



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**  
**ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΝΕΑΣ ΓΕΝΙΑΣ ΚΑΙ**  
**ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία**

**Τίτλος εργασίας:**

**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ ΣΕ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ  
TERAHERTZ**

**Συγγραφέας: ΓΑΝΙΔΗ ΜΑΡΙΝΑ-ΣΤΑΥΡΟΥΛΑ**

**ΑΜ: mngd21004**

**Επιβλέπων: ΜΥΡΙΔΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**

**Αθήνα, Σεπτέμβριος 2023**



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA**

**SCHOOL OF ENGINEERING**

**DEPARTMENT OF INFORMATION AND COMPUTER ENGINEERING**

**NEXT GENERATION COMMUNICATION NETWORKS**

**AND DISTRIBUTED APPLICATION ENVIRONMENTS (MSc/MBA)**

**Diploma Thesis**

**Title:**

**WIRELESS CHANNEL MODELING AT TERAHERTZ FREQUENCIES**

**Author: GANIDI MARINA-STAVROULA**

**Registration Number: mngd21004**

**Supervisor: MIRIDAKIS NIKOLAOS**

**Athens, September 2023**



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**  
**ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΝΕΑΣ ΓΕΝΙΑΣ ΚΑΙ**  
**ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**Τίτλος εργασίας: Μοντελοποίηση Ασύρματου Καναλιού σε Συχνότητες  
Terahertz**

**Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή**

Η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

<b>Α/α</b>	<b>ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ</b>	<b>ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ</b>	<b>ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ</b>
1	ΜΥΡΙΔΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ	ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)	
2	ΜΠΟΓΡΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ	ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	
3	ΚΑΡΚΑΖΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ	ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Γανίδα Μαρίνα-Σταυρούλα του Κωνσταντίνου, με αριθμό μητρώου mngd21004, φοιτήτρια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Δίκτυα Επικοινωνιών Νέας Γενιάς και Κατανεμημένα Περιβάλλοντα Εφαρμογών», του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Υπολογιστών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα



**\* Ονοματεπώνυμο /Ιδιότητα**

**Ψηφιακή Υπογραφή Επιβλέποντα**  
(Υπογραφή)



## Περιεχόμενα

Περίληψη .....	10
Abstract .....	10
Κεφάλαιο 1ο : Από το 1G έως και το 5G.....	11
1.1 Εισαγωγή.....	11
1.2 Ιστορική Ανασκόπηση.....	12
Κεφάλαιο 2ο: 5G ή 6G : Ποια είναι η τάση; .....	20
Κεφάλαιο 3ο : Terahertz .....	24
3.1 Η τεχνολογία .....	24
3.2 Χρήσεις .....	25
3.3 Ιδιότητες.....	29
3.4 Παραγωγή κι ανίχνευση.....	31
Κεφάλαιο 4ο: Μοντελοποίηση διάδοσης.....	33
4.1 Παράμετροι μοντέλου διάδοσης .....	33
4.1.1 Διάδοση σε ορίζοντα ορατότητας .....	34
4.1.1.1 Απευθείας διάδοση.....	36
4.1.1.2 Διάδοση από ανάκλαση.....	37
4.1.1.3 Διάδοση από σκέδαση.....	40
4.1.1.4 Διάδοση από περίθλαση.....	42
4.2 Ατμοσφαιρική απορρόφηση.....	44
4.2.1 Βάση δεδομένων HITRAN .....	47
Κεφάλαιο 5ο: Προσομοίωση .....	49
5.1 Προσομοιωτής teraMIMO .....	49
5.1.1 Είδος καναλιού (CHANNEL MODEL).....	49
5.1.2 Παράμετροι εκπομπής (TRANSMISSION PARAMETERS) .....	49
5.1.3 Μοριακή απορρόφηση (MOLECULAR ABSORPTION) .....	51
5.1.4 Διάταξη στο χώρο πομπού-δέκτη (GEOMETRY) .....	52
5.1.5 Υποφορείς (SUBARRAYS).....	52
5.1.6 Παράμετροι πολλαπλών διαδρομών (MULTIPATH PARAMETERS).....	53
5.1.7 Εξειδικευμένη υλοποίηση διάδοσης (THz SPECIFIC REALIZATION PROPAGATION MODEL).....	54
5.1.8 Διαχωρισμός ακτινών (BEAM SPLIT).....	54
5.1.9 Αστοχία ευθυγράμμισης (MISALIGNMENT).....	55
5.1.10 Κέρδος κεραίας (ANTENNA GAIN) .....	55
5.2 Προσομοίωση.....	56

5.2.1 Προσομοίωση για $R = 0,5 \text{ Km}$ .....	59
5.2.2 Προσομοίωση για $R = 0,8 \text{ Km}$ .....	61
5.2.3 Προσομοίωση για $R = 1 \text{ Km}$ .....	63
5.2.4 Προσομοίωση για $R = 3 \text{ Km}$ .....	65
5.2.5 Προσομοίωση για $R = 5 \text{ Km}$ .....	68
Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα .....	69
6.1 Θεωρητική σύνοψη .....	69
6.2 Συμπεράσματα προσομοιώσεων .....	70
Βιβλιογραφία .....	74

## Πίνακας Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1. Τυπική ατμοσφαιρική σύσταση σε εξωτερικό χώρο.....	46
Διάγραμμα 2. Τυπική ατμοσφαιρική σύσταση σε εσωτερικό χώρο .....	46
Διάγραμμα 3. Συχνότητας - Κέρδους Διαδρομής για $R=0,5$ km .....	59
Διάγραμμα 4. Φάσης – Συχνότητας για $R=0,5$ km.....	59
Διάγραμμα 5. Ισχύς – Υστέρησης για $R=0,5$ km .....	60
Διάγραμμα 6. Πλάτους παλμού – Υστέρησης για $R=0,5$ km.....	60
Διάγραμμα 7. Συχνότητας - Κέρδους Διαδρομής για $R=0,8$ km .....	60
Διάγραμμα 8. Φάσης – Συχνότητας για $R=0,8$ km.....	61
Διάγραμμα 9. Ισχύς – Υστέρησης για $R=0,8$ km .....	62
Διάγραμμα 10. Πλάτους παλμού – Υστέρησης για $R=0,8$ km.....	63
Διάγραμμα 11. Συχνότητας - Κέρδους Διαδρομής για $R=1$ km .....	63
Διάγραμμα 12. Φάσης – Συχνότητας για $R=1$ km.....	64
Διάγραμμα 13. Ισχύς – Υστέρησης για $R=1$ km .....	64
Διάγραμμα 14. Πλάτους παλμού – Υστέρησης για $R=1$ km.....	65
Διάγραμμα 15. Συχνότητας - Κέρδους Διαδρομής για $R=3$ km .....	66
Διάγραμμα 16. Φάσης – Συχνότητας για $R=3$ km.....	66
Διάγραμμα 17. Ισχύς – Υστέρησης για $R=3$ km .....	67
Διάγραμμα 18. Πλάτους παλμού – Υστέρησης για $R=3$ km.....	67
Διάγραμμα 19. Συχνότητας - Κέρδους Διαδρομής για $R=5$ km .....	68
Διάγραμμα 20. Φάσης – Συχνότητας για $R=5$ km.....	68
Διάγραμμα 21. Ισχύς – Υστέρησης για $R=5$ km .....	69
Διάγραμμα 22. Πλάτους παλμού – Υστέρησης για $R=5$ km.....	69
Διάγραμμα 23. Απώλειες συναρτήσεως της απόστασης πομπού - δέκτη.....	71
Διάγραμμα 24. Υστέρηση συναρτήσεως της απόστασης πομπού-δέκτη .....	72
Διάγραμμα 25. Πλάτος παλμού συναρτήσεως απόστασης πομπού - δέκτη .....	73

## Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1. Αναπαράσταση ανακλώμενης και απευθείας ακτίνας που καταφτάνει στο δέκτη .....	37
Εικόνα 2. Παράδειγμα ανάκλασης (αριστερά) και σκέδασης ακτίνας (δεξιά).....	40
Εικόνα 3. Ακτίνες που καταφτάνουν στο δέκτη λόγω φαινομένου περίθλασης .....	43
Εικόνα 4. Επιφάνεια εργασία προσομοιωτή teraMIMO.....	49
Εικόνα 5. Απεικόνιση της συσχέτισης τοπικού – ολικού συστήματος συντεταγμένων .....	51
Εικόνα 6. Διάκενο μεταξύ δύο υποφορέων (διακεκομμένη γραμμή) .....	52
Εικόνα 7. Σφαιρικό κυματικό μέτωπο (αριστερά) – Επίπεδο κυματικό μέτωπο (δεξιά) .....	54
Εικόνα 8. Αναπαράσταση διαχωρισμού ακτινών (Beam Split) .....	54
Εικόνα 9. Αναπαράσταση αστοχίας ευθυγράμμισης σήματος σε διαφορετικά μήκη .....	55



Εικόνα 10. Απεικόνιση μιας ισοτροπικής κεραίας και μιας κεραίας με μεγάλο κέρδος .....	55
--	----

### **Κατάλογος Πινάκων**

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά 1G, 2G, 3G.....	16
Πίνακας 2. Σύγκριση 5G-6G. ....	22
Πίνακας 3. Απώλειες συναρτήσει της απόστασης πομπού - δέκτη .....	71
Πίνακας 4. Υστέρηση συναρτήσει της απόστασης πομπού - δέκτη .....	72
Πίνακας 5. Πλάτος παλμού συναρτήσει απόστασης πομπού - δέκτη .....	73

## Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί μεγάλο ενδιαφέρον για την έρευνα σχετικά με το δίκτυο πέμπτης γενιάς (5G). Τα βασικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας 5G περιλαμβάνουν υψηλές ταχύτητες μετάδοσης, αξιοπιστία, ενεργειακή απόδοση και την ικανότητα σύνδεσης πολλών ετερογενών συσκευών σε ένα ενιαίο δίκτυο. Για την επίτευξη αυτών των στόχων απαιτείται η ανάπτυξη προσαρμόσιμων δικτύων που μπορούν να ικανοποιήσουν τις ανάγκες του μελλοντικού τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Για να γίνει το 5G πραγματικότητα, όλοι οι ενδιαφερόμενοι φορείς - συμπεριλαμβανομένων των ρυθμιστικών οργανισμών, των φορέων τυποποίησης, των βιομηχανικών φόρουμ, των φορέων κινητής τηλεφωνίας και των εταιρειών πώλησης εξοπλισμού- πρέπει να συνεργαστούν. Η διαδικασία τυποποίησης ολοκληρώθηκε το 2020, οπότε και έχει ξεκινήσει η εμπορευματοποίηση. Με την έλευση των τηλεπικοινωνιών πέμπτης γενιάς, ολόκληροι κάθετοι τομείς, συμπεριλαμβανομένων εκείνων της αυτοκινητοβιομηχανίας, της ενέργειας, της γεωργίας, της διαχείρισης πόλεων, της υγειονομικής περίθαλψης και της μεταποίησης, θα υποστούν θεμελιώδεις ανατροπές, ανοίγοντας νέες προοπτικές για υπηρεσίες και εφαρμογές.

## Abstract

Recent years have seen a lot of interest in research related to the fifth generation network (5G). The essential characteristics of 5G technology include high transmission speeds, dependability, energy efficiency, and the capacity to connect several heterogeneous devices in a single network. The development of adaptable networks that can satisfy the needs of the future telecommunications system is required to accomplish these objectives. To make 5G a reality, all stakeholders—including regulatory organizations, standardization bodies, industry fora, mobile carriers, and equipment sales firms—must collaborate. The standardization process is finished in 2020, at which point commercialization started. With the advent of fifth generation telecoms, entire vertical sectors including those in the automobile, energy, agriculture, city management, healthcare, and manufacturing will undergo fundamental upheaval, opening up new vistas for services and applications.

## Κεφάλαιο 1ο : Από το 1G έως και το 5G

### 1.1 Εισαγωγή

Οι διάφορες απαιτήσεις απόδοσης, αξιοπιστίας και καθυστέρησης του συνεχώς μεταβαλλόμενου οικοσυστήματος εφαρμογών που πρέπει να υποστηρίζονται από τα σύγχρονα κυψελοειδή δίκτυα αποτέλεσαν την κινητήρια δύναμη πίσω από την τυποποίηση της νέας ραδιοεπικοινωνίας 5G. Αυτές οι εφαρμογές 5G χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: τεράστια επικοινωνία τύπου μηχανής, εξαιρετικά αξιόπιστη επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης και ενισχυμένη κινητή ευρυζωνικότητα. Δεδομένου ότι ήταν προφανές από την αρχή ότι μπορεί να μην υπάρχει μια ενιαία λύση για όλες τις εφαρμογές, οι πρόσφατες γενιές κυψελοειδών συστημάτων διερεύνησαν τη χρήση τεχνικών δικτύωσης και επικοινωνιών αιχμής. Αυτές οι τεχνικές περιλαμβάνουν την πύκνωση του δικτύου μέσω της χρήσης μικρών κυβελών, τον καλύτερο προγραμματισμό και τα συστήματα πολλαπλών κεραιών για βελτιωμένη φασματική απόδοση, για να αναφέρουμε μερικές από αυτές. Το γεγονός ότι το παραδοσιακό φάσμα κάτω των 6 GHz δεν θα είναι αρκετό για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις των μελλοντικών εφαρμογών είναι ίσως αυτό που διαφοροποιεί το 5G από άλλες γενιές κυψελοειδών συστημάτων. Φυσικά, το φάσμα των χιλιοστομετρικών κυμάτων προέκυψε ως βιώσιμη λύση. Λόγω της προόδου στην τεχνολογία των συσκευών και των κεραιών, οι ζώνες αυτές -που προηγουμένως θεωρούνταν ακατάλληλες για κινητές λειτουργίες λόγω των δυσμενών χαρακτηριστικών διάδοσής τους- μπορούν πλέον να χρησιμοποιηθούν για ποικίλες εμπορικές ασύρματες εφαρμογές (Tripathi S, 2021).

Ως αποτέλεσμα, η εμπορική επικοινωνία mmWave κατέστη δυνατή με τις προδιαγραφές 5G. Τώρα που μπορούμε να δούμε στο μέλλον, είναι σαφές ότι σταδιακά κινούμαστε προς εφαρμογές που θα επιβάλλουν ακόμη αυστηρότερους περιορισμούς στις απαιτήσεις ρυθμού μετάδοσης, αξιοπιστίας και καθυστέρησης, όπως η εικονική και επαυξημένη πραγματικότητα, οι τηλεδιασκέψεις με βίντεο υπερ-HD, τα τρισδιάστατα παιχνίδια και η χρήση της ασύρματης τεχνολογίας για διεπαφές εγκεφάλου-μηχανής. Είναι επίσης ρεαλιστικό να προβλεφθεί ότι οι επικοινωνίες σε νανοκλίμακα θα γίνουν σύντομα πραγματικότητα, δεδομένης της ανάπτυξης των τεχνικών κατασκευής συσκευών. Φαινόταν λογικό ότι, δεδομένης της πρόσφατης επιτυχίας των επικοινωνιών mmWave, οι επιστήμονες θα έστρεφαν την προσοχή τους σε άλλες, λιγότερο εξερευνημένες ζώνες ραδιοσυχνοτήτων, ιδίως στη ζώνη terahertz, η οποία βρίσκεται πάνω από τη ζώνη mmWave. Υπάρχουν πολυάριθμες εφαρμογές που μπορούν να αξιοποιήσουν το τεράστιο εύρος ζώνης των κυμάτων THz. Μπορούμε να αξιοποιήσουμε το πλήρες δυναμικό πολλών νέων εφαρμογών με αυτό, εκτός από τις διαθέσιμες σήμερα ζώνες κάτω των 6 GHz και mmWave. Επιπλέον, λόγω του μικρού μήκους κύματός τους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επικοινωνία σε μικρο- και νανοκλίμακες.

Οι ζώνες THz χρησιμοποιούνταν προηγουμένως μόνο για απεικόνιση και ανίχνευση λόγω της έλλειψης πρακτικού και αποτελεσματικού εξοπλισμού που θα μπορούσε να λειτουργήσει σε αυτές τις συχνότητες. Παρόλα αυτά, η επικοινωνία THz

αναμένεται να διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο στις επόμενες γενιές προτύπων επικοινωνίας, ως αποτέλεσμα των πρόσφατων εξελίξεων στις συσκευές THz.

Ο κύριος στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι να παρέχει στους αναγνώστες αρκετές βασικές πληροφορίες σχετικά με τις ζώνες mmWave και THz, ώστε να κατανοήσουν γιατί η χρήση αυτών των ζωνών για εμπορικές επικοινωνίες είναι απαραίτητη στο σημερινό ασύρματο περιβάλλον και γιατί ορισμένοι παράγοντες σχεδιασμού είναι σημαντικοί για τα συστήματα επικοινωνιών που χρησιμοποιούν αυτές τις ζώνες. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μεθοδική αντιμετώπιση του θέματος, ξεκινώντας με μια ενδελεχή μελέτη των ιδιοτήτων διάδοσης σε αυτές τις συχνότητες, η οποία λογικά οδηγεί στην εξέταση μοντέλων καναλιών που αποτυπώνουν αυτά τα χαρακτηριστικά.

## 1.2 Ιστορική Ανασκόπηση

Τα πρώτα δίκτυα κινητών τηλεπικοινωνιών αναπτύχθηκαν και τέθηκαν σε χρήση στις ΗΠΑ, την Ιαπωνία και την Ευρώπη στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και στις αρχές της δεκαετίας του 1980, αντίστοιχα. Υπήρχαν αυτά τα λεγόμενα δίκτυα πρώτης γενιάς ή αναλογικά δίκτυα, τα οποία μετέδιδαν μόνο φωνή. Παρόλο που είχαν περιορισμένες δυνατότητες, η εφεύρεσή τους θεωρήθηκε ως σημαντική τεχνολογική πρόοδος εκείνη την εποχή. Το πρώτο σύστημα κινητών τηλεπικοινωνιών, το οποίο ονομάστηκε Advanced Mobile Phone Service (AMPS), εμφανίστηκε για πρώτη φορά το 1978 σε μερικές πολιτείες των ΗΠΑ, προτού γίνει παγκόσμιο το 1983. Η ιδέα των κινητών τηλεπικοινωνιών επεκτάθηκε αργότερα και στις άλλες ηπείρους (Agrawal J, 2015).

Συνολικά, τα συστήματα που εμφανίστηκαν στις εκτός Ευρώπης περιοχές, ήταν τα εξής:

- Το Advanced Mobile Phone Service (AMPS), το 1983 στις Η.Π.Α,
- Το US Digital Cellular (USDC) Standard IS-54, το 1991 στις Η.Π.Α,
- Το 1979, το πρώτο σύστημα της Nippon Telephone and Telegraph (NTT) Company, στην Ιαπωνία.

Στην Ευρώπη έκαναν την εμφάνιση τους δύο συστήματα κινητών τηλεπικοινωνιών τα οποία ήταν:

- Το Nordic Mobile Telephony (NMT) και
- Το European Total Access Communication System (Agrawal et al., 2015).

Η κυψελοειδής δομή των δικτύων είναι ένα από τα διακριτικά χαρακτηριστικά τους. Δεδομένου ότι τα συστήματα αυτά είναι χτισμένα σε κυψέλες, το σχήμα των οποίων συμβολίζει κατά κάποιο τρόπο το γεωγραφικό πλαίσιο στο οποίο μπορούν να παρέχονται οι κινητοί χρήστες, είναι γνωστά ως "κυψελοειδή" συστήματα. Μέσα σε

κάθε κυψέλη υπάρχει ένας σταθμός βάσης που διαχειρίζεται την υλοποίηση και τη δρομολόγηση των κλήσεων. Η γεωγραφική τοπολογία της περιοχής που εξυπηρετεί το σύστημα καθώς και η πυκνότητα του πληθυσμού των χρηστών καθορίζουν την ακτίνα της κυψέλης. Η αδυναμία των δικτύων αυτών να αντιμετωπίζουν σημαντικά συμβάντα παρεμβολής είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό. Όταν ο χρήστης ξεπερνούσε τα όρια, η κλήση τερματιζόταν και δεν υπήρχε περίπτωση προσωρινής κλήσης σε άλλη κυψέλη. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τεράστιες και εξαιρετικά ακριβές στα μειονεκτήματα αυτών (Agrawal et al., 2015).

Μόνο 2,4 kilobits ανά δευτερόλεπτο δεδομένων μπορούσαν να σταλούν με τη χρήση του 1G. Καθώς όμως ο αριθμός των χρηστών αυξανόταν και τα ασύρματα δίκτυα γίνονταν όλο και πιο δημοφιλή, αναπτύχθηκε μια νέα γενιά κυψελοειδούς δικτύου, το δίκτυο 2G. Με το 2G εισαγάγαμε μια εντελώς ψηφιακή τεχνολογία. Αυτό υποδηλώνει ότι αρχίσαμε να κωδικοποιούμε δυαδικά δεδομένα αντί να επιλέγουμε μια αναλογική κωδικοποίηση ζώνης συχνοτήτων (Bhandari N, 2017).

Τα θεμέλια για τα δίκτυα τρίτης γενιάς παρέχονται από τα δίκτυα δεύτερης γενιάς. Η ψηφιακή μετάδοση χρησιμοποιείται πλέον για το σήμα. Ωστόσο, με τη σύνδεση των καναλιών φωνής και τη χρήση τους ως μόντεμ δεδομένων, όπως στα σταθερά δίκτυα, παρήχθησαν μέτριες υπηρεσίες δεδομένων (Agrawal et al., 2015).

Τα πιο διαδεδομένα συστήματα 2ης γενιάς ήταν:

- Το Global System for Mobile communication (GSM) το οποίο χρησιμοποιεί την TDMA τεχνική και υποστηρίζει 8 χρόνο - σχισμές (time-slots) με εύρος ζώνης 200 KHz η κάθε μια.

- Το Interim Standard 54 (IS-54) και το Interim Standard 136 (IS-136) γνωστό και ως North American Digital Cellular (NADC) ή US Digital Cellular (USDC), που χρησιμοποιεί την TDMA ως τεχνική πρόσβασης.

- Το Pacific Digital Cellular (PDC) ένα Ιαπωνικό σύστημα που είχε αρκετές ομοιότητες με το IS-136 και

- Το Interim Standard 95 Code Division Multiple Access (IS-95) επίσης γνωστό ως CDMA One το οποίο χρησιμοποιεί την CDMA τεχνική πρόσβασης (Bhandari et al., 2017).

Το GSM αναπτύχθηκε στην Ευρώπη υπό την καθοδήγηση του Ευρωπαϊκού Ινστιτούτου Τεχνικών Προτύπων, ανταποκρινόμενο στην ανάγκη να δημιουργηθεί ένα ενιαίο σύστημα που θα εξυπηρετούσε όλους τους Ευρωπαίους πολίτες, ανεξάρτητα από τον τόπο διαμονής τους (ETSI), ένα σύστημα που έχει πλέον εξαπλωθεί σε ολόκληρο τον κόσμο. Ενώ ορισμένα έθνη που έχουν υιοθετήσει το GSM χρησιμοποιούν τις ζώνες 1,8 (DCS 1800) και 2 GHz, το GSM αρχικά λειτουργούσε στο φάσμα 800-900 MHz. Τέλος, μερικές από τις υπηρεσίες που έκαναν το ντεμπούτο τους με τη δεύτερη γενιά δικτύων ήταν η δυνατότητα περιορισμένης πρόσβασης στο Διαδίκτυο και η δυνατότητα

μετάδοσης σύντομων μηνυμάτων κειμένου (γνωστά και ως SMS ή Short Messaging Service) μεταξύ των χρηστών (Bhandari et al., 2017).

Ένα υφιστάμενο δίκτυο 2ης γενιάς που έχει υποστεί ορισμένες τροποποιήσεις με κύριο στόχο τη δημιουργία ταχύτερων ρυθμών μετάδοσης, ιδίως για υπηρεσίες δεδομένων, αναφέρεται ως δίκτυο 2,5ης γενιάς. Αν και η τρίτη γενιά διαθέτει επίσης πολλά από τα χαρακτηριστικά που προσφέρουν. Ως αποτέλεσμα, δημιουργούνται διάφορα νέα συστήματα, τα οποία αποτελούν τα δίκτυα 2,5 γενιάς, με στόχο την καλύτερη υποστήριξη εφαρμογών δεδομένων (Meenal G, 2014).

Τα ακόλουθα 4 συστήματα:

- High Speed Circuit Switched Data (HSCSD), το οποίο είναι η μοναδική εφαρμογή της τεχνολογίας μεταγωγής κυκλώματος που επιτρέπει στον χρήστη να χρησιμοποιεί διαδοχικές χρονοθυρίδες GSM. Εκτός από ορισμένες πρόσθετες αλλαγές, όπως μια πιο φιλελεύθερη στρατηγική ελέγχου σφαλμάτων για κάθε χρονοθυρίδα, το HSCSD είναι σε θέση να ξεπεράσει τον ρυθμό μετάδοσης 9,6 Kbps του GSM, επιτυγχάνοντας ρυθμούς μετάδοσης 14,4 Kbps. Επιπλέον, αυτό το πρότυπο επιτρέπει ρυθμούς έως και 57,6 Kbps με τη χρήση τεσσάρων διαδοχικών χρονοθυρίδων, ανοίγοντας την πόρτα για εφαρμογές όπως η ροή, συγκρίσιμες με τους ρυθμούς μιας γραμμής τύπου ISDN B-channel. Στην πραγματικότητα, αυτό συνέκρινε τις ταχύτητες μετάδοσης των κινητών τηλεφώνων μας με εκείνες των γνωστών ενσύρματων μόντεμ που χρησιμοποιούσαμε για να έχουμε πρόσβαση στο Διαδίκτυο μέσω υπολογιστή. Η τεχνολογία HSCSD έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να λειτουργήσει με τον ελάχιστο δυνατό πρόσθετο εξοπλισμό σε οποιαδήποτε τοποθεσία όπου γινόταν μεταφορά δεδομένων με ταχύτητα 9,6 kbit/sec με το σημερινό δίκτυο GSM. Επιπλέον, όσον αφορά τους παρόχους, τους δόθηκε η δυνατότητα επιλογής κλιμακωτής χρέωσης με βάση τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης από τον χρήστη. Ενώ η χρήση της μεταγωγής κυκλώματος σπαταλούσε πόρους του δικτύου, καθώς οι χρονοθυρίδες κρατούνταν ακόμη και όταν δεν χρησιμοποιούνταν η χωρητικότητά τους, αυτό ήταν το μεγαλύτερο μειονέκτημα του HSCSD (Meenal et al., 2014).

• Οι εφαρμογές που εκτελούνται σε υποδομές μεταγωγής πακέτων υποστηρίζονται από την υπηρεσία General Packet Radio Service (GPRS), ενώ οι ίδιες υλοποιούνται με μεταγωγή κυκλώματος. Εξαιτίας αυτού, είναι πλέον κατάλληλο για υπηρεσίες όπως το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, η αποστολή φαξ και η ασύμμετρη περιήγηση στο διαδίκτυο, κατά την οποία ο χρήστης κατεβάζει πολύ περισσότερα δεδομένα από το διαδίκτυο από ό,τι συνεισφέρει. Η απλή περιήγηση στο Διαδίκτυο έως τη μετάδοση φωνής και βίντεο είναι όλες εφαρμογές GPRS. Στα βασικά πλεονεκτήματά του περιλαμβάνεται το γεγονός ότι χρησιμοποιεί πόρους του δικτύου μόνο όταν πρέπει να παραδοθούν δεδομένα και ότι εξαρτάται λιγότερο από στοιχεία του δικτύου που χρησιμοποιούν μεταγωγή κυκλώματος. Ως αποτέλεσμα, ακόμη και αν ο χρήστης πιστεύει ότι είναι πάντα συνδεδεμένος, η κινητή συσκευή ζητά από το δίκτυο περισσότερους πόρους μόνο όταν απαιτούνται νέα δεδομένα. Επιπλέον, μπορούν να υποστηριχθούν επιπλέον χρήστες επειδή στο GPRS, σε αντίθεση με το HSCSD, το κανάλι δεν κρατείται από τον κινητό χρήστη. Σε αντίθεση με το GSM, όπου οι χρήστες μπορούν να χρησιμοποιήσουν μόνο μία χρονοθυρίδα, το GPRS επιτρέπει στους χρήστες να καταλαμβάνουν και τις οκτώ, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται ρυθμός

μετάδοσης έως και  $8 \times 21,4 = 171,2$  Kbps. Παρόλο που το GPRS προοριζόταν αρχικά να βελτιώσει το σύστημα GSM, έκτοτε επεκτάθηκε για να συνεργαστεί με το πρότυπο IS-136 (Meenal et al., 2014).

- Επειδή απαιτεί αναβάθμιση τόσο στο λογισμικό όσο και στο υλικό, το Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EDGE) θεωρείται μάλλον προχωρημένη βελτιστοποίηση του προτύπου GSM. Η ανάπτυξη του EDGE θεωρείται το αποτέλεσμα του κοινού στόχου των διαχειριστών των δικτύων GSM και IS-136 για μια συνεργατική τεχνολογική πρόοδο που θα επέτρεπε την ανάπτυξη δικτύων τρίτης γενιάς, υψηλής ταχύτητας. Όταν χρησιμοποιείται χωρίς διόρθωση σφαλμάτων και με τις οκτώ ωρολογιακές σχισμές δεσμευμένες από έναν μόνο χρήστη, η ψηφιακή διαμόρφωση 8-PSK που εισήγαγε το EDGE επιτρέπει ρυθμό μετάδοσης έως και 547,2 Kbps (Meenal et al., 2014).

- Interim Standard 95B (IS-95B), το οποίο προσφέρει τόσο μεταγωγή πακέτων όσο και μεταγωγή κυκλώματος με χρήση καναλιών CDMA, αποτελεί εξέλιξη του προσωρινού προτύπου 95A, το οποίο προτάθηκε για πρώτη φορά το 1995. Τα κυψελοειδή δίκτυα που βασίζονται στα πρότυπα IS-95A και IS-95B αναφέρονται ως CDMA One. Το 1999, η Κορέα εγκαινίασε το πρώτο δίκτυο IS-95B. Είναι δυνατόν να επιτευχθούν ταχύτητες μετάδοσης  $8 \times 14,4 = 115,2$  Kbps με τη χρήση και των 8 καναλιών ταυτόχρονα (Meenal et al., 2014).

Τα δίκτυα τρίτης γενιάς επιτρέπουν εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, σε αντίθεση με τα δίκτυα προηγούμενης γενιάς. Το δίκτυο WCDMA, το οποίο είναι ενσωματωμένο στην τρίτη γενιά, μετατρέπει το κινητό τηλέφωνο σε ασύρματη συσκευή πολυμέσων. Προσφέρουν επίσης μια ποικιλία υπηρεσιών, όπως σταθερό τηλέφωνο, φωνή και βίντεο, παρέχοντάς τους πλήρη συμβατότητα. Στον τομέα των δικτύων, τα δίκτυα 3G θεωρούνται πολύ επιτυχημένα με αυτή την έννοια, με αποτέλεσμα να βοηθήσουν στην ανάπτυξη και την κατασκευή των δικτύων 4G. Το πρότυπο cdma2000 εξελίχθηκε ως συνέχεια του CDMA και του WidebandCDMA (W-CDMA) ή Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) ως συνέχεια των GSM, IS-136 και PDC στο πλαίσιο της εξέλιξης των συστημάτων που χρησιμοποιούν τα δίκτυα 2ης γενιάς. Ενώ το UMTS στην Ευρώπη, το CDMA2000 στη Βόρεια Αμερική και το TDSCDMA στην Κίνα είναι σήμερα τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα (Dhruv B, 2014).

Όσον αφορά την αρχιτεκτονική του GPRS, το UMTS αποτελεί βελτίωση του GSM και επέκταση, δίνοντας στους χρήστες καλύτερο έλεγχο της ποιότητας των υπηρεσιών τόσο στην πλευρά του UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network) όσο και στην πλευρά του δικτύου κορμού. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το UMTS προσφέρει τόσο υπηρεσίες μεταγωγής πακέτων (PS) όσο και υπηρεσίες μεταγωγής κυκλώματος (CS) για δεδομένα, ενώ το GPRS υποστήριζε μόνο υπηρεσίες μεταγωγής κυκλώματος. Η επερχόμενη τεχνολογία 4G είναι η πρώτη που χρησιμοποιεί εγγενώς τη φωνή μέσω IP (UMTS-LTE). Μέσω του SGSN πραγματοποιείται η εγγραφή και η πιστοποίηση ταυτότητας των χρηστών. Για την αυθεντικοποίηση των χρηστών, το HLR ενημερώνεται επίσης για να φιλοξενήσει υπηρεσίες IP. Η λύση 3GPP, η οποία είναι υπεύθυνη για όλα τα πρότυπα και τις εκδόσεις 3G, όχι μόνο για το WCDMA, μπορεί να θεωρηθεί περισσότερο ως IPover-GPRS με τη συμπερίληψη μιας ενημερωμένης

τεχνολογίας ραδιοδιεπαφής (το UTRAN) για να επιτρέψει μεγαλύτερες ταχύτητες (Payal et al., 2014).

Τα συστήματα IS-95, IS-95A και IS-95B είναι συμβατά προς τα πίσω με το CDMA 2000. Βασίζεται στη χρήση χωρητικότητας καναλιού 1,25 MHz ανά χρήστη και θεωρείται ως κίνηση προς την κατεύθυνση του 3G. Ως εναλλακτική λύση στην τεχνολογία 3G, το πρωτόκολλο TD-SCDMA (Time Division Synchronous Code Division Multiple Access) υλοποιήθηκε από την China Academy of Communications Technology (CATT) και την Siemens Information and Communication Mobile Group (IC Mobile). Για τη μεταφορά δεδομένων υψηλής ταχύτητας μέσω των δικτύων GSM, κάνει χρήση των μεθόδων TDMA/TDD και CDMA, έως και 384Kbps. Διαθέτει επίσης ένα πλαίσιο 5msec που χωρίζεται σε 7 χρονοθυρίδες και ένα ραδιοκανάλι 1,6MHz. Το αρχικό του gadget παρουσιάστηκε το 2003 και το σύστημα τέθηκε σε χρήση για εμπορικούς σκοπούς το 2005 (Payal et al., 2014).

Η δημιουργία των προτύπων 3G βρίσκεται πλέον υπό τον έλεγχο δύο μεγάλων οργανισμών:

- Το 3G Project Partnership (3GPP) που επεξεργάζεται το WCDMA πρότυπο.
- Το 3G Project Partnership 2 (3GPP2) που επεξεργάζεται το cdma2000 πρότυπο.

Τεχνολογία	1G	2G	3G
Εμφανίστηκε	1970	1980	1990
Εφαρμόστηκε	1981	1991	2001
Υπηρεσίες	Αναλογικές υπηρεσίες φωνής	Ψηφιακές υπηρεσίες φωνής, μηνύματα (SMS)	Μεγαλύτερη χωρητικότητα, ρυθμός δεδομένων έως 2Mbps
Πρότυπα	AMPS, ETACS, NMT κλπ.	TDMA, CDMA, GSM	WCDMA, CDMA-2000
Ρυθμός Δεδομένων	NA	14.4kbps	2Mbps
Πολυπλεξία	FDMA	TDMA, CDMA	CDMA
Δίκτυο	PSTN	PSTN	Πακέτα Δικτύου

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά 1G, 2G, 3G. Πηγή: Google Scholar

Τα δίκτυα που χρησιμοποιούν την τεχνολογία HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) επιπλέον της τεχνολογίας WCDMA θεωρούνται ότι ανήκουν στη γενιά 3.5. Κατά τρόπο παρόμοιο με αυτό που προσφέρει το πρότυπο EDGE σε σύγκριση με το GSM, το HSDPA θεωρείται ως εξέλιξη του προτύπου UMTS, προσφέροντας στους



πελάτες 5 φορές μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και μεγαλύτερη χωρητικότητα. Το HSDPA στο σύνολο του απαιτεί επανασχεδιασμό της αρχιτεκτονικής του δικτύου και αναβάθμιση του υλικού, όπως αυτό που θα χρησιμοποιηθεί στους σταθμούς βάσης, παρά το γεγονός ότι ορισμένα στοιχεία αυτού του προτύπου θεωρείται ότι είναι εύκολο να υλοποιηθούν με το υπάρχον υλικό. Εκτός από το ότι πρέπει να λειτουργούν καλά σε τόσο υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, τα τελευταία πρέπει επίσης να είναι σε θέση να υποστηρίζουν τη λειτουργία πιο περίπλοκων πρωτοκόλλων (Payal et al., 2014).

Τα πρότυπα HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) και HSUPA (High Speed Uplink Packet Access) αναφέρονται συλλογικά ως πρότυπο HSPA (HSUPA). Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το HSDPA και το HSUPA μπορούν να υλοποιηθούν στην ίδια συχνότητα των 5 MHz με το UMTS, επιτρέποντας την ταυτόχρονη λειτουργία του HSPA και του παραδοσιακού UMTS. Το HSDPA παρέχει ρυθμούς μετάδοσης έως και 14,4 Mbps ανά χρήστη και συμπεριλήφθηκε στην έκδοση 5 του προτύπου 3GPP (ανακοινώθηκε το 2003 και αναπτύχθηκε το 2005). Στην ανοδική ζεύξη, το HSUPA προστέθηκε στο πρότυπο 3GPP στην έκδοση 6, προσφέροντας δυνατότητα για έως και 5,8 Mbps χρησιμοποιώντας ένα αποκλειστικό κανάλι ανοδικής ζεύξης (Payal et al., 2014).

Το HSDPA λειτουργεί με τη χρήση ενός κοινού καναλιού Downlink Shared Channel (DSCH), το οποίο μοιράζονται οι χρήστες για τη μετάδοση πακέτων, σε αντίθεση με τη χρήση ξεχωριστών αφιερωμένων καναλιών (DCH) για τη μεταφορά δεδομένων. Η ονομασία αυτού του καναλιού, highspeed DSCH, αναφέρεται στη σημαντικά μεγαλύτερη χωρητικότητά του (εύρος ζώνης) (HS-DSCH). Τέλος, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ο όρος HSPA+ χρησιμοποιείται για να αναφερθεί σε όλες τις προσπάθειες αναβάθμισης που διερευνά το 3GPP με σκοπό τη βελτίωση των δυνατοτήτων της ίδιας της τεχνολογίας HSPA, ιδίως στον τομέα της βελτιστοποίησης του ασύρματου μέσου μετάδοσης (K.P, 2013).

Η πρωτοβουλία για την τεχνολογία 4G αποσκοπεί στη δημιουργία ενός ενιαίου, μεταδιδόμενου, πλήρως λειτουργικού και συνεκτικού διαδικτυακού έργου με την ενσωμάτωση των υφιστάμενων συστημάτων 2G (2ης γενιάς), 3G (3ης γενιάς), WLAN (ασύρματο τοπικό δίκτυο), μικρής εμβέλειας, σταθερού καλωδίου. Πρόκειται για μια εξέλιξη της τεχνολογίας 3G που προσφέρει χαρακτηριστικά που περιγράφονται στο IMT (International Mobile Telecommunications), τα οποία είναι δυνατότητες που ορίζονται από την ITU (International Telecommunication Union). Τα χαρακτηριστικά αυτά περιλαμβάνουν επεκτασιμότητα, ευελιξία, αποδοτικότητα, αυτοδιαχείριση, ασφάλεια για την υποστήριξη της διασύνδεσης με διάφορους τύπους δικτύων και πλήθος νέων και υφιστάμενων υπηρεσιών (K.P, 2013).

Εκτός από την πανταχού παρούσα κινητή συνδεσιμότητα, παρέχει πλήρως συγκλίνουσες προσαρμοσμένες υπηρεσίες (φωνή, δεδομένα και πολυμέσα) με ρυθμούς δεδομένων έως και 100 Mbps:

- Κινητή τηλεόραση υψηλής ανάλυσης,
- Τηλεφωνία IP,
- Υπηρεσίες τυχερού παιχνιδιού,

- Τηλεδιάσκεψη,
- Τρισδιάστατη τηλεόραση.

Το 4G ενσωματώνει βελτιωμένες εκδόσεις των ακόλουθων σύγχρονων τεχνολογιών: CDMA, IMT-2000, W-CDMA, W-CDMA και CDMAone. Προβλέπεται ροή από άκρο σε άκρο μέσω του πρωτοκόλλου Internet για μουσική και βίντεο υψηλής ποιότητας. Παρά την υποστήριξη μέγιστου ρυθμού δεδομένων πολύ μικρότερου από 1 Gbit/s και την προώθησή τους ως 4G από τους πάροχους υπηρεσιών, οι κινητές εκδόσεις του LTE (Long Term Evolution) και του WiMAX (Global Interoperability for Microwave Access) δεν συμμορφώνονται πλήρως με το IMT-Advanced. Η υψηλή κινητικότητα και η παγκόσμια σύνδεση ήταν οι βασικοί στόχοι του 4G LTE (Κ.Ρ, 2013).

Το δίκτυο πυρήνα IP ενισχύεται σταδιακά για να φιλοξενήσει υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, υπηρεσίες εφαρμογών αιχμής και αποτελεσματικότερη διαχείριση των δικτύων IP και των ραδιοδικτύων. Αντικαθιστά την τεχνολογία διασποράς φάσματος που χρησιμοποιείται στο 3G.

-Μετάδοση πολλαπλών φορέων με χρήση πολλαπλής πρόσβασης με ορθογωνική διαίρεση συχνότητας (OFDMA).

-OFDMA (εξίσωση στο πεδίο της συχνότητας). Συνεπώς, μπορεί να μεταφέρει δεδομένα σε εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης bit χωρίς να επηρεάζεται από εκτεταμένη ραδιομετάδοση πολλαπλών διαδρομών. Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης bit αυξάνεται περαιτέρω για επικοινωνίες MIMO (Multiple Input Multiple Output) που χρησιμοποιούν ευφυείς συστοιχίες κεραιών. Η μετάδοση γίνεται με τη χρήση MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Services) και διαμόρφωση υψηλότερης τάξης έως και 64 QAM (Κ.Ρ, 2013). Ο όρος "τεχνολογία 5G" αναφέρεται στην κύρια εξέλιξη των προτύπων κινητής τηλεφωνίας μετά τα πρότυπα 4G/IMT-Advanced. Όλα τα είδη των προηγούμενων χαρακτηριστικών περιλαμβάνονται στις τεχνολογίες 5G, καθιστώντας τις πιο ισχυρές και με μεγάλη ζήτηση στο εγγύς μέλλον. Μία από τις επιπλέον χρήσεις της κινητής συνδεσιμότητας είναι ο έξυπνος οικιακός αυτοματισμός, ο οποίος θα αποτελέσει κρίσιμο στοιχείο των σπιτιών του μέλλοντος. Μια λύση βασισμένη σε IP για τη διαλειτουργικότητα ασύρματων και κινητών δικτύων είναι το κινητό σύστημα 5G (Meenal et al., 2014). Τα τρία κύρια σενάρια χρήσης που συνιστώνται από το IMT (International Mobile Telecommunications) για τα δίκτυα 5G έχουν το καθένα μοναδικές δυνατότητες και απαιτήσεις:

- Η ευρεία κάλυψη περιοχής και τα σημεία πρόσβασης για υψηλές επιδόσεις και απρόσκοπτη εμπειρία χρήστη παρέχονται από την ενισχυμένη κινητή ευρυζωνικότητα (eMBB) (Meenal G, 2014).

- Εξαιρετικά αξιόπιστη επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης (URLLC), η οποία έχει υψηλή απόδοση, χαμηλή καθυστέρηση (περίπου 1 ms) και υψηλή διαθεσιμότητα (Meenal G, 2014).

- Μαζικές επικοινωνίες τύπου μηχανής (mMTC): εξαιρετικά ευρεία κάλυψη, υψηλή πυκνότητα συνδεδεμένων συσκευών, χαμηλό κόστος και εξαιρετικά παρατεταμένη διάρκεια ζωής της μπαταρίας για κινητές συσκευές.

Τα δίκτυα επικοινωνιών τέταρτης γενιάς (4G) που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι σε θέση να διαχειριστούν την κίνηση δεδομένων που παράγεται από τις κινητές συσκευές και τις πολυάριθμες συσκευές που σχετίζονται με το IoT. Καθώς υποστηρίζουν την επικοινωνία τύπου μηχανής (MTC) του Διαδικτύου των πραγμάτων και παρέχουν ευρυζωνικές υπηρεσίες, τα δίκτυα αυτά έχουν ορισμένες απαιτήσεις. Όμως πιστεύεται ότι τα δίκτυα διαχειρίζονται ήδη 35 Exabytes δεδομένων κάθε δευτερόλεπτο. Επιπλέον, καθώς οι μηχανές ξεπερνούν σε αριθμό τα κινητά τηλέφωνα, αναμένεται ότι ο αριθμός των συσκευών IoT και των δεδομένων που παράγουν θα αυξηθεί δραματικά (Meenal G, 2014).

Ως εκ τούτου, είναι ζωτικής σημασίας η δημιουργία ενός νέου δικτύου επικοινωνιών, διότι κάτι τέτοιο θα οδηγήσει σε νέες απαιτήσεις. Το δίκτυο πέμπτης γενιάς (5G), το οποίο θα χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό νέων τεχνολογιών πρόσβασης και παλαιών τεχνολογιών δικτύου, αναμένεται να αποτελέσει τη βάση του δικτύου στο μέλλον (Meenal G, 2014).

Ο εκθετικά αυξανόμενος αριθμός χρηστών θα πρέπει να φιλοξενηθεί από τα δίκτυα πέμπτης γενιάς, τα οποία θα πρέπει επίσης να είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν τις απαιτήσεις για μεγαλύτερο μέγεθος:

- 1000 φορές μεγαλύτερο εύρος ζώνης,
- εκατονταπλάσιος αριθμός συνδεδεμένων χρηστών,
- 99,9% διαθεσιμότητας,
- εξυπηρέτηση 1000 φορές μεγαλύτερου όγκου δεδομένων ανά περιοχή,
- 10 ως 100 φορές μεγαλύτερος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων,
- βελτίωση κατά 10 φορές του χρόνου εκφόρτισης των μπαταριών για χαμηλής κατανάλωσης συσκευών μαζικών επικοινωνιών (Massive Machine Communication, MMC),
- 5 φορές μειωμένος λανθάνων χρόνος End-to-End (E2E). Ιδανικά 1ms (Meenal G, 2014).

## Κεφάλαιο 2ο: 5G ή 6G : Ποια είναι η τάση;

Αν και η ιστορία του 5G γράφεται ακόμη, επειδή τα δίκτυα εγκαθίστανται ακόμη σε όλο τον κόσμο, αυτή η έκτη γενιά της τεχνολογίας επικοινωνιών ανοίγει ήδη το δρόμο. Η ερευνητική κοινότητα εξετάζει ήδη την επόμενη γενιά της τεχνολογίας επικοινωνιών, παρά το γεγονός ότι το 5G δεν έχει ακόμη ανταποκριθεί στις υποσχέσεις του και ότι οι ζώνες mmWave είναι ως επί το πλείστον ανεπαρκώς αξιοποιημένες σε σύγκριση με την περιοχή κάτω των 7 GHz. Αν και είναι δύσκολο να παρουσιαστεί ένα σαφές και ευδιάκριτο όραμα για το 6G αυτή τη στιγμή, αναμένεται ότι οι προδιαγραφές 6G θα ολοκληρωθούν και θα εκδοθούν στα έτη 2026 έως 2027. Ωστόσο, σύμφωνα με τους (Rajatheva N, 2020), τρία γεγονότα σχετικά με την 6G φαίνεται να ισχύουν:

- Το 6G αναμένεται να καλύψει όλες τις ανάγκες που δεν μπορεί να καλύψει τώρα το 5G, συμπεριλαμβανομένου του ότι θα είναι πιο ικανό, έξυπνο, αξιόπιστο, κλιμακούμενο και αποδοτικό στην κατανάλωση ενέργειας.

- Στο 6G θα συνδυαστούν οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στο 5G και σε άλλα ασύρματα δίκτυα από προηγούμενες γενιές καθώς και νέες που είτε θεωρήθηκαν πολύ ανώριμες για το 5G είτε θα υιοθετηθούν ή θα αναπτυχθούν ειδικά για το 6G.

- Το 6G πιθανότατα θα συνεχίσει την τάση της χρήσης ολοένα και υψηλότερων συχνοτήτων φορέα για την παροχή επικοινωνίας υψηλής χωρητικότητας από σημείο σε σημείο με στόχο την επίτευξη φασματικής απόδοσης 5 φορές μεγαλύτερη από το 5G. Αυτή η τάση θα επεκταθεί πιθανότατα πέρα από τα κύματα mmWaves μέσω των ζωνών THz και μέχρι το ορατό φως.

Δεδομένου ότι αρκετές υπηρεσίες για τη ραδιοαστρονομία, τη δορυφορική εξερεύνηση της Γης, την κινητή δορυφορική και τη δια-δορυφορική έχουν ήδη αδειοδοτηθεί στη ζώνη 141,8 έως 275 GHz, η περιοχή 100 έως 300 GHz θεωρείται ότι αποτελεί το πρώτο παράθυρο ευκαιρίας για την αναπόφευκτη ανάπτυξη του 6G σε υψηλότερες συχνότητες (Rajatheva N, 2020).

Στις ζώνες 116 έως 123, 174,8 έως 182, 185 έως 190 και 244 έως 246 GHz, η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC) έχει εγκρίνει φάσμα 21,2 GHz για μη αδειοδοτημένη χρήση (Rajatheva N, 2020).

Η εμπειρία ταχύτητας δεδομένων των καταναλωτών θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 10 φορές ταχύτερη από ό,τι με τα δίκτυα 5G, ενώ οι θεμελιώδεις ανάγκες του 6G για μέγιστους ρυθμούς δεδομένων προβλέπεται να είναι 50 φορές μεγαλύτερες από εκείνες του 5G. Επιπλέον, το 6G αναμένεται να συνδέσει ακόμη μεγαλύτερο αριθμό συσκευών από το 5G και να παρέχει σημαντικά υψηλότερη χωρητικότητα

κίνησης περιοχής. Το 6G θα ανταποκριθεί αποτελεσματικά στις απαιτήσεις των αυτόνομων μεταφορών, του βιομηχανικού αυτοματισμού και της ρομποτικής χάρη στην ακόμη χαμηλότερη καθυστέρηση και τη σημαντικά αυξημένη αξιοπιστία. Ο πίνακας 1.2 παρέχει μια ολοκληρωμένη σύγκριση των βασικών δεικτών επιδόσεων (KPI) για το σημερινό 5G και το αναμενόμενο 6G.

Σε σύγκριση με τις προηγούμενες γενιές 3G, 4G και 5G, αυτό το επόμενο βήμα στην εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών θα απαιτήσει πολύ βαθύτερη κατανόηση των τεχνολογικών περιορισμών. Η υιοθέτηση του 6G, η εφαρμογή του οποίου αναμένεται να ξεκινήσει μεταξύ 2028 και 2030, θα επηρεαστεί σε μεγάλο βαθμό από τα επίπεδα τεχνολογικής ετοιμότητας. Οι παράγοντες που θα καταστήσουν το 6G επιτυχημένο συζητούνται στις επόμενες παραγράφους. Θα επικεντρωθούμε αποκλειστικά σε εκείνους που αυξάνουν και καθιστούν περισσότερο διαθέσιμο το φάσμα για τις κυψελοειδείς επικοινωνίες. Οι έρευνες για το 6G, γνωστό και ως sub-THz, με συχνότητες που εκτείνονται από 100 έως 300 GHz, επικεντρώνονται στις ανώτερες ζώνες mmWave ή sub-THz, παρόλο που υπάρχουν σχέδια για την αύξηση του ανώτερου ορίου του 5G στα 71 GHz. Η πιο ενδιαφέρουσα ζώνη για την έρευνα σχετικά με τις ολοκαίνουργιες τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας είναι πιθανώς αυτή. Ένα πράγμα που πρέπει να είναι κατά νου, ωστόσο, είναι ότι το 6G δεν θα χρησιμοποιεί μόνο νέο φάσμα για να φέρει βελτιώσεις σε σχέση με το 5G- θα χρησιμοποιεί επίσης παλαιές και νέες ζώνες με απρόσκοπτο και δυναμικό τρόπο για να παρέχει την απαραίτητη ποιότητα υπηρεσιών για τις συγκεκριμένες περιπτώσεις χρήσης (Rajatheva N, 2020).

Για τη μηχανική RF και τη φυσική των συσκευών, η ανάπτυξη του 6G και η αξιοποίηση των ζωνών υπο-THz θα παρουσιάσει πολύ μεγαλύτερα προβλήματα από ό,τι το 5G. Η ενεργειακά αποδοτική παραγωγή, διαμόρφωση, ανίχνευση και αποδιαμόρφωση σήματος THz ήταν πάντα εξαιρετικά δύσκολη και η ανάπτυξη σε αυτόν τον τομέα τις τελευταίες δεκαετίες ήταν μάλλον αργή. Όμως, κατά τη διάρκεια των τελευταίων δέκα ετών, εμφανίστηκαν ορισμένες νέες τεχνολογίες, κυρίως οι δίοδοι Schottky και οι διατάξεις III-V InP που μπορούν να λειτουργήσουν στο 1 THz. Ιδιαίτερα για τις συσκευές του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), οι συσκευές 6G θα χρειαστούν εξαιρετικά υψηλά επίπεδα ολοκλήρωσης, εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και σημαντικές δυνατότητες συγκομιδής και διατήρησης ενέργειας (Faisal A, 2020).

Λόγω των πιθανών ταχυτήτων των τρανζίστορ σε CMOS, SiGe και HBT, το 6G στην περιοχή κάτω των THz θα έχει δυσκολίες στην εξασφάλιση του διαθέσιμου κέρδους, της ισχύος εξόδου και του δείκτη θορύβου που απαιτούνται για να ξεπεραστούν οι μεγαλύτερες απώλειες διαδρομής.

Για μεταφορές δεδομένων Tbps σε απόσταση 1 χιλιομέτρου, οι διαθέσιμες σήμερα τεχνολογίες ολοκληρωμένων κυκλωμάτων δεν είναι ακόμη επαρκώς ανεπτυγμένες ή οικονομικά αποδοτικές. Ρυθμοί μεταφοράς δεδομένων μερικών δεκάδων Gbps έχουν καταγραφεί κάτω από τα 120 GHz και σε απόσταση 10 m με χρήση CMOS, αν και παρόμοιες ταχύτητες έως και 1 km μπορούν να επιτευχθούν με χρήση InP και κεραιών υψηλής κατευθυντικότητας (Faisal A, 2020).

<b>TABLE 1</b>		
<b>NOTIONAL 6G VS. 5G PERFORMANCE<sup>2</sup></b>		
<b>KPI</b>	<b>5G</b>	<b>6G</b>
Peak Data Rate	20 Gbps	1 Tbps
Experience Data Rate	100 Mbps	1 Gbps
Peak Spectral Efficiency	30 b/s/Hz	60 b/s/Hz
Experience Spectral Efficiency	0.3 b/s/Hz	3 b/s/Hz
Maximum Bandwidth	1 GHz	100 GHz
Area Traffic Capacity	10 Mb/s/m <sup>2</sup>	1 Gb/s/m <sup>2</sup>
Connection Density	1 Million Devices/km <sup>2</sup>	10 Million Devices/km <sup>2</sup>
Energy Efficiency	-	1 Tb/J
Latency	1 ms	100 μs
Reliability	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-9</sup>
Jitter	-	1 μs
Mobility	500 km/h	1000 km/h

Πίνακας 2: Σύγκριση 5G-6G. Πηγή: *microwavejournal.com*

Όταν δύο δυνάμεις συναντώνται, η μία προκύπτει από τις απαιτήσεις της κοινωνίας και η άλλη όταν οι τεχνολογίες είναι αρκετά προηγμένες για να ανταποκριθούν στην ανάγκη, γεννιέται μια νέα γενιά τεχνολογίας επικοινωνιών. Μόνο οι περιπτώσεις χρήσης που δεν ενδιαφέρονται για το κόστος και την ενεργειακή απόδοση θα έχουν νόημα για τις ασύρματες επικοινωνίες που χρησιμοποιούν τις ζώνες υπο-THz και THz. Οι εσωτερικές επικοινωνίες σε κέντρα δεδομένων είναι πιθανώς μία από αυτές, επιτρέποντας την αποτελεσματική και ανέξοδη μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων. Το backhaul θα αναπτυχθεί ως μια εφαρμογή για επικοινωνίες σε εξωτερικούς χώρους, όπου θα είναι δυνατή η μεταφορά δεδομένων που μοιάζει με οπτικές ίνες σε καλώδια 0,1 έως 1 km. Τέτοιες χρήσεις φαίνεται να είναι κατάλληλες για την κατώτερη ζώνη υπο-THz, η οποία έχει συχνότητες μεταξύ 100 και 200 GHz. Οι συσκευές και τα συστήματα της ζώνης D (110 έως 170 GHz) και G (140 έως 220 GHz) μελετώνται και αναπτύσσονται ήδη από ερευνητές και μηχανικούς. Πρέπει να γίνει πολύ περισσότερη δουλειά για να δημιουργηθεί διαμόρφωση που να είναι πιο αποτελεσματική. Θα προκύψουν νέες μέθοδοι διαμόρφωσης, οι οποίες θα υποστηρίζονται από την τεχνητή νοημοσύνη και τη μηχανική μάθηση και θα είναι

κατάλληλες για συγκεκριμένες περιπτώσεις χρήσης, απόδοσης και καθυστέρησης (Faisal A, 2020).

Στην πράξη, είναι δύσκολο να οραματιστεί κανείς δίκτυα επικοινωνιών 6G που χρησιμοποιούν συχνότητες υψηλότερες από 300 GHz. Η εμβέλεια μιας ασύρματης σύνδεσης μειώνεται, το πολύ, σε μερικές δεκάδες μέτρα λόγω των απωλειών του ελεύθερου χώρου, οι οποίες συχνά είναι μεγαλύτερες από 100 dB. Επιπλέον, οι συσκευές ημιαγωγών, τα υλικά και οι τεχνολογίες ολοκλήρωσης δεν έχουν αναπτυχθεί ώστε να παρέχουν επικοινωνία Tbps σε συχνότητες άνω των 300 GHz. Είναι λανθασμένη η πεποίθηση ότι το απαιτούμενο επίπεδο ωριμότητας της τεχνολογίας RF θα υλοποιηθεί τελικά. Ενώ τα ηλεκτρονικά RF θα εξελιχθούν με την πάροδο του χρόνου και, όταν συνδυαστούν με τεχνικές διαμόρφωσης δέσμης κεραίας αιχμής, θα μετριάσουν τις υψηλότερες απώλειες σήματος και τις περιορισμένες αποστάσεις σύνδεσης, αυτό δεν είναι δεδομένο. Μέχρι να υλοποιηθεί η 6G, δεν είναι σαφές αν τα CMOS και SiGe BiCMOS θα προσφέρουν επαρκείς επιδόσεις στις συχνότητες THz. Επιπλέον, θα χρειαστεί χρόνος για να ωριμάσουν και να αποδείξουν τη βιωσιμότητά τους τα νανο- και μετα-υλικά, καθώς και τα ηλεκτρονικά που βασίζονται στο γραφένιο. Θα συνεχιστεί η τάση των αναλογικών και ψηφιακών ηλεκτρονικών που βασίζονται σε CMOS και BiCMOS προς την ολοένα αυξανόμενη ταχύτητα, η οποία είναι απαραίτητη για τις επικοινωνίες μεγάλης κλίμακας; Ή μήπως ήρθε η ώρα για νέες καινοτομίες ημιαγωγών, όπως το InP HBT, να χρησιμεύσουν ως θεμέλιο της 6G; Η ικανότητα να ξεπεραστούν οι δυσκολίες που σχετίζονται με τον παραλληλισμό των κυκλωμάτων RF, τον σχεδιασμό και την κατασκευή κεραίων, τα εξαρτήματα υψηλής ταχύτητας και ισχύος, την αποδοτικότητα, την κατανάλωση ενέργειας και τη διάχυση θερμότητας, καθώς και τα ζητήματα ολοκλήρωσης του συστήματος εγκαίρως για την εξάπλωση του 6G είναι ένα άλλο ζήτημα που είναι άγνωστο. Με τις αυστηρές κατευθυντήριες γραμμές σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας και την ενεργειακή απόδοση για τις συσκευές και τα δίκτυα 6G, η επεξεργασία δεδομένων μπορεί να γίνει το σημείο συμφόρησης, ακόμη και αν αντιμετωπιστούν όλες οι ηλεκτρονικές και τεχνολογικές προκλήσεις RF (Alwis Ch, 2021).

Ακόμη και με τις πιο αισιόδοξες προβλέψεις για την απόδοση των κυκλωμάτων RF στα υπο-THz, η χρησιμότητα τέτοιων συστημάτων για συσκευές που λειτουργούν με μπαταρία θα είναι πολύ περιορισμένη. Πέρα από τα 300 GHz, η πραγματική μετάδοση στα THz μπορεί να είναι δυνατή, αν και μπορεί να συμβεί μόνο εγκαίρως για το 7G. Η πιθανή απόσταση σύνδεσης είναι το μεγαλύτερο εμπόδιο, επειδή η ισχύς εξόδου και η ευαισθησία των πομποδεκτών είναι τώρα χαμηλές και αναμένεται να παραμείνουν έτσι στο άμεσο μέλλον. Ωστόσο, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα οι ζώνες υπο-THz να χρησιμοποιηθούν στην 6G για όλες εκείνες τις εφαρμογές και τις περιπτώσεις χρήσης όπου η ίδια η ποσότητα της χωρητικότητας μεταφοράς δεδομένων θα χρησιμεύσει ως ο πρωταρχικός KPI και θα υποστηρίζεται από την επιχειρηματική υπόθεση. Οι επικοινωνίες είναι πλέον εξίσου σημαντικές με το νερό και το ηλεκτρικό ρεύμα, καθώς οι άνθρωποι στρέφονται προς τις εικονικές συναντήσεις και τη συνεργασία. Η ιδέα ενός μέλλοντος στο οποίο τα zettabytes δεδομένων θα διαμοιράζονται σε δισεκατομμύρια ανθρώπους, συσκευές, συνδεδεμένα οχήματα, ρομπότ και μη επανδρωμένα αεροσκάφη μας επιβάλλεται συνεχώς. Ο στόχος του 6G είναι να παρέχει ένα προσβάσιμο, κλιμακούμενο δίκτυο με άριστη κάλυψη παντού,

καλύπτοντας το ψηφιακό χάσμα και δημιουργώντας έναν πραγματικά διασυνδεδεμένο κόσμο (Alwis Ch, 2021). Υπάρχουν πολλά σοβαρά προβλήματα με το Sub-THz 6G. Για τα κυκλώματα RF απαιτούνται υψηλότερη ισχύς και απόδοση εξόδου, χαμηλότερος NF και θόρυβος φάσης και ακόμη πιο εξελιγμένες λύσεις διαμόρφωσης δέσμης κεραίας, προκειμένου να καταπολεμηθούν οι απώλειες σήματος και οι μικρές αποστάσεις σύνδεσης. Καθώς οι μέθοδοι βολιδοσκόπησης καναλιών και ο εξοπλισμός μέτρησης είναι ξεπερασμένοι, τα κανάλια διάδοσης στις συχνότητες THz τόσο για εσωτερικές όσο και για εξωτερικές επικοινωνίες παραμένουν ελάχιστα καθορισμένα και βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στη μοντελοποίηση παρά στις μετρήσεις. Απαιτείται μια νέα στρατηγική συλλογής και μεταφοράς ενέργειας για τις συσκευές και τα δίκτυα για την επίτευξη αυστηρών κριτηρίων bit-ανά-joule, δεδομένου ότι τα πρότυπα ενεργειακής κατανάλωσης και βιωσιμότητας που αναμένονται για τα δίκτυα 6G είναι επαχθή. Για την προώθηση της μαζικής παραγωγής και τη μείωση του κόστους, οι μέθοδοι συσκευασίας και ενσωμάτωσης που χρησιμοποιούν κυρίως ορθογώνιους κυματοδηγούς και διαδικασίες φρεζαρίσματος πρέπει να γίνουν απλούστερες (Alwis Ch, 2021).

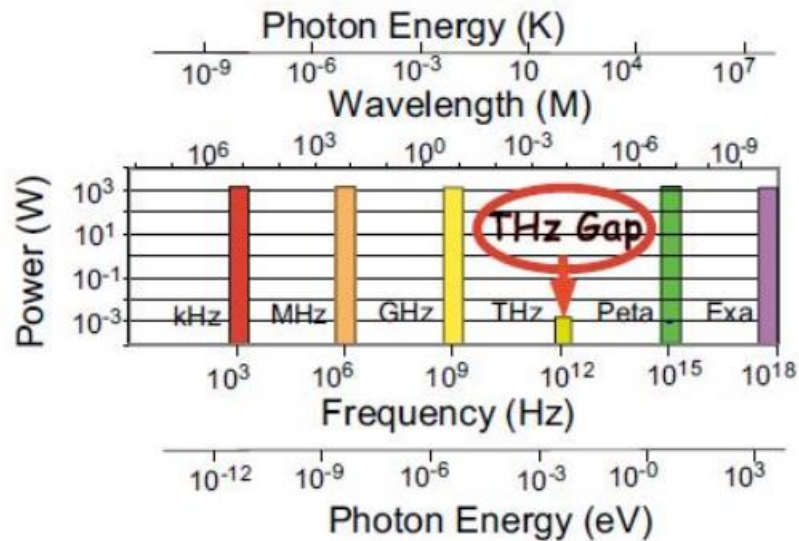
Η δυσκολία της δημιουργίας του 6G είναι σημαντικά πιο δύσκολη από ό,τι ήταν για το 5G, το οποίο στηρίχθηκε σε πιο ανεπτυγμένα θεμέλια, λόγω της ανωριμότητας των τεχνολογιών και των μεθόδων κατασκευής. Θα είναι πιο δύσκολο για το 6G να παρέχει επικοινωνία THz και πολυάριθμες νέες περιπτώσεις χρήσης στην παραδοσιακή δεκαετή περίοδο. Η επικοινωνία THz στο 6G μοιάζει απίθανη δεδομένης της κατάστασης της ωριμότητας των υποκείμενων τεχνολογιών και της απαραίτητης ανάπτυξης. Το πιο πιθανό σενάριο είναι ότι η επικοινωνία THz θα είναι διαθέσιμη εγκαίρως για το 7G (Alwis Ch, 2021).

## **Κεφάλαιο 3ο : Terahertz**

### **3.1 Η τεχνολογία**

Η τεχνολογία THz έχει προσελκύσει αυξανόμενο επιστημονικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Ωστόσο, η ανθρωπότητα έχει χρησιμοποιήσει και εξερευνήσει εδώ και πολύ καιρό ολόκληρο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Η ανθρώπινη επιβίωση εξαρτιόταν πλήρως από την ηλιοφάνεια ακόμη και στην προϊστορική εποχή, και ακόμη και οι άνθρωποι των σπηλαίων χρησιμοποιούσαν φακούς. Γύρω στο 1000 π.Χ. δημιουργήθηκαν τα κεριά, αλλά γρήγορα αντικαταστάθηκαν από το αέριο και τους λαμπτήρες πυρακτώσεως, τους οποίους ανακάλυψε ο Έντισον το 1879. Στη συνέχεια, προς το τέλος του 18ου και τις αρχές του 19ου αιώνα, σημειώθηκαν σημαντικές τεχνολογικές εξελίξεις που οδήγησαν στην ανακάλυψη των ραδιοκυμάτων και, κατά συνέπεια, του ραδιοφώνου το 1986, των ακτίνων X το 1895, της υπέρυθρης ακτινοβολίας (UV) το 1901 και του ραντάρ το 1936.





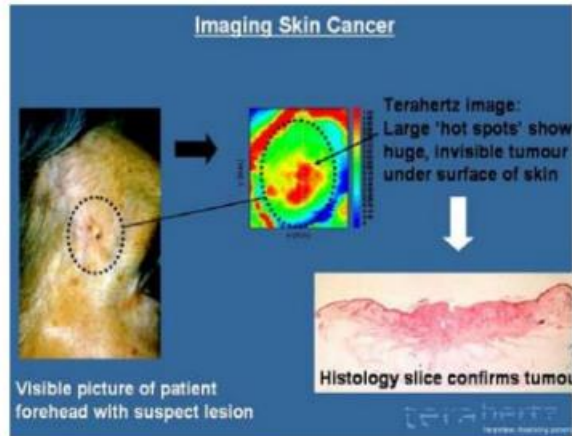
Σχήμα 1: THz φάσμα συχνοτήτων. Πηγή: Abd-Elhady et al., 2012.

Για τους ερευνητές της ηλεκτρονικής και της φωτονικής τεχνολογίας, το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα από 10 m έως 1 mm - που αντιστοιχεί σε συχνότητες από 300 GHz έως 30 THz - παραμένει ένα πρόβλημα. Για παράδειγμα, η ανάπτυξη λέιζερ που λειτουργούν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και στην περιοχή THz είναι αρκετά δύσκολη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, με εξαίρεση φυσικά τα λέιζερ ελεύθερων ηλεκτρονίων, τα οποία μπορούν να φτάσουν ακόμη και τα kilowatts ενέργειας, όπως φαίνεται στο διάγραμμα στα αριστερά, οι πηγές THz μπορούν να δημιουργήσουν μόνο milliwatts ή ακόμη και microwatts ενέργειας. Δεδομένου ότι η ενέργεια των φωτονίων σε ένα THz είναι σημαντικά χαμηλότερη από τη θερμική ενέργεια ενός τυπικού δωματίου, η οποία είναι 26 meV, η ενέργεια αυτή στην πραγματικότητα "χάνεται" αφού είναι πολύ χαμηλότερη. Δηλαδή, συνεχίζει να είναι αμελητέα σε σχέση με την ενέργεια που υπάρχει. Όμως, παρά τις προκλήσεις αυτές, το ενδιαφέρον για τις τεχνολογίες terahertz επεκτείνεται με εκθετικό ρυθμό.

Αυτό οφείλεται κυρίως στο ευρύ φάσμα χρήσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όπως η απεικόνιση αντικειμένων, η τομογραφία, το ραντάρ, ο βιομηχανικός έλεγχος, η ιατρική, η βιολογία, η εξερεύνηση του διαστήματος, ακόμη και η εθνική ασφάλεια. Παρακάτω θα εξετάσουμε διάφορες περιπτώσεις.

### 3.2 Χρήσεις

Η χρήση της τεχνολογίας terahertz για την απεικόνιση αντικειμένων για χρήση στην παραγωγή, τη βιολογία και την ιατρική είναι η σημαντικότερη χρήση της (Semenov, 2009).

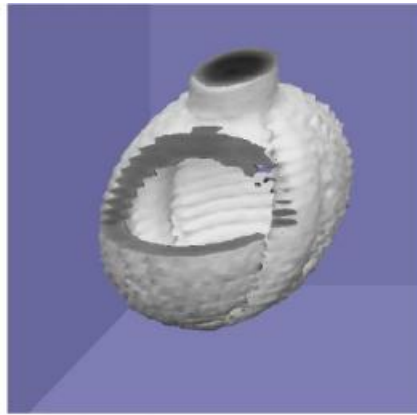


Σχήμα 2: Απεικόνιση καρκίνου του δέρματος. Πηγή: Abd-Elhady et al., 2012.

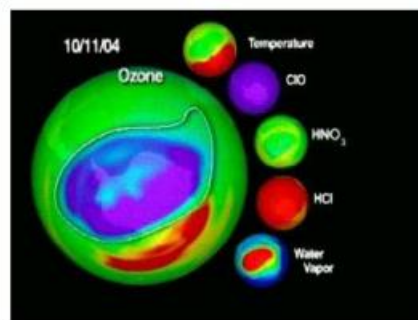


Σχήμα 3: Απεικόνιση ενός φύλλου και του ίδιου, 48 ώρες αργότερα. Πηγή: Abd-Elhady et al., 2012.

Αυτές οι εικόνες δείχνουν πώς να απεικονίζονται βιολογικοί ιστοί με τη χρήση του φάσματος THz. Η εικόνα 3 δείχνει την απεικόνιση ενός φύλλου και την απεικόνιση του ίδιου φύλλου 48 ώρες αργότερα. Η εικόνα 2 δείχνει την απεικόνιση ενός καρκίνου του δέρματος με χρήση της τεχνολογίας THz. Οι εικόνες 4 και 5 δείχνουν την τρύπα του όζοντος και, αντίστοιχα, πώς χρησιμοποιείται η απεικόνιση THz στον βιομηχανικό τομέα για την απεικόνιση της κοιλότητας μιας μπάλας του γκολφ. Η εικόνα 6 δείχνει πώς χρησιμοποιείται αυτή η τεχνική για την ανίχνευση όπλων. Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι τεχνικές εκπομπής και λήψης terahertz μπορούν και οι δύο να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση εκρηκτικών υλών, δεδομένου ότι εκμεταλλεύονται το φαινόμενο της διάχυσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, το οποίο εξαλείφει την ανάγκη οπτικής επαφής με το αντικείμενο (Kiourti A, 2012).



Σχήμα 4: Τρύπα του όζοντος. Πηγή: Abd-Elhady et al., 2012.



Σχήμα 5: Απεικόνιση μπάλας του γκολφ. Πηγή: Abd-Elhady et al., 2012.



Σχήμα 6: Ακτινοβολία για ανίχνευση όπλων. Πηγή: Abd-Elhady et al., 2012.

Η ακτινοβολία THz εξακολουθεί να ερευνάται για χρήση σε πρακτικές εφαρμογές. Μια μελλοντική λύση που θα βελτιώσει τη διαγνωστική ιατρική και θα ενισχύσει την κατανόηση πολλών βιολογικών διαδικασιών σε κυτταρικό και μοριακό

επίπεδο είναι η βιοϊατρική απεικόνιση και φασματοσκοπία THz. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των κυμάτων THz είναι ότι αφήνουν ένα χαρακτηριστικό THz "αποτύπωμα" όταν αλληλεπιδρούν με βιομόρια όπως πρωτεΐνες και μόρια DNA, μεταξύ άλλων (Kourti A, 2012).

Το φαινόμενο αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι το φάσμα THz περιλαμβάνει ενδομοριακές και διαμοριακές περιστροφικές δονήσεις. Επιπλέον, οι συχνότητες THz απορροφώνται έντονα από τους δεσμούς υδρογόνου και μειώνονται σημαντικά όταν ταξιδεύουν μέσα από υλικά που περιέχουν πολύ νερό. Η επίπτωση αυτή θεωρείται μη ελκυστική με την πρώτη ματιά. Ωστόσο, από μακροσκοπική άποψη, η ακτινοβολία THz μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση απίστευτα λεπτών μεταβολών στην περιεκτικότητα των ιστών σε νερό, όπως η ανάπτυξη αίματος σε κακοήθεις ιστούς. Οι προσεγγίσεις βιολογικής απεικόνισης THz βασίζονται σε αυτά τα χαρακτηριστικά των ακτίνων THz και στη μη ιονίζουσα φύση τους. Δεδομένου ότι οι σύγχρονες πηγές THz έχουν ισχύ εξόδου μικρότερη από 1 W, οι θερμικές επιπτώσεις των ακτίνων THz στα έμβια όντα θεωρούνται ελάχιστες (Kourti A, 2012).

Ο συνδυασμός της στατικής ανατομικής απεικόνισης με τη γνώση που προσφέρει η λειτουργική απεικόνιση με τη χρήση ποικίλων απεικονιστικών τεχνικών αποτελεί τη βάση για το μέλλον της ιατρικής απεικόνισης και τις ανάγκες της διαγνωστικής ιατρικής. Η εύρεση δεικτών που μπορούν να δείξουν την πρωτεϊνική δραστηριότητα και τη χημική σύσταση των κυττάρων ακόμη και σε πραγματικό χρόνο είναι ο κύριος στόχος της τρέχουσας έρευνας. Η απεικόνιση και η φασματοσκοπία THz θα προωθήσουν τη σύζευξη μακροσκοπικών και μικροσκοπικών δεδομένων σε αυτή την προσπάθεια. Για παράδειγμα, η ανατομική απεικόνιση THz ενός κακοήθους ιστού από μακροσκοπική άποψη αποκαλύπτει την αλλοίωση που έχει προκαλέσει η κακοήθεια στον κυτταρικό ιστό. Οι τεχνικές απεικόνισης THz μπορούν να εντοπίσουν τις εμπλεκόμενες πρωτεΐνες και να τις προσδιορίσουν βιοχημικά, διότι οι αλλαγές στη δομή των κυττάρων και των ιστών προκαλούνται πιθανότατα από τις διασταυρώσεις και τη σύνδεση συγκεκριμένων πρωτεϊνών από μικροσκοπική άποψη (Kourti A, 2012).

Η ανάγκη δημιουργίας αξιόπιστων και αποτελεσματικών συστημάτων THz αποδεικνύεται από τα πολυάριθμα παραδείγματα χρήσης των συχνοτήτων THz σε βιοϊατρικές εφαρμογές. Χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση νευροδιαβιβαστών που συνδέονται με θεμελιώδεις εγκεφαλικές δραστηριότητες. Οι ακτινοβολίες THz επιτρέπουν την εκτίμηση *in vivo* των αλλαγών στη συγκέντρωση των ιστών και την απεικόνιση υψηλής αντίθεσης του αίματος και άλλων ιστών. Επιπλέον, οι οδοντικές βλάβες μπορούν να ανιχνευθούν αρκετά νωρίς. Το βάθος και ο βαθμός των δερματικών εγκαυμάτων μπορούν να μετρηθούν και τα επίπεδα υγρασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της διαδικασίας επούλωσης. Οι τεχνικές απεικόνισης THz καθιστούν επίσης δυνατή την αναγνώριση του υποδόριου καρκίνου και τη μέτρηση της σοβαρότητάς του (Kourti A, 2012).

Ανάλογα με την πηγή που χρησιμοποιείται, τα συστήματα THz μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο ομάδες: THz και συστήματα συνεχούς κύματος THz (CW). Τα πρώτα χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που χρειάζονται δεδομένα πλάτους και φάσης σε ένα ευρύ φάσμα και μετρούν κύματα THz στο πεδίο του χρόνου. Τα συστήματα

συνεχούς κύματος συλλέγουν πληροφορίες μόνο για το πλάτος της ακτινοβολίας, αλλά προσφέρουν υψηλή χωρική ανάλυση και πολύ υψηλό σηματοθορυβικό λόγο (SNR). Επιπλέον, είναι φθηνά και απλά στη δημιουργία τους με μεταγενέστερη επεξεργασία. Αυτά τα συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή διαφόρων τύπων πληροφοριών για κάθε μετρούμενο βιολογικό δείγμα σε συνδυασμό με διάφορες γεωμετρικές απεικόνισης, διάδοσης ή ανάκλασης. Η προετοιμασία των δειγμάτων αποτελεί σημαντική πρόκληση, διότι πρέπει να είναι κατάλληλα για μέτρηση στην ακτινοβολία THz και πρέπει επίσης να τηρούν ένα συγκεκριμένο πρωτόκολλο που να επιτρέπει την αποτελεσματική σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ τους. Η λυοφιλοποίηση είναι μια τεχνική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε λεπτά, φρεσκοκομμένα δείγματα για τη διατήρηση της υγρασίας στο δείγμα, στον ιστό ή στα κύτταρα για *in vitro* μετρήσεις. Η μέθοδος φίλτρου πολυμερικής μεμβράνης, η οποία βυθίζει και στεγνώνει το δείγμα, επιτρέπει την προετοιμασία δειγμάτων βιομορίων με βάση το διάλυμα (DeSantis et al., 2013).

### 3.3 Ιδιότητες

Η ITU ( International Telecommunication Union) ορίζει ως "ακτινοβολία THz" το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με συχνότητες μεταξύ 0,3 και 3 THz. Η ακτινοβολία THz, ωστόσο, φαίνεται συχνά να αναφέρεται σε ένα ευρύτερο φάσμα συχνοτήτων, από 100 GHz έως 10 THz, στις ερευνητικές προσπάθειες. Δεδομένου ότι το φάσμα THz βρίσκεται συχνά μεταξύ των μικροκυμάτων και της υπέρυθρης ακτινοβολίας, μπορεί να δημιουργηθεί ή να ανιχνευθεί κατά προσέγγιση με τη χρήση ηλεκτρονικών και φωτονικών τεχνικών. Η ακτινοβολία THz παρατηρήθηκε για πρώτη φορά από τους E. Nichols και J. Tear το 1923, ενώ τα χαρακτηριστικά της ήταν γνωστά από το 1890, όταν η ακτινοβολία μέλανος σώματος μετρήθηκε με τη χρήση βολτομέτρου. Ωστόσο, το φάσμα THz παρέμεινε για πολλά χρόνια ανεκμετάλλευτο, λόγω των προκλήσεων της ανάπτυξης αξιόπιστων πηγών και ανιχνευτών αυτών των συχνοτήτων (DeSantis et al., 2013).

Καθώς όμως η μικροηλεκτρονική, η φωτοτεχνία και η νανοτεχνολογία προχωρούσαν, το ίδιο συνέβη και με το ενδιαφέρον και τη χρήση των ακτίνων THz. Η αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας THz με την ύλη επιδεικνύει μοναδικές ιδιότητες που την καθιστούν ελκυστική για μια σειρά εφαρμογών. Τα μόρια νερού και τα μέταλλα είναι αδιαφανή στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα THz, σε αντίθεση με την πλειονότητα των μη αγώγιμων υλικών και των διηλεκτρικών. Τα συστήματα απεικόνισης THz έχουν χαμηλότερη χωρική ανάλυση από τις οπτικές συχνότητες, επειδή το μήκος κύματος της ακτινοβολίας THz είναι μεγαλύτερο από αυτό των οπτικών συχνοτήτων. Ωστόσο, σε αντίθεση με το ορατό φως, το μεγάλο μήκος κύματος δεν διαχέεται σε μικρού μεγέθους κοκκώδη υλικά. Με άλλα λόγια, πράγματα όπως οι κόκκοι ή η σκόνη, τα οποία είναι αδιαφανή στις οπτικές συχνότητες, μπορούν να διαπεραστούν από την ακτινοβολία THz (DeSantis et al., 2013).

Επιπλέον, οι ακτίνες THz έχουν χαρακτηριστεί ως μη ιονίζουσες και επομένως είναι ασφαλείς για τους βιολογικούς ιστούς, επειδή δεν διαθέτουν την ενέργεια (0,4 - 41 milli-eVs) που απαιτείται για τον ιονισμό ενός βιομορίου.

Τα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας THz συνοψίζονται ως εξής:

Μπορούν να περάσουν μέσα από μη αγώγιμα και διηλεκτρικά υλικά όπως το χαρτί και το ύφασμα, αλλά εξασθενούν γρήγορα όταν συναντούν μέταλλα και νερό. Σε γενικές γραμμές, επιδεικνύουν διαφορετικά επίπεδα διείσδυσης για διάφορα υλικά.

Η χωρική ανάλυση αυξάνεται καθώς μειώνεται το μήκος κύματος. Κατά συνέπεια, οι συχνότητες THz έχουν χειρότερη ανάλυση από τις οπτικές συχνότητες και μεγαλύτερη ανάλυση από τις μικροκυματικές συχνότητες (DeSantis et al., 2013).

Οι ακτίνες THz δεν ιονίζονται.

Σε σύγκριση με τις οπτικές συχνότητες, παρουσιάζουν μικρή διασπορά. Σε σύγκριση με τα μικροκύματα, ένα μέτωπο δέσμης THz είναι απλούστερο στην ευθυγράμμιση.

Φασματοσκοπία: μεγάλα μόρια και βιομόρια έχουν χαρακτηριστική απόκριση στις THz συχνότητες, η οποία συνήθως καλείται THz φασματικό «αποτύπωμα».

Αυτές οι ιδιότητες, οι οποίες καθιστούν την ακτινοβολία THz κατάλληλη για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στον πραγματικό κόσμο, πυροδότησαν την έρευνα για την εξέλιξη της τεχνολογίας THz τα τελευταία δέκα χρόνια. Η περιοχή συχνοτήτων THz αποτελεί την επόμενη εξέλιξη στην ασύρματη επικοινωνία. Στο εγγύς μέλλον, θα υπάρχει συνεχής ανάγκη για ταχύτερη μετάδοση μεγαλύτερου όγκου δεδομένων, η οποία θα απαιτεί συχνότητες λειτουργίας περίπου 100 Gbps (DeSantis et al., 2013).

Για την ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιών THz, ωστόσο, θα πρέπει να επιλυθούν πολυάριθμα πρακτικά ζητήματα, όπως το ζήτημα της σοβαρής εξασθένησης σε μεγάλες αποστάσεις που προκαλείται από την απορρόφηση από τους υδρατμούς και η σημαντική εξάρτηση της μετάδοσης από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Μια σημαντική εφαρμογή των ακτίνων THz στον τομέα της εθνικής ασφάλειας, όπως η ασφάλεια αεροδρομίων, η ταχυδρομική ασφάλεια κ.λπ., είναι η ανίχνευση και ο χαρακτηρισμός χημικών ουσιών που περιέχονται σε σφραγισμένες επιστολές, δέσμες χαρτιού ή ρούχα. Ο φασματογράφος THz χρησιμοποιήθηκε για τη φωτογράφιση παράνομων ουσιών, συμπεριλαμβανομένων των μεθαμφεταμινών και του MDMA, οι οποίες ανακαλύφθηκαν σε σφραγισμένο χάρτινο φάκελο με απλή ασπιρίνη (DeSantis et al., 2013).

Κάθε ουσία είχε μια ξεχωριστή αντίδραση που κατέστησε δυνατή τη διάκριση της μιας ουσίας από την άλλη. Σε μια άλλη περίπτωση, οι μετρήσεις της διαδιδόμενης και ανακλώμενης ακτινοβολίας μέσω μιας ποικιλίας σπόρων *Bacillus* και πλαστικών εκρηκτικών υλών με τη χρήση ενός ευρυζωνικού παλμικού ηλεκτρονικού ανακλασίμετρου THz έδειξαν ότι η φασματική έξοδος ήταν πολύ συγκεκριμένη για τη σύνθεση του υλικού, ακόμη και όταν μεταβλήθηκε η μορφολογία και η θέση του. Τα συστήματα THz έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για πολυάριθμες μελέτες απεικόνισης ολόκληρου του σώματος, όπου είναι δυνατόν να διακρίνει κανείς με μεγάλη αντίθεση αν ένα άτομο φέρει ένα μεταλλικό αντικείμενο, όπως ένα πιστόλι ή ένα μαχαίρι.

Το φάσμα συχνοτήτων THz στην αστρονομία επιτρέπει τη μελέτη του ψυχρού Σύμπαντος. Αυτό οφείλεται σε τρεις παράγοντες: Τα αντικείμενα με θερμοκρασία μεταξύ 4 και 100 K εκπέμπουν ακτινοβολία μέλανος σώματος που ανήκει στο φάσμα

THz. Οι διεγέρσεις, οι περιστροφές και οι δονήσεις THz παράγονται από συγκρούσεις χαμηλής θερμοκρασίας των διαστελλόμενων μορίων αερίου- ορισμένα υλικά που υπάρχουν ως κόκκοι και σκόνη, όπως ο γραφίτης, είναι διαφανή στις ακτίνες THz. Η φυσική του σχηματισμού των βαρέων στοιχείων και των νέων γαλαξιών, καθώς και η εξέλιξη και η σύνθεση των πλανητών, είναι όλα θέματα που η ακτινοβολία THz είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση. Η συλλογή δεδομένων με τη χρήση τηλεσκοπίων THz πρέπει να γίνεται από το διάστημα, σε ξηρή ατμόσφαιρα ή σε συγκεκριμένα υψόμετρα. Το 1996 εκτοξεύθηκε από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ESA) το Infrared Space Observatory, ένα ψυχόμενο τηλεσκόπιο διαμέτρου 60 cm με φασματοσκόπιο μεγάλου μήκους κύματος (THz) (Lombart N, 2013).

Η φασματοσκοπία THz χρησιμοποιείται συχνά για τον έλεγχο της ποιότητας γεωργικών και φαρμακευτικών προϊόντων. Η φασματοσκοπία THz θεωρείται μη επεμβατική μορφή ελέγχου, δεδομένου ότι οι ακτίνες THz μπορούν να περάσουν μέσα από την πλειονότητα των υλικών. Ως αποτέλεσμα, η τεχνολογία THz μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλη τη διαδικασία επεξεργασίας, συντήρησης και συσκευασίας τροφίμων. Το φάσμα απορρόφησης στο έλαιο από πίτουρο ρυζιού σε εύρος 0,2-1,6 THz συμφωνεί απόλυτα με αυτό που προσδιορίστηκε από τη θεωρία λειτουργικών πυκνοτήτων (DFT). Επιπλέον, τρεις διαφορετικοί τύποι οξέων που βρίσκονται στα σπορέλαια αναλύθηκαν ποσοτικά με τη χρήση φασματοσκοπίας THz στο πεδίο του χρόνου (Lombart N, 2013).

Η τεχνολογία THz έχει χρησιμοποιηθεί για την ποσοτική μέτρηση και ανάλυση της υγρασίας που υπάρχει στους σπόρους σιταριού. Η ανακάλυψη 11 αντιβιοτικών σε μια πραγματική μήτρα τροφίμων είναι ένα άλλο παράδειγμα. Η έρευνα έχει γενικά αποδείξει ότι η φαρμακευτική βιομηχανία και η βιομηχανία τροφίμων μπορούν να χρησιμοποιήσουν την τεχνολογία THz για τους ακόλουθους σκοπούς: χαρακτηρισμός και κατηγοριοποίηση, ποσοτική και ποιοτική ανάλυση, αξιολόγηση της ποιότητας και έλεγχος της ασφάλειας. Μια άλλη εφαρμογή της ακτινοβολίας THz είναι στον τομέα των στρατιωτικών αμυντικών συστημάτων, όπου παλμοί THz με ευρύ φάσμα συχνοτήτων παράγονται από ραντάρ THz (ραντάρ). Η επίστροφή απορρόφησης στενής ζώνης του ραντάρ των αεροσκαφών stealth απομακρύνεται από τους παλμούς μεγάλης εμβέλειας. Τέλος, η εξέλιξη των συστημάτων THz στις ιατρικές και βιοϊατρικές εφαρμογές έχει τεράστιο αντίκτυπο (Lombart N, 2013).

### 3.4 Παραγωγή και ανίχνευση

Για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα, η δημιουργία και η ανίχνευση συχνοτήτων THz ήταν ένα πολύ δύσκολο εγχείρημα, γι' αυτό και το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα THz περιγράφηκε για πρώτη φορά ως έχον χάσμα THz. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη μίμηση της ακτινοβολίας THz είναι τόσο ηλεκτρικές όσο και φωτονικές, επειδή οι συχνότητες αυτές εμπίπτουν μεταξύ μικροκυμάτων και υπέρυθρων. Τα φωτόνια THz έχουν πολύ χαμηλότερη ενέργεια από τις διεγέρσεις ηλεκτρονίων των συνηθισμένων ατόμων και μορίων που χρησιμοποιούνται στα λέιζερ και σε άλλες πηγές φωτός. Όταν ένα φωτόνιο 1 THz έχει ενέργεια 4 meV, οι ημιαγωγοί που χρησιμοποιούνται στις πηγές φωτός στερεάς κατάστασης έχουν κενό ενός βολτ ηλεκτρονίων. Το ανακτημένο εύρος

συχνοτήτων είναι περιορισμένο ακόμη και στην περίπτωση πηγών που βασίζονται σε δονητικές διεγέρσεις, όπως οι διεγέρσεις μορίων CO<sub>2</sub> (Lombart N, 2013).

Κατά την προσπάθεια χρησιμοποίησης οπτικών ανιχνευτών για συχνότητες THz, προκύπτουν αντίστοιχα προβλήματα, καθώς ένα φωτόνιο THz δεν μπορεί να διεγείρει μια φωτοδίοδο ή να οδηγήσει σε εκπομπή ηλεκτρονίων σε έναν φωτοπολλαπλασιαστή σωλήνα. Από την άλλη πλευρά, το μέγεθος των ηλεκτρονικών συσκευών και των συστατικών μερών μειώνεται συνεχώς, ενώ ο ρυθμός μετάδοσης του σήματος αυξάνεται πάντα (ή αλλιώς των ηλεκτρονίων που διέρχονται από το ηλεκτρονικό σύστημα). Για τη συνεχή αυτή πρόοδο είναι απαραίτητη η σε βάθος κατανόηση των χαρακτηριστικών των υλικών σε πολύ υψηλές συχνότητες. Η παραγωγή πολύ λεπτών στρωμάτων ή κβαντικών φρεατίων, καθώς και η σμίκρυνση εξαρτημάτων και κυκλωμάτων στην περιοχή των νανομέτρων, καθίστανται δυνατές χάρη σε νέες τεχνικές όπως η λιθογραφία με ηλεκτρονική δέσμη και σε νέους, καθαρότερους ημιαγωγούς. Ωστόσο, οι ηλεκτρονικές προσεγγίσεις στις συχνότητες THz εξακολουθούν να αποτελούν πρόκληση.

Ιστορικά, η θερμική εκπομπή μέλανος σώματος ήταν μια πολύ δημοφιλής τεχνική για την παραγωγή ακτινοβολίας THz. Στους 300 K, ή σε θερμοκρασία δωματίου, η θερμική ενέργεια είναι της τάξης των 25 meV, πράγμα που σημαίνει επίσης ότι όλα τα πράγματα εκπέμπουν ακτινοβολία μέλανος σώματος στην περιοχή THz. Ως αποτέλεσμα, ένα βολτόμετρο που έχει ψυχθεί σε θερμοκρασίες υγρού ήλιου μπορεί να ανιχνεύσει ακτινοβολία THz. Ωστόσο, επειδή τόσο η επιδιωκόμενη πηγή όσο και κάθε αντικείμενο στο παρασκήνιο παράγουν ακτινοβολία THz, η θερμική ακτινοβολία που έχει εντοπιστεί είναι ακανόνιστη και εξαιρετικά δυνατή. Οι πυροηλεκτρικοί ανιχνευτές, οι κυψέλες Golay και τα βολόμετρα θερμών ηλεκτρονίων είναι μερικοί από τους θερμικούς ανιχνευτές που έχουν εξελιχθεί με την τεχνολογία THz (HEBs). Οι HEBs, σε αντίθεση με τους παλαιότερους θερμικούς ανιχνευτές που παρουσιάζουν απορρόφηση ισχύος, παράγουν φάσμα και φασματική πληροφορία όταν συνδυάζονται με την κατάλληλη τεχνολογία ανίχνευσης ετεροδύνου. Σύμφωνα με έρευνες σχετικά με τους HEBs, το γραφένιο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στη θέση του ημιαγωγού ή του υπεραγωγού για την αύξηση της ευαισθησίας σε θερμοκρασία δωματίου (Lombart N, 2013).

Η πιο δημοφιλής επιλογή για εφαρμογές THz είναι τα HEBs. Οι δίοδοι Schottky, οι οποίες λειτουργούν σε θερμοκρασίες μεταξύ 4 και 300 K, βρίσκονται στη δεύτερη θέση. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για άμεση ανίχνευση ή, όπως οι HEBs, για σύμμορφη ανίχνευση με περιεχόμενο φάσματος όταν χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με ένα σύστημα ετεροδυνίας. Τα ηλεκτρονικά στερεάς κατάστασης, όπως ταλαντωτές, ενισχυτές και πολλαπλασιαστές, μαζί με διόδους (όπως η δίοδος Gunn), χρησιμοποιούνται συνήθως σήμερα για τη δημιουργία συχνοτήτων μεταξύ 200 GHz και 1 THz. Το klystron, ο σωλήνας ταξιδιωτικού κύματος, ο ταλαντωτής ανάστροφου κύματος και το γυροτρόνιο είναι περαιτέρω πηγές που χρησιμοποιούν την ελεύθερη κίνηση ηλεκτρονίων και είναι πηγές μικροκυματικών συχνοτήτων που ανάγονται σε αυτές τις συχνότητες. Μικρές και απλές πηγές Smith-Purcell μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία ακτινοβολίας συνεχούς κύματος (CW) THz. Αντίθετα, συχνότητες μεγαλύτερες από 2 THz παράγονται με τη χρήση κβαντικών λέιζερ καταρράκτη, μιας κατηγορίας λέιζερ ημιαγωγών.



Οι τεχνικές της φωτοαγωγιμότητας και της οπτικής ανόρθωσης, οι οποίες εξαρτώνται από τη μη γραμμική αλληλεπίδραση ενός μικρού οπτικού παλμού με έναν ημιαγωγό, είναι ζωτικής σημασίας για την παραγωγή και την ανίχνευση ακτινοβολίας THz. Στην πρώτη περίπτωση, ένας οπτικός παλμός διάρκειας femtosecond φωτίζει τον χώρο μεταξύ δύο ηλεκτροδίων σε έναν φωτοαγωγό (όπως το GaAs) για να παράγει ένα φορτίο που επιταχύνεται με την εφαρμογή ενός ισχυρού στατικού ηλεκτρικού πεδίου. Η ακτινοβολία THz παράγεται από τη χρονική μεταβολή της πολικότητας. Αυτή η βασική ιδέα διέπει τη λειτουργία των φωτοαγωγικών κεραιών. Όταν ένας πολύ στενός παλμός λέιζερ διέρχεται μέσα από έναν κρύσταλλο με σημαντική ποσότητα μη γραμμικής οπτικής επιδεκτικότητας δεύτερης τάξης ((2)(t)), όπως το GaAs, το GaP και το ZnTe, παράγεται ακτινοβολία THz στο δεύτερο σενάριο (Lee, 2009).

## Κεφάλαιο 4ο: Μοντελοποίηση διάδοσης

### 4.1 Παράμετροι μοντέλου διάδοσης

Οι παράμετροι που πρέπει να αναλυθούν για τη δημιουργία ενός μοντέλου καναλιού στο φάσμα των terahertz είναι:

- Απώλειες διάδοσης καθώς το σήμα διαδίδεται μέσα στο κανάλι (path loss). Σε αυτό το φάσμα η εξασθένιση του σήματος είναι λόγω μοριακής απορρόφησης και σκέδασης του στα ατμοσφαιρικά μόρια και στις επιφάνειες του περιβάλλοντος χώρου. Η μετρική αυτή μπορεί να ποσοτικοποιηθεί μέσω του νόμου Beer-Lambert ο οποίος συσχετίζει την απόσβεση του σήματος λόγω του μήκους της διαδρομής, το συντελεστή απορρόφησης και τη συγκέντρωση των αερίων του μέσου διάδοσης.
- Η διαφορά υστέρησης (delay spread) είναι μια ακόμη σημαντική μετρική σε ένα μοντέλο καναλιού. Πρόκειται για τη χρονική διαφορά της άφιξης του πρώτου και του τελευταίου μέρους του σήματος στο δέκτη, η οποία στο εύρος των terahertz δεν είναι αμελητέα. Κύρια αιτία της είναι η πρόσκρουση του σήματος σε εμπόδια που βρίσκονται στο περιβάλλοντα χώρο και μπορεί να οδηγήσει σε διαζευκτική παρεμβολή μειώνοντας με αυτό τον τρόπο το λόγο σήματος – θορύβου έχοντας επίπτωση στη απόδοση του συστήματος.
- Η διασπορά Doppler είναι επίσης ένας παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση του συστήματος. Πρόκειται περί της διαφοράς συχνότητας του εκπεμπόμενου και του καταφανούς σήματος λόγω της σχετικής κίνησης πομπού – δέκτη και της ενδεχόμενης κίνησης ολόκληρου του περιβάλλοντος χώρου. Λόγω της υψηλής ταχύτητας των κυμάτων στο φάσμα αυτό μπορεί να επηρεάσει το συγχρονισμό του συστήματος με αρνητική επίδραση στη απόδοση του συστήματος.
- Η χωρητικότητα του καναλιού είναι ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων που μπορεί να επιτευχθεί μέσω του καναλιού και μπορεί να περιορισθεί από όλους τους παραπάνω λόγους. Συνήθης εκτίμηση της μετρικής αυτής γίνεται μέσω του

θεωρήματος Shannon-Hartley που συσχετίζει τη χωρητικότητα του καναλιού με το λόγο σήματος-θορύβου και το συνολικό αριθμό ορθογώνιων διαδρομών.

#### 4.1.1 Διάδοση σε οριζόντια ορατότητα

Η διάδοση μέσω ελεύθερου χώρου χωρίς εμπόδια και άρα φαινόμενα ανάκλασης μεταξύ πομπού-δέκτη είναι το πρώτο βήμα για την δημιουργία οποιουδήποτε μοντέλου καναλιού. Για τη περιγραφή της ατμοσφαιρικής απορρόφησης χρησιμοποιείτε η θεωρία μεταφοράς ενέργειας μέσω ακτινοβολίας (radiative transfer theory). Πρόκειται περί ενός θεωρητικού πλαισίου για μελέτη της διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσω ενός μέσου. Βασίζεται στις αρχές της κβαντικής και στατιστικής φυσικής για την ανάλυση της αλληλεπίδρασης των φωτονίων με τα μόρια που συνθέτουν το μέσο διάδοσης. Σκοπός της θεωρίας είναι η ποσοτική περιγραφή των φαινομένων διασποράς, διάδοσης και απορρόφησης της ακτινοβολίας από το μέσο συσχετίζοντας τα υλικά που το αποτελούν, τη θερμοκρασία, τη πόλωση και συχνότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας και τη χωρική κατανομή της ακτινοβολίας και του μέσου διάδοσης.

Ένα ακόμη βασικό εργαλείο για την περιγραφή της ατμοσφαιρικής απορρόφησης είναι η βάση δεδομένων HITRAN (HIGH RESOLUTION TRANSMISSION). Περιέχει εκείνες τις φασματοσκοπικές παραμέτρους οι οποίες είναι απαραίτητες για τη προσομοίωση και μοντελοποίηση της ατμοσφαιρικής μετάδοσης και ακτινοβολίας ενός σήματος όπως τη διατομή απορρόφησης, τη θέση και ένταση των γραμμών απορρόφησης καθώς και τους συντελεστές διεύρυνσης που προκαλούνται λόγω πίεσης για ένα μεγάλο εύρος αερίων.

Ως απώλεια διαδρομής του σήματος νοείται το άθροισμα των απωλειών λόγω διάδοσης, μοριακής απορρόφησης και ανάκλασης. Σε ένα μοντέλο πολλαπλών διαδρομών λαμβάνεται υπόψη το γεγονός ότι το εκπεμπόμενο σήμα μπορεί να φτάσει στο δέκτη εκτελώντας πολλαπλές διαδρομές με κάθε διαδρομή να υπόκειται σε διαφορετικές παραμέτρους όπως απόσβεση, διαστρέβλωση και υστέρηση. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται τεχνικές ανίχνευσης ακτινών (ray tracing), δηλαδή προσομοιώσεις σε υπολογιστικό περιβάλλον για την εύρεση και ανάλυση των παραπάνω μετρικών για την εκάστοτε διαδρομή.

Οι συχνότητες εκπομπής δε λαμβάνονται μεμονωμένα αλλά σε κλάσεις γειτονικών συχνοτικών ομάδων. Κριτήριο για την συμβατότητα μίας συχνοτικής κλάσης είναι να έχει σε όλο της το εύρος επίπεδη κρουστική απόκριση (impulse response). Ως κρουστική απόκριση νοείται η απόκριση ενός συστήματος όταν η εκπομπή είναι ένας μοναδιαίος παλμός. Για τη περιγραφή της απόκρισης των συχνοτικών ομάδων σε σχέση με το εκπεμπόμενο σήμα χρησιμοποιείται μια μαθηματική αναπαράσταση που ονομάζεται συνάρτηση μεταφοράς (transfer function). Πρόκειται για μια συνάρτηση που ως μεταβλητή λαμβάνει το σήμα εκπομπής και αποδίδει την απόκριση του σήματος εκπομπής στο δέκτη. Αν το φάσμα χωριστεί σε  $i$  συχνοτικές ομάδες κάθε μία εκ των οποίων περιέχει  $N_i$  ακτίνες και σε κάθε  $N_i$  ακτίνα αντιστοιχεί συχνότητα απόσβεσης

$a_{n,i}$  και θέτοντας  $\tau$  την υστέρηση διάδοσης μπορούμε να εκφράσουμε τη συνάρτηση μεταφοράς ως (Tarboush, 2021):

$$h_i(\tau) = \sum_{n=1}^{N_i} a_{n,i} \delta(\tau - \tau_n) \quad \mathbf{E\xi(4.1)}$$

Όπου  $\delta$  υποδηλώνει την συνάρτηση δέλτα του *Kronecker* που παίρνει τη τιμή 1 (ένα) για όρισμα 0 (μηδέν) και μηδέν (0) για οποιοδήποτε άλλο όρισμα. Συνεπώς πρόκειται περί του διακριτού αθροίσματος των συχνοτήτων απόσβεσης που η υστέρηση τους συμπίπτει με την εκάστοτε υστέρηση της εν λόγω συχνότητας.

Αν υπήρχαν μόνο απευθείας διαδρομές (line of sight) η συνάρτηση μεταφοράς θα ήταν η 4.1. Όμως εν γένει στο δέκτη καταφτάνουν και ακτίνες είτε από ανάκλαση είτε από διασπορά ακτινών που έχουν προσπέσει σε τραχιές επιφάνειες και τέλος αν θεωρηθεί το μέσο του καναλιού ανομοιογενές και από περίθλαση. Η μόνη διαφορά των ακτινών λόγω διασποράς από τις ανακλώμενες είναι η μείωση της έντασης της ακτίνας καθώς μπορούμε να δούμε την διασπορά ως μια ατελή ανάκλαση πάνω σε μία επιφάνεια. Εφαρμόζοντας την 4.1 σε κάθε υποομάδα των διασπαρμένων  $N_{\delta i a}^{(i)}$ , περιθλασμένων  $N_{\pi \epsilon \rho}^{(i)}$  και ανακλασμένων  $N_{\alpha \nu \alpha}^{(i)}$  ακτινών τότε η συνάρτηση μεταφοράς δεν θα είναι παρά το διακριτό άθροισμα των επιμέρους υποομάδων:

$$h_i(\tau) = a_{\alpha \pi}^{(i)} \delta(\tau - \tau_{\alpha \pi}) |_{\alpha \pi} + \sum_{p=1}^{N_{\delta i a}^{(i)}} a_{\delta i a}^{(i,p)} \delta(\tau - \tau_{\delta i a}^{(p)}) + \sum_{q=1}^{N_{\pi \epsilon \rho}^{(i)}} a_{\pi \epsilon \rho}^{(i,q)} \delta(\tau - \tau_{\pi \epsilon \rho}^{(q)}) + \sum_{v=1}^{N_{\alpha \nu \alpha}^{(i)}} a_{\alpha \nu \alpha}^{(i,v)} \delta(\tau - \tau_{\alpha \nu \alpha}^{(v)}) \quad \mathbf{E\xi(4.2)}$$

Όπου ο δείκτης  $|_{\alpha \pi}$  λαμβάνει την διακριτή ακολουθία τιμών 0 και 1 ανάλογα με την ύπαρξη απευθείας ακτίνας η όχι μηδενίζοντας στη τελευταία περίπτωση το πρώτο όρο.

Μέσο του θεωρήματος Wiener-Khinchin οι απώλειες σήματος και οι υστερήσεις για κάθε i-κλάση συχνοτήτων, μπορούν να γραφούν:

$$\left( a_{\alpha \pi}^{(i)}, a_{\delta i a}^{(i,p)}, a_{\pi \epsilon \rho}^{(i,q)}, a_{\alpha \nu \alpha}^{(i,v)} \right)^T = \left( |H_{\alpha \pi}(f_i)|, |H_{\delta i a}^p(f_i)|, |H_{\pi \epsilon \rho}^q(f_i)|, |H_{\alpha \nu \alpha}^v(f_i)| \right)^T \quad \mathbf{E\xi(4.3)}$$

Η μετάβαση από τους συντελεστές απόσβεσης στις συναρτήσεις μεταφοράς με όρισμα τις αντίστοιχες συχνότητες δεν είναι τετριμμένη. Το θεώρημα Wiener-Khinchin συσχετίζει τη συνάρτηση πυκνότητας της ισχύς των συχνοτήτων (power spectral density) μίας τυχαίας διαδικασίας με τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της τυχαίας διαδικασίας. Αν θέσουμε ως  $PSD(f)$  τη συνάρτηση πυκνότητας της ισχύς των συχνοτήτων και ως  $R_{xx}(\tau)$  της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης τότε η σχέση είναι:

$$PSD(f) = \text{fourier transform}(R_{xx}(\tau)) \quad \mathbf{E\xi(4.4)}$$

Δηλαδή ο μετασχηματισμός *Fourier* της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης ισούται με τη συνάρτηση πυκνότητας της ισχύς των συχνοτήτων. Η συνάρτηση PSD περιγράφει πως η ισχύς ενός σήματος κατανέμεται στις διαφορετικές συχνότητες που το αποτελούν. Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης περιγράφει τη συσχέτιση ενός σήματος με τον εαυτό του σε ένα εύρος φάσεων στο πεδίο του χρόνου. Στη περίπτωση μας η τυχαία διαδικασία είναι η ίδια η απώλεια διαδρομής και η συνάρτηση PSD ταυτίζεται με την

συνάρτηση μεταφοράς που προσπαθούμε να εξάγουμε, καταλήγοντας στην εξίσωση 4.3.

#### 4.1.1.1 Απευθείας διάδοση

Σκοπός της ανάλυσης αυτής είναι η εξαγωγή μιας συνάρτησης μεταφοράς για κάθε υποπερίπτωση των ακτινών που καταφτάνουν στο δέκτη. Για τις ακτίνες που φτάνουν απευθείας από το πομπό στο δέκτη (line of sight) η συνάρτηση μεταφοράς θα είναι το γινόμενο των συναρτήσεων μεταφοράς των ανεξάρτητων παραγόντων που επηρεάζουν την μετάδοση. Δεδομένου ότι οι παράγοντες αυτοί είναι οι απώλειες λόγω διάδοσης και οι απώλειες λόγω μοριακής απορρόφησης, η συνάρτηση μεταφοράς θα είναι το γινόμενο των αντιστοίχων συναρτήσεων μεταφοράς των δύο αυτών παραγόντων:

$$H_{Los}(f) = H_{\delta\iota\alpha}(f) H_{\alpha\pi}(f) e^{-j2\pi f\tau_{\alpha\pi}} \quad \text{Εξ(4.5)}$$

Στην εξίσωση 4.5 πέραν των συναρτήσεων μεταφοράς απορρόφησης και διάδοσης εμφανίζεται και ένα εκθετικός όρος με μιγαδικό εκθέτη. Το πραγματικό μέρος του εκθετικού όρου υπολογίζει την απόσβεση της ακτίνας ενώ το φανταστικό αναπαριστά τη φάση της. Ως φάση της ακτίνας νοείται η γωνία που σχηματίζει ένα σημείο στο κυματικό μέτωπο σε σχέση με την αρχική του θέση στο σημείο εκπομπής. Ως  $\tau_{\alpha\pi}$  νοείται ο χρόνος που απαιτείται η ακτίνα να φτάσει στο πομπό. Αν θεωρηθεί ότι η ακτίνα ταξιδεύει με τη ταχύτητα του φωτός τότε ο χρόνος αυτός θα ισούται με  $\tau_{\alpha\pi} = \frac{r}{c}$ .

Η συνάρτηση μεταφοράς των απωλειών διάδοσης θα είναι:

$$H_{\delta\iota\alpha}(f) = \frac{c}{4\pi fr} \quad \text{Εξ(4.6)}$$

Όπου  $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός,  $f$  η συχνότητα και  $r$  η απόσταση πομπού-δέκτη.

Η συνάρτηση μεταφοράς των απωλειών λόγω μοριακής απορρόφησης θα είναι:

$$H_{\alpha\pi} = e^{-\frac{1}{2}k(f)r} \quad \text{Εξ(4.7)}$$

Όπου  $k(f)$  είναι ο συντελεστής απορρόφησης του σήματος και είναι συνάρτηση της συχνότητας. Γενικά η εξάρτηση του συντελεστή με τη συχνότητα είναι αύξουσα, δηλαδή η τιμή του αυξάνεται με τη παράλληλη αύξηση της συχνότητας και εξαρτάται από τη σύνθεση του μέσου διάδοσης (μίγμα αερίων).

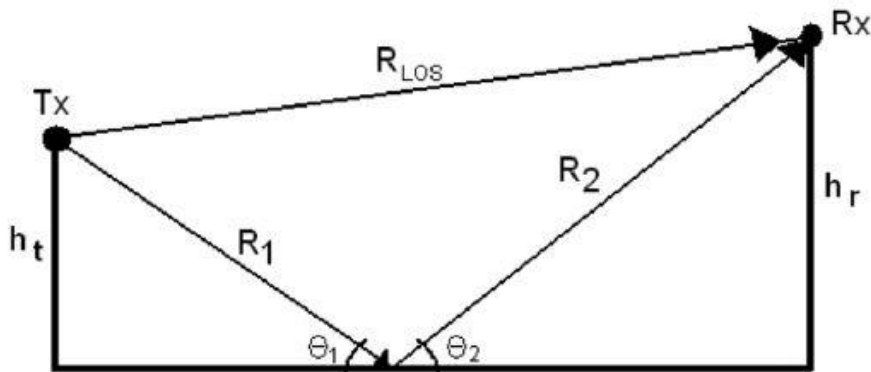
Συνοψίζοντας τις εκφράσεις των εξισώσεων 4.6 και 4.7 στην εξίσωση 4.5 παίρνουμε την αναλυτική έκφραση για τη συνάρτηση μεταφοράς της απευθείας ακτίνας συναρτήσει της συχνότητας:

$$H_{Los} = \frac{c}{4\pi fr} e^{-\frac{1}{2}k(f)r} e^{-j2\pi f\tau_{\alpha\pi}} = \frac{c}{4\pi fr} e^{-\frac{1}{2}k(f)r - j2\pi f\tau_{\alpha\pi}} \quad \text{Εξ(4.8)}$$

#### 4.1.1.2 Διάδοση από ανάκλαση

Όπως και στην απευθείας διάδοση επιθυμούμε την εξαγωγή ενός τύπου για τη συνάρτηση μεταφοράς των ακτινών από ανάκλαση συναρτήσει της συχνότητας. Είναι εύλογο η δομή του τύπου να ομοιάζει σε μεγάλο βαθμό με τη συνάρτηση μεταφοράς από απευθείας διάδοση, με τη διαφορά ότι υπεισέρχεται στο τύπο και ο συντελεστής ανάκλασης  $R(f)$ .

Ο συντελεστής ανάκλασης αναφέρεται στο ποσοστό της εισερχόμενης ενέργειας που αντανακλάται από ένα εμπόδιο ή μια επιφάνεια και εκφράζεται ως αναλογία ισχύος ή τάσης ανάμεσα στην ανακλώμενη ενέργεια και την εισερχόμενη ενέργεια. Αν ο συντελεστής ανάκλασης είναι υψηλός, αυτό σημαίνει ότι μεγάλο ποσοστό της εισερχόμενης ενέργειας αντανακλάται πίσω, ενώ εάν είναι χαμηλός, τότε λίγη ενέργεια αντανακλάται και η πλειονότητα της διοχέτευσης της ενέργειας συνεχίζει να διαδίδεται προς τα εμπρός.



Εικόνα 1. Αναπαράσταση ανακλώμενης και απευθείας ακτίνας που φτάνει στον δέκτη.

Συνεπώς η συνάρτηση μεταφοράς των ανακλώμενων ακτινών θα δίδεται από το τύπο:

$$H_{ref} = H_{\delta\iota\alpha}(f) H_{\alpha\pi}(f) e^{-j2\pi f\tau_{av}} R(f) \quad \text{Εξ(4.9)}$$

Η συνάρτηση μεταφοράς των απωλειών λόγω διάδοσης θα πρέπει να λάβει υπόψη την πλήρη διαδρομή της ακτίνας από το πομπό έως το δέκτη, η οποία θα συνίσταται από την απόσταση πομπού και σημείου ανάκλασης  $r_1$  και την απόσταση σημείου ανάκλασης και δέκτη  $r_2$ . Η μορφή της φυσικά θα είναι κατά τα λοιπά ίδια με την εξίσωση 4.6:

$$H_{\delta\iota\alpha}(f) = \frac{c}{4\pi f(r_1+r_2)} \quad \text{Εξ(4.10)}$$

Η συνάρτηση μεταφοράς των απωλειών λόγω διάδοσης θα είναι ίδια με την περίπτωση απευθείας μετάδοσης δεδομένου ότι το φαινόμενο δεν αλλάζει με τη διαφορά ότι και εδώ πρέπει να ληφθεί υπόψη η διαδρομή της ακτίνας και άρα οι αποστάσεις  $r_1$  και  $r_2$ .

$$H_{\alpha\pi} = e^{-\frac{1}{2}k(f)(r_1+r_2)} \quad \text{Εξ(4.11)}$$

Ο εκθετικός όρος που εμφανίζεται στην εξίσωση 4.8 θα τροποποιηθεί μόνο ως προς το χρόνο για τον οποίο ταξιδεύει η ακτίνα διανύοντας τις αποστάσεις  $r_1$  και  $r_2$ . Εάν δεχτούμε ότι η ακτίνα κινείται με σταθερή ταχύτητα του φωτός τότε ο χρόνος  $\tau_{av}$  θα είναι:

$$\tau_{av} = \frac{r_1+r_2}{c} = \tau_{ap} - \tau_{ap} + \frac{r_1+r_2}{c} = \tau_{ap} - \frac{r}{c} + \frac{r_1+r_2}{c} = \tau_{ap} + \frac{r_1+r_2-r}{c}$$

**Εξ(4.12)**

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση 4.9 τις εκφράσεις 4.10 , 4.11 και 4.12 έχουμε :

$$H_{ref} = \frac{c}{4\pi f(r_1 + r_2)} e^{-\frac{1}{2}k(f)(r_1+r_2)} e^{-j2\pi f\tau_{av}} R(f)$$

Απομένει η εύρεση του συντελεστή ανάκλασης  $R(f)$  ώστε να προκύψει η αναλυτική του έκφραση συναρτήσει της συχνότητας. Για την εύρεση ενός αναλυτικού τύπου θα χρησιμοποιηθεί ένα υβριδικό μοντέλο όπου γίνεται χρήση της θεωρίας σκέδασης κατά Kirchhoff σε συνδυασμό με το συντελεστή διαταραχής Rayleigh.

Ο συντελεστής ανάκλασης συναρτήσει του συντελεστή Fresnel  $\gamma_{TE}$  και του παράγοντα διαταραχής Rayleigh  $\rho(f)$  θα δίδεται από το τύπο:

$$R(f) = \gamma_{TE} \rho(f) \quad \text{Εξ(4.13)}$$

Οι εξισώσεις Fresnel αναφέρονται σε μια σειρά εξισώσεων που περιγράφουν την ανάκλαση και τη διάθλαση του φωτός στο διαχωριστικό επιφανειακό όριο μεταξύ δύο διαφορετικών μέσων και αποτελούν βασικό εργαλείο στην οπτική για να υπολογιστούν οι συντελεστές ανάκλασης και διάθλασης του φωτός στο διαχωριστικό όριο. Διαφέρουν για γραμμικά πολωμένο φως και για μη γραμμικά πολωμένο φως.

Η εξαγωγή ενός αναλυτικού τύπου για το συντελεστή ανάκλασης Fresnel  $\gamma$  εκκινεί από τον ορισμό του για μια μη πολωμένη ακτίνα:

$$\gamma = \frac{E_r}{E_i} \quad \text{Εξ(4.14)}$$

Όπου  $E_r$  είναι το πλάτος του ανακλώμενου ηλεκτρικού πεδίου και  $E_i$  είναι το πλάτος του εισερχόμενου ηλεκτρικού πεδίου. Αν το ηλεκτρικό πεδίο παρασταθεί σε μιγαδική μορφή:

$$E = E_0 e^{i\varphi} \quad \text{Εξ(4.15)}$$

Όπου  $E_0$  είναι το πλάτος του πεδίου και  $\varphi$  η γωνία φάσης. Εκφράζοντας τα πλάτη  $E_r$  και  $E_i$  με αυτό το φορμαλισμό έχουμε, για το εισερχόμενο ηλεκτρικό πεδίο:

$$E_i = E_0 e^{i\varphi_i} \quad \text{Εξ(4.16)}$$

και για το ανακλώμενο ηλεκτρικό πεδίο αντίστοιχα:

$$E_r = r E_0 e^{i\varphi_r} \quad \text{Εξ(4.17)}$$

Όπου  $r$  είναι ο μιγαδικός συντελεστής ανάκλασης και  $\varphi_r$  είναι η αλλαγή φάσης λόγω ανάκλασης. Εισάγοντας τώρα της εξισώσεις 4.16 και 4.17 στον ορισμό 4.14 παίρνουμε:

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{rE_0 e^{i\varphi_r}}{E_0 e^{i\varphi_i}} = \frac{r e^{i\varphi_r}}{e^{i\varphi_i}} = \frac{r \cos(\varphi_r) + i r \sin(\varphi_r)}{\cos(\varphi_i) + i \sin(\varphi_i)} = \frac{r \cos(\varphi_r)}{\cos(\varphi_i)} + i \frac{r \sin(\varphi_r)}{\sin(\varphi_i)} = \\ &= \frac{r \cos(\varphi_r)}{\cos(\theta_i)} + i \frac{r \sin(\varphi_r)}{\sin(\theta_i)} \quad \mathbf{Εξ(4.18)} \end{aligned}$$

Χρησιμοποιήθηκε η φόρμουλα Euler και στο τελευταίο βήμα έγινε η αντικατάσταση τις γωνίας  $\varphi_i$  με τη γωνία του εισερχόμενου ηλεκτρικού πεδίου  $\theta_i$ . Εφαρμόζοντας τώρα την σχέση μεταξύ γωνίας και του μιγαδικού συντελεστή ανάκλασης:

$$\cos(\varphi_r) = \sqrt{1 - \sin^2(\varphi_r)} = \sqrt{1 - \frac{1}{n_i^2} \sin^2(\theta_i)} \quad \mathbf{Εξ(4.19)}$$

Και αντικαθιστώντας την 4.19 στην 4.18 παίρνουμε:

$$\gamma = \frac{r \cos(\varphi_r)}{\cos(\theta_i)} + i \frac{r \sin(\varphi_r)}{\sin(\theta_i)} = \frac{r \sqrt{1 - \frac{1}{n_i^2} \sin^2(\theta_i)}}{\cos(\theta_i)} + i \frac{r \sin(\varphi_r)}{\sin(\theta_i)} \quad \mathbf{Εξ(4.20)}$$

Απλοποιώντας, χρησιμοποιώντας το νόμο του Snell, τον όρο  $\sin(\varphi_r)$ :

$$\sin(\varphi_r) = \frac{n_i}{n_r} \sin(\theta_i) \quad \mathbf{Εξ(4.21)}$$

Όπου  $n_r$  είναι ο δείκτης διάθλασης. Αντικαθιστώντας την 4.21 στην 4.20 παίρνουμε:

$$\gamma = \frac{r \sqrt{1 - \frac{1}{n_i^2} \sin^2(\theta_i)}}{\cos(\theta_i)} + i \frac{r \frac{n_i}{n_r} \sin(\theta_i)}{\sin(\theta_i)} = \frac{r \sqrt{1 - \frac{1}{n_i^2} \sin^2(\theta_i)}}{\cos(\theta_i)} + i r \frac{n_i}{n_r} \quad \mathbf{Εξ(4.22)}$$

Και ορίζοντας τον όρο:

$$\gamma_{TE} = \frac{r \sqrt{1 - \frac{1}{n_i^2} \sin^2(\theta_i)}}{\cos(\theta_i)} \quad \mathbf{Εξ(4.23)}$$

Η 4.23 γράφεται ως:

$$\gamma = \gamma_{TE} + i r \frac{n_i}{n_r} \quad \mathbf{Εξ(4.24)}$$

Ο παραπάνω τύπος αναπαριστά το συντελεστή ανάκλασης Fresnel λαμβάνοντας υπόψη τη διαμήκη ηλεκτρική και μαγνητική συνιστώσα. Ο όρος  $\gamma_{TE}$  αναφέρεται στην ηλεκτρική και ο όρος  $i r \frac{n_i}{n_r}$  στη μαγνητική συνιστώσα και μπορεί να γραφεί προσεγγιστικά:

$$\gamma_{TE} = \frac{r \sqrt{1 - \frac{1}{n_i^2} \sin^2(\theta_i)}}{\cos(\theta_i)} = -1 + \frac{2 \cos(\theta_i)}{\sqrt{n_i^2 - 1}} = -e^{\frac{2 \cos(\theta_i)}{\sqrt{n_i^2 - 1}}} \quad \mathbf{Εξ(4.25)}$$

Ο συντελεστής Rayleigh δίδεται από το τύπο:

$$\rho(f) = e^{-\frac{g}{2}} \quad \mathbf{Εξ(4.26)}$$

Όπου  $g$ , αναπαριστά τη παράμετρο της επιφανειακής διαταραχής. Ως διαταραχή νοείται η απόκλιση από μια λεία επιφάνεια. Ο συντελεστής Rayleigh χρησιμοποιείται

για τη μοντελοποίηση της σκέδασης φωτός από ανωμαλίες επιφάνειας, όπου μεγαλύτερες τιμές του "g" υποδηλώνουν πιο ανώμαλες επιφάνειες με αυξημένη σκέδαση. Ο εκθετικός όρος στον τύπο αντιπροσωπεύει την απόσβεση του ανακλώμενου ή σκορπισμένου φωτός λόγω της επιφανειακής διαταραχής. Η παράμετρος επιφανειακής ανωμαλίας "g" μπορεί να οριστεί με διάφορες συναρτήσεις, ανάλογα με το συγκεκριμένο μοντέλο ή πλαίσιο αναφοράς. Ένας κοινός τρόπος για τον υπολογισμό του "g" είναι μέσω του μέσου τετραγωνικού ύψους (RMS) της επιφανειακής ανωμαλίας:

$$g = \frac{\sigma^2}{2h^2} \quad \text{Εξ(4.27)}$$

όπου  $\sigma$  αναπαριστά την τυπική απόκλιση των μεταβολών ύψους της επιφάνειας και  $h$  είναι η συσχέτιση μήκους, η οποία αντιπροσωπεύει το χαρακτηριστικό μήκος κλίμακας μέσα στο οποίο οι μεταβολές ύψους είναι συσχετισμένες. Αυτός ο τύπος συνδέει την επιφανειακή ανωμαλία με τις στατιστικές ιδιότητες του προφίλ επιφάνειας. Ωστόσο αν εισάγουμε την γωνία πρόσπτωσης  $\theta_i$  ο τύπος 4.27 γίνεται:

$$g = \left( \frac{4\pi\sigma \cos(\theta_i)}{\lambda} \right)^2 \quad \text{Εξ(4.28)}$$

Αντικαθιστώντας την έκφραση 4.28 στην εξίσωση 4.26 παίρνουμε:

$$\rho(f) = e^{-\frac{\left(\frac{4\pi\sigma \cos(\theta_i)}{\lambda}\right)^2}{2}} = e^{-\frac{\left(\frac{4\pi\sigma \cos(\theta_i)}{\frac{c}{f}}\right)^2}{2}} = e^{-\frac{(8\pi\sigma f \cos(\theta_i))^2}{c^2}} \quad \text{Εξ(4.29)}$$

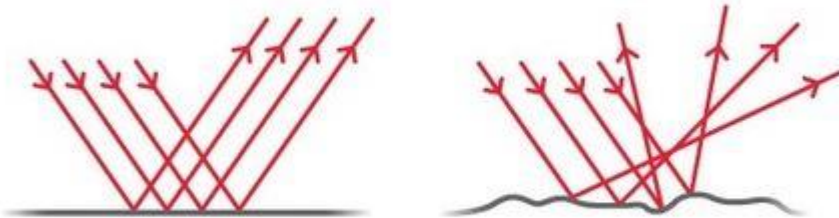
Καταλήγοντας τελικά στο τύπο για το συντελεστή ανάκλασης αντικαθιστώντας στην 4.13 τις εκφράσεις 4.25 και 4.29:

$$R(f) = -e^{\frac{2 \cos(\theta_i)}{\sqrt{n_i^2 - 1}}} e^{-\frac{(8\pi\sigma f \cos(\theta_i))^2}{c^2}} = -e^{\frac{2 \cos(\theta_i)}{\sqrt{n_i^2 - 1}} - \frac{(8\pi\sigma f \cos(\theta_i))^2}{c^2}} \quad \text{Εξ(4.30)}$$

#### 4.1.1.3 Διάδοση από σκέδαση

Η σκέδαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων αναφέρεται στη διαδικασία απόκλισης, διάχυσης ή διάσπασης του φωτός κατά τη διέλευσή του από ένα μέσο ή μια επιφάνεια. Κατά τη σκέδαση, το φως αλληλοεπιδρά με τα σωματίδια ή τις ανωμαλίες του μέσου, προκαλώντας αλλαγές στη φάση και την έντασή του. Αυτό οδηγεί σε αλλαγές στη διαδικασία διάδοσης του φωτός και τη διάχυσή του σε διάφορες κατευθύνσεις (Rappaport, 2019).





Εικόνα 2. Παράδειγμα ανάκλασης (αριστερά) και σκέδασης ακτίνας (δεξιά).

Η σκέδαση προκύπτει όταν το σήμα έρχεται σε επαφή με μια μη λεία επιφάνεια. Το πόσο λεία είναι μια επιφάνεια μπορεί όμως να ποικίλει. Θεωρώντας επιφάνειες όπου η απόκλιση από μια τέλεια λεία επιφάνεια ακολουθεί γκαουσιανή κατανομή και αποκλείοντας αποκλίσεις μεγαλύτερες από το μήκος αυτοσυσχέτισης του σήματος μπορούμε να ορίσουμε ένα συντελεστή σκέδασης  $S(f)$  που να ποσοτικοποιεί την επίδραση της σκέδασης στη συνάρτηση μεταφοράς των σκεδαζόμενων ακτινών. Τότε η συνάρτηση μεταφοράς απωλειών των ακτινών λόγω σκέδασης θα είναι:

$$H_{sca} = H_{δια}(f) H_{απ}(f) e^{-j2\pi f \tau_{sca}} S(f) \quad \text{Εξ(4.31)}$$

Όπου όπως και προηγουμένως  $H_{δια}(f)$  είναι η συνάρτηση μεταφοράς απωλειών λόγω διάδοσης,  $H_{απ}(f)$  η συνάρτηση απωλειών λόγω μοριακής απορρόφησης και  $S(f)$  ο συντελεστής σκέδασης.

Αν ονομάσουμε την απόσταση επαφής της ακτίνας με την επιφάνεια  $s_1$  και την απόσταση από το σημείο επαφής έως το δέκτη  $s_2$  τότε η συνάρτηση μεταφοράς απωλειών λόγω διάδοσης οφείλει να είναι η ίδια με την περίπτωση της ανάκλασης χρησιμοποιώντας ωστόσο τα αντίστοιχα μήκη.

$$H_{δια}(f) = \frac{c}{4\pi f(s_1+s_2)} \quad \text{Εξ(4.32)}$$

Το μήκος αυτοσυσχέτισης (autocorrelation length) είναι μια μέτρηση της απόστασης στην οποία η αυτοσυσχέτιση ενός σήματος ή μιας συνάρτησης μεταβλητής χρόνου έχει μειωθεί σε ένα συγκεκριμένο ποσοστό της αρχικής της τιμής. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση ενός σήματος, η αυτοσυσχέτιση μετράει τη σχέση μεταξύ της τιμής του σήματος σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή και της τιμής του σήματος σε μια χρονική στιγμή που απέχει από αυτήν κατά μια συγκεκριμένη απόσταση. Το μήκος αυτοσυσχέτισης είναι η απόσταση στην οποία η αυτοσυσχέτιση μειώνεται σε ένα συγκεκριμένο ποσοστό της αρχικής τιμής, συνήθως σε ένα επιλεγμένο ποσοστό της τιμής της αρχικής αυτοσυσχέτισης. Το μήκος αυτοσυσχέτισης είναι σημαντικό σε εφαρμογές επεξεργασίας σήματος, καθώς παρέχει πληροφορίες για το πώς το σήμα αλληλοεπιδρά με τον εαυτό του κατά τη διάρκεια του χρόνου. Εδώ η απαίτηση είναι να μην προλαβαίνει να αλληλοεπιδράσει η σκεδαζόμενη ακτίνα με τον εαυτό της πριν απομακρυνθεί αρκετά από το σημείο επαφής της επιφάνειας.

Ομοίως η συνάρτηση μεταφοράς απωλειών λόγω απορρόφησης θα είναι ίδια με την εξίσωση 4.11, χρησιμοποιώντας φυσικά τα αντίστοιχα μήκη:

$$H_{απ} = e^{-\frac{1}{2}k(f)(s_1+s_2)} \quad \text{Εξ(4.33)}$$

Ο εκθετικός όρος που εμφανίζεται στην εξίσωση 4.31 θα τροποποιηθεί μόνο ως προς το χρόνο για τον οποίο ταξιδεύει η ακτίνα διανύοντας τις αποστάσεις  $s_1$  και  $s_2$ . Εάν δεχτούμε ότι η ακτίνα κινείται με σταθερή ταχύτητα του φωτός τότε ο χρόνος  $\tau_{dif}$  θα είναι:

$$\tau_{dif} = \tau_{Los} + \frac{s_1+s_2-r}{c} \quad \text{Εξ(4.34)}$$

Απομένει η εξαγωγή ενός αναλυτικού τύπου για το συντελεστή σκέδασης, ο οποίος ακολουθεί παρόμοια δομή με το συντελεστή ανάκλασης. Δηλαδή:

$$S(f) = \gamma_{TE} s(f) \quad \text{Εξ(4.35)}$$

Όπου  $\gamma_{TE}$  είναι ο συντελεστής ανάκλασης λείας επιφάνειας όπως και στη περίπτωση ανάκλασης και  $s(f)$  είναι μια συνάρτηση που αποδίδει την ευαισθησία σκέδασης ανά τιμή συχνότητας. Υπάρχουν πολλά μοντέλα για την απόδοση του συντελεστή  $s(f)$  όπως το μοντέλο Blinn – Phong και το Torrance Sparrow. Το καθένα αποδίδει ανάλογα με τις παραδοχές για την εξαγωγή του. Στη παρούσα ανάλυση θα χρησιμοποιηθεί το μοντέλο διάχυσης Beckmann - Kirchhoff το οποίο αναφέρεται στη θεωρητική προσέγγιση της διάχυσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από ανώμαλες επιφάνειες. Βασίζεται στην υπόθεση ότι η ανώμαλη επιφάνεια μπορεί να θεωρηθεί ως σύνολο από μικρές ανώμαλες στοιβάδες, και η διάχυση προκύπτει από τη συνεισφορά αυτών των στοιβάδων.

Το μοντέλο Beckmann-Kirchhoff λαμβάνει υπόψη πολλούς παράγοντες για την περιγραφή της διάχυσης, συμπεριλαμβανομένης της γωνίας προς την επιφάνεια, των χαρακτηριστικών της επιφάνειας (όπως η ροπή της επιφάνειας), και της διάστασης της επιφάνειας. Ο συντελεστής σκέδασης  $s(f)$  που χρησιμοποιείται στο μοντέλο περιγράφει την ένταση της διάχυσης σε συγκεκριμένη συχνότητα  $f$ .

$$s(f) = e^{-\frac{g}{2}} \sqrt{\rho_0^2 + \frac{\pi L^2 F^2}{l_x l_y} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{g^m}{m!m} e^{-\frac{V_s}{m}}} \quad \text{Εξ(4.36)}$$

Όπου  $g$  είναι ο συντελεστής διαταραχής της επιφάνειας όπως ορίστηκε στην εξίσωση 4.27,  $\rho_0$  ο συντελεστής ανάκλασης Fresnel για μια λεία επιφάνεια,  $L$  το χαρακτηριστικό μήκος των συστάδων της επιφάνειας,  $F$  είναι ο παράγοντας τάσης διεύθυνσης που λαμβάνει υπόψη την γεωμετρία της σκέδασης,  $l_x$  και  $l_y$  τα αντίστοιχα μήκη της επιφάνειας και  $V_s$  η διασπορά των κλίσεων της επιφάνειας. Συνοψίζοντας τις αναλυτικές εκφράσεις για τους επιμέρους όρους από τις εξισώσεις 4.32 έως 4.35 και αντικαθιστώντας στην 4.31 παίρνουμε:

$$H_{sca} = \frac{c}{4\pi f(s_1+s_2)} e^{-\frac{1}{2}k(f)(s_1+s_2)} \gamma_{TE} e^{-\frac{g}{2}} \sqrt{\rho_0^2 + \frac{\pi L^2 F^2}{l_x l_y} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{g^m}{m!m} e^{-\frac{V_s}{m}}} \quad \text{Εξ(4.37)}$$

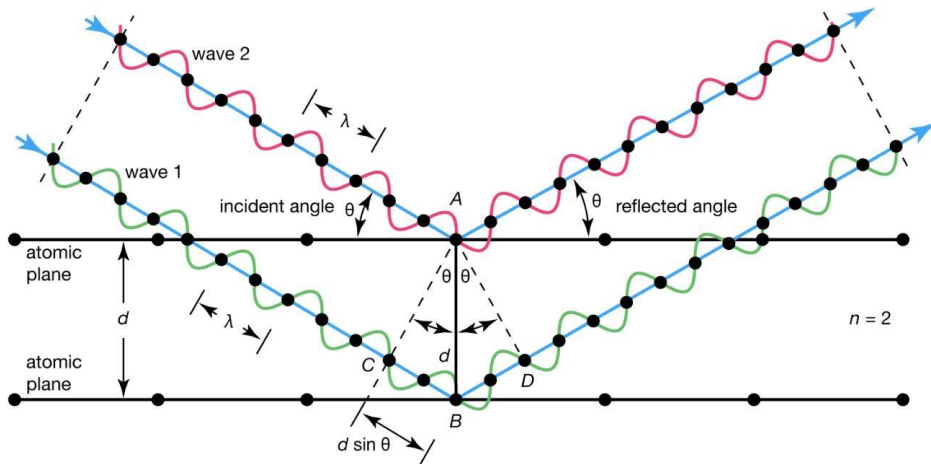
#### 4.1.1.4 Διάδοση από περίθλαση

Η περίθλαση στη μάντα των THz δεν είναι τόσο σημαντική όπως σε άλλες μάντες συχνοτήτων, στην οπτική ή στα υψηλά GHz. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αυτά τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα στη μάντα των THz έχουν μεγάλο μήκος κύματος και χαρακτηρίζονται από μικρή διασπορά και ελάχιστη απορρόφηση από τα υλικά (Sheikh, 2016). Αυτό σημαίνει ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα στη μάντα THz μπορούν να διασχίσουν διάφορα υλικά χωρίς να υποστούν σημαντικές απώλειες ή αλλαγές στη διασπορά τους. Γίνεται ωστόσο σημαντική και περιλαμβάνεται στους υπολογισμούς όταν λειτουργούν σε μεγάλες αποστάσεις ή υπό δύσκολες συνθήκες. Στις εφαρμογές εικόνας υπερέθρων (IR imaging), η περίθλαση μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια και την ευκρίνεια των εικόνων. Επίσης, στις ασύρματες επικοινωνίες THz, η περίθλαση μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα και την απόδοση των σημάτων, ειδικά σε περιβάλλοντα με πολλαπλά εμπόδια και ανακλάσεις (Shihao, 2019).

Για την εύρεση ενός αναλυτικού τύπου της συνάρτησης μεταφοράς απωλειών λόγω περίθλασης διατηρείτε ο φορμαλισμός που ακολουθήθηκε για την ανάκλαση και σκέδαση. Δηλαδή:

$$H_{dif} = H_{δια}(f) H_{απ}(f) e^{-j2\pi f \tau_{dif}} M(f) \quad \text{Εξ(4.38)}$$

Όπου όπως και προηγουμένως  $H_{δια}(f)$  είναι η συνάρτηση μεταφοράς απωλειών λόγω διάδοσης,  $H_{απ}(f)$  η συνάρτηση απωλειών λόγω μοριακής απορρόφησης και  $M(f)$  ο συντελεστής περίθλασης.



Εικόνα 3. Ακτίνες που καταφτάνουν στο δέκτη λόγω φαινομένου περίθλασης.

Αν ορίσουμε την απόσταση πομπού και σημείου περίθλασης ως  $l_1$  και αντιστοίχως σημείου περίθλασης δέκτη  $d_2$  τότε η συνάρτηση μεταφοράς απωλειών λόγω διάδοσης θα είναι:

$$H_{δια}(f) = \frac{c}{4\pi f(l_1 + l_2)} \quad \text{Εξ(4.39)}$$

Ομοίως η συνάρτηση μεταφοράς απωλειών λόγω απορρόφησης θα είναι ίδια με την εξίσωση 4.11, χρησιμοποιώντας φυσικά τα αντίστοιχα μήκη:

$$H_{\alpha\pi} = e^{-\frac{1}{2}k(f)(l_1+l_2)} \quad \text{Εξ(4.40)}$$

Ο εκθετικός όρος που εμφανίζεται στην εξίσωση 4.38 θα τροποποιηθεί μόνο ως προς το χρόνο για τον οποίο ταξιδεύει η ακτίνα διανύοντας τις αποστάσεις  $l_1$  και  $l_2$ . Εάν δεχτούμε ότι η ακτίνα κινείται με σταθερή ταχύτητα του φωτός τότε ο χρόνος  $\tau_{dif}$  θα είναι:

$$\tau_{dif} = \tau_{Los} + \frac{K}{c} \quad \text{Εξ(4.41)}$$

Με το παράγοντα  $K$  να αναπαριστά την παραπάνω απόσταση που διένυσε η περιθλώμενη ακτίνα ο οποίος προσεγγιστικά μπορεί να δοθεί:

$$K = d \frac{l_1+l_2}{l_1 l_2} \quad \text{Εξ(4.42)}$$

Όπου  $d$  είναι η απόσταση διείσδυσης στο μέσο.

Ο συντελεστής περίθλασης μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$M(f) = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{AB}{A^2+B^2}} \sin\left(\frac{\pi AB}{\lambda} \theta^2\right) \quad \text{Εξ(4.42)}$$

Όπου θεωρήθηκε ότι η επιφάνεια που προκύπτει η διάθλαση είναι ορθογώνια με διαστάσεις  $A$  και  $B$ ,  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος της προσπίπτουσας δέσμης και  $\theta$  είναι η γωνία που σχηματίζει η δέσμη με την επιφάνεια και το δέκτη. Η έκφραση 4.42 εξαρτάται από τη γεωμετρία της επιφάνειας και συνεπώς για διαφορετικές γεωμετρίες προκύπτουν διαφορετικά αποτελέσματα (Siemion, 2019).

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση 4.38 τις εκφράσεις 4.39 έως 4.42 εξάγεται η αναλυτική έκφραση για την συνάρτηση μεταφοράς απωλειών λόγω περίθλασης:

$$H_{dif} = \frac{c}{4\pi f(l_1+l_2)} e^{-\frac{1}{2}k(f)(l_1+l_2)} e^{-j2\pi f \tau_{dif}} \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{AB}{A^2+B^2}} \sin\left(\frac{\pi AB}{\lambda} \theta^2\right) \quad \text{Εξ(4.43)}$$

## 4.2 Ατμοσφαιρική απορρόφηση

Η ατμοσφαιρική απορρόφηση στη μπάνα των THz οφείλεται στο γεγονός ότι οι ατμοσφαιρικές μάζες έχουν καταληκτική δράση σε αυτήν την περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Συγκεκριμένα, τα μόρια του αέρα, όπως το οξυγόνο και το άζωτο, έχουν απορροφητικές γραμμές στην μπάνα των THz λόγω των πολλαπλών περιστροφικών και δονητικών κινήσεων τους. Οι ατμοσφαιρικές απορροφητικές γραμμές στη μπάνα των THz επηρεάζουν τη διέλευση και την εξάπλωση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και κατά συνέπεια η απορρόφηση αυτή μπορεί να περιορίσει την επικοινωνία, την απεικόνιση και τις εφαρμογές ανίχνευσης. Συγκεκριμένα, οι μεταβάσεις μεταξύ περιστροφικών, δονητικών και ηλεκτρονιακών ενεργειακών επιπέδων των μορίων του αερίου μπορούν να απορροφήσουν ενέργεια από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Καθώς η συχνότητα αυξάνει, οι ατομικές και

μοριακές μεταβάσεις που απορροφούν ενέργεια είναι ευαισθητοποιημένες σε αυτήν την περιοχή και η απορρόφηση γίνεται πιο έντονη.

Η διαπερατότητα του μέσου  $T$  (transmittance) μπορεί να υπολογιστεί βάσει του νόμου του Beer-Lambert χρησιμοποιώντας την απορροφητικότητα  $A$  (absorbance) και τη σχέση εκφρασμένη σε μοριακή κλίμακα. Ο τύπος είναι ο εξής:

$$T = e^{-A} \quad \text{Εξ(4.44)}$$

Η απορροφητικότητα μπορεί να εκφραστεί ως το γινόμενο του  $\kappa(f)$  που είναι ο απορροφητικός συντελεστής ανά μονάδα μήκους στη συχνότητα  $f$  και  $d$  είναι το μήκος διαδρομής του φωτός μέσα από το υλικό.

$$T = e^{-\kappa(f)d} \quad \text{Εξ(4.45)}$$

Η διαπερατότητα αναφέρεται στο ποσοστό της ενέργειας του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που διαπερνά το μέσο σε σχέση με την αρχική ενέργεια του πριν εισέλθει στο μέσο. Εάν το μέσο έχει υψηλή διαπερατότητα, τότε η περισσότερη ενέργεια του φωτός θα διαπεράσει το μέσο, ενώ αν έχει χαμηλή διαπερατότητα, μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας θα απορροφηθεί από το μέσο. Η συνάρτηση μεταφοράς συνδέεται με το συντελεστή απορρόφησης μέσω της σχέσης:

$$H_{abs} = \sqrt{T} = \sqrt{e^{-\kappa(f)d}} = e^{-\frac{1}{2}\kappa(f)d} \quad \text{Εξ(4.46)}$$

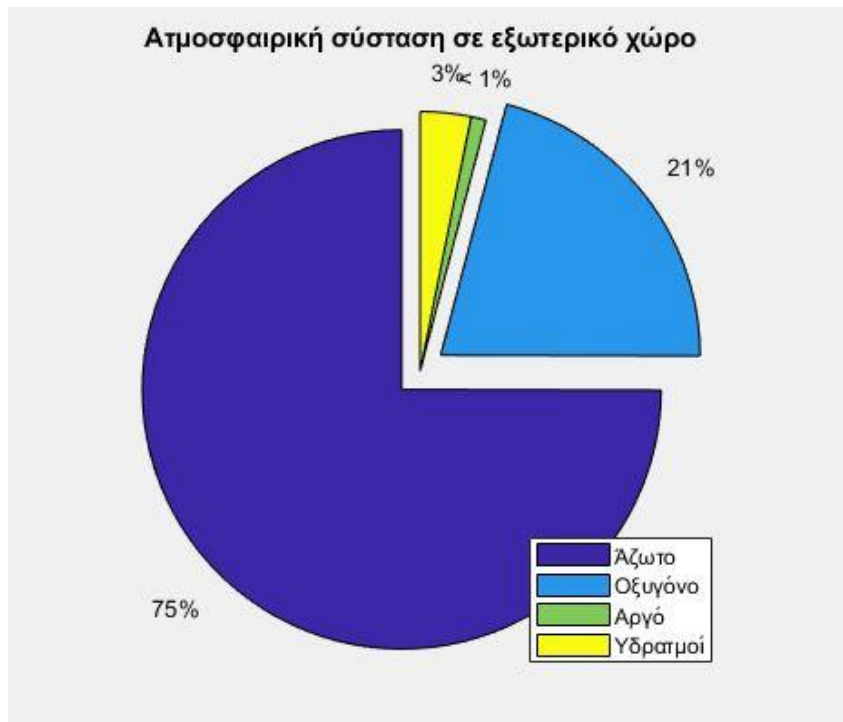
Η τετραγωνική ρίζα προέρχεται από τη σχέση μεταξύ των απωλειών λόγω απορρόφησης και της μετάδοσης ενέργειας.

Ο συντελεστής  $\kappa(f)$ , όπως υποδηλώνεται και στο τύπο έχει εξάρτηση από τη συχνότητα, αλλά και τη σύσταση του μέσου διάδοσης.

$$\kappa(f) = \sum_{i,g} k^{i,g} \quad \text{Εξ(4.47)}$$

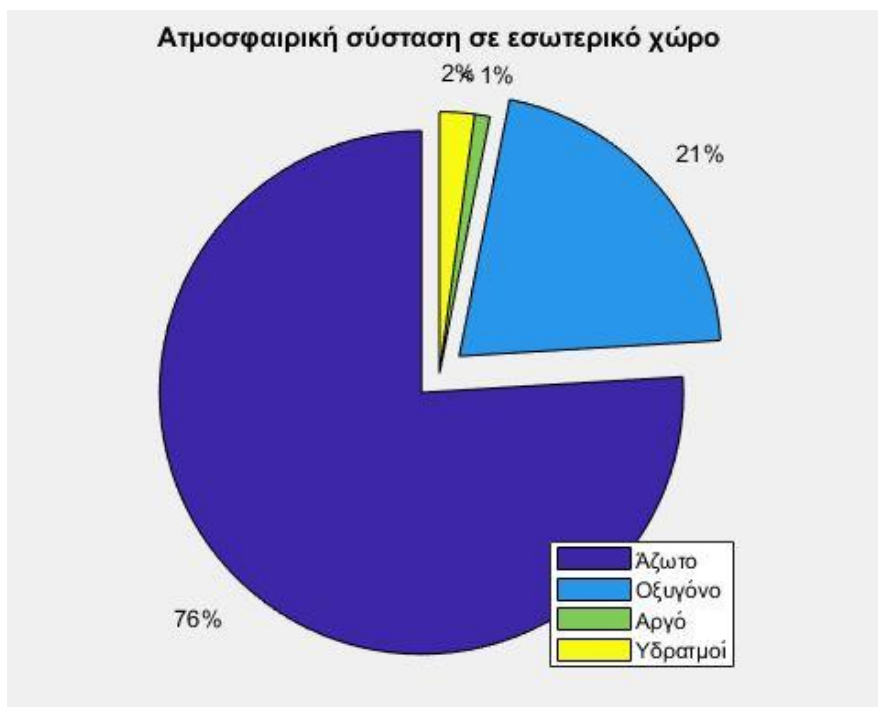
Οι δείκτες στο άθροισμα αναφέρονται στο ισότοπο  $i$  του αερίου  $g$  της σύστασης του μέσου διάδοσης. Δηλαδή για κάθε αέριο του μέσου διάδοσης και για κάθε ισότοπο του αερίου που είναι παρόν στο μέσο, ο συντελεστής είναι το διακριτό άθροισμα των επιμέρους συντελεστών (Shihao, 2019).

Δεδομένου ότι η σύσταση του μέσου παίζει καθοριστικό ρόλο στον υπολογισμό του συντελεστή απορρόφησης, παρατίθεται η τυπική σύσταση του εξωτερικού ατμοσφαιρικού αέρα, λαμβάνοντας υπόψη τη μέση περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε υδρατμούς που υπολογίζεται στο 4%.



Διάγραμμα 1. Τυπική ατμοσφαιρική σύσταση σε εξωτερικό χώρο.

Οι εσωτερικοί χώροι διαφέρουν ως προς τη περιεκτικότητα σε υδρατμούς που παίζουν καθοριστικό ρόλο στο φαινόμενο της μοριακής απορρόφησης. Μια συνήθης ποσότητα υδρατμών μέσα σε κτίριο είναι από 1% έως 2.5%.



Διάγραμμα 2. Τυπική ατμοσφαιρική σύσταση σε εσωτερικό χώρο.

#### 4.2.1 Βάση δεδομένων HITRAN

Η βάση δεδομένων HITRAN (high resolution transmission molecular absorption database) είναι μια συλλογή από φασματοσκοπικές παραμέτρους, μορφοποιημένη ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από προσομοιωτές και γενικότερα λογισμικό ώστε να καταστήσει δυνατή τη πρόβλεψη και προσομοίωση της διάδοσης ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε ένα μέσο διάδοσης που συνίσταται από αέρια και ειδικότερα της γήινης ατμόσφαιρας. Οι φασματοσκοπικές παράμετροι που περιέχονται στη βάση δεδομένων προέρχονται από ένα μίγμα θεωρητικών υπολογισμών, εμπειρικών παρατηρήσεων και απευθείας μετρήσεις. Σκοπός της βάσης είναι να περιέχει ένα θεωρητικά αυτόνομο σύνολο παραμέτρων ενώ παράλληλα να μεγιστοποιεί τον εναρμονισμό της με τα πειραματικά δεδομένα (Rotnman L, 2013).

Η διατομή απορρόφησης (absorption cross section) είναι μια μετρική που ποσοτικοποιεί την ενεργή επιφάνεια που θέτει ένας στόχος, εν προκειμένω ένα μόριο ή άτομο, στην εισερχόμενη ακτινοβολία. Στην ουσία αναπαριστά τη πιθανότητα απορρόφησης ανά μονάδα επιφανείας και συμβολίζεται με το γράμμα “σ” και είναι μια από τις βασικές παραμέτρους που παρατίθεται στη βάση δεδομένων HITRAN.

Ο συντελεστής απορρόφησης θα δίδεται από το τύπο:

$$k^{i,g}(f) = 100 \frac{p}{p_0} \frac{T_{stp}}{T} Q^{i,g} \sigma^{i,g} \quad \text{Εξ(4.48)}$$

Όπου  $p$  είναι η μερική πίεση του αερίου,  $p_0$  η ατμοσφαιρική πίεση,  $T$  η θερμοκρασία των αερίων του μέσου,  $T_{stp}$  η θερμοκρασία σε πρότυπες συνθήκες (δηλαδή 273 Kelvin),  $Q^{i,j}$  η μοριακή πυκνότητα του  $i$  ισότοπου του  $g$  αερίου και  $\sigma^{i,j}$  η διατομή απορρόφησης του  $i$  ισότοπου του  $g$  αερίου. Εάν εισαγάγουμε το λόγο πρόσμιξης  $q^{i,j}$  του  $i$  ισότοπου του  $g$  αερίου, χρησιμοποιώντας το νόμο των ιδανικών αερίων παίρνουμε:

$$Q^{i,j} = \frac{n}{V} q^{i,j} N_A = \frac{p}{RT} q^{i,j} N_A \quad \text{Εξ(4.49)}$$

Η διατομή απορρόφησης μπορεί να αναλυθεί σε επιμέρους όρους:

$$\sigma^{i,j} = \frac{n_e^{i,j} S_e^{i,j}}{v N Q^{i,j} P} \quad \text{Εξ(4.50)}$$

Όπου  $n_e^{i,j}$  η συγκέντρωση του  $i$  ισότοπου του  $g$  αερίου,  $v$  ο κυματάρθμος,  $N$  η ολική συγκέντρωση των μορίων του μέσου και  $p$  η ολική πίεση. Ο όρος  $S_e^{i,j}$  ονομάζεται γραμμική ένταση του  $i$  ισότοπου του  $g$  αερίου και αναπαριστά την ένταση απορρόφησης για μια συγκεκριμένη μετάπτωση του κάθε ισότοπου. Εξαρτάται από τη μεταβατική διπολική κίνηση του μορίου, τις ενεργειακές στάθμες και τη γεωμετρία της γραμμής απορρόφησης.

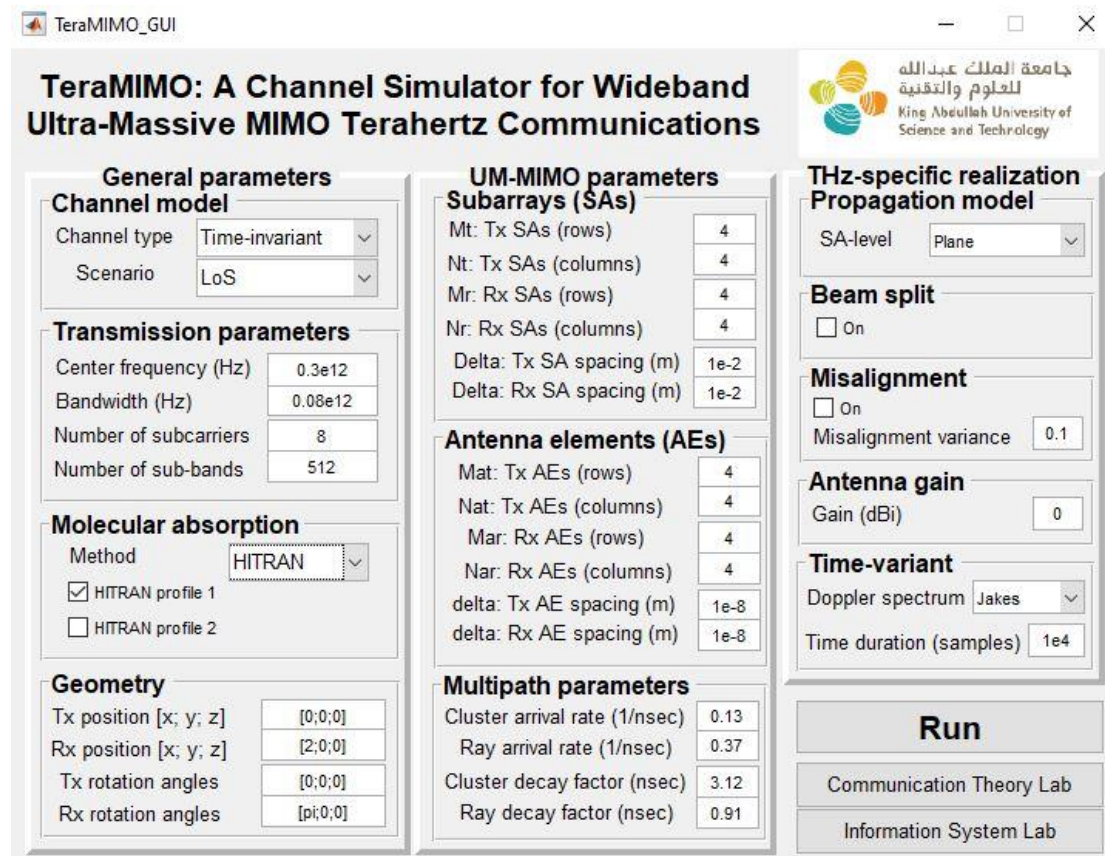
$$S_e^{i,j} = \frac{\pi e^2}{m_e c} f_e u_e^2 g_e Q(T) e^{-\frac{E_e}{kT}} \quad \text{Εξ(4.51)}$$

Όπου  $e$  το φορτίο του ηλεκτρονίου,  $m_e$  η μάζα του ηλεκτρονίου,  $f_e$  η ένταση της ταλάντωσης του δίπολου,  $u_e$  ο εκφυλισμός της στάθμης σθένους,  $g_e$  το στατιστικό βάρος της στάθμης σθένους,  $Q(T)$  η εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία συνάρτηση κατάτμησης,  $E_e$  η ενεργειακή διαφορά της στάθμης σθένους με τις χαμηλότερες στάθμες,  $k$  η σταθερά Boltzman και  $T$  η θερμοκρασία.



## Κεφάλαιο 5ο: Προσομοίωση

### 5.1 Προσομοιωτής teraMIMO



Εικόνα 4. Επιφάνεια εργασίας προσομοιωτή teraMIMO.

Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε ο προσομοιωτής teraMIMO channel simulator v1.0 (Simon Tarboush et al 2021) στην έκδοχή GUI (graphics user interface). Πρόκειται περί προσομοιωτή γραμμένο αποκλειστικά σε γλώσσα MATLAB, ο οποίος δίνετε να παράγει προσομοιώσεις λαμβάνοντας υπόψη όλες τις σχετικές παραμέτρους που επηρεάζουν την διάδοση ενός σήματος στη συχνότητα των THz (Tarboush, 2021).

#### 5.1.1 Είδος καναλιού (CHANNEL MODEL)

Ένα χρονικά ανεξάρτητο κανάλι αναφέρεται σε ένα ασύρματο κανάλι επικοινωνίας στο οποίο τα χαρακτηριστικά διάδοσης παραμένουν σταθερά ή δεν αλλάζουν σημαντικά με την πάροδο του χρόνου. Με άλλα λόγια, οι ιδιότητες του καναλιού, όπως η απώλεια σήματος, η εξασθένιση και η χωρική συσχέτιση, παραμένουν σταθερές ή εμφανίζουν ελάχιστες μεταβολές κατά τη διάρκεια του ενδιαφερομένου χρονικού διαστήματος. Σε ένα χρονικά αναλλοίωτο κανάλι, η απόκριση του καναλιού, η οποία

περιγράφει το πώς το μεταδιδόμενο σήμα διαδίδεται και φθάνει στον δέκτη, δεν αλλάζει κατά τη διάρκεια του χρόνου. Αυτό σημαίνει ότι οι συντελεστές ή οι παράμετροι που σχετίζονται με το μοντέλο του καναλιού παραμένουν σταθεροί. Τα χρονικά αναλλοίωτα κανάλια συναντώνται συχνά σε περιπτώσεις όπου οι συνθήκες του περιβάλλοντος ή οι θέσεις του πομπού και του δέκτη είναι στατικές όπως γραφεία ή κατοικίες, όπου οι συνθήκες διάδοσης παραμένουν σταθερές για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Στην αντίθετη περίπτωση, ένα χρονικά μεταβαλλόμενο κανάλι αναφέρεται σε ένα κανάλι όπου τα χαρακτηριστικά διάδοσης αλλάζουν σημαντικά με τον χρόνο. Αυτό μπορεί να συμβεί, για παράδειγμα, σε ασύρματα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας όπου οι συνθήκες διάδοσης μπορούν να αλλάζουν συνεχώς λόγω της κίνησης των χρηστών και του περιβάλλοντος. Για την ανάλυση τους απαιτούνται δυναμικά μοντέλα καναλιού που να λαμβάνουν υπόψη την εξέλιξη του καναλιού στο χρόνο. Αυτά τα μοντέλα μπορούν να περιλαμβάνουν την αλλαγή των παραμέτρων του καναλιού, όπως η αμφίδρομη απόκριση συχνότητας, η στάθμη σήματος και η στάθμη θορύβου, κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου. Στις γενικές παραμέτρους του προσομοιωτή ο χρήστης καλείται να διαλέξει εάν το είδος του καναλιού είναι χρονοεξαρτούμενο ή χρονικά ανεξάρτητο.

Στην ίδια καρτέλα ρυθμίσεων επιλέγεται το είδος του σεναρίου προσομοίωσης. Οι επιλογές είναι:

- **LoS** : Διάδοση στον ορίζοντα ορατότητας. Στην εκδοχή αυτή πομπός και δέκτης έχουν άμεση ορατότητα. Δηλαδή στη νοητή ευθεία που ενώνει πομπό και δέκτη δε παρεμβάλλονται εμπόδια. Ο υπόλοιπος χώρος θεωρείται κενός και συνεπώς δεν γίνεται ανάκλαση ακτινών στα όρια του περιβάλλοντος χώρου καθώς και τα φαινόμενα σκέδασης αποκλείονται.
- **Multipath** : Στο σενάριο αυτό το σήμα συναντάει εμπόδια καθώς οδεύει στο χώρο και κατά συνέπεια στο δέκτη καταφτάνουν πολλαπλά αντίγραφα του σήματος με διαφορετικές χρονικές υστερήσεις λόγω ανάκλασης, διάθλασης και περίθλασης. Στο μοντέλο αυτό αποκλείεται η απευθείας διάδοση LoS, δηλαδή στο δέκτη δεν καταφτάνει σήμα απευθείας από το πομπό.
- **LoS+Multipath**: Τρίτη επιλογή είναι στο δέκτη να καταφτάνουν αντίγραφα του σήματος απευθείας από το δέκτη αλλά και από ανάκλαση, περίθλαση και διάθλαση. Είναι το πιο ρεαλιστικό σενάριο εκ των τριών και είναι και αυτό που θα χρησιμοποιηθεί στις προσομοιώσεις.

### 5.1.2 Παράμετροι εκπομπής (TRANSMISSION PARAMETERS)

Σε αυτή τη καρτέλα ρυθμίσεων προσδιορίζονται οι παράμετροι εκπομπής του σήματος. Τα πεδία είναι:

- **Κεντρική Συχνότητα (Center Frequency)**: Αυτή η παράμετρος αναφέρεται στην κεντρική συχνότητα του μεταδιδόμενου σήματος ή τη συχνότητα φέροντος. Στα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας, το σήμα μεταδίδεται

συνήθως εντός ενός συγκεκριμένου εύρους συχνοτήτων. Η κεντρική συχνότητα αντιπροσωπεύει το μέσο σημείο αυτού του εύρους. Εκφράζεται σε Hertz (Hz) και καθορίζει το μήκος κύματος του σήματος.

- **Εύρος Ζώνης (Bandwidth):** Το εύρος ζώνης αναφέρεται στην περιοχή των συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση του σήματος. Η επιλογή του εύρους ζώνης επηρεάζει το πλήθος των διαθέσιμων συχνοτήτων για τη μετάδοση του σήματος και, κατά συνέπεια, τη μεταφορά δεδομένων. Ένα μεγαλύτερο εύρος ζώνης παρέχει περισσότερες διαθέσιμες συχνότητες και αυξάνει την χωρητικότητα του συστήματος. Η επιλογή του εύρους ζώνης επηρεάζει άμεσα τον εφικτό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, τη χωρητικότητα του συστήματος και την ανοχή στις παρεμβολές.
- **Αριθμός Υποφερόντων Φορέων (Number of Subcarriers):** Αυτή η παράμετρος αναφέρεται στον αριθμό των υποφερόντων φορέων που χρησιμοποιούνται στη μετάδοση του σήματος. Οι υποφέροντες φορείς είναι υποδιαιρέσεις του εύρους ζώνης και χρησιμοποιούνται για **τη μετάδοση πολλαπλών σημάτων ή δεδομένων παράλληλα**. Ο μεγάλος αριθμός υποφερόντων φορέων αυξάνει την χωρητικότητα του συστήματος και επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση περισσότερων δεδομένων.
- **Αριθμός Υποζωνών (Number of Subbands):** Το πεδίο αυτό αναφέρεται στον αριθμό των υποζωνών στις οποίες χωρίζεται το εύρος ζώνης του σήματος. Οι υποζώνες χρησιμοποιούνται για **την παράλληλη μετάδοση πολλαπλών σημάτων ή δεδομένων σε διαφορετικές συχνότητες**. Η χρήση υποζωνών επιτρέπει την αξιοποίηση του φάσματος με πιο αποδοτικό τρόπο και αυξάνει τη χωρητικότητα του συστήματος, καθώς διαφορετικές υποζώνες μπορούν να φέρουν διαφορετικά σήματα.

### 5.1.3 Μοριακή απορρόφηση (MOLECULAR ABSORPTION)

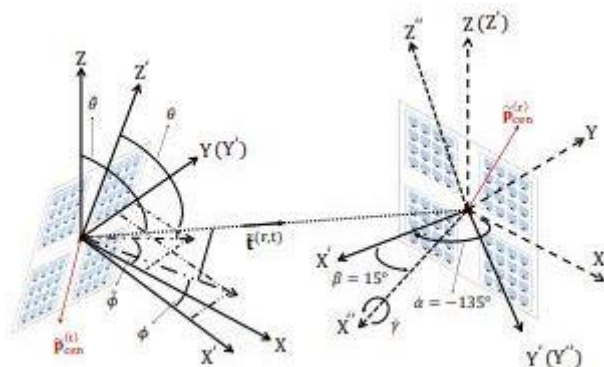
Σε αυτή τη καρτέλα ρυθμίσεων προσδιορίζεται η μέθοδος υπολογισμού του συντελεστή μοριακής απορρόφησης. Τα πεδία είναι:

- **HITRAN:** Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη θεωρία μεταφοράς ακτινοβολίας (radiative transfer theory) και βασίζει τους υπολογισμούς στη βάση δεδομένων υψηλής ευκρίνειας εκπομπής μοριακής απορρόφησης (high-resolution transmission molecular absorption aka HITRAN) και είναι η πιο ακριβής και κοστοβόρα (σε υπολογιστικό χρόνο).
- **APPROX1:** Προσεγγιστική μέθοδος που βασίζεται στην επικράτηση της τάσης ατμών του νερού σε αυτό το εύρος συχνοτήτων και έχει ισχύ στο εύρος 275-400Hz. Είναι η λιγότερο κοστοβόρα σε υπολογιστικό χρόνο.
- **APPROX2:** Προσεγγιστική μέθοδος που βασίζεται στην επικράτηση της τάσης ατμών του νερού όπως και η παραπάνω αλλά έχει ισχύ σε μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων 100-450Hz. Είναι η μέση λύση εκ των τριών μεθόδων σε χρόνο υπολογισμού.

### 5.1.4 Διάταξη στο χώρο πομπού-δέκτη (GEOMETRY)

Η γεωμετρία του συστήματος πομπού (Tx) δέκτη (Rx) (διάταξη τους στο χώρο) δεδομένου ότι πρόκειται για τρισδιάστατες απεικονίσεις (3D) είναι σύνθετη και προσδιορίζεται στα παρακάτω χωρία:

- **Tx position [x; y; z]:** πρόκειται για τη θέση του πομπού στο ολικό σύστημα συντεταγμένων,
- **Rx position [x; y; z]:** πρόκειται για τη θέση του δέκτη στο ολικό σύστημα συντεταγμένων,
- **Tx rotation angles:** είναι το εύρος των γωνιών που δύναται να στρέφεται ο πομπός κατά τους τρεις άξονες x, y και z με μονάδα μέτρησης τα ακτίνια,
- **Rx rotation angles:** είναι το εύρος των γωνιών που δύναται να στρέφεται ο δέκτης κατά τους τρεις άξονες x, y και z με μονάδα μέτρησης τα ακτίνια.



Εικόνα 5. Απεικόνιση της συσχέτισης τοπικού – ολικού συστήματος συντεταγμένων.

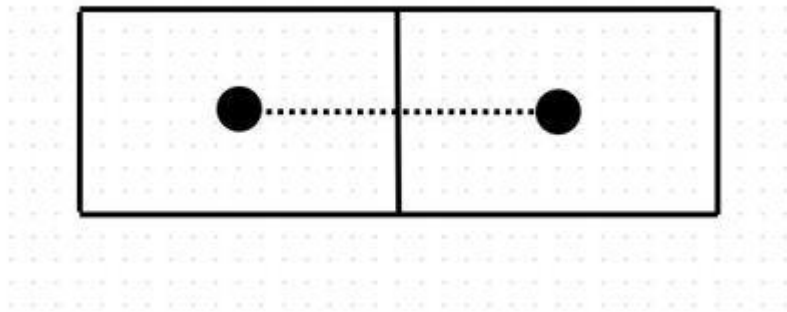
Δεδομένης τη μη σημειακής μορφής του πομπού θεωρείται στους υπολογισμούς ότι το κέντρο του πομπού βρίσκεται στο κέντρο του ολικού συστήματος συντεταγμένων. Θεωρείται ότι ο πομπός είναι μια συστοιχία υποπομπών (Array of sub Arrays aka AoSA) και σε κάθε υποπομπό ανατίθεται ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων. Οι θέσεις των υποπομπών είναι πάντα στο επίπεδο X-Y του εκάστοτε τοπικού συστήματος συντεταγμένων. Για την οριοθέτηση του κάθε τοπικού συστήματος συντεταγμένων σε σχέση με το ολικό σύστημα χρησιμοποιούνται γωνίες Euler.

### 5.1.5 Υποφορείς (Subarrays)

- **Υποφορείς Tx (Tx SAs rows & columns):** Πρόκειται για τα στοιχεία του πομπού και το πώς είναι αυτά κατανομημένα στο χώρο. Κάθε στοιχείο πομπού τοποθετείτε στις ακμές ενός δικτύου τετραγώνων που σχηματίζουν όλα μαζί ένα ορθογώνιο πίνακα με γραμμές και στήλες. Ο χρήστης μπορεί να καταχωρήσει τον αριθμό των γραμμών και στηλών του πίνακα. Κατά συνέπεια

μόνο ορθογώνιες διατάξεις μπορούν να προκύψουν, δηλαδή διατάξεις περιττού αριθμού υποφορέων δεν προβλέπονται από το εν λόγω λογισμικό.

- **Υποφορείς Rx (Rx SAs rows & columns):** Πρόκειται για τα στοιχεία του δέκτη και το πώς είναι αυτά κατανομημένα στο χώρο. Η διάταξη τους είναι πανομοιότυπη με του πομπού.
- **Διάκενα υποφορέων πομπού (Delta Tx SAs spacing):** Ο αριθμός των υποφορέων έχει οριστεί σε προηγούμενο χωρίο καθώς και η σχετική διάταξη τους στο χώρο. Στο χωρίο αυτό ορίζεται η απόλυτη απόσταση μεταξύ του κέντρου γραμμής-στήλης δύο γειτονικών υποφορέων του πομπού. Στην ουσία πρόκειται για την διακεκομμένη γραμμή που φαίνεται στην Εικόνα 6.
- **Διάκενα υποφορέων δέκτη (Delta Rx SAs spacing):** Ο αριθμός των υποφορέων έχει οριστεί σε προηγούμενο χωρίο καθώς και η σχετική διάταξη τους στο χώρο. Στο χωρίο αυτό ορίζεται η απόλυτη απόσταση μεταξύ του κέντρου γραμμής-στήλης δύο γειτονικών υποφορέων του δέκτη.



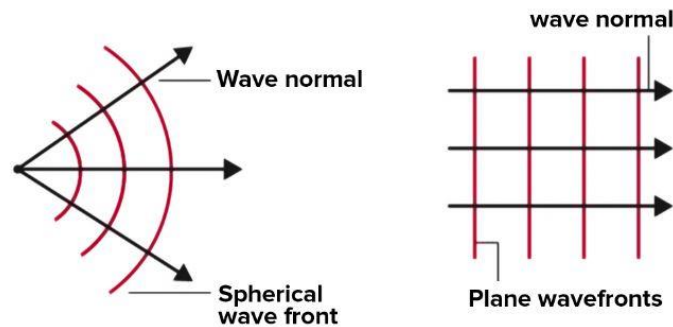
Εικόνα 6. Διάκενο μεταξύ δύο υποφορέων (διακεκομμένη γραμμή).

### 5.1.6 Παράμετροι πολλαπλών διαδρομών (MULTIPATH PARAMETERS)

Σε αυτή τη καρτέλα ρυθμίσεων προσδιορίζονται οι παράμετροι που αφορούν τη μοντελοποίηση των πολλαπλών διαδρομών των ακτινών που καταφτάνουν στο δέκτη.

- **Ρυθμός αφίξεων κλάσεων (Cluster arrival rate):** Το μοντέλο που έχει υιοθετήσει ο στοχαστικός προσομοιωτής θεωρεί ότι τα στοιχεία που συνθέτουν το πολυκλαδικά μονοπάτια καταφτάνουν σε κλάσεις οι οποίες περιέχουν διαφορετικό αριθμό ακτινών. Το παραπάνω χωρίο προσδιορίζει το ρυθμό που καταφτάνουν οι κλάσεις αυτές.
- **Ρυθμός αφίξεων ακτινών (Ray arrival rate):** Ο αριθμός ακτινών σε κάθε κλάση εν γένει ακολουθεί διαφορετική κατανομή από τις κλάσεις αυτές καθ'αυτές και ο ρυθμός με τον οποίο φτάνουν σε κάθε κλάση ορίζεται σε αυτό το χωρίο.
- **Ρυθμός απόσβεσης κλάσεων (Cluster decay rate):** Είναι ο ρυθμός με τον οποίο αποσβένετε ο ρυθμός αφίξεων κλάσεων.
- **Ρυθμός απόσβεσης ακτινών (Ray decay rate):** Είναι ο ρυθμός με το οποίο αποσβένετε ο ρυθμός αφίξεων των ακτινών.

### 5.1.7 Εξειδικευμένη υλοποίηση διάδοσης (THz Specific Realization Propagation Model)

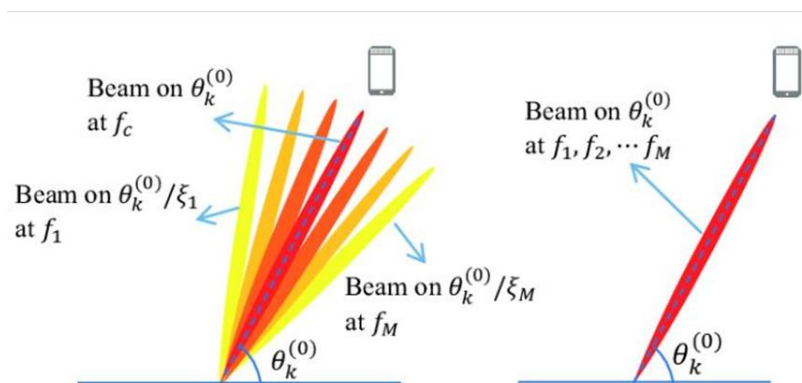


Εικόνα 7. Σφαιρικό κυματικό μέτωπο (αριστερά) – Επίπεδο κυματικό μέτωπο (δεξιά).

Σε αυτή τη καρτέλα γίνεται η επιλογή του τρόπου προσομοίωσης της διάδοσης του μετώπου του κύματος.

- **Μοντέλο επίπεδου μετώπου:** Σε αυτό το μοντέλο, υιοθετείται ότι τα κύματα THz διαδίδονται ως ένα επίπεδο μέτωπο κάθετο προς της διεύθυνση διάδοσης. Πρόκειται για μια απλοποιημένη αναπαράσταση όπου τα κύματα θεωρούνται παράλληλα με σταθερή κατεύθυνση διάδοσης. Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται συνήθως για τη μελέτη σεναρίων όπου η απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη είναι μεγάλη σε σχέση με το μήκος κύματος των κυμάτων.
- **Μοντέλο σφαιρικού μετώπου:** Σε αυτό το μοντέλο, υιοθετείται ότι τα κύματα THz διαδίδονται σε σφαιρική μορφή. Λαμβάνεται υπόψη η εκπομπή των κυμάτων καθώς διαδίδονται από την πηγή προς όλες τις κατευθύνσεις, καθιστώντας δυνατή την ακριβέστερη προσομοίωση σεναρίων με κοντινή απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, όπου η εκπομπή και διάδοση κυμάτων έχουν σημαντική αλληλεπίδραση με το περιβάλλον.

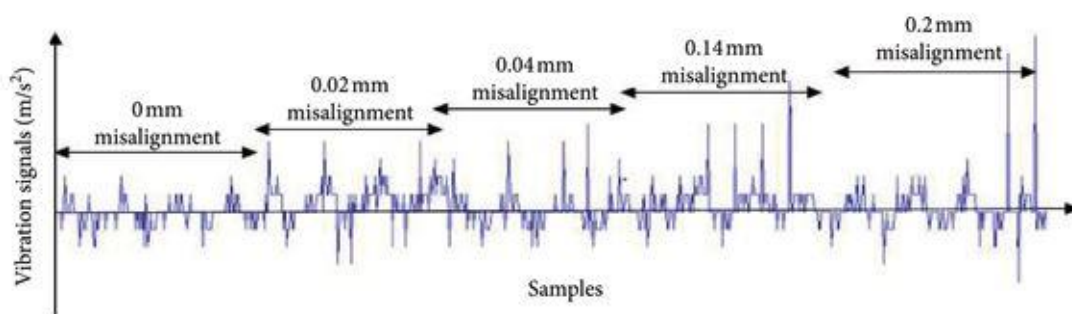
### 5.1.8 Διαχωρισμός ακτινών (BEAM SPLIT)



Εικόνα 8. Αναπαράσταση διαχωρισμού ακτινών (Beam Split).

Σε αυτό το εύρος συχνοτήτων όταν η ακτίνα διαδίδεται σε ένα μέσο με πολλαπλούς δείκτες διάθλασης συμβαίνει διαχωρισμός ακτινών. Η γωνία διάσπασης είναι εξαιρετικά ευαίσθητη στη συχνότητα και συνεπώς η ακτίνα δεν διαχωρίζεται ομοιογενώς αλλά σε πολλαπλές κατευθύνσεις στο χώρο. Η επιλογή στο συγκεκριμένο πεδίο αφορά στο εάν θα ληφθεί υπόψη το φαινόμενο αυτό.

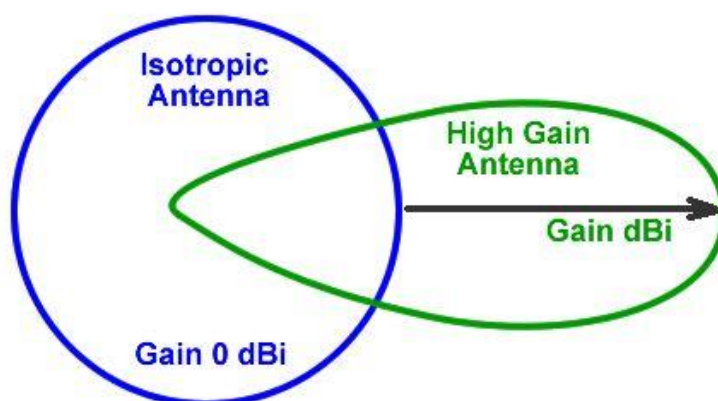
### 5.1.9 Αστοχία ευθυγράμμισης (MISALIGNMENT)



Εικόνα 9. Αναπαράσταση αστοχίας ευθυγράμμισης σήματος σε διαφορετικά μήκη.

Πρόκειται για το αν το εκπεμπόμενο κύμα θα έχει τέλεια αναμετάδοση ή θα διαφέρει με τυπική απόκλιση που ορίζεται στο χωρίο Misalignment variance από το αρχικό. Η επιλογή αυτή οδηγεί σε πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα καθώς κανένας πομπός δεν είναι τέλειος.

### 5.1.10 Κέρδος κεραίας (ANTENNA GAIN)



Εικόνα 10. Απεικόνιση μιας ισοτροπικής κεραίας και μιας κεραίας με μεγάλο κέρδος.

Στην ουσία πρόκειται για μια ποιοτική μετρική. Είναι το γινόμενο της κατευθυντικότητας μια κεραίας με το συντελεστή απόδοσης εκπομπής. Η γεωμετρική

ερμηνεία της είναι η στρέβλωση της ενεργής περιοχής λήψης προς μια κατεύθυνση (ιδεατά προς την κατεύθυνση του σήματος) με μείωση προς τις υπόλοιπες κατευθύνσεις. Ως κέρδος νοείται η απόσταση του πιο απομακρυσμένου σημείου της ενεργής περιοχής λήψης από το πέρας της ακτίνας μιας ισοτροπικής κεραίας με περιοχή ενεργού λήψης ίσου εμβαδού.

## 5.2 Προσομοίωση

Για τις προσομοιώσεις επιλέχθηκε να διατηρηθούν όλες οι παράμετροι ίδιες εκτός της σχετικής θέσης πομπού – δέκτη. Δεδομένου ότι η σχετική θέση παραμένει ίδια, χωρίς απώλεια της γενικότητας, εάν θεωρήσουμε το πομπό σταθερό και τοποθετημένο στην αρχή του συστήματος αναφοράς και μετακινούμε μόνο το δέκτη, επιλέχθηκε να γίνουν προσομοιώσεις για αποστάσεις  $R = 0,5, 0,8, 1, 3$  και  $5$  στη κατεύθυνση  $X$  του ολικού συστήματος συντεταγμένων. Οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρήθηκαν ίδιες σε όλες τις προσομοιώσεις και επιλέχθηκαν με γνώμονα ένα ρεαλιστικό σενάριο στατικού πομπού-δέκτη. Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν τα εξής:

- Επιλέχθηκε το μοντέλο να είναι χρονικά ανεξάρτητο (time invariant) επειδή στα σενάρια που επεξεργαζόμαστε ο πομπός και ο δέκτης είναι σε σταθερές θέσεις πχ ρούτερ οικίας, ρούτερ βιβλιοθήκης πανεπιστημίου κ.ο.κ
- Επιλέχθηκε το σενάριο Multipath + LoS που είναι και το πιο ρεαλιστικό για σταθερό πομπό και δέκτη.
- Η κεντρική συχνότητα ορίστηκε στα  $0.6e12$  Hz και το εύρος ζώνης  $0.08e12$  Hz. Ο αριθμός υποζωνών σε 8 και ο αριθμός υποφερόντων φορέων σε 512, συνήθης τιμές σε ένα ρεαλιστικό σύστημα ασύρματων επικοινωνιών.
- Επιλέχθηκε η πιο ακριβής μέθοδος προσδιορισμού του συντελεστή μοριακής απορρόφησης HITRAN και η υποβάση δεδομένων profile 1 που αντιστοιχεί στις πιο τυπικές συνθήκες γήινης ατμόσφαιρας.
- Επιλέχθηκε να είναι πανομοιότυπη η διάταξη των υποφορέων πομπού-δέκτη με τέσσερις υποφορείς εκάστη και διάκενο  $1e-8$  m.
- Ο ρυθμός άφιξης κλάσεων ορίστηκε σε  $0,13$  1/nsec, ο ρυθμός άφιξης ακτινών σε  $0,37$  1/nsec, ο ρυθμός απόσβεσης των κλάσεων σε  $3,12$  nsec και ο ρυθμός απόσβεσης των ακτινών  $0.91$  nsec.
- Το κυματικό μέτωπο ορίστηκε να είναι σφαιρικό διότι είναι πιο ρεαλιστικό για μικρές αποστάσεις.
- Ορίστηκε να λαμβάνεται υπόψη των φαινόμενο διαχωρισμού ακτινών.
- Ορίστηκε να υπάρχει αστοχία ευθυγράμμισης με τυπική απόκλιση  $0.1$  για ρεαλιστικότερη περιγραφή του πομπού.
- Ορίστηκε ο πομπός και ο δέκτης να είναι ισοτροπικοί δηλαδή με κέρδος κεραίας μηδέν.

Κάθε προσομοίωση παράγει τέσσερα διαγράμματα, από τα οποία εξάγονται τα συμπεράσματα του πειράματος και συγκεκριμένα τα εξής:



Δύο γραφικές παραστάσεις παρουσιάζονται ταυτόχρονα, μια από την απευθείας μετάδοση (μοντέλο LoS) και μια από τις σκεδαζόμενες και ανακλώμενες ακτίνες (multipath components). Ο εναρμονισμός των δύο γραφικών παραστάσεων καταδεικνύει σε ποιες συχνότητες η μετάδοση των δεδομένων γίνεται καλύτερα.

### **ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΕΡΔΟΥΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ – ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ (CHANNEL FREQUENCY RESPONSE)**

Το διάγραμμα του κέρδους διαδρομής - συχνότητας παρέχει πληροφορίες σχετικά με την απόκριση του καναλιού σε διάφορες συχνότητες. Αυτό το διάγραμμα απεικονίζει το κέρδος ή την απώλεια σήματος κατά μήκος της συχνότητας στη μπάνα των THz. Μπορεί να αποκαλύψει τις συχνότητες στις οποίες το κανάλι έχει υψηλότερη ή χαμηλότερη απόκριση, και επιτρέπει την εκτίμηση των περιοχών μεγαλύτερης παραμόρφωσης ή απώλειας σήματος. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση συστημάτων επικοινωνίας στις ζώνες των THz. Δύο γραφικές παραστάσεις παρουσιάζονται ταυτόχρονα, μια από την απευθείας μετάδοση (μοντέλο LoS) και μια από τις σκεδαζόμενες και ανακλώμενες ακτίνες (multipath components). Ο εναρμονισμός των δύο γραφικών παραστάσεων καταδεικνύει σε ποιες συχνότητες η μετάδοση των δεδομένων γίνεται καλύτερα.

### **ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΦΑΣΗΣ – ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ (CHANNEL PHASE RESPONSE)**

Από το γράφημα απόκρισης φάσης του καναλιού, μπορούν εξαχθούν ορισμένες πληροφορίες. Αυτές περιλαμβάνουν:

**Φάση Σήματος:** Το γράφημα φάσης αποτυπώνει τη μεταβολή της φάσης του καναλιού για διάφορες συχνότητες. Από αυτό, μπορούμε να αντλήσουμε πληροφορίες σχετικά με τη φάση παραμόρφωσης που εισάγει το κανάλι στο σήμα.

**Σταθερή Φάση:** Αν η φάση του καναλιού παραμένει σταθερή για όλες τις συχνότητες, αυτό υποδεικνύει ένα πρακτικά απορροφητικό κανάλι χωρίς αποκλίσεις στη φάση. Αυτό μπορεί να είναι χρήσιμο για τη σχεδίαση συστημάτων επικοινωνίας που απαιτούν σταθερότητα φάσης.

**Μεταβολή Φάσης:** Αντιλαμβανόμαστε τη μεταβολή της φάσης του καναλιού σε σχέση με τη συχνότητα. Αυτό μπορεί να δείξει την ύπαρξη περιοχών με απότομη μεταβολή της φάσης, που σημαίνει ότι το κανάλι εισάγει μεγάλες αλλαγές στη φάση του σήματος για συγκεκριμένες συχνότητες.

Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να βοηθήσουν στην αξιολόγηση των χαρακτηριστικών του καναλιού και να παράσχουν πληροφορίες για την ποιότητα της επικοινωνίας. Ειδικότερα, μπορούμε να αντλήσουμε τα εξής:

**Αργή Φάση:** Η απόκλιση της φάσης σε μεγάλες κλίμακες χρόνου μπορεί να υποδείξει την ύπαρξη αλλαγών και διαμορφώσεων στο κανάλι. Αυτό μπορεί να είναι χρήσιμο για τον χαρακτηρισμό και την ανίχνευση διαταραχών στο κανάλι.

**Ταχεία Φάση:** Οι απότομες αλλαγές φάσης σε μικρές κλίμακες χρόνου μπορούν να υποδείξουν την ύπαρξη πολλαπλών μονοπατιών και αντανάκλασεων, που μπορούν να προκαλέσουν παραμορφώσεις. Αυτό μπορεί να επηρεάσει την αντίληψη του σήματος και να επηρεάσει την απόδοση του συστήματος επικοινωνίας.

### **ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΙΣΧΥΟΣ (CHANNEL POWER DELAY PROFILE)**

Το γράφημα αυτό παρουσιάζει την κατανομή της ισχύος του σήματος σε διάφορες υστερήσεις, που οφείλονται στην πολλαπλή διαδρομή του σήματος λόγω αντανάκλασεων, διάχυσης και διάσπασης. Το γράφημα αναδεικνύει τις διαφορετικές συνιστώσες του σήματος που φθάνουν στον δέκτη με διάφορες καθυστερήσεις. Το χαμηλότερο σημείο της γραφικής παράστασης οφείλεται στην απευθείας διάδοση της ακτίνας.

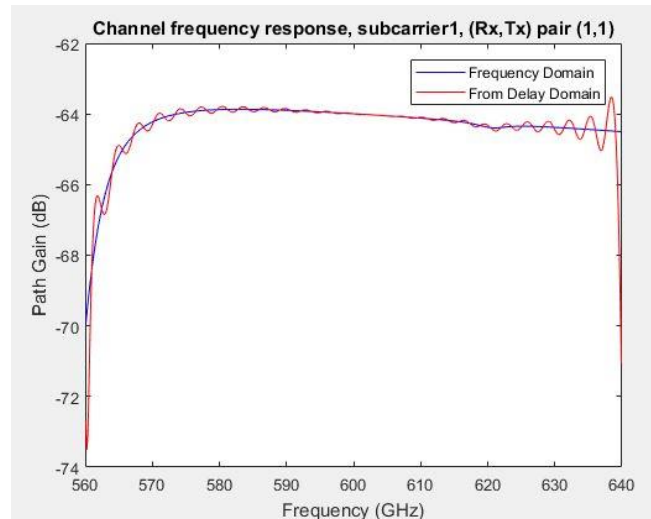
### **ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΠΑΛΜΟΥ (CHANNEL DELAY – DOMAIN)**

Στο διάγραμμα απόκρισης παλμού (impulse response), όπου οριζόντιος άξονας είναι η υστέρηση του σήματος και κάθετος άξονας το πλάτος του παλμού, αναπαριστάτε η συμπεριφορά του συστήματος όταν το εκπεμπόμενο σήμα είναι ένα απλός παλμός. Το μέγιστο σημείο της γραφικής παράστασης αντιστοιχεί στην απευθείας ακτίνα και για αυτό και το πλάτος του παλμού είναι σε εκείνο το σημείο μέγιστο. Οι υπόλοιπες κορυφές εάν υπάρχουν αντιστοιχούν σε παλμούς που καταφτάνουν στο δέκτη από διαδρομές μεγαλύτερες της ελάχιστης. Τα αντίστοιχα πλάτη είναι πάντοτε μικρότερα. Το πόσο εξασθενημένα είναι τα πλάτη αυτά καθώς και το πλάτος από την απευθείας διάδοση σε σχέση με το πλάτος του εκπεμπόμενου παλμού είναι μια κρίσιμη μετρική του συστήματος.

### 5.2.1 Προσομοίωση για $R = 0,5 \text{ Km}$

Εκτελέστηκε προσομοίωση για απόσταση 0,5 Km πομπού – δέκτη με τις υπόλοιπες παραμέτρους όπως ορίστηκαν στη παράγραφο 5.1.

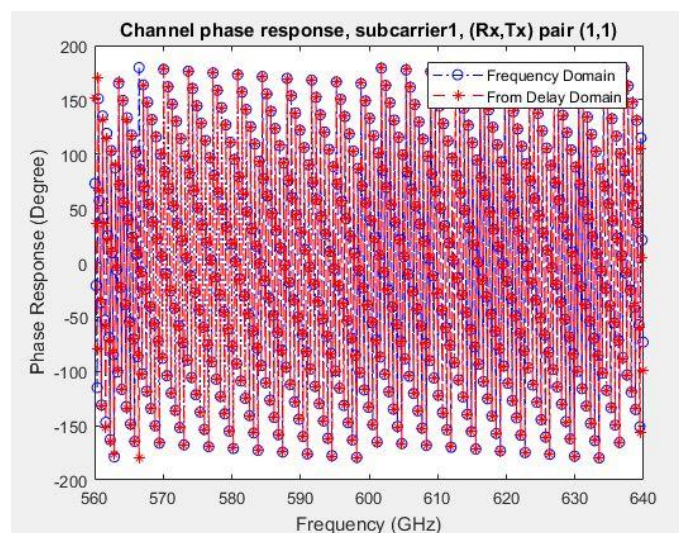
Η απόκριση του καναλιού φαίνεται στο διάγραμμα Κέρδους διαδρομής – Συχνότητας:



Διάγραμμα 3. Συχνότητας - Κέρδους Διαδρομής για  $R=0,5 \text{ km}$ .

Παρατηρούμε ότι η απώλεια σήματος στο μέσο της εκπεμπόμενης συχνότητας παρουσιάζει απώλειες γύρω από τη τιμή των 64 dB και στο κάτω άκρο (650 έως 570 GHz) οι απώλειες αυξάνονται εκθετικά έως τη τιμή των 74 dB. Το ίδιο ισχύει και για την απευθείας διάδοση (μπλε γραμμή) και για τις συνιστώσες πολλαπλών διαδρομών (multipath components). Οι τελευταίες κινούνται αρμονικά γύρω από την εκάστοτε τιμή της απευθείας διάδοσης εκτός από το άνω πέρασ του φάσματος όπου γίνονται εντονότερες (620 έως 640 GHz).

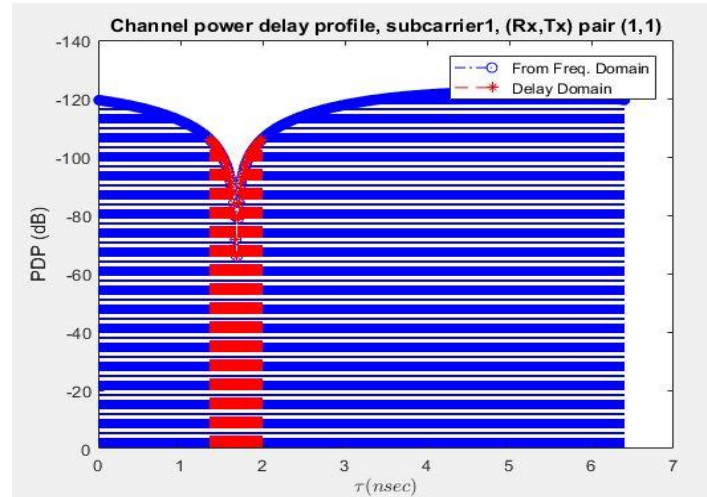
Ακολουθεί το διάγραμμα απόκρισης φάσης – συχνότητας:



Διάγραμμα 4. Φάσης – Συχνότητας για  $R=0,5 \text{ km}$ .

Παρατηρούμε ομοιογενή συμπεριφορά στη μεταβολή φάσης του σήματος σε ολόκληρο το φάσμα. Δεν διακρίνεται κάποια ιδιαιτερότητα και η μεταβολή φάσης είναι σχετικά ταχύς (όπως αυτό αναμένεται για σήματα σε αυτό το φάσμα συχνοτήτων) και ακολουθεί ημιτονοειδή μορφή.

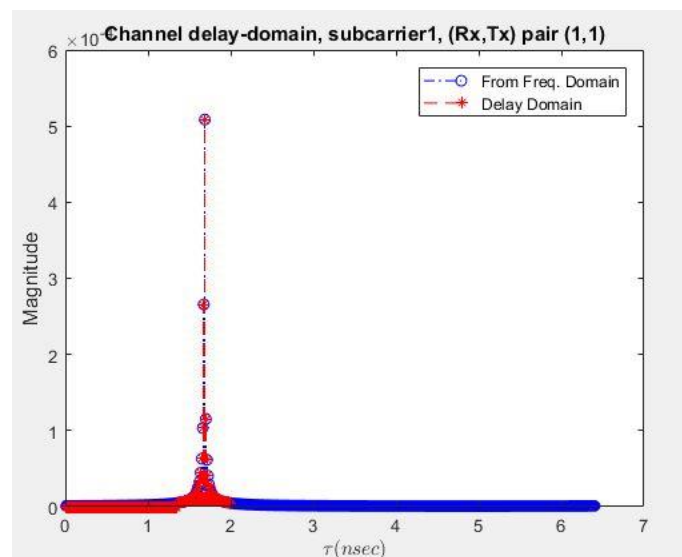
Ακολουθεί το διάγραμμα ισχύς-υστέρησης:



Διάγραμμα 5. Ισχύς – Υστέρησης για  $R=0,5$  km.

Στο διάγραμμα απωλειών ισχύος συναρτήσει της υστέρησης η ελάχιστη τιμή της γραφικής παράστασης αντιστοιχεί στην απευθείας διάδοση. Είναι αναμενόμενο σε μοντέλα όπου η απευθείας διάδοση είναι εφικτή, το σήμα με τις λιγότερες απώλειες να είναι αυτό που διένυσε τη μικρότερη απόσταση εντός του καναλιού. Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι για την απευθείας διάδοση η υστέρηση είναι στα 1,7 nsec και οι απώλειες περίπου στα 68 dB. Ο χρόνος υστέρησης για τις συνιστώσες των πολλαπλών διαδρομών κυμαίνεται γύρω από αυτή τη τιμή έως 2 με απώλειες να κινούνται γύρω από τα 100 dB.

Ακολουθεί το διάγραμμα απόκρισης παλμού:



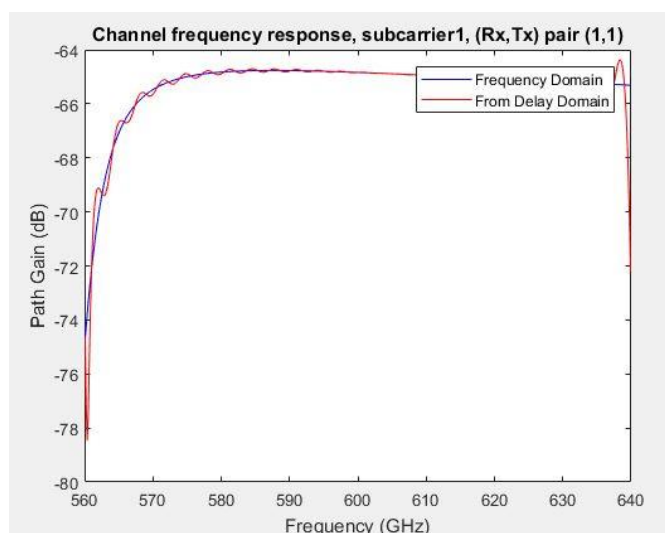
Διάγραμμα 6. Πλάτους παλμού – Υστέρησης για  $R=0,5$  km.

Η υψηλότερη τιμή στο γράφημα αντιστοιχεί στην απευθείας μετάδοση. Βλέπουμε ότι οι κορυφές είναι συγκεντρωμένες στα 1,8 nsec. Παρατηρούμε ότι κάθε κορυφή από τη LoS μετάδοση σχεδόν ακολουθείτε ακαριαία από κορυφή συνιστώσας του μοντέλου πολλαπλών διαδρομών, το οποίο υποδηλώνει πολύ μικρή υστέρηση των ανακλώμενων ακτινών από τις απευθείας.

## 5.2.2 Προσομοίωση για $R = 0,8 \text{ Km}$

Εκτελέστηκε προσομοίωση για απόσταση 0,8 Km πομπού – δέκτη με τις υπόλοιπες παραμέτρους όπως ορίστηκαν στη παράγραφο 5.1.

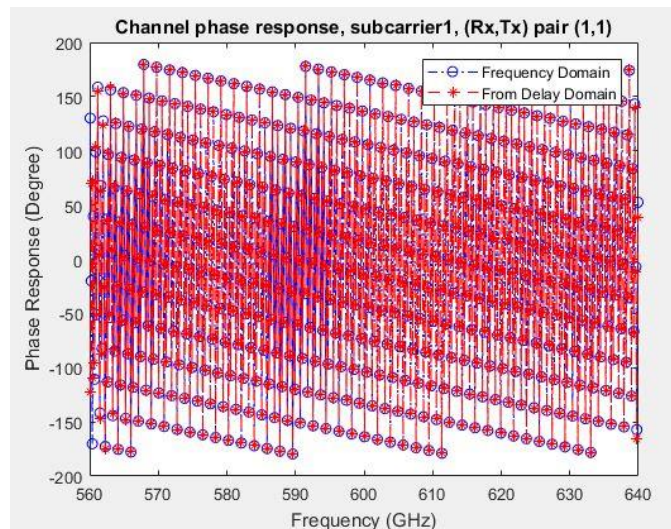
Η απόκριση του καναλιού φαίνεται στο διάγραμμα Κέρδους διαδρομής – Συχνότητας:



Διάγραμμα 7. Συχνότητας - Κέρδους Διαδρομής για  $R=0,8 \text{ km}$ .

Παρατηρούμε ότι η απώλεια σήματος στο μέσο της εκπεμπόμενης συχνότητας παρουσιάζει απώλειες γύρω από τη τιμή των 64,3 dB και στο κάτω άκρο (650 έως 570 GHz) οι απώλειες αυξάνονται εκθετικά έως τη τιμή των 78 dB. Το ίδιο ισχύει και για την απευθείας διάδοση (μπλε γραμμή) και για τις συνιστώσες πολλαπλών διαδρομών (multipath components). Οι τελευταίες κινούνται αρμονικά γύρω από την εκάστοτε τιμή της απευθείας διάδοσης εκτός από το άνω πέρας του φάσματος όπου γίνονται εντονότερες (620 έως 640 GHz).

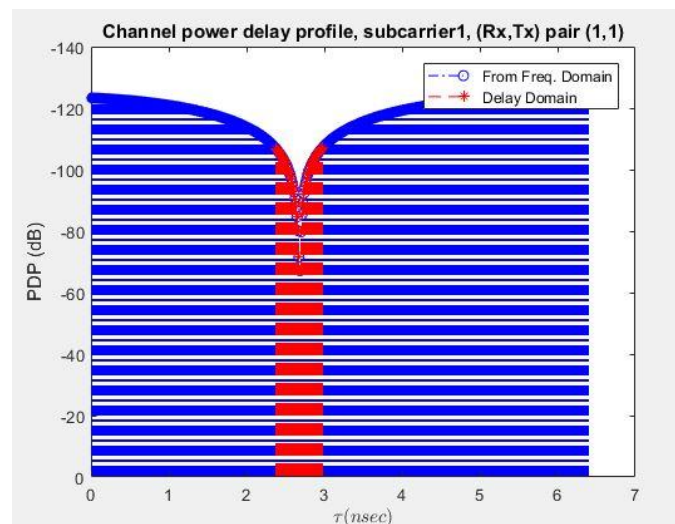
Ακολουθεί το διάγραμμα απόκρισης φάσης – συχνότητας:



Διάγραμμα 8. Φάσης – Συχνότητας για  $R=0,8$  km.

Παρατηρούμε ομοιογενή συμπεριφορά στη μεταβολή φάσης του σήματος σε ολόκληρο το φάσμα. Δεν διακρίνεται κάποια ιδιαιτερότητα και η μεταβολή φάσης είναι σχετικά ταχύς (όπως αυτό αναμένεται για σήματα σε αυτό το φάσμα συχνοτήτων) και ακολουθεί ημιτονοειδή μορφή. Σε σύγκριση με το διάγραμμα 4 παρατηρούμε αραίωση της ημιτονοειδούς μορφής της γραφικής παράστασης, δηλαδή επιβράδυνση στο ρυθμό μεταβολής της φάσης.

Ακολουθεί το διάγραμμα ισχύς-υστέρησης:

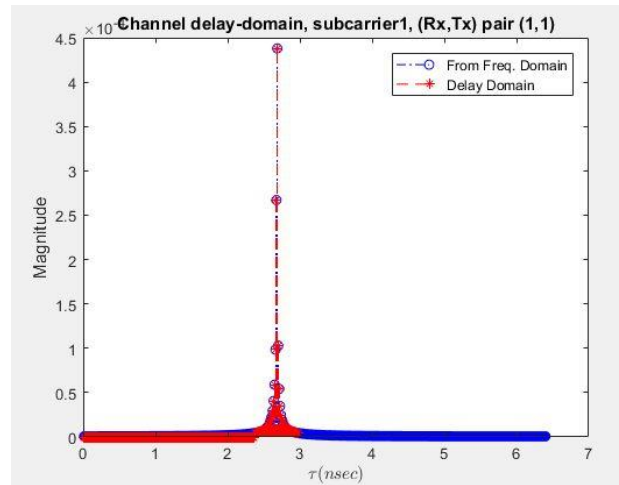


Διάγραμμα 9. Ισχύς – Υστέρησης για  $R=0,8$  km.

Στο διάγραμμα απωλειών ισχύος συναρτήσει της υστέρησης η ελάχιστη τιμή της γραφικής παράστασης αντιστοιχεί στην απευθείας διάδοση. Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι για την απευθείας διάδοση η υστέρηση είναι στα 2,6 nsec και οι απώλειες περίπου στα 72 dB. Ο χρόνος υστέρησης για τις συνιστώσες του πολλαπλών

διαδρομών κυμαίνεται γύρω από αυτή τη τιμή έως 2,8 με απώλειες να κινούνται γύρω από τα 110 dB.

Ακολουθεί το διάγραμμα απόκρισης παλμού:



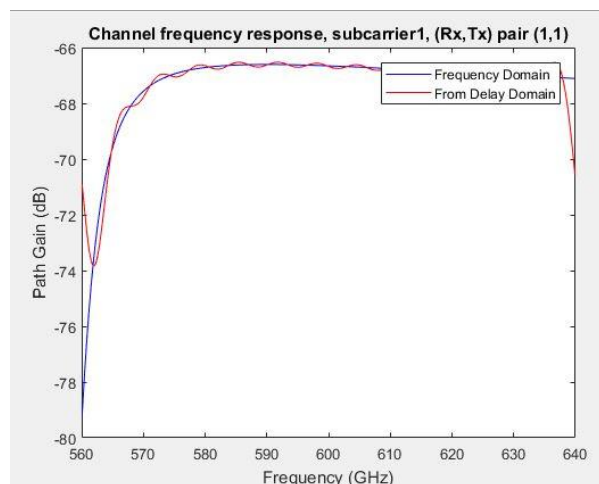
Διάγραμμα 10. Πλάτους παλμού – Υστέρησης για  $R=0,8$  km.

Η υψηλότερη τιμή στο γράφημα αντιστοιχεί στην απευθείας μετάδοση. Βλέπουμε ότι οι κορυφές είναι συγκεντρωμένες στα 2,8 nsec και προκύπτει σχεδόν κατά 1 nsec μετέπειτα από τη προηγούμενη προσομοίωση. Παρατηρούμε ότι κάθε κορυφή από τη LoS μετάδοση σχεδόν ακολουθείτε ακαριαία από κορυφή συνιστώσας του μοντέλου πολλαπλών διαδρομών, το οποίο υποδηλώνει πολύ μικρή υστέρηση των ανακλώμενων ακτινών από τις απευθείας.

### 5.2.3 Προσομοίωση για $R = 1$ Km

Εκτελέστηκε προσομοίωση για απόσταση 1 Km πομπού – δέκτη με τις υπόλοιπες παραμέτρους όπως ορίστηκαν στη παράγραφο 5.1.

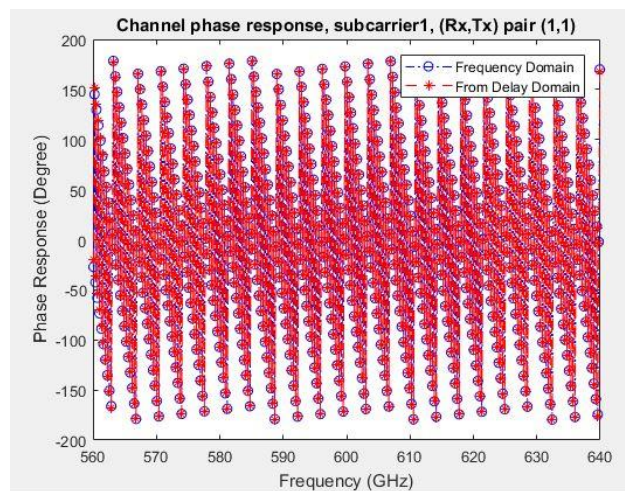
Η απόκριση του καναλιού φαίνεται στο διάγραμμα Κέρδους διαδρομής – Συχνότητας:



Διάγραμμα 11. Συχνότητας - Κέρδους Διαδρομής για  $R=1$  km.

Παρατηρούμε ότι η απώλεια σήματος στο μέσο της εκπεμπόμενης συχνότητας παρουσιάζει απώλειες γύρω από τη τιμή των 67dB και στο κάτω άκρο (650 έως 570 GHz) οι απώλειες αυξάνονται εκθετικά έως τη τιμή των 78 dB. Το ίδιο ισχύει και για την απευθείας διάδοση (μπλε γραμμή) και για τις συνιστώσες πολλαπλών διαδρομών (multipath components) οι οποίες όμως στο κάτω μέρος του φάσματος (560 έως 565 GHz) φαίνεται να παρουσιάζουν περισσότερες απώλειες εκκινώντας από τα 72 dB και φτάνοντας έως και στα -74dB. Οι τελευταίες κινούνται αρμονικά γύρω από την εκάστοτε τιμή της απευθείας διάδοσης εκτός από το άνω πέρασ του φάσματος όπου γίνονται εντονότερες (620 έως 640 GHz).

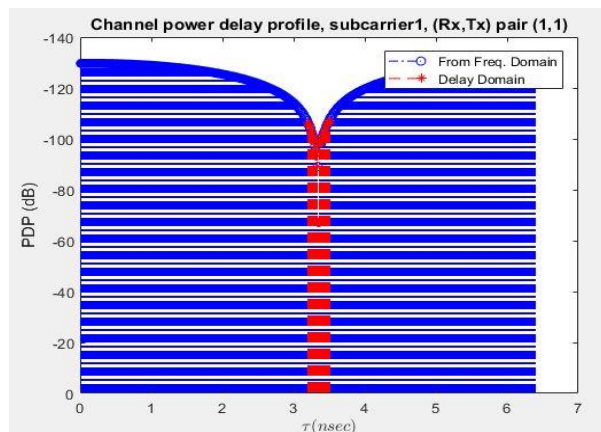
Ακολουθεί το διάγραμμα απόκρισης φάσης – συχνότητας:



Διάγραμμα 12. Φάσης – Συχνότητας για  $R=1$  km.

Παρατηρούμε ομοιογενή συμπεριφορά στη μεταβολή φάσης του σήματος σε ολόκληρο το φάσμα. Δεν διακρίνεται κάποια ιδιαιτερότητα και η μεταβολή φάσης είναι σχετικά ταχύς (όπως αυτό αναμένεται για σήματα σε αυτό το φάσμα συχνοτήτων) και ακολουθεί ημιτονοειδή μορφή. Σε σύγκριση με το διάγραμμα 8 παρατηρούμε ακόμη μεγαλύτερη αραίωση της ημιτονοειδούς μορφής της γραφικής παράστασης, δηλαδή επιβράδυνση στο ρυθμό μεταβολής της φάσης.

Ακολουθεί το διάγραμμα ισχύος-υστέρησης:

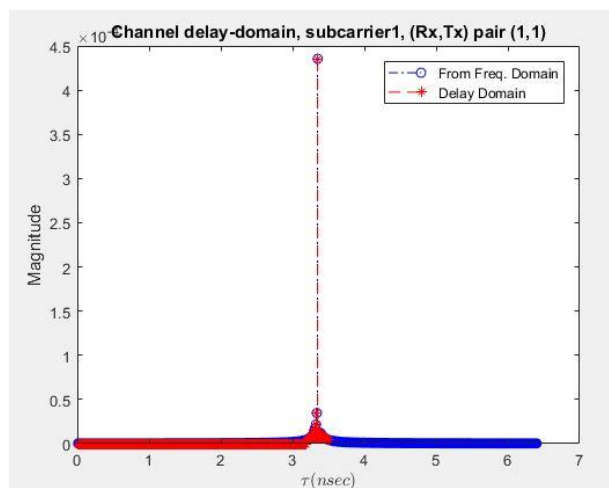


Διάγραμμα 13. Ισχύς – Υστέρησης για  $R=1$  km.



Στο διάγραμμα απωλειών ισχύος συναρτήσει της υστέρησης η ελάχιστη τιμή της γραφικής παράστασης αντιστοιχεί στην απευθείας διάδοση. Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι για την απευθείας διάδοση η υστέρηση είναι στα 3,6 nsec και οι απώλειες περίπου στα 100 dB. Ο χρόνος υστέρησης για τις συνιστώσες του πολλαπλών διαδρομών κυμαίνεται γύρω από αυτή τη τιμή έως 3,7 nsec με απώλειες να κινούνται γύρω από τα 120 dB.

Ακολουθεί το διάγραμμα απόκρισης παλμού:



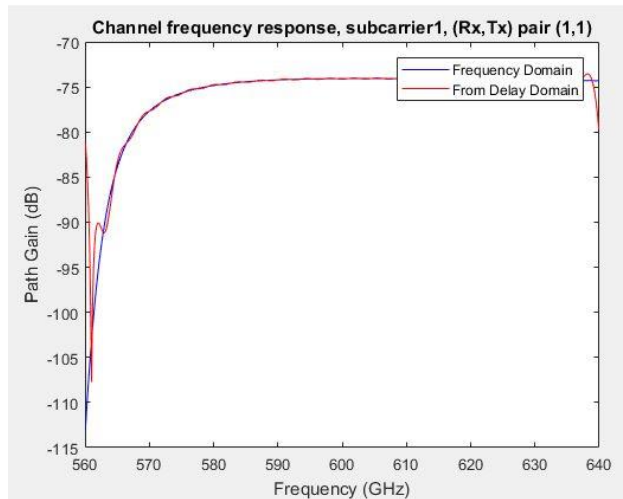
Διάγραμμα 14. Πλάτους παλμού – Υστέρησης για  $R=1$  km.

Η υψηλότερη τιμή στο γράφημα αντιστοιχεί στην απευθείας μετάδοση. Βλέπουμε ότι οι κορυφές είναι συγκεντρωμένες στα 3,4 nsec και προκύπτει σχεδόν κατά 1,2 nsec μετέπειτα από τη προηγούμενη προσομοίωση. Παρατηρούμε ότι κάθε κορυφή από τη LoS μετάδοση σχεδόν ακολουθείτε ακαριαία από κορυφή συνιστώσας του μοντέλου πολλαπλών διαδρομών, το οποίο υποδηλώνει πολύ μικρή υστέρηση των ανακλώμενων ακτινών από τις απευθείας.

#### 5.2.4 Προσομοίωση για $R = 3$ Km

Εκτελέστηκε προσομοίωση για απόσταση 3 Km πομπού – δέκτη με τις υπόλοιπες παραμέτρους όπως ορίστηκαν στη παράγραφο 5.1.

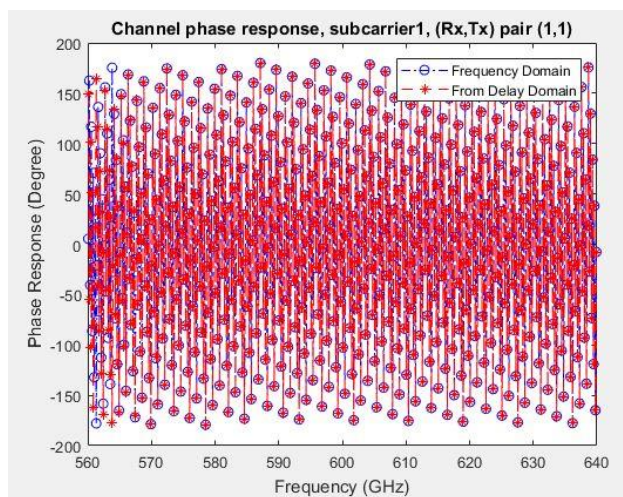
Η απόκριση του καναλιού φαίνεται στο διάγραμμα Κέρδους διαδρομής – Συχνότητας:



Διάγραμμα 15. Συχνότητας - Κέρδους Διαδρομής για  $R=3$  km.

Παρατηρούμε ότι η απώλεια σήματος στο μέσο της εκπεμπόμενης συχνότητας παρουσιάζει απώλειες γύρω από τη τιμή των 75dB και στο κάτω άκρο (650 έως 570 GHz) οι απώλειες αυξάνονται εκθετικά έως τη τιμή των 105 dB. Το ίδιο ισχύει και για την απευθείας διάδοση (μπλε γραμμή) και για τις συνιστώσες πολλαπλών διαδρομών (multipath components) οι οποίες όμως στο κάτω μέρος του φάσματος (560 έως 565 GHz) φαίνεται να παρουσιάζουν περισσότερες απώλειες εκκινώντας από τα 80 dB. Οι τελευταίες κινούνται αρμονικά γύρω από την εκάστοτε τιμή της απευθείας διάδοσης εκτός από το άνω πέρας του φάσματος όπου γίνονται εντονότερες (620 έως 640 GHz).

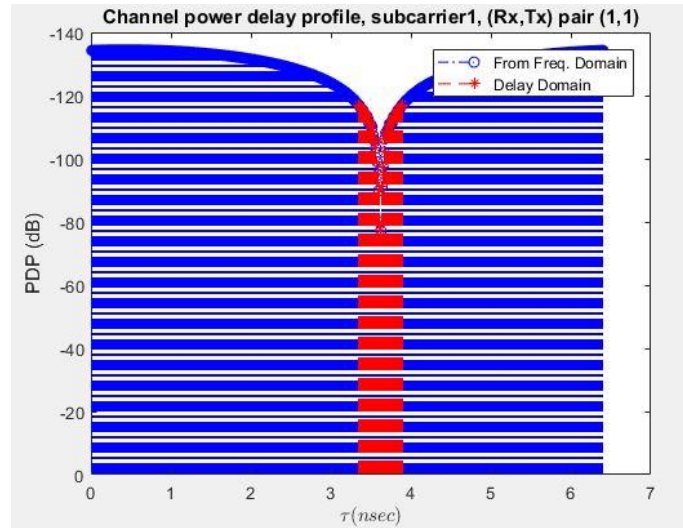
Ακολουθεί το διάγραμμα απόκρισης φάσης – συχνότητας:



Διάγραμμα 16. Φάσης – Συχνότητας για  $R=3$  km.

Παρατηρούμε ομοιογενή συμπεριφορά στη μεταβολή φάσης του σήματος σε ολόκληρο το φάσμα. Δεν διακρίνεται κάποια ιδιαιτερότητα και η μεταβολή φάσης είναι σχετικά ταχύς (όπως αυτό αναμένεται για σήματα σε αυτό το φάσμα συχνοτήτων) και ακολουθεί ημιτονοειδή μορφή.

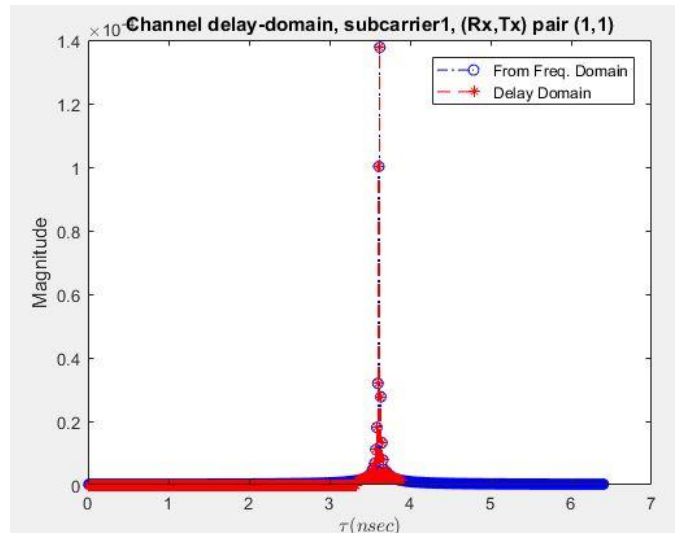
Ακολουθεί το διάγραμμα ισχύς-υστέρησης:



Διάγραμμα 17. Ισχύς – Υστέρησης για  $R=3$  km.

Στο διάγραμμα απωλειών ισχύος συναρτήσει της υστέρησης η ελάχιστη τιμή της γραφικής παράστασης αντιστοιχεί στην απευθείας διάδοση. Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι για την απευθείας διάδοση η υστέρηση είναι στα 3,6 nsec και οι απώλειες περίπου στα 72 dB. Ο χρόνος υστέρησης για τις συνιστώσες του πολλαπλών διαδρομών κυμαίνεται γύρω από αυτή τη τιμή έως 3,6 με απώλειες να κινούνται γύρω από τα 115 dB.

Ακολουθεί το διάγραμμα απόκρισης παλμού:



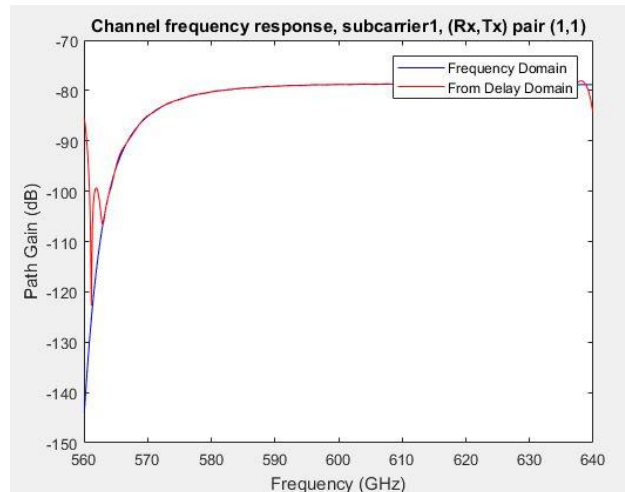
Διάγραμμα 18. Πλάτους παλμού – Υστέρησης για  $R=3$  km.

Η υψηλότερη τιμή στο γράφημα αντιστοιχεί στην απευθείας μετάδοση. Βλέπουμε ότι οι κορυφές είναι συγκεντρωμένες στα 3,6 nsec. Παρατηρούμε ότι κάθε κορυφή από τη LoS μετάδοση σχεδόν ακολουθείτε ακαριαία από κορυφή συνιστώσας του μοντέλου πολλαπλών διαδρομών, το οποίο υποδηλώνει πολύ μικρή υστέρηση των ανακλώμενων ακτινών από τις απευθείας.

### 5.2.5 Προσομοίωση για $R = 5$ Km

Εκτελέστηκε προσομοίωση για απόσταση 5 Km πομπού – δέκτη με τις υπόλοιπες παραμέτρους όπως ορίστηκαν στη παράγραφο 5.1.

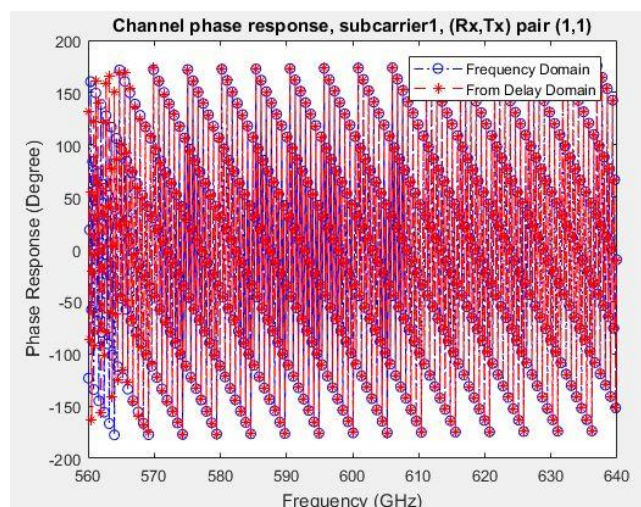
Η απόκριση του καναλιού φαίνεται στο διάγραμμα Κέρδους διαδρομής – Συχνότητας:



Διάγραμμα 19. Συχνότητας - Κέρδους Διαδρομής για  $R=5$  km.

Παρατηρούμε ότι η απώλεια σήματος στο μέσο της εκπεμπόμενης συχνότητας παρουσιάζει απώλειες γύρω από τη τιμή των 85dB και στο κάτω άκρο (650 έως 570 GHz) οι απώλειες αυξάνονται εκθετικά έως τη τιμή των 135 dB. Το ίδιο ισχύει και για την απευθείας διάδοση (μπλε γραμμή) και για τις συνιστώσες πολλαπλών διαδρομών (multipath components) οι οποίες όμως στο κάτω μέρος του φάσματος (560 έως 565 GHz) φαίνεται να παρουσιάζουν περισσότερες απώλειες εκκινώντας από τα 100 dB. Οι τελευταίες κινούνται αρμονικά γύρω από την εκάστοτε τιμή της απευθείας διάδοσης εκτός από το άνω πέρας του φάσματος όπου γίνονται εντονότερες (620 έως 640 GHz).

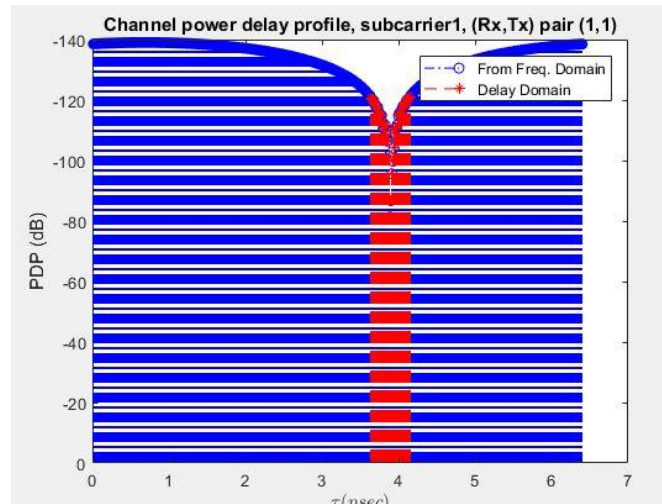
Ακολουθεί το διάγραμμα απόκρισης φάσης – συχνότητας:



Διάγραμμα 20. Φάσης – Συχνότητας για  $R=5$  km.

Παρατηρούμε ομοιογενή συμπεριφορά στη μεταβολή φάσης του σήματος σε ολόκληρο το φάσμα. Δεν διακρίνεται κάποια ιδιαιτερότητα και η μεταβολή φάσης είναι σχετικά ταχύς (όπως αυτό αναμένεται για σήματα σε αυτό το φάσμα συχνοτήτων) και ακολουθεί ημιτονοειδή μορφή.

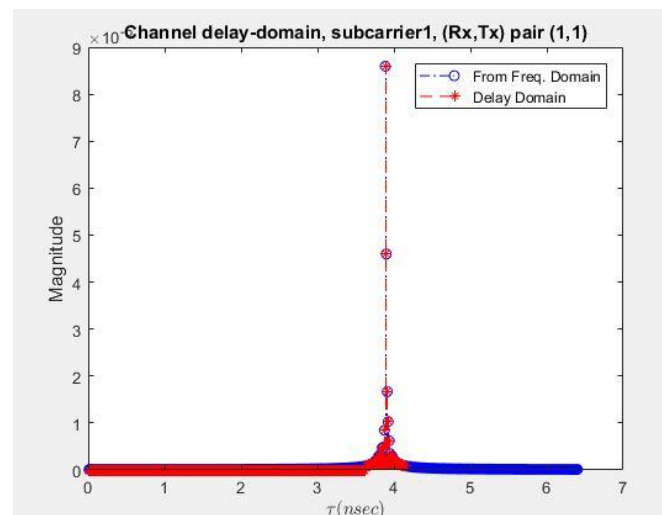
Ακολουθεί το διάγραμμα ισχύς -υστέρησης:



Διάγραμμα 21. Ισχύς – Υστέρησης για  $R=5$  km.

Στο διάγραμμα απωλειών ισχύος συναρτήσει της υστέρησης η ελάχιστη τιμή της γραφικής παράστασης αντιστοιχεί στην απευθείας διάδοση. Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι για την απευθείας διάδοση η υστέρηση είναι στα 3,8 nsec και οι απώλειες περίπου στα 110 dB. Ο χρόνος υστέρησης για τις συνιστώσες του πολλαπλών διαδρομών κυμαίνεται γύρω από αυτή τη τιμή έως 4,1 με απώλειες να κινούνται γύρω από τα 120 dB.

Ακολουθεί το διάγραμμα απόκρισης παλμού:



Διάγραμμα 22. Πλάτους παλμού – Υστέρησης για  $R=5$  km.

Η υψηλότερη τιμή στο γράφημα αντιστοιχεί στην απευθείας μετάδοση. Βλέπουμε ότι οι κορυφές είναι συγκεντρωμένες στα 3,9 nsec. Παρατηρούμε ότι κάθε κορυφή από τη

LoS μετάδοση σχεδόν ακολουθείτε ακαριαία από κορυφή συνιστώσας του μοντέλου πολλαπλών διαδρομών, το οποίο υποδηλώνει πολύ μικρή υστέρηση των ανακλώμενων ακτινών από τις απευθείας.

## **Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα**

### **6.1 Θεωρητική σύνοψη**

Κάθε γενιά κινητών επικοινωνιών προσφέρει βελτιωμένη λειτουργικότητα σε σχέση με την προηγούμενη, ενώ παράλληλα παρουσιάζει καινοτομίες για να καλύψει τις ανάγκες μιας αγοράς που αλλάζει γρήγορα. Υπό αυτό το πρίσμα, αναμένεται ότι το σύστημα πέμπτης γενιάς (5G), το οποίο εισάγεται εμπορικά γύρω στο έτος 2020, δεν θα είναι σε θέση να εξυπηρετήσει επαρκώς την ταχέως αυξανόμενη ζήτηση για ασύρματη επικοινωνία σε περίπου δέκα χρόνια. Κατά συνέπεια, υπάρχει επιτακτική ανάγκη μετάβασης σε ένα μελλοντικό δίκτυο 6G, το οποίο πρέπει να κατασκευαστεί κατά την τρέχουσα δεκαετία. Αναμένεται ότι τα μέλη της έκτης γενιάς θα έχουν απεριόριστη πρόσβαση τόσο σε αγαθά όσο και σε πληροφορίες, ανεξάρτητα από τον τόπο ή τους χρονικούς περιορισμούς. Ως αποτέλεσμα, η κοινωνία και η οικονομία θα καθοδηγούνται από τα δεδομένα στο εγγύς μέλλον, επιτρέποντας την παγκόσμια συνδεσιμότητα και την αλληλεπίδραση χωρίς τριβές μεταξύ ανθρώπων και μηχανών για τη δημιουργία ενός πλήρως συνδεδεμένου ψηφιακού "έξυπνου περιβάλλοντος αναφοράς" που θα λειτουργεί ως διαδραστικός σύνδεσμος μεταξύ του πραγματικού και του εικονικού κόσμου.

Μια άλλη σημαντική πτυχή της 6G θα είναι η ταχεία ανάπτυξη της μηχανικής μάθησης (ML) και της τεχνητής νοημοσύνης (AI), η οποία θα έχει καταλυτική επίδραση στην ευρεία υιοθέτηση της κοινωνίας της πληροφορίας, καθώς και στην ανάπτυξη πιο έξυπνων δικτύων με επικοινωνίες σε πραγματικό χρόνο, φέρνοντας στο προσκήνιο νέες ανθρώπινες αισθητηριακές εμπειρίες και καινοτόμες εφαρμογές. Πιο συγκεκριμένα, η ομοσπονδιακή μάθηση (FL) θα είναι η καλύτερη επιλογή για καταναεμημένη τεχνητή νοημοσύνη, επιτρέποντας στις επικοινωνίες 6G να επιτύχουν πανταχού παρούσα AI, ενώ η μηχανική μάθηση θα αποκτήσει μια πολύ ανώτερη άποψη προς την κατεύθυνση της πλήρους αυτοματοποίησης των λειτουργιών του δικτύου. Τα μελλοντικά συστήματα επικοινωνιών 6G θα έχουν ορισμένα σημαντικά χαρακτηριστικά, όπως γρήγορους ρυθμούς δεδομένων, εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία, χαμηλή καθυστέρηση, υψηλή χωρητικότητα, υψηλή ενέργεια και φασματική αποδοτικότητα. Η απρόσκοπτη μετάβαση στο 6G απαιτεί υψηλά επίπεδα ασφάλειας και ιδιωτικότητας για τις σχετικές εφαρμογές και υπηρεσίες.

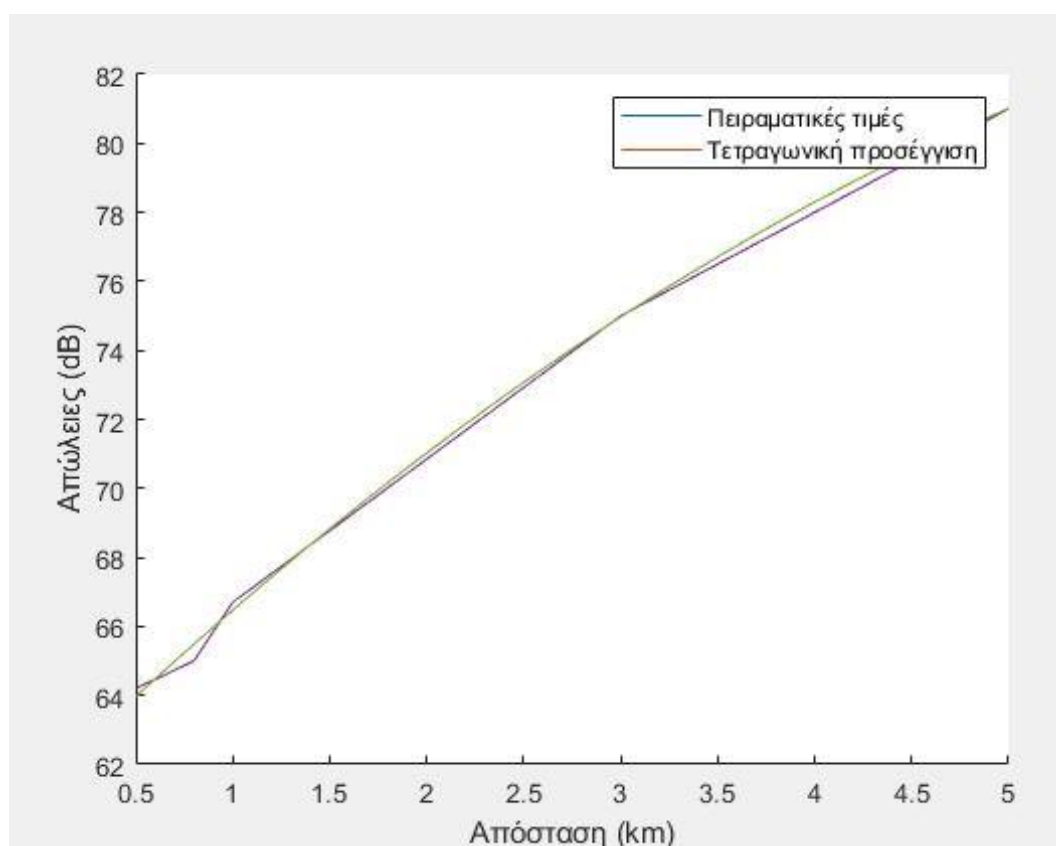
## 6.2 Συμπεράσματα προσομοιώσεων

Από τα διαγράμματα απωλειών – συχνότητας για κάθε προσομοίωση κρατάμε την μέση τιμή των απωλειών γύρω από τη κεντρική συχνότητα.

Πίνακας 3. Απώλειες συναρτήσει της απόστασης πομπού – δέκτη.

Απόσταση (Km)	0,5	0,8	1,0	3,0	5,0
Ισχύς (dB)	64,2	65,0	66,7	75,0	81,0

Και κάνοντας τη γραφική παράσταση των σημείων στο καρτεσιανό επίπεδο και ενώνοντας τα με γραμμική παρεμβολή παίρνουμε το παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 23. Απώλειες συναρτήσει της απόστασης πομπού – δέκτη.

Η δεύτερη γραφική παράσταση προκύπτει με τη προσάρτηση ενός πολυωνύμου δευτέρου βαθμού στα σημεία του Πίνακα 3. Το χαρακτηριστικό πολυώνυμο είναι:

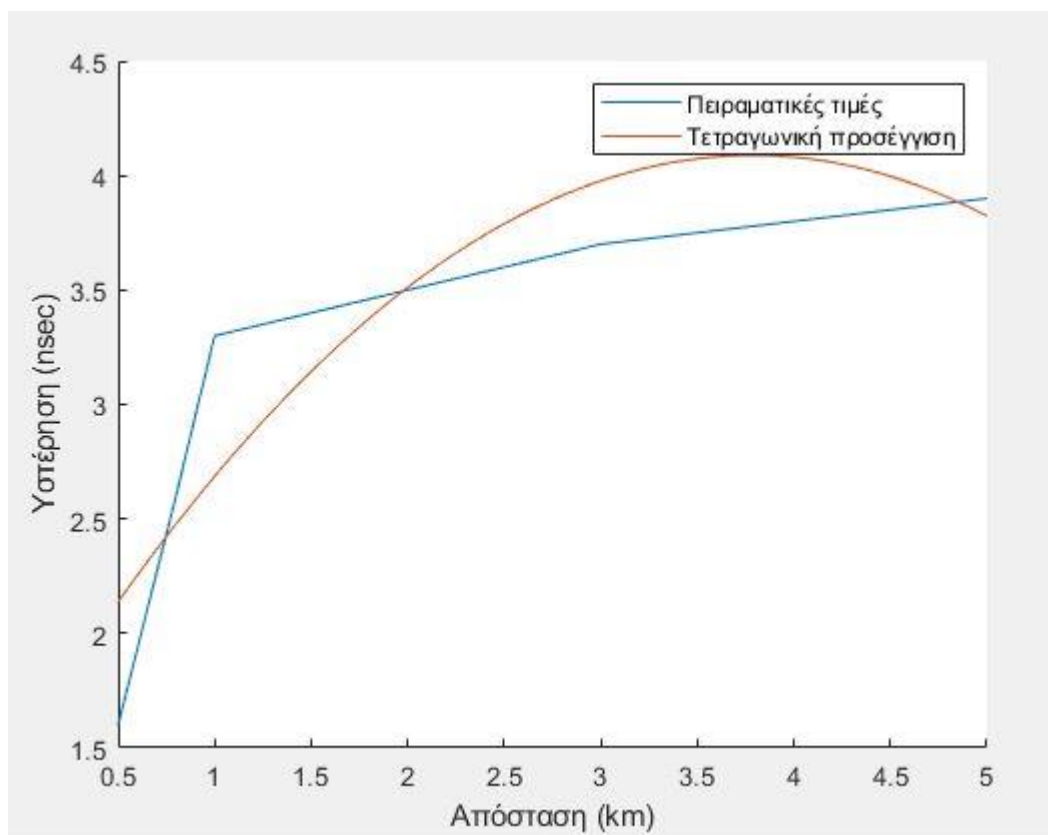
$$\varphi(x) = -\frac{35}{114}x^2 + \frac{356}{65}x + \frac{4475}{73} \quad \text{Εξ (6.1)}$$

Από τα διαγράμματα ισχύος – υστέρησης μπορεί να εξαχθεί ο χρόνος υστέρησης που αντιστοιχεί στην απευθείας διάδοση συναρτήσει της απόστασης.

Πίνακας 4. Υστέρηση συναρτήσει της απόστασης πομπού – δέκτη.

<b>Απόσταση (Km)</b>	0,5	0,8	1,0	3,0	5,0
<b>Χρόνος υστέρησης (nsec)</b>	1,6	2,6	3,3	3,7	3,9

Και κάνοντας τη γραφική παράσταση των σημείων στο καρτεσιανό επίπεδο και ενώνοντας τα με γραμμική παρεμβολή παίρνουμε το παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 24. Υστέρηση συναρτήσει της απόστασης πομπού-δέκτη.

Η δεύτερη γραφική παράσταση προκύπτει με τη προσάρτηση ενός πολωνύμου δευτέρου βαθμού στα σημεία του Πίνακα 4. Το χαρακτηριστικό πολώνυμο είναι:

$$\varphi(x) = -\frac{288}{1595}x^2 + \frac{625}{457}x + \frac{628}{419} \quad \text{Εξ (6.2)}$$

Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει τόσο μεγάλος εναρμονισμός του τετραγωνικού πολωνύμου με τα πειραματικά δεδομένα που σημαίνει ότι η υστέρηση συναρτήσει της απόστασης δεν συνδέεται με πολωνυμική σχέση.

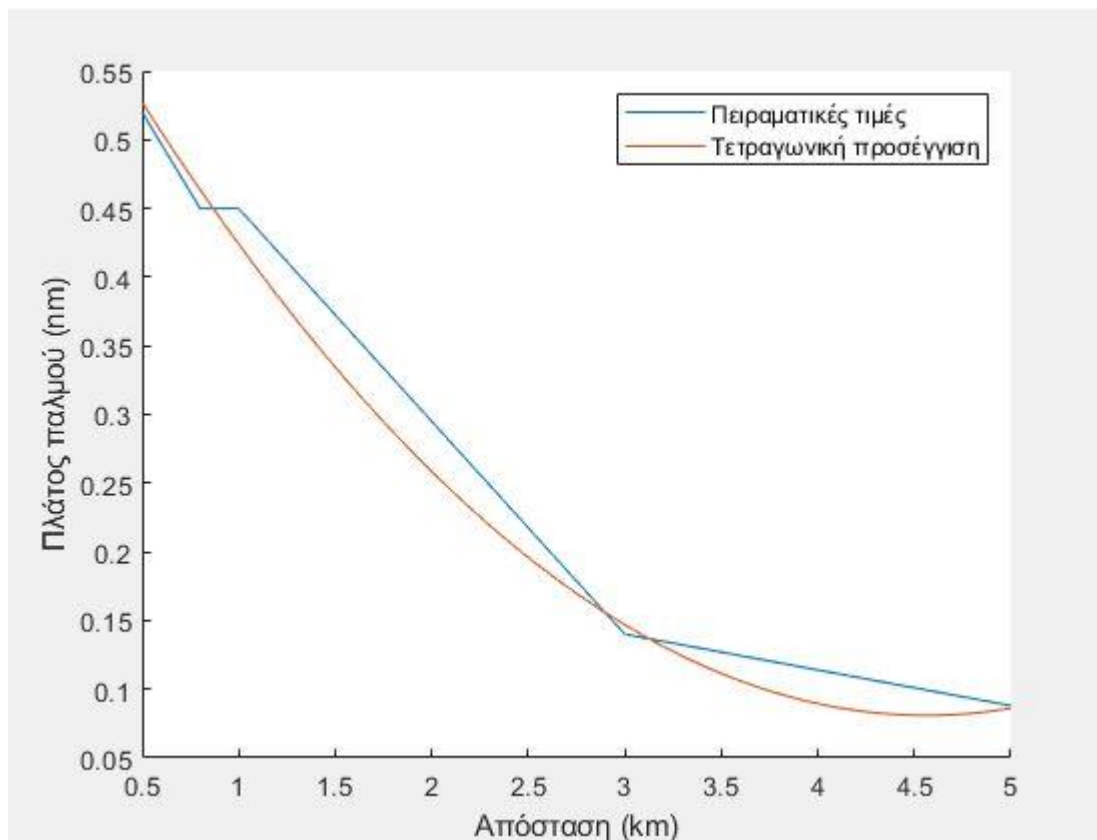
Από τα διαγράμματα απόκρισης παλμού μπορεί να εξαχθεί το πλάτος απόκρισης παλμού συναρτήσει της απόστασης.



Πίνακας 5. Πλάτος παλμού συναρτήσει απόστασης πομπού – δέκτη.

Απόσταση (Km)	0,5	0,8	1,0	3,0	5,0
Πλάτος παλμού (nm)	$5,2 \cdot 10^{-1}$	$4,5 \cdot 10^{-1}$	$4,5 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$0,88 \cdot 10^{-1}$

Και κάνοντας τη γραφική παράσταση των σημείων στο καρτεσιανό επίπεδο και ενώνοντας τα με γραμμική παρεμβολή παίρνουμε το παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 25. Πλάτος παλμού συναρτήσει απόστασης πομπού – δέκτη.

Η δεύτερη γραφική παράσταση προκύπτει με τη προσάρτηση ενός πολυωνύμου δευτέρου βαθμού στα σημεία του Πίνακα 5. Το χαρακτηριστικό πολυώνυμο είναι:

$$\varphi(x) = \frac{37}{1368}x^2 - \frac{191}{774}x + \frac{826}{1283} \quad \text{Εξ (6.3)}$$

Παρατηρούμε ότι εκτός από χρόνο υστέρησης συναρτήσει της απόστασης, δηλαδή στο πλάτος παλμού και στις απώλειες συναρτήσει της απόστασης είμαστε σε θέση να περιγράψουμε το διάγραμμα με πολυώνυμο δευτέρου βαθμού. Ο χρόνος υστέρησης φαίνεται να ακολουθεί  $a\sqrt{x}$  κατανομή, όπου  $a$  είναι ένας συντελεστής αναλογίας.

## **Βιβλιογραφία**

- Agrawal J, P. R. (2015). Evolution of Mobile Communication Network: from 1G to 4G. *International Journal of Multidisciplinary and Current Research* .
- Alwis Ch, K. A. (2021). Survey of 6G Frontiers: Trends , Application, Technologies and Future Research. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, σσ. 836-886.
- Bhandari N, D. S. (2017). Evolution of cellular network: from 1G to 5G . *International journal of engineering and techniques* , σσ. 98-105.
- Dhruv B, P. K. (2014). A Research based study on evolution of cellular generations (5G) . *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering issue 7*.
- Faisal A, S. H.-N. (2020). Ultra Massive MIMO Systems at Terahertz Bands : Prospects and Challenges. *IEEE Vehicular Technology Magazine Vol 15 Issue 4* .
- K.P, S. a. (2013). A Comparative Study of 1G,2G,3G and 4G. *International Journal of Advances in Engineering Research*.
- Kiourti A, N. S. (2012). A review of implantable patch antennas for biomedical telemetry: Challenges and Solutions. *Antennas Propag Mag IEEE vol 54 no3* , σσ. 210-228.
- Lee, Y. (2009). Principles of Terahertz Science and Technology . *Proceeding of the International Conference in Mainz Germany* .
- Lombart N, L. C.-D.-k. (2013). Silicon micromachined lens antenna for THz integrated heterodyne arrays .
- Meenal G, K. a. (2014). 5G Technology-Evolution and Revolution. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing* .
- Rajatheva N, A. I. (2020). Scoring the Terabit/s Goal: Broadband Connectivity in 6G. *IEEE Open journal of Communication Society*.
- Rappaport, S. (2019). Wireless communications and applications above 100 GHz: Opportunities and challenges and beyond. *IEEE Access vol 7*, σσ. 78,729.
- Rotnman L, G. I. (2013). The HITRAN2012 molecular spectroscopic database. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 130*.
- S, S. (2009). Microwave tomography: review of the progress towards clinical applications . *Philos Trans R Soc Math Phys Eng Sci vol 367* , σσ. 3021-3042.
- Semenov, S. (2009). Microwave Tomography: Review of the progress towards clinical applications . *Philos Trans R Soc Math Phys Eng Sci vol 367*, σσ. 3021-3042.
- Sheikh, F. (2016). Terahetz band: Channel Modeling for short-range wireless communications in the spectral windows . *IET Microwaves, Antennas & Propagation Vol 10 issue 13*.

- Shihao, J. (2019). Scattering Mechanisms and Modeling for Terahertz Wireless Communications. *Electrical Engineering and Systems Science -> Signal Processing* .
- Siemion, A. (2019). Terahertz Diffractive Optics - Smart Control over Radiation. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves* 40 , σσ. 477-499.
- Tarboush, S. (2021). TeraMIMO, A Channel Simulator for Wideband Ultra-Massive MIMO Terahertz Communications.
- Tripathi S, S. N. (2021). Millimeter-wave and Terahertz Spectrum for 6G Wireless. *6G Mobile Wireless Networks* .