανωμένη ορχήστρα όπου πολλά όργανα παίζουν τα μέρη τους αρμονικά για να δημιουργήσουν όμορφη μουσική. Στον κόσμο των τηλεπικοινωνιών, το OFDMA εξασφαλίζει ότι διάφορες συσκευές μπορούν να μεταδίδουν και να λαμβάνουν δεδομένα ταυτόχρονα, χωρίς παρεμβολές ή διακοπές.

Φανταστείτε ένα αεροδρόμιο γεμάτο δραστηριότητα όπου πολλά αεροσκάφη απογειώνονται και προσγειώνονται. Το OFDMA λειτουργεί όπως ένας ελεγκτής αεροπορικής κυκλοφορίας που διαχειρίζεται αποτελεσματικά την κατανομή των διαθέσιμων διαδρόμων σε πολλά αεροσκάφη, εξασφαλίζοντας ομαλές απογειώσεις και προσγειώσεις για όλα τα αεροσκάφη. Με παρόμοιο τρόπο, το OFDMA διαιρεί το διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων σε μικρότερα υπο-κανάλια, επιτρέποντας σε διάφορες συσκευές να επικοινωνούν ταυτόχρονα χωρίς συγκρούσεις.

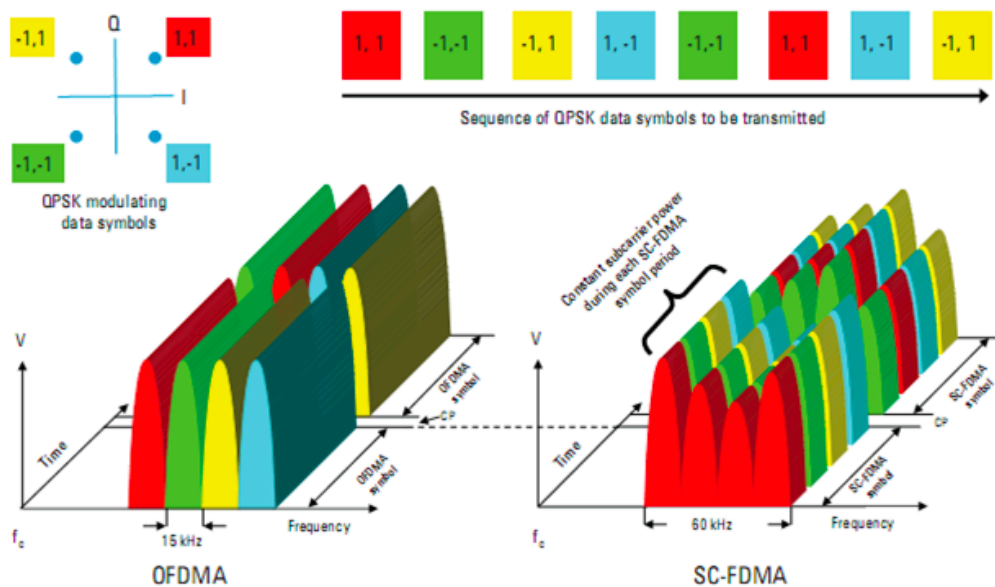
Ένα από τα πλεονεκτήματα του OFDMA είναι η ικανότητά του να προσαρμόζεται σε μεταβαλλόμενες συνθήκες. Είναι σαν ένα έξυπνο σύστημα διαχείρισης κυκλοφορίας που διαθέτει τη δυνατότητα να διανέμει δυναμικά περισσότερους πόρους σε μια συσκευή όταν απαιτείται μια πιο γρήγορη σύνδεση δεδομένων, εξασφαλίζοντας μια ομαλή εμπειρία για τους χρήστες, είτε πρόκειται για streaming υψηλής ανάλυσης βίντεο είτε για αποστολή μηνυμάτων κειμένου.

Λόγω του ότι το OFDMA είναι μια τεχνική πολλαπλής πρόσβασης που διαχειρίζεται αποτελεσματικά τα υπο-κανάλια στον φασματικό χώρο, επιτρέποντας σε πολλές συσκευές να μεταδίδουν και να λαμβάνουν δεδομένα ταυτόχρονα, με ελάχιστες παρεμβολές, βρίσκει ευρεία εφαρμογή στην πολλαπλή πρόσβαση στην κάτω ζεύξη (downlink) του 4G.

Το SC-FDMA (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access), όπως φαίνεται στο σχήμα 1.6 δεξιά, είναι μια τεχνική πολλαπλής πρόσβασης που χρησιμοποιείται σε ασύρματα συστήματα επικοινωνίας, ειδικά στο uplink (από τη συσκευή προς το δίκτυο). Ως ένας έξυπνος τρόπος για πολλές συσκευές να μιλάνε σε σειρά με το δίκτυο χωρίς να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.

Όπως μία ομάδα ανθρώπων που έχει μια συζήτηση σε ένα ήσυχο δωμάτιο, το SC-FDMA είναι σαν ένα σύστημα όπου κάθε άτομο μιλάει μία φορά, διασφαλίζοντας ότι οι φωνές τους δεν επικαλύπτονται. Αυτή η οργανωμένη προσέγγιση επιτρέπει σε όλους να ακουστούν χωρίς να προκαλείται σύγχυση ή θόρυβος.

Σε πιο τεχνικούς όρους, το SC-FDMA παίρνει τα δεδομένα από πολλές συσκευές και τα αναθέτει σε διάφορους υπο-φορείς εντός του φάσματος συχνοτήτων. Αυτοί οι υπο-φορείς μεταδίδουν τα δεδομένα ένα προς ένα, παρόμοια με τον τρόπο που τα άτομα μιλάνε σε σειρά στην αναλογία μας για τη συζήτηση. Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα αποδοτική σε καταστάσεις όπου οι συσκευές χρειάζεται να μεταδώσουν δεδομένα προς το δίκτυο χωρίς να προκαλέσουν παρεμβολές, καθιστώντας το κατάλληλο για την επικοινωνία προς τα πάνω (uplink) σε ασύρματα συστήματα όπως το 4G LTE.



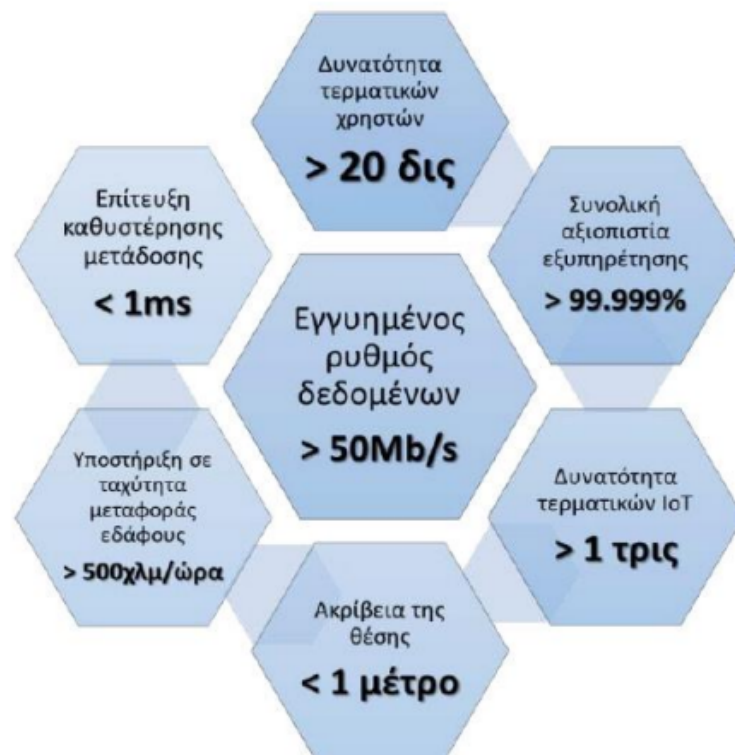
Σχήμα 1.6: Ορθογωνική Πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση συχνότητας (OFDMA) και Single Carrier-FDMA (SC-FDMA).

1.2.6 5G

Το 5G, το οποίο αποτελεί την “Πέμπτη Γενιά” κινητής τηλεφωνίας, είναι πολλά περισσότερα από απλώς μια νέα τεχνολογία. Είναι σαν να φέρνει τον κόσμο λίγο πιο κοντά και να δίνει τη δυνατότητα να κάνουμε πράγματα που ποτέ δεν φανταζόμασταν ότι θα μπορούσαμε. Συγκεκριμένα, το 5G όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.7, προσφέρει:

- Ταχύτερη Συνδεσιμότητα: Το 5G μας προσφέρει ακόμη μεγαλύτερες ταχύτητες στο διαδίκτυο από οποιοδήποτε άλλο προηγούμενο δίκτυο. Σκεφτείτε το σαν να έχετε έναν υπεργρήγορο αυτοκινητόδρομο για την πρόσβαση στο διαδίκτυο, που σας επιτρέπει να κατεβάζετε ταινίες σε λίγα δευτερόλεπτα και να παίζετε online παιχνίδια χωρίς καθυστέρηση.
- Χαμηλή Καθυστέρηση (Χαμηλό Latency): Το 5G μας φέρνει πολύ χαμηλή καθυστέρηση, σαν να μιλάμε με κάποιον πρόσωπο στο δίπλα δωμάτιο. Αυτό είναι σημαντικό για εφαρμογές που απαιτούν αμεσότητα, όπως τηλεχειρισμό, παιχνίδια και ιατρικές επεμβάσεις από απόσταση.
- Σύνδεση Σε Όλα: Το 5G θα συνδέει όχι μόνο τα κινητά μας τηλέφωνα, αλλά και τα αυτοκίνητά μας, τα σπίτια μας, τις πόλεις μας και ακόμη και τις συσκευές που φοράμε. Αυτό μας δίνει τη δυνατότητα να ζούμε σε έναν πιο έξυπνο, συνδεδεμένο κόσμο.

- Εφαρμογές Του Μέλλοντος: Με το 5G, ανοίγουμε τον δρόμο για εκπληκτικές νέες εφαρμογές όπως η εικονική πραγματικότητα, η αυτόνομη οδήγηση, η χειρουργική από απόσταση και πολλές άλλες που ακόμη δεν μπορούμε να φανταστούμε.
- Και Οι Άνθρωποι Πίσω Από Αυτό: Πίσω από αυτήν την τεχνολογία υπάρχουν χιλιάδες ανθρώπων που εργάζονται σκληρά για να μας φέρουν αυτές τις δυνατότητες. Είναι σαν να μας φέρνουν το μέλλον πιο κοντά και να μας δίνουν τη δυνατότητα να ζούμε σε έναν κόσμο γεμάτο δυνατότητες και συνδεσιμότητα.



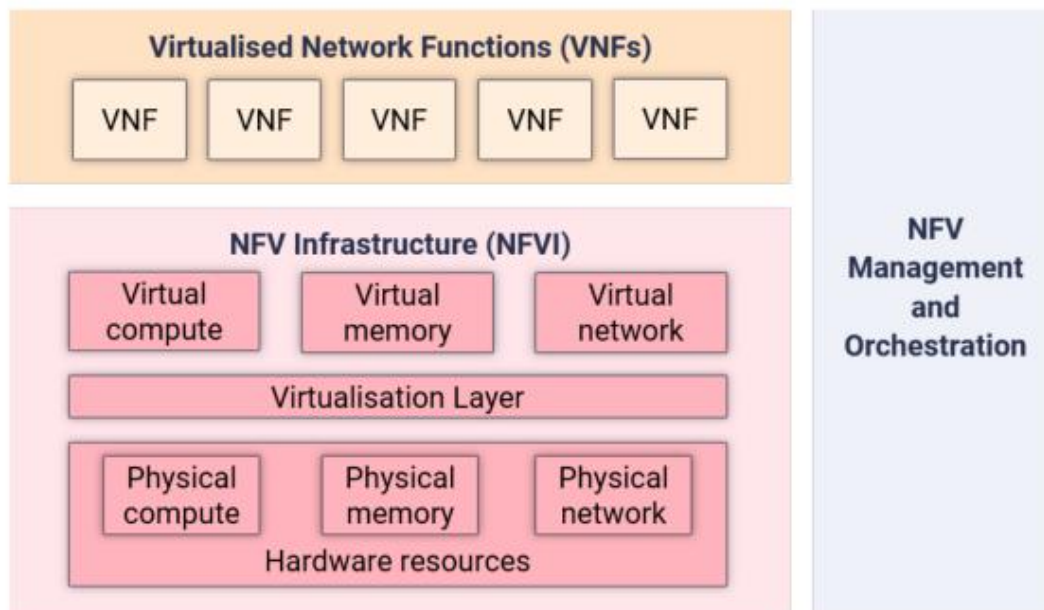
Σχήμα 1.7: Δυνατότητες των δικτύων 5G.

• 5G τεχνολογίες κλειδιά

- Network function virtualization (NFV). Αντικαθιστά τις υπηρεσίες που παρέχονται από στοιχεία δικτύου (hardware) με διαδικασίες λογισμικού και υποστηρίζεται από το European Telecommunications Standards Institute (ETSI) (Σχήμα 1.8). Στα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου NFV συγκαταλέγονται η μείωση των κεφαλαιακών και λειτουργικών δαπανών (CAPEX, OPEX).

Τα βασικά χαρακτηριστικά του NFV περιλαμβάνουν:

- * Εικονικοποίηση: Οι δικτυακές λειτουργίες εκτελούνται ως εικονικές μηχανές (Virtual Machines - VMs) ή ως λογισμικά εφαρμογών, αντί να είναι συνδεδεμένες με συγκεκριμένο υλικό.
- * Ευελιξία: Οι λειτουργίες μπορούν να ενεργοποιηθούν, απενεργοποιηθούν και αλλάξουν δυναμικά, ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου.



Σχήμα 1.8: Δομή (NFV) υψηλού επιπέδου σύμφωνα με το ETSI.

- * Αυτοματισμός: Οι διαδικασίες διαχείρισης και εκτέλεσης μπορούν να αυτοματοποιηθούν, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα.
- * Συνεργασία με Το Cloud: Το NFV συνδυάζεται συχνά με υπηρεσίες cloud για ευκολότερη επικοινωνία και διαχείριση.

Οι εφαρμογές του NFV είναι πολλές και ποικίλες, περιλαμβάνοντας:

- * Δικτύα Κινητής Τηλεφωνίας: Η εικονικοποίηση των βασικών δικτυακών λειτουργιών βοηθά στην επίτευξη αποδοτικότερων και ευέλικτων δικτύων κινητής τηλεφωνίας.
- * Δίκτυα Data Center: Το NFV χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ευέλικτων υποδομών δεδομένων και τον διαχειρισμό τους.
- * Δικτύα Επικοινωνιών: Απλοποιεί την παροχή υπηρεσιών επικοινωνίας και την ανάπτυξη νέων λειτουργιών.

Συνολικά, το NFV ανοίγει τον δρόμο για πιο ευέλικτα, αποδοτικά και αυτοματοποιημένα δίκτυα, προσφέροντας τη δυνατότητα για την παροχή προηγμένων υπηρεσιών επικοινωνίας στην εποχή της ψηφιακής μετάβασης.

- Software defined radio networking (SDN). Διαχωρισμός των διαδικασιών ελέγχου (control) του δικτύου και των δεδομένων του χρήστη (data/user) (Σχήμα 1.9). Στα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου SDN συγκαταλέγονται η αυτοματοποιημένη και προγραμματιζόμενη διαμόρφωση των στοιχείων δικτύου.

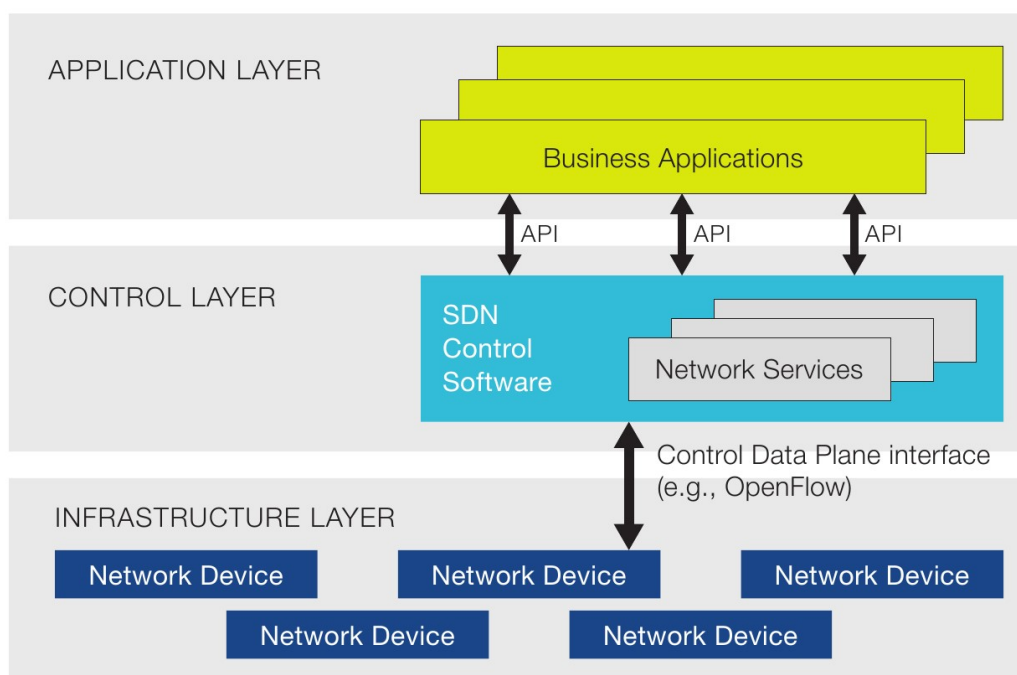
Χαρακτηριστικά του SDN:

- * Ευελιξία: Ο χρήστης μπορεί να αναδιαμορφώνει τις ραδιοκυματικές ρυθμίσεις και να προσαρμόζει την επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο.
- * Επαναπρογραμματιζόμενο: Οι συσκευές SDN μπορούν να επαναπρογραμματιστούν για να υποστηρίξουν διάφορες εφαρμογές και πρωτόκολλα.
- * Συμβατότητα με Διάφορα Πρότυπα: Το SDN επιτρέπει την αποδοτική χρήση διαφορετικών πρωτοκόλλων επικοινωνίας και συχνοτήτων.

Οι εφαρμογές του SDN περιλαμβάνουν:

- * Αμυντικές Επικοινωνίες: Σε στρατιωτικές εφαρμογές, το SDN επιτρέπει την ασφαλή και ευέλικτη επικοινωνία σε δυνητικά εχθρικά περιβάλλοντα.
- * Τηλεπικοινωνίες Έκτακτης Ανάγκης: Σε περιπτώσεις καταστροφών, το SDN μπορεί να επιτρέψει την επαναδιαμόρφωση του δικτύου για τη διάσωση ανθρώπων.
- * Επικοινωνία Internet of Things (IoT): Στον κόσμο του Internet of Things, το SDN εξασφαλίζει την αποδοτική και αξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ συνδεδεμένων συσκευών.

Συνοψίζοντας, το SDN είναι μια τεχνολογική προσέγγιση που αναπτύσσει την ευελιξία και την αποδοτικότητα των ασύρματων επικοινωνιών, ενώ οι εφαρμογές του εκτείνονται έως τη διαχείριση του Internet of Things.



Σχήμα 1.9: Η αυτοματοποιημένη και προγραμματιζόμενη διαμόρφωση των στοιχείων δικτύου στα τρία επίπεδα.

- Cloud-RAN (Radio Access Network). Υποστήριξη των λειτουργιών του ραδιοδικτύου από κεντρικούς servers. Ακόμη ανάλογα με τις απαιτήσεις και τις υπηρεσίες είναι δυνατός ο λειτουργικός διαχωρισμός (functional split) του ραδιοδικτύου με διάφορους τρόπους και σε διάφορα επίπεδα. Για παράδειγμα στο Split A (Σχήμα 1.10) όλες οι λειτουργίες πάνω από τη σχετική γραμμή πραγματοποιούνται κεντρικά (στο cloud). Στα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου cloud-RAN συγκαταλέγονται η μείωση των κεφαλαιακών και λειτουργικών δαπανών (CAPEX, OPEX).

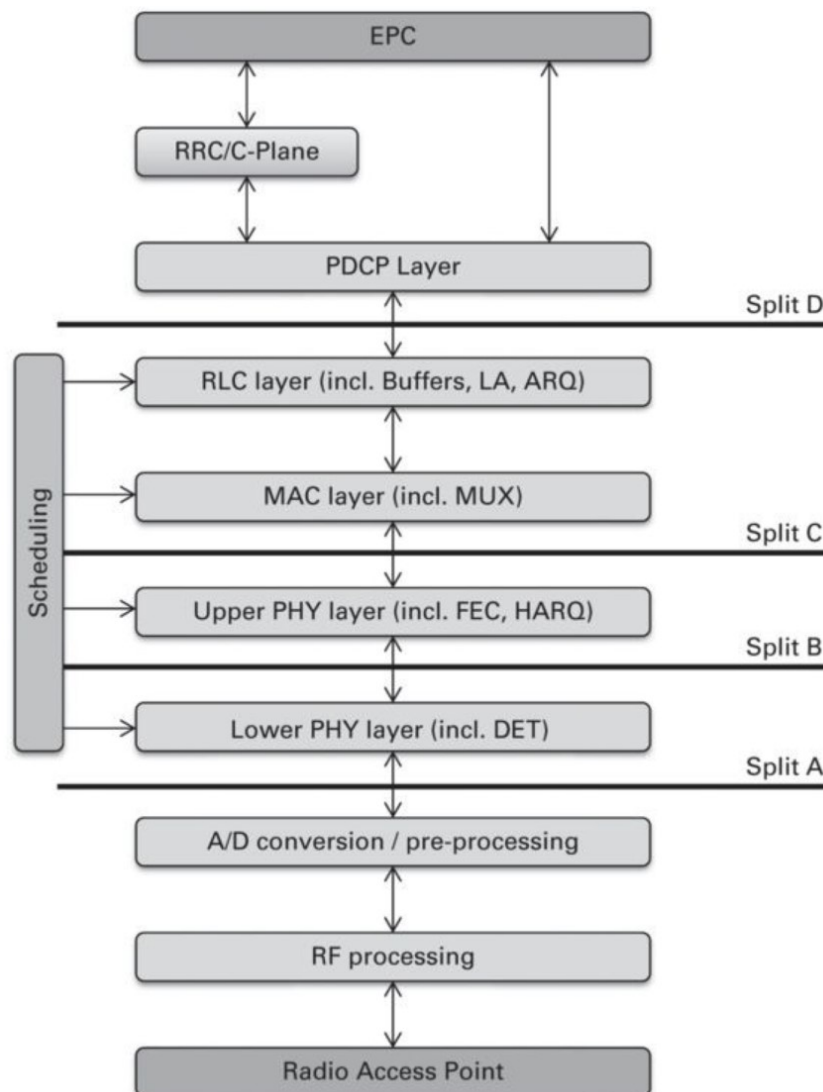
Τα κύρια χαρακτηριστικά του Cloud-RAN περιλαμβάνουν:

- * Εικονικοποίηση: Οι λειτουργίες του δικτύου πρόσβασης μετατρέπονται σε εικονικές μηχανές (VMs) ή λογισμικό, αποσπώντας τις από συγκεκριμένο υλικό και δίνοντας την ευκαιρία για ευελιξία.

- * Κεντρική Διαχείριση: Ο έλεγχος και η διαχείριση των ραδιοκυμάτων και της ποιότητας της επικοινωνίας διακυβεύονται σε κεντρικό επίπεδο.
- * Δυνατότητα Επέκτασης: Το Cloud-RAN επιτρέπει την απλούστευση της επέκτασης του δικτύου χωρίς την ανάγκη για πολύπλοκη υποδομή.

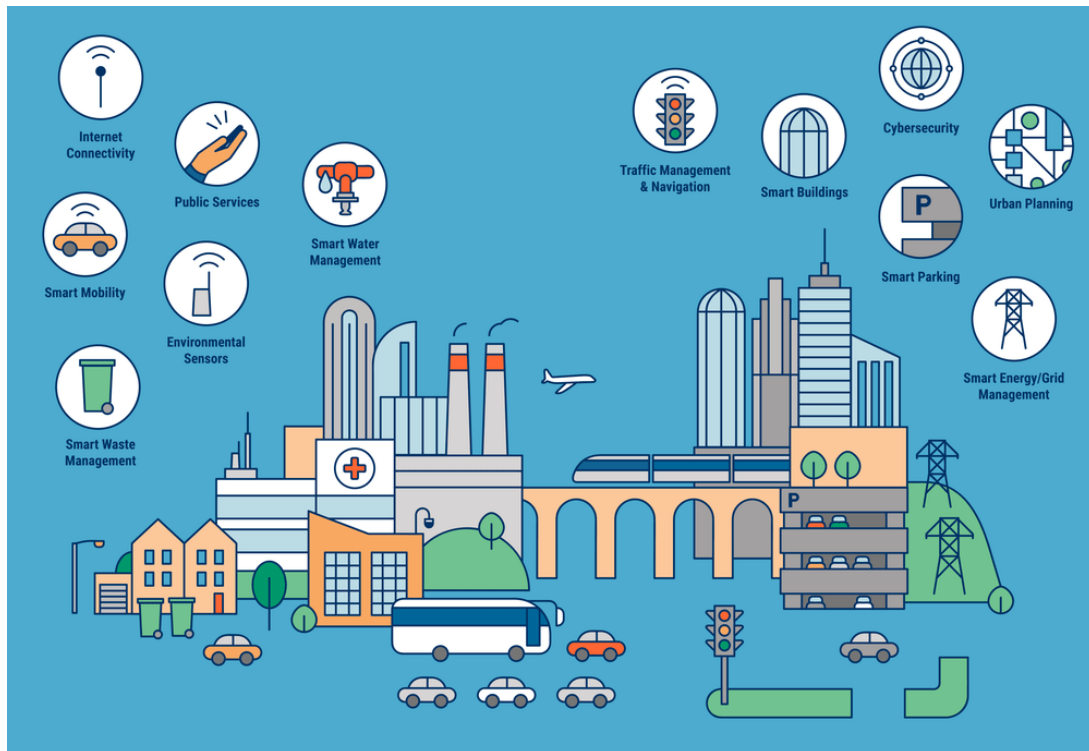
Επιπρόσθετα, οι κύριες εφαρμογές του Cloud-RAN είναι:

- * Υψηλές ταχύτητες: Σε δίκτυα όπως τα 5G, το Cloud-RAN εξασφαλίζει αποδοτική χρήση των περιορισμένων συχνοτήτων.
- * Επικοινωνίες Έκτακτης Ανάγκης: Σε καταστάσεις κρίσης, το Cloud-RAN παρέχει αξιόπιστη επικοινωνία και ανάλυση δεδομένων.
- * Έξυπνες Πόλεις (Smart Cities) 1.11: Στο πλαίσιο των έξυπνων πόλεων, το Cloud-RAN συμβάλλει στην ανάπτυξη προηγμένων υπηρεσιών και διαχείρισης της κίνησης.



Σχήμα 1.10: Ο λειτουργικός διαχωρισμός (functional split) του ραδιοδικτύου με διάφορους τρόπους και σε διάφορα επίπεδα.

Συνοψίζοντας, το Cloud-RAN αντιπροσωπεύει μια σημαντική εξέλιξη στις ασύρματες επικοινωνίες και συγκεκριμένα στο 5G, επιτρέποντας την ευελιξία και την αποδοτικότητα σε



Σχήμα 1.11: Έξυπνη πόλη.

πολλές εφαρμογές, από την υψηλή ταχύτητα των 5G έως τη διαχείριση έκτακτων αναγκών και την ανάπτυξη έξυπνων πόλεων.

- Network Slicing (Κατάτμηση Δικτύου). Το τμήμα (φέτα) δικτύου (network slice) είναι ένα δυναμικά δημιουργούμενο λογικό δίκτυο, από άκρο σε άκρο (end-to-end) που υποστηρίζει ένα συγκεκριμένο τύπο υπηρεσιών πιθανά με βάση ένα Service-level Agreement (SLA) (Σχήμα 1.12).

Τα κύρια χαρακτηριστικά της κατάτμησης δικτύου είναι:

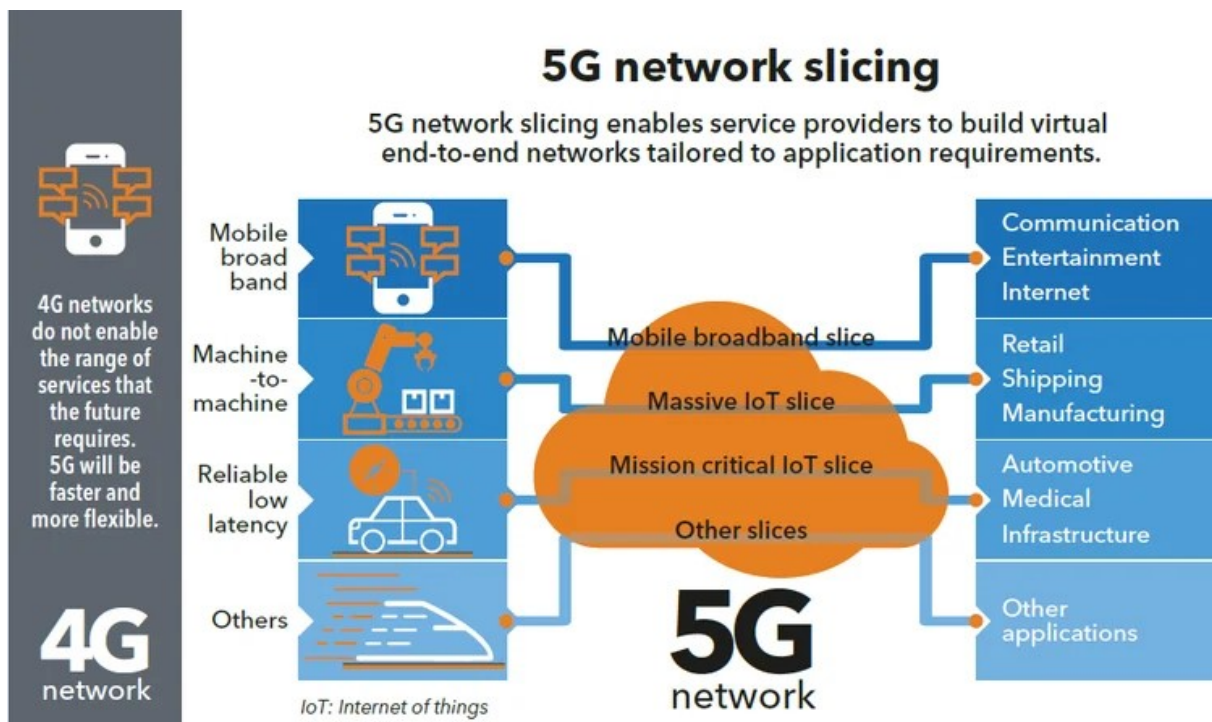
- * Προσαρμοστικότητα: Η κατάτμηση δικτύου επιτρέπει τη δημιουργία εικονικών δικτύων που προσαρμόζονται ακριβώς στις απαιτήσεις κάθε εφαρμογής.
- * Διαχείριση Πόρων: Κάθε κομμάτι (slice) διαχειρίζεται τους δικούς του πόρους, όπως εύρος ζώνης και υπολογιστική ισχύ, για βέλτιστη απόδοση.
- * Απομόνωση: Η κατάτμηση δικτύου παρέχει απομόνωση μεταξύ των κομματιών, εξασφαλίζοντας ότι η απόδοση ή η ασφάλεια μιας εφαρμογής δεν επηρεάζει άλλες.

Η κατάτμηση δικτύου βρίσκει τις παρακάτω εφαρμογές:

- * Δίκτυα 5G: Η κατάτμηση δικτύου είναι θεμελιώδης για τα 5G, καθώς επιτρέπει την εξατομίκευση των υπηρεσιών και την υποστήριξη πολλαπλών χρηστών και συσκευών.
- * Έξυπνες Πόλεις (Smart Cities): Στις έξυπνες πόλεις, η κατάτμηση δικτύου βοηθά στη διαχείριση της κίνησης, την ασφάλεια και τις υπηρεσίες δημόσιας υγείας.
- * Αυτοκίνητα Χωρίς Οδηγό (Autonomous Vehicles): Στα αυτόνομα οχήματα, η κατάτμηση δικτύου διευκολύνει την αξιόπιστη επικοινωνία και την αποφυγή ατυχημάτων.

Συνοψίζοντας, η κατάτμηση δικτύου αποτελεί μια καινοτόμο προσέγγιση που επιτρέπει την

αντιμετώπιση των αναγκών του μέλλοντος στις τηλεπικοινωνίες, από την εξυπηρέτηση των 5G έως τη δημιουργία έξυπνων πόλεων και την υποστήριξη της αυτονομίας των οχημάτων.



Σχήμα 1.12: Ο τεμαχισμός δικτύου 5G επιτρέπει στους παρόχους υπηρεσιών να δημιουργούν εικονικά δίκτυα από άκρο σε άκρο, προσαρμοσμένα στις απαιτήσεις της εφαρμογής.

1.3 6η γενιά κινητής τηλεφωνίας

Το 6G αναφέρεται στην επόμενη γενιά των ασύρματων δικτύων κινητής τηλεφωνίας και τηλεπικοινωνιών, που αναμένεται να διαδεχθεί το 5G. Αυτή η νέα γενιά τεχνολογίας αναμένεται να φέρει αρκετές καινοτομίες και βελτιώσεις στην επικοινωνία, τη συνδεσιμότητα και τις ψηφιακές υπηρεσίες. Ενδεικτικά, μερικά από τα χαρακτηριστικά και τις τεχνολογίες που απαρτίζουν το 6G είναι:

- Πολύ υψηλές ταχύτητες, δηλαδή υπερευρυζωνική συνδεσιμότητα. Το 6G αναμένεται να επεκτείνει την υποστήριξη υπερευρυζωνικών συχνοτήτων, συμπεριλαμβανομένων των υψηλών συχνοτήτων mmWave, που θα επιτρέπουν ακόμη μεγαλύτερη ταχύτητα και ευκρίνεια.
- Χαμηλή καθυστέρηση (Ultra-Low Latency), η οποία θα είναι κρίσιμη για εφαρμογές όπως η επαυξημένη πραγματικότητα (AR), η εικονική πραγματικότητα (VR), και οι αυτόνομοι οδηγοί.
- Αυξημένη χωρητικότητα: το 6G θα προσφέρει μεγαλύτερη χωρητικότητα για τη σύνδεση εκατομμυρίων συσκευών και αισθητήρων.
- Αυξημένη ασφάλεια: Θα δοθεί έμφαση στην αυξημένη ασφάλεια των δικτύων 6G, κυρίως λόγω της χρήσης τους σε εφαρμογές όπως η υγειονομική φροντίδα και οι αυτόνομοι οδηγοί.

- Σύνδεση με Τομείς Επιστήμης και Έρευνας: το 6G αναμένεται να επιτρέψει τη σύνδεση με τομείς όπως η τεχνητή νοημοσύνη, η γενετική, η κβαντική υπολογιστική και άλλες προηγμένες τεχνολογίες που είναι αξιοθαύμαστο.
- Ενεργειακή αποδοτικότητα και βιωσιμότητα.
- Ανώτερες επιδόσεις στη σύνδεση ανθρώπου-μηχανής: η διαδικτυακή επίδραση στον Εγκέφαλο, οι εξελιγμένες τεχνολογίες επικοινωνίας εγκεφάλου-μηχανής μπορεί να ενσωματωθούν στο 6G, επιτρέποντας ανώτερες επιδόσεις στη σύνδεση ανθρώπου-μηχανής.
- Εξαιρετικά προηγμένο δίκτυο, που θα υποστηρίζει εφαρμογές που δεν μπορούν να φανταστούμε ακόμη, ενισχύοντας την συνδεσιμότητα και την ψηφιακή εξέλιξη σε παγκόσμιο επίπεδο.

1.3.1 Προκλήσεις στο 6G και στόχοι

Στη συνέχεια αναλύονται οι προκλήσεις που έχουν να αντιμετωπίσουν τα 6G δίκτυα καθώς και σχετικά κριτήρια ποιότητας (KPIs) στα οποία στοχεύουν, όπως φαίνονται συνοπτικά στον Πίνακα 1.1.

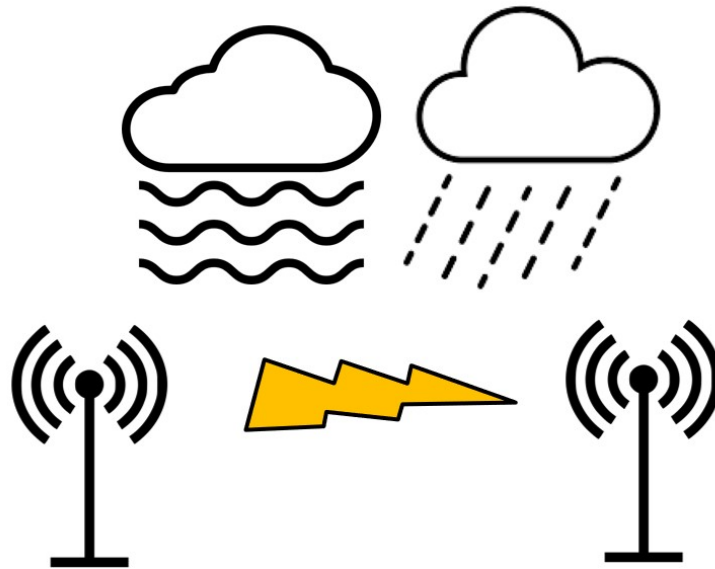
Προβλήματα	Σχετικό KPI
Απώλειες ασύρματης ζεύξης	Κάλυψη δικτύου, αξιοπιστία δικτύου
Διαθέσιμο εύρος ζώνης	Ρυθμός δεδομένων και φασματική αποδοτικότητα δικτύου
Περιορισμένη ισχύς εκπομπής	Ενεργειακή αποδοτικότητα
Πολυπλοκότητα και κόστος υλοποίησης	Αποδοτικότητα του κόστους (cost efficiency)

Πίνακας 1.1: 6G ανοικτά προβλήματα και σχετικοί δείκτες ποιότητας.

- **Απώλειες ασύρματης ζεύξης:** Οι απώλειες μπορούν να αφορούν απώλειες ελεύθερου χώρου λόγω απόστασης, ατμοσφαιρικές απώλειες, συμπεριλαμβανομένου των απωλειών λόγω βροχής, λόγω απορρόφησης των μορίων του οξυγόνου, καθώς και λόγω υδρατμών και άλλων αερίων. Οι παράγοντες αυτοί θα αναλυθούν στην ενότητα "Παράγοντες που επηρεάζουν τα mmWave". Σχετικός δείκτης ποιότητας: κάλυψη δικτύου και αξιοπιστία δικτύου (Σχήμα 1.13).
- **Διαθέσιμο εύρος ζώνης :** Το διαθέσιμο εύρος ζώνης μιας τηλεπικοινωνιακής ζεύξης είναι περιορισμένο και καθορίζει την χωρητικότητα της Σχετικός δείκτης ποιότητας: ρυθμός δεδομένων και φασματική αποδοτικότητα δικτύου.
- **Περιορισμένη ισχύς εκπομπής :** Κάθε κινητή συσκευή και σταθμός βάσης έχει μια μέγιστη ισχύ εκπομπής και η περιοχή κάλυψης του αυτομάτως καθορίζεται από αυτή. Σχετικός δείκτης ποιότητας: ενεργειακή αποδοτικότητα.
- **Πολυπλοκότητα και κόστος υλοποίησης :** Σχετικός δείκτης ποιότητας: η αποδοτικότητα του κόστους (cost efficiency).

1.3.2 6G τεχνολογίες κλειδιά και προβλήματα

- Η έκτη γενιά των ασύρματων επικοινωνιών, γνωστή και ως 6G, αντιπροσωπεύει το μέλλον της ασύρματης τεχνολογίας και αναμένεται να φέρει μια νέα επανάσταση στον τρόπο που επικοινωνούμε και αλληλεπιδρούμε με τα δίκτυα και τις συσκευές μας. Σε αυτήν την εισαγωγή, θα εξετάσουμε



Σχήμα 1.13: Απώλειες λόγω απόστασης, λόγω ατμοσφαιρικών απωλειών κτλ.

τις τεχνολογίες κλειδιά που αναμένεται να διαμορφώσουν το 6G, καθώς και τα προβλήματα και τις προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπίσουμε κατά την ανάπτυξη αυτής της νέας γενιάς δικτύων επικοινωνιών.

- Το 6G αναμένεται να προσφέρει ακόμη υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, χαμηλότερες καθυστερήσεις, αυξημένη συνδεσιμότητα και επεκταμένη υποστήριξη για τις συσκευές του Internet of Things (IoT) (Σχήμα 1.14). Τεχνολογίες κλειδιά όπως τα υπερυψηλά εύρη ζώνης (THz), το Massive MIMO, η τεχνητή νοημοσύνη, η επεξεργασία σημάτων, των υψηλών συχνοτήτων mmWave και τα αναδύομενα πρότυπα επικοινωνιών αναμένεται να διαδραματίσουν έναν κρίσιμο ρόλο.
- Παράλληλα, υπάρχουν πολλά προβλήματα και προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν, συμπεριλαμβανομένων των προκλήσεων ασφάλειας, της διαχείρισης των συχνοτήτων THz, της αποτελεσματικής ενέργειας, και της συμβατότητας με τα προηγούμενα πρότυπα επικοινωνιών. Η επιτυχία του 6G θα απαιτήσει στενή συνεργασία μεταξύ των επιστημόνων της τεχνολογίας, της βιομηχανίας και των κυβερνητικών φορέων προκειμένου να αντιμετωπιστούν αυτές οι προκλήσεις και να δημιουργηθεί ένα ασφαλές, αποδοτικό και αξιόπιστο 6G δίκτυο που θα υποστηρίζει τις εφαρμογές του μέλλοντος.
- Νέες ζώνες συχνοτήτων (THz). Οι νέες ζώνες συχνοτήτων ή χρονοσυχνοτικοί περιορισμοί είναι μια από τις κύριες καινοτομίες που αναμένονται στο πλαίσιο της εξέλιξης προς το 6G. Συγκεκριμένα, το 6G αναμένεται να εκμεταλλευτεί τις ζώνες συχνοτήτων στο υπερύψηλο εύρος των THz συχνοτήτων. Οι THz συχνοότητες βρίσκονται σε ένα εξαιρετικά υψηλό εύρος, πέραν των 100 GHz, και φτάνουν μέχρι τις GHz συχνοότητες. Αυτό το εύρος συχνοτήτων προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα για τις επικοινωνίες. Συγκεκριμένα προσφέρουν:
 - Υψηλή διαθεσιμότητα ανεκμετάλλετου εύρους ζώνης και κατά συνέπεια υψηλή χωρητικότητα (Tbps). Στις συχνοότητες αυτές υπάρχει άφθονο ανεκμετάλλετο εύρος ζώνης που μπορεί να προσφέρει πολύ υψηλή χωρητικότητα στο δίκτυο.



Σχήμα 1.14: IoT.

- Δυνατότητα δημιουργίας μαζικών συστοιχιών κεραιών πολλαπλής εισόδου πολλαπλής εξόδου (MIMO) και κατά συνέπεια υψηλή φασματική αποδοτικότητα. Συγκεκριμένα, με την αύξηση της συχνότητας μειώνεται και η διάσταση της κεραίας κάνοντας έτσι δυνατή την δημιουργία μαζικών συστοιχιών κεραιών πολλαπλής εισόδου πολλαπλής εξόδου, προσφέροντας έτσι πολύ υψηλή φασματική αποδοτικότητα στο δίκτυο.
- Σημαντικές εφαρμογές όπως η οπτική επικοινωνία ελευθέρου χώρου (FSO) (Σχήμα 1.15), και η επικοινωνία ορατού φωτός (VLC) (Σχήμα 1.16). Η πρώτη τεχνολογία συνδυάζει την μεγάλη χωρητικότητα της οπτικής επικοινωνίας με την ευελιξία της ασύρματης ζεύξης για τη μετάδοση μεγάλης ποσότητας πληροφορίας εκεί που η ύπαρξη οπτικής ίνας είναι αδύνατη ή αρκετά ακριβή, π.χ. από ένα κτίριο σε ένα άλλο στο κέντρο της πόλης όπως στο σχήμα. Η δεύτερη τεχνολογία βασίζεται στην μετάδοση πληροφορίας χρησιμοποιώντας ορατό φως, δηλαδή μέσω λαμπτήρων LED, σε μικρές αποστάσεις όπως μέσα σε ένα γραφείο.

Τα βασικά όμως μειονεκτήματα της χρήσης πολύ υψηλών συχνοτήτων είναι αφενός οι πολύ μεγάλες απώλειες διαδρομής που συνήθως όμως αντισταθμίζονται από τα πολύ μεγάλα κέρδη κεραιών, και η απουσία αποτελεσματικού hardware σε αυτές τις συχνότητες όπως π.χ. αποδοτικών ενισχυτών.

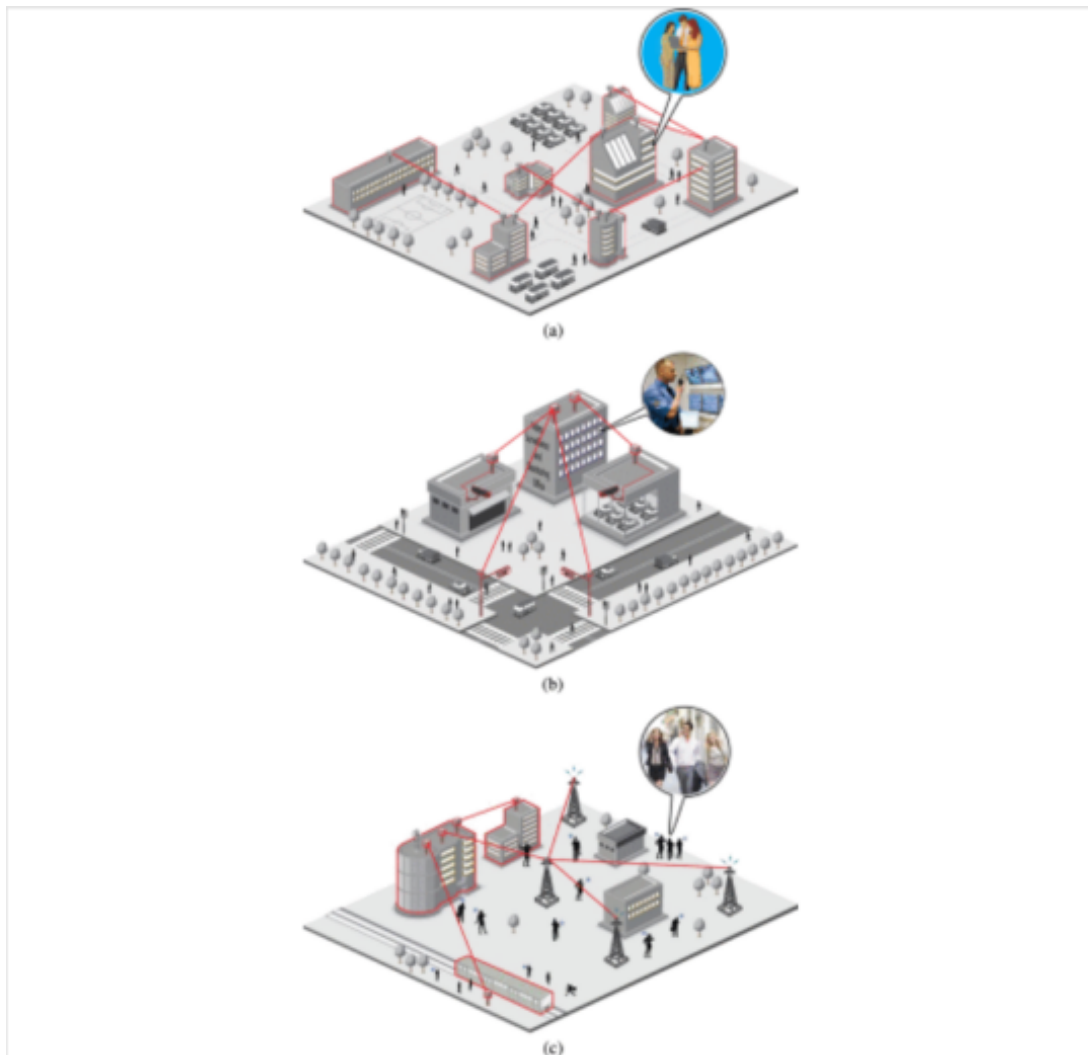
- Συστήματα FSO: τα συστήματα FSO χρησιμοποιούνται για επικοινωνία υψηλού ρυθμού μεταξύ δύο σταθερών σημείων σε αποστάσεις έως και πολλών χιλιομέτρων. Σε σύγκριση με τα αντίστοιχα RF, η σύνδεση FSO έχει πολύ υψηλό οπτικό εύρος ζώνης διαθέσιμο, επιτρέποντας πολύ υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων. Επίγεια προϊόντα OWC με ρυθμούς μετάδοσης

10 Gbps είναι ήδη στην αγορά και οι ταχύτητες των πρόσφατων πειραματικών συστημάτων OWC ανταγωνίζονται τις οπτικές ίνες. Τα συστήματα FSO χρησιμοποιούν πολύ στενές ακτίνες λέιζερ. Αυτός ο χωρικός περιορισμός παρέχει υψηλό παράγοντα επαναχρησιμοποίησης, εγγενή ασφάλεια και ανθεκτικότητα στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Επιπλέον, η συχνότητα που χρησιμοποιείται από την τεχνολογία FSO είναι πάνω από 300 GHz, η οποία είναι χωρίς άδεια σε όλο τον κόσμο. Επομένως, τα συστήματα FSO δεν απαιτούν τέλη άδειας. Τα συστήματα FSO μπορούν επίσης να αναπτυχθούν εύκολα και μπορούν να επανεγκατασταθούν χωρίς το κόστος των αποκλειστικών συνδέσεων οπτικών ινών.

- Κάποια από τα πλεονεκτήματα και τις εφαρμογές του FSO είναι οι υψηλές Ταχύτητες Μετάδοσης Δεδομένων, το FSO μπορεί να παρέχει πολύ υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, κάνοντάς το κατάλληλο για γρήγορη επικοινωνία. Επίσης το χαμηλό Latency, επειδή οι φωτεινές δέσμες δεν αντιμετωπίζουν καθυστέρηση από τα φυσικά εμπόδια, το FSO προσφέρει χαμηλή καθυστέρηση, κάτι που το καθιστά κατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν πραγματικού χρόνου ανταπόκριση. Σημαντική η ασφάλεια, επειδή οι φωτεινές δέσμες δεν διασπώνται εύκολα, το FSO προσφέρει υψηλή ασφάλεια επικοινωνίας, δυσκολεύοντας τον εξωτερικό κόσμο να παρεμβαίνει στη μετάδοση. Τέλος το χαμηλό Κόστος Λειτουργίας, δεν απαιτείται η χρήση υποδομής ή καλωδίων, και οι λαμπτήρες που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως αξιόπιστοι με μεγάλη διάρκεια ζωής και χαμηλή συντήρηση.
- Οι εφαρμογές του FSO είναι στις τηλεπικοινωνίες που χρησιμοποιείται για την παροχή υψηλής ταχύτητας σύνδεσης σε αστικές περιοχές και σενάρια όπου οι καλωδιακές συνδέσεις είναι δύσκολες ή ακατάλληλες. Φυσικά σε στρατιωτικές εφαρμογές, ενώ χρησιμοποιείται για ασφαλή επικοινωνία σε πεδία μάχης, όπου η ασφάλεια και η υψηλή απόδοση είναι κρίσιμες. Επίσης στην σύνδεση των δικτύων, χρησιμοποιείται για τη σύνδεση διαφορετικών δικτύων σε μεγάλες αποστάσεις, όπου η εκτεταμένη ίντερνετ ή οι καλωδιακές συνδέσεις δεν είναι εφικτές. Επιπρόσθετα η διαχείριση καταστροφών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επανασύνδεση της επικοινωνίας μετά από φυσικές καταστροφές που μπορεί να καταστρέψουν τις καλωδιακές συνδέσεις. Ακόμη σε διαστημικές επικοινωνίες, χρησιμοποιείται στις διαστημικές αποστολές για την επικοινωνία με δορυφόρους και διαστημόπλοια. Συμπεραίνουμε ότι το "FSO" είναι μια ενδιαφέρουσα τεχνολογία που έχει πολλές πιθανές εφαρμογές σε διάφορους τομείς. Ωστόσο, η ευπάθεια του στις καιρικές συνθήκες, όπως η βροχή και η ομίχλη, μπορεί να αποτελέσει περιορισμό σε ορισμένα περιβάλλοντα.

Η ανάπτυξη νέων και αποτελεσματικών ασύρματων τεχνολογιών για μια σειρά ζεύξεων μετάδοσης είναι απαραίτητη για τη δημιουργία μελλοντικών ετερογενών δικτύων επικοινωνίας για την υποστήριξη ενός ευρέος φάσματος τύπων υπηρεσιών με διάφορα πρότυπα κίνησης και για την κάλυψη των συνεχώς αυξανόμενων απαιτήσεων για υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων. Πιστεύουμε ότι το FSO θα πρέπει να θεωρείται ως βασικό συστατικό τέτοιων ετερογενών δικτύων. Με το μεγάλο οπτικό εύρος ζώνης τους, τα συστήματα FSO μπορούν να χρησιμοποιηθούν, σε ορισμένες εφαρμογές, ως ισχυρή εναλλακτική λύση και, σε άλλες, ως συμπληρωματικά των υπάρχοντων ασύρματων συστημάτων ραδιοσυχνότητας.

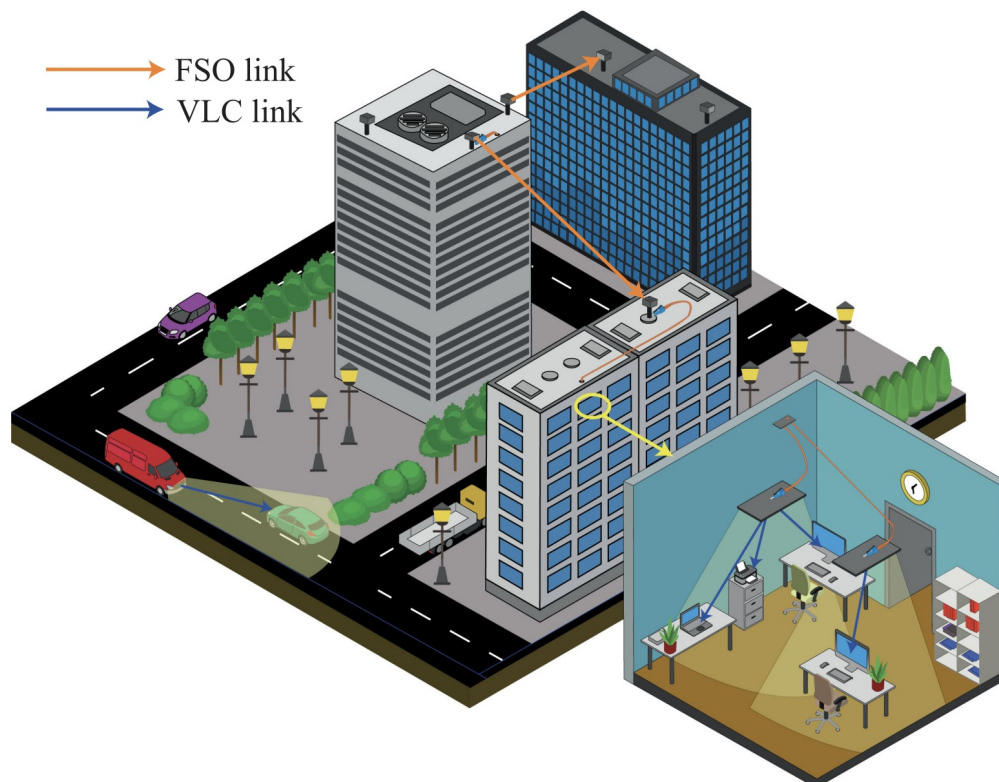
Επίγειες ζεύξεις FSO με ρυθμούς μετάδοσης 10 Gbps (υποθέτοντας εμβέλεια λίγων εκατοντάδων μέτρων) είναι ήδη στην αγορά και οι ταχύτητες των πρόσφατων πειραματικών συστημάτων FSO υπόσχονται ακόμη μεγαλύτερους. Για να αυξηθούν περαιτέρω τα όρια των συστημάτων FSO και να ξεπεραστούν οι μεγάλες τεχνικές προκλήσεις (ιδιαίτερα η ε-



Σχήμα 1.15: Ένα σενάριο σύνδεσης σε πανεπιστημιακό περιβάλλον όπου οι συνδέσεις μεταξύ κτιρίων επιτυγχάνονται μέσω υψηλής ταχύτητας συνδέσεων Ελεύθερου Χώρου (Free Space Optics - FSO).

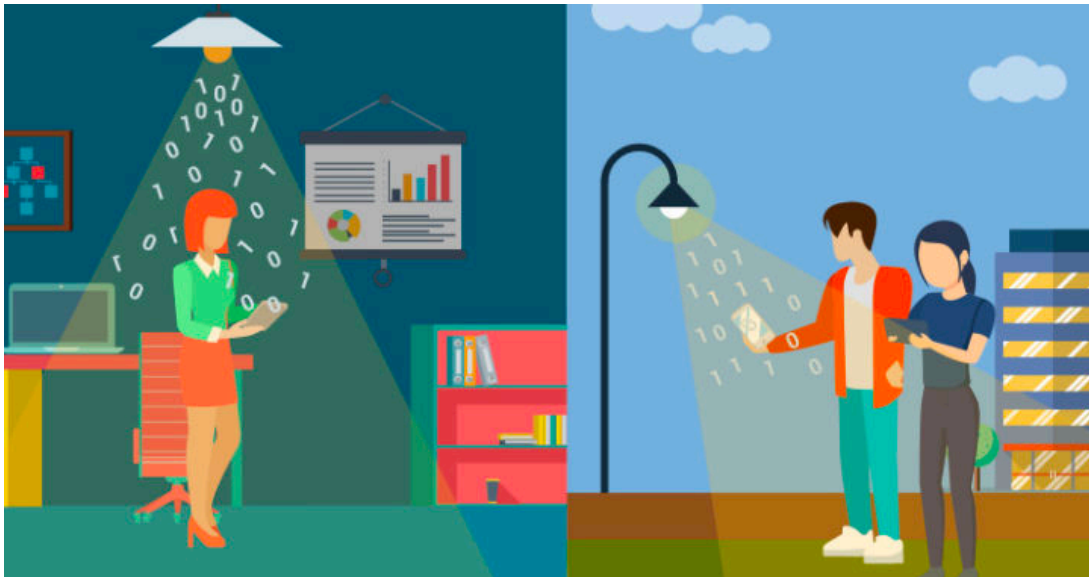
ξασθένιση των ατμοσφαιρικών αναταράξεων και οι δυσμενείς καιρικές επιπτώσεις), έχουν γίνει σημαντικές πρόσφατες ερευνητικές προσπάθειες για τα ζητήματα σχεδιασμού φυσικών επιπέδων (PHY) των συστημάτων FSO. Αυτά είναι κυρίως εμπνευσμένα από πολλές συναρπαστικές εξελίξεις που έχουν παρατηρηθεί στον τομέα της έρευνας του επιπέδου PHY για ασύρματες επικοινωνίες RF την τελευταία περίπου δεκαετία. Μέθοδοι και τεχνικές επιπέδου PHY, όπως η επικοινωνία MIMO.

Επίγειες ζεύξεις FSO με ρυθμούς μετάδοσης 10 Gbps (υποθέτοντας εμβέλεια λίγων εκατοντάδων μέτρων) είναι ήδη στην αγορά και οι ταχύτητες των πρόσφατων πειραματικών συστημάτων FSO υπόσχονται ακόμη περισσότερες. Για να αυξηθούν περαιτέρω τα όρια των συστημάτων FSO και να ξεπεραστούν οι μεγάλες τεχνικές προκλήσεις (ιδιαίτερα η εξασθένιση των ατμοσφαιρικών αναταράξεων και οι δυσμενείς καιρικές επιπτώσεις), έχουν γίνει σημαντικές πρόσφατες ερευνητικές προσπάθειες για τα ζητήματα σχεδιασμού φυσικών επιπέδων (PHY) των συστημάτων FSO. Αυτά είναι κυρίως εμπνευσμένα από πολλές συναρπαστικές εξελίξεις που έχουν παρατηρηθεί στον τομέα της έρευνας του επιπέδου PHY για ασύρματες επικοινωνίες RF την τελευταία περίπου δεκαετία.



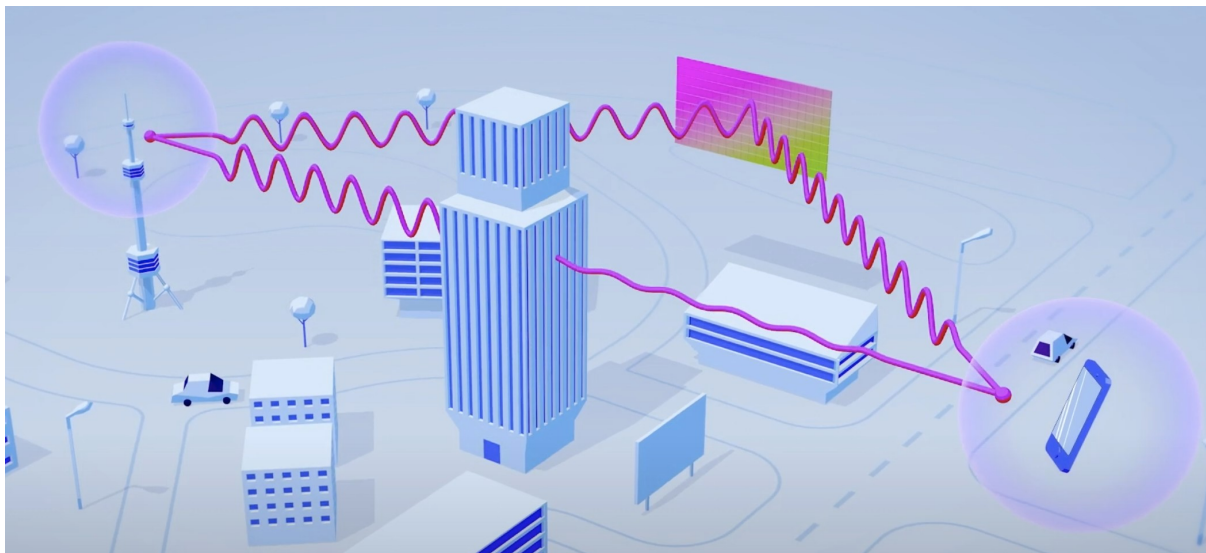
Σχήμα 1.16: VLC και FSO.

- Visible light communication (VLC): μια από τις τεχνολογίες κλειδιά είναι η επικοινωνία ορατού φωτός Visible light communication (VLC). Η επικοινωνία ορατού φωτός (VLC) είναι ένα από τα θέματα της τάσης στις ασύρματες επικοινωνίες. Λόγω της υψηλής ταχύτητας μετάδοσης και των αξιόπιστων ιδιοτήτων ασφαλείας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές εσωτερικού χώρου. Η Επικοινωνία μέσω Ορατού Φωτός (Visible Light Communication - VLC) (Σχήμα 1.17) είναι μια τεχνολογία επικοινωνίας που χρησιμοποιεί το ορατό φως, κυρίως το ορατό φάσμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, για την ασύρματη μετάδοση δεδομένων. Αυτή η τεχνολογία λειτουργεί με τον εξής τρόπο:
- Αρχή: Η VLC λειτουργεί με τον τρόπο που ελέγχει την ένταση του φωτός που εκπέμπεται από τις λυχνίες LED (Light-Emitting Diodes) σε πολύ υψηλές ταχύτητες, συνήθως γρηγορότερα από ό,τι μπορεί να αντιληφθεί το ανθρώπινο μάτι.
- Οι τεχνολογίες και τα χαρακτηριστικά της Επικοινωνίας μέσω Ορατού Φωτός (Visible Light Communication - VLC) περιλαμβάνουν:
- LEDs (Light-Emitting Diodes): Οι λυχνίες LED είναι η πηγή φωτός στην τεχνολογία VLC. Χρησιμοποιούνται για να εκπέμψουν φως με δυνατότητα ρύθμισης της έντασης.
- Υψηλές Ταχύτητες Δεδομένων: Η VLC μπορεί να μεταδίδει δεδομένα σε πολύ υψηλές ταχύτητες, πολλές φορές γρηγορότερα από το Wi-Fi. Αυτό την καθιστά κατάλληλη για εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη μετάδοση δεδομένων.
- Φάσμα Ορατού Φωτός: Η τεχνολογία VLC χρησιμοποιεί το φάσμα του ορατού φωτός, που κυμαίνεται από το κόκκινο έως το μπλε, για τη μετάδοση. Αυτό το φάσμα είναι ασφαλές και δεν αντιμετωπίζει προβλήματα υγείας.



Σχήμα 1.17: VLC.

- Ανθρώπινη Ανεκτικότητα: Οι άνθρωποι δεν αντιλαμβάνονται την υψηλή συχνότητα της λειτουργίας της VLC, καθιστώντας την ασφαλή για χρήση σε εσωτερικούς χώρους.
 - Συνδυασμός με Άλλες Τεχνολογίες: Η VLC μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες επικοινωνίας, όπως το Wi-Fi, για να βελτιώσει τη συνδεσιμότητα σε πολυσύχναστα περιβάλλοντα.
 - Χρήση σε Ειδικές Εφαρμογές: Η VLC μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ειδικές εφαρμογές όπως στην επικοινωνία μέσα σε κτίρια, σε ηλεκτρονικά καταστήματα, και σε περιβάλλοντα που απαιτούν ασφαλή μετάδοση δεδομένων.
 - Ασφάλεια: Επειδή το φως δεν διαπερνά εύκολα τα τοιχώματα, η VLC προσφέρει αυξημένη ασφάλεια σε σχέση με άλλες μορφές επικοινωνίας.
 - Η τεχνολογία της VLC συνεχίζει να αναπτύσσεται και να βρίσκει νέες εφαρμογές σε διάφορους τομείς, όπως οι έξυπνοι φωτισμοί, η ρομποτική, και η υγειονομική περίθαλψη.
- Οι Επαναδιαμορφώσιμες Έξυπνες Επιφάνειες (Reconfigurable Intelligent Surfaces - RIS) είναι μια καινοτόμα τεχνολογία που χρησιμοποιείται στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών και των ασύρματων δικτύων. Είναι επαναδιαμορφώσιμες γιατί οι ιδιότητες τους μπορούν να αλλάξουν, έξυπνες γιατί είναι δυνατή η δυναμική διαμόρφωση τους, και επιφάνειες γιατί αποτελούνται από υλικά που επιτρέπουν ορισμένα χαρακτηριστικά. Ουσιαστικά, οι RIS είναι επιφάνειες που αποτελούνται από έξυπνα υλικά και τεχνολογίες, τα οποία μπορούν να αλλάζουν τον τρόπο με τον οποίο αντανακλούν, διανέμουν και ενισχύουν τα ασύρματα σήματα ραδιοκυμάτων. Αυτό τους επιτρέπει να επαναδιαμορφώνονται και να προσαρμόζονται δυναμικά για να βελτιώσουν την απόδοση των ασύρματων επικοινωνιών. Κάποια βασικά χαρακτηριστικά των RIS περιλαμβάνουν:
 - Δυναμική Αναμόρφωση, όπου οι RIS μπορούν να αλλάζουν την φάση, τον προσανατολισμό και την αντανάκλαση των ραδιοκυμάτων που περνούν από αυτές. Αυτή η δυνατότητα διαμόρφωσης μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα της επικοινωνίας.



Σχήμα 1.18: Αστικό περιβάλλον που γίνεται χρήση μιας RIS επιφάνειας.

- Ανακλαστικότητα και συγκέντρωση, οι RIS μπορούν να επικεντρώνουν τα ασύρματα σήματα σε συγκεκριμένες περιοχές ή συσκευές, αυξάνοντας την ισχύ και την ποιότητα των σημάτων. Ένα ακόμα βασικό πλεονέκτημα τους είναι ότι μπορούν να τοποθετηθούν σε περιβάλλοντα με μεγάλα εμπόδια, όπως π.χ. στο σχήμα 1.18, λειτουργώντας ως ένας καθρέφτης που επιτρέπει μία εναλλακτική διαδρομή στο σήμα αντισταθμίζοντας τις απώλειες διαδρομής.
- Περιβαλλοντική ευαισθησία, όπου οι “RIS” μπορούν να προσαρμόζονται σε αλλαγές του περιβάλλοντος, όπως αλλαγές στη γεωγραφία ή στη θερμοκρασία, προκειμένου να διατηρήσουν την αποτελεσματικότητά τους.
- Χαμηλό κόστος και ενεργειακή αποδοτικότητα. Συνήθως λειτουργούν με χαμηλή ενέργεια και μπορούν να είναι ενεργές μόνο όταν απαιτείται, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα. Οι επιφάνειες αυτές είναι επίσης αρκετά οικονομικές μιας και δεν αποτελούνται από ενεργά στοιχεία όπως π.χ. ενισχυτές, επιτυγχάνοντας έτσι υψηλότερη ενεργειακή αποδοτικότητα.
- Πληθώρα εφαρμογών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των ασύρματων επικοινωνιών, της επαυξημένης πραγματικότητας (AR), της αυτόνομης οδήγησης και της υγειονομικής φροντίδας.

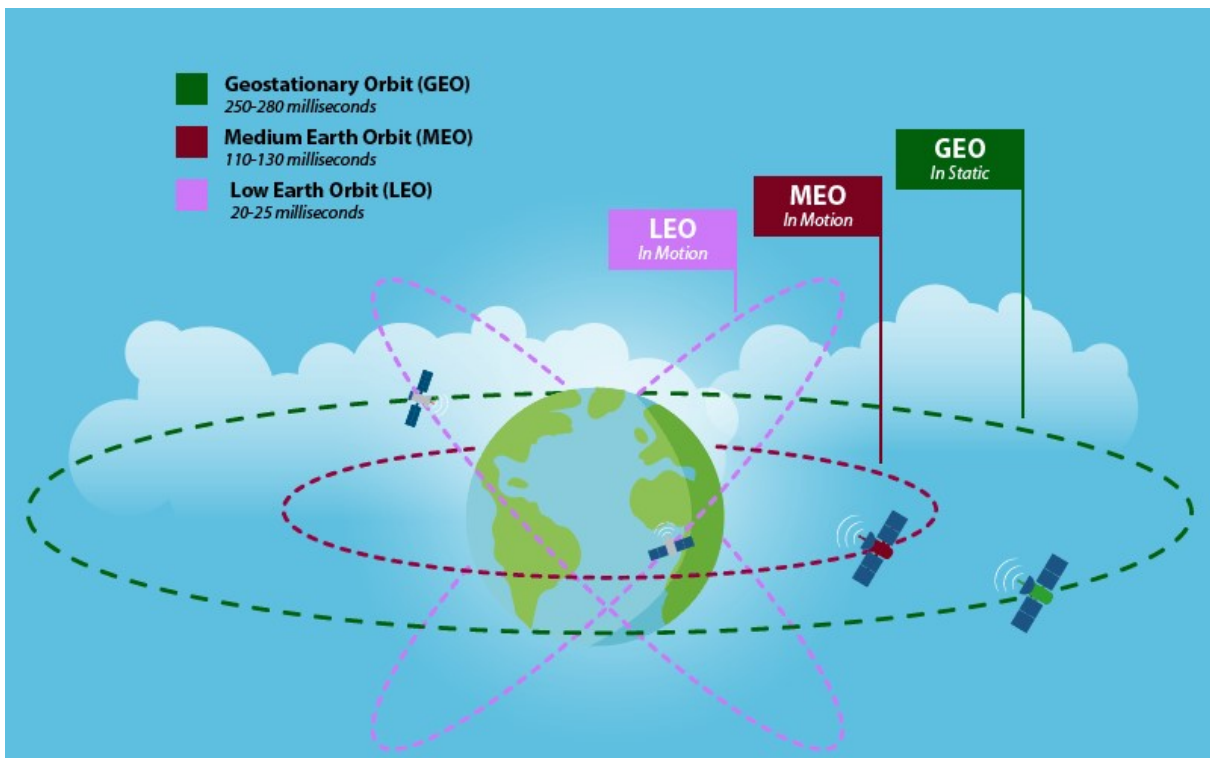
Συνολικά, οι RIS ανοίγουν τον δρόμο για την ανάπτυξη προηγμένων ασύρματων δικτύων που είναι ευέλικτα και αποδοτικά, με τη δυνατότητα να προσαρμόζονται δυναμικά στις ανάγκες της συνδεσιμότητας και της επικοινωνίας σε ποικίλα περιβάλλοντα.

Προς αυτή την κατεύθυνση, μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον έχει η μελέτη του εντοπισμού και της ανίχνευσης υψηλής ακρίβειας, δηλαδή ο εντοπισμός ανθρώπων και αντικειμένων με ακρίβεια, ο οποίος είναι πολύ σημαντικός αφενός στις επαναδιαμορφώσιμες έξυπνες επιφάνειες για να ανιχνεύουν το περιβάλλον και να ξέρουν προς τα που θα στρίψουν δυναμικά αλλά και σε άλλες εφαρμογές, όπως στην αυτόνομη οδήγηση.

Επειδή όμως οι επιφάνειες αυτές δεν έχουν ενεργά στοιχεία δεν είναι σε θέση να εκτιμήσουν το κανάλι και αντ’ αυτού στηρίζονται στην πληροφορία που παίρνουν από τον πομπό και τον δέκτη, κάνοντας την εκτίμηση του καναλιού μία πολύπλοκη διαδικασία. Επίσης λόγω της θέσης τους εί-

ναι σημαντική η απρόσκοπτη παροχή ενέργειας η οποία συχνά βασίζεται σε τεχνικές συγκομιδής ενέργειας όπου δηλαδή οι επιφάνειες συλλέγουν ενέργεια από τα περιβάλλοντα σήματα ραδιοσυχνότητας ή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τέλος, ένα ακόμα σημαντικό ερευνητικό πρόβλημα είναι το πόσο συχνά οι επιφάνειες αυτές θα εναλλάσσουν κατάσταση, θα περνάνε δηλαδή από την κατάσταση επικοινωνίας σε εκείνη του εντοπισμού ή ανίχνευσης περιβάλλοντος και το ανάποδο.

- Τα ενοποιημένα επίγεια, εναέρια και διαστημικά δίκτυα απαρτίζονται από τα εναέρια τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAVs), Συστήματα πλατφόρμας μεγάλου υψόμετρου (HAPS). Επίσης τα διαστημικά που οι δορυφόροι Χαμηλής Γήινης Τροχιάς (LEO), Μεσαίας Γήινης Τροχιάς (MEO), Γεωστατικοί (GEO) δορυφόροι (Σχήμα 1.19). Ένα παράδειγμα ενοποιημένου επίγειου, εναέριου και δορυφορικού δικτύου δίνεται στο σχήμα 1.20.

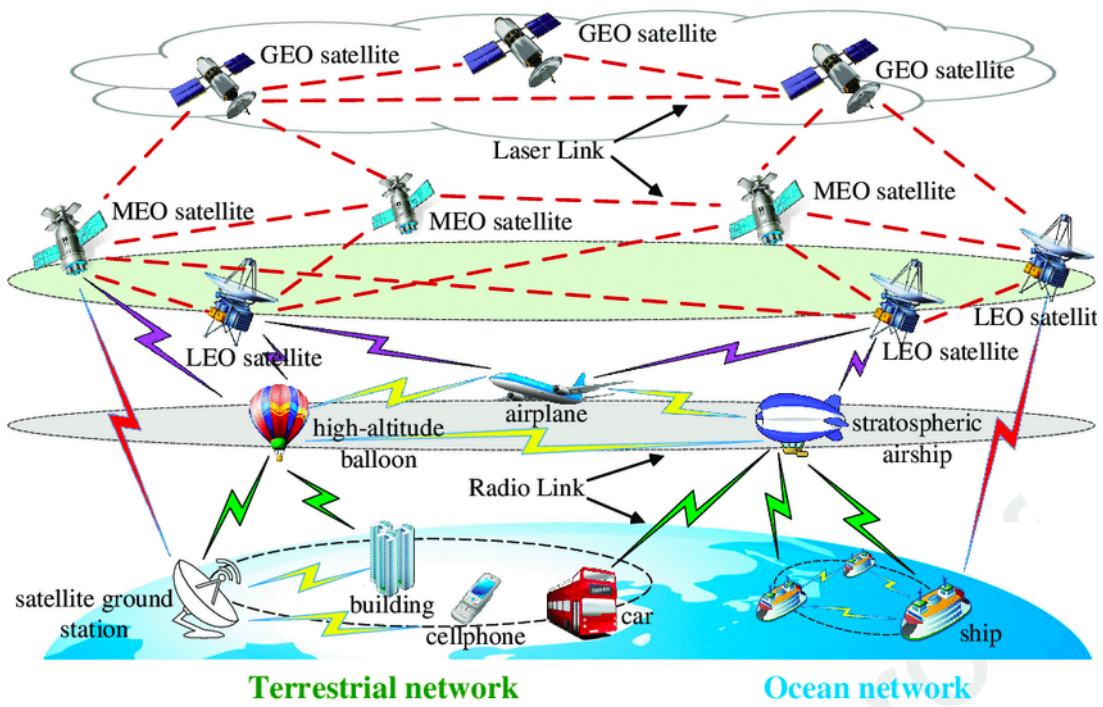


Σχήμα 1.19: Διαφορετικές δορυφορικές τροχιές.

Τα εναέρια μέσα περιλαμβάνουν μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα όπως drones και συστήματα πλατφόρμας μεγάλου υψόμετρου όπως τα αερόστατα τύπου Zepplin της φωτογραφίας, τα οποία θα μπορούν να παρέχουν 6G κάλυψη πάνω από μεγάλες πόλεις όπως το Λονδίνο. Επίσης, θα έχουμε και διαστημικά μέσα, τα οποία περιλαμβάνουν δορυφόρους χαμηλής και μεσαίας γήινης τροχιάς καθώς και γεωστατικούς δορυφόρους όπως φαίνεται στο σχήμα 1.21.

Με άλλα λόγια οδηγούμαστε σε μια πολυεπίπεδη 6G αρχιτεκτονική, της οποίας η μεγαλύτερη πρόκληση είναι η ενοποίηση των επιπέδων σε «ένα ενιαίο δίκτυο από δίκτυα».

Προς αυτή την κατεύθυνση, ανοικτά ερευνητικά προβλήματα αποτελούν η απευθείας πρόσβαση των κινητών στο ενοποιημένο δίκτυο, αφού τα τωρινά τηλέφωνα δεν έχουν δυνατότητα εκπομπής και λήψης σε τόσο μεγάλες αποστάσεις. Επίσης, είναι αναγκαία η χρήση μίας ενιαίας κυματομορφής για τη χρήση σε όλα τα επίπεδα για τη μείωση της πολυπλοκότητας του συστήματος. Επειδή όμως παραδοσιακές κυματομορφές όπως το OFDM δεν είναι ανθεκτικές στο φαινόμενο Doppler



Σχήμα 1.20: Παράδειγμα ενοποιημένου επίγειου και δορυφορικού δικτύου 6G.



Σχήμα 1.21: Γεωστατικός δορυφόρος (GEO).

που χαρακτηρίζει την επικοινωνία με κινούμενους κόμβους όπως οι δορυφόροι, εναλλακτικές κυματομορφές όπως το Orthogonal Time Frequency Space (OTFS) φαίνονται πιο κατάλληλες για το 6G.

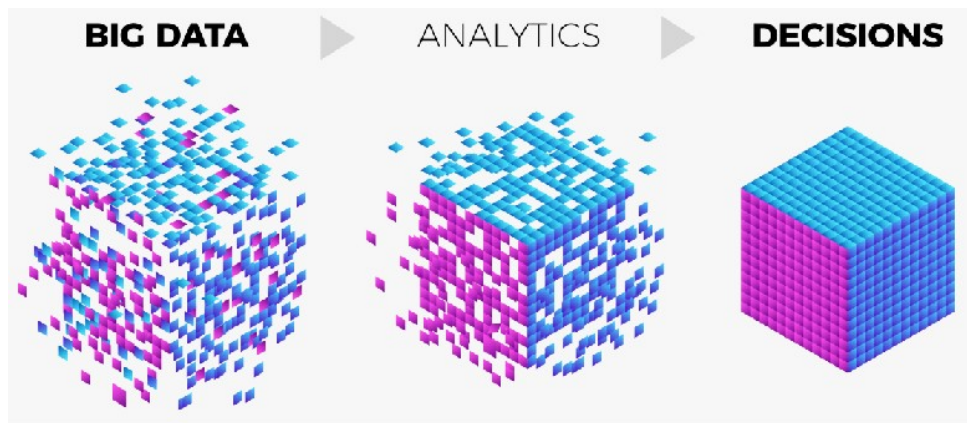
Ακόμη, το πρόβλημα της βέλτιστης ανάθεσης πόρων γίνεται ακόμα πιο περίπλοκο λόγω της μεγάλης ετερογένειας του δικτύου, στο οποίο πέρα από την επικοινωνία στα διάφορα επίπεδα θα είναι δυνατή και η επεξεργασία καθώς και η αποθήκευση δεδομένων σε αυτά, δηλαδή σε ένα δορυφόρο ή και σε ένα HAPS. Τέλος, αποτελεί πρόκληση τόσο ο συντονισμός και η ενορχήστρωση του ενοποιημένου δικτύου, όσο και οι απρόσκοπτες μεταπομπές είτε οριζόντιες, μεταξύ ίδιου επιπέδου είτε κάθετες, μεταξύ διαφορετικών επιπέδων.

Από αυτές ξεχωρίζουμε τις μεταπομπές από LEO σε LEO δορυφόρο λόγω της συχνότητας τους. Αυτό συμβαίνει, καθώς οι τελευταίοι έχουν πολύ μικρό χρόνο ορατότητας, αφού βρίσκονται σε χαμηλό υψόμετρο και κινούνται με πολύ μεγάλη ταχύτητα για να αντισταθμίσουν την βαρυτική δύναμη που τους ασκείται από τη Γη. Έτσι έχουν μέγιστο χρόνο ορατότητας τα 20 λεπτά, καθιστώντας απαραίτητη τη συνεχή μεταπομπή του σήματος στον γειτονικό LEO δορυφόρο (Σχήμα 1.22 για την επίτευξη απρόσκοπτης επικοινωνίας).



Σχήμα 1.22: Constellation από δορυφόρους χαμηλής γήινης τροχιάς.

- Αποσύνθεση και η εικονικοποίηση του δικτύου. Τεχνολογίες κλειδιά αποτελούν επίσης η αποσύνθεση και η εικονικοποίηση του δικτύου, καθώς επίσης και η προσθήκη ευφύας σε αυτό.
- Προς αυτή την κατεύθυνση, σημαντικά ερευνητικά προβλήματα αποτελούν η διαχείριση του δικτύου με τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης που εκμεταλλεύονται την επίγνωση σημασιολογίας, και συγκεκριμένα το πόσο πρόσφατα είναι τα δεδομένα (την ηλικία της πληροφορίας δηλαδή) αλλά και το πόσο σημαντικά (την αξία της πληροφορίας). Έτσι, οι αλγόριθμοι αυτοί θα μπορούν να δίνουν προτεραιότητα π.χ. σε πρόσφατες τιμές του βηματοδότη ενός ανθρώπου έναντι των μετρήσεων θερμοκρασίας στο χώρο του ασθενή.
- Μια ακόμα βασική τεχνολογία για τα δίκτυα 6G είναι η ανάλυση μεγάλου όγκου δεδομένων χρησιμοποιώντας τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης (σχήμα 1.23). Η τεχνολογία αυτή εκμεταλλεύεται τον τεράστιο όγκο δεδομένων που είναι διαθέσιμα στο δίκτυο ώστε να βγάλει χρήσιμα συμπεράσματα



Σχήμα 1.23: Διαδικασία ανάλυσης των διαθέσιμων δεδομένων με σκοπό τη λήψη βέλτιστων αποφάσεων.

που θα βοηθήσουν στην λήψη αποφάσεων με σκοπό π.χ. τη βελτιστοποίηση του δικτύου.

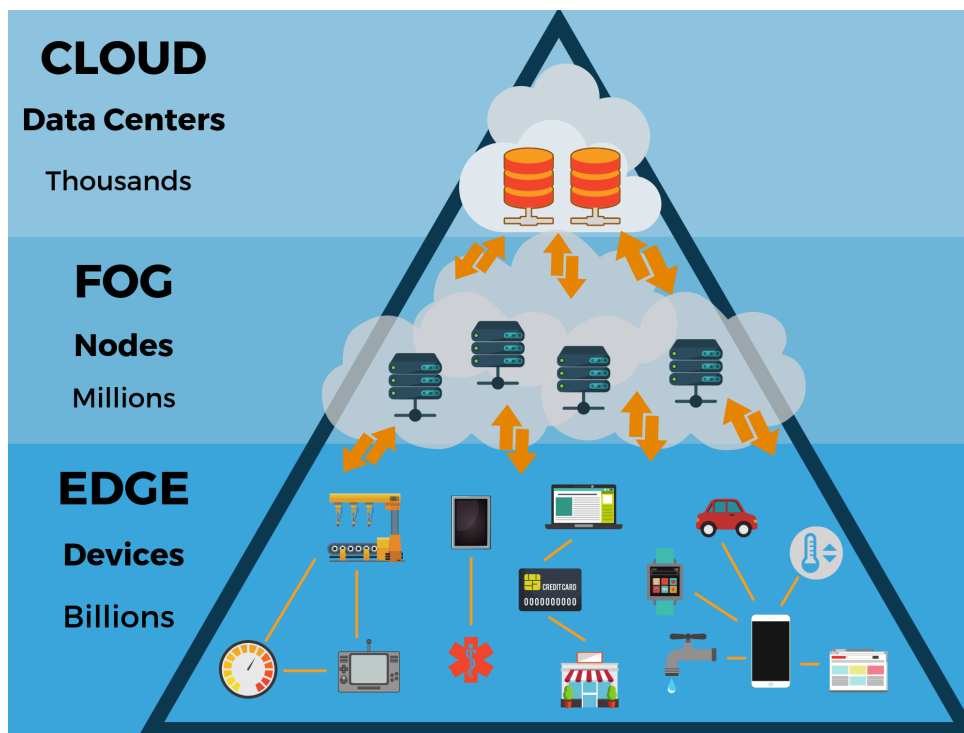
- Με όλες τις παραπάνω τεχνικές επιτυγχάνεται τόσο υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα και αποδοτικότητα κόστους όσο και υψηλή ευελιξία, ενώ είναι δυνατός ο πλήρης προγραμματισμός του δικτύου.
- Σε ένα τέτοιο όμως πολύπλοκο σύστημα ανοικτό πρόβλημα αποτελεί η βέλτιστη ανάθεση από κοινού των επικοινωνιακών υπολογιστικών και αποθηκευτικών πόρων. Επίσης, είναι σημαντική η εύρεση λύσεων για την μείωση τόσο της παραγωγής όσο και της αποστολής περιττής πληροφορίας. Και τέλος, είναι σημαντική η εξασφάλιση υψηλής ασφαλείας δικτύου για την οποία τα δίκτυα 6G αναμένεται να χρησιμοποιήσουν μεταξύ άλλων τεχνικές όπως το blockchain και οι κβαντικές επικοινωνίες.

1.3.3 Κριτήρια ποιότητας

Τα κριτήρια ποιότητας (KPIs) για την 6η γενιά ασύρματων επικοινωνιών (6G) περιλαμβάνουν πολλά σημαντικά στοιχεία που συμβάλλουν στη βελτιωμένη εμπειρία των χρηστών και στην αποτελεσματική λειτουργία του δικτύου. Ανάμεσα στα βασικά κριτήρια ποιότητας για το 6G συμπεριλαμβάνονται τα εξής:

- Υψηλές Ταχύτητες Δεδομένων: Το 6G πρέπει να προσφέρει ακόμη υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές, προκειμένου να υποστηρίξει προηγμένες εφαρμογές, όπως την εικονική πραγματικότητα και την αυτόνομη οδήγηση.
- Χαμηλές Καθυστερήσεις: Η χαμηλή καθυστέρηση είναι ουσιώδης για εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπως οι τηλεοπτικές μεταδόσεις και η αλληλεπίδραση με ρομπότ.
- Υψηλή Χωρητικότητα: Το δίκτυο 6G πρέπει να έχει τη δυνατότητα να υποστηρίξει τη συνδεσιμότητα εκατοντάδων χιλιάδων συσκευών του Internet of Things (IoT) και τη μεγάλη ροή δεδομένων.
- Χαμηλή Ενέργεια: Η αποδοτική χρήση ενέργειας είναι σημαντική για να διατηρηθεί η διάρκεια ζωής των μπαταριών συσκευών και για να μειωθεί ο αντίκτυπος στο περιβάλλον.

- **Ασφάλεια:** Η ασφάλεια των δεδομένων και του δικτύου πρέπει να είναι υψηλού επιπέδου, καθώς η αποθήκευση και η μετάδοση ευαίσθητων πληροφοριών αυξάνονται.
- **Επεξεργασία στην Άκρη του Δικτύου (Edge Computing) (Σχήμα 1.24)** Η δυνατότητα για επεξεργασία δεδομένων στην άκρη του δικτύου (edge computing) είναι σημαντική για την επίτευξη χαμηλών καθυστερήσεων και την υποστήριξη εφαρμογών πραγματικού χρόνου σε αντίθεση με το cloud.
- **Αξιοπιστία:** Η αξιοπιστία του δικτύου πρέπει να είναι υψηλή, ώστε να εξασφαλίζεται η συνδεσιμότητα και η λειτουργία των υπηρεσιών ακόμη και σε δύσκολες συνθήκες.



Σχήμα 1.24: Επίπεδα δικτύου με υπολογιστικές δυνατότητες.

1.4 Δομή πτυχιακής και μεθοδολογία

Αρχικά εξετάσαμε τη βιβλιογραφία και είδαμε ότι δεν υπάρχουν παρόμοια εργαλεία στα Ελληνικά που να υπολογίζουν μια πληθώρα παραμέτρων μιας mmWave ζεύξης, επεξηγώντας παράλληλα την επίδραση των παραμέτρων αυτών στα τελικά αποτελέσματα. Έπειτα ασχοληθήκαμε με τις εξισώσεις που θα πρέπει να έχει ένα τέτοιο tool για την λειτουργία του και συγκεκριμένα να μπορεί να υπολογίζει την “Ενεργό ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύ (EIRP)” όπως και τις “Συνολικές απώλειες”, τον “Σηματοθορυβικό λόγο (SNR)” και την λαμβανόμενη ισχύ (Prx). Οι παράμετροι που λαμβάνει το εργαλείο σαν input περιλαμβάνουν την “ισχύ εκπομπής (Ptx)”, την “συχνότητα (f)”, το “κέρδος κεραίας δέκτη (Grx) πομπού (Gtx)”, τις “απώλειες γραμμής μεταφοράς δέκτη (Lrx) πομπού (Ltx)”, την “πυκνότητα αερίων (varour density)”, την “διαθεσιμότητα”, τη “γωνία ανύψωσης (E)”, την “εικόνα θορύβου”, τη “θερμοκρασία (K)”, την πόλωση (polarization) και την “περιοχή” (σε αυτήν την επιλογή έχουμε τα γράμματα από A μέχρι Q και το κάθε ένα αντιπροσωπεύει μια γεωγραφική περιοχή με συγκεκριμένο ρυθμό βροχόπτωσης). Ακόμα για την σωστή κατανόηση των απωλειών δημιουργήθηκαν και δύο έξτρα καρτέλες,

μία που αναλύει τη συμπεριφοράς της ζεύξης για διαφορετικούς “ρυθμούς εξασθένισης λόγω βροχής (A gain)” και διαφορετικά κέρδη κεραίας και ακόμα μία που μελετά την επίδραση της απόστασης και των διαφορετικών συχνοτήτων στην συμπεριφορά της ζεύξης. Για την δημιουργία του εργαλείου επιλέξαμε τα κατάλληλα εργαλεία όπως το “XAMPP” για το τεστάρισμα του web εργαλείου και το “Javascript” για τη δημιουργία δυναμικών scripts με τη βοήθεια μεθόδων για να υλοποιηθεί ο κάθε υπολογισμός με τη χρήση του σωστού τύπου. Το GUI (Graphical User Interface) σχεδιάστηκε να είναι εύκολο προς το χρήστη για μην χρειάζεται καθοδήγηση για να το χρησιμοποιήσει. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν “HTML5” και CSS (bootstrap) για την μορφοποίηση και την προβολή των δεδομένων στον περιηγητή (browser) με τη χρήση του “Visual studio code” για την συγγραφή και σύνταξη του απαιτούμενου κώδικα. Αφού πρώτα επεξηγήθηκαν όλοι οι τύποι, εισήχθησαν και στο εργαλείο για να υπάρχει πλήρη αντιστοίχιση και να καταλαβαίνει ο χρήστης τι γίνεται σε ένα πραγματικό πρόβλημα. Ακόμη για την εξαγωγή των γραφημάτων για την κατανόηση της επίδρασης της απόστασης και των ατμοσφαιρικών απωλειών χρησιμοποιήθηκε το ίδιο το εργαλείο όπως και το Excel.

1.5 Επίλογος

Στην ενότητα αυτή παρουσιάστηκαν οι γενιές κινητής τηλεφωνίας από το 0G μέχρι και το 6G. Επίσης αναλύθηκαν αυτές οι τεχνολογίες και αναφέρθηκαν και πολλές ακόμη τεχνολογίες που βοήθησαν την εξέλιξη του 0G μέχρι και τα 6G. Ακόμη αναφέραμε τα κριτήρια ποιότητας και τα ανοικτά προβλήματα όπως και τεχνολογίες κλειδιά για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών. Από τις τεχνολογίες κλειδιά ξεχωρίσαμε εκείνη των κυμάτων χιλιοστόμετρου, των οποίων η χρήση αν και ξεκίνησε με το 5G, αναμένεται να συνεχίσει και στο 6G. Με τα κύματα χιλιοστόμετρου (millimeterWave, mmWave) να αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι των δικτύων επόμενης γενιάς (Beyond 5G και 6G δίκτυα), η ανάπτυξη μίας διαδικτυακής εφαρμογής με στόχο την εξοικείωση του αναγνώστη με αυτά αποκτά μεγάλη σημασία. Προς αυτή την κατεύθυνση, στην πατούσα διπλωματική θα υλοποιηθεί ένα τέτοιο εργαλείο με χρήση π.χ. Javascript, το οποίο θα έχει τη δυνατότητα να ενημερώνει τον χρήστη για τις παραμέτρους που χρησιμοποιεί, τα όρια αυτών και την χρήση τους αναπτύσσοντας ένα φιλικό προς το χρήστη περιβάλλον για τον προϋπολογισμό ισχύος της mmWave ζεύξης. Παράλληλα, ο χρήστης θα είναι σε θέση να παρατηρήσει πως διαφορετικές τιμές στην είσοδο επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα κατανοώντας καλύτερα τις βασικές παραμέτρους που επηρεάζουν μια mmWave ζεύξη, π.χ. πως μία αύξηση του ρυθμού βροχόπτωσης ή η χρήση μιας πιο κατευθυντικής mmWave κεραίας επηρεάζει την ισχύ του σήματος προς το θόρυβο στην υπό μελέτη κάθε φορά mmWave ζεύξη, μέσω γραφικών παραστάσεων ή και πινάκων.

Κεφάλαιο 2ο: Κύματα χιλιοστόμετρου

2.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και θα ξεχωριστεί σε ιονίζουσες και μη, το πως οι άνθρωποι μπορεί να ανησυχούν για την ακτινοβολία και θα εξηγήσουμε που ακριβώς είναι τα κύματα χιλιοστόμετρου και αν είναι πραγματικά τόσο βλαβερά για την υγεία μας. Επίσης θα αναφερθούν οι παράγοντες που επηρεάζουν τα κύματα χιλιοστόμετρου, όπως οι απώλειες ελεύθερου χώρου (Path Loss) και οι ατμοσφαιρική εξασθένηση. Επιπρόσθετα θα δούμε τον προϋπολογισμό ισχύος και θα ααλύσουμε όλες τις παραμέτρους που περιλαμβάνει.

2.2 Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα καλύπτει ένα ευρύ φάσμα ενεργειών και συχνοτήτων και περιλαμβάνει διάφορες μορφές ακτινοβολίας, όπως τις υπέρυθρες, το ορατό φως, τα υπεριώδη, τα ακτινοβολία X, τα γκάμα, τα ραδιοκύματα και πολλά άλλα. Κάθε μορφή ακτινοβολίας στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα έχει διαφορετική συχνότητα, μήκος κύματος και ενέργεια, και εκπέμπονται από διάφορες πηγές. Εδώ είναι μερικές από τις βασικές πληροφορίες σχετικά με τις διάφορες περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος:

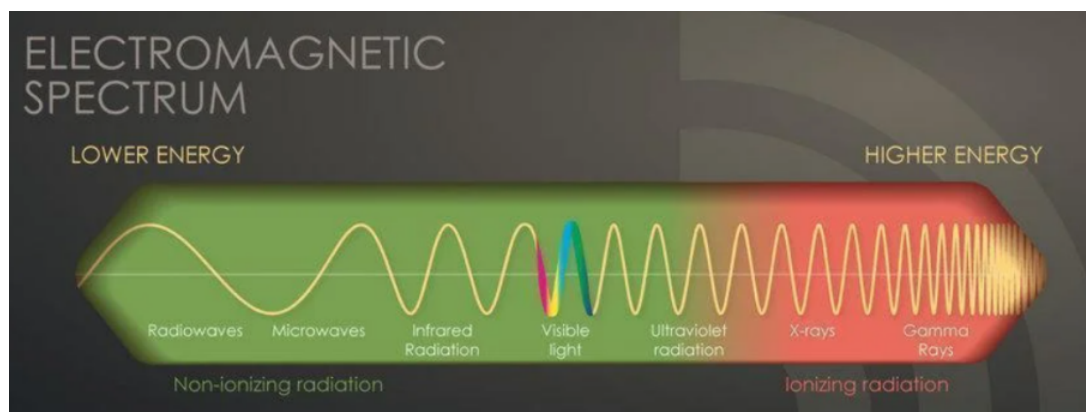
- Υπέρυθρες: Οι υπέρυθρες είναι ακτινοβολία με χαμηλότερη συχνότητα από το ορατό φως. Χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, όπως, η ασύρματη επικοινωνία και η ανίχνευση κινήσεων.
- Ορατό Φως: Το ορατό φως αποτελεί το μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που αντιλαμβανόμαστε με το ανθρώπινο μάτι. Το ορατό φως αποτελείται από διάφορες χρωματικές περιοχές, όπως το κόκκινο, το πράσινο και το μπλε.
- Υπεριώδη (UV) Ακτινοβολία: Οι υπεριώδεις ακτίνες έχουν υψηλότερη ενέργεια από το ορατό φως και μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στο δέρμα και τα μάτια. Ωστόσο, χρησιμοποιούνται επίσης στην απεικόνιση στην ιατρική (π.χ., ακτινογραφίες).
- Ακτινοβολία X: Οι ακτίνες X έχουν ακόμα υψηλότερη ενέργεια από τις υπεριώδεις και χρησιμοποιούνται κυρίως στην ιατρική διάγνωση και την ανίχνευση βλαβών σε υλικά.
- Γκάμα (Γ-ακτινοβολία): Οι ακτίνες γκάμα έχουν ακόμα υψηλότερη ενέργεια και προέρχονται από τον πυρήνα του ατόμου. Χρησιμοποιούνται στην ανιχνευτική ακτινοβολία και στη θεραπεία του καρκίνου.
- Ραδιοκύματα: Τα ραδιοκύματα έχουν πολύ χαμηλότερη συχνότητα από το ορατό φως και χρησιμοποιούνται για ασύρματη επικοινωνία, την εκπομπή ραδιοφώνου και την τηλεόραση, καθώς και για ραδιοερασιτεχνικά.

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα είναι μια συνεχής περιοχή ακτινοβολίας, που εκτείνεται απ' τα ραδιοκύματα έως τις ακτίνες γ. Σε όλες τις περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος τα κύματα έχουν την ίδια

φύση, διαδίδονται με την ίδια ταχύτητα, την ταχύτητα του φωτός και διαφέρουν μόνο στη συχνότητα και το μήκος κύματος. Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος τόσο μικρότερη η συχνότητα. Επειδή η ταχύτητα διάδοσης ενός κύματος είναι 300.000 km/s, ένα κύμα π.χ. που έχει συχνότητα 1GHz, θα έχει μήκος 0,3 m. Ισχύει δηλαδή η σχέση

$$\lambda = c/v \quad (2.1)$$

όπου c = η ταχύτητα του φωτός στο κενό, v = η ταχύτητα του φωτός στο υλικό που μελετάται και λ = το μήκος κύματος του ραδιοκύματος που εκπέμπεται.



Σχήμα 2.1: Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα [6].

Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι το μήκος των ραδιοφωνικών κυμάτων AM είναι από 190 έως 560 m, ενώ των FM είναι από 2,7 έως 3,7 m, ενώ το μήκος κύματος του ορατού φωτός ποικίλει από 35 έως 70 περίπου εκατομμυριστά του εκατοστού. Πριν την ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (που είναι εξαιρετικά μικρή σε σχέση με ολόκληρο το φάσμα) βρίσκονται τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα, οι υπέρυθρες, ενώ μετά την ορατή περιοχή, οι υπεριώδεις, οι ακτίνες χ και οι ακτίνες γ. Το εάν μία ακτινοβολία είναι επικίνδυνη ή όχι, εμπίπτει στον αν ανήκει στις ιονίζουσες ή μη ακτινοβολίες όπως βλέπουμε στο σχήμα 2.1.

2.2.1 Ιονίζουσες και μη ακτινοβολίες

Στις μη ιονίζουσες ακτινοβολίες περιλαμβάνονται μέρος του υπεριώδους φωτός, το ορατό φως, η υπέρυθη ακτινοβολία και οι χαμηλότερες συχνότητες, όπως τα ραδιοκύματα. Οι καθημερινές τεχνολογίες, όπως οι γραμμές ηλεκτρικού ρεύματος, το ραδιόφωνο FM και το Wi-Fi, εμπίπτουν επίσης σε αυτό το εύρος. (Τα μικροκύματα είναι η μόνη εξαίρεση μη ιονίζουσας ακτινοβολίας, αλλά ικανή να βλάψει ιστό, καθώς είναι ακριβώς σκόπιμα φτιαγμένη να συντονίζεται με τα μόρια νερού και να τα κάνει να πάλλονται, όπως συμβαίνει στους φούρνους μικροκυμάτων [7].) Τα χιλιοστομετρικά κύματα δεν είναι ικανά να βλάψουν τον ανθρώπινο ιστό. Ανησυχίες για τους κινδύνους στην υγεία: Η τεχνολογία είναι τόσο νέα που κανείς δεν ξέρει αν πραγματικά υπάρχουν ή ποιοι μπορεί να είναι. Δεν υπάρχουν μελέτες από Ιατρικές σχολές και επιδημιολογικά συμπεράσματα. Δεν υπάρχει τίποτα καταγεγραμμένο και οτιδήποτε αναφέρεται είναι στην σφαίρα των προσωπικών απόψεων και μη επιστημονικά τεκμηριωμένο. Ωστόσο τα θέματα πυκνότητας ισχύος και τα όρια εκπομπής ακτινοβολιών τα καθορίζει η ΕΕΑΕ και η ΕΕΤΤ και βρίσκονται τουλάχιστον στο 60% των Ευρωπαϊκών ορίων. Οι συχνότητες πάνω από την υπεριώδη ακτινοβολία, όπως οι ακτίνες X και οι ακτίνες γάμμα, είναι ιονίζουσες. Άραγε οι υψηλές συχνότητες

του 5G 28GHz μπορούν επίσης να επηρεάζουν την ζωή μας και την υγεία μας και το περιβάλλον στον πλανήτη μας; Κατά την κλασική Φυσική, όχι.

Είναι κατανοητό ότι οι άνθρωποι ανησυχούν γενικώς για την ακτινοβολία. Η χρήση του γενικού όρου “ακτινοβολία” είναι παραπλανητική, επειδή οι άνθρωποι σκέφτονται τα πυρηνικά όπλα. Στην πραγματικότητα σκέφτονται την ιονίζουσα ακτινοβολία που μπορεί να προκαλέσει βλάβες, να σκοτώσει κύτταρα ή και να προκαλέσει μεταλλάξεις DNA.

2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τα mmWave

Όπως κάθε ακτινοβολία έχει ευαίσθησιες έτσι και ακόμη παραπάνω έχουν και τα κύματα χιλιοστόμετρου. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση τους μπορούν να χωριστούν στις απώλειες ελεύθερου χώρου και τις ατμοσφαιρικές απώλειες. Απώλεια Σήματος (Path Loss), τα mmWave συχνότητες υποστηρίζουν υψηλές ταχύτητες μετάδοσης, αλλά έχουν μεγαλύτερη απώλεια σήματος σε σχέση με τις χαμηλότερες συχνότητες. Αυτό σημαίνει ότι τα σήματα mmWave απαιτούν πυκνότερα δίκτυα και βελτιωμένες τεχνικές διόρθωσης σφαλμάτων για να διατηρήσουν τη σταθερή συνδεσιμότητα. Ακόμη η Διάχυση (Diffraction) και Σκέδαση (Scattering). Τα mmWave σήματα μπορούν να υποστούν διάχυση και σκέδαση από τα αντικείμενα και τα εμπόδια που συναντούν στο περιβάλλον. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε απώλειες σήματος και παραμορφώσεις. Ακόμη στις ατμοσφαιρικές απώλειες υπάγονται οι περιβαλλοντικοί παράγοντες, οι καιρικές συνθήκες, όπως η βροχή και η νεφοκάλυψη, μπορούν να επηρεάσουν την επίδοση των σημάτων mmWave. Επίσης, οι φυσικές εμποδίσσεις όπως τα δέντρα και τα κτίρια μπορούν να προκαλέσουν απώλειες σήματος. Η γωνία πομποδέκτη, η γωνία μεταξύ του πομπού και του δέκτη μπορεί να επηρεάσει την απόδοση των mmWave σημάτων. Είναι σημαντικό να ευθυγραμμιστούν γωνία πομποδέκτη για την αποτελεσματική μετάδοση. Τέλος η συχνότητα Λειτουργίας, οι διάφορες ζώνες συχνοτήτων mmWave.

2.3.1 Απώλειες ελεύθερου χώρου

Απώλειες ελεύθερου χώρου (Free Space Path Loss) είναι η απόσβεση του σήματος (μετρημένη σε dB) καθώς το σήμα ταξιδεύει στον χώρο, συμβολίζεται με L_{fs} και υπολογίζεται από τον τύπο (2.2).

$$L_{fs} = \left[\frac{4\pi R}{\lambda} \right]^2 \quad (2.2)$$

όπου R η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη και το $4\pi R$ το εμβαδόν επιφάνειας σφαίρας.

2.3.2 Ατμοσφαιρική εξασθένηση

Η Ατμοσφαιρική εξασθένηση (L_a) περιλαμβάνει της απώλειες λόγω βροχής (L_{rain}), την απορρόφηση οξυγόνου (L_o) και τις απώλειες λόγω υδρατμών και άλλων αερίων (L_w) που επηρεάζουν τα χιλιοστομετρικά κύματα. Ισχύει δηλαδή:

$$L_a = [L_{rain} + L_o + L_w][dB] \quad (2.3)$$

L_{rain} : Ρυθμός εξασθένησης λόγω βροχής.

Κεφάλαιο 2

L_o : Ρυθμός απορρόφησης οξυγόνου.

L_w : Ρυθμός απόσβεσης λόγω υδρατμών και άλλων αερίων.

- Απώλειες βροχής: Οι απώλειες λόγω βροχής δίνονται από τη σχέση:

$$L_{rain} = \gamma_{\mathcal{R}} L_e [dB] \quad (2.4)$$

όπου $\gamma_{\mathcal{R}}$ είναι ο ειδικός ρυθμός εξασθένησης λόγω βροχής και δίνεται από:

$$\gamma_{\mathcal{R}} = k R_e^a [dB/km] \quad (2.5)$$

με R_e τον ρυθμό βροχόπτωσης (rain rate), δηλαδή ο ρυθμός που το νερό συσσωρεύεται σε βροχομετρητή στο έδαφος στη περιοχή ενδιαφέροντος (που βρίσκεται ο δέκτης) και k και a βοηθητικές παράμετροι που δίνονται από την (2.6) και (2.7), αντίστοιχα.

$$k = \frac{1}{2} [k_H + k_v + (k_H - k_v) \cos^2(E) \cos(2t)] \quad (2.6)$$

$$a = \frac{1}{2k} [k_H a_H + k_v a_v + (k_H a_H - k_v a_v) \cos^2(E) \cos(2t)] \quad (2.7)$$

Οι παράμετροι k_H , k_v , a_H , a_v εξαρτώνται από τη συχνότητα και λαμβάνονται από πίνακες.

E : η γωνία ανύψωσης

t : η γωνία κλίσης της πόλωσης (π.χ. για κυκλική πόλωση, $t = 45^\circ$)

Η παράμετρος L_e αναπαριστά το ενεργό μήκος της διαδρομής (effective path length) του σήματος διαμέσου της βροχής και δίνεται από:

$$L_e = L_S r_e \quad (2.8)$$

όπου L_S το γεωγραφικό μήκος της διαδρομής του σήματος διαμέσου της βροχής, το οποίο ισούται με:

$$L_S = (h_R - h_S) / \sin(E) \quad (2.9)$$

με h_S το ύψος του δέκτη πάνω από τη μέση στάθμη της θάλασσας. Για τη παράμετρο h_R ισχύει:

$$\begin{aligned} h_R &= 3 + 0.028 (\text{γεωργ. πλ.}) [km], \text{ αν } 0^\circ < \text{γεωργ. πλ.} < 36^\circ \\ h_R &= 4 - 0.075 (\text{γεωργ. πλ.} - 36^\circ) [km], \text{ αν γεωργ. πλ.} \geq 36^\circ \end{aligned} \quad (2.10)$$

Η παράμετρος r_e δηλώνει τον συντελεστή ελάττωσης (reduction factor), εξαρτάται από το e δηλαδή το ποσοστό του χρόνου που η ζεύξη δεν είναι διαθέσιμη και δίνεται από τον Πίνακα 2.1.

Ο παράγοντας οριζόντιας εξασθένησης δίνεται από:

$$r_{0.01} = [1 + 0.78 \sqrt{L_G \gamma_{\mathcal{R}} / f} - 0.38(1 - e^{-2L_G})]^{-1} \quad (2.11)$$

e (%)	r_e
0.001	$10/(10+L_G)$
0.01	$90/(90+4L_G)$
0.1	$180/(180+L_G)$
1	1

Πίνακας 2.1: Πίνακας τιμών r_e για διαφορετικές τιμές e .

όπου το L_G δίνεται σε km, το γ_R σε dB/km και η συχνότητα f σε GHz.

Το L_G προκύπτει από:

$$L_G = L_S \cos(e) \quad (2.12)$$

Η μεθοδολογία προσδιορισμού του L_{rain} μπορεί να χωριστεί στα παρακάτω βήματα:

- Καθορισμός ρυθμού βροχόπτωσης από πίνακες \mathcal{R}_e
 - Υπολογισμός ύψους βροχής $h_{\mathcal{R}}$
 - Υπολογισμός του συντελεστή ελάττωσης r_e /οριζόντιας εξασθένησης, κατακόρυφης προσαρμογής
 - Υπολογισμός ενεργού μήκους διαδρομής L_e
 - Υπολογισμός ειδικής εξασθένησης $\gamma_{\mathcal{R}}$
 - Υπολογισμός L_{rain}
- Οι απώλειες λόγω οξυγόνου και άλλων αερίων στην ατμόσφαιρα βασίζονται στη σύσταση ITU-R P.676 [8] της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (ITU) και συγκεκριμένα το άθροισμα τους έστω L_g σε dB ισούται με:

$$L_g = (\gamma_o + \gamma_w)R \quad (2.13)$$

όπου R είναι το μήκος της διαδρομής σε χιλιόμετρα και γ_o και γ_w ο ειδικός ρυθμός εξασθένησης σε [dB/km] λόγω απορρόφησης των μορίων του οξυγόνου και λόγω υδρατμών και άλλων αερίων, αντίστοιχα [8].

2.4 Προϋπολογισμός Ισχύος

Η ισχύς λήψης δίνεται από:

$$P_{rx} = (EIRP) \left[\frac{1}{L_{fs} L_a} \right] \left[\frac{G_{rmax}}{L_r L_{frx} L_{pol}} \right], \quad (2.14)$$

όπου η ενεργός ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύς (Effectively Isotropically Radiated Power) δίνεται από: $EIRP = \text{ισχύς πομπού (dBm)} + \text{κέρδος κεραίας (dBi)} - \text{απώλειες πομπού (dB)}$ ή εναλλακτικά:

$$EIRP = P_t + G_t - (L_t + L_{ftx}) \quad (2.15)$$

Η ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύς υποδηλώνει από τον ορισμό της “την ισχύ που θα πρέπει να ακτινοβολεί μία υποθετική ιστροπική κεραία, έτσι ώστε να λαμβάνει το ίδιο ακριβώς επίπεδο σήματος στην

Κεφάλαιο 2

κατεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας μιας συγκεκριμένης κεραιάς και ισοδύναμα με τις προαναφερθείσες εξισώσεις δίνεται από:

$$EIRP = \frac{P_{tx}G_t}{L_tL_{ftx}} \quad (2.16)$$

Αν θεωρήσουμε ότι $L_t=0$: $EIRP=P_tG_t$ (μετριέται σε W)

L_{pol} : Απώλειες ασυμφωνίας πολώσεων.

L_a : Ατμοσφαιρική εξασθένηση.

L_{ftx}, L_{frx} : Απώλειες εξοπλισμού εκπομπής και λήψης.

L_t, L_r : Απώλειες λόγω κακής ευθυγράμμισης μεταξύ των κεραιών του πομπού και του δέκτη, αντίστοιχα.

Βάση της εξίσωσης (2.14) θέτοντας όλες τις παραπάνω ποσότητες σε λογαριθμική κλίμακα, π.χ.

$$(EIRP)_{dBW} = 10\log_{10}(EIRP)_W \quad (2.17)$$

η ισχύς του σήματος λήψης γράφεται:

$$P_{rx} = [EIRP] + [G_r] - [L_{frx}] - [L_r] - [L_{pol}] - [L_a] - [L_{fs}] \quad (2.18)$$

$$B_w = \eta \left[\frac{\pi D}{\lambda} \right]^2 = \eta \frac{70\pi}{\theta_{3db}} \quad (2.19)$$

Κέρδος-απολαβές κεραιάς:

$$G_{rmax} = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{eff} \quad (2.20)$$

παραβολική κεραιά:

$$G_{rmax} = \eta \left[\frac{\pi D}{\lambda} \right]^2 = \eta \frac{70\pi}{\theta_{3db}} \quad (2.21)$$

θ_{3db} : Εύρος ημίσειας ισχύος

D : Διάμετρος

2.5 Επίλογος

Σε αυτό το κεφάλαιο είπαμε τι είναι το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και ως που εκτείνεται απ' τα ραδιοκύματα έως τις ακτίνες γ. Ακόμη είπαμε την φύση του και εάν μία ακτινοβολία είναι επικίνδυνη ή όχι, εμπίπτει στον αν ανήκει στις ιονίζουσες ή μη ακτινοβολίες. Επιπρόσθετα οι άνθρωποι ανησυχούν γενικώς για την ακτινοβολία. Η χρήση του γενικού όρου “ακτινοβολία” είναι παραπλανητική και μόνο η ιονίζουσα ακτινοβολία και μπορεί να προκαλέσει ζημιά. Επίσης είπαμε για τις ευαισθησίες των κύματα χιλιοστόμετρου όπως η απώλειες κενού χώρου και η ατμοσφαιρική εξασθένηση του σήματος αναλύθηκαν οι απώλειες ελεύθερου χώρου εκπεμπόμενης ως προς την λαμβανομένη ισχύ το πως συμβολίζεται

και πως υπολογίζεται και από ποιον τύπο. Επίσης τι περιλαμβάνει η ατμοσφαιρική εξασθένηση, όπως απώλειες βροχής, ειδική εξασθένηση και ολική εξασθένηση. Ακόμη ο υπολογισμός ειδικής εξασθένησης και η επίδραση της ατμόσφαιρας και από τι εξαρτάται η ατμοσφαιρική απορρόφηση. Επίσης από τι δίνεται η ισχύς λήψης από: Απώλειες ασυμφωνίας, απώλειες εξοπλισμού εκπομπής και λήψης και απώλειες λόγω κακής ευθυγράμμισης. Τέλος εξηγήσαμε αναλύσαμε και δώσαμε τους τύπους που υπολογίζετε το EIRP.

Κεφάλαιο 3ο: Online εργαλείο εκμάθησης

3.1 Εισαγωγή

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται το online εργαλείο εκμάθησης και ο τρόπος λειτουργίας του. Επίσης δίνεται έμφαση στον τρόπο υλοποίησης του και στην φιλικότητα του προς τον χρήστη, και εξηγείται με ποιες τεχνολογίες και ποιες γλώσσες προγραμματισμού έχει δημιουργηθεί το εργαλείο. Ακόμη μέσω μιας πληθώρας στιγμιότυπων, παρουσιάζονται τα κύρια αποτελέσματα που εμφανίζει το εργαλείο και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα ώστε να βοηθήσουν τον φοιτητή να πάρει σωστές αποφάσεις, αφού έχει πειραματιστεί με το εργαλείο να είναι σε θέση, όπου έχει καταλάβει όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν μια δορυφορική ζεύξη.

3.2 Παρουσίαση εργαλείου

Η υλοποίηση του εργαλείου χιλιοστομετρικών κυμάτων έχει ως στόχο να εκπαιδεύσει τον φοιτητή για το πως επηρεάζεται μία τηλεπικοινωνιακή ζεύξη από διάφορους παράγοντες όπως οι ατμοσφαιρικές απώλειες και η απόσταση. Για τη δημιουργία και την επίτευξη του εργαλείου χρησιμοποιήθηκε Html(5), για την συγγραφή της ιστοσελίδας, η Javascript για τη δημιουργία διαδραστικών κουμπιών με την βοήθεια σεναρίων (scripts). Για το design χρησιμοποιήθηκε Bootstrap αλλά τροποποιήθηκε με css code για το output που θα έχει το εργαλείο. Επίσης για τη δοκιμή (testing) του αποτελέσματος, προσομοιώνοντας πως θα είναι το εργαλείο όταν θα είναι σε έναν server, χρησιμοποιήσαμε το πακέτο προγραμμάτων Xampp και τέλος το Visual studio code για την συγγραφή όλου του κώδικα.

Η πρώτη οθόνη του εργαλείου, η οποία φαίνεται στο σχήμα 3.1, καλωσορίζει τον χρήστη και του δίνει πρόσβαση στις κύριες λειτουργίες του εργαλείου. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνει το μενού με το κουμπί “home” και το κουμπί “feedback” όπου όπως αναφέρεται και παρακάτω στην ενότητα με τις προτάσεις βελτίωσης αναμένεται να δώσει πληροφορίες σχετικά με υπάρχουσα bugs του εργαλείου που εντόπισαν οι χρήστες καθώς και ιδέες εμπλουτισμού του. Επίσης πατώντας στο “ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΧΙΛΙΟΣΤΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ” μεταφερόμαστε στην αρχική σελίδα για διευκόλυνση. Στα αριστερά βρίσκεται ένα μενού επιλογών με όλα τα διαθέσιμα εργαλεία. Η πρώτη επιλογή αφορά στα “Κύματα χιλιοστόμετρου προϋπολογισμός ισχύος”, όπου επιλέγοντας το, εμφανίζεται η κύρια οθόνη στο Σχήμα 3.2.

Σε αυτήν την καρτέλα μπορούμε να συμπληρώσουμε εμείς τις εξής παραμέτρους: ισχύς εκπομπής (P_{tx}), συχνότητα (f), κέρδος κεραίας δέκτη (G_{rx}), απώλειες γραμμής μεταφοράς δέκτη (L_{rx}), απώλειες γραμμής μεταφοράς πομπού (L_{tx}), κέρδος κεραίας πομπού (G_{tx}), πυκνότητα αερίων (vapour density), εικόνα θορύβου, θερμοκρασία (K), εύρος ζώνης, περιοχή, γωνία ανύψωσης (E) και πόλωση (polarization). Έπειτα πατάμε το κουμπί που βρίσκεται πάνω από τον χάρτη των ζωνών βροχόπτωσης και μας υπολογίζει τα παρακάτω: την ενεργό ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύ (EIRP), τις απώλειες ελεύθερου χώρου, τη λαμβανόμενη ισχύ (P_{rx}), τις συνολικές απώλειες και το σηματοθορυβικό λόγο (SNR). Ο χάρτης ζωνών βροχόπτωσης, ο οποίος παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3, χωρίζει τις γεωγραφικές περιοχές σε ζώνες με βάση το ρυθμό βροχόπτωσης.

Επιπρόσθετα βλέπουμε τη δεύτερη επιλογή με το όνομα “Ατμοσφαιρικές απώλειες”, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4, Σχήμα 3.5 και Σχήμα 3.6, όπου έχουν γίνει κάποια πειράματα με το συγκεκριμένο εργαλείο



Σχήμα 3.1: Πρώτη οθόνη του εργαλείου όπου καλωσορίζει τον χρήστη, και εμφανίζει το μενού για περαιτέρω λειτουργίες.

με διαφορετικές περιοχές βροχόπτωσης για διαφορετικές συχνότητες 60, 70 και 80 GHz αλλά και με άλλο κέρδος κεραίας πομπού (G_{tx}) με τιμές 18, 22 και 30 dBi.

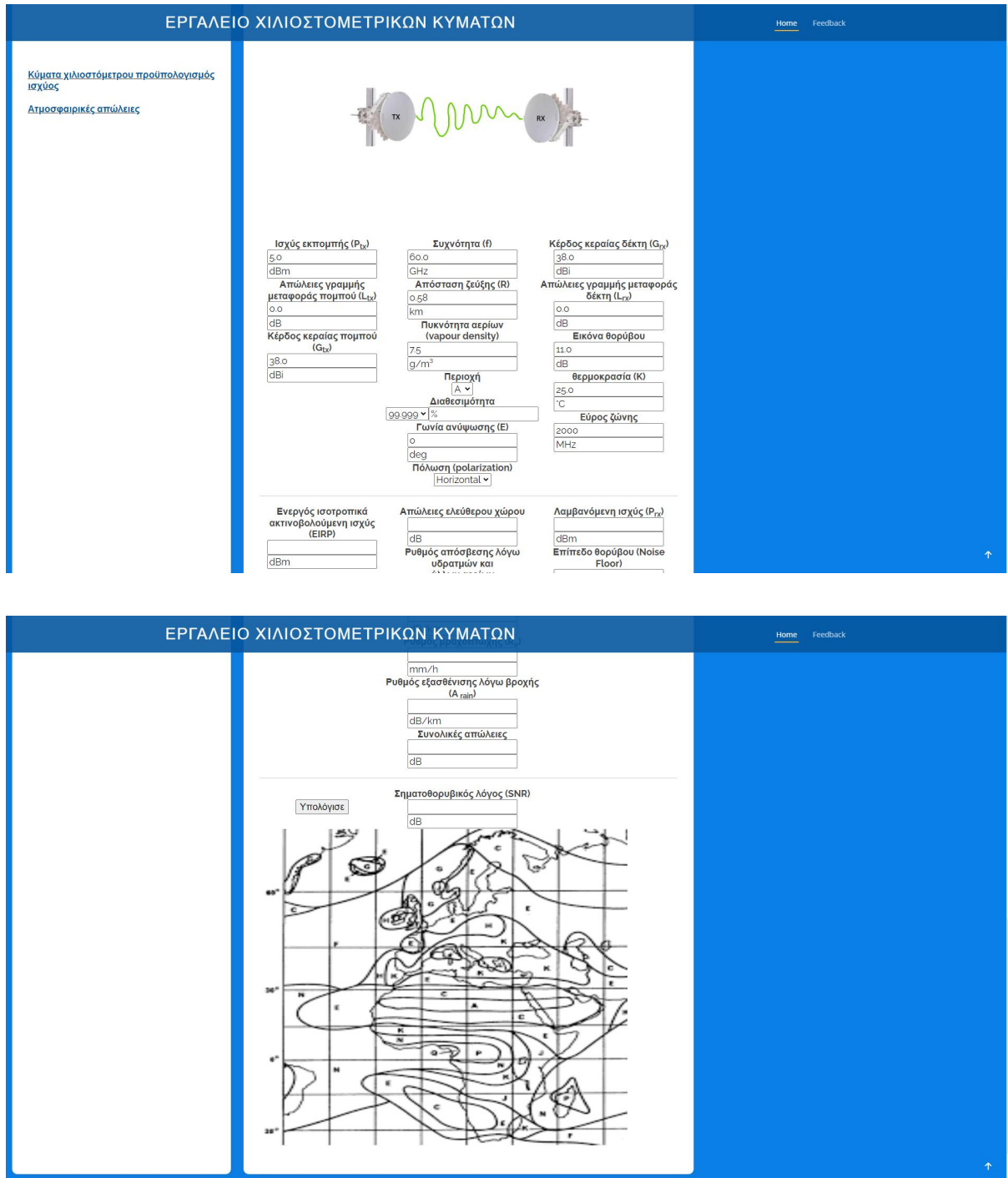
Επιπρόσθετα βλέπουμε τη τρίτη επιλογή με το όνομα “Επίδραση της απόστασης”, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7, όπου έχουν γίνει κάποια πειράματα με το συγκεκριμένο εργαλείο με (πR 0-1.0)

Η επίδραση της ατμόσφαιρας χωρίζεται σε τρία είδη, τις απώλειες λόγω βροχής, τις απώλειες λόγω απορρόφησης των μορίων του οξυγόνου και τις απώλειες υδρατμών και άλλων αερίων. Οι απώλειες λόγω βροχής επηρεάζουν όλες τις συχνότητες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8. Συγκεκριμένα βλέπουμε ότι όσο αυξάνεται ο ρυθμός βροχόπτωσης (R_e) τόσο μειώνεται η λαμβανόμενη ισχύς και το SNR (Σχήματα 3.8, 3.9, αντίστοιχα) για όλες τις συχνότητες. Ωστόσο, η συχνότητα των 60 GHz εμφανίζει τη χειρότερη επίδοση σε σχέση με τις άλλες δύο συχνότητες. Αυτό οφείλεται στις μεγάλες απώλειες που λαμβάνουν χώρα στα 60 GHz λόγω απορρόφησης των μορίων του οξυγόνου όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10.

Ακόμη η λαμβανόμενη ισχύς αυξάνεται με την επιλογή υψηλότερου κέρδους κεραίας πομπού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.11, όπου παρουσιάζεται η λαμβανόμενη ισχύς για διαφορετικούς ρυθμούς βροχόπτωσης και κέρδος κεραίας πομπού ($G_{tx}=18, 22$ και 30 dBi). Από το Σχήμα 3.12 συμπεραίνουμε ότι όσο το κέρδος κεραίας αυξάνεται, τόσο αυξάνεται και ο σηματοθορυβικός λόγος στο δέκτη και αυτό γίνεται για διάφορους λόγους:

Πρώτον ο θερμικός Θόρυβος: Κάθε συσκευή έχει μια φυσική θερμική θόρυβο, που προκαλείται από τη θερμοκρασία της συσκευής. Καθώς η ισχύς του σήματος αυξάνεται, αυξάνεται και ο θερμικός θόρυβος.

Δεύτερον ο Θόρυβος Περιβάλλοντος: Ο θόρυβος από πηγές όπως ηλεκτρονικές συσκευές, άλλες κεραίες, και παρεμβολές αυξάνεται όταν αυξάνεται το κέρδος της κεραίας. Ο αυξημένος λόγος σήματος προς

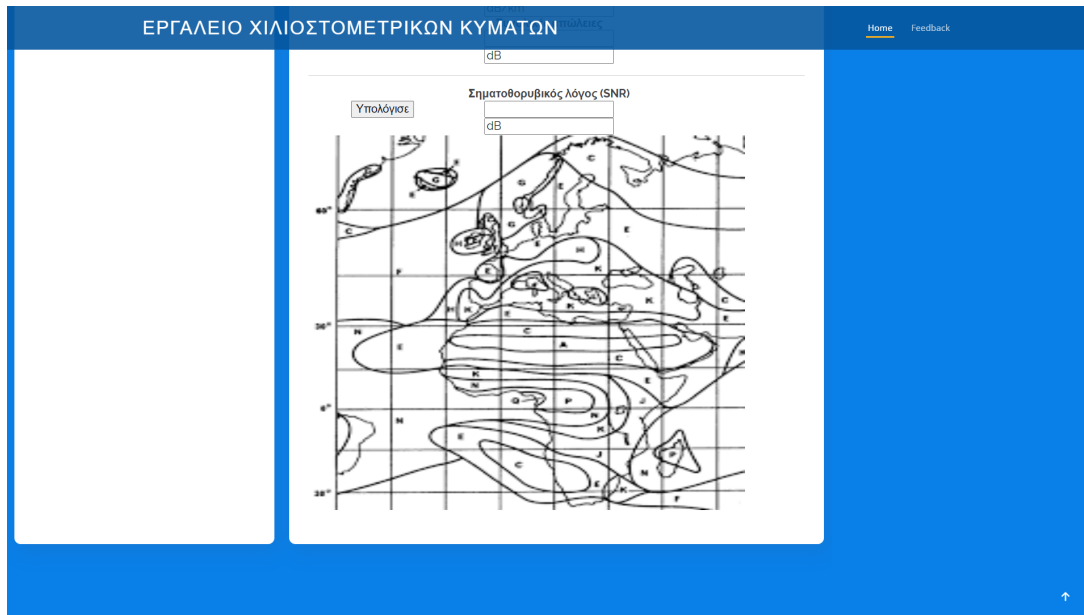


Σχήμα 3.2: Κύρια οθόνη του εργαλείου προϋπολογισμού ισχύος για τα κύματα χιλιοστόμετρου.

θόρυβο μπορεί να επιδεινώσει την ποιότητα του σήματος.

Τρίτον η πολυποριακότητα: Όταν η κεραία έχει υψηλό κέρδος, επικεντρώνει το σήμα σε συγκεκριμένη κατεύθυνση και μπορεί να αποκλείσει σήματα που προέρχονται από άλλες κατευθύνσεις. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια σημάτων ή αύξηση του θορύβου.

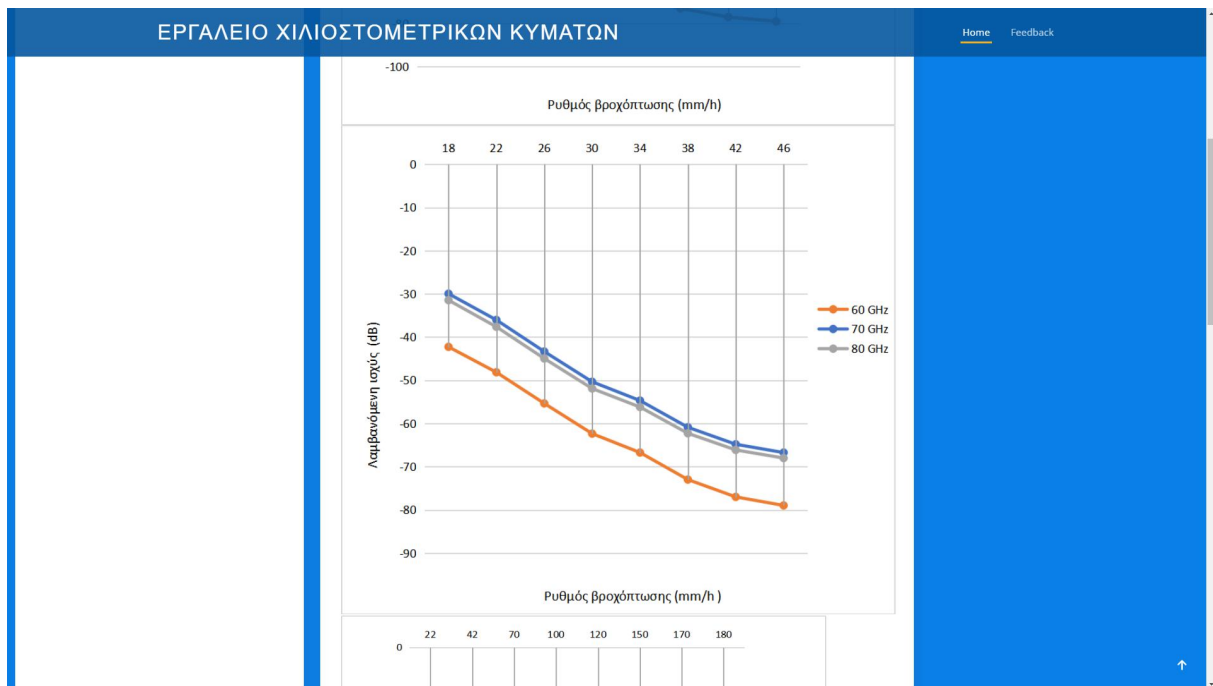
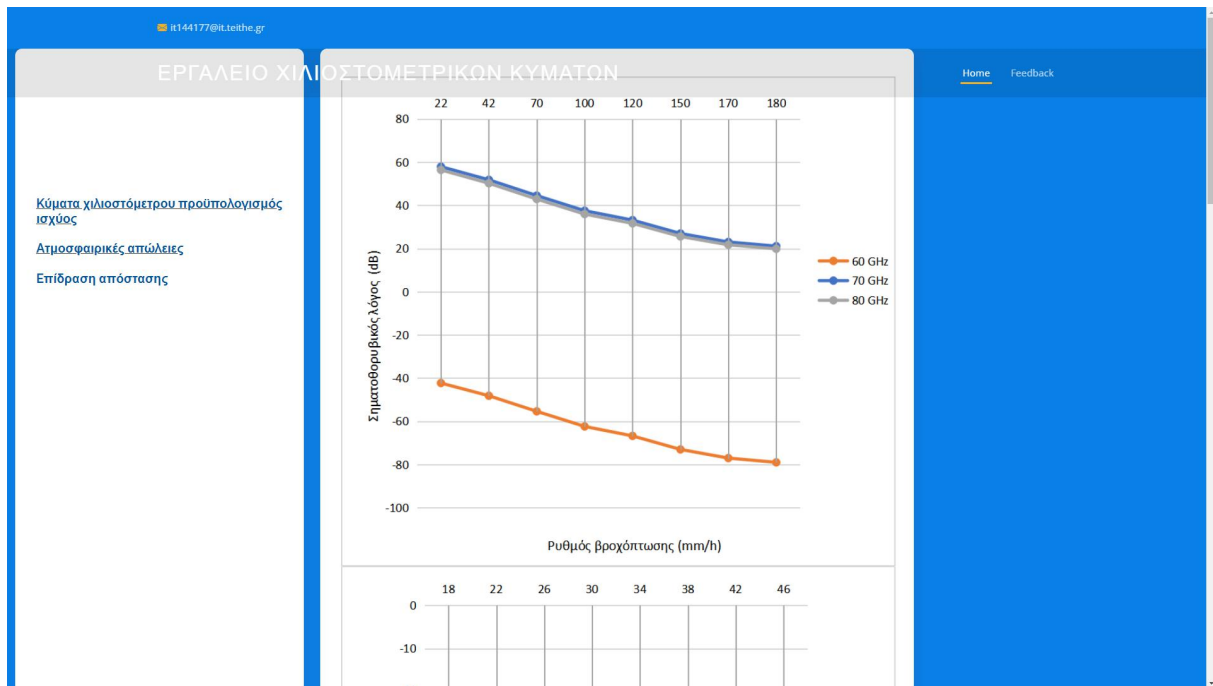
Κατά συνέπεια, αν και το αυξημένο κέρδος της κεραίας μπορεί να βοηθήσει στην αύξηση της εμβέλειας



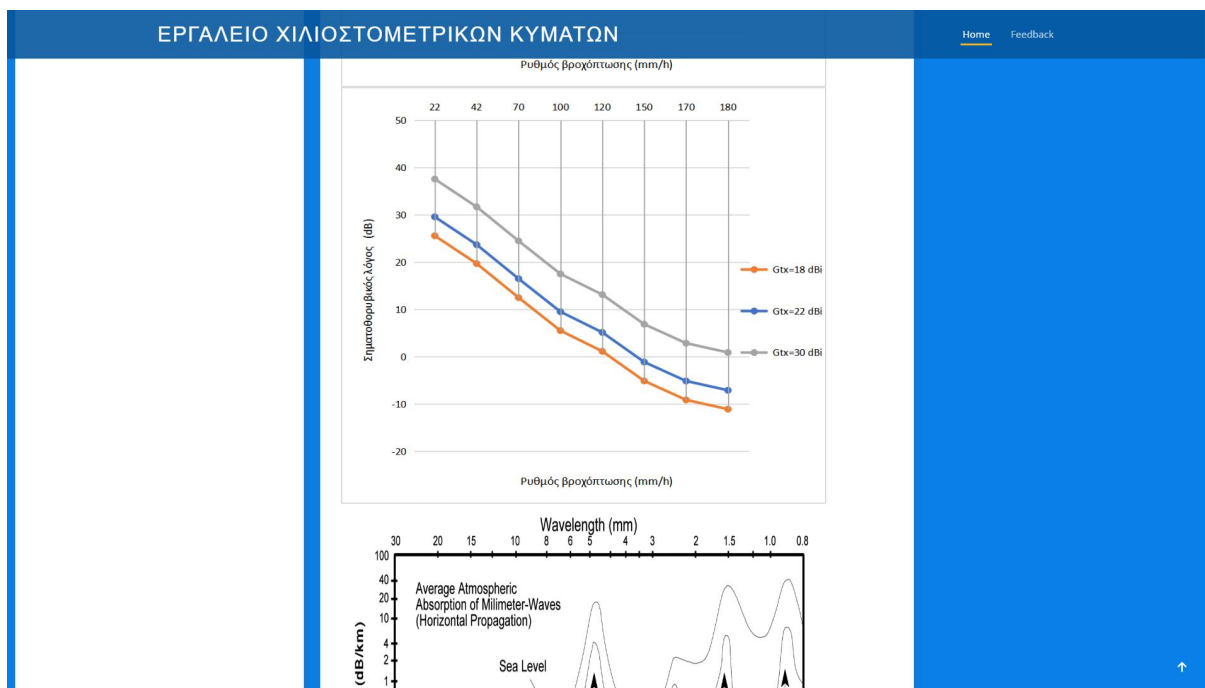
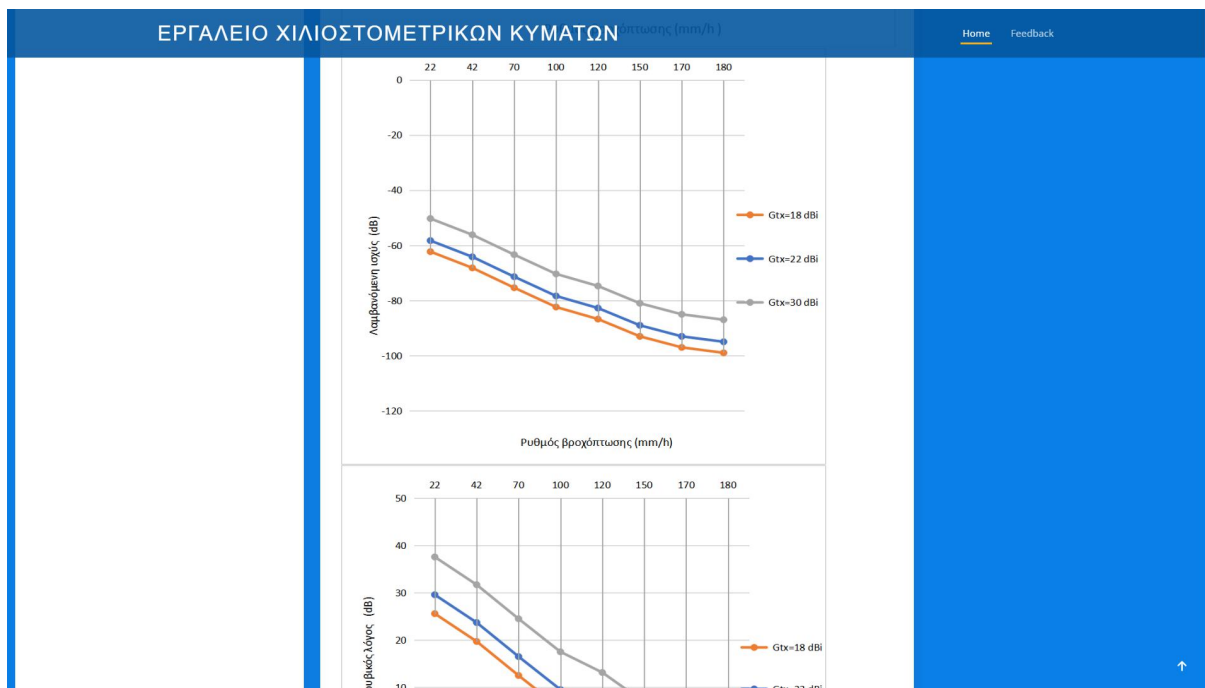
Σχήμα 3.3: Χάρτης διαφορετικών περιοχών βάσει του μέσου ρυθμού βροχόπτωσης.

και της ισχύος του σήματος, αυξάνει επίσης τον θόρυβο που λαμβάνει ο δέκτης. Για να διατηρηθεί μια καλή ποιότητα σήματος, είναι σημαντικό να ισορροπήσει το κέρδος της κεραίας με τη μείωση του θορύβου στο δίκτυο επικοινωνίας. .

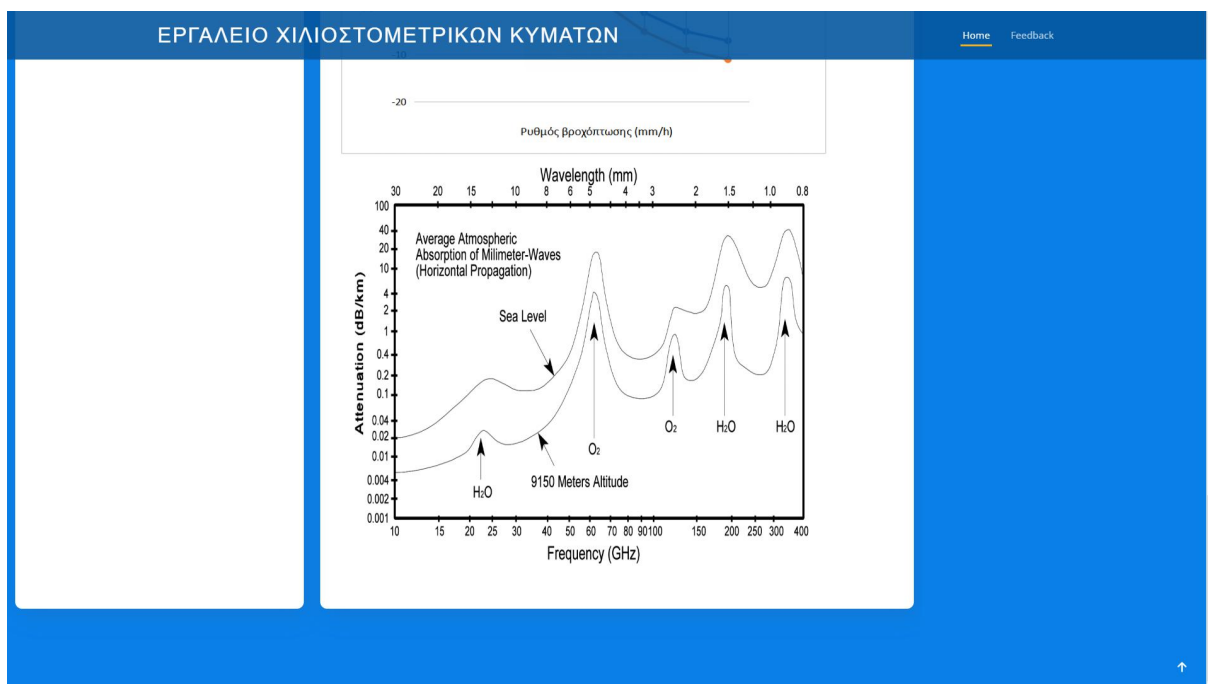
Επίσης, η τρίτη επιλογή αφορά στην “Επίδραση απόστασης”, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.13. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 3.14 έγιναν μετρήσεις της λαμβανόμενης ισχύος για διαφορετικές τιμές απόστασης ζεύξης από 0.1 - 1 km και διαφορετικές συχνότητες 60, 70 και 80 GHz. Παρακάτω βλέπουμε σε ένα σχετικό γράφημα (Σχήμα 3.15) το πως με την αύξηση της απόστασης το SNR μειώνεται για όλες τις συχνότητες. Συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η συχνότητα τόσο αυξάνεται και η επίδραση της απόστασης λόγω των απωλειών ελευθέρου χώρου οι οποίες αυξάνονται σημαντικά με την αύξηση της συχνότητας.



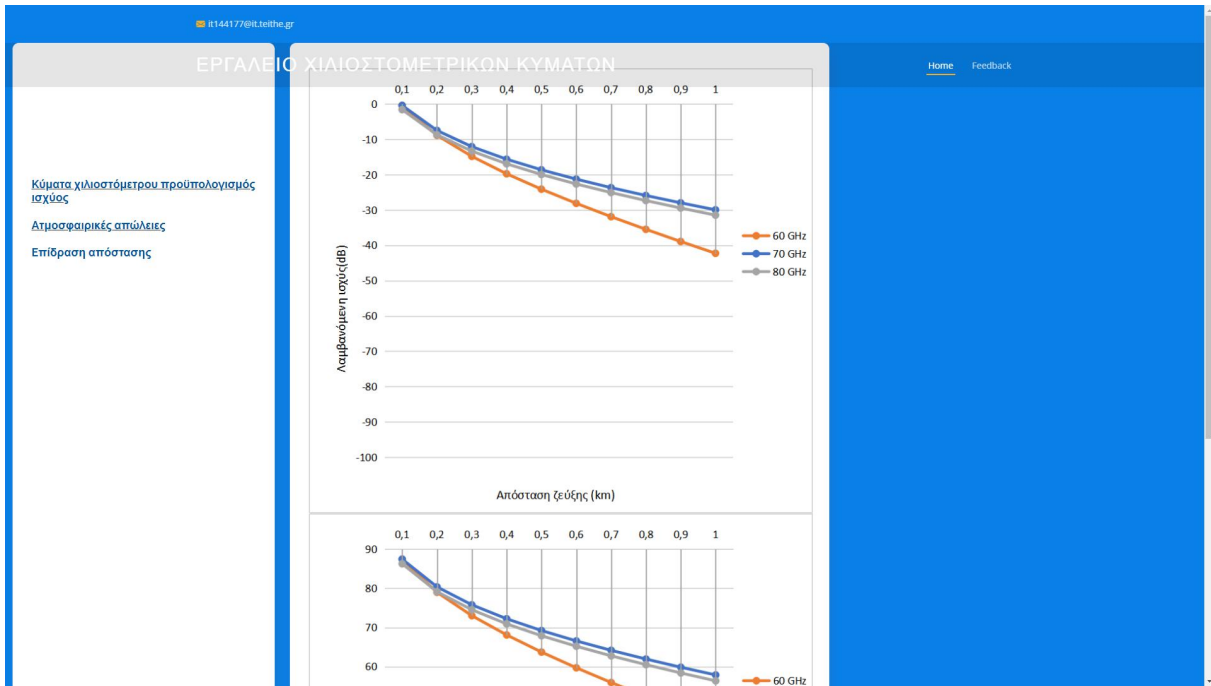
Σχήμα 3.4: Μελέτη επίδρασης ατμοσφαιρικών απωλειών σε μία mmWave ζεύξη για διαφορετικές συχνότητες (60, 70 και 80 GHz) και τιμές κερδών κεραίας πομπού (Δεύτερη επιλογή του μενού "Ατμοσφαιρικές απώλειες").



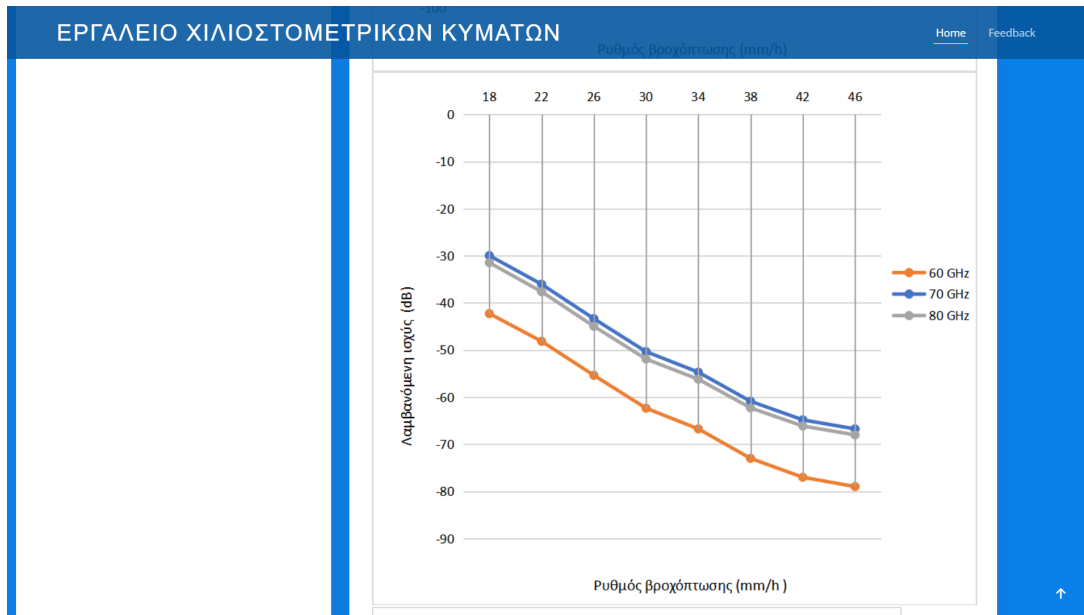
Σχήμα 3.5: Δεύτερη επιλογή του μενού “Ατμοσφαιρικές απώλειες”.



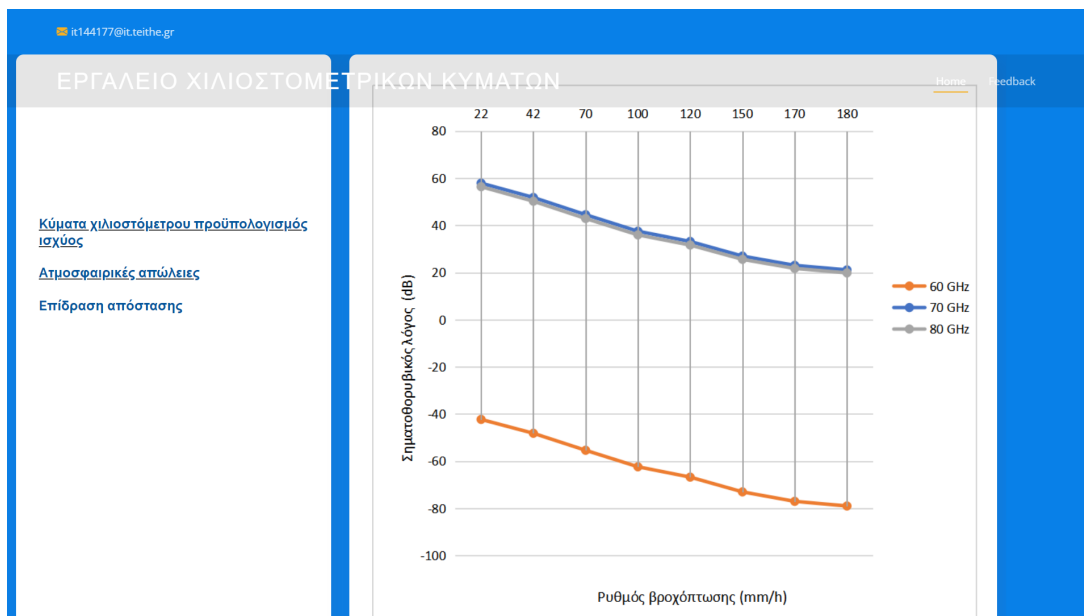
Σχήμα 3.6: Δεύτερη επιλογή του μενού "Ατμοσφαιρικές απώλειες".



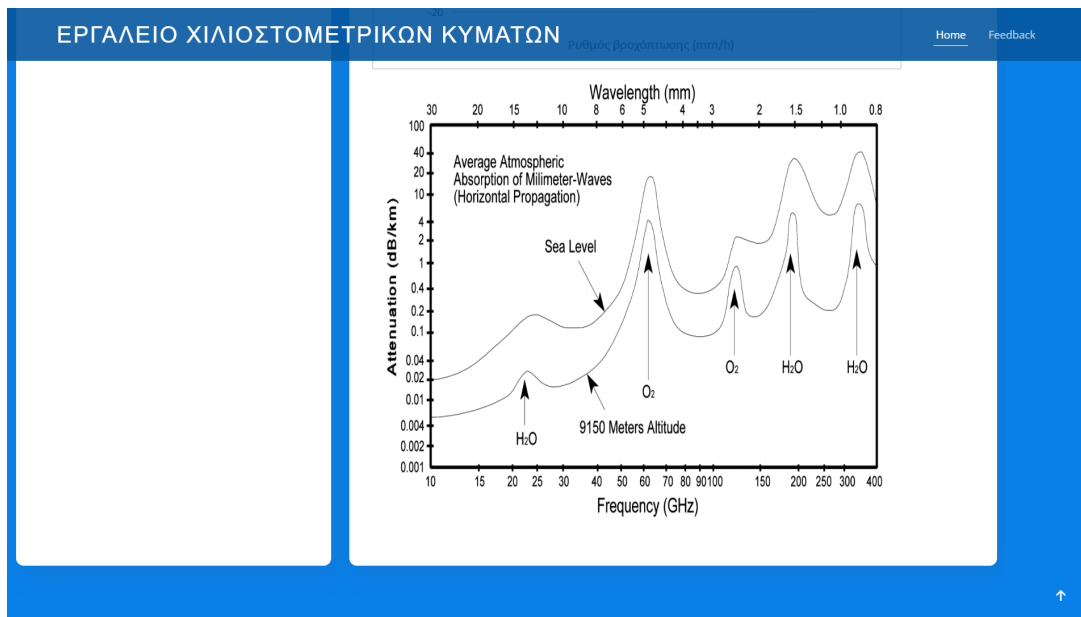
Σχήμα 3.7: Μελέτη επίδρασης της απόστασης σε μία mmWave ζεύξη για διαφορετικές συχνότητες (60, 70 και 80 GHz) ως προς την απόσταση ($R_r = 18, 22$ και 30 dB).



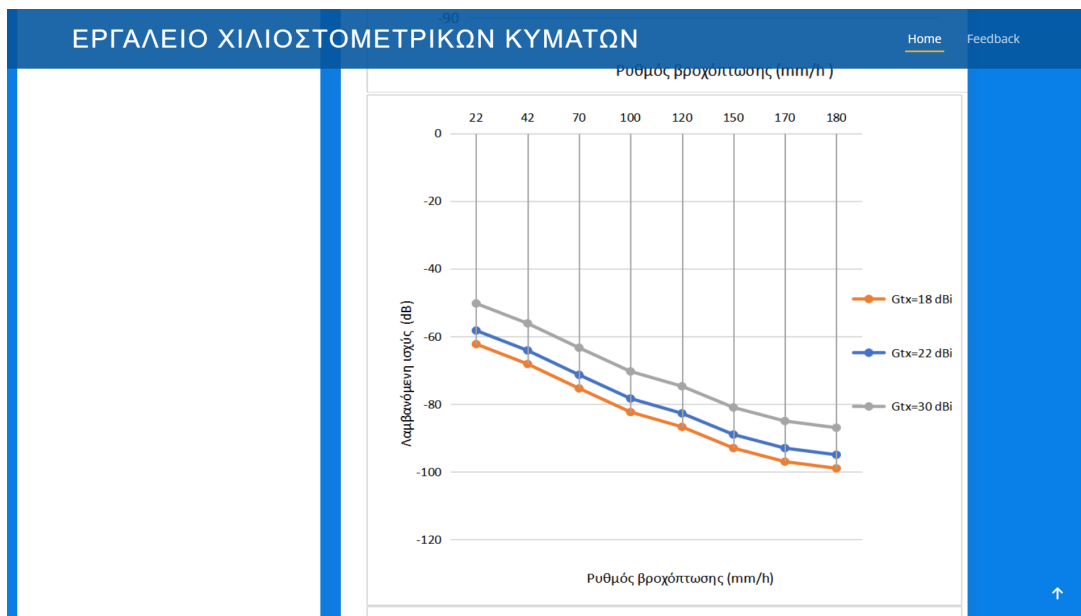
Σχήμα 3.8: Γραφική αναπαράσταση της λαμβανόμενης ισχύος του δέκτη ως προς τον ρυθμό βροχόπτωσης για διαφορετικές τιμές συχνότητας (60, 70 και 80 GHz).



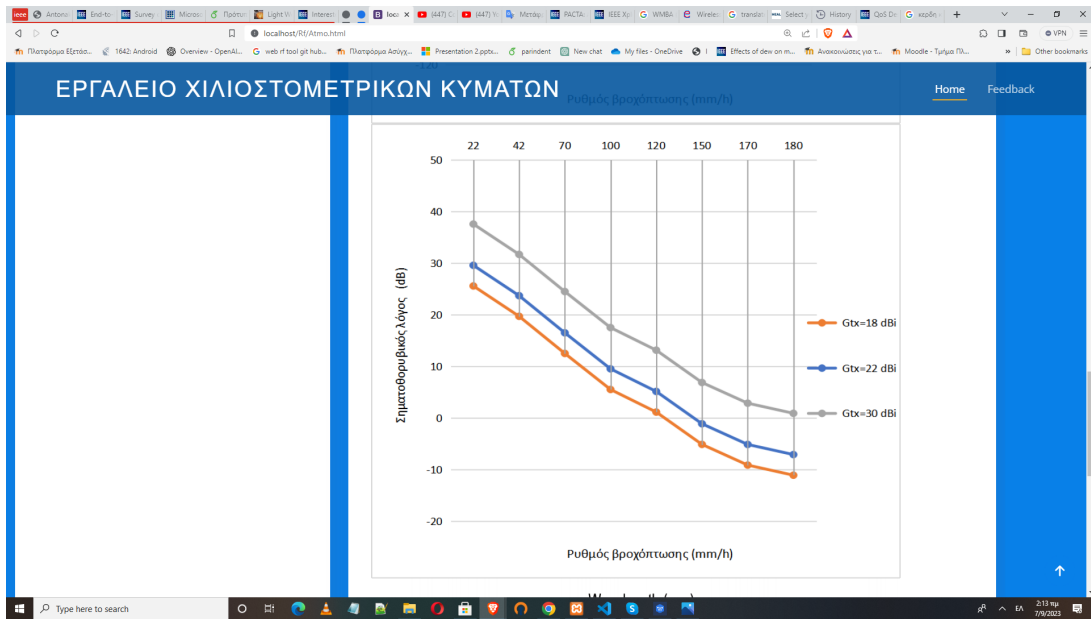
Σχήμα 3.9: Γραφική αναπαράσταση του σηματοθορυβικού λόγου του δέκτη ως προς το ρυθμό βροχόπτωσης για διαφορετικές τιμές συχνότητας (60, 70 και 80 GHz).



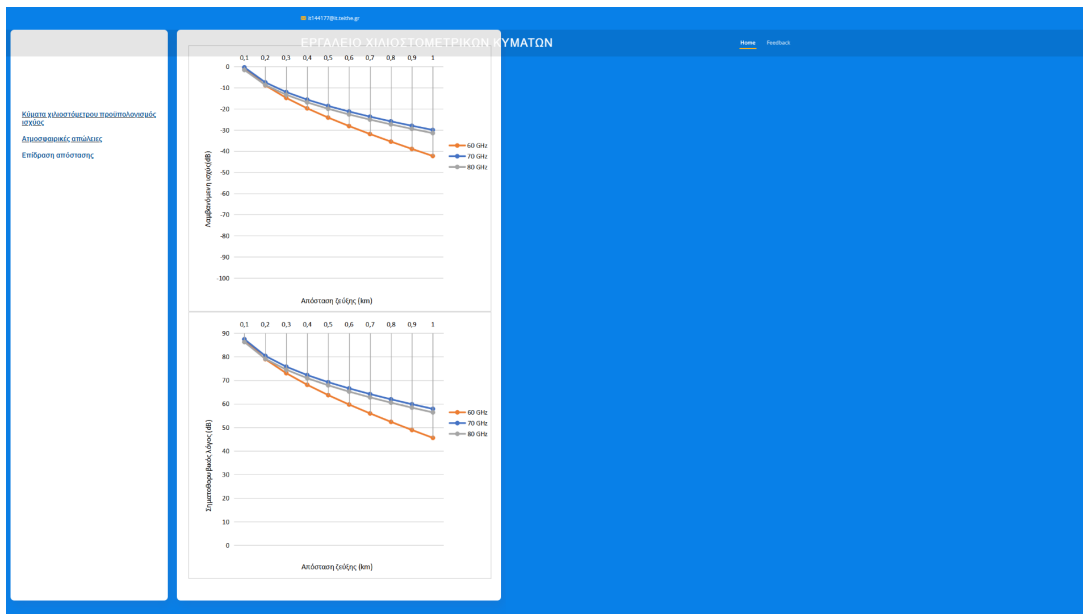
Σχήμα 3.10: Γραφική αναπαράσταση της επίδρασης της ατμόσφαιρας ως προς την συχνότητα και το μήκος κύματος.



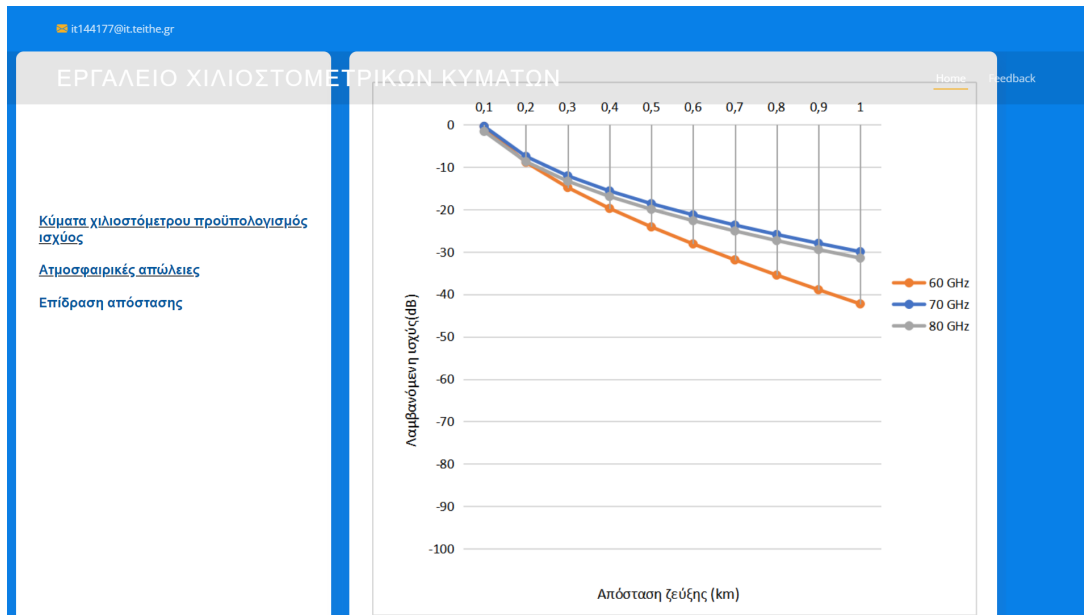
Σχήμα 3.11: Γραφική αναπαράσταση της λαμβανόμενης ισχύος του δέκτη ως προς το ρυθμό βροχόπτωσης για διαφορετικές τιμές κερδών της κεραίας πομπού (G_{tx} = 18, 22 και 30 dBi).



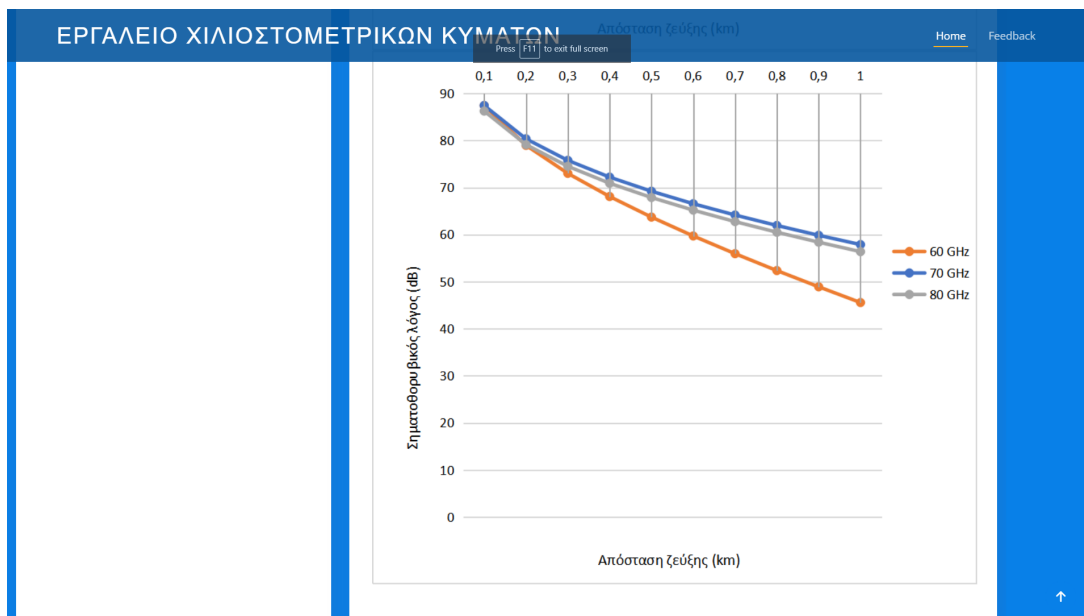
Σχήμα 3.12: Γραφική αναπαράσταση του σηματοθρομβικού λόγου του δέκτη ως προς το ρυθμό βροχόπτωσης για διαφορετικές τιμές κερδών της κεραίας πομπού ($G_{tx}= 18, 22$ και 30 dB).



Σχήμα 3.13: Μελέτη επίδρασης απόστασης σε μία mmWave ζεύξη για διαφορετικές συχνότητες (60, 70 και 80 GHz).



Σχήμα 3.14: Γραφική αναπαράσταση της λαμβανόμενης ισχύος του δέκτη ως προς την απόσταση για διαφορετικές τιμές συχνοτήτων (60, 70 και 80 GHz).



Σχήμα 3.15: Γραφική αναπαράσταση του σηματοθορυβικού λόγου του δέκτη ως προς την απόσταση για διαφορετικές τιμές συχνοτήτων (60, 70 και 80 GHz).

3.3 Επίλογος

Αβίαστα, λοιπόν, οδηγούμαστε στη διαπίστωση ότι η συμπίεση του λόγου και της πράξης μπορεί να βοηθήσει στην άμβλυνση της κατάστασης των προβλημάτων. Με το συνδυασμό κατάλληλων εργαλείων και τεχνολογιών μπορούμε να πετύχουμε ένα αποτέλεσμα που θα μας λύσει τα χέρια αφού μπορούμε να μελετήσουμε πώς επηρεάζονται σημαντικές παράμετροι μιας mmWave ζεύξης, εφαρμόζοντας διαφορετικούς συνδυασμούς τιμών. Είδαμε γραφήματα από διαφορετικά πειράματα για το πώς επηρεάζουν οι ατμοσφαιρικές απώλειες το σήμα και συγκεκριμένα πως επιδρά η ατμόσφαιρα στην λαμβανόμενη ισχύ, στην ενεργό ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύ (EIRP) και στο σηματοθορυβικό λόγο (SNR) για: i) διαφορετικές συχνότητες, ii) για διαφορετικό κέρδος κεραίας πομπού, και iii) για διαφορετικούς ρυθμούς βροχόπτωσης. Επιπρόσθετα, έγιναν πειράματα με διαφορετική απόσταση ζεύξης και εξηγήθηκαν κάποιες αξιοσημείωτες περιπτώσεις και συμπεριφορές, εξάγοντας παράλληλα χρήσιμα συμπεράσματα. Συνοψίζοντας, συμπεραίνουμε ότι ένα τέτοιο εργαλείο είναι απαραίτητο για την εκμάθηση και τον πειραματισμό για την λήψη βέλτιστων αποφάσεων σε μία mmWave ζεύξη.

Κεφάλαιο 4ο: Συμπεράσματα ή/και προτάσεις βελτίωσης

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτήν την ενότητα αναλύονται τα συμπεράσματα της πτυχιακής εργασίας και παρουσιάζονται προτάσεις βελτίωσης της.

4.2 Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, τα κύματα χιλιοστόμετρου έχουν να μας προσφέρουν πολλά και θα παίξουν καθοριστικό ρόλο στα δίκτυα επόμενης γενιάς 6G. Η επίδραση της ατμόσφαιρας είναι πολύ σοβαρός παράγοντας σε μια δορυφορική ζεύξη και χωρίζεται σε 3 είδη, τις απώλειες λόγω βροχής, τις απώλειες λόγω απορρόφησης των μορίων του οξυγόνου και τις απώλειες υδρατμών και άλλων αερίων. Οι απώλειες λόγω βροχής επηρεάζουν όλες τις συχνότητες και συγκεκριμένα όσο αυξάνεται ο ρυθμός βροχόπτωσης (R_e) τόσο το SNR μειώνεται, και αντίστοιχα μειώνεται και η λαμβανόμενη ισχύς. Αντίστοιχα, όσο περισσότερο αυξάνεται το μήκος βροχής τόσο μεγαλύτερες και οι απώλειες για όλες τις συχνότητες. Έπειτα όσο το κέρδος της κεραίας πομπού αυξάνεται, τόσο αυξάνεται και το SNR, επιτυγχάνοντας μία πιο ανθεκτική ζεύξη. Τέλος, είδαμε ότι το SNR μειώνεται με την αύξηση της απόστασης. Η μείωση αυτή είναι πιο αισθητή στις μεγαλύτερες συχνότητες λόγω των αρκετά υψηλότερων απωλειών ελευθέρου χώρου στις συχνότητες αυτές.

4.3 Προτάσεις βελτίωσης

Θα μπορούσε να βελτιωθεί ο τρόπος παρουσίασης των επιμέρους υπολογιστών με την χρήση AJAX και με την ύπαρξη μια βάσης δεδομένων για να μπορείς να κρατήσεις τα αποτελέσματα από κάποια πειράματα που επιλέγεις και να τα συγκρίνεις με άλλα πειράματα που έχουν γίνει στο παρελθόν ή που θα γίνουν στο μέλλον. Επίσης να μπορείς να επεμβαίνεις με κάποιους περιορισμούς στην καρτέλα "Κύματα χιλιοστόμετρου προϋπολογισμός ισχύος" στις παραμέτρους όπως "Ρυθμός απορρόφησης οξυγόνου (LA)", στο πεδίο "Επίπεδο θορύβου (Noise Floor)" και στο πεδίο "Απώλειες ελευθέρου χώρου". Επιπρόσθετα να μπορείς να αλλάζεις τις τιμές και να δημιουργούνται δυναμικά τα διαγράμματα. Τέλος θα μπορούσε να υπάρχει η δυνατότητα feedback από τους χρήστες προς του προγραμματιστές ώστε να βελτιώσουν κάποια χαρακτηριστικά που έχουν να κάνουν με ακριβώς αυτό που θέλουν να υπολογίσουν οι χρήστες.

4.4 Επίλογος

Σε αυτήν την πτυχιακή εργασία αναφερθήκαμε στα κύματα χιλιοστόμετρου και που ακριβώς εντάσσονται στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Επίσης, αναλύθηκαν οι παράγοντες που επηρεάζουν τα mmWaves, όπως οι απώλειες ελευθέρου χώρου και η ατμοσφαιρική εξασθένιση. Για τον προϋπολογισμό ισχύος μιας mmWave ζεύξης αναπτύχθηκε και παρουσιάστηκε ένα online εργαλείο εκμάθησης. Μέσω του εργαλείου αυτού, εξήχθησαν κάποια γραφήματα που μας βοήθησαν να καταλάβουμε πως φέρονται τα κύματα χιλιοστόμετρου σε μία πληθώρα διαφορετικών σεναρίων. Τέλος, εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα με απώτερο σκοπό την εξοικείωση του αναγνώστη αλλά και του μελλοντικού χρήστη του εργαλείου με τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν μια ζεύξη χιλιοστομετρικών κυμάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] A. Kumar, Y. Liu, J. Sengupta, *et al.*, “Evolution of mobile wireless communication networks 1g to 4g,” *International Journal of electronics & communication technology*, vol. 1, no. 1, pp. 68–72, 2010.
- [2] u. i. M. e. a. Mohammad Meraj *et al.*, “(ijcsit) international journal of computer science and information technologies,” *International Journal of electronics & communication technology*, vol. 6, no. 3, pp. 2545–2551, 2015.
- [3] A. R. Mishra, *Fundamentals of Network Planning and Optimisation 2G/3G/4G: Evolution to 5G*. John Wiley & Sons, 2018.
- [4] Y. Kim, B. J. Jeong, J. Chung, C.-S. Hwang, J. S. Ryu, K.-H. Kim, and Y. K. Kim, “Beyond 3g: vision, requirements, and enabling technologies,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 3, pp. 120–124, 2003.
- [5] N. Soni and T. Patel, “International journal of scientific and research publications,” *Quality Teaching & Higher Education System in India SSN*, pp. 2250–3153.
- [6] C. for Disease Control and Prevention, “CDC 24/7: Saving Lives, Protecting People.” <https://www.cdc.gov/>, 2023. [Online; accessed 19-April-2023].
- [7] <https://iguru.gr/is-5g-dangerous-for-human-health/>, “Πόσο επικίνδυνο είναι για την υγεία του ανθρώπου το 5g.”
- [8] I. ITU, “Attenuation by atmospheric gases,” *International Telecommunication Union-Recommendation*, pp. 676–10, 2013.
- [9] S. Rekha and S. Jino Ramson, “Parasitically isolated 4-element mimo antenna for 5g/wlan applications,” *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 47, no. 11, pp. 14711–14720, 2022.
- [10] J. Hao, J. Chen, and R. Wang, “Visible light positioning using a single led luminaire,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 11, no. 5, pp. 1–13, 2019.
- [11] C. Chen, W.-D. Zhong, and D. Wu, “Non-hermitian symmetry orthogonal frequency division multiplexing for multiple-input multiple-output visible light communications,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 9, no. 1, pp. 36–44, 2017.
- [12] S. M. Berman, D. S. Greenhouse, I. L. Bailey, R. D. Clear, and T. W. Raasch, “Human electroretinogram responses to video displays, fluorescent lighting, and other high frequency sources,” *Optometry and vision science*, vol. 68, no. 8, pp. 645–662, 1991.
- [13] P. Lin, X. Hu, Y. Ruan, H. Li, J. Fang, Y. Zhong, H. Zheng, J. Fang, Z. L. Jiang, and Z. Chen, “Real-time visible light positioning supporting fast moving speed,” *Optics Express*, vol. 28, no. 10, pp. 14503–14510, 2020.

- [14] X. Chi, Y. Jing, H. Sun, and B. Yu, "A random compensation scheme for 5g slicing under statistical delay-qos constraints," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 195197–195205, 2020.
- [15] J. Fang, Z. Yang, S. Long, Z. Wu, X. Zhao, F. Liang, Z. L. Jiang, and Z. Chen, "High-speed indoor navigation system based on visible light and mobile phone," *IEEE Photonics Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 1–11, 2017.
- [16] N. A. Jazea, H. Alyasiri, and A. H. Saloom, "Planning and optimization of 5g mobile network for al-najaf city (phase i)," in *2019 International Engineering Conference (IEC)*, pp. 45–49, IEEE, 2019.
- [17] A. Matencio-Escolar, Q. Wang, and J. M. A. Calero, "Slicenetworkswitch: Definition, design and implementation of 5g multi-tenant network slicing in software data paths," *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 17, no. 4, pp. 2212–2225, 2020.
- [18] M. J. G. A.S. SWAROOP and V. N. AHAMED, "Full duplex radio-wave transmission for 6g internet," *International Journal Of Recent Trends in Engineering Research*, vol. 1, no. 1, pp. 2455–1457, 2010.
- [19] V. D. A. T. Rukmani Khutey, Ghankuntla Rana and A. Dewamngan, "Future of wireless technology 6g 7g," *Future of Wireless Technology 6G 7G*, vol. 1, no. 1.
- [20] E. Damosso, L. Stola, and G. Brussaard, "Characterisation of the 50-70 ghz band for space communications," *ESA Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 25–43, 1983.
- [21] J. Dees, R. Wangler, and J. Wiltse, "System considerations for millimeter wave satellite communications," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, no. 6, pp. 195–213, 1966.
- [22] H. H. Meinel, "System design, applications and development trends in the millimeter-wave range," in *1988 18th European microwave conference*, pp. 1203–1217, IEEE, 1988.
- [23] W. O. Copeland, J. R. Ashwell, G. P. Kefalas, and J. C. Wiltse, "Millimeter-wave systems applications," in *1969 G-MTT International Microwave Symposium*, pp. 485–488, IEEE, 1969.
- [24] Y. Azar, G. N. Wong, K. Wang, R. Mayzus, J. K. Schulz, H. Zhao, F. Gutierrez, D. Hwang, and T. S. Rappaport, "28 ghz propagation measurements for outdoor cellular communications using steerable beam antennas in new york city," in *2013 IEEE international conference on communications (ICC)*, pp. 5143–5147, IEEE, 2013.
- [25] H. Zhao, R. Mayzus, S. Sun, M. Samimi, J. K. Schulz, Y. Azar, K. Wang, G. N. Wong, F. Gutierrez, and T. S. Rappaport, "28 ghz millimeter wave cellular communication measurements for reflection and penetration loss in and around buildings in new york city," in *2013 IEEE international conference on communications (ICC)*, pp. 5163–5167, IEEE, 2013.
- [26] K. J. Button, *Infrared and Millimeter Waves V4: Millimeter Systems*, vol. 4. Elsevier, 2014.
- [27] M. Samimi, K. Wang, Y. Azar, G. N. Wong, R. Mayzus, H. Zhao, J. K. Schulz, S. Sun, F. Gutierrez, and T. S. Rappaport, "28 ghz angle of arrival and angle of departure analysis for outdoor cellular

- communications using steerable beam antennas in new york city,” in *2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pp. 1–6, IEEE, 2013.
- [28] P. A. Tenerelli and C. W. Bostian, “Measurements of 28 ghz diffraction loss by building corners,” in *Ninth IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (Cat. No. 98TH8361)*, vol. 3, pp. 1166–1169, IEEE, 1998.
- [29] L. A. Hoffman, K. H. Hurlbut, D. E. Kind, and H. J. Wintroub, “A 94-ghz radar for space object identification,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 17, no. 12, pp. 1145–1149, 1969.
- [30] P. Soma, L. C. Ong, S. Sun, and M. Y. W. Chia, “Propagation measurements and modeling of lmds radio channel in singapore,” *IEEE transactions on vehicular technology*, vol. 52, no. 3, pp. 595–606, 2003.
- [31] M. Shafi, A. F. Molisch, P. J. Smith, T. Haustein, P. Zhu, P. De Silva, F. Tufvesson, A. Benjebbour, and G. Wunder, “5g: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice,” *IEEE journal on selected areas in communications*, vol. 35, no. 6, pp. 1201–1221, 2017.
- [32] T. S. Rappaport, F. Gutierrez, E. Ben-Dor, J. N. Murdock, Y. Qiao, and J. I. Tamir, “Broadband millimeter-wave propagation measurements and models using adaptive-beam antennas for outdoor urban cellular communications,” *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. 61, no. 4, pp. 1850–1859, 2012.
- [33] J. N. Murdock, E. Ben-Dor, Y. Qiao, J. I. Tamir, and T. S. Rappaport, “A 38 ghz cellular outage study for an urban outdoor campus environment,” in *2012 IEEE wireless communications and networking conference (WCNC)*, pp. 3085–3090, IEEE, 2012.
- [34] H. Xu, T. S. Rappaport, R. J. Boyle, and J. H. Schaffner, “Measurements and models for 38-ghz point-to-multipoint radiowave propagation,” *IEEE journal on selected areas in communications*, vol. 18, no. 3, pp. 310–321, 2000.
- [35] S. Nie, G. R. MacCartney, S. Sun, and T. S. Rappaport, “72 ghz millimeter wave indoor measurements for wireless and backhaul communications,” in *2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 2429–2433, IEEE, 2013.
- [36] A. Bleicher, “Telecom wireless news millimeter waves may be the future of 5g phones,” 2013.
- [37] M. K. Samimi and T. S. Rappaport, “Local multipath model parameters for generating 5g millimeter-wave 3gpp-like channel impulse response,” in *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1–5, IEEE, 2016.
- [38] mmMagic, “6-100 ghz channel modelling for 5g: Measurement and modelling plans in mmmagic,” *white paper*, 2016.
- [39] K. Safjan *et al.*, “Architectural aspects of mm-wave radio access integration with 5g ecosystem white paper w3. 1 version 1.0,” tech. rep., mmMAGIC, Tech. Rep. ICT-671650, Apr. 2016., 2016.

- [40] Z. Pi and F. Khan, "An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems," *IEEE communications magazine*, vol. 49, no. 6, pp. 101–107, 2011.
- [41] K. Haneda, J. Järveläinen, A. Karttunen, M. Kyrö, and J. Putkonen, "A statistical spatio-temporal radio channel model for large indoor environments at 60 and 70 ghz," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 6, pp. 2694–2704, 2015.
- [42] K. Farooq and P. Zhouyue, "mmwave mobile broadband (mmb): Unleashing the 3-300ghz spectrum," in *Sarnoff Symposium, 2011 34th IEEE*, pp. 1–6, 2011.
- [43] S. Hur, "Millimeter wave beamforming for wireless backhaul and access in small cell networks and practical approaches in software-defined radio," 2013.
- [44] M. R. Akdeniz, Y. Liu, M. K. Samimi, S. Sun, S. Rangan, T. S. Rappaport, and E. Erkip, "Millimeter wave channel modeling and cellular capacity evaluation," *IEEE journal on selected areas in communications*, vol. 32, no. 6, pp. 1164–1179, 2014.
- [45] F. Khan and Z. Pi, "mmwave mobile broadband (mmb): Unleashing the 3–300ghz spectrum," in *34th IEEE Sarnoff Symposium*, pp. 1–6, IEEE, 2011.
- [46] W. Alliance, "Wigig white paper: defining the future of multi-gigabit wireless communications. wireless gigabit alliance, beaverton," tech. rep., Ore, Tech. Rep, 2009.
- [47] W. S. Version, "Wirelesshd specification version 1.1 overview," *WirelessHD-Specification-Overview-v1. 1May2010. pdf*, 2010.
- [48] E. International, "Standard ecma-387: High rate 60 ghz phy, mac and hdmi pals," 2010.
- [49] O. El Ayach, S. Rajagopal, S. Abu-Surra, Z. Pi, and R. W. Heath, "Spatially sparse precoding in millimeter wave mimo systems," *IEEE transactions on wireless communications*, vol. 13, no. 3, pp. 1499–1513, 2014.
- [50] A. Natarajan, A. Komijani, X. Guan, A. Babakhani, and A. Hajimiri, "A 77-ghz phased-array transceiver with on-chip antennas in silicon: Transmitter and local lo-path phase shifting," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 41, no. 12, pp. 2807–2819, 2006.
- [51] A. Maltsev, V. Erceg, E. Perahia, C. Hansen, R. Maslennikov, A. Lomayev, A. Sevastyanov, A. Khoryaev, G. Morozov, M. Jacob, *et al.*, "Channel models for 60 ghz wlan systems, doc.: Ieee 802.11-09/0334r8," *IEEE 802.11 document 09/0334r8*, 2010.
- [52] R. W. Heath, N. Gonzalez-Prelcic, S. Rangan, W. Roh, and A. M. Sayeed, "An overview of signal processing techniques for millimeter wave mimo systems," *IEEE journal of selected topics in signal processing*, vol. 10, no. 3, pp. 436–453, 2016.
- [53] F. Giannetti, M. Luise, and R. Reggiannini, "Mobile and personal communications in the 60 ghz band: A survey," *Wireless Personal Communications*, vol. 10, pp. 207–243, 1999.
- [54] P. Pietraski, D. Britz, A. Roy, R. Pragada, and G. Charlton, "Millimeter wave and terahertz communications: Feasibility and challenges," *ZTE communications*, vol. 10, no. 4, pp. 3–12, 2012.

- [55] H. Zhang, S. Venkateswaran, and U. Madhow, "Channel modeling and mimo capacity for outdoor millimeter wave links," in *2010 IEEE wireless communication and networking conference*, pp. 1–6, IEEE, 2010.
- [56] S. Geng, J. Kivinen, and P. Vainikainen, "Propagation characterization of wideband indoor radio channels at 60 ghz," in *2005 IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, vol. 1, pp. 314–317, IEEE, 2005.
- [57] O. Andrisano, V. Tralli, and R. Verdone, "Millimeter waves for short-range multimedia communication systems," *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, no. 7, pp. 1383–1401, 1998.
- [58] Y. S. Khiong, "An overview of multigigabit wireless through millimeter wave technology: Potentials and technical challenges," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2007, p. 10, 2007.
- [59] Z. Pi and F. Khan, "A millimeter-wave massive mimo system for next generation mobile broadband," in *2012 Conference Record of the Forty Sixth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR)*, pp. 693–698, IEEE, 2012.
- [60] W. Alliance, "Wigig white paper: Defining the future of multi-gigabit wireless communications," 2010.
- [61] E. Ben-Dor, T. S. Rappaport, Y. Qiao, and S. J. Lauffenburger, "Millimeter-wave 60 ghz outdoor and vehicle aoa propagation measurements using a broadband channel sounder," in *2011 IEEE Global Telecommunications Conference-GLOBECOM 2011*, pp. 1–6, IEEE, 2011.
- [62] Z. Pi and F. Khan, "System design and network architecture for a millimeter-wave mobile broadband (mmb) system," in *34th IEEE Sarnoff Symposium*, pp. 1–6, IEEE, 2011.
- [63] M. Kim, S.-E. Hong, Y. Kim, and J. Kim, "Analysis of resource assignment for directional multihop communications in mm-wave wpans," *ETRI Journal*, vol. 35, no. 1, pp. 120–130, 2013.
- [64] J. F. Buckwalter, S. Daneshgar, J. Jayamon, and P. Asbeck, "Series power combining: Enabling techniques for si/sige millimeter-wave power amplifiers," in *2016 IEEE 16th Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems (SiRF)*, pp. 116–119, IEEE, 2016.
- [65] P. Russer, "Si and sige millimeter-wave integrated circuits," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 46, no. 5, pp. 590–603, 1998.
- [66] R. H. Walden, "Analog-to-digital converter survey and analysis," *IEEE Journal on selected areas in communications*, vol. 17, no. 4, pp. 539–550, 1999.
- [67] J. N. Murdock and T. S. Rappaport, "Consumption factor: A figure of merit for power consumption and energy efficiency in broadband wireless communications," in *2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)*, pp. 1393–1398, IEEE, 2011.
- [68] T. S. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, K. Wang, G. N. Wong, J. K. Schulz, M. Samimi, and F. Gutierrez, "Millimeter wave mobile communications for 5g cellular: It will work!," *IEEE access*, vol. 1, pp. 335–349, 2013.

- [69] K.-C. Huang and Z. Wang, *Millimeter wave communication systems*. John Wiley & Sons, 2011.
- [70] W. Oibile, "Ericsson mobility report," *Nov*, 2016.
- [71] C. V. N. Index, "Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2015–2020," *San Jose, CA, USA*, pp. 1–42, 2016.
- [72] B. Mondal, T. A. Thomas, E. Visotsky, F. W. Vook, A. Ghosh, Y.-H. Nam, Y. Li, J. Zhang, M. Zhang, Q. Luo, *et al.*, "3d channel model in 3gpp," *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 3, pp. 16–23, 2015.
- [73] L. Hanzo, H. Haas, S. Imre, D. O'Brien, M. Rupp, and L. Gyongyosi, "Wireless myths, realities, and futures: from 3g/4g to optical and quantum wireless," *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. Special Centennial Issue, pp. 1853–1888, 2012.
- [74] S. Painuly, S. Sharma, and P. Matta, "Future trends and challenges in next generation smart application of 5g-iot," in *2021 5th international conference on computing methodologies and communication (ICCMC)*, pp. 354–357, IEEE, 2021.
- [75] N. Kishore and A. Senapati, "5g smart antenna for iot application: A review," *International Journal of Communication Systems*, vol. 35, no. 13, p. e5241, 2022.
- [76] S. Li, L. Da Xu, and S. Zhao, "5g internet of things: A survey," *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 10, pp. 1–9, 2018.
- [77] K. Rao, M. Sankaradas, V. Aswal, and S. Chakradhar, "Smartslice: Dynamic, self-optimization of application's qos requests to 5g networks," in *2021 Eighth International Conference on Software Defined Systems (SDS)*, pp. 1–7, IEEE, 2021.
- [78] Y. Wang, X. Dai, J. M. Wang, and B. Bensaou, "A reinforcement learning approach to energy efficiency and qos in 5g wireless networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 37, no. 6, pp. 1413–1423, 2019.
- [79] J. Gao, K. Li, and H. Harada, "60 ghz wideband antenna with air filled stacked patch structure," in *2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, pp. 634–637, IEEE, 2011.
- [80] M. Polese, M. Mezzavilla, and M. Zorzi, "Performance comparison of dual connectivity and hard handover for lte-5g tight integration," *arXiv preprint arXiv:1607.05425*, 2016.
- [81] J. Garrity, "Icts, income inequality, and ensuring inclusive growth," *Available at SSRN 2588115*, 2015.
- [82] D. M. Pozar, *Microwave engineering*. John wiley & sons, 2011.
- [83] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons, 2016.
- [84] M. Alsenwi, N. H. Tran, M. Bennis, A. K. Bairagi, and C. S. Hong, "embb-urllc resource slicing: A risk-sensitive approach," *IEEE Communications Letters*, vol. 23, no. 4, pp. 740–743, 2019.

- [85] M. Zhang, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, “ns-3 implementation of the 3gpp mimo channel model for frequency spectrum above 6 ghz,” in *Proceedings of the 2017 Workshop on ns-3*, pp. 71–78, 2017.
- [86] C. d. T. de Catalunya, “The lena ns-3 lte module documentation.”
- [87] A. Sabbah, A. Jarwan, O. Issa, and M. Ibnkahla, “Enabling lte emulation by integrating core emulator and lte-epc network (lena) simulator,” in *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 1–6, IEEE, 2017.
- [88] N. Baldo, M. Miozzo, M. Requena-Esteso, and J. Nin-Guerrero, “An open source product-oriented lte network simulator based on ns-3,” in *Proceedings of the 14th ACM international conference on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, pp. 293–298, 2011.
- [89] I. Jamil, S. Sindian, A. Khalil, M. Crussière, and J.-F. Hélar, “A new distributed decision making scheme for the ieee 802.15. 3 parent/child model,” in *2013 Third International Conference on Communications and Information Technology (ICCIT)*, pp. 256–261, IEEE, 2013.
- [90] A. Bhattacharjee, R. Bhattacharjee, and S. K. Bose, “A dynamic approach for channel time allocation in ieee 802.15. 3 based parent-child piconet model,” in *TENCON 2017-2017 IEEE Region 10 Conference*, pp. 851–856, IEEE, 2017.
- [91] S. Sindian, A. E. Samhat, A. Khalil, M. Crussière, and J.-F. Hélar, “Dynamic superframe size-based admission control in parent/child hr wpans,” in *2013 Third International Conference on Communications and Information Technology (ICCIT)*, pp. 314–319, IEEE, 2013.
- [92] R. Kulke, C. Günner, S. Holzwarth, J. Kassner, A. Lauer, M. Rittweger, P. Uhlig, and P. Weigand, “24 ghz radar sensor integrates patch antenna and frontend module in single multilayer ltcc substrate,” in *Proc. Eur. Microelectronics and Packaging Conf*, pp. 239–242, 2005.
- [93] C.-Y. Ho, M.-F. Jhong, P.-C. Pan, C.-Y. Huang, C.-C. Wang, and C.-Y. Ting, “Integrated antenna-in-package on low-cost organic substrate for millimeter-wave wireless communication applications,” in *2017 IEEE 67th electronic components and technology conference (ECTC)*, pp. 242–247, IEEE, 2017.
- [94] O. Kramer, T. Djerafi, and K. Wu, “Very small footprint 60 ghz stacked yagi antenna array,” *IEEE Transactions on antennas and propagation*, vol. 59, no. 9, pp. 3204–3210, 2011.
- [95] J. Hasch, E. Topak, R. Schnabel, T. Zwick, R. Weigel, and C. Waldschmidt, “Millimeter-wave technology for automotive radar sensors in the 77 ghz frequency band,” *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, vol. 60, no. 3, pp. 845–860, 2012.
- [96] A. Fischer, Z. Tong, A. Hamidipour, L. Maurer, and A. Stelzer, “77-ghz multi-channel radar transceiver with antenna in package,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 3, pp. 1386–1394, 2013.
- [97] E. Baccarelli, M. Scarpiniti, and A. Momenzadeh, “Fog-supported delay-constrained energy-saving live migration of vms over multipath tcp/ip 5g connections,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 42327–42354, 2018.

- [98] E. Datsika, E. Kartsakli, J. S. Vardakas, A. Antonopoulos, G. Kalfas, P. Maniotis, C. Vagionas, N. Pleros, and C. Verikoukis, “Qos-aware resource management for converged fiber wireless 5g fronthaul networks,” in *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1–5, IEEE, 2018.
- [99] H. L. Guo and Y. Liu, “A virtual network embedding framework based on equivalent bandwidth in fiber-wireless enhanced 5g networks,” *2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, vol. 6, no. 3, pp. 1–4, 2020.
- [100] “5mart: A 5g smart scheduling framework for optimizing qos through reinforcement learning, author= Mohammad Meraj, ud in Mir et a and others, journal=IEEE Transactions on Network and Service Management, volume= 17, number=2, pages=1110-1124, year=2020,”
- [101] P. A. M. Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics*. International series of monographs on physics, Clarendon Press, 1981.
- [102] A. Mesodiakaki, F. Adelantado, A. Antonopoulos, E. Kartsakli, L. Alonso, and C. Verikoukis, “Energy impact of outdoor small cell backhaul in green heterogeneous networks,” in *2014 IEEE 19th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, pp. 11–15, 2014.
- [103] A. A. Huurdeman, *The worldwide history of telecommunications*. John Wiley & Sons, 2003.
- [104] M. Goossens, F. Mittelbach, and A. Samarin, *The L^AT_EX Companion*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1993.
- [105] D. Knuth, “Knuth: Computers and typesetting.”
- [106] D. E. Knuth, *Fundamental Algorithms*. Addison-Wesley, 1973.
- [107] D. E. Knuth, *The Art of Computer Programming*. Four volumes, Addison-Wesley, 1968. Seven volumes planned.
- [108] G. D. Greenwade, “The Comprehensive Tex Archive Network (CTAN),” *TUGBoat*, vol. 14, no. 3, pp. 342–351, 1993.
- [109] J. L. Spudich and B. H. Satir, *Sensory Receptors and Signal Transduction*. New York: Wiley-Liss, 2001.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΤΙΤΛΟΣ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ