



**ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ**

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗ  
ΜΙΚΡΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ**

**ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ : ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Χρήση του Φάσματος Συχνοτήτων 70-500GHz στις  
δορυφορικές επικοινωνίες**

**Δημήτριος Σ. Κωνσταντινίδης-Φράγκος**

**Επιβλέπων**

**Νικόλαος Ουζούνογλου, Ομ. Καθηγητής ΗΜΜΥ ΕΜΠ**

**ΑΘΗΝΑ**

**ΙΟΥΛΙΟΣ 2020**

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Χρήση του Φάσματος Συχνοτήτων 70-500GHz στις δορυφορικές επικοινωνίες

**Δημήτριος Σ. Κωνσταντινίδης-Φράγκος**

**A.M.: MM242**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ**

**Νικόλαος Ουζούνογλου, Καθηγητής ΕΜΠ ΗΜΜΥ**

**ΑΘΗΝΑ**  
Ιούλιος 2020

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας έγινε μία προσπάθεια να επικεντρώσουμε το ενδιαφέρον μας στις συχνότητες που αφορούν τις δορυφορικές επικοινωνίες.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία ιστορική αναδρομή στις δορυφορικές επικοινωνίες και σε θέματα που αφορούν τη δομή τους, την αρχιτεκτονική τους, τις τροχιές, τις υπηρεσίες και τις εφαρμογές τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μία παρουσίαση των δορυφορικών επικοινωνιών με τη χρήση συχνοτήτων σε TeraHertz τιμές. Παράλληλα, αναφερόμαστε στα κίνητρα για τη χρήση των TeraHertz συχνοτήτων καθώς και στην ατμοσφαιρική απορρόφηση σε αυτές τις συχνότητες.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναφερόμαστε σε μήκη κύματος της τάξης των mm και στο μοντέλο καναλιού σε μήκη κύματος mm. Ταυτόχρονα, παρουσιάζονται δύο εφαρμογές γι' αυτά τα μήκη κύματος (mmMAGIC Project και mmWave Backhaul και Fronthaul).

Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο εκθέτουμε μία σειρά από συμπεράσματα που αφορούν τη χρήση υπερυψηλών συχνοτήτων στις δορυφορικές επικοινωνίες.

**ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ:** Δορυφορικές Επικοινωνίες

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** Συχνότητες TeraHertz, Μήκη Κύματος της Τάξης των mm, mmMAGIC Project, mmWave Backhaul και Fronthaul

## **ABSTRACT**

In the context of this dissertation, an attempt was made to focus our attention on the frequencies related to satellite communications.

The first chapter provides a historical overview of satellite communications and issues related to their structure, architecture, trajectories, services and applications.

The second chapter presents a presentation of satellite communications using frequencies in TeraHertz values. At the same time, we refer to the incentives for the use of TeraHertz frequencies as well as to the atmospheric absorption at these frequencies.

In the third chapter we refer to wavelengths of the order of mm and to the channel model in wavelengths of mm. At the same time, two applications are presented for these wavelengths (mmMAGIC Project and mmWave Backhaul and Fronthaul).

Finally, in the fourth chapter we present a series of conclusions regarding the use of high frequencies in satellite communications.

**SUBJECT AREA:** Satellite Communications

**KEYWORDS:** TeraHertz Frequencies, mm Class Wave Length, mmMAGIC Project, mmWave Backhaul and Fronthaul

*Στη αγαπημένη μου μητέρα Όλγα, στους αγαπητούς μου συναδέλφους του Ερευνητικού  
Εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Μετρητικών Συστημάτων,  
Περιβάλλοντος και Αντίστροφης Μηχανικής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, καθώς  
και σε όλους όσους είναι δίπλα μου και με στηρίζουν.*

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την εκπόνηση της παρούσης διπλωματικής εργασίας ολοκληρώνεται ο δεύτερος κύκλος σπουδών μου στο Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών στη Μικροηλεκτρονική με ειδίκευση στη Σχεδίαση Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων στο τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών. Το όμορφο αυτό ταξίδι γνώσης έφτασε στο τέλος του και θα ήθελα πριν αναφερθώ στο περιεχόμενο της εργασίας να δώσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους συνέβαλλαν στο επίτευγμα αυτό και θα ήταν παράλειψη μου να μην τους αναφέρω.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Ουζούνογλου Νικόλαο, για την ένθερμη υποστήριξη και την κατανόηση σε όλα τα επίπεδα αυτής της προσπάθειας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το προσωπικό του τομέα Ηλεκτρικής Ενέργειας και Ισχύος του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής (πρώην Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά -τμήμα Ηλεκτρολογίας), τους καθηγητές κ.κ. Μαλατέστα Παντελή και Σινιόρο Παναγιώτη για την εμπιστοσύνη και την υποστήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω, τον καθηγητή κ. Λεωνιδόπουλο Γεώργιο για την άψογη συνεργασία, την κατανόηση και την υποστήριξη του, τον επίκουρο καθηγητή Μανουσάκη Νικόλαο ο οποίος πάντα με καλή διάθεση και χαμόγελο με ενθάρρυνε και με καθοδηγούσε συστηματικά στο πως να διαχειρίζομαι διάφορες καταστάσεις τόσο σε επιστημονικό όσο και σε προσωπικό επίπεδο, τον Λέκτορα εφαρμογών Καραγιαννόπουλο Παναγιώτη για την κατανόηση και την ενθάρρυνση σε κάθε δύσκολη στιγμή που αντιμετώπιζα, τη Φωτεινή Μεταξά ΕΔΙΠ για την όλη στάση και συμπεριφορά της ως προς το πρόσωπο μου , το ευχαριστώ μου είναι λίγο .

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ για την υπομονή και την κατανόηση στην Αρτέμιδα, στην Κυριακή, στον Στέργιο, στο Σταύρο, στο Βασίλη και στους υπόλοιπους αγαπητούς και εκλεκτούς συναδέλφους που δουλεύαμε μαζί και φυσικά στην ηρωίδα μητέρα μου.

Η αλήθεια είναι ότι νιώθω ευλογημένος που συναναστρέφομαι με τους παραπάνω και ότι χωρίς τη βοήθεια τους δεν θα είχα καταφέρει όχι μόνο να ολοκληρώσω τον δεύτερο κύκλο σπουδών μου αλλά και πολλά άλλα πράγματα. Για αυτό τους οφείλω ένα τεράστιο ευχαριστώ από καρδιάς και αμέριστη ευγνωμοσύνη.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....</b>	<b>9</b>
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ .....</b>	<b>11</b>
1.1 Εισαγωγή.....	11
1.2 Ιστορική Εξέλιξη .....	11
1.3 Δορυφορικά Συστήματα Επικοινωνιών .....	13
1.4 Σχεδιασμός και οργάνωση δορυφορικού Συστήματος.....	15
1.5 Δορυφορικές Τροχιές .....	16
1.6 Υπηρεσίες και εφαρμογές δορυφορικών επικοινωνιών .....	18
1.7 Ζώνες Συχνοτήτων .....	21
1.8 Κατηγορίες Δορυφορικών Ραδιοεπικοινωνιών .....	22
<b>2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΣΕ ΤΗΖ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ.....</b>	<b>24</b>
2.1 Εισαγωγικά .....	24
2.2 Κίνητρο για THz Επικοινωνίες.....	26
2.3 Εφαρμογές.....	27
2.4 Προκλήσεις και Ερευνητικοί Σκοποί.....	28
2.5 Ατμοσφαιρική Απορρόφηση στα THz.....	31
2.6 Πομπός-Επίγειο Τμήμα .....	31
2.7 Δέκτης-Δορυφορικό Τμήμα.....	33
<b>3. ΜΗΚΗ ΚΥΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΤΑΞΗΣ ΤΩΝ MM.....</b>	<b>35</b>
3.1 Μηχανισμοί Διάδοσης.....	35
3.2 Μοντέλο καναλιού mmWave κυμάτων (mmWave channel model).....	39
3.3 mmMAGIC Project .....	41

3.4 mmWave Backhaul και Fronthaul .....	42
3.5 Προκλήσεις mmWave .....	43
4. ΕΠΙΛΟΓΗ ΖΩΝΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ.....	47
5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....	48



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η τεχνολογία των δορυφόρων έχει εξελιχθεί παρά πολύ κατά τη διάρκεια των τελευταίων 70 ετών, από τότε δηλαδή που την πρότεινε αρχικά ο Arthur C. Clarke. Σήμερα, τα δορυφορικά συστήματα μπορούν να παρέχουν ποικίλες υπηρεσίες, συμπεριλαμβανομένων των ευρυζωνικών επικοινωνιών, των ακουστικών/τηλεοπτικών δικτύων διανομής, της θαλάσσιας ναυσιπλοΐας, της παγκόσμιας εξυπηρέτησης και υποστήριξης πελατών, καθώς επίσης και των στρατιωτικών συστημάτων.

Τα δορυφορικά συστήματα έχουν, εδώ και χρόνια, εμφανιστεί στο προσκήνιο, μαζί με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που αυτό συνεπάγεται. Στηριζόμενοι στις δορυφορικές επικοινωνίες, δεν είναι λίγοι οι οργανισμοί που επένδυσαν σε αυτές και στην έρευνά τους. Ανάμεσα στους οργανισμούς αυτούς και μεγάλα ονόματα, όπως οι : Intelsat, Inmarsat και Eutelsat. Από τι μέρη όμως αποτελείται ένας δορυφόρος; Ποια είναι αυτά τα υποσυστήματα που συνεργάζονται τόσο αρμονικά μεταξύ τους για την επίτευξη της λειτουργίας του; Ένα δορυφόρος κινείται γύρω από τη γη σε καθορισμένες τροχιές, ανάλογα με το είδος του και το είδος των υπηρεσιών που δημιουργήθηκε για να προσφέρει. Οι υπηρεσίες αυτές περιλαμβάνουν υπηρεσίες τηλεόρασης, Internet, ραδιοφώνου, τηλεφωνίας, GPS, και άλλες.

Σε μια εποχή σαν τη σημερινή, κατά την οποία οι τηλεπικοινωνίες είναι κάτι το αυτονόητο, το καθημερινό στη ζωή μας, το ξεκίνημα των τηλεπικοινωνιών στα παλαιότερα χρόνια είναι κάτι στο οποίο αξίζει να αναφερθεί κανείς. Ξεκινάμε από την αρχή όταν ο κύριος τρόπος επικοινωνίας ήταν τα οπτικά σήματα με φωτιά τα οποία ξεκίνησαν από τους αρχαίους Έλληνες (περίπου 1195-1184 π.Χ.), συνεχίζουμε με τα ταχυδρομικά περιστέρια (5ο π.Χ), τον ακουστικό τηλέγραφο και καταλήγουμε με τους αγγελιαφόρους, πεζούς ή έφιππους, σύστημα το οποίο διατήρησαν και το ανέπτυξαν ο Μ. Αλέξανδρος, οι Ρωμαίοι και οι Βυζαντινοί. Από τις παραπάνω μεθόδους μπορεί κανείς να καταλάβει πόσο σημαντική ήταν η ανάγκη επικοινωνίας των ανθρώπων, από την αρχαία ακόμα εποχή. Το μέσο το οποίο έφερε την επανάσταση είναι ο πρώτος τηλέγραφος. Τρεις παράγοντες συντέλεσαν στην ανάπτυξή του: Η ανακάλυψη των ιδιοτήτων του ηλεκτρισμού, η τεχνολογική δυνατότητα παραγωγής χάλκινων αγωγών μεγάλου μήκους και οι ανάγκες των σιδηροδρόμων που διέθεταν οικονομική δυνατότητα να χρηματοδοτήσουν εφευρέτες. Έπειτα από αυτόν ακολούθησαν διάφορα άλλα επιτεύγματα όπως ο τηλέγραφος Morse τον οποίο επινόησε ο Samuel Morse (1791-1872) και, αργότερα, εφηύρε τον ομώνυμο κώδικα. Η δεύτερη μεγάλη επανάσταση ήρθε το 1876 από τον Αμερικανό Γκράχαμ Μπελ (1847- 1922): το τηλέφωνο, μια από τις σημαντικότερες εφευρέσεις στην ιστορία της ανθρωπότητας. Εκμηδένισε τις αποστάσεις και επέδρασε στην οικονομική και κοινωνική ζωή των ανθρώπων. Ο Μπελ κατάφερε να μεταδώσει την ομιλία χάρη σε ηλεκτρικά σήματα. Από το 1877 ήδη το τηλέφωνο τελειοποιήθηκε χάρη στον Αμερικανό Τόμας Έντισον (1847-1931). Στη συνέχεια αναπτύχθηκαν και τα τηλεπικοινωνιακά κέντρα τα οποία για πολλά χρόνια λειτουργούσαν χειροκίνητα μέχρι το 1931 που έγιναν αυτόματα. Το 1894 ο Μαρκόνι άρχισε να πειραματίζεται με τον ηλεκτρομαγνητισμό και ήταν αυτός που πέτυχε την πρώτη μετάδοση μηνύματος χωρίς την χρήση συρμάτων.

Παράλληλα, πρωτοπόροι ακόμα εκείνη την εποχή υπήρξαν ο Ν. Tesla ο οποίος κατασκεύασε το πρώτο ασύρματο σύστημα επικοινωνίας το 1893, ο Alexander Popov ο οποίος κατασκεύασε δέκτη Η/Μ κυμάτων το 1894 και πέτυχε μετάδοση ραδιοκυμάτων μεταξύ δύο σημείων και τέλος ο Reginald Fessenden ο οποίος πέτυχε αμφίδρομη υπερατλαντική ασύρματη επικοινωνία το 1906. Είχε αρχίσει να μπαίνει σοβαρά στη ζωή των ανθρώπων η ασύρματη μετάδοση. Το 1947 γεννιέται η ιδέα του κινητού τηλεφώνου, όταν οι επιστήμονες της AT&T (American Telephone & Telegraph) συνειδητοποιούν ότι ένας πομπός μικρής εμβέλειας μπορεί να μεταμορφωθεί σε πομπό μεγάλης εμβέλειας συνδέοντας πολλές "κυψέλες" ενός τοπικού δικτύου. Το 1967 το

κινητό τηλέφωνο ήταν διαθέσιμο στην αγορά. Από την εποχή αυτή και έπειτα ακολούθησε η ραγδαία ανάπτυξη της κινητής τηλεφωνίας η οποία θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο. Σειρά στην περιέργεια του ανθρώπου είχε το διάστημα και το πώς αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί για την διευκόλυνση της επικοινωνίας. Οι σύγχρονες δορυφορικές επικοινωνίες έχουν την αφετηρία τους στην ιδέα του Βρετανού A.J.Clarke, ο οποίος το φθινόπωρο του 1945 δημοσίευσε ένα μικρό άρθρο με τον τίτλο *Wireless World*, στο οποίο πρότεινε την εγκατάσταση γεωστατικών δορυφόρων γύρω από τη Γη. Οι δορυφόροι αυτοί θα είχαν τη δυνατότητα να μεταδίδουν μικροκυματικά σήματα σε μεγάλες αποστάσεις επιτυγχάνοντας τηλεπικοινωνιακή σύνδεση μεταξύ απομακρυσμένων σημείων. Παρά την καινοτομική αυτή δημοσίευση, χρειάστηκε να περάσουν αρκετά χρόνια για να υλοποιηθούν οι προφητικές ιδέες του Clarke.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

### 1.1 Εισαγωγή

Τα δορυφορικά δίκτυα επικοινωνιών αποτελούν ένα σημαντικό τμήμα των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, εξαιτίας της ανάπτυξης των δυνατοτήτων σχετικά με τους τρόπους μετάδοσης πληροφοριών, της ζεύξης μεταξύ σημείων, που θα ήταν αδύνατον να επικοινωνήσουν, χωρίς τη χρήση δορυφόρων, τον άμεσο χρόνο λήψης δεδομένων χωρίς την παρέμβαση άλλων δικτύων, αλλά και την προσιτή χρήση τους πλέον σε όλες τις εκφάνσεις της ανθρώπινης δραστηριότητας. Μέσω αυτών των δικτύων έχει καταστεί πλέον δυνατή η επικοινωνία οποιοδήποτε, με οποιονδήποτε και ανά πάσα στιγμή. Τα δορυφορικά συστήματα αρχικά χρησιμοποιήθηκαν για την παροχή τηλεφωνικής υπηρεσίας. Οι πρώτοι δορυφόροι που χρησιμοποιήθηκαν γι' αυτό τον σκοπό στα τέλη της δεκαετίας του 1960 ήταν οι γεωστατικοί δορυφόροι (Geostationary Earth Orbit, GEO), οι οποίοι δεν ξεπερνούσαν σε βάρος τα 500 κιλά και είχαν χωρητικότητα περίπου 5000 κυκλωμάτων εξυπηρέτησης τηλεφωνικών κλήσεων. Οι κύριοι λόγοι, για τους οποίους προτιμήθηκε η γεωστατική τροχιά, ήταν η ευκολία στη δημιουργία ζεύξης μεταξύ ενός γεωστατικού δορυφόρου και ενός σταθμού εδάφους (επίγειου σταθμού), η μηδενική σχετικά φαινομενική ταχύτητα του δορυφόρου σε σχέση με τον επίγειο σταθμό, η οποία καθιστούσε ευκολότερη και με λιγότερες διορθώσεις την επίτευξη της σωστής κατευθυντικότητας στην εκπεμπόμενη και λαμβανόμενη δέσμη, και η μεγάλη περιοχή κάλυψης, που παρέχουν οι γεωστατικοί δορυφόροι λόγω της μεγάλης γωνίας ανύψωσης, υπό την οποία φαίνονται από τη Γη. Οι γεωστατικοί δορυφόροι καλύπτουν περίπου το 75% της συνολικής επιφάνειας της Γης. Με την πάροδο των χρόνων οι δορυφόροι αναπτύχθηκαν τόσο σε μέγεθος και βάρος όσο και σε επιδόσεις και διάρκεια ζωής, αποτελώντας κύρια πηγή εσόδων για τα κράτη που τους εκτόξευαν, μέσα από την παροχή υπηρεσιών δορυφορικών εφαρμογών. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των δορυφόρων σε σχέση με άλλα εξελιγμένα συστήματα (π.χ. οπτικές ίνες) είναι η μεταφορά της πληροφορίας σε οποιοδήποτε μήκος και πλάτος του πλανήτη, καθιστώντας τη δορυφορική επικοινωνία ως τον πιο βολικό τρόπο επικοινωνίας σε μέρη, τα οποία δεν υποστηρίζουν καλωδιακή δικτύωση. Οι δορυφόροι GEO συμπληρώνονται από τους δορυφόρους μέσης (Medium Earth Orbit, MEO) και χαμηλής γήινης τροχιάς (Low Earth Orbit, LEO). Μέχρι το 2000, τέτοια συστήματα ήταν σε τροχιά ή κοντά στην ολοκλήρωση, με ένα σύνολο 138 δορυφόρων LEO. Οι δορυφόροι MEO και LEO χρησιμοποιούνται, επίσης, για την παρακολούθηση και απεικόνιση της Γης μέσω της γεωστρατηγικής απεικόνισης διαφόρων δεδομένων, όπως τα Γεωπληροφοριακά Συστήματα (Geographic Information System, GIS), τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για στρατιωτικές, περιβαλλοντολογικές, ιατρικές, βιομηχανικές και άλλες επιστημονικές μελέτες.

Σήμερα, οι δορυφόροι χρησιμοποιούνται σε μια ευρεία γκάμα υπηρεσιών, όπως η εκπομπή τηλεοπτικού σήματος, οι τοπικές και διεθνείς κλήσεις, η μεταφορά δεδομένων και η πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Η ανάπτυξη των δορυφορικών επικοινωνιών προσφέρει πλήθος νέων δυνατοτήτων και είναι σχεδόν σίγουρο ότι και στο προσεχές μέλλον οι δορυφόροι θα συνεχίσουν να κατέχουν εξέχοντα ρόλο στις τηλεπικοινωνίες.

### 1.2 Ιστορική Εξέλιξη

Η ιστορία των δορυφορικών επικοινωνιών ξεκινά τον Οκτώβριο του 1957 από την πρώτην ΕΣΣΔ, με την εκτόξευση ενός μικρού δορυφόρου με το όνομα Sputnik I. Ο Sputnik I, ήταν ο πρώτος τεχνητός δορυφόρος της Γης και αποτέλεσε το έναυσμα για έναν αγώνα για την κατάκτηση του διαστήματος μεταξύ των ΗΠΑ και ΕΣΣΔ. Διέθετε απλώς έναν πομπό σήματος και δεν είχε δυνατότητες επικοινωνιών. Απέδειξε, όμως,

ότι οι δορυφόροι μπορούσαν να τεθούν σε τροχιά μέσω ισχυρών πυραύλων. Ο πρώτος δορυφόρος, που εκτοξεύτηκε με επιτυχία από τις ΗΠΑ, ήταν ο Explorer I τον Ιανουάριο του 1958, σε έναν πύραυλο τύπου “junco”.

Τα επόμενα χρόνια ακολούθησαν αρκετές απόπειρες δορυφορικής ζεύξης, με σημαντικότερες τη μετάδοση μέσω του δορυφόρου SCORE (1958) των Χριστουγεννιάτικων ευχών του τότε προέδρου των ΗΠΑ, την εκτόξευση του παθητικού δορυφόρου ECHO (1960), την αποθήκευση και προώθηση ενός σήματος από τον COURIER(1960), αλλά και την εκτόξευση των πρώτων πραγματικών επικοινωνιακών δορυφόρων το 1962 και 1963 (Telstar I και II). Οι δορυφόροι Telstar (MEO) εκτοξεύτηκαν με περιόδους 158 και 225 λεπτά, με δυνατότητα υπερατλαντικών ζεύξεων για 20 λεπτά, δηλαδή όσο διαρκούσε η οπτική επαφή μεταξύ των δορυφόρων. Ωστόσο, οι τροχιές, που επελέγησαν για τους Telstar, διέρχονταν από περιοχές μεγάλης ακτινοβολίας (ζώνες Van Allen), με αποτέλεσμα την καταστροφή των ηλεκτρονικών τους κυκλωμάτων (Ippolito, 2008). Το 1961 ο πρόεδρος των ΗΠΑ John F. Kennedy καθόρισε τις γενικές γραμμές της αμερικάνικης πολιτικής για τις δορυφορικές επικοινωνίες και στις 20 Δεκεμβρίου του 1961 η ITU (International Telecommunications Union) εισηγήθηκε στο αμερικάνικο Κογκρέσο θέματα διαστημικών επικοινωνιών, για τα οποία η διεθνής συνεργασία ήταν απαραίτητη. Τον Αύγουστο του 1962 ψηφίστηκε ο νόμος για τους τηλεπικοινωνιακούς δορυφόρους και αυτό αποτέλεσε τη βάση, ώστε στις 19 Ιουλίου 1964 να δημιουργηθεί ένας οργανισμός που ονομάστηκε COMSAT (Communications Satellite Corporation), ο οποίος θα ενσωμάτωνε τις προσπάθειες 12 χωρών, και θα διαχειριζόνταν αργότερα τον INTELSAT (International Telecommunications Satellite Organization).

Το 1963 τέθηκε σε τροχιά από την NASA ο πρώτος γεωστατικός δορυφόρος (SYNCOM) και δύο χρόνια αργότερα ο πρώτος γεωστατικός δορυφόρος για εμπορική χρήση “early bird” (INTELSAT I), εγκαινιάζοντας τη μεγάλη σειρά δορυφόρων INTELSAT. Επίσης, το 1965 εκτοξεύτηκε από τους Σοβιετικούς ο πρώτος επικοινωνιακός δορυφόρος Molniya. Το 1963, με το ποσοστό επιτυχίας των εκτοξεύσεων δορυφόρων τύπου MEO-GEO να κυμαίνεται στο 25%, σημειώθηκε αλματώδης εξέλιξη στο επίπεδο των MEO δορυφόρων με την προσπάθεια δημιουργίας του πρώτου εμπορικού δορυφορικού συστήματος. Παρόλα αυτά, εξαιτίας της στέρσης σε αξιοπιστία και εύρος μεταξύ των MEO και GEO δορυφόρων, οι προσπάθειες εντάθηκαν στο διαστημικό πρόγραμμα για τη δημιουργία δορυφορικών επικοινωνιών με τη χρήση δορυφόρων γεωστατικής τροχιάς (GEO). Χώρες, όπως ο Καναδάς, οι ΗΠΑ, η Σοβιετική Ένωση και η Ινδονησία κατάφεραν να δημιουργήσουν ένα επικερδές επικοινωνιακό σύστημα μέσω δορυφόρων γεωστατικής τροχιάς, πράγμα το οποίο ήταν μέχρι τότε αντισυμβαλλόμενο. Από το 1970 και για τα επόμενα 20 χρόνια, τα δορυφορικά συστήματα επικοινωνιών με χρήση δορυφόρων γεωστατικής τροχιάς (GEO) αυξήθηκαν κατακόρυφα, παρόλο που ήδη είχαν αναπτυχθεί πλήρως οι τεχνολογίες των οπτικών ινών. Τα επόμενα χρόνια στις ΗΠΑ η επέκταση στράφηκε προς τη μετάδοση και διανομή βίντεο και την ανάπτυξη δικτύων τερματικών σταθμών πολύ μικρής επιφάνειας (Very Small Aperture Terminals, VSATs). Υπό το πρίσμα της διαφανόμενης υπερπλήρωσης της Ku-ζώνης δημιουργήθηκε η ανάγκη επέκτασης και στην Ka-ζώνη μέχρι τις αρχές του 1995, λόγω της αύξησης της ψηφιακής κίνησης και της επιθυμίας ανάπτυξης συστημάτων ευρείας ζώνης για μεταφορά υψηλού ρυθμού ταχύτητας δεδομένων του Internet. Η πρώτη εφαρμογή στην Ka-ζώνη (26,5–40 GHz) έγινε το 2001 με το σύστημα SES (Societe Europeenne des Satellites) και τη χρήση του δορυφόρου Astra 1H. Το σύστημα ξεκίνησε μια αμφίδρομη υπηρεσία μετάδοσης πολυμέσων και πρόσβασης στο διαδίκτυο για τις περιοχές της Δυτικής και Κεντρικής Ευρώπης. Ακόμη, μέσω των κινητών δορυφορικών υπηρεσιών (Mobile Satellite Services, MSS) εμφανίστηκε η δυνατότητα παροχής επικοινωνιών σε κινούμενους

χρήστες λόγω των οικονομικότερων παραμέτρων σε σχέση με το δημόσιο δίκτυο PTSN (Public Switched Telephone Network). Όμως, εξαιτίας της χαμηλής απήχησης για τη δημιουργία ευρείας βάσεως στο καταναλωτικό κοινό, οι υπηρεσίες ήταν οικονομικά ασύμφορες. Ξεκίνησε, λοιπόν, μια προσπάθεια για τη δημιουργία ενός δορυφορικού τηλεφωνικού δικτύου παγκόσμιας κάλυψης, το οποίο φαινόταν ότι υπόσχονταν τα δορυφορικά συστήματα χαμηλής τροχιάς (LEO) τη δεκαετία του 1990. Ωστόσο, η εκμετάλλευση των LEO συστημάτων για κινητές επικοινωνίες, αποδείχθηκε σύντομα πιο ακριβή, από όσο είχε αρχικά εκτιμηθεί. Η μικρή χωρητικότητα των συστημάτων χαμηλής τροχιάς οδήγησε σε υψηλότερο κόστος ανά μεταδιδόμενο δυαδικό ψηφίο (bit). Ως εκ τούτου, τα δορυφορικά τηλεφωνικά συστήματα (LEO) απέτυχαν να συναγωνιστούν τα κυψελωτά τηλεφωνικά συστήματα. Με την ανάπτυξη, όμως, των τεχνικών μεταγωγής και επεξεργασίας επί του δορυφόρου (on-board switching and processing), τη χρήση πολλαπλών δεσμών (multi-beams), τη χρήση υψηλότερων συχνοτήτων και άρα διαθέσιμου εύρους ζώνης, την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης πληροφορίας και τη μείωση του μεγέθους των κινητών τερματικών και του κόστους των παρεχόμενων υπηρεσιών, τα δορυφορικά συστήματα κινητών υπηρεσιών έχουν βρει ευρεία εφαρμογή. Τα τελευταία χρόνια οι δορυφόροι GEO αποτελούν την κύρια αιχμή στην ανάπτυξη των δορυφορικών επικοινωνιών. Λόγω των χαρακτηριστικών τους μπορούν να καλύψουν το 1/3 της επιφάνειας της Γης, ενώ με τις τεχνολογικές εξελίξεις στη δομή και τα λειτουργικά τους χαρακτηριστικά έχουν φτάσει τα 10.000 κιλά βάρος, παραγόμενη ισχύ στα 25kW και κεραιές με εκατοντάδες δέσμες. Η μετάδοση τηλεοπτικών προγραμμάτων και DBS-TV (Direct Broadcast Satellite Television) αποτελεί την κύρια πηγή εσόδων για τις εταιρίες παροχής δορυφορικών προϊόντων, παρέχοντας παραπάνω από τα μισά κέρδη στον τομέα αυτό. Η αυξημένη ισχύς εκπομπής και η χρήση κεραιών υψηλού κέρδους στους επίγειους σταθμούς εξασφαλίζει υψηλή χωρητικότητα για τα GEO συστήματα, η οποία μεταφράζεται σε οικονομικό όφελος. Επιπλέον, τα συστήματα σταθερών κατευθυντικών κεραιών μεταφέρουν bit με σημαντικά μικρότερο κόστος από τα συστήματα κεραιών χαμηλού κέρδους (όπως αυτά των κινητών επικοινωνιών). Έτσι, οι GEO δορυφόροι προβλέπεται να αποτελέσουν την κύρια πηγή εισοδήματος για τις εταιρίες στο κοντινό μέλλον, με το προσδοκώμενο κέρδος του συνόλου των δορυφορικών επικοινωνιών να αυξάνει σημαντικά.

### 1.3 Δορυφορικά Συστήματα Επικοινωνιών

Τα δορυφορικά συστήματα επικοινωνιών είχαν αρχικά υψηλό κόστος και μικρές ικανότητες. Π.χ. ο δορυφόρος INTELSAT I είχε μάζα 68kg, διέθετε 480 τηλεφωνικά κανάλια με ετήσιο κόστος \$32.500/κανάλι). Οι βασικοί παράγοντες κόστους ήταν το κόστος του πυραύλου εκτόξευσης, το κόστος του δορυφορικού σκάφους, η μικρή διάρκεια ζωής δορυφόρου (1.5 έτη) και η μικρή χωρητικότητα σε κανάλια. Η τεχνολογική πρόοδος μείωσε το κόστος, π.χ. ο δορυφόρος INTELSAT VIII είχε μάζα 3.600Kg, διέθετε 22.500 τηλεφωνικά κανάλια και είχε ετήσιο κόστος \$1.000/κανάλι. Μερικά από τα βασικά θέματα, που συναντώνται στις δορυφορικές επικοινωνίες και πρέπει να ληφθούν υπόψη, προκειμένου να αντιμετωπιστούν, απεικονίζονται παρακάτω:

- Υπάρχει απαίτηση οι δορυφόροι να είναι μικροί, ελαφριοί και να καταναλώνουν την ελάχιστη δυνατή ενέργεια.
- Οποιαδήποτε αύξηση βάρους συνεπάγεται αύξηση κόστους εκτόξευσης λόγω των μεγαλύτερων πυραύλων εκτόξευσης.
- Με τη βασική πηγή ενέργειας να είναι ο ήλιος, η πηγή τροφοδοσίας τους πρέπει να είναι οι ηλιακές κυψέλες. Αύξηση της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας σημαίνει αύξηση βάρους και επιφάνειας.
- Με τις επικοινωνίες να είναι η μοναδική πηγή εσόδων, απαιτείται μεγιστοποίηση των διαθέσιμων διαύλων.

- Λόγω του μεγάλου κόστους των δορυφόρων και της εκτόξευσης, απαιτείται μακροχρόνια λειτουργία, χωρίς συντήρηση.
  - Με τις αντίξοες συνθήκες λειτουργίας εξαιτίας της εναλλαγής θερμοκρασίας, του συνεχούς βομβαρδισμού από υψηλή ακτινοβολία, υποατομικά σωματίδια, μικρομετεωρίτες, οι δορυφόροι θα πρέπει να είναι ανθεκτικοί.
  - Η απόσταση δορυφόρου-Γης είναι τεράστια (π.χ. 35.786km) και τα Η/Μ σήματα πρέπει να την ταξιδεύουν δύο φορές, για μια απλή ζεύξη. Με απλή εφαρμογή απωλειών διάδοσης ελεύθερου χώρου (αντίστροφα ανάλογες του τετραγώνου της απόστασης) προκύπτουν τεράστιες απώλειες στην ισχύ του σήματος. Σε συχνότητες μεγαλύτερες των 10GHz πρέπει να προστεθούν και οι απώλειες εξαιτίας βροχής.
  - Στην άνω-ζεύξη απαιτούνται ισχυροί πομποί και μεγάλες κεραίες, άρα αυξημένο κόστος.
  - Στην κάτω-ζεύξη το μέγεθος της κεραίας και η ισχύς του πομπού είναι περιορισμένη από το μέγεθος του δορυφόρου και την ενέργεια, που μπορεί να παράγει. Τα λαμβανόμενα στη Γη σήματα είναι εξαιρετικά ασθενή, ασθενέστερα από οποιοδήποτε άλλο σύστημα επικοινωνιών. Άρα, απαιτούνται τεχνικές για την αντιμετώπιση της εξασθένησης και του θορύβου. Λόγω της απόστασης ακόμη και τα διάφορα υπάρχοντα πρωτόκολλα απαιτούν κάποια τροποποίηση για τη σωστή λειτουργία.
  - Οι τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης πρέπει να μπορούν να υποστηρίξουν μεγάλο, αλλά μεταβαλλόμενο αριθμό χρηστών, ταυτόχρονα και αποδοτικά.
  - Οι επίγειοι σταθμοί πρέπει να είναι φθινοί, αλλά και ιδιαίτερα αποτελεσματικοί στην επικοινωνία με τους δορυφόρους (π.χ. να τους εντοπίζουν γρήγορα, να μπορούν να αντεπεξέρχονται σε μεταβολές της τροχιάς τους κ.λπ.).
- Η χρήση τεχνητών (artificial) δορυφόρων σε διάφορες εφαρμογές παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, τα σημαντικότερα από τα οποία είναι τα εξής (Maral & Bousquet, 2012):
- Χρήση ανεξαρτήτως απόστασης.
  - Μοναδική λύση για δυσπρόσιτες περιοχές και περιοχές, όπου τα επίγεια δίκτυα αδυνατούν να παρέχουν επικοινωνία (π.χ. πλοία, αεροπλάνα).
  - Παγκόσμια κάλυψη εκπομπής σημάτων ευρείας ζώνης συχνοτήτων.
  - Παράκαμψη των επίγειων δικτύων.
  - Παροχή κινητών υπηρεσιών συμπληρωματικά ως προς τα επίγεια.
  - Ευκολία εγκατάστασης και αναδιάρθρωσης.
  - Διασύνδεση επίγειων δικτύων ανεξάρτητα από την τεχνολογία και τον τύπο του δικτύου.
  - Λειτουργία ακόμη και σε περιόδους φυσικών καταστροφών. Αλλά και μειονεκτήματα:
  - Καθυστέρηση μετάδοσης της τάξης των 240ms (για γεωστατικούς δορυφόρους).
  - Εξασθένηση των σημάτων εξαιτίας της μεγάλης απόστασης και του μέσου διάδοσης.
  - Αύξηση της τρωτότητας (vulnerability) στις δορυφορικές επικοινωνίες εξαιτίας της εκπομπής στον αέρα, με αποτέλεσμα να χρειάζονται μεγαλύτερες απαιτήσεις στην κρυπτογράφηση.
  - Υψηλό κόστος τοποθέτησης και περιορισμένη διάρκεια ζωής σε αντιστοιχία με πιθανότητα αποτυχίας εκτόξευσης και επιτυχούς λειτουργίας.
  - Συμφόρηση, η οποία συχνά παρατηρείται στη γεωστατική τροχιά και στις χρησιμοποιούμενες συχνότητες.
- Τα δορυφορικά συστήματα επικοινωνιών χρησιμοποιούν τροχιές, οι οποίες καθορίζονται από μια σειρά παραμέτρων, οι οποίες σχετίζονται με την επιφάνεια κάλυψης, την υπό κλίση απόσταση και τη χρονική καθυστέρηση του σήματος. Μία εξίσου σημαντική παράμετρος είναι η παρουσία των ζωνών Van Allen, που αποτελούνται από ζώνες φορτισμένων σωματιδίων, τα οποία έχουν παγιδευτεί στο μαγνητικό πεδίο και μπορούν να προκαλέσουν ζημιά στον δορυφόρο, ακόμη και να τον καταστρέψουν.

Η μεγάλη απόσταση μεταξύ του δορυφόρου και των τερματικών του χρήστη σε σύγκριση με τα επίγεια συστήματα προκαλεί μεγάλες καθυστερήσεις, που επηρεάζουν ειδικότερα τις επικοινωνίες φωνής και μεγάλες εξασθενίσεις του σήματος, απαιτώντας μεγάλη ισχύ μετάδοσης και διάμετρο κεραίας. Για τις περιπτώσεις όπου η απόσταση είναι κρίσιμος παράγοντας για την επικοινωνία, χρησιμοποιούνται μη γεωστατικοί δορυφόροι, οι οποίοι μειώνουν τις απαιτήσεις στην καθυστέρηση του σήματος και στο μέγεθος της κεραίας. Τα δορυφορικά συστήματα GEO πρώτης γενιάς, λόγω του περιορισμού ενέργειας, απαιτούσαν τερματικά, τα οποία ήταν κοστοβόρα και δεν ήταν εύκολα στην εγκατάσταση, ιδίως για αμφίδρομη επικοινωνία. Σήμερα τα προβλήματα αυτά έχουν μετριασθεί, λόγω της μείωσης του μεγέθους της κεραίας και άρα και του κόστους, και εξαιτίας των μεγάλων αυξήσεων στη διαθέσιμη ισχύ επί του δορυφόρου (on-board satellite). Γενικότερα, η ανάπτυξη ενός δορυφορικού συστήματος επιφέρει τεράστια έξοδα υλοποίησης και χρειάζεται ένα μεγάλο αρχικό κεφάλαιο επένδυσης. Ειδικότερα, το κόστος κατασκευής και εκτόξευσης ενός γεωστατικού δορυφόρου υπολογίζεται περίπου στα 200-400 εκατομμύρια δολάρια. Εκτιμώντας ως διάρκεια ζωής του δορυφόρου τα 15 χρόνια από την εκτόξευση, προκειμένου να είναι επικερδής η επένδυση, υπολογίζεται ότι τα έσοδα από τον δορυφόρο θα πρέπει να ανέρχονται στα 20-30 εκατομμύρια δολάρια ετησίως.

#### **1.4 Σχεδιασμός και οργάνωση δορυφορικού Συστήματος**

Η δομή ενός δορυφορικού συστήματος αποτελείται από το διαστημικό και το επίγειο τμήμα. Οι λειτουργίες κατά τη διάρκεια σύνδεσής τους επιμερίζονται σε δύο ζεύξεις: στην άνω και την κάτω ζεύξη. Σήμερα οι δορυφόροι καλύπτουν ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών, όπως π.χ. Δορυφορική Τηλεόραση, Δορυφορικό Internet και Δορυφορικό Τηλέφωνο, ενώ υπάρχουν διαθέσιμοι Μετεωρολογικοί Δορυφόροι, Δορυφόροι Στρατιωτικών Εφαρμογών, Δορυφόροι Διάσωσης, Δορυφόροι Εντοπισμού Θέσης και Πλοήγησης, Δορυφόροι Γήινης Παρατήρησης κ.ά. Για την εξυπηρέτηση του εκάστοτε σκοπού, ο δορυφόρος είναι εφοδιασμένος με τις κατάλληλες διατάξεις (κεραίες, αναμεταδότες, φωτογραφικές μηχανές, κάμερες παρακολούθησης), οι οποίες και τον διαφοροποιούν από τους άλλους δορυφόρους.

Το διαστημικό τμήμα αποτελείται από τον δορυφόρο, ενώ το τμήμα ελέγχου αποτελείται από τις επίγειες εγκαταστάσεις ελέγχου, τηλεμετρίας & ιχνηλάτησης του δορυφόρου (Tracking, Telemetry & Command, TT&C), καθώς και από το κέντρο διαχείρισης του δικτύου. Ο δορυφόρος αποτελείται από το ωφέλιμο φορτίο (payload), το οποίο περιλαμβάνει τις κεραίες, τον λοιπό ηλεκτρονικό εξοπλισμό μεταδόσεων και την πλατφόρμα (Platform or Bus). Η πλατφόρμα είναι μία μηχανική κατασκευή για την υποστήριξη του εξοπλισμού, που εγγυάται τη σταθερότητα και ευστάθεια του δορυφόρου, παρέχει την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια για την ισχύ και ρύθμιση της τάσης, πραγματοποιεί έλεγχο θερμοκρασίας με δυνατότητα απαγωγής θερμότητας, έλεγχο θέσης και σταθεροποίηση τροχιάς με μεγάλη ακρίβεια. Επίσης, διαθέτει τον εξοπλισμό πρόωσης, για να παρέχει αυξήσεις ταχύτητας και κατάλληλες ροπές με συγκεκριμένες ωθήσεις, όπως και τον εξοπλισμό παρακολούθησης της τηλεμετρίας και ελέγχου, όπου γίνεται ανταλλαγή δεδομένων με τον σταθμό ελέγχου. Το επίγειο τμήμα αποτελείται από τον επίγειο σταθμό, που περιλαμβάνει πομπούς και δέκτες. Οι επίγειοι σταθμοί είναι είτε σταθεροί είτε κινητοί. Οι σταθεροί επίγειοι σταθμοί περιλαμβάνουν σταθμούς δρομολόγησης της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, η οποία συλλέγεται από επίγεια συστήματα και σταθμούς στις εγκαταστάσεις του χρήστη. Οι κινητοί σταθμοί περιλαμβάνουν σταθμούς σε ξηρά, θάλασσα και αέρα. Τα δορυφορικά συστήματα επικοινωνιών εμπλέκουν πολλούς επίγειους σταθμούς, οι οποίοι εκπέμπουν και ζητούν ταυτόχρονη πρόσβαση σε έναν δορυφόρο, χρησιμοποιώντας τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης. Τα δορυφορικά συστήματα ευρείας μετάδοσης περιλαμβάνουν έναν επίγειο σταθμό, που εκπέμπει, και πολλαπλούς επίγειους σταθμούς, που είναι μόνο

δέκτες (Receive Only, RCVO). Οι λειτουργίες του ωφέλιμου φορτίου (payload) μπορούν να υλοποιηθούν είτε με απλό (διάφανο) αναμεταδότη είτε με αναμεταδότη επεξεργασίας επί του σκάφους (on-board processing). Η λειτουργία με απλό αναμεταδότη αφορά τη συλλογή μικροκυματικών σημάτων από συγκεκριμένες περιοχές της Γης, την ενίσχυση του φέροντος ραδιοσυχνοτήτων, τη μετατροπή της συχνότητας του φέροντος από τη συχνότητα της άνω ζεύξης στη συχνότητα της κάτω ζεύξης και την εκπομπή των μικροκυματικών σημάτων προς συγκεκριμένη περιοχή της Γης. Το συνολικό εύρος ζώνης του επαναλήπτη (repeater) χωρίζεται σε υπο-ζώνες, καθεμία από τις οποίες έχει εύρος μέχρι μερικές δεκάδες MHz. Κάθε υπο-ζώνη συχνοτήτων ενισχύεται από έναν δορυφορικό δίαυλο. Ένας αναμεταδότης (transponder) μπορεί να υποστηρίξει πιο πολύπλοκες διεργασίες από την απλή αναμετάδοση με τη χρήση του αναμεταδότη επεξεργασίας επί του σκάφους, όπως π.χ. μεταγωγή (switching) στη συχνότητα και/ή στον χώρο και/ή στον χρόνο, αναγέννηση (regeneration), δηλαδή ανάκτηση της ψηφιακής πληροφορίας στον δορυφόρο, και επεξεργασία βασικής ζώνης (baseband processing), όπως π.χ. bit rate conversion, error correcting decoding κ.λπ.

### 1.5 Δορυφορικές Τροχιές

Οι πιο συνήθεις τροχιές είναι:

- Ελλειπτικές τροχιές (High Elliptical Orbit, HEO) με γωνία κλίσης  $63,44^\circ$  ως προς το επίπεδο του ισημερινού. Ο συγκεκριμένος τύπος τροχιάς είναι πολύ σταθερός ως προς τις διακυμάνσεις του γήινου βαρυτικού δυναμικού και λόγω της κλίσης επιτρέπει στον δορυφόρο να καλύψει περιοχές με μεγάλο γεωγραφικό πλάτος για μεγάλο κλάσμα της περιόδου της τροχιάς, καθώς αυτός κινείται στο απόγειο. Ο δορυφόρος παραμένει πάνω από τις περιοχές, που βρίσκονται κάτω από το απόγειο για μία περίοδο της τάξης των 8 με 12 ωρών. Επίσης, οι κεκλιμένες ελλειπτικές τροχιές μπορούν να εξασφαλίσουν ζεύξεις σε μεσαία γεωγραφικά πλάτη, όταν ο δορυφόρος βρίσκεται κοντά στο απόγειο με γωνίες ανύψωσης κοντά στις  $90^\circ$ .
- Κυκλικές τροχιές μικρού ύψους (Low Earth Orbit, LEO). Το ύψος του δορυφόρου είναι σταθερό και ίσο με μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα (700-1000km). Η περίοδος είναι της τάξης της 1,5 ώρας. Με σχεδόν  $90^\circ$  κλίση ο συγκεκριμένος τύπος τροχιάς εγγυάται ότι ο δορυφόρος θα περάσει πάνω από κάθε περιοχή της Γης. Γι' αυτό τον λόγο ο συγκεκριμένος τύπος τροχιάς επιλέγεται για δορυφόρους παρατήρησης (π.χ. ο δορυφόρος SPOT, με ύψος τροχιάς 830km, κλίση τροχιάς  $98,7^\circ$ , περίοδο 101min). Ένας "αστερισμός" μερικών δεκάδων δορυφόρων κυκλικής τροχιάς σε μικρό ύψος (της τάξης των 1000km) μπορεί να παρέχει παγκόσμιες επικοινωνίες σε πραγματικό χρόνο. Μερικά τέτοια συστήματα, που έχουν προταθεί, είναι τα Iridium, Globalstar, Ellipsat και Teledesic.
- Κυκλικές τροχιές μέσου ύψους (Medium Earth Orbit, MEO) ή ενδιάμεσες κυκλικές τροχιές (Intermediate Circular Orbits, ICO). Οι τροχιές αυτές έχουν ύψος περίπου 10.000-20.000 km, κλίση περίπου  $50^\circ$  και η περίοδος είναι 6 ώρες. Με συστήματα 10 έως 15 δορυφόρων είναι δυνατό να επιτευχθεί εγγυημένη παγκόσμια κάλυψη για παροχή επικοινωνιών σε πραγματικό χρόνο. Ένα υπό σχεδιασμό σύστημα αυτού του τύπου είναι το σύστημα new-ICO (προέρχεται από το σύστημα Project 21 του INMARSAT) ή Pendrell Corporation, όπως μετονομάστηκε τον Ιούνιο του 2011, με σύστημα 10 δορυφόρων σε 2 τροχιακά επίπεδα και κλίση  $45^\circ$ .
- Κυκλικές τροχιές με μηδενική κλίση (ισημερινές τροχιές) ή γεωστατική τροχιά (Geostationary Earth Orbit, GEO). Η πιο γνωστή είναι η τροχιά των γεωστατικών δορυφόρων. Οι δορυφόροι περιστρέφονται γύρω από τη Γη σε ύψος 35.786km και με την ίδια φορά, όπως η Γη. Η περίοδος είναι ίση με της Γης, με αποτέλεσμα ο δορυφόρος να φαίνεται σαν ένα σταθερό σημείο στον ουρανό. Ένας γεωστατικός δορυφόρος εξασφαλίζει συνεχή κάλυψη ως αναμεταδότης σε πραγματικό χρόνο, για την



περιοχή στην οποία είναι ορατός (περίπου 42,4% της επιφάνειας της Γης). Κατά συνέπεια, 3 δορυφόροι είναι αρκετοί για την πλήρη κάλυψη της επιφάνειας της Γης.

Ένας ιδιαίτερα σημαντικός τύπος τροχιάς είναι η ηλιο-σύγχρονη τροχιά (Sun-Synchronous Orbit). Οι παράμετροι αυτής της τροχιάς είναι επιλεγμένες με τέτοιο τρόπο, ώστε το επίπεδο της τροχιάς να περιστρέφεται με την ίδια περίοδο περίπου που περιστρέφεται η Γη γύρω από τον Ήλιο. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι το επίπεδο της τροχιάς του δορυφόρου περιστρέφεται κατά 1ο περίπου κάθε ημέρα. Κάτι τέτοιο μπορεί να συμβεί, επειδή η Γη δεν είναι τελείως σφαιρική, με αποτέλεσμα πρόσθετες βαρυτικές δυνάμεις, οι οποίες δρουν στον δορυφόρο, όταν βρίσκεται κοντά στον ισημερινό, να επιδρούν στην τροχιά του. Σε μία ηλιο-σύγχρονη τροχιά ο δορυφόρος περνά από το ίδιο σημείο την ίδια τοπική ώρα. Αυτού του είδους η τροχιά χρησιμοποιείται ευρέως σε συστήματα, στα οποία οι δορυφόροι πρέπει να δέχονται ηλιακή ακτινοβολία σταθερά υπό συγκεκριμένη γωνία.

Επίσης, με τον όρο γεωσύγχρονος δορυφόρος (Geo-Synchronous Satellite) προσδιορίζεται ο δορυφόρος εκείνος, ο οποίος έχει περίοδο περιστροφής ίση με την περίοδο περιστροφής της Γης, δηλαδή  $T=23\text{h } 56\text{min } 4,1\text{sec}$ . Κάνοντας χρήση της σχέσης, μπορεί να υπολογιστεί ότι το ύψος ενός γεωσύγχρονου δορυφόρου είναι ίσο με 35.786km. Η ταχύτητα ενός γεωσύγχρονου δορυφόρου είναι 3.075m/sec, ενώ η κλίση αλλά και η εκκεντρότητα της γεωσύγχρονης τροχιάς μπορούν να έχουν γενικά οποιαδήποτε τιμή. Προφανώς, ο γεωσύγχρονος δορυφόρος, του οποίου η τροχιά έχει μηδενική εκκεντρότητα και κλίση, δηλαδή κινείται σε κυκλική τροχιά στο επίπεδο του ισημερινού (γεωστατική τροχιά), είναι γεωστατικός (Geostationary Satellite) δορυφόρος. Εάν το επίπεδο τροχιάς του δορυφόρου είναι το ισημερινό επίπεδο και η τροχιά του είναι κυκλική και η ταχύτητα περιστροφής του ταυτίζεται με αυτήν της Γης, θα φαίνεται από τον επίγειο σταθμό ως ένα σταθερό σημείο στον ουρανό. Όμως, οι γεωστατικοί δορυφόροι παρουσιάζουν μία μικρή ολίσθηση, έτσι ώστε η τροχιά τους να παρουσιάζει μια μικρή κλίση. Το φαινόμενο αυτό, που οφείλεται σε φαινόμενα έλξεων από τον Ήλιο ή από τη Σελήνη, μπορεί να δημιουργήσει, αν δεν ληφθεί πρόνοια, μια γωνία κλίσης, η οποία θα είναι αρκετές μοίρες στη διάρκεια ενός χρόνου. Γι' αυτό τον λόγο η τροχιά του γεωστατικού δορυφόρου διορθώνεται περιοδικά, ώστε να παραμένει στο ισημερινό επίπεδο. Όσον αφορά τους δορυφόρους μέσης γήινης τροχιάς (MEO), το ύψος της τροχιάς τους κυμαίνεται στα 10.000-20.000km, με κλίση περίπου 50% και περίοδο περιστροφής γύρω από την Γη περίπου 6 ώρες. Για να πετύχουν πλήρη κάλυψη της Γης, πρέπει να υλοποιήσουν έναν αστεροειδή σχηματισμό 10-15 δορυφόρων. Έχουν πολύ μικρότερες απώλειες διάδοσης και μικρότερη καθυστέρηση μετάδοσης λόγω κοντινότερης απόστασης από τη Γη. Όμως, λόγω της μεταβολής της γωνιακής τους ταχύτητας σε σχέση με το έδαφος απαιτείται διαρκής παρακολούθηση της θέσης τους, ενώ η εκτόξευση, συντήρηση και αντικατάσταση μεγάλου αριθμού δορυφόρων οδηγούν σε αύξηση του κόστους. Παραδείγματα δορυφόρων MEO είναι οι 24 δορυφόροι του Παγκόσμιου Συστήματος Ανεύρεσης Θέσης (Global Positioning Systems, GPS), οι οποίοι βρίσκονται σε τροχιά σε υψόμετρο 20.000km περίπου. Στους δορυφόρους χαμηλής γήινης τροχιάς (LEO) το ύψος της τροχιάς τους κυμαίνεται από 700 έως 1000km και η κλίση τους είναι της τάξεως των 90ο περίπου. Έχουν μικρότερες απώλειες διάδοσης, επιτυγχάνοντας τη χρήση μικρότερων επίγειων τερματικών, ενώ λόγω της μικρότερης απόστασης από την Γη, επιτυγχάνουν καθυστέρηση της μετάδοσης σε επίπεδα όμοια με αυτά των οπτικών ινών. Λόγω της μεγάλης ταχύτητας περιστροφής και του μεγάλου αριθμού των δορυφόρων, που απαιτούνται για την πλήρη κάλυψη της Γης, έχουν μεγάλο κόστος λειτουργίας και μικρότερη διάρκεια ζωής, εξαιτίας της γρήγορης εξάντλησης των αποθεμάτων καυσίμων. Τα βασικά κριτήρια επιλογής τύπου της τροχιάς είναι η έκταση της προς κάλυψη περιοχής, το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής, η επιθυμητή γωνία ανύψωσης, η επιθυμητή διάρκεια εκπομπής, η μέγιστη

ανεκτή καθυστέρηση εκπομπής, η ανοχή στις παρεμβολές, η απόδοση των εκτοξευτών και, φυσικά, το κόστος.

## 1.6 Υπηρεσίες και εφαρμογές δορυφορικών επικοινωνιών

Ο επίσημος ορισμός των γενικών υπηρεσιών ραδιοεπικοινωνιών (Radio-communication Services) είναι η εκπομπή και/ή λήψη ραδιοκυμάτων για συγκεκριμένους τηλεπικοινωνιακούς σκοπούς. Μέρος της κατηγορίας των υπηρεσιών ραδιοεπικοινωνιών αποτελούν οι δορυφορικές ραδιοεπικοινωνίες (Space Radiocommunication Services). Στο Άρθρο 1, οι Κανονισμοί Ραδιοσυχνοτήτων ορίζουν 10 από τις 42 κατηγορίες για τις Δορυφορικές Ραδιοεπικοινωνίες:

- Σταθερή Δορυφορική Υπηρεσία (Fixed Satellite Service, FSS): υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας μεταξύ επίγειων σταθμών σε δεδομένες θέσεις, όταν χρησιμοποιούνται ένας ή περισσότεροι δορυφόροι. Η δεδομένη θέση μπορεί να είναι ένα καθορισμένο σταθερό σημείο ή οποιοδήποτε σταθερό σημείο εντός των συγκεκριμένων περιοχών. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η υπηρεσία αυτή περιλαμβάνει ζεύξεις δορυφόρου με δορυφόρο, οι οποίες μπορούν, επίσης, να λειτουργούν με διαδορυφορική υπηρεσία. Η σταθερή δορυφορική υπηρεσία μπορεί ακόμη να περιλαμβάνει ζεύξεις τροφοδοσίας για άλλες υπηρεσίες δορυφορικών ραδιοεπικοινωνιών.
- Δορυφορική Υπηρεσία Ευρεκπομπής (Broadcasting Satellite Service, BSS): υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας, στην οποία τα σήματα, που μεταδίδονται ή αναμεταδίδονται από διαστημικούς σταθμούς, προορίζονται για άμεση λήψη από το ευρύ κοινό. Στις δορυφορικές υπηρεσίες ευρεκπομπών ο όρος «άμεση λήψη» περιλαμβάνει τόσο την ατομική λήψη όσο και τη λήψη ευρείας κοινότητας.
- Κινητή Δορυφορική Υπηρεσία (Mobile Satellite Service, MSS): Υπηρεσία μεταξύ κινητών επίγειων σταθμών και ενός ή περισσότερων διαστημικών σταθμών ή μεταξύ διαστημικών σταθμών και μεταξύ κινητών επίγειων σταθμών μέσω ενός ή περισσότερων διαστημικών σταθμών. Η υπηρεσία αυτή μπορεί να περιλαμβάνει για τη λειτουργία της και ζεύξεις τροφοδοσίας. ο Αεροναυτική Κινητή Δορυφορική Υπηρεσία (Aeronautical Mobile Satellite Service, AMSS): κινητή υπηρεσία μεταξύ αεροναυτικών σταθμών και σταθμών αεροσκάφους ή μεταξύ σταθμών αεροσκάφους, στην οποία μπορεί να συμμετάσχουν και σταθμοί σωστικών σκαφών. Μπορούν, επίσης, να συμμετέχουν σε αυτή την υπηρεσία σταθμοί ένδειξης θέσης ραδιοφάρων (radiobeacon) για περιστατικά έκτακτης ανάγκης σε καθορισμένες συχνότητες κινδύνου και επείγουσας ανάγκης. ο Ναυτική Κινητή Δορυφορική Υπηρεσία (Maritime Mobile Satellite Service, MMSS): κινητή δορυφορική υπηρεσία, στην οποία οι κινητοί επίγειοι σταθμοί βρίσκονται επί των πλοίων. Μπορούν, επίσης, να συμμετέχουν σε αυτή την υπηρεσία σταθμοί σωστικών σκαφών και σταθμοί ένδειξης θέσης ραδιοφάρων για περιστατικά έκτακτης ανάγκης. ο Κινητή Υπηρεσία Ξηράς (Land Mobile Satellite Service, LMSS): κινητή δορυφορική υπηρεσία, στην οποία οι επίγειοι σταθμοί βρίσκονται στην ξηρά.
- Δορυφορική Υπηρεσία για Ερασιτέχνες (Amateur Satellite Service, AmSS): υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας, που χρησιμοποιεί τους διαστημικούς σταθμούς σε δορυφόρους της Γης για τους ίδιους μη κερδοσκοπικούς λόγους, όπως η υπηρεσία ραδιοερασιτεχνών (εκπαίδευση, επικοινωνία, έρευνα).
- Δορυφορική Υπηρεσία Ραδιοεντοπισμού (Radio Determination Satellite Service, RDSS): υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας για τον σκοπό του ραδιοεντοπισμού της θέσης, της ταχύτητας και άλλων χαρακτηριστικών ενός αντικειμένου, μέσω των ιδιοτήτων του μέσου διάδοσης. Περιλαμβάνει τη χρήση ενός ή περισσότερων δορυφορικών σταθμών

και μπορεί, επίσης, να περιλαμβάνει ζεύξεις τροφοδοσίας, οι οποίες είναι απαραίτητες για τη λειτουργία της. ο Δορυφορική Υπηρεσία Ραδιοεντοπισμού (Radiolocation Satellite Service): υπηρεσία ραδιοεντοπισμού μέσω δορυφόρου, που χρησιμοποιείται για τους σκοπούς του ραδιοεντοπισμού, εκτός της ραδιοπλοήγησης. Αυτή η υπηρεσία μπορεί, επίσης, να περιλαμβάνει και ζεύξεις τροφοδοσίας, που είναι απαραίτητες για τη λειτουργία της. ο Δορυφορική Υπηρεσία Ραδιοπλοήγησης (Radio Navigation Satellite Service, RNSS): υπηρεσία ραδιοεντοπισμού μέσω δορυφόρου, που χρησιμοποιείται για τους σκοπούς της ραδιοπλοήγησης, συμπεριλαμβανομένης της προειδοποίησης εμποδίων. Αυτή η υπηρεσία μπορεί, επίσης, να περιλαμβάνει και ζεύξεις τροφοδοσίας, που είναι απαραίτητες για τη λειτουργία της.

♣ Ναυτική Δορυφορική Υπηρεσία Ραδιοπλοήγησης (Maritime Radio Navigation Satellite Service, MRNSS): υπηρεσία ραδιοεντοπισμού μέσω δορυφόρου, όπου οι επίγειοι σταθμοί βρίσκονται επί των πλοίων.

♣ Αεροναυτική Δορυφορική Υπηρεσία Ραδιοπλοήγησης (Aeronautical Radio Navigation Satellite Service, AeRNSS): υπηρεσία ραδιοεντοπισμού μέσω δορυφόρου, όπου οι επίγειοι σταθμοί βρίσκονται επί των αεροσκαφών.

• Δορυφορική Υπηρεσία Πρότυπων Σημάτων Χρόνου και Συχνότητας (Standard Frequency & Time signal Satellite Service, SFSS): υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας, που χρησιμοποιεί τους διαστημικούς σταθμούς σε δορυφόρους της Γης για τους ίδιους σκοπούς, όπως η βασική υπηρεσία σημάτων συχνότητας και χρόνου. Αυτή η υπηρεσία μπορεί, επίσης, να περιλαμβάνει και ζεύξεις τροφοδοσίας, που είναι απαραίτητες για τη λειτουργία της. • Δια-Δορυφορική Υπηρεσία (Inter-Satellite Service, ISS): υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας, που παρέχει ζεύξεις μεταξύ των τεχνητών δορυφόρων.

• Δορυφορική Υπηρεσία Εξερεύνησης της Γης (Earth Exploration Satellite Service, EESS): υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας μεταξύ επίγειων σταθμών και ενός ή περισσότερων διαστημικών σταθμών, η οποία μπορεί να συμπεριλάβει ζεύξεις μεταξύ διαστημικών σταθμών κατά την οποία:

α) συλλέγονται πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά της Γης και τα φυσικά φαινόμενα, συμπεριλαμβανομένων των δεδομένων σχετικά με την κατάσταση του περιβάλλοντος, από ενεργούς ή παθητικούς αισθητήρες σε δορυφόρους της Γης,

β) συλλέγονται παρόμοιες πληροφορίες από αερομεταφερόμενες πλατφόρμες ή πλατφόρμες εδάφους,

γ) οι πληροφορίες αυτές μπορούν να διανεμηθούν στους επίγειους σταθμούς εντός του συγκεκριμένου συστήματος, και

δ) μπορεί να συμπεριληφθεί πλατφόρμα εξακρίβωσης των στοιχείων. Αυτή η υπηρεσία μπορεί, επίσης, να περιλαμβάνει και ζεύξεις τροφοδοσίας, που είναι απαραίτητες για τη λειτουργία της. ο Μετεωρολογική Δορυφορική Υπηρεσία (Meteorological Satellite Service, MetS): δορυφορική υπηρεσία επίγειας εξερεύνησης για μετεωρολογικούς σκοπούς.

• Υπηρεσία Έρευνας Διαστήματος (Space Research Service, SRS): υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας, στην οποία χρησιμοποιούνται για σκοπούς επιστημονικής ή τεχνολογικής έρευνας διαστημικά σκάφη ή άλλα αντικείμενα στο διάστημα.

• Υπηρεσία Λειτουργίας Διαστήματος (Space Operation Service, SpO): υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας, που αφορά αποκλειστικά τη λειτουργία των διαστημικών σκαφών και συγκεκριμένα την ιχνηλάτηση, την τηλεμετρία και τον τηλεχειρισμό στο διάστημα. Αυτές οι λειτουργίες θα πρέπει κανονικά να παρέχονται εντός της υπηρεσίας, στην οποία λειτουργεί ο διαστημικός σταθμός.

Οι βασικές τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες, που παρέχονται σήμερα από τις δορυφορικές επικοινωνίες, είναι:

- Συγκανάλωση (trunking) τηλεφωνίας και κέντρο τηλεοπτικών προγραμμάτων: αναφέρεται σε επικοινωνίες σημείου-προς-σημείο (point-to-point), επιτρέποντας την αποδοτική και αξιόπιστη μετάδοση υψηλής κίνησης τηλεφωνίας και τηλεοπτικών σημάτων μεταξύ των επίγειων σταθμών μεγάλου μεγέθους. Παράδειγμα τέτοιας υπηρεσίας είναι τα δορυφορικά συστήματα INTELSAT και EUTELSAT.
- Εφαρμογές ευρυεκπομπής: οι δορυφόροι είναι τοποθετημένοι στην τροχιά κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να μεταδίδουν ταυτόχρονα σε όλους τους χρήστες της περιοχής κάλυψης. Τυπικές εφαρμογές αποτελούν η διανομή περιεχομένου, όπως προγράμματα με βίντεο και/ή ήχο, στους τελικούς χρήστες, απαιτώντας σημαντική ποσότητα εύρους φάσματος: ο τηλεόραση: αυτή η εφαρμογή έχει επιφέρει μεγάλη ανάπτυξη λόγω της ψηφιακής τηλεόρασης και του προτύπου DVB-S (Satellite Digital Video Broadcasting), το οποίο έχει αντικαταστήσει το προηγούμενο αναλογικό πρότυπο (Astra, Hotbird). ο ήχος: με το ψηφιακό ραδιόφωνο, όπου παρέχεται υψηλής ποιότητας ήχος (CDquality) στους ακροατές, υπάρχει απαίτηση για μετάδοση μέσω δορυφόρου, ιδίως σε περιοχές, όπου το επίγειο ραδιόφωνο FM δεν είναι διαθέσιμο (Worldspace, SiriusRadio, XM-Radio). ο διαδραστική τηλεόραση: αποτελεί εξέλιξη της αρχικής μονόδρομης ευρυεκπομπής με την παροχή ζεύξης επιστροφής (return link) από τον χρήστη στο κέντρο ευρυεκπομπής μέσω επίγειου τηλεφωνικού δικτύου ή μέσω δορυφόρου.
- ευρυζωνικές υπηρεσίες πολυμέσων: παρέχουν στον χρήστη δυνατότητες επικοινωνιών, συνδυάζοντας διαφορετικά μέσα (δεδομένα, ήχο, βίντεο κ.λπ.), δικτυώνοντας απομακρυσμένες περιοχές, οι οποίες βρίσκονται μέσα στην περιοχή κάλυψης του δορυφόρου. Μπορεί να χρησιμοποιηθούν μεταδόσεις πολυεκπομπής (multicast) από μία περιοχή σε πολλές περιοχές.
- κινητές και προσωπικές επικοινωνίες: παρά την παγκόσμια ανάπτυξη των επίγειων κυψελωτών συστημάτων, υπάρχουν ακόμα γεωγραφικές περιοχές, όπου δεν υπάρχει επαρκής κάλυψη. Αυτές οι περιοχές είναι ελεύθερες για χρήση κινητών και προσωπικών δορυφορικών επικοινωνιών, όπως η κινητή τηλεφωνία για δεδομένα και φωνή (Inmarsat, Iridium, Globalstar, Thuraya) και η αναφορά θέσης (Inmarsat, Euteltracks, Thuraya, Orbcomm).
- δορυφορική συλλογή ειδήσεων (Satellite News Gathering, SNG): είναι η εφαρμογή προσωρινών και περιστασιακών μεταδόσεων με πολύ μικρή ειδοποίηση ευρυεκπομπής, χρησιμοποιώντας φορητούς δορυφορικούς επίγειους σταθμούς άνω ζεύξης, λειτουργώντας ουσιαστικά ως υπηρεσία FSS.

## 1.7 Ζώνες Συχνοτήτων

Τα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών χρησιμοποιούν την ατμόσφαιρα ως μέσο διάδοσης και το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων για τη μετάδοση των σημάτων. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται η κατανομή του δορυφορικού φάσματος. Κάθε ζώνη συχνοτήτων χρησιμοποιείται για διαφορετικές εφαρμογές.

**Πίνακας 1.1 Μέγεθος κεραίας, διαθέσιμο εύρος ζώνης και οι υπηρεσίες τους για τις δορυφορικές ζώνες συχνοτήτων**

Ζώνη Συχνοτήτων	Συχνότητα άνω ζεύξης	Συχνότητα κάτω ζεύξης	Κεραία Γερματικού	Διαθέσιμο Εύρος Ζώνης	Κατηγορίες Τηλεπικοινωνιακών Υπηρεσιών
L-ζώνη	2 GHz	1 GHz	Μικρή	<100MHz	Κινητή υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Mobile Satellite Service, MSS) Κινητή υπηρεσία ξηράς μέσω δορυφόρου (Land Mobile Satellite Service, LMSS)
S-ζώνη	4 GHz	2 GHz	Μικρή	<100MHz	Κινητή υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Mobile Satellite Service, MSS) Υπηρεσία έρευνας του διαστήματος (Space Research Service)
C-ζώνη	8 GHz	4 GHz	Μεγάλη	800MHz	Σταθερή Υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Fixed Satellite Service, FSS)
X-ζώνη	12,5 GHz	8 GHz	Μεσαία		Σταθερή Υπηρεσία μέσω δορυφόρου για στρατιωτικούς σκοπούς (Fixed Satellite Service military communication)
Ku-ζώνη	19 GHz	12,5 GHz	Μικρή	1000MHz	Σταθερή Υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Fixed Satellite Service, FSS) Υπηρεσία ευρυεκπομπής μέσω δορυφόρου (Broadcast Satellite Service, BSS)
K-ζώνη	26,5 GHz	19 GHz	Μικρή	1000MHz	Σταθερή Υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Fixed Satellite Service, FSS) Υπηρεσία ευρυεκπομπής μέσω δορυφόρου (Broadcast Satellite Service, BSS)
Ka-ζώνη	30 GHz	26,5 GHz	Μικρή	2500MHz	Σταθερή Υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Fixed Satellite Service, FSS) Υπηρεσία ευρυεκπομπής μέσω δορυφόρου (Broadcast Satellite Service, BSS)

- Εκτός από τις τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες που εμφανίζονται στον πίνακα, στο Διεθνή Κανονισμό Ραδιοεπικοινωνιών προβλέπονται και άλλες (περισσότερο εξειδικευμένες) κατηγορίες υπηρεσιών (συνολικά 17). Τέτοιες είναι η δια-δορυφορική (inter-satellite) υπηρεσία, η κινητή ναυτική υπηρεσία μέσω δορυφόρου, η υπηρεσία ραδιοεντοπισμού μέσω δορυφόρου, η υπηρεσία εξερεύνησης της Γης μέσω δορυφόρου, η μετεωρολογία κ.ά.

- Αξίζει να επισημανθεί η χρήση διαφορετικών συχνοτήτων μεταξύ της άνω ζεύξης (Γηςδορυφόρου) και της κάτω ζεύξης (δορυφόρου-Γης), με τη χαμηλότερη συχνότητα να ανατίθεται τις περισσότερες φορές στη δεύτερη. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται οι παρεμβολές ανάμεσα στους δύο δυνατούς τρόπους λειτουργίας του δορυφόρου ή του επίγειου σταθμού (ως πομπού και ως δέκτη), ενώ προφυλάσσεται η κάτω ζεύξη από τις μεγαλύτερες αποσβέσεις, τις οποίες συνεπάγεται η διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε υψηλότερες συχνότητες.

Κατά την εισαγωγή μίας νέας υπηρεσίας στο δορυφορικό φάσμα εκτελούνται γενικά οι παρακάτω ενέργειες:

- Επιλέγεται μία ζώνη συχνοτήτων, από αυτές που έχει εκχωρήσει η ITU.
- Εξετάζονται οι πιθανές παρεμβολές σε εθνικό και παγκόσμιο επίπεδο.
- Ενημερώνεται η ITU για τα χαρακτηριστικά του συστήματος.

- Επιλύονται τυχόν προβλήματα μεταξύ της νέας υπηρεσίας και των άλλων ήδη υπάρχουσών υπηρεσιών και γίνεται καταχώρηση στα αρχεία της ITU. Η χρήση των συχνοτήτων για την άνω και κάτω ζεύξη πραγματοποιείται σε διαφορετικές συχνότητες, για λόγους αποφυγής παρεμβολών στον δορυφόρο, με τη μεγαλύτερη συχνότητα να χρησιμοποιείται από την άνω ζεύξη (από τον επίγειο σταθμό προς τον δορυφόρο). Η επικοινωνία με κινητούς σταθμούς γίνεται σε χαμηλές συχνότητες της S-ζώνης (2,6/2,5GHz) και L-ζώνης (1,6/1,4GHz) λόγω των μικρότερων απωλειών διάδοσης, ενώ η επικοινωνία με σταθερούς επίγειους σταθμούς γίνεται σε πιο υψηλές συχνότητες, στην Cζώνη (6/4GHz), στην X-ζώνη (8/7GHz), στην Ku-ζώνη (14/12GHz) και στην Ka-ζώνη (30/20GHz).

Αν και οι πρώτοι δορυφόροι, που τέθηκαν σε τροχιά, έκαναν στην πλειοψηφία τους χρήση της φασματικής ζώνης C, η ζώνη αυτή άρχισε να υπερπληρώνεται, με αποτέλεσμα την έναρξη κατασκευής δορυφόρων, οι οποίοι θα εκμεταλλεύονταν άλλες ζώνες συχνοτήτων. Αρχικά η Ku-ζώνη και στη συνέχεια η Ka-ζώνη, αλλά και η ζώνη συχνοτήτων V (50GHz/40GHz), έγιναν περισσότερο ελκυστικές για τα σύγχρονα εμπορικά δορυφορικά συστήματα, σε συνέχεια του μεγάλου όγκου ζήτησης δορυφορικών εφαρμογών και της ανάπτυξης του Internet. Εκτός από τους λόγους αυτούς, η ενεργοποίηση φερουσών συχνοτήτων υψηλότερων των 10GHz προσέφερε προσωρινά ανακούφιση στο πρόβλημα των διαθέσιμων θέσεων στη γεωστατική τροχιά. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στη Βόρεια Αμερική κατά μήκος ενός τόξου 70ο επί της γεωστατικής τροχιάς υπάρχουν περίπου 35 δορυφόροι, που λειτουργούν στη ζώνη C. Όταν δύο δορυφορικά συστήματα λειτουργούν σε κοινή περιοχή του φάσματος, το πρόβλημα των αμοιβαίων παρεμβολών λαμβάνει σοβαρές διαστάσεις, εφόσον η γωνιακή απόσταση, που χωρίζει τους αντίστοιχους δορυφόρους, είναι μικρή. Με την τοποθέτηση στους δορυφορικούς επαναλήπτες πομποδεκτών στις ζώνες Ku, Ka και V, το πρόβλημα μετριάζεται και οι δορυφόροι εγκαθίστανται σε γωνιακές αποστάσεις μέχρι 1ο. Το όριο των 1ο δεν μπορεί να μειωθεί περαιτέρω, λόγω της μειωμένης ικανότητας σκόπευσης ενός μόνο δορυφόρου (με επαρκή απομόνωση από τους γειτονικούς του) από τις μικρές σε μέγεθος κεραίες, που χρησιμοποιούν οι μικροί χρήστες δορυφορικών υπηρεσιών, όπως οι οικιακοί χρήστες, τα δίκτυα επιχειρήσεων κ.λπ.

## 1.8 Κατηγορίες Δορυφορικών Ραδιοεπικοινωνιών

Fixed satellite service (FSS) RR22: Μια υπηρεσία ραδιοεπικοινωνιών μεταξύ επίγειων σταθμών σε συγκεκριμένες θέσεις, όταν χρησιμοποιείται ένας ή περισσότεροι δορυφόροι. Οι συγκεκριμένες θέσεις μπορεί να είναι είτε καθορισμένα σταθερά σημεία, είτε οποιαδήποτε σταθερά σημεία μέσα σε προκαθορισμένη περιοχή. Άρα περιλαμβάνονται μεταφερόμενοι σταθμοί οι οποίοι όμως λειτουργούν σε σταθερά σημεία.

Broadcasting satellite service (BSS) RR37: Μια υπηρεσία ραδιοεπικοινωνιών στην οποία τα σήματα που εκπέμπονται από ένα δορυφορικό σταθμό προορίζονται για την απευθείας λήψη από το κοινό. Είναι είτε ανεξάρτητης ή ατομικής λήψης (π.χ. NOVA) είτε κοινής ή ομαδικής λήψης (π.χ. EPT) με σκοπό τη διανομή στο κοινό.

Mobile satellite service (MBS) Υπηρεσία που υποστηρίζει την κινητικότητα των χρηστών. Αφορά την επικοινωνία κινητών σταθμών είτε με επίγειους σταθερούς, είτε με άλλους κινητούς σταθμούς. Ανάλογα με την τοποθεσία των κινητών σταθμών (ξηρά, αέρας, θάλασσα), χωρίζεται σε υποκατηγορίες. Η συγκεκριμένη υπηρεσία αποτελεί το μέλλον των δορυφορικών προσωπικών επικοινωνιών.

Amateur satellite service (AmSS) RR53: Μια υπηρεσία ραδιοεπικοινωνιών που χρησιμοποιεί δορυφορικούς σταθμούς σε δορυφόρους της γης, με σκοπό την αυτο-εκπαίδευση, την ενδοεπικοινωνία και τις τεχνικές έρευνες ραδιοερασιτεχνών, δηλαδή δεόντως εξουσιοδοτημένων ατόμων που ενδιαφέρονται για ραδιοτεχνικές, για προσωπικούς και όχι για χρηματικούς λόγους.

Radio determination service (RDSS) RR10: Ο καθορισμός της θέσης, της ταχύτητας ή/και άλλων χαρακτηριστικών ενός αντικειμένου ή ο τρόπος απόκτησης της πληροφορίας σχετικά με αυτές τις παραμέτρους, μέσω των ιδιοτήτων διάδοσης των ραδιοκυμάτων. Εμπεριέχει τις Radio Navigation Satellite Services (RNSS), είτε σε θάλασσα (MRNSS) είτε σε αέρα

(AeRNSS). Standard frequency & time signal satellite service (SFSS) RR51: Υπηρεσία με την οποία παρέχονται οι τρόποι για την παραγωγή και μετάδοση ακριβούς χρονισμού και συχνοτήτων. Διευκολύνεται έτσι η ακριβής σύγκριση των εθνικών προτύπων για τις πηγές χρόνου και συχνοτήτων, και η αναμετάδοση ακριβέστατων υπολογισμών του χρόνου.

Earth exploration satellite service (EESS) RR48: Μια υπηρεσία ραδιοεπικοινωνιών μεταξύ επίγειων σταθμών και ενός ή περισσότερων δορυφορικών σταθμών, περιλαμβανομένων και των διαδορυφορικών ζεύξεων, με την οποία η πληροφορία η σχετική με τα χαρακτηριστικά της γης και τα φυσικά της φαινόμενα, συλλέγεται από ενεργούς ή παθητικούς αισθητήρες πάνω σε δορυφόρους, στη συνέχεια διανέμεται σε επίγειους σταθμούς και περιλαμβάνει τις ερωτήσεις στις διάφορες πλατφόρμες.

Space research service (SRS) Η SRS αφορά επικοινωνία και έλεγχο επανδρωμένων διαστημοπλοίων και διαπλανητικών οχημάτων. Inter satellite service (ISS) RR21: Υπηρεσία που καλύπτει την απευθείας επικοινωνία μεταξύ δορυφορικών σταθμών, δηλαδή τις διαδορυφορικές ζεύξεις

(Inter Satellite Links). Space operation service (SpO) RR25: Αφορά τις υπηρεσίες που παρέχονται κατά τη διάρκεια της τοποθέτησης του δορυφόρου στη σωστή θέση και στις περιπτώσεις επαναφοράς του σε σταθερή κατάσταση, όταν αυτή δεν υφίσταται. Συνήθως αποδίδονται άλλες συχνότητες για τον έλεγχο κατά τη φάση της εκτόξευσης, οι οποίες αφορούν στο σταθμό ελέγχου.

## 2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΣΕ ΤΗΖ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ

### 2.1 Εισαγωγικά

Η κίνηση των ασύρματων δεδομένων έχει αυξηθεί εκθετικά τα τελευταία χρόνια, κάτι που συνεπάγεται και την αυξανόμενη ζήτηση για ασύρματες ζεύξεις υψηλότερων ταχυτήτων. Την τελευταία δεκαετία, η κίνηση των ασύρματων δεδομένων έχει αυξηθεί δραστικά λόγω της αλλαγής με την οποία η σύγχρονη κοινωνία δημιουργεί, μοιράζεται και καταναλώνει τις πληροφορίες. Αυτή η αλλαγή έχει ακολουθηθεί από μία αυξανόμενη ζήτηση για ασύρματες επικοινωνίες υψηλότερων ταχυτήτων οπουδήποτε και ανά πάσα χρονική στιγμή. Ακολουθώντας αυτή την τάση, ασύρματες υπερ-ευρυζωνικές ζεύξεις στα 100 Gbps ή ακόμα και Tbps γίνονται πραγματικότητα. Η εισαγωγή προηγμένων λύσεων φυσικού στρώματος, και σημαντικότερα, νέων συχνοτικών ομάδων είναι απαραίτητη για να υποστηριχθεί αυτός ο υψηλός ρυθμός μετάδοσης στα μελλοντικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Μεταξύ άλλων, η μπάντα των Terahertz (0.06 – 10 THz) έχει βρεθεί ως μία από τις υποσχόμενες συχνοτικές μπάντες που θα προσφέρει επικοινωνίες πολύ υψηλών ταχυτήτων. Η συχνοτική αυτή ομάδα προσφέρει ένα πολύ ευρύ εύρος ζώνης, το οποίο ποικίλει από δεκάδες GHz έως και αρκετά THz, ανάλογα με την απόσταση εκπομπής.

Η ζώνη συχνοτήτων Terahertz (THz) κυμαίνεται από 0,1 έως 10 THz, η οποία είναι η τελευταία έκταση του ραδιοφάσματος και γενικά θεωρείται ως Terahertz Gap. Η ζώνη Terahertz είναι ορατή ώστε να μπορεί να παρέχει ταχύτητα δεδομένων έως και Tbps για να ικανοποιήσει εξαιρετικά υψηλή απόδοση, χαμηλή λανθάνουσα κατάσταση και εντελώς νέα σενάρια εφαρμογής για το 6G. Το πρώτο έργο στο IEEE 802 προς 100 Gbps, IEEE 802.15d, εγκρίθηκε τον Μάρτιο του 2014, αν και δεν υπάρχει εμπορικό σχέδιο βασισμένο σε αυτό το πρότυπο. Τα μοναδικά χαρακτηριστικά της ζώνης terahertz, όπως η μεγάλη απώλεια διαδρομής, η διασπορά κ.λ.π. Θέτουν πολλές νέες προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν πριν επιτευχθούν οι σύνδεσμοι Tbps (Terabit/s). Τα κύρια χαρακτηριστικά της ζώνης terahertz είναι τα εξής:

- (1) Τεράστια εύρη ζώνης (> 50 GHz) διαθέσιμα στις συχνότητες THz,
- (2) Σοβαρή απώλεια διαδρομής ακόμη και για διάδοση ελεύθερου χώρου, π.χ. ~ 100 dB στα 300 GHz στην απόσταση των 10 m,
- (3) Υπερβολική εξασθένηση λόγω συντονισμού των μορίων στον αέρα. Ωστόσο, υπάρχουν αρκετά ατμοσφαιρικά παράθυρα, π.χ. 140, 220, 340GHz όπου η εξασθένηση λόγω συντονισμού μορίων είναι μόλις περίπου 2 dB / km, αμελητέα σε σύγκριση με την εξασθένηση του ελεύθερου χώρου. Πρέπει να σημειωθεί ότι, όταν η συχνότητα υπερβαίνει το 1 THz, το ασύρματο κύμα υφίσταται σημαντική απορρόφηση από ατμούς νερού και οξυγόνου στην ατμόσφαιρα και μπορεί να εξασθενίσει δέκα φορές σε απόσταση διάδοσης 1 m.
- (4) Ευαισθησία σε σκιές και αποκλεισμό λόγω της ήπιας διάθλασης σε τόσο μικρό μήκος κύματος. Για παράδειγμα, η εξασθένηση σήματος του τούβλου είναι τόσο υψηλή όσο 40-80 dB και το ανθρώπινο σώμα μπορεί να προκαλέσει εξασθένηση σήματος 20-35 dB.
- (5) Λιγότερη ευαισθησία στην υγρασία / βροχόπτωση, π.χ., η εξασθένηση γίνεται σχετικά επίπεδη πάνω από τα 100 GHz.
- (6) Εξαιρετικά γρήγορη διακύμανση καναλιών και διακοπτόμενη σύνδεση, π.χ. ο χρόνος συσχέτισης της ζώνης terahertz είναι πολύ σύντομος και η συχνότητα Doppler είναι πολύ μεγάλη.



(7) Ευρεία χρήση πολύ κατευθυντικών κεραιών (~ 25 dBi).

(8) Εξαιρετικά υψηλή στιγμιαία ισχύς επεξεργασίας. Μία σημαντική πρόκληση στη χρήση πολύ μεγάλων κεραιών είναι η κατανάλωση ισχύος της μετατροπής συστήματος ευρείας ζώνης terahertz (A/D). Η κατανάλωση ενέργειας είναι γενικά ανάλογη με το ρυθμό δειγματοληψίας και αυξάνεται εκθετικά με τον αριθμό δειγματοληψίας ανά bit.

Ωστόσο, η κατασκευή των εξαρτημάτων THz έχει γίνει πιο ώριμη και ορισμένα εμπορικά προϊόντα είναι σε θέση να εκπέμπουν ισχύ 0 - 10 dBm στα 300 GHz. Αναμένεται ότι μπορεί να επιτευχθεί υψηλότερη ισχύς εξόδου στο εγγύς μέλλον. Επιπλέον, τα απλά σχήματα διαμόρφωσης (π.χ. BPSK, QPSK) θα ήταν επαρκή για υψηλές ταχύτητες δεδομένων (> 100 GBit / s), δεδομένων των τεράστιων εύρους ζώνης των ταινιών THz τουλάχιστον στο πρώτο στάδιο. Ως εκ τούτου, οι επικοινωνίες terahertz έχουν την ευκαιρία να εφαρμοστούν στην εποχή 6G και μπορούμε να προσβλέπουμε στην περαιτέρω βελτίωση των επιδόσεων με ορισμένες βασικές τεχνολογικές καινοτομίες.

Τα σενάρια επικοινωνίας terahertz μπορούν να ταξινομηθούν κυρίως σε: δίκτυα μακρο-, μικρο- και νανο-κλίμακας. Τα δίκτυα μεγάλης κλίμακας χρησιμοποιούνται κυρίως για εφαρμογές στις οποίες το εύρος μετάδοσης κυμαίνεται από περίπου 10 μέτρα έως λίγα χιλιόμετρα. Τα δίκτυα μικρής κλίμακας είναι συνήθως για τις εφαρμογές με περιορισμένο εύρος μετάδοσης (λιγότερο από λίγα μέτρα, π.χ.  $\leq 10\text{m}$ ). Τα δίκτυα νανο-κλίμακας είναι πιο κατάλληλα για τις επικοινωνίες σε απόσταση μικρότερη από 1 μέτρο ή εκατοστά. Τα δίκτυα μεγάλης κλίμακας προορίζονται κυρίως για υπαίθρια σενάρια και οι τυπικές εφαρμογές μπορούν να περιλαμβάνουν τη σύνδεση φορητού, backhaul / fronthaul και ούτω καθεξής. Αυτές οι εφαρμογές θα απαιτούν ευρύτερη κάλυψη (π.χ., 10 m έως λίγα χιλιόμετρα) και υψηλή απόδοση (έως 1 Tbps) με χαμηλή λανθάνουσα κατάσταση (π.χ.  $< 1\text{ms}$ ).

Όσον αφορά τα δίκτυα μικρής κλίμακας, μπορούν να ταξινομηθούν περαιτέρω σε σενάρια εξωτερικού και εσωτερικού χώρου. Για εσωτερικά σενάρια, μπορούν να υποστηρίξουν τις εφαρμογές που απαιτούν κινητικότητα καθώς και εφαρμογές με σταθερές συνδέσεις σημείων ή πολλαπλών σημείων, όπως εσωτερικά μικρά κελιά, WPAN (Wireless Personal Area Network), ασύρματες συνδέσεις σε Data Centers και Near-Field Επικοινωνίες (NFC). Ενώ για υπαίθρια σενάρια, οι εφαρμογές μπορούν να περιλαμβάνουν οχήματα, μικρά κελιά και σύνδεση backhaul. Και οι εξωτερικές εφαρμογές είναι διαφορετικές από το εσωτερικό περιβάλλον, γεγονός που οφείλεται σε μεγάλο βαθμό σε φαινόμενα αντανάκλασης και σκέδασης με απώλεια διαδρομής και απορρόφησης. Επομένως, αυτά τα σενάρια εσωτερικού και εξωτερικού χώρου απαιτούν διαφορετικά μοντέλα διάδοσης, αντίστοιχα, για να αντιπροσωπεύουν διαφορετικά εμπόδια, σκέδαση και ατμοσφαιρικές απώλειες.

Το δίκτυο νανο-κλίμακας είναι μια ολοκαίνουργια τοπολογία δικτύου κατάλληλη για εξαιρετικά σύντομο μήκος κύματος. Σε δίκτυο νανο-κλίμακας, η επικοινωνία είναι συνήθως για την απόσταση που κυμαίνεται από 1 μέτρο ή εκατοστά (π.χ. συνδέσεις μεταξύ μικροσκοπικών συσκευών, συνδέσεις on-chip και chip-to-chip, επικοινωνίες εντός σώματος). Οι κύριες προκλήσεις περιλαμβάνουν το νέο σχεδιασμό πομποδέκτη για συσκευές νανο-κλίμακας, μοντέλα καναλιών για τα νέα περιβάλλοντα δικτύων νανο-κλίμακας, λύσεις φυσικών επιπέδων, συμπεριλαμβανομένων των σχημάτων κωδικοποίησης καναλιών και διαμόρφωσης, και πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Εκτός από τα παραπάνω τρία επίγεια σενάρια, οι επικοινωνίες στο διάστημα είναι επίσης σημαντικά σενάρια επικοινωνιών terahertz, τα οποία έχουν εφαρμοστεί εδώ και πολλά χρόνια στον τομέα της διαστημικής επιστήμης. Στον εξωτερικό χώρο, το κύμα terahertz έχει σχετικά διαφανή ατμοσφαιρικά παράθυρα, όπως τα 350, 450, 620, 735 και 870 microns. Η μετάδοση θα είχε μικρή απορρόφηση από την υγρασία, έτσι ώστε η επικοινωνία μεγάλων αποστάσεων να είναι εφικτή στο terahertz. Αν και η τεχνολογία

επικοινωνίας terahertz εξελίσσεται ταχύτατα στους τομείς των αρχιτεκτονικών πομποδέκτη, των υλικών, του σχεδιασμού της κεραίας, της μέτρησης της διάδοσης, της μοντελοποίησης καναλιών και των τεχνικών φυσικής στρώσης, υπάρχουν ακόμα πολλές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν πριν οι συνδέσεις Tbps καταστούν πρακτικές.

## 2.2 Κίνητρο για THz Επικοινωνίες

Εκτός της THz συχνοτικής μπάντα επικοινωνίας, αρκετές άλλες εναλλακτικές εξετάζονται για να ικανοποιήσουν την ζήτηση.

- Στα συστήματα επικοινωνιών σε συχνότητες κάτω των 5 GHz, προηγμένες ψηφιακές διαμορφώσεις όπως η Τεχνική ορθογωνίας πολυπλεξίας διαίρεσης συνχότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM) και προηγμένα επικοινωνιακά σχήματα, όπως πολύ μεγάλης κλίμακας συστήματα Πολλαπλών Εισόδων Πολλαπλών Εξόδων (Multiple Input Multiple Output - MIMO) χρησιμοποιούνται για να επιτύχουν πολύ υψηλές φασματικές αποδοτικότητες. Ωστόσο, η έλλειψη διαθέσιμου εύρους ζώνης περιορίζουν τους ρυθμούς μετάδοσης που μπορούν να επιτευχθούν. Για παράδειγμα, στα Long-Term Evolution Advanced (LTE-A) δίκτυα, οι μέγιστοι ρυθμοί μετάδοσης της τάξης του 1 Gbps είναι εφικτοί σε αθροιστικό εύρος ζώνης πάνω από 100 MHz. Αυτό είναι τρεις τάξεις μεγέθους κάτω από το επιθυμητό για τις ζεύξεις σε Tbps.

- Τα συστήματα επικοινωνιών σε χιλιοστομετρικές συχνότητες, όπως αυτά στα 60 GHz, έχουν κερδίσει πολύ έδαφος τα τελευταία χρόνια εξαιτίας της ικανότητας τους να υποστηρίζουν πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, της τάξης των 10 Gbps, με κόστος την περιορισμένη απόσταση μετάδοσης. Ο τρόπος για να βελτιωθούν αυτοί οι ρυθμοί δεδομένων περιλαμβάνει την ανάπτυξη πιο πολύπλοκων δομών πομποδεκτών, ικανών να εφαρμόσουν λύσεις φυσικού στρώματος με πολύ υψηλότερη φασματική αποδοτικότητα. Ωστόσο, τελικά, το χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης περιορίζεται να είναι λιγότερο των 10 GHz, το οποίο αναπόφευκτα θέτει ένα άνω όριο στους επιτεύξιμους ρυθμούς μετάδοσης.

- Συστήματα επικοινωνίας Οπτικής Ελευθέρου Χώρου (Free Space Optical - FSO), τα οποία λειτουργούν σε υπέρυθρες (IR) συχνότητες και πάνω, ανακαλύπτονται ως ένας τρόπος να βελτιωθούν οι επιτεύξιμοι ρυθμοί μετάδοσης στα ασύρματα δίκτυα. Το εγγενώς πολύ διαθέσιμο εύρος ζώνης σε αυτές τις υψηλές συχνότητες λειτουργεί υπέρ τους. Από την άλλη μεριά, τα χαμηλά επίπεδα εκπομπόμενης ισχύος εξαιτίας των περιορισμών για την προστασία των ματιών, η επίδραση διαφόρων ατμοσφαιρικών φαινομένων στη διάδοση του σήματος (όπως ομίχλη, βροχή σκόνη ή ρύπανση), και το μέγεθος και η ανάγκη για αυστηρή ευθυγράμμιση μεταξύ πομπού και δέκτη, περιορίζουν τους επιτεύξιμους ρυθμούς μετάδοσης ή την πρακτικότητα των FSO συστημάτων για κινητά και προσωπικά ασύρματα δίκτυα.

Αντίθετα, η συχνοτική ομάδα των THz προσφέρει ένα πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης, το οποίο ποικίλει από δεκάδες GHz μέχρι αρκετά THz ανάλογα με την απόσταση μετάδοσης [1]. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι περισσότερο από μία τάξη μεγέθους πάνω από τα πιο σύγχρονα συστήματα χιλιοστομετρικών κυμάτων, ενώ η συχνότητα λειτουργίας είναι τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους κάτω από αυτή των FSO συστημάτων. Η τεχνολογία που απαιτείται για να γίνει πραγματικότητα η επικοινωνία στην μπάντα των THz αναπτύσσεται ραγδαία εξίσου. Επιπρόσθετα σε όσα αναφέρθηκαν, οι συχνότητες στα THz δεν έχουν ακόμα υπαχθεί σε κανονισμούς. Σε όρους ευρύτερης επίπτωσης, η THz τεχνολογία έχει πρόσφατα αναγνωριστεί από την DARPA ως ένας από τους τέσσερις μεγαλύτερους τομείς έρευνας οι οποίοι θα μπορούσαν να έχουν επίδραση στην κοινωνία μεγαλύτερη από το ίδιο το Internet.

## 2.3 Εφαρμογές

Το μεγάλο εύρος ζώνης που παρέχεται από την μπάντα των THz ανοίγει το δρόμο για μια πληθώρα εφαρμογών οι οποίες απαιτούν πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και επιτρέπουν την ανάπτυξη μια πληθώρας καινούργιων εφαρμογών σε κλασσικά θέματα δικτύων καθώς και σε καινούργια ζητήματα επικοινωνίας σε επίπεδο νανοκλίμακας.

Οι εφαρμογές στις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθούν τα THz σε μακροσκοπικό επίπεδο είναι, μεταξύ άλλων:

- **5G Κυψελωτά Δίκτυα:** Η επικοινωνία μέσω της συχνοτικής ομάδας των THz μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις μικροκυψέλες νέας γενιάς, δηλαδή ως μέρος ιεραρχούμενων κυψελωτών δικτύων ή ετερογενών δικτύων. Η μπάντα των THz θα παρέχει στις μικρές κυψέλες εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες δεδομένων σε περιοχή κάλυψης έως και 10 μέτρα. Επιπλέον, οι κατευθυνόμενες ζεύξεις στα THz μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παρέχουν πολύ υψηλές ταχύτητες ασύρματων backhaul συνδέσεων στις μικρές κυψέλες.

- **Terabit Wireless Local Area Networks (T-WLAN):** Η επικοινωνία μέσω THz επιτρέπει την απρόσκοπτη διασύνδεση μεταξύ πολύ γρήγορων ενσύρματων δικτύων, όπως ζεύξεις οπτικών ινών, και προσωπικών ασύρματων συσκευών όπως φορητοί ηλεκτρονικοί υπολογιστές (καμία διαφορά σε ταχύτητα μεταξύ ασύρματων και ενσύρματων δικτύων).
- **Terabit Wireless Personal Area Networks (T-WPAN):** Οι ζεύξεις σε Tbps μεταξύ συσκευών σε κοντινή απόσταση είναι πιθανές με την επικοινωνία σε THz. Το περιβάλλον λειτουργίας είναι κυρίως εσωτερικός χώρος και συνήθως πάνω σε γραφείο.

- **Ασφαλής Ασύρματη Επικοινωνία σε Terabit:** Η μπάντα των THz μπορεί ακόμα να επιτρέψει ασφαλείς συνδέσεις επικοινωνίας ευρείας κλίμακας σε στρατιωτικούς τομείς και τομείς άμυνας. Η πολύ υψηλή ατμοσφαιρική απορρόφηση στις συχνότητες των THz και η χρήση πολύ μεγάλων συστοιχιών κεραιών για να υπερνικήσουν την περιορισμένη απόσταση επικοινωνίας έχουν ως αποτέλεσμα πολύ μικρές σε μέγεθος ακτίνες, οι οποίες μειώνουν δραστικά την πιθανότητα υποκλοπής.

Η μπάντα των THz θα δώσει ακόμα τη δυνατότητα για ασύρματη επικοινωνία μεταξύ μηχανών σε νανοσκοπική κλίμακα ή αλλιώς νανομηχανές. Η τελευταία λέξη της τεχνολογίας στους πομποδέκτες και τις κεραίες αυτής της κλίμακας υποδεικνύουν τα THz ως το ιδανικό συχνοτικό εύρος λειτουργίας τους. Το πολύ μικρό μέγεθος και οι μοναδικές ιδιότητες των νανοκεραιών και των νανοδεκτών επιτρέπουν στις νανομηχανές να επικοινωνούν σε αυτήν την πολύ υψηλή συχνότητα. Μερικές εφαρμογές είναι:

- **Συστήματα Παρακολούθησης Υγείας:** Το νάτριο, η γλυκόζη και άλλα ιόντα στο αίμα, η χοληστερίνη, βιοδείκτες για τον καρκίνο ή η ύπαρξη διαφόρων μεταδοτικών παραγόντων μπορεί να ελεγχθεί μέσω νανοαισθητήρων. Αρκετοί νανοαισθητήρες οι οποίοι είναι καταμεμημένοι στο σώμα και ορίζουν ένα δίκτυο νανοαισθητήρων στο ανθρώπινο σώμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να συλλεχθούν σχετικά δεδομένα για την υγεία του ασθενούς. Μια ασύρματη διεπαφή μεταξύ αυτών των αισθητήρων και μια συσκευή όπως ένα κινητό τηλέφωνο ή ειδικός ιατρικός εξοπλισμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συλλεχθούν όλα αυτά τα δεδομένα και να προωθηθούν στο ιατρικό προσωπικό.

- **Άμυνα σε πυρηνικά, βιολογικά και χημικά όπλα:** Οι χημικές και βιολογικοί νανοαισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ανιχνεύσουν επιβλαβή χημικά και βιολογικά όπλα με έναν καταμεμημένο τρόπο. Ένα από τα βασικά οφέλη της χρήσης νανοαισθητήρων αντί για τους κλασσικούς χημικούς ανιχνευτές είναι ότι η παρουσία ενός χημικού σύνθετου υλικού μπορεί να ανιχνευθεί σε συγκέντρωση τόσο χαμηλή όσο ένα μόριο και πολύ γρηγορότερα από τους κλασσικούς αισθητήρες μικροσκοπικής κλίμακας.

• **The Internet of Nano-things:** Η διασύνδεση συσκευών νανοσκοπικής κλίμακας με υπάρχοντα επικοινωνιακά δίκτυα και κυρίως με το Internet καθορίζει ένα κυβερνο-φυσικό σύστημα το οποίο είναι γνωστό ως Internet of Nano-Things (IoNT). Το IoNT επιτρέπει νέες ενδιαφέρουσες εφαρμογές οι οποίες θα έχουν επιρροή και στον τρόπο που εργαζόμαστε. Για παράδειγμα, σε ένα διασυνδεδεμένο γραφείο, ένας νανο-πομπός και μια νανο-κεραία μπορούν να ενσωματωθούν σε κάθε αντικείμενο ώστε να τους επιτρέψουμε να είναι μόνιμως συνδεδεμένα στο Internet. Ως αποτέλεσμα, ένας χρήστης μπορεί να ανιχνεύει όλα τα επαγγελματικά και προσωπικά του αντικείμενα με μεγάλη ευκολία.

• **Πολύ υψηλής ταχύτητας On-chip επικοινωνία:** Η THz μπάντα μπορεί να προσφέρει αποτελεσματικούς και κλιμακούμενους τρόπους εσωτερικής επικοινωνίας σε ασύρματα on-chip δίκτυα, χρησιμοποιώντας νανο-κεραίες για να κατασκευάσουμε εξαιρετικά γρήγορες ζεύξεις. Αυτή η καινούργια προσέγγιση θα ικανοποιήσει, σύμφωνα με τις προσδοκίες, τις απαιτητικές προσδοκίες των χωρικά περιορισμένων και εντατικών επικοινωνιών των on-chip εφαρμογών, εξαιτίας τόσο του υψηλού εύρους ζώνης και της εξαιρετικής χωρικής αξιοποίησης.

## 2.4 Προκλήσεις και Ερευνητικοί Σκοποί

Καθώς οδεύουμε προς την υλοποίηση της επικοινωνίας σε THz, υπάρχουν ακόμα ερευνητικές προκλήσεις για την υλοποίηση αποδοτικών και πρακτικών επικοινωνιακών δικτύων σε THz συχνότητες οι οποίες απαιτούν καινοτόμες λύσεις και την αναθεώρηση ακόμα κάποιων καλά θεμελιωμένων ιδεών στις ασύρματες επικοινωνίες, στα διαφορετικά επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλου. Ακολουθώς, αναφέρονται οι κύριες προκλήσεις που αφορούν την μοντελοποίηση καναλιού στην μπάντα των THz. Πολλά από αυτά τα ζητήματα είναι κοινά με τα συστήματα των mm-Wave, οπότε οι προτεινόμενες λύσεις μπορούν να εφαρμοστούν κατά κόρον και για τα τελευταία συστήματα.

Τα υπάρχοντα μοντέλα καναλιού για τις χαμηλότερες συχνοτικές ομάδες δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην μπάντα των THz, καθώς δεν αντικατοπτρίζουν τη συμπεριφορά αυτής της φασματικής ομάδας, δηλαδή τις πολύ υψηλές απώλειες λόγω ατμοσφαιρικής απορρόφησης ή ανάκλασης. Προς το παρόν, οι προσπάθειες που γίνονται και αφορούν τον χαρακτηρισμό του καναλιού, επικεντρώνονται στο παράθυρο εκπομπής στα 300 GHz, καθώς σε αυτές τις συχνότητες υπάρχουν οι περισσότερες διαθέσιμες πειραματικές διατάξεις [1]. Ωστόσο, ένα παράθυρο εκπομπής σε υψηλότερες συχνότητες, ή ακόμα και παραπάνω από ένα παράθυρα ταυτόχρονα σε ολόκληρο το φάσμα των THz, θα χρειαστεί για να επιτευχθούν αξιόπιστες ζεύξεις σε Tbps. Επιπρόσθετα, εκτός από την απευθείας επικοινωνία (Line of Sight – LoS), η μη απευθείας διάδοση (Non Line of Sight – NLOS) χρειάζεται να ληφθεί υπόψιν. Συνολικά, ένα ολοκληρωμένο μοντέλο καναλιού πολλαπλών διαδρομών το οποίο θα λαμβάνει υπόψιν το στατιστικά μεταβαλλόμενο περιβάλλον είναι απαραίτητο.

Το πρώτο βήμα για την κατανόηση του καναλιού στα THz είναι ο χαρακτηρισμός των φαινομένων διάδοσης τα οποία επηρεάζουν την διάδοση ελεύθερου χώρου των THz κυμάτων. Προς αυτή την κατεύθυνση, έχει αναπτυχθεί ένα LoS μοντέλο διάδοσης για ολοκληρη την ομάδα των THz (0.1– 10 THz). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η θεωρία μεταφοράς ενέργειας λόγω ακτινοβολίας (radiative transfer theory) και οι πληροφορίες από την βάση δεδομένων του HITRAN για να αναλυθεί η επίδραση της ατμοσφαιρικής απορρόφησης στις απώλειες διαδρομής και στο θόρυβο. Οι απώλειες διαδρομής για ένα διαδιδόμενο κύμα στις THz συχνότητες ορίζεται ως το άθροισμα των απωλειών διάδοσης και των απωλειών λόγω μοριακής απορρόφησης. Οι απώλειες διάδοσης αποτελούν την εξασθένηση εξαιτίας της διεύρυνσης του κύματος καθώς αυτό διαδίδεται στο μέσο. Οι απώλειες απορρόφησης αποτελούν την εξασθένηση που υπόκειται ένα διαδιδόμενο κύμα εξαιτίας της μοριακής απορρόφησης και εξαρτάται από την συγκέντρωση και τη σύσταση του μέσου σε μόρια. Ως αποτέλεσμα, το κανάλι στα THz

είναι πολύ επιλεκτικό συχνοτικά. Για μια δεδομένη απόσταση, η συνολική απώλεια καναλιού αυξάνει με τη συχνότητα εξαιτίας των απωλειών διάδοσης. Οι απώλειες διαδρομής μπορούν εύκολα να ξεπεράσουν τα 100 dB για αποστάσεις εκπομπής της τάξης λίγων μόνο μέτρων. Ακόμα, η μοριακή απορρόφηση ορίζει αρκετά παράθυρα, των οποίων η θέση και το εύρος εξαρτάται από την απόσταση εκπομπής. Για αποστάσεις πολύ κάτω του 1 μέτρου, η μοριακή απορρόφηση είναι σχεδόν αμελητέα και, έτσι, η μπάντα των THz συμπεριφέρεται ως ένα παράθυρο εκπομπής εύρους 10 THz.

Ωστόσο, για αποστάσεις εκπομπής μεγαλύτερες του 1 μέτρου, πολλές συνιστώσες γίνονται σημαντικές και τα παράθυρα εκπομπής γίνονται πιο στενά. Στο φάσμα των 10 THz, υπάρχουν παράθυρα εκπομπής στα οποία επίδραση των απωλειών λόγω μοριακής απορρόφησης είναι μηδαμινή, πολύ κάτω των 10 dB/km. Βέβαια, εξαιτίας των απωλειών διάδοσης, οι συνολικές απώλειες είναι υψηλές, κάτι το οποίο οδηγεί στη χρησιμοποίηση πολύ κατευθυντικών με υψηλό κέρδος κεραιές, καθώς και τα καινούργια Massive MIMO σχέδια.

Οι LoS εκπομπές μπορεί να μην είναι πάντα πιθανές λόγω της παρουσίας εμποδίων. Συγκεκριμένα, οι NLoS εκπομπές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε: διάδοση κατοπτρικής ανάκλασης, διάδοση διάχυτης σκέδασης και περιθλούμενη διάδοση. Για να συνυπολογίσουμε την NLoS διάδοση, χρειάζεται να χαρακτηρίσουμε τους συντελεστές ανάκλασης, σκέδασης και περίθλασης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στις THz συχνότητες. Αυτές οι συνιστώσες εξαρτώνται από το υλικό και τη γεωμετρία της επιφάνειας, καθώς και από τη συχνότητα και γωνία πρόσπτωσης του κύματος. Υπάρχουν και άλλες ερευνητικές προτάσεις για τη μοντελοποίηση της μη απευθείας διάδοσης, οι οποίες είναι:

- Ο χαρακτηρισμός των συντελεστών ανάκλασης, σκέδασης και περίθλασης για κοινά υλικά στην μπάντα των THz συχνοτήτων. Οι ιδιότητες των οικοδομικών υλικών έχουν υπολογισθεί έως το 1 THz. Ωστόσο, οι συντελεστές αυτοί για κοινά υλικά που χρησιμοποιούνται στις οραματιζόμενες εφαρμογές (από εσωτερικά περιβάλλοντα μέχρι on-chip επικοινωνίες) πρέπει να μελετηθούν αναλυτικά και να επαληθευτούν με πειραματικές μετρήσεις για όλο το φάσμα των THz.

- Η μελέτη NLOS επικοινωνιών με κατευθυνόμενη ανάκλαση σε διηλεκτρικούς καθρέπτες. Αυτή η μορφή διάδοσης δρα συμπληρωματικά σε περίπτωση που η απευθείας δεν είναι διαθέσιμη. Συγκεκριμένα σε εσωτερικά περιβάλλοντα, η απευθείας διάδοση είναι το πιο πιθανόν μη διαθέσιμη. Αντ' αυτού, η NLOS διάδοση μπορεί να σχεδιαστεί τοποθετώντας στρατηγικά διηλεκτρικούς καθρέπτες ώστε να ανακλούν την ακτίνα προς τον δέκτη. Οι απώλειες διαδρομής που προκύπτουν είναι αποδεκτές εξαιτίας των χαμηλών απωλειών ανάκλασης στους διηλεκτρικούς καθρέπτες.

Με εξαιρετικά μεγάλο εύρος ζώνης, κάθε συχνοτική συνιστώσα του εκπεμπόμενου σήματος υπόκειται διαφορετική εξασθένηση και καθυστέρηση. Αυτό τα φαινόμενα δασποράς συχνότητας, ή αντιστοίχως παραμόρφωσης στον τομέα του χρόνου, δεν εμφανίζονται σε ήδη υπάρχοντα μοντέλα καναλιού πολλαπλών διαδρομών. Έτσι, νέα μοντέλα πολλαπλών διαδρομών πρέπει να αναπτυχθούν για τις THz συχνότητες επικοινωνίας. Μία πιθανή προσέγγιση για να αναλυθεί η διάδοση πολλαπλών διαδρομών είναι η μελέτη μεμονομένων ακτίνων που φτάνουν στο δέκτη, χρησιμοποιώντας τεχνικές ανίχνευσης ακτίνων (ray tracing). Όταν υπάρχει LOS ακτίνα, μόνο η LOS και οι ανακλώμενες ακτίνες χρειάζεται να αναλυθούν για τη μοντελοποίηση καναλιού πολλαπλών ακτίνων. Αντιθέτως, υπό NLOS συνθήκες, τα φαινόμενα σκέδασης πρέπει να ενσωματωθούν στο μοντέλο μαζί με τις ανακλώμενες συνιστώσες. Συγκεκριμένα, υψηλότερο ποσό ενέργειας εμφανίζεται στις σκεδαζόμενες ακτίνες σε σχέση με τις ανακλώμενες, όσο η τραχύτητα της επιφάνειας αυξάνεται. Και στις δύο περιπτώσεις, τα φαινόμενα περίθλασης μπορούν να αγνοηθούν, εκτός μόνο από την περίπτωση που ο δέκτης είναι πολύ κοντά με το προσπίπτον όριο σκίασης.

Εναλλακτικά, εξαιτίας του ότι η μελέτη για το μοντέλο του καναλιού όταν αναφερόμαστε σε μεμονομένα σήματα άφιξης απαιτεί προηγούμενη γνώση της γεωμετρίας του περιβάλλοντος, μπορεί να αναπτυχθεί ένα στατιστικό μοντέλο το οποίο θα χαρακτηρίζει το κανάλι πολλαπλών διαδρομών αποτελεσματικά. Μία ερευνητική πρόκληση είναι να αναλυθούν στοχαστικά οι διάφορες παράμετροι που εξαρτώνται σημαντικά από τη συχνότητα και επηρεάζουν τα λαμβανόμενα σήματα πολλαπλών διαδρομών, οι οποίες μπορεί να περιλαμβάνουν την πιθανότητα παρουσίας LOS διάδοσης, τον αριθμό των υπολογίσιμων NLOS συνιστωσών, καθυστερήσεις διάδοσης και κέρδος διαδρομής. Ακόμα, είναι επίσης σχετικό να συμπεριληφθεί η επίπτωση της κατευθυντικότητας των κεραιών στις απώλειες διαδρομής του καναλιού πολλαπλών διαδρομών.

Υπάρχουν αρκετές πηγές θορύβου στην μπάντα των THz. Από τη μια πλευρά, η πλειονότητα του θορύβου στα κανάλια των THz προέρχεται κυρίως από θόρυβο λόγω μοριακής απορρόφησης. Η απορρόφηση από μόρια του μέσου όχι μόνο εξασθενεί το μεταδιδόμενο σήμα, αλλά εισάγει και θόρυβο. Η ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου στο δέκτη αποφασίζεται από τον αριθμό και την ποσόστωση των μορίων που ανιχνεύονται κατά τη διαδρομή. Ο θόρυβος μοριακής απορρόφησης δεν είναι λευκός. Όντως, εξαιτίας λόγω των διαφορετικών συχνοτήτων ταλάντωσης κάθε τύπου μορίων, η φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου δεν είναι επίπεδη, αλλά έχει αρκετές κορυφές. Ακόμα, αυτός ο τύπος θορύβου εμφανίζεται κυρίως κατά την εκπομπή, το οποίο σημαίνει ότι θα υπάρχει μόνο background noise όταν το κανάλι δεν χρησιμοποιείται. Αυτή η ιδιαιτερότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό νέων διαμορφώσεων και κωδίκων καναλιού. Από την άλλη μεριά, εκτός του πλεονάζοντος θορύβου που δημιουργείται στο κανάλι, μια μεγάλη πηγή θορύβου είναι ο δέκτης. Ο θόρυβος από το δέκτη, ο οποίος συχνά χαρακτηρίζεται από την δείκτη θορύβου (noise figure), εξαρτάται από την τεχνολογία της συσκευής που χρησιμοποιείται. Νέα μοντέλα θορύβου για συσκευές νέας τεχνολογίας από γραφένιο πρέπει να αναπτυχθούν. Προς το παρόν, αντικρουόμενες δηλώσεις για την δείκτη θορύβου του γραφενίου έχουν γίνει. Αφενός, η πολύ υψηλή αντίσταση επαφής των νανο-δομών θεωρούνταν ότι θα έχει ως αποτέλεσμα τον υψηλό θερμικό θόρυβο. Αφετέρου, το γεγονός ότι οι νανο-δομές που έχουν ως βάση το γραφένιο επιτρέπουν την βαλλιστική μεταφορά των ηλεκτρονίων, το οποίο με τη σειρά οδηγεί σε πολύ χαμηλό θερμικό θόρυβο στη συσκευή. Ένα ομοιόμορφο μοντέλο θορύβου για το γραφένιο πρέπει λοιπόν να αναπτυχθεί.

## 2.5 Ατμοσφαιρική Απορρόφηση στα THz

Τα μόρια ενός μέσου διεγείρονται από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα συγκεκριμένων συχνοτήτων στην μπάντα των Terahertz. Ένα διεγερμένο μόριο δονείται εσωτερικά, δηλαδή τα άτομα του εμφανίζουν μια περιοδική κίνηση ενώ το μόριο σαν σύνολο έχει σταθερές μεταφορικές και περιστροφικές κινήσεις. Ως αποτέλεσμα αυτής της δόνησης, μέρος της ενέργειας του διαδιδόμενου κύματος μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια. Από τηλεπικοινωνιακής σκοπιάς, η ενέργεια αυτή χάνεται. Οι συχνότητες ταλάντωσης στις οποίες ένα δεδομένο μόριο αντηχεί μπορεί να βρεθεί λύνοντας την εξίσωση του Schrödinger για τη συγκεκριμένη εσωτερική δομή του μορίου. Η απώλεια αυτή μπορεί να υπολογισθεί χρησιμοποιώντας τον Beer-Lambert law.

Η απορρόφηση από ένα συγκεκριμένο μόριο δεν περιορίζεται σε μία μόνο συχνότητα, αλλά επεκτείνεται σε ένα εύρος συχνοτήτων. Για ένα σύστημα στο οποίο η πίεση είναι πάνω από 0.1 atm, η επέκταση αυτή κυριαρχείται κυρίως από συγκρούσεις μεταξύ των μορίων του ίδιου αερίου. Το μέγεθος της διεύρυνσης εξαρτάται από τα μόρια που εμπλέκονται στις κρούσεις και συνήθως αναφέρεται ως το ημιεύρος Lorentz  $\gamma(p,T)$

## 2.6 Πομπός-Επίγειο Τμήμα

Σε ένα δορυφορικό σύστημα επικοινωνιών τα τρία θεμελιώδη μέρη, που το αποτελούν, είναι το επίγειο τμήμα, το διαστημικό τμήμα και το σύστημα άνω και κάτω ζεύξης ανάμεσα στο επίγειο και το διαστημικό τμήμα. Το επίγειο τμήμα κατασκευάζεται στην επιφάνεια της Γης, ενώ μπορεί να είναι εναέριο ή θαλάσσιο, σταθερό ή κινητό. Το επίγειο τμήμα στοχεύει στην επικοινωνία με έναν ή περισσότερους, επανδρωμένους ή μη, δορυφορικούς σταθμούς ή και στην επικοινωνία με έναν ή περισσότερους επίγειους σταθμούς μέσω της δορυφορικής ζεύξης. Υπάρχουν και περιπτώσεις όπου το επίγειο τμήμα, όσον αφορά τη λειτουργία, είτε μόνο λαμβάνει είτε μόνο εκπέμπει προς το αντίστοιχο δορυφορικό τμήμα.

Τα κύρια υποσυστήματα ενός επίγειου σταθμού περιλαμβάνουν πρωτίστως τον πομπό, η πολυπλοκότητα του οποίου εξαρτάται από τον αριθμό των διαφορετικών συχνοτήτων των φερόντων, καθώς και τον αριθμό των δορυφόρων, που διαχειρίζεται ο ίδιος ο επίγειος σταθμός. Στη συνέχεια ακολουθεί το τμήμα του δέκτη, η πολυπλοκότητα του οποίου εξαρτάται και εδώ από τον αριθμό των συχνοτήτων και των δορυφόρων, τους οποίους διαχειρίζεται ο επίγειος σταθμός, το σύστημα της κεραιοδιάταξης, το οποίο μπορεί να αποτελείται είτε από μία συστοιχία κεραιών (antenna array) είτε από μία μόνο κεραία και το τμήμα ιχνηλάτησης (tracking), που εξασφαλίζει ότι η κεραία του επίγειου σταθμού σκοπεύει προς τον δορυφόρο. Τέλος, υπάρχει το τμήμα παροχής ηλεκτρικής ισχύος, το οποίο είναι πολύ σημαντικό, αφού αποτελεί στην ουσία την πηγή ενέργειας όλων των συστημάτων του επίγειου σταθμού.

Κατά το στάδιο του σχεδιασμού και της μελέτης, ο επίγειος σταθμός απαιτεί συνδυασμό από ένα μεγάλο εύρος αντικειμένων, ξεκινώντας από το βασικότερο, που είναι οι τηλεπικοινωνίες, και φτάνοντας μέχρι και το δομικό κομμάτι για την ανέγερση του σταθμού. Η περιοχή εγκατάστασης επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη δόμηση του επίγειου σταθμού και τα βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της κτιριακής εγκατάστασης, από το κομμάτι της γείωσης, μέχρι και τις αντίστοιχες ηλεκτρικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται. Παράλληλα, κάθε επίγειος σταθμός θα πρέπει να χαρακτηρίζεται και από αυτονομία. Ιδιαίτερα, εάν ο επίγειος σταθμός βρίσκεται σε απομακρυσμένη περιοχή, τότε η αυτόνομη λειτουργία θα πρέπει να εξασφαλίζεται, προτού πραγματοποιηθεί η ηλεκτροδότηση από το δίκτυο στο συγκεκριμένο σημείο. Εξίσου σημαντικό ρόλο στη σχεδίαση διαδραματίζει και ο ανθρώπινος παράγοντας, δηλαδή εάν ο σταθμός κρίνεται απαραίτητο να είναι επανδρωμένος. Στην προκειμένη περίπτωση, τα μέτρα ασφαλείας που θα πρέπει να λαμβάνονται, καθώς και ο σχεδιασμός του σταθμού θα είναι κατά πολύ διαφορετικά από ό,τι στην περίπτωση που ο σταθμός είναι

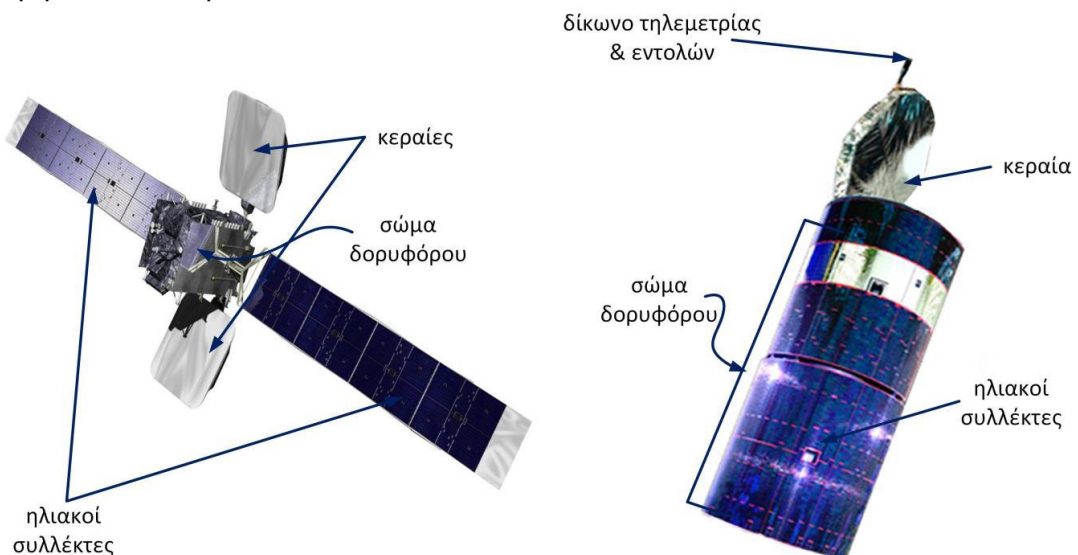




## 2.7 Δέκτης-Δορυφορικό Τμήμα

Το δορυφορικό τμήμα, αποτελείται από διαφορετικά υποσυστήματα, κάθε ένα από τα οποία εκτελεί και μια διαφορετική, αλλά εξίσου σημαντική ενέργεια ή λειτουργία. Στα διαφορετικά υποσυστήματα, περιλαμβάνονται, το υποσύστημα τροφοδοσίας ισχύος, το υποσύστημα ελέγχου, το οποίο περιλαμβάνει λειτουργίες όπως ο θερμικός έλεγχος και ο έλεγχος τροχιάς, το υποσύστημα των αναμεταδοτών για την υποστήριξη των επικοινωνιών, καθώς επίσης και το υποσύστημα τηλεμετρίας, ιχνηλάτησης και εντολών (TT&C), το οποίο είναι υπεύθυνο για τη διατήρηση της τροχιακής θέσης και της ορθής λειτουργίας του δορυφόρου στο διάστημα. Ο διαστημικός εξοπλισμός χωρίζεται σε υποσυστήματα, ανάλογα με τις επιμέρους λειτουργίες του. Το σώμα του δορυφόρου αποτελείται από διαφορετικά συστήματα, κάθε ένα από τα οποία αναλαμβάνει και διαφορετική λειτουργία. Ένα από τα βασικά υποσυστήματα του δορυφόρου αποτελεί το υποσύστημα τροφοδοσίας ισχύος. Η ισχύς χρησιμοποιείται κυρίως από τους πομπούς του δορυφόρου, καθώς και από τα επιμέρους υποσυστήματα για την υποστήριξή του. Το υποσύστημα ελέγχου, αναλαμβάνει όλες τις λειτουργίες ελέγχου που αφορούν το φορτίο, το θερμικό έλεγχο, καθώς και ελέγχους, που αφορούν τη θέση του δορυφόρου, την τροχιά και τη διατήρησή του πάνω σε αυτή (έλεγχος προσανατολισμού). Τέλος, η επικοινωνία του δορυφόρου με τους επίγειους σταθμούς πραγματοποιείται με τη χρήση των μονάδων κεραιών που διαθέτει ο δορυφόρος, οι οποίες λαμβάνουν και εκπέμπουν σε πολύ υψηλές συχνότητες. Οι μονάδες αυτές συγκροτούν το γενικό υποσύστημα των κεραιών. Επίσης, σε αυτό περιλαμβάνονται και οι μονάδες πομποδεκτών που λαμβάνουν, ενισχύουν και αναμεταδίδουν τα εισερχόμενα σήματα, γνωστοί και ως αναμεταδότες (transponders).

Η βασική εξωτερική δομή ενός δορυφορικού συστήματος, φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί. Όπως εύκολα παρατηρεί κανείς, το εξωτερικό μέρος του δορυφόρου αποτελείται από το υποσύστημα κεραιών, τα ηλιακά πάνελς και το εξωτερικό περίβλημα του σώματος του δορυφόρου (body ή satellite housing). Το σχήμα του εξωτερικού περιβλήματος, του βασικού σώματος του δορυφόρου εξαρτάται από το σύστημα, που χρησιμοποιείται για να κρατήσει τον δορυφόρο εντός της τροχιάς, σε ένα σταθεροποιημένο υψόμετρο. Εάν ο δορυφόρος έχει ένα σύστημα σταθεροποίησης τριών αξόνων, το σχήμα του θα είναι ένα ορθογώνιο κουτί με ηλιακούς συλλέκτες, οι οποίοι προεξέχουν από δύο αντίθετες πλευρές. Εάν ο δορυφόρος έχει ένα σύστημα σταθεροποίησης σπιν, το περίβλημα θα είναι κυλινδρικό. Οι ηλιακοί συλλέκτες βρίσκονται εξωτερικά του κυλινδρικού σώματος, και η κεραία, συνδέεται με το υπόλοιπο σώμα του δορυφόρου, χρησιμοποιώντας μια περιστρεφόμενη συσκευή (ρουλεμάν), ώστε να διατηρεί μια σταθερή κατεύθυνση.



Εικόνα 2.7: Εξωτερική Μορφή Δορυφόρου

Οι εξωτερικές κεραιές χρησιμοποιούνται, προκειμένου να είναι δυνατό να υποστηρίζονται οι εξής δύο λειτουργίες: α) η λήψη και η εκπομπή τηλεπικοινωνιακών σημάτων, και β) η παροχή λειτουργιών ελέγχου και ιχνηλάτησης του δορυφόρου (δίκωνο τηλεμετρίας και ανίχνευσης). Τα εύρη συχνοτήτων ορίζονται στις ζώνες C, Ku και Ka. Οι δορυφόροι με μεταδόσεις στη C-ζώνη, χρησιμοποιούν συχνότητες από 4 έως και 8GHz. Για τις ζώνες Ku και Ka, οι συχνότητες επιλέγονται από 11 έως και 17GHz, και από 20 έως 30GHz, αντίστοιχα. Στο δορυφορικό τμήμα υπάρχει η ανάγκη για κεραιές με μικρές διαστάσεις και μεγάλο κέρδος στη λήψη των σημάτων από τη Γη και στη μετάδοση σημάτων προς τη Γη. Για παράδειγμα, κατά τις μεταδόσεις στη C-ζώνη, η διάμετρος της κεραίας μπορεί να φτάσει έως και τα 3 μέτρα.

Όλα τα σήματα και τις καταστάσεις, που προκύπτουν από τις επιδράσεις του εξωτερικού περιβάλλοντος του δορυφόρου, τα επεξεργάζεται το εσωτερικό τμήμα του. Οι απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας έχουν αυξηθεί σε σημαντικό βαθμό τα τελευταία χρόνια. Το φαινόμενο αυτό, οφείλεται στους εξής τρεις βασικούς παράγοντες: α) τα συστήματα εκτόξευσης είναι πολύ ισχυρά και μπορούν να εισάγουν φορτία εντός των τροχιών από 2.000 έως και 5.000kg, β) ο αριθμός των αναμεταδοτών γίνεται όλο και μεγαλύτερος, ενώ παράλληλα οι ενισχυτές σε κάθε αναμεταδότη αυξάνουν την κατανάλωση ενέργειας από τα 10-20Watt στα 60-100Watt, και γ) τα συστήματα γεωστατικής τροχιάς (Geostationary Orbit Systems, GOS), τα οποία χρησιμοποιούνται για υπηρεσίες επικοινωνιών, καθώς και η χρήση υβριδικών δορυφόρων, συχνοτήτων 6/4GHz και 14/12GHz, αυξάνουν τις απαιτήσεις ενέργειας από 1kW σε περίπου 15kW. Τα σύγχρονα συστήματα των 30/20GHz, τα οποία χρησιμοποιούν και μικρότερου μεγέθους κεραιές στους επίγειους σταθμούς βάσης, αυξάνουν επιπλέον τις ενεργειακές απαιτήσεις.

Για παράδειγμα, στην περίπτωση του δορυφόρου Hellas-Sat 2, ο οποίος χρησιμοποιείται για την υποστήριξη υπηρεσιών, όπως Internet, δεδομένων, καθώς και ραδιοτηλεοπτικών υπηρεσιών, έχουμε 30 αναμεταδότες, με εύρος ζώνης 36MHz ο καθένας. Οι αναμεταδότες αυτοί μπορούν να μεταδίδουν ταυτόχρονα, τόσο κατά τις περιόδους έκλειψης όσο και κατά τις περιόδους ηλιοφάνειας. Ο ταυτοχρονισμός στη μετάδοση επιτυγχάνεται με τον κατάλληλο σχεδιασμό των συχνοτήτων, στις οποίες λαμβάνουν τα σήματα τα δύο ζεύγη κεραιών. Αντίστοιχα, έχουμε και δύο διαφορετικούς τύπους δεκτών και μετατροπέων, οι οποίοι λειτουργούν σε διαφορετικά εύρη συχνοτήτων, με διαφορετικές κεντρικές συχνότητες. Ο τύπος 1, χρησιμοποιεί δύο εναλλασσόμενους τοπικούς ταλαντωτές στα 1,244 και 1,5 GHz αντίστοιχα, για τη μετάβαση συχνότητας του σήματος από τη ζώνη συχνοτήτων της άνω ζεύξης (13,75-14 GHz, ή 14-14,25 GHz) στη ζώνη συχνοτήτων της κάτω ζεύξης (12,5-12,75 GHz). Ο τύπος 2 χρησιμοποιεί έναν απλό ταλαντωτή στη συχνότητα των 3,050GHz, για τη μετάβαση από τη ζώνη 14-14,25 GHz (uplink) στη ζώνη 10,95-11,20 GHz. Επίσης, έχουμε και δύο είδη μετατροπέων, που παρέχουν μετάβαση συχνότητας από την άνω ζεύξη ζώνη συχνοτήτων της S<sub>2</sub> (14,25-14,50 GHz) στη ζώνη συχνοτήτων κάτω ζεύξης (11,45-11,70 GHz), με χρήση ενός ταλαντωτή στη συχνότητα των 2,8GHz.

Η ηλεκτρική ενέργεια, που χρησιμοποιείται για τη λειτουργία του δορυφόρου και των υποσυστημάτων του, εξασφαλίζεται μέσω των συστημάτων που αναλαμβάνουν τη συλλογή ηλιακής ενέργειας, τη μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια, όπως επίσης και μέσω των αυτόνομων μονάδων παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι αυτόνομες μονάδες (μπαταρίες) αποθηκεύουν την ενέργεια από τους συλλέκτες. Όταν οι συλλέκτες και οι μετατροπείς διακόψουν τη λειτουργία τους, οι μπαταρίες επιστρέφουν την ενέργεια αυτή στα επιμέρους υποσυστήματα του δορυφόρου. Αυτή η κατάσταση τροφοδοσίας αξιοποιείται κυρίως κατά τις περιόδους εκλείψεων ή κατά το διάστημα, όπου ο δορυφόρος δεν διαθέτει άμεση επαφή με τις ακτίνες του Ήλιου.

### 3. ΜΗΚΗ ΚΥΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΤΑΞΗΣ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΜΕΤΡΩΝ

#### 3.1 Μηχανισμοί Διάδοσης

Τα σημερινά ασύρματα δίκτυα αντιμετωπίζουν πρόβλημα. Περισσότεροι άνθρωποι και συσκευές ανταλλάσσουν περισσότερα δεδομένα από ποτέ, αλλά παραμένουν στις ίδιες ζώνες του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων που χρησιμοποιούνταν πάντα από τους παρόχους κινητής τηλεφωνίας. Αυτό σημαίνει μικρότερο εύρος ζώνης για όλους, προκαλώντας πιο αργή εξυπηρέτηση και περισσότερες πτώσεις σύνδεσης. Ένας τρόπος για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα είναι απλά η μετάδοση σήματος σε μια εντελώς νέα ζώνη συχνοτήτων που δεν έχει χρησιμοποιηθεί ξανά για κινητή υπηρεσία. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι πάροχοι πειραματίζονται με την εκπομπή σε mmWaves, τα οποία χρησιμοποιούν υψηλότερες συχνότητες από τα ραδιοκύματα που χρησιμοποιούνται εδώ και πολύ καιρό για κινητά τηλέφωνα.

Επιπλέον, εφόσον η χωρητικότητα του καναλιού είναι ανάλογη προς το διαθέσιμο εύρος ζώνης και τον λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR), οι ψηλότερες συχνότητες θα προσφέρουν μεγαλύτερη χωρητικότητα καναλιού εξαιτίας του μεγαλύτερου διαθέσιμου εύρους ζώνης. Επομένως, ο επιθυμητός ψηλότερος ρυθμός μετάδοσης θα επιτευχθεί με τη χρήση αυτού του φάσματος. Έτσι με χρήση μιας απλής τεχνικής διαμόρφωσης, όπως η QPSK, μπορεί να επιτευχθεί ρυθμός μετάδοσης 10 Gbps, με εύρος ζώνης 1 GHz, συνδυάζοντας τεχνικές όπως η massive MIMO.

Το ασύρματο κανάλι περιορίζει και καθορίζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την απόδοση ενός ασύρματου Τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Σε αντίθεση με το ενσύρματο κανάλι το οποίο είναι στατικό και προβλέψιμο, το ασύρματο είναι ευμετάβλητο και δύσκολο στην μοντελοποίηση του. Η διάδοση του σήματος ασύρματα από τον πομπό στο δέκτη μπορεί να γίνει είτε ανεμπόδιστα όταν πομπός και δέκτης έχουν οπτική επαφή (Line of Sight, LOS) είτε μέσω κτηρίων ή άλλων εμποδίων του αστικού/υπεραστικού περιβάλλοντος. Ο πομπός στέλνει την πληροφορία μέσω του καναλιού αφού αυτή έχει διαμορφωθεί κατάλληλα ώστε να διαδοθεί στο κανάλι και να φτάσει αξιόπιστα στο δέκτη. Το αρχικό σήμα θα αλλοιωθεί κατά την όδευση του μέσω του καναλιού γι' αυτό και ο δέκτης θα πρέπει να ανακτήσει τη πληροφορία με τη μεγαλύτερη δυνατή πιστότητα. Η διάδοση του κύματος στο ασύρματο κανάλι μπορεί να λάβει χώρα ποικιλοτρόπως αλλά κυρίως μέσω των φυσικών φαινομένων της ανάκλασης, της περίθλασης και της σκέδασης. Τα περισσότερα κυψελωτά συστήματα κινητών επικοινωνιών λειτουργούν σε αστικό περιβάλλον στο οποίο δεν υφίσταται σχεδόν ποτέ οπτική επαφή μεταξύ πομπού – δέκτη.

Στον ελεύθερο χώρο τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται όπως το φως ακολουθώντας μια ευθεία γραμμή από τον πομπό στον δέκτη. Ακόμα και αν δεν υπάρχει ύλη μεταξύ τους, το κύμα εξασθενεί λόγω των απωλειών του ελευθέρου χώρου (free space loss). Στην περίπτωση που υπάρχει ύλη ανάμεσα σε πομπό και δέκτη η ανάλυση είναι πιο σύνθετη. Το κύμα καθώς διαδίδεται συναντά την ατμόσφαιρα, τη βροχή, κλπ τα οποία προκαλούν απώλεια όδευσης (path loss) ή εξασθένηση (attenuation). Σε περιπτώσεις κοντινής απόστασης οι απώλειες είναι μικρής σημασίας σε αντίθεση με την περίπτωση δορυφορικών επικοινωνιών όπου το σήμα οδεύει χιλιόμετρα.

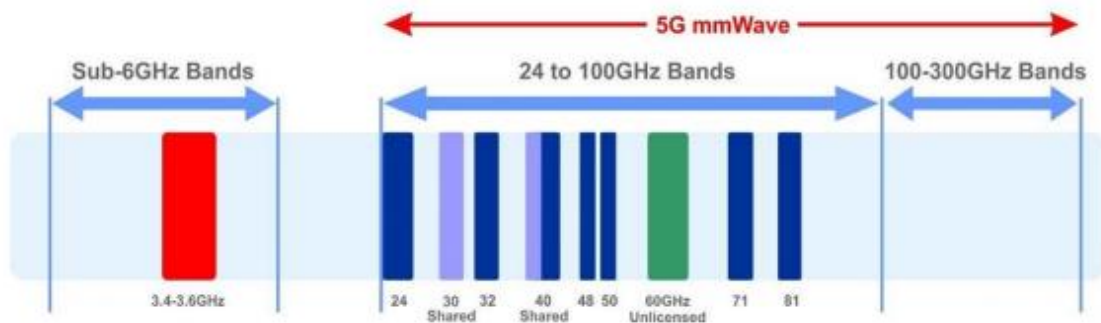
Ενώ το εύρος συχνοτήτων των mmWave είναι από 30 GHz έως 300 GHz, οι συχνότητες άνω των 24GHz είναι κοινώς γνωστές ως 5G mmWave. Έχουν πολύ μεγάλο εύρος ζώνης παρέχοντας εξαιρετικά υψηλή χωρητικότητα και πολύ χαμηλό έως μηδενικό latency.

Η εικονική συχνότητα εκπομπής κυμαίνεται πάνω από τα 40 GHz. Αν και το μήκος κύματος της ζώνης Ka είναι μεταξύ των 8,5 χιλιοστών συχνότητας 35 GHz, η τεχνολογία των radar της ζώνης Ka είναι περισσότερο σαν αυτά των μικροκυμάτων παρά αυτών των χιλιομετρικών κυμάτων και σπάνια θεωρείται ότι είναι αντιπροσωπευτικό της

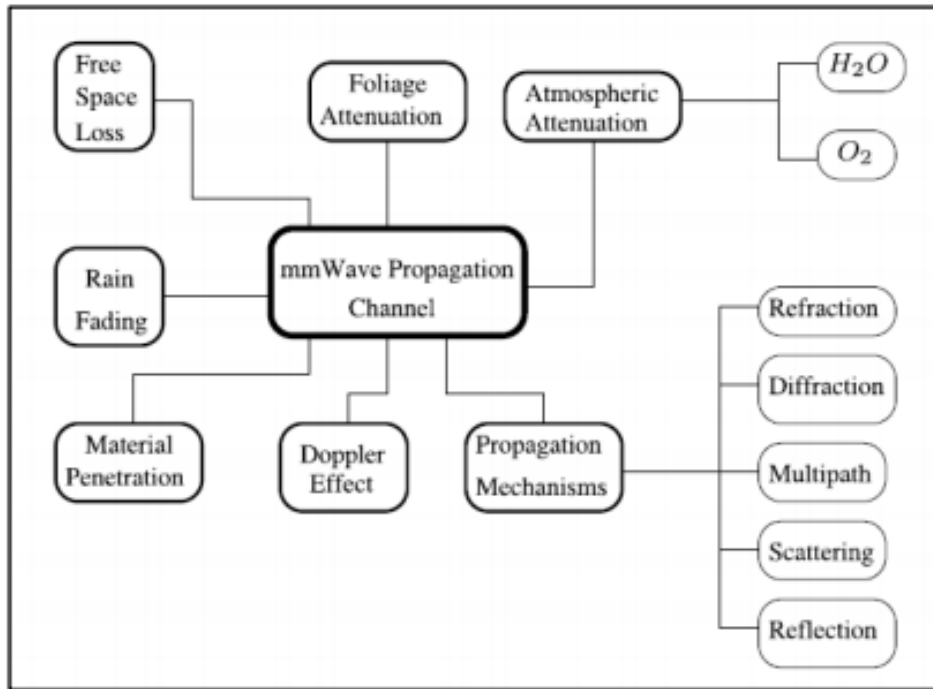
περιοχής των χιλιομετρικών κυμάτων. Τα radar χιλιομετρικών κυμάτων είναι σε μια συχνότητα από 40 έως 300 GHz. Η εξαιρετικά υψηλή εξασθένηση προκαλείται από την ατμοσφαιρική ζώνη απορρόφησης από το οξυγόνο στα 60 GHz εμποδίζει σημαντικές εφαρμογές στην γεινίαση αυτής της συχνότητας μεταξύ της ατμόσφαιρας. Άρα η περιοχή συχνοτήτων των 94 GHz θεωρείται ως η συχνότητα που αντιπροσωπεύει τα χιλιομετρικά radar.

Υπάρχει όμως ένα μεγάλο μειονέκτημα των mmWaves, και αυτό είναι ότι δεν μπορούν εύκολα να ταξιδεύουν μέσα από κτίρια ή εμπόδια και μπορούν να απορροφηθούν από τη βροχή και το φύλλωμα των δέντρων. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο τα δίκτυα 5G θα αυξήσουν πιθανώς τους παραδοσιακούς κυψελοειδείς πύργους με μια άλλη νέα τεχνολογία, που ονομάζεται small cells.

Η περιοχή χιλιομετρικών κυμάτων (mm) πάνω από τα 40 GHz έχει υποδιαιρεθεί σε 2 ζώνες, την V και την W. Αν και εκεί συναντάτε ιδιαίτερο ενδιαφέρον για το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα του χιλιομετρικού κύματος, δεν υπάρχουν λειτουργικά radar πάνω από την ζώνη Ka. Υψηλής ενέργειας δέκτες και χαμηλής απώλειας ζώνες μετάδοσης είναι δύσκολο να πετύχουν σε χιλιομετρικά μήκη κύματος., αλλά δεν είναι βασικά προβλήματα. Ο βασικός λόγος για την περιορισμένη ωφέλεια της ζώνης είναι η υψηλή εξασθένηση που προκαλείται στην ατμόσφαιρα. Αυτή η περιοχή είναι για λειτουργία στο διάστημα, όπου δεν υπάρχει απορρόφηση από την ατμόσφαιρα και για εφαρμογές μικρής απόστασης μεταξύ της ατμόσφαιρας, όπου δεν υπάρχει ολική απορρόφηση.



Σχήμα 3.1 mmWave στα δίκτυα 5ης γενιάς



Σχήμα 3.2 Χαρακτηριστικά διάδοσης mm – Wave κυμάτων

Λόγω της υψηλότερης συχνότητας τα mm – Wave έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά διάδοσης σε σύγκριση με τα μικροκύματα, όπως για παράδειγμα ότι εμφανίζουν μεγαλύτερη εξασθένηση κατά τη διάδοση τους μέσα από υλικά, με αποτέλεσμα μεγαλύτερες απώλειες διάδοσης. Πιο συγκεκριμένα, στη συνέχεια περιγράφονται οι ιδιαιτερότητες που παρουσιάζουν τα mm – Wave κατά τη διάδοσή τους.

- Εξάρτηση από τη συχνότητα Οι απώλειες διάδοσης εξαρτώνται από τη συχνότητα, με αποτέλεσμα στο φάσμα των mmWave να εμφανίζονται μεγάλες απώλειες διάδοσης στον ελεύθερο χώρο από τα πρώτα κίλας μέτρα διάδοσης. Από τη συχνότητα εξαρτώνται και άλλες παράμετροι όπως η κατανομή της καθυστέρησης και η γωνιακή κατανομή. Στο 3GPP TR 38.901 τόσο η κατανομή της καθυστέρησης όσο και η γωνιακή κατανομή δίνονται ως συνάρτηση της συχνότητας για το φάσμα άνω των 6 GHz.

- Εξασθένηση Κατά τη διάδοση, των mmWaves, σε αντίθεση με τα μικροκύματα, πρέπει να ληφθεί υπόψη η εξασθένηση λόγω της βροχής και η ατμοσφαιρική εξασθένηση. Επιπλέον, τα mmWaves είναι πιο ευαίσθητα στον αποκλεισμό της διάδοσης από εμπόδια. Έτσι, η ύπαρξη σταθερών ή κινούμενων αντικειμένων μεταξύ του πομπού και του δέκτη θα μεταβάλλει ιδιαίτερα τα χαρακτηριστικά και θα προκαλεί φαινόμενα σκίασης (shadowing) αλλάζοντας τη χρονική μεταβολή του καναλιού.
- Μεγάλο εύρος ζώνης και μεγάλες στοιχειοκεραίες Προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητοί ρυθμοί μετάδοσης χρειάζεται εύρος ζώνης της τάξης του 1GHz, το οποίο είναι διαθέσιμο στα mm – Waves. Από την άλλη πλευρά όμως, τα μικρά μήκη κύματος οδηγούν σε μεγάλες στοιχειοκεραίες. Έτσι, το μοντέλο καναλιού για αυτές τις συχνότητες θα πρέπει να μπορεί να περιγράψει το πεδίο της χρονικής καθυστέρησης και της κατανομής των γωνιών αποστολής και λήψης. Προκειμένου να επιτευχθεί το παραπάνω, η μετατόπιση της γωνιάς και η σχετική καθυστέρηση θα πρέπει να μοντελοποιηθούν ως μεταβλητές και όχι ως σταθερές. Προτείνονται διάφοροι τύποι κεραιών για τα mm – Waves, όπως ομοιόμορφες γραμμικές στοιχειοκεραίες (ULA), ομοιόμορφες τετράγωνες στοιχειοκεραίες (URA) και ομοιόμορφες κυλινδρικές στοιχειοκεραίες (UCA).

- Χωρική σταθερότητα Η χωρική σταθερότητα ενός καναλιού σημαίνει ότι το σήμα λαμβάνεται χωρίς ασυνέχειες ακόμη και όταν ο πομπός ή ο δέκτης κινούνται και ορίζεται από διάφορους παράγοντες, όπως από μεγάλης ή μικρής κλίμακας παραμέτρους καθυστέρησης, τα AoAs και τα AoDs, τις LOS/NLOS καταστάσεις. Η μελέτη των

περιοχών σταθερότητας παίζει σημαντικό ρόλο τόσο στη μοντελοποίηση όσο και στην πρόβλεψη ενός καναλιού. Μετρήσεις στην περιοχή από 2 μέχρι τα 30 GHz δείχνουν ότι οι περιοχές σταθερότητας στα mmWaves είναι πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες των μικροκυμάτων, ενώ δείχνουν μεγάλη μετάπτωση του σήματος σε μετακίνηση μήκους μερικών δεκάδων μήκους κύματος, η οποία εξαρτάται από την κατεύθυνση της κεραίας και το γύρω περιβάλλον.

- Τυχαίος πλήθος συστάδων (clusters) Ενώ στα μικροκυματικά μοντέλα ο αριθμός των clusters είναι σταθερός, στα mm – Waves το πλήθος των clusters είναι μικρός και τυχαίος και ακολουθεί κατανομή Poisson. Έτσι ανάλογα με τον αριθμό των clusters, αλλάζουν ανάλογα πολλές ιδιότητες του καναλιού, όπως για παράδειγμα η χωρητικότητά του. Υπάρχει τεράστιο απόθεμα φάσματος στη συγκεκριμένη συχνοτική περιοχή, πολλές υποζώνες του οποίου παρουσιάζουν πολύ καλή συμπεριφορά αναφορικά με την ασύρματη διάδοση, επιτυγχάνοντας πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Η σχεδίαση συστημάτων επικοινωνιών με χρήση συχνοτήτων mmWave θα πρέπει να υπερκεράσει το βασικό περιορισμό που επιφέρει στη μετάδοση το πολύ μικρό μήκος κύματος, που είναι η μικρή εμβέλεια. Αυτό μεταξύ άλλων, μπορεί να επιτευχθεί με ανάπτυξη δεκτών υψηλής ευαισθησίας, εκπομπή υψηλής κατευθυντικότητας και χρήση κεραιών υψηλής απολαβής ισχύος. Παρόλα αυτά, το βραχύ μήκος κύματος επιτρέπει σε κεραιές μικρού μεγέθους να επιτύχουν δέσμη εκπομπής πολύ μικρού πλάτους, αυξάνοντας κατά αυτό τον τρόπο τη βέλτιστη χρήση του φάσματος, μέσω της μεγαλύτερης επαναχρησιμοποίησης των συχνοτήτων και της ταυτόχρονης αποφυγής παρεμβολών από γειτονικές εκπομπές σημάτων. Για αυτό το λόγο, η χρήση συχνοτήτων mmWave στις ασύρματες επικοινωνίες αποτελεί αντικείμενο που απασχολεί την ερευνητική κοινότητα, ιδίως για την υλοποίηση των δικτύων 5ης γενιάς. Παρότι, τα συστήματα mmWave θεωρούνται ως ένα ραγδαία εξελισσόμενο πεδίο των δικτύων νέας γενιάς, υπάρχουν πολλές ανησυχίες όσον αφορά τα χαρακτηριστικά διάδοσης των κυμάτων αυτών.

Η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών των Ηνωμένων Πολιτειών (Federal Communications Commission-FCC) έθεσε τα θεμέλια για δοκιμές 5G που αφορούν τη χρήση του φάσματος τον Οκτώβριο του 2014, όταν εξέδωσε μια ειδοποίηση έρευνας (notice of inquiry-NOI) για να διερευνήσει τη χρήση ζωνών κυψέλης άνω των 24 GHz. Κατά τη διαδικασία, η FCC έγινε ο πρώτος ρυθμιστικός φορέας στον κόσμο για να κινήσει επίσημα διαδικασία για φάσμα 5G.

Η FCC τον Ιούλιο του 2016 ανακοίνωσε ότι οι κάτοχοι αδειών χρήσης των συχνοτήτων 28 GHz, 37 GHz και 39 GHz "θα έχουν την ευελιξία να παρέχουν κάθε σταθερή ή κινητή υπηρεσία που είναι συνεπής με την κατανομή του φάσματος τους. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με το πρόσφατο παρελθόν, κατά το οποίο οι κάτοχοι αδειών περιορίστηκαν μόνο σε άδειες ενιαίας χρήσης σε αυτές τις ζώνες. "Αυτές οι τρεις μπάντες βρίσκονται υπό μελέτη για το WRC-19. Η απόφαση του FCC βοήθησε ώστε να παρέχονται πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο για το πώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί το 5G στο χιλιοστομετρικό κύμα (mmWave). Παρόλο που τα συστήματα κυψέλης έχουν παραδοσιακά χρησιμοποιήσει μόνο αδειοδοτημένο φάσμα, μερικές εφαρμογές 5G θα χρησιμοποιήσουν μη αδειοδοτούμενες ζώνες. Αυτό θα μπορούσε να σημαίνει συσσώρευση αδειοδοτημένων και μη αδειοδοτημένων συχνοτήτων ώστε να δημιουργηθεί μια σύνδεση αρκετά γρήγορη για να υποστηρίξει μια εφαρμογή που απαιτεί μεγάλο εύρος ζώνης ή να χρησιμοποιεί μόνο το φάσμα χωρίς άδεια από μόνη της. Η διάθεση μη αδειοδοτημένων ζωνών για κυψελοειδή συστήματα είναι ένα από τα πολλά σημαντικά στοιχεία για την ελάττωση της χρονίας έλλειψης φάσματος. Η ανακοίνωση της προτεινόμενης νομοθεσίας (notice of proposed rulemaking - NPRM) από την FCC τον Οκτώβριο του 2015 περιλαμβάνει τη χρήση της μη αδειοδοτημένης ζώνης 64-71 GHz, ενώ άλλοι οργανισμοί ασχολούνται με ζώνες χωρίς άδεια άνω των 95 GHz. Αυτές οι υψηλές συχνότητες θα μπορούσαν να είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για

οικιακές εφαρμογές, όπως βίντεο και ευρυζωνικές συνδέσεις, διότι μπορούν να παρέχουν υψηλό εύρος ζώνης, ενώ η περιορισμένη εμβέλειά τους μειώνει τον κίνδυνο να παρεμβαίνει το σύστημα ενός νοικοκυριού με εκείνο των γειτόνων του. Αυτό το παράδειγμα δείχνει επίσης πως το 5G σε μη αδειοδοτημένο φάσμα χιλιοστομετρικού κύματος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παροχή υπηρεσιών που προσφέρονται επί του παρόντος μόνο με χαλκό ή ίνες, δίνοντας έτσι στους καταναλωτές περισσότερες επιλογές.

### 3.2 Μοντέλο καναλιού mmWave κυμάτων (mmWave channel model)

Για την κατανόηση των χαρακτηριστικών διάδοσης των ραδιοσυχνοτήτων σε οποιαδήποτε ζώνη συχνοτήτων, είναι απαραίτητο να αναπτυχθεί και το αντίστοιχο μοντέλο καναλιού. Στα mmWave κύματα, η ακριβής μοντελοποίηση καναλιού αποτελεί βασική προϋπόθεση για το σχεδιασμό ενός αποτελεσματικού συστήματος επικοινωνιών που λειτουργεί σε αυτή τη ζώνη συχνοτήτων για την ανάπτυξη νέων τεχνικών οι οποίες να μπορούν να προσαρμοστούν στα χαρακτηριστικά διάδοσης τους.

Σε αυτήν την ενότητα περιγράφεται το μοντέλο καναλιού που χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση στενής ζώνης (narrow – band) και υπέρ ευρυζωνικής (Ultra – Wideband, UWB) mmWave καναλιού. Τα μοντέλα καναλιών ταξινομούνται γενικά σε δύο κατηγορίες, γνωστά ως φυσικά μοντέλα και αναλυτικά μοντέλα. Ένα μοντέλο φυσικού καναλιού κατασκευάζεται με βάση τα ηλεκτρομαγνητικά (EM) χαρακτηριστικά του σήματος που μεταδίδεται μεταξύ των συστοιχιών κεραιών μετάδοσης και λήψης, ενώ ένα μοντέλο αναλυτικού καναλιού περιγράφεται με βάση τη μαθηματική ανάλυση του καναλιού. Εδώ εξετάζονται μόνο τα μοντέλα των φυσικών καναλιών, επειδή μπορούν να αντικατοπτρίζουν αποδοτικά τις μετρούμενες παραμέτρους του καναλιού και είναι επίσης δημοφιλείς για τη μοντελοποίηση MIMO καναλιών. Αντίθετα, τα αναλυτικά μοντέλα, όπως τα μοντέλα καναλιών με βάση τους πίνακες συσχέτισης Kronecker και Weichselberger καθώς και οι πεπερασμένοι σκεδαστές βάσει διάδοσης (propagation-based finite scatterer), η μέγιστη εντροπία και η απεικόνιση εικονικού καναλιού, χαρακτηρίζουν το κανάλι επικοινωνίας μαθηματικά και μπορούν να εξαχθούν από τα φυσικά μοντέλα. Αυτά τα μοντέλα χρησιμοποιούνται καλύτερα για την ανάπτυξη αλγορίθμων και την ανάλυση του συστήματος. τα μοντέλα των φυσικών καναλιών χωρίζονται περαιτέρω σε δύο ομάδες: ντετερμινιστικά και στοχαστικά φυσικά μοντέλα. Τα ντετερμινιστικά μοντέλα απαιτούν λεπτομερείς πληροφορίες για τη δόμηση του περιβάλλοντος το οποίο μοντελοποιούν, το οποίο ισοδυναμεί σε μεγάλο όγκο δεδομένων εισάγοντας έτσι, αυξημένη υπολογιστική πολυπλοκότητα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι τεχνικές ανίχνευσης ακτινών (ray – tracing, RT) για τον χαρακτηρισμό ντετερμινιστικών μοντέλων, όπως είναι και τα μοντέλα καναλιών mmWave. Οι τεχνικές ανίχνευσης ακτινών (RT) υλοποιούνται γενικά χρησιμοποιώντας ένα αυτόνομο πακέτο λογισμικού (stand – alone software package) για να προσομοιώσουν ένα επιθυμητό σενάριο καναλιού, όπου όλα τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά είναι γνωστά και αποθηκευμένα στο σύστημα. Ένα άλλο πλεονέκτημα των ντετερμινιστικών μοντέλων, ειδικά των μοντέλων ανίχνευσης ακτινών, είναι όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις για ένα συγκεκριμένο σενάριο, τα ντετερμινιστικά μοντέλα μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη των χαρακτηριστικών του νέου περιβάλλοντος. Αυτό εξαλείφει το τεράστιο κόστος των μετρήσεων. Στις συχνότητες mmWave, αρκετές μελέτες περιλάμβαναν το μοντέλο ανίχνευσης ακτινών για να προβλέψουν τη συμπεριφορά διάδοσης του καναλιού σε διάφορα σενάρια.

Σε αντίθεση με τα ντετερμινιστικά μοντέλα, τα στοχαστικά μοντέλα εξάγουν την κρουστική απόκριση του καναλιού (impulse response) περιγράφοντας τα χωροχρονικά χαρακτηριστικά των συνιστωσών πολυόδευσης (multipath component, MPC) του καναλιού ως ένα πιθανοτικό μοντέλο που βασίζεται σε εκτεταμένες μετρήσεις που λαμβάνονται σε διαφορετικά σενάρια και περιβάλλοντα. Γενικά, οι συναρτήσεις

πυκνότητας πιθανότητας (PDFs) των παραμέτρων του καναλιού χρησιμοποιούνται τόσο για τον χαρακτηρισμό των διαλείψεων μεγάλης κλίμακας όσο και μικρής κλίμακας. Μερικά παραδείγματα στοχαστικών μοντέλων περιλαμβάνουν το μοντέλο Saleh – Valenzuela (SV) και των επεκτάσεων του (π.χ. μοντέλο Triple – SV, TSV), το 3GPP Χωρικό μοντέλο καναλιού (3GPP Spatial Channel Model) και το μοντέλο Zwick. Όσες περισσότερες παραμέτρους περιλαμβάνει το μοντέλο καναλιού για τον χαρακτηρισμό του καναλιού, τόσο καλύτερη είναι και η ακρίβειά του. Τα στοχαστικά μοντέλα καναλιών θεωρούνται απλά μοντέλα που απαιτούν λιγότερο χρόνο και χαμηλότερη υπολογιστική πολυπλοκότητα. Τα υπάρχοντα μοντέλα καναλιών μπορούν να υιοθετηθούν για τα mmWave μοντέλα καναλιών τροποποιώντας τις βασικές παραμέτρους τους, οι οποίες εξαρτώνται τόσο από τη συχνότητα φέροντος όσο και από τα διαφορετικά περιβάλλοντα (πχ, εσωτερικά, εξωτερικά, αστικά ή αγροτικά σενάρια). Κατά το σχεδιασμό των δικτύων 5G, αρκετά ερευνητικά κέντρα έχουν προτείνει μοντέλα καναλιών για συχνότητες φερόντων που κυμαίνονται από 2 GHz μέχρι 100 GHz.

Ένα άλλο έργο γνωστό ως COMMINDOR διεξήχθη στη Γαλλία με σκοπό την επίτευξη “πολύ υψηλής ταχύτητας” των 155 Mbit/s, στις αρχές της δεκαετίας του 2000, για σενάρια μικρής εμβέλειας οικιστικά συγκροτήματα που λειτουργούν στα 60 GHz. Οι Zhang et al. χρησιμοποίησαν την τεχνική ray – tracing προκειμένου να χαρακτηρίσουν ένα κατευθυντικό κανάλι πολλαπλών διαδρομών στα 60 GHz με βάση ένα σύστημα MIMO  $2 \times 2$ . Το έργο αυτό, μελετήθηκε περαιτέρω από τους Torkildson et al. χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο καναλιού έξι ακτινών για ένα υπαίθριο σενάριο στη ζώνη των 60 GHz. Οι Azzaoui και Clavier εισήγαγαν στο ένα στατιστικό μοντέλο καναλιού για ένα κανάλι ευρείας ζώνης στα 2 GHz. Στις αρχές του 2015, το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιών (European Telecommunications Standards Institute – ETSI) πραγματοποίησε την πρώτη συνεδρίαση της Industry Specification Group (ISG) σχετικά με τη μετάδοση των mmWave κυμάτων, όπου ο κύριος στόχος ήταν η διερεύνηση των ζωνών στα 60 GHz και από 71 έως 86 GHz για back-hauling κίνηση και mobile access. Την ίδια χρονιά, ξεκίνησε το project mmMAGIC στο πλαίσιο της πρωτοβουλίας της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για μια συνεργασία με πολλούς σημαντικούς βιομηχανικούς φορείς. Το πρόγραμμα mmMAGIC διερευνά τις εφαρμογές των mmWaves για τα δίκτυα 5G για την αντιμετώπιση των κυριότερων προκλήσεων των σημερινών κινητών συστημάτων, συμπεριλαμβανομένης της υποστήριξης πυκνών δικτύων με υψηλό βαθμό ευελιξίας και απόδοσης. Οι κύριες προσπάθειες έγιναν κατά τη διάρκεια του 2010 για την απόκτηση γνώσεων σχετικά με την υπο – ζώνη των 100 GHz των mmWaves όπως σηματοδοτήθηκε από την πρωτοβουλία του COST2100. Επιπλέον, μια άλλη πρωτοβουλία του COST που χαρακτηρίζει το mmWave κανάλι είναι η IC1004 Action, η οποία στοχεύει στην αναγνώριση των κύριων χαρακτηριστικών των συχνοτήτων που κυμαίνονται μεταξύ 24 GHz και 86 GHz για συστήματα 5G που λειτουργούν τόσο σε εσωτερικά όσο και σε υπαίθρια σενάρια. Μια άλλη ομάδα γνωστή ως Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων και Τεχνολογίας (National Institute of Standards and Technology – NIST) 5G mmWave Channel Model Alliance ιδρύθηκε για πρώτη φορά στα μέσα του 2015 και στοχεύει, επίσης, στο να χαρακτηρίσει το mmWave κανάλι. Συγκεκριμένα, αυτή η συνεργασία χωρίζεται σε έξι υπο – ομάδες που συμμετέχουν όλες μαζί για το χαρακτηρισμό των mmWave διαύλων διάδοσης για σενάρια εσωτερικών, εξωτερικών και άλλων χώρων. Από την άλλη πλευρά, οι προσπάθειες μοντελοποίησης που αφορούσαν το κανάλι των 28 GHz ξεκίνησαν πολύ νωρίτερα, με στόχο τη χρήση αυτής της ζώνης για δίκτυα κινητών ευρυζωνικών συνδέσεων, όπου οι μετρήσεις που πραγματοποίησαν οι Parazian et al. στη ζώνη 28 GHz στόχευαν στην τοπική πολυ – σημειακή υπηρεσία διανομής (Local Multipoint Distribution Service – LMDS)<sup>2</sup> προτού αποτύχει κατά τη διάρκεια της δημοπρασίας του ραδιοφάσματος. Οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν ένα απλό μοντέλο γραμμής καθυστέρησης (tapped delay line) για τη μίμηση του καναλιού πολλαπλών διαδρομών των 28 GHz. Παρομοίως, ένα άλλο



μοντέλο καναλιού προτάθηκε από τους Xu et al. για απευθείας σύνδεση πομπού και δέκτη (point – to – point) σενάριο που λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων των 38 GHz. Το ίδιο σενάριο επανεξετάστηκε αργότερα από τους Rappaport et al. σε σενάριο peer – to – peer.

### 3.3 mmMAGIC Project

Ο κύριος στόχος του έργου mmMAGIC (mm – wave based Mobile radio Access network for fifth Generation Integrated Communications) είναι να αναπτυχθούν και να σχεδιαστούν νέες ιδέες για την κινητή τεχνολογία ραδιοπρόσβασης (RAT) στις περιοχές συχνοτήτων 6 – 100 GHz. Μία από τις βασικές φιλοδοξίες του mmMAGIC είναι η διεξαγωγή συνολικών μετρήσεων καναλιού και μοντελοποίησης καναλιών. Αντίστοιχα σχέδια και αρχικές εκτιμήσεις παρουσιάζονται σε αυτό το έγγραφο. Συνολικά, πάνω από 60 μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν (μονοσυχνοτικά ισοδύναμες) παρουσιάστηκαν σε ολόκληρη την περιοχή των συχνοτήτων 6-100 GHz. Χρησιμοποιώντας τον τεράστιο όγκο δεδομένων μετρήσεων που συλλέχθηκαν για πολλαπλές υπο – ζώνες και συμπληρώνοντας με τα δεδομένα προσομοίωσης, στόχος ήταν η ανάπτυξη ενός ενιαίου μοντέλου καναλιού σε επίπεδο συστήματος που καλύπτει ολόκληρη την περιοχή συχνοτήτων. Το αρχικό μοντέλο καναλιού βασίστηκε σε πρώιμα διαθέσιμα δεδομένα τον Μάρτιο του 2016. Τον Μάρτιο του 2017, το mmMAGIC εισήγαγε το τελικό μοντέλο που είναι διαθέσιμο ως λογισμικό ανοιχτού κώδικα.

Εκτός από τα σενάρια αστικών μικροκυβελοειδών (UMi) περιοχών (φαράγγι δρόμου, πλατεία), εσωτερικών χώρων (γραφείο, εμπορικό κέντρο, αεροδρόμιο) εξωτερικών – εσωτερικών χώρων (outdoor – to – indoor, O2I), δύο ακόμη σενάρια θεωρούνται ως περιβάλλοντα με πολύ υψηλές πυκνότητες χρηστών, το στάδιο και ο σταθμός του μετρό. Αξίζει να σημειωθεί ότι το σενάριο μακροκυβελοειδούς αστικού περιβάλλοντος (urban macro – cellular, UMa), δεν λαμβάνεται υπόψη δεδομένου ότι το φάσμα συχνοτήτων άνω των 6 GHz αναμένεται να χρησιμοποιηθεί αρχικά για σταθμούς βάσης μικρών κυβελών (BS).

Στο mmMAGIC, διεξήχθησαν περισσότερες από 20 μετρήσεις σε περισσότερες από 8 ζώνες συχνοτήτων από 6 έως 100 GHz, από επτά συνεργάτες του έργου, δηλαδή το Aalto University, CEA-Leti (CEA), Ericsson (EAB), Fraunhofer HHI , Orange (Orange), University of Bristol (UoB) και οι Rohde & Schwarz (R&S). Η διεξαγωγή των μετρήσεων περιελάμβανε ρυθμίσεις ηχοβολιστή καναλιού με πολλαπλές συχνότητες (έως και τέσσερις ζώνες παράλληλα) και υπερευρυζωνική δυνατότητες (έως 4 GHz εύρος ζώνης). Συνολικά προσχεδιάστηκαν περισσότερες από 60 μονο – συχνοτικές ισοδύναμες μετρήσεις. Δύο προσεγγίσεις μετρήσεων εξετάζονται, η μια με τη χρήση καθοδηγούμενων κατευθυντικών κεραιών (steered directional antennas) και η άλλη με τη χρήση πανκατευθυντικών κεραιών. Οι μετρήσεις που διεξήχθησαν συμπληρώθηκαν από προσομοιώσεις βάσει – χάρτη βασιζόμενες σε ιχνηλάτηση ακτινών (ray tracing) και cloud point μοντέλα καθώς και από διαθέσιμα δεδομένα από προηγούμενα έργα. Ο τεράστιος όγκος δεδομένων παρέχει μια σταθερή βάση για τον ακριβή χαρακτηρισμό του καναλιού σε όλο το εύρος των παραμέτρων του χώρου. Τα καθορισμένα χαρακτηριστικά του καναλιού χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των προδιαγραφών μοντελοποίησης, την ανάπτυξη νέων χαρακτηριστικών μοντέλου και την παροχή ενός ενιαίου μοντέλου καναλιών για ολόκληρο το φάσμα των 6 – 100 GHz συμπεριλαμβανομένων των αντίστοιχων πινάκων παραμέτρων. Τα πιο σύγχρονα τρισδιάστατα (3D) στοχαστικά μοντέλα καναλιού βασισμένα στη γεωμετρία (geometry – based stochastic channel models, GSCMs) τα οποία περιλαμβάνουν και μια οιονει ντετερμινιστική μοντελοποίηση, αποτελούν τη βάση ενός προηγμένου μοντέλου καναλιού mmMAGIC. Η 3D προσέγγιση βασισμένη στη γεωμετρία είναι απαραίτητη για τη στήριξη συστοιχιών κεραιάς με μεγάλο αριθμό στοιχείων ή / και μεγάλου μεγέθους, ενώ η στοχαστική προσέγγιση επιλέγεται για να διατηρηθεί η πολυπλοκότητα του μοντέλου

σε αποδεκτό επίπεδο, κάτι που μπορεί να μην ήταν εφικτό με προσεγγίσεις map – based.

Το μοντέλο καναλιού 3GPP – 3D, το στοχαστικό μοντέλο METIS και το QuaDRiGa είναι η εξέλιξη του μοντέλου καναλιού 3D WINNER+ έτσι, μπορούν να χρησιμοποιήσουν το ίδιο σύνολο παραμέτρων για την προσομοίωση καναλιών. Η μοντελοποίηση του mmMAGIC θα βασιστεί σε μεγάλο βαθμό σε αυτά τα 3D GSCMs. Το «κλειδί» για την επιτυχία μοντελοποίησης του mmMAGIC καναλιού ήταν οι εξής: • Προσδιορισμός των απαιτήσεων για 5G μοντέλα καναλιού, καλύπτοντας ένα εύρος συχνοτήτων από 6 έως 100 GHz. • Διεξαγωγή πολυάριθμων πολυσυχνοτικών μετρήσεων μοντέλων καναλιού και συμπληρωματικές προσομοιώσεις με τη μέθοδο ιχνηλάτησης ακτινών μεταξύ 2 και 100 GHz για διάφορα σενάρια διάδοσης των 5G. • Αξιολόγηση των μετρούμενων και προσομοιωμένων δεδομένων με ιδιαίτερη έμφαση στη μοντελοποίηση παραμέτρων μεγάλης κλίμακας που εξαρτώνται από τη συχνότητα, τις επιδράσεις ανάκλασης του εδάφους, τις συστάδες και υποδιαδρομών, τις διαλείψεις μικρής κλίμακας, το φαινόμενο της παρεμπόδισης, τη διείσδυση κτιρίων, τη χωρική συνέπεια, τις ανακλάσεις από την επιφάνεια του εδάφους καθώς και τη διάχυτη σκέδαση. • Διατίθεται ως εφαρμογή ανοιχτού κώδικα του μοντέλου καναλιού ως μέρος της νέας έκδοσης QuaDRiGa (v2.0), συμπεριλαμβανομένου του βασικού μοντέλου mmMAGIC και επιλεγμένων πρόσθετων χαρακτηριστικών.

### 3.4 mmWave Backhaul και Fronthaul

Με τη συνεχή εξέλιξη στην πύκνωση του δικτύου των small cells, πρέπει να αυξηθούν οι απαιτήσεις χωρητικότητας του backhaul (δηλαδή του δικτύου που αφορά τη σύνδεση ενός απομακρυσμένου τόπου ή δικτύου με ένα κεντρικό τόπο) για την αποφυγή της συμφόρησης στο δίκτυο. Ο σχεδιασμός αποτελεσματικών ασύρματων συνδέσεων backhaul για τα μελλοντικά δίκτυα έχει καταστεί ένα δύσκολο έργο και αυτό διότι απαιτεί την πιο αποτελεσματική αξιοποίηση του δικτύου backhaul για τη διευκόλυνση της συγκριτικής αξιολόγησης διαφορετικών πτυχών όπως είναι η κάλυψη, ο ρυθμός διεκπεραίωσης διεργασιών, η καθυστέρηση, η διαθεσιμότητα, η υποστήριξη QoS, η ασφάλεια, κ.λ.π. Στην περίπτωση μιας βασικής χρήσης που χρησιμοποιείται εμπειρία 5G σε στοχευμένα hotspots, ακόμη και αν οι μισοί από τους χρήστες χρειάζονται μόνο 100 Mbps ρυθμό δεδομένων ένα μικρό ποσοστό των χρηστών θα χρειαστεί ρυθμό μετάδοσης δεδομένων έως και 20 Gbps για την υποστήριξη Ultra High Definition (UHD) video85 και 3D υπηρεσιών εικονικής πραγματικότητας και βίντεο, γεγονός που επιβάλλει πρωτοφανείς προκλήσεις στις σημερινές τεχνολογίες backhaul. Εν τω μεταξύ, το κόστος για τη σύνδεση κάθε small cell με το κεντρικό δίκτυο μέσω ενσύρματης σύνδεσης backhaul θα μπορούσε να καταστεί σημαντική και ως εκ τούτου πρακτικά δύσκολη σε ορισμένες plug and play ή ad-hoc ανάπτυξη. Για όλους τους παραπάνω λόγους, θα προτιμώνται ασύρματες λύσεις backhaul που θα είναι και πιο αποδοτικές. Οι ζώνες mmWave μπορούν να υποστηρίξουν πολύ υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων και επιτρέπουν ασύρματες λύσεις backhaul υψηλού ρυθμού. Ασύρματες συνδέσεις backhaul ή fronthaul επιτυγχάνονται σήμερα μέσω σταθερών ζεύξεων σημείου προς σημείο στις διάφορες ζώνες συχνοτήτων έως 86 GHz, αλλά οι τρέχουσες τάσεις φαίνεται να επικεντρώνονται στη ζώνη V (57-66 GHz) και E (71-76 και 81- 86 GHz), όπου είναι διαθέσιμο ένα ευρύ φάσμα πόρων στις περισσότερες περιοχές του κόσμου. Οι εκτεταμένες περιπτώσεις χρήσης επιβάλλουν διάφορες απαιτήσεις σε συνδέσεις backhaul. Στην επέκταση της κάλυψης, μπορεί να χρειαστεί δείγμα ανερχόμενης ζεύξης από Coordinated MultiPoint (CoMP) [68] για την υποστήριξη της κάλυψης, με αποτέλεσμα να πρέπει να δημιουργηθούν πολλαπλοί σύνδεσμοι backhaul. Σε αυτό το πλαίσιο απαιτείται το inband backhaul, που σημαίνει διαμοιρασμό mmWave συχνοτήτων μεταξύ του backhaul και της πρόσβασης. Το inband backhaul μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεταξύ των σταθμών βάσης για συνεργατική επικοινωνία, μειώνοντας

με τον τρόπο αυτό το κόστος και την πολυπλοκότητα της εγκατάστασης backhaul δικτύου. Η φορητότητα (κινητικότητα) που μελετάται για την περίπτωση μετακινούμενου hotspot, εισάγει επιπρόσθετες επιπλοκές στην κοινή χρήση του φάσματος και απαιτεί αυξημένο επίπεδο δυναμικών inband backhaul δικτύων. Με την κεραία να έχει εγκατασταθεί σε ένα κινούμενο όχημα, η δυναμική ρύθμιση backhaul είναι υψίστης σημασίας. Η σχεδίαση ενός backhaul δικτύου που διαθέτει επίγνωση πλαισίου (Context-aware) που χρησιμοποιεί την πληροφορία τοποθεσίας, αποτελεί μια δυναμική λύση για τη βελτίωση της ποιότητας backhaul. Επιπλέον, πρέπει να ληφθούν υπόψη προβλήματα όπως καλύτερες επιλογές συνδέσμων καθώς και δυναμική κατάτμηση του εύρους ζώνης μεταξύ της πρόσβασης RAN και backhaul. Υπάρχουν όμως και άλλες απαιτήσεις, όπως οι αυστηρότερες απαιτήσεις καθυστέρησης στο 5G, οι οποίες επιβάλλουν νέες προκλήσεις σε διάφορους τομείς. Για παράδειγμα, στο uplink CoMP, όπου τα small cells προωθούν το σήμα στις macro cells, όπου όλες οι διενέξεις από πολλαπλά small cells υποβάλλονται σε επεξεργασία από κοινού. Η ολοένα και πιο συμπυκνωμένη ανάπτυξη small cells mmWave για την παροχή υψηλής χωρητικότητας έρχεται με το κόστος μιας πολύ υψηλότερης κατανάλωσης ενέργειας και θα μπορούσε να υπονομεύσει τη βιωσιμότητα και την επεκτασιμότητα του δικτύου. Η κατανάλωση ενέργειας δεν είναι πλέον αμελητέα όπως πριν και μπορεί να αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό ποσοστό της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης των small cells mmWave.

### 3.5 Προκλήσεις mmWave

Αν και στο παρελθόν είχε εξεταστεί η εκδοχή της χρήσης των mmWave ζωνών για τις κινητές επικοινωνίες, εν τέλει απορρίφθηκε και κρίθηκε ακατάλληλη κυρίως λόγω της χαμηλής ποιότητας διάδοσης. Πλέον όμως η ανάγκη για περισσότερους πόρους φάσματος προκειμένου τα δίκτυα της πέμπτης γενιάς να πετύχουν τους στόχους τους, σε χωρητικότητα και ρυθμούς μετάδοσης, επέφερε την αναγκαστική στροφή στις mmWave ζώνες. Έτσι προκύπτει ένα πλήθος προκλήσεων που πρέπει να υπερκεραστούν συμπεριλαμβανομένων του ισχυρού pathloss, της υψηλής κατευθυντικότητας των κυματομορφών, της ατμοσφαιρική σκέδασης, της απορρόφησης από τη βροχή, της χαμηλής περιθλάσης γύρω από τα εμπόδια, της χαμηλής διείσδυσης μέσα από αντικείμενα, και, περαιτέρω, λόγω του ισχυρού θορύβου φάσης και του υπέρογκου κόστους εξοπλισμού. Επιπλέον προκλήσεις προστίθενται λόγω των θεμελιωδών διαφορών μεταξύ των mmWave επικοινωνιών και των ήδη υφιστάμενων συστημάτων επικοινωνίας, που λειτουργούν στη μικροκομματική ζώνη (π.χ., 2.4 GHz και 5 GHz), ενώ υπάρχουν ακόμα πολλές προκλήσεις στο φυσικό επίπεδο (PHY), στο επίπεδο του μέσου ελέγχου πρόσβασης (MAC) και στη δρομολόγηση των στρωμάτων των mmWave επικοινωνιών στα ασύρματα δίκτυα 5G. Για να επιτευχθεί επίσης υψηλή απόδοση του δικτύου, χρειάζεται να υιοθετήσουμε αποτελεσματικούς και αποδοτικούς μηχανισμούς για τη διαχείριση των παρεμβολών, το προγραμματισμό της μετάδοσης, τη διαχείριση της κινητικότητας των χρηστών και την διαμόρφωση του σήματος. Βλέπουμε λοιπόν πως απαιτούνται νέες σκέψεις και ιδέες σε αρχιτεκτονικές και πρωτόκολλα για να αντιμετωπιστούν αυτές οι προκλήσεις. Οι mmWave επικοινωνίες υποφέρουν από τεράστιες απώλειες μετάδοσης, σε σχέση με άλλα συστήματα επικοινωνίας, χρησιμοποιώντας χαμηλότερες συχνότητες φορέα. Η εξασθένηση από τη βροχή, την ατμοσφαιρική σκέδαση και την απορρόφηση περιορίζουν το εύρος τους. Η απώλεια διάδοσης ελεύθερου χώρου είναι ανάλογη με το τετράγωνο της συχνότητας του φέροντος. Βλέπουμε πως με μήκος κύματος περίπου 5 mm, η απώλεια διάδοσης ελεύθερου χώρου στα 60 GHz είναι 28 dB περισσότερα σε σχέση με την ζώνη των 2,4 GHz. Εκτός αυτού, η απορρόφηση από το οξυγόνο στη ζώνη 60 GHz κυμαίνεται από 15 έως 30 dB/km. Η None-line-of-sight (NLOS) επικοινωνία υποφέρει από υψηλότερη εξασθένηση σε σχέση με την line-of-sight (LOS). Επίσης υλικά στον εξωτερικό χώρο, όπως φιμέ τζάμια ή τούβλα προκαλούν πολύ περισσότερες απώλειες σε σχέση με υλικά

εσωτερικού χώρου, όπως απλό τζάμι και γυψοσανίδα, ενώ και η ανθρώπινη δραστηριότητα σε έναν εσωτερικό χώρο συμβάλει στην αύξηση των παρεμβολών. Λόγω της υψηλής συχνότητας του φορέα και του μεγάλου εύρους ζώνης, υπάρχουν αρκετές τεχνικές προκλήσεις στο σχεδιασμό στις κεραίες για τις mmWave επικοινωνίες. Στην ζώνη των 60 GHz, η μετάδοση υψηλής ισχύος και το τεράστιο εύρος ζώνης μπορεί να προκαλέσει σοβαρή μη γραμμική παραμόρφωση των ενισχυτών. Κάποια ακόμα σημαντικά προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα ολοκληρωμένα κυκλώματα είναι ο θόρυβος φάσης. Ωστόσο με την πύκνωση του δικτύου και τα μικρότερα μεγέθη κυψελών που εφαρμόζονται για τη βελτίωση της φασματικής απόδοσης, η εξασθένηση από τη βροχή και την ατμοσφαιρική σκέδαση δεν δημιουργούν σημαντική πρόσθετη απώλεια διαδρομής για μεγέθη κυψελών της τάξεως των 200m. Για την καταπολέμηση των σοβαρών απωλειών διάδοσης και των πολλαπλών διαδρομών (multipath) χρησιμοποιούνται συστοιχίες κατευθυντικών κεραιών κυκλικής πόλωσης και μικρού πλάτους δέσμης που έχουν την δυνατότητα να περιστρέφονται, τόσο στον πομπό όσο και στο δέκτη, με στόχο την επίτευξη ενός υψηλού κέρδους της κεραίας. Πιο συγκεκριμένα γίνεται έλεγχος της φάσης του σήματος που μεταδίδεται από κάθε στοιχείο της κεραίας και στη συνέχεια γίνεται περιστροφή προς την κατεύθυνση του πομπού προκειμένου να επιτευχθεί ένα υψηλό κέρδος προς αυτή την κατεύθυνση, προσφέροντας παράλληλα ένα πολύ χαμηλό κέρδος σε όλες τις υπόλοιπες κατευθύνσεις. Για να κάνουμε τον πομπό και το δέκτη να κατευθύνουν τις κεραίες τους, ο ένας προς τον άλλο είναι απαραίτητοι πολύπλοκοι αλγόριθμοι δέσμης που θα μειώνουν την χρονική διάρκεια αυτής της διαδικασίας. Στην LOS επικοινωνία προτείνεται από την IEEE το πρότυπο 802.11ad, όπου η άμεση διαδρομή περιέχει σχεδόν όλη την ενέργεια και σχεδόν εξαλείφεται το φαινόμενο του multipath. Στην περίπτωση αυτή, το κανάλι μπορεί να θεωρηθεί ως ένα κανάλι με προσθετικό λευκό Gaussian θόρυβο (AWGN). Στην NLOS επικοινωνία δεν υπάρχει άμεση διαδρομή και έτσι ο αριθμός των διαδρομών με σημαντική ενέργεια είναι μικρός. Η επίτευξη υψηλού ρυθμού δεδομένων και η μεγιστοποίηση της απόδοσης ισχύος στις mmWave επικοινωνίες βασίζονται κυρίως στις LOS μετάδοση. Οι παρεμβολές στο δίκτυο μπορούν να διαιρεθούν σε δύο μέρη, τις παρεμβολές από χρήστες του δικτύου που βρίσκονται στην ίδια κυψέλη και τις παρεμβολές από χρήστες που βρίσκονται σε άλλες κυψέλες. Είναι λοιπόν απαραίτητο να εφαρμοστούν μηχανισμοί διαχείρισης παρεμβολών, όπως ο έλεγχος της ισχύος μετάδοσης και ο συντονισμός μετάδοσης, προκειμένου να αποφευχθεί η σημαντική υποβάθμιση της απόδοσης. Με την αποτελεσματική διαχείριση των παρεμβολών, η ταυτόχρονη μετάδοση (spatial reuse) θα πρέπει να υποστηρίζεται τόσο μεταξύ διαφορετικών σταθμών βάσης όσο στο χώρο που εξυπηρετεί ένας σταθμός βάσης.

Η κινητικότητα των χρηστών θέτει επίσης πολλές προκλήσεις στην mmWave επικοινωνία. Κατ' αρχάς η κινητικότητα των χρηστών θα επιβαρύνει με σημαντικές αλλαγές την κατάσταση του καναλιού. Όταν οι χρήστες μετακινούνται, η απόσταση μεταξύ του πομπού (TX) και του δέκτη (RX) ποικίλλει, και η κατάσταση του καναλιού ποικίλλει επίσης αντίστοιχα. Επίσης η χωρητικότητα του καναλιού ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με την απόσταση. Ως εκ τούτου η επιλογή διαφορετικών συστημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (MCS) θα πρέπει να εκτελείται σύμφωνα με την κατάσταση του καναλιού ούτως ώστε να αξιοποιηθεί πλήρως το δυναμικό της mmWave επικοινωνίας. Επιπλέον λόγω των μικρών περιοχών κάλυψης των σταθμών βάσης, ειδικά σε εσωτερικούς χώρους, η κινητικότητα των χρηστών θα προκαλέσει σημαντικές και ταχείες διακυμάνσεις του φόρτου απασχόλησης σε κάθε σταθμό βάσης. Έτσι είναι πολύ σημαντικό να γίνεται έξυπνη αντιστοίχιση των χρηστών με τους σταθμούς βάσης και αποδοτικό handover. Τα υπάρχοντα πρότυπα των mmWave επικοινωνιών, όπως το IEEE 802.11ad και IEEE 802.15.3c, αντιστοιχίζουν τους χρήστες με τους σταθμούς βάσης με γνώμονα την Ένδειξη Έντασης Σήματος (received signal strength indicator -

RSSI) γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αναποτελεσματική χρήση των πόρων. Παρόλο που μια μεγάλη ποικιλία πρωτοκόλλων έχει προταθεί για να βελτιστοποιεί μια συγκεκριμένη εφαρμογή ή μια συγκεκριμένη κατάσταση του καναλιού, είναι απαραίτητο να είναι εφικτή η κατάλληλη και έξυπνη εναλλαγή μεταξύ τους ή ακόμα και ο έξυπνος συνδυασμός τους ανάλογα με την κατάσταση του δικτύου. Ανοικτά προβλήματα είναι ο τρόπος που θα συνδυαστεί έξυπνα το TDMA και το CSMA/CA σε μια ποικιλία εφαρμογών, ο τρόπος που θα επιλεγθεί κάποιο MCS (Modulation and coding scheme) ανάλογα με τις χρονικά μεταβαλλόμενες καταστάσεις του καναλιού. Επιπλέον σημαντικό ρόλο στην απόδοση των δικτύων, θα έχει η απόκτηση πληροφοριών για τις καταστάσεις που βρίσκεται το δίκτυο με αποτελεσματικούς μηχανισμούς μέτρησης. Σε μια από τις ενδεχόμενες εκδοχές χρησιμοποιείται τόσο η μικροκυματική όσο και η mmWave επικοινωνία. Πιο συγκεκριμένα οι διαδικασίες διαχείρισης πραγματοποιούνται στη ζώνη των 2,4 GHz με πανκατευθυντικές κεραίες ενώ οι μεταδόσεις των δεδομένων πραγματοποιούνται στη ζώνη των 60 GHz με κατευθυντικές κεραίες, για να μειωθεί ο χρόνος ανακάλυψης κάποιου γείτονα και η κατανάλωση ενέργειας. Ωστόσο οι περισσότεροι από τους τρέχοντες μηχανισμούς επικεντρώνονται στη μέτρηση πληροφοριών κατάστασης εντός ενός μόνο σταθμού βάσης. Για να επιτύχουμε ομαλό handover και αποτελεσματική διαχείριση των παρεμβολών χρειαζόμαστε και μετρήσεις από περιοχές που έχουν εμβέλεια για παράδειγμα δύο σταθμοί βάσης, Έτσι μπορώντας να μετρήσουμε την παρεμβολή μεταξύ των διαφόρων σταθμών βάσης όσο το δυνατόν ακριβέστερα θα μπορέσουμε να μεγιστοποιήσουμε την ταυτόχρονη μετάδοση μεταξύ διαφορετικών σταθμών βάσης. Όλοι αυτοί οι έλεγχοι στο δίκτυο θα πρέπει να γίνονται σε πραγματικό χρόνο και να ολοκληρώνονται το συντομότερο δυνατόν. Βλέπουμε λοιπόν πως η χρήση αποτελεσματικών μηχανισμών μέτρησης είναι ανοικτό πρόβλημα, το οποίο πρέπει να διερευνηθεί εκτενώς για να διευκολύνει την περαιτέρω ανάπτυξη των συστημάτων επικοινωνίας mmWave στο μέλλον. Τα mmWave συστήματα επικοινωνιών πρέπει να συνυπάρχουν με άλλα συστήματα, όπως το LTE και το WiFi. Η μεγάλη χωρητικότητα που προσφέρουν οι mmWave επικοινωνίες μπορεί να μειώσει την κυκλοφορία από τις μακροκυψέλες και να κάνει εφικτή την παροχή καλύτερων υπηρεσιών διακίνησης των δεδομένων. Από την άλλη πλευρά, τα handover μεταξύ σταθμών βάσης της μακροκυψέλης και των και APs στην mmWave ζώνη εγείρει προβλήματα όπως η εξισορρόπηση του φορτίου κίνησης, η διαχείριση της κινητικότητας και των παρεμβολών. Η αλληλεπίδραση και η συνεργασία μεταξύ των διαφόρων ειδών δικτύων είναι το κλειδί για να διευρυνθούν οι δυνατότητες των ετερογενών δικτύων. Το επίπεδο ολοκλήρωσης μεταξύ τους έχει σημαντικό αντίκτυπο σχετικά με την απόδοση του συστήματος. Έντονη σύζευξη (strong coupling) σημαίνει καλύτερη απόδοση, ενώ η χαλαρή σύζευξη (weak coupling) έχει λιγότερη περιπλοκότητα. Ως εκ τούτου, υπάρχει μια ισορροπία μεταξύ πολυπλοκότητας και απόδοσης σε ετερογενή δίκτυα. Μια ακόμα βασική πρόκληση στις mmWave επικοινωνίες είναι η χρήση στενών δεσμών και η δυσκολία στη δημιουργία συσχετίσεων μεταξύ των χρηστών και σταθμών βάσης, τόσο για την αρχική πρόσβαση όσο και για την απώθηση. Τόσο ο σταθμός βάσης όσο και ο χρήστης μπορεί να χρειαστεί να κάνει σαρώσεις σε διάφορες γωνίες που θα μπορούσε ενδεχομένως να βρεθεί μια στενή δέσμη ή να αναπτύξει μια ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία κωδικοποίησης σε μια πλατιά δέσμη και στην συνέχεια συμπίεσή της σε μια στενή. Η ανάπτυξη λύσεων σε αυτό το πρόβλημα, και ιδιαίτερα στο πλαίσιο της υψηλής κινητικότητας, αποτελεί μια σημαντική ερευνητική πρόκληση.

Για να συμβαδίσουν τα δίκτυα νέας γενιάς με την εκρηκτική αύξηση της ζήτησης έξυπνων συσκευών, εξετάζεται η μαζική πύκνωση των κυψελών προκειμένου να επιτευχθεί 10 000 φορές αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου μέχρι το 2030. Κάθε μακροκυψέλη θα αποτελείται από πολλές μικρότερες, όπως WLAN (wireless local area networks) ή WPAN (wireless personal area networks). Αυτή είναι μια πολλά υποσχόμενη λύση για την ενίσχυση της χωρητικότητας των 5G δικτύων και σε

συνδυασμό με τις mmWave ζώνες, ιδίως των 28 GHz, 38 GHz, 71-76 GHz και 81-86 GHz ενισχύεται κατά πολύ η τοπική πρόσβαση. Με αυτό τον τρόπο θα έχουμε πολλές μικρές κυψέλες με τεράστιο εύρος ζώνης, ικανές να παρέχουν στον χρήστη ρυθμούς πολλών gigabit για εφαρμογές πολυμέσων, όπως υψηλή ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων μεταξύ συσκευών, π.χ. φωτογραφικών μηχανών, laptops, τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας σε πραγματικό χρόνο (HDTV), ασύρματο gigabit Ethernet, ασύρματο gaming και βίντεο υψηλής ευκρίνειας (HD) σε ρυθμούς έως και 3 Gb/s. Επίσης πέρα από την πύκνωση του δικτύου εξακριβώθηκε ότι η χωρητικότητα του μπορεί να βελτιωθεί και από τη χρήση εξελιγμένων και κατευθυντικών κεραιών στην ζώνη των mmWave. Μελέτες έδειξαν πως με τη χρήση αυθαίρετων γωνιών σε κατευθυντικές κεραιές πετυχαίνουμε 20 φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα από ό, τι στα δίκτυα 4G, ενώ υπάρχουν ακόμα περισσότερα περιθώρια βελτίωσης όταν χρησιμοποιηθούν πλήρως κατευθυντικές κεραιές από και προς τα σημεία μετάδοσης και λήψης. Η επικοινωνία μεταξύ συσκευών (D2D) είναι μια πολύ οικονομική λύση, από πλευράς ενέργειας, και προσφέρει μια πολύ καλή ευκαιρία για την αύξηση της φασματικής αποδοτικότητας των κυψελών. Τα δίκτυα μπορούν να αξιοποιήσουν αυτή την ευκαιρία και να χρησιμοποιήσουν τις D2D επικοινωνίες στις ζώνες των mmWave, επιτρέποντας σε κάθε συσκευή να βρίσκει και να επικοινωνεί με κάποια κοντινή της δίνοντας έτσι στο χρήστη τη δυνατότητα μέσα από αυτή την επικοινωνία να κάνει χρήση εφαρμογών ακόμα και ευαίσθητου περιεχομένου. Σε ένα τόσο πυκνό δίκτυο, η σύνδεση των σταθμών βάσεων μεταξύ τους με τη χρήση οπτικών ινών βασισμένων στο backhaul είναι αρκετά δαπανηρή. Κάπου εδώ έρχονται τα mmWave για να δώσουν λύση. Στις ζώνες των 60 GHz (V-band) και E-band (71-76 GHz και 81-86 GHz) μπορεί να επιτευχθεί υψηλής ταχύτητας ασύρματο backhaul, πιο αποδοτικό, ευέλικτο και πιο εφαρμόσιμο.

#### **4. ΕΠΙΛΟΓΗ ΖΩΝΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ**

Συνοψίζοντας θα μπορούσαμε να αναφέρουμε ότι οι συχνότητες άνω των 30GHz δεν χρησιμοποιούνται παρά μόνο για πειραματικούς σκοπούς λόγω του φαινομένου της εξασθένισης λόγω της βροχής και της ατμοσφαιρικής απορρόφησης που ολοένα και επιδρά αρνητικά στο εκπεμπόμενο σήμα όσο η συχνότητα αυξάνεται. Έτσι οι ζώνες Q-Band, V-Band και W-Band που θεωρητικά υπάρχουν ακόμα μελετούνται και προσπαθούν να βρεθούν βελτιώσεις ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

Ωστόσο η επιλογή της ζώνης γίνεται ανάλογα την εφαρμογή και τον όγκο δεδομένων που χρειάζεται για την σωστή λειτουργία της. Όσο μεγαλύτερο όγκο χρειαζόμαστε, καταφεύγουμε σε μεγαλύτερο τηλεπικοινωνιακό κανάλι (απόσταση) και σε υψηλότερη συχνότητα. Επίσης γίνεται λεπτομερής εξέταση των αρνητικών επιπτώσεων που υφίσταται σε κάθε ζώνη λόγω της βροχής και τους χρόνους καθυστέρησης που έχει η κάθε μία ανάλογα τον αστερισμό που χρησιμοποιεί και το είδος της τροχιάς. Άρα ένας παράγοντας είναι και το κλίμα που έχει η κάθε περιοχή. Συνυπολογίζοντας το κόστος και το μέγεθος του εξοπλισμού, τις χρεώσεις και όλες τις παραπάνω παραμέτρους θα είμαστε σε θέση να επιλέξουμε την σωστότερη ζώνη για την προς λειτουργία εφαρμογή μας.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Ippolito, L. J. (2008). *Satellite Communications Systems Engineering: Atmospheric Effects, Satellite Link Design and System Performance*. UK: John Wiley & Sons Ltd.
- [2] Maini, A. K. & Agrawal, V. (2011). *Satellite Technology: Principles and Applications (3rd Edition)*. UK: John Wiley & Sons Ltd.
- [3] Maral, G. & Bousquet, M. (2012). *Δορυφορικές Επικοινωνίες: Συστήματα Τεχνικές και Τεχνολογία (5η Έκδοση)*. Θεσσαλονίκη: Εκδ. Τζιόλα.
- [4] Pratt, T., Bostian, C. & Allnutt, J. (2003). *Δορυφορικές Επικοινωνίες (2 η Έκδοση)*. Αθήνα: Εκδ. Παπασωτηρίου.
- [5] Roddy, D. (2006). *Satellite Communications (4th Edition)*. USA: McGraw-Hill.
- [6] Κωπτής, Π. & Καψάλης, Χ. (2012). *Δορυφορικές Επικοινωνίες (3η Έκδοση)*. Θεσσαλονίκη: Εκδ. Τζιόλα.
- [7] F. Khan and Z. Pi, "mmWave mobile broadband (MMB): Unleashing the 3- 300 GHz spectrum," in *Sarnoff Symposium, 2011 34th IEEE*, May 2011.
- [8] Mustafa Riza Akdeniz, Yuanpeng Liu, Mathew K. Samimi, Shu Sun, Sundeep Rangan, Theodore S. Rappaport, Elza Erkip, "Millimeter Wave Channel Modeling and Cellular Capacity Evaluation", Dec. 2013. Available: <https://arxiv.org/abs/1312.4921>
- [9] P. Kyösti, J. Meinilä, L. Hentilä, X. Zhao, T. Jämsä, C. Schneider, M. Narandzić, M. Milojević, A. Hong, J. Ylitalo, V.-M. Holappa, M. Alatossava, R. Bultitude, Y. de Jong, and T. Rautiainen, "WINNER II Channel Models", Sept. 2007. Available: <https://www.cept.org/files/8339/winner2%20-%20final%20report.pdf>
- [10] M. Reil, G. Lloyd, "Millimeter-Wave Beamforming: Antenna Array Design Choices & Characterization", October 2016, White Paper. Available: [https://www.rohde-schwarz.com/gr/applications/millimeter-wavebeamforming-antenna-array-design-choices-characterization-whitepaper\\_230854-325249.html](https://www.rohde-schwarz.com/gr/applications/millimeter-wavebeamforming-antenna-array-design-choices-characterization-whitepaper_230854-325249.html)
- [11] X. Gu et al., "W-Band Scalable Phased Arrays for Imaging and Communications," *IEEE* 53, April 2015.
- [12] "Further advancements for E-UTRA physical layer aspects," SophiaAntipolis, France, ETSI, TR 136 913 V9.0.0 (2010-02).
- [13] M.2134: Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s)," Geneva, Switzerland, Tech. Rep., 2009. Available: <https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2134-2008/en>
- [14] M. Jankiraman, *Space-time Codes and MIMO Systems*, ser. Artech House universal personal communications series. Artech House, 2004. Available: <https://books.google.it/books?id=HU-T7y16AGEC>
- [15] W. Roh, J. Y. Seol, J. Park, B. Lee, J. Lee, Y. Kim, J. Cho, K. Cheun, and F. Aryanfar, "Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: theoretical feasibility and prototype results," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 106–113, February 2014.



- [16] T. Bai, A. Alkhateeb, and R. W. Heath, "Coverage and capacity of millimeterwave cellular networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 9, pp. 70–77, September 2014.
- [17] T. Bai and R. W. Heath, "Coverage and Rate Analysis for Millimeter-Wave Cellular Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 2, pp. 1100–1114, Feb 2015.
- [18] M. D. Renzo, "Stochastic Geometry Modeling and Analysis of Multi-Tier Millimeter Wave Cellular Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 9, pp. 5038–5057, Sept 2015.
- [19] J. Park, S. L. Kim, and J. Zander, "Tractable Resource Management With Uplink Decoupled Millimeter-Wave Overlay in Ultra-Dense Cellular Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 6, pp. 4362–4379, June 2016.
- [20] M. D. Renzo, A. Guidotti, and G. E. Corazza, "Average Rate of Downlink Heterogeneous Cellular Networks over Generalized Fading Channels: A Stochastic Geometry Approach," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 61, no. 7, pp. 3050–3071, July 2013.
- [21] A. Adhikary et al., "Joint spatial division and multiplexing for mmWave channels," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 6, pp. 1239–1255, June 2014.
- [22] O. E. Ayach et al., "Spatially sparse precoding in millimeter wave MIMO systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 3, pp. 1499–1513, March 2014.
- [23] Ibrahim A. Hemadeh, Katla Satyanarayana, Mohammed El-Hajjar, and Lajos Hanzo, "Millimeter-Wave Communications: Physical Channel Models, Design Considerations, Antenna Constructions, and Link-Budget", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 20, No. 2, Second Quarter 2018, Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8207426>
- [24] P. Almers, "Survey of channel and radio propagation models for wireless MIMO systems," *EURASIP J. Wireless Commun. Netw.*, vol. 2007, no. 1, Feb. 2007, Art. no. 19070. Available: <https://www.eurecom.fr/publication/2162>
- [25] H. Zhang, S. Venkateswaran, and U. Madhow, "Channel modeling and MIMO capacity for outdoor millimeter wave links," in *Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. (WCNC)*, Sydney, NSW, Australia, Apr. 2010, pp. 1–6.
- [26] E. Torkildson, H. Zhang, and U. Madhow, "Channel modeling for millimeter wave MIMO," in *Proc. Inf. Theory Appl. Workshop (ITA)*, San Diego, CA, USA, Jan. 2010, pp. 1–8.
- [27] N. Azaoui and L. Clavier, "Statistical channel model based on a stable random processes and application to the 60 GHz ultra wide band channel," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 58, no. 5, pp. 1457–1467, May 2010.
- [28] L. Liu et al., "The COST 2100 MIMO channel model," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 19, no. 6, pp. 92–99, Dec. 2012.
- [29] COST, COST IC1004 White Paper on Channel Measurements and Modeling for 5G Networks in the Frequency Bands Above 6 GHz. Cisco, San Jose, CA, USA, Apr. 2016. Available: <http://www.ic1004.org/>
- [30] 5G mmWave Channel Model Alliance, NIST, Gaithersburg, MD, USA, Jul. 2015. Available: <https://www.nist.gov/ctl/5g-mmwave-channel-modelalliance>

- [31] P. B. Papazian, G. A. Hufford, R. J. Achatz, and R. Hoffman, "Study of the local multipoint distribution service radio channel," *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 43, no. 2, pp. 175–184, Jun. 1997.
- [32] H. Xu, T. S. Rappaport, R. J. Boyle, and J. H. Schaffner, "Measurements and models for 38-GHz point-to-multipoint radiowave propagation," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 18, no. 3, pp. 310–321, Mar. 2000.
- [33] S. Ju, and T. S. Rappaport, "Millimeter-wave Extended NYUSIM Channel Model for Spatial Consistency," 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Abu Dhabi, UAE, Dec. 2018, pp. 1-6. Available: <https://arxiv.org/pdf/1808.07099.pdf>
- [34] mmMAGIC. (Apr. 2016). "Architectural aspects of mm-wave radio access integration with 5G ecosystem," European Commission H2020.
- [35] M. Nekovee *et al.*, "Millimetre-Wave Based Mobile Radio Access Network for Fifth Generation Integrated Communications (mmMAGIC)," *Deliv. D5.1*.
- [36] Y. Niu, Y. Li, D. Jin, L. Su, and A. V. Vasilakos, "A Survey of Millimeter Wave (mmWave) Communications for 5G: Opportunities and Challenges," 2015.
- [37] P. Fernandes, "Context aware," 2011. [Online]. Available: <http://studentguru.gr/b/biboudis/archive/2009/01/16/context-aware>.
- [38] J. G. Andrews *et al.*, "What Will {5G} Be?," *IEEE jsac Spec. issue 5g Wirel. Commun. Syst.*, vol. 32, no. 6, pp. 1065–1082, 2014.
- [39] J. Zhu *et al.*, "First Demonstration of a WDM-PON System Using Full C-band Tunable SFP+ Transceiver Modules [Invited]," in *Journal of Optical Communications and Networking*, 2015, vol. 7, no. 1, p. A28.