



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Η Εξέλιξη των Δορυφορικών Επικοινωνιών: 5G και Νέες
Τεχνολογίες**

**Συγγραφέας: Μελέτιος Κουτσοδήμος
Ice18390168**

Επιβλέπων Καθηγητής: Νικόλαος Μυριδάκης

Αθήνα, Ιούλιος 2025

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Η Εξέλιξη των Δορυφορικών Επικοινωνιών: 5G και Νέες Τεχνολογίες

Μελέτιος Κουτσοδήμος
ice18390168

Εισηγητής: Νικόλαος Μυριδάκης

Εξεταστική Επιτροπή:

| A/a | ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ | ΒΑΘΜΙΔΑ | ΥΠΟΓΡΑΦΗ |
|-----|--------------------------|-----------------------|----------|
| 1 | Νικόλαος Μυριδάκης | Αναπληρωτής Καθηγητής | |
| 2 | Κωνσταντίνος Μαυρομμάτης | Λέκτορας | |
| 3 | Παναγιώτης Καρκαζής | Αναπληρωτής Καθηγητής | |

Ημερομηνία εξέτασης: 07/24/2025

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος **Κουτσοδήμος Μελέτιος** του **Ιωάννη**, με αριθμό μητρώου **18390168** φοιτητής του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Υπολογιστών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

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

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

Ο Δηλών


Κουτσοδήμος Μελέτιος

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον καθηγητή μου κύριο Νικόλαο Μυριδάκη για την άψογη συνεργασία και υποστήριξη στην προσπάθειά μου κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Με εμπιστεύτηκε με το παρών θέμα, με στήριξε με υπομονή και ήταν πάντα πρόθυμος να μου λύσει κάθε απορία. Με βοήθησε να κατανοήσω καλύτερα το θέμα και ελπίζω με την πρώτη ευκαιρία να ξανά συνεργαστούμε στο μέλλον.

Η παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώθηκε μετά από επίμονες προσπάθειες και δυσκολίες. Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές μου για την υποστήριξη και βοήθεια που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια κάθε εξαμήνου, πάντα με προθυμία να μοιραστούν την γνώση και πληροφορίες τους.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη συμπαράσταση κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Η αμέριστη στήριξή τους με βοήθησε να προχωρήσω και να ολοκληρώσω τις σπουδές μου ακόμα και σε πολύ δύσκολες συνθήκες.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εμβαθύνει στην εξέλιξη των δορυφορικών επικοινωνιών στο πλαίσιο της ανάπτυξης των τηλεπικοινωνιών, επικεντρώνοντας στα δίκτυα 5G και πέρα. Με την αυξανόμενη ζήτηση για υψηλές ταχύτητες μετάδοσης και μειωμένο χρόνο καθυστέρησης, η δορυφορική τεχνολογία διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην κάλυψη αυτών των απαιτήσεων. Στόχος της εργασίας είναι η κατανόηση και η έρευνα του τρόπου ενσωμάτωσης των μη επίγειων στα συστήματα 5G και Beyond 5G, καθώς και η εξέταση των προκλήσεων που ακολουθούν. Αρχικά, στο πρώτο και εισαγωγικό κεφάλαιο παρουσιάζεται μια ιστορική αναδρομή της εξέλιξης των τηλεπικοινωνιών από τα δίκτυα 0G έως τα 5G και 5G Beyond. Στο δεύτερο κεφάλαιο εστιάζουμε σε μία ολοκληρωμένη ανάλυση των δορυφορικών συστημάτων, των τύπων δορυφόρων (LEO, MEO, GEO), των φασματικών περιοχών που χρησιμοποιούνται, καθώς και σύγχρονων υλοποιήσεων όπως τα Starlink, Iridium και OneWeb. Στο τρίτο κεφάλαιο, επικεντρωνόμαστε στις νέες και προηγμένες τεχνολογίες που επιτρέπουν την ενσωμάτωση δικτύων 5G και δορυφορικών επικοινωνιών. Μελετώνται τεχνολογίες, όπως οι οπτικοί σύνδεσμοι επικοινωνίας, δια-δορυφορικές συνδέσεις (ISL), η χρήση NB-IoT σε δορυφορικό περιβάλλον και οι προηγμένες αρχιτεκτονικές δορυφόρων. Το τέταρτο κεφάλαιο εισάγει το δορυφορικό σενάριο με τη θεωρητική θεμελίωση και τις εξισώσεις που θα χρησιμοποιηθούν στο επόμενο κεφάλαιο. Στο πέμπτο κεφάλαιο προσομοιώνεται ένα δορυφορικό σενάριο στο MATLAB, ξεκινώντας με ένα σενάριο ραδιοζεύξης και την ανάλυση του link budget. Ακολουθεί σύγκριση μεταξύ ραδιοζεύξης και οπτικής ζεύξης, μελέτη του NB-IoT σε περιβάλλον NTN και ανάλυση του φαινομένου Doppler και πως μπορεί να αντιμετωπιστεί. Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο, συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα της μελέτης και γίνονται προτάσεις για μελλοντικές κατευθύνσεις στην εξέλιξη των δορυφορικών επικοινωνιών σε Beyond 5G και 6G.

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Δορυφορικές Επικοινωνίες.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Μη Επίγεια Δίκτυα, Doppler, Starlink, 5G Beyond, ISL, MATLAB.

ABSTRACT

This thesis delves into the evolution of satellite communications in the context of telecommunications development, focusing on 5G networks and beyond. With the increasing demand for high transmission speeds and reduced latency, satellite technology plays a critical role in meeting these requirements. The aim of the thesis is to understand and investigate how non-terrestrials are integrated into 5G and Beyond 5G systems, as well as to examine the challenges that follow. Initially, the first and introductory chapter presents a historical review of the evolution of telecommunications from 0G networks to 5G and 5G Beyond. In the second chapter, we focus on a comprehensive analysis of satellite systems, the types of satellites (LEO, MEO, GEO), the spectral regions used, as well as modern implementations such as Starlink, Iridium and OneWeb. In the third chapter, we focus on new and advanced technologies that enable the integration of 5G networks and satellite communications. Technologies such as optical communication links, inter-satellite links (ISLs), the use of NB-IoT in a satellite environment and advanced satellite architectures are studied. The fourth chapter introduces the satellite scenario with the theoretical foundation and equations that will be used in the next chapter. In the fifth chapter, a satellite scenario is simulated in MATLAB, starting with a radio link scenario and the analysis of the link budget. This is followed by a comparison between radio link and optical link, a study of NB-IoT in an NTN environment and an analysis of the Doppler effect and how it can be addressed. Finally, in the sixth chapter, the main conclusions of the study are summarized, and suggestions are made for future directions in the evolution of satellite communications beyond 5G and 6G.

SCIENTIFIC FIELD: Satellite Communications.

KEYWORDS: Non Terrestrial Networks, Doppler, Starlink, 5G Beyond, ISL, MATLAB.

Πίνακας Περιεχομένων

| | |
|---|----|
| ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ | 5 |
| ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ | 7 |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | 9 |
| Πίνακας Περιεχομένων | 13 |
| Κατάλογος Εικόνων | 16 |
| Κατάλογος Πινάκων..... | 17 |
| Συντομογραφίες..... | 18 |
| Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή..... | 23 |
| 1.1 Μηδενική Γενιά (0G) | 23 |
| 1.2 Πρώτη Γενιά (1G) | 24 |
| 1.3 Δεύτερη Γενιά (2G)..... | 26 |
| 1.4 Τρίτη Γενιά (3G) | 28 |
| 1.5 Τέταρτη Γενιά (4G)..... | 30 |
| 1.6 Πέμπτη Γενιά (5G) | 33 |
| 1.7 Πέρα της Πέμπτης Γενιάς (Beyond 5G)..... | 36 |
| 1.8 Στόχος Εργασίας..... | 36 |
| Κεφάλαιο 2: Δορυφορικά Συστήματα..... | 37 |
| 2.1 Η Έννοια του Δορυφόρου | 37 |
| 2.2 Ιστορική Αναδρομή..... | 39 |
| 2.3 Τροχιές Δορυφόρων | 42 |
| 2.3.1 Χαμηλή περί της Γης Τροχιά (LEO) | 43 |
| 2.3.2 Μεσαία περί της Γης Τροχιά (MEO)..... | 46 |
| 2.3.3 Γεωσύγχρονη Τροχιά (GEO)..... | 48 |
| 2.3.4 Συγκρίσεις και Συμπεράσματα για τις Τρεις Τροχιές Δορυφόρων | 51 |
| 2.4 Ζώνες Συχνοτήτων για Δορυφορικές Επικοινωνίες..... | 53 |
| 2.5 Τηλεπικοινωνιακοί Δορυφόροι | 55 |
| 2.5.1 Vsat..... | 55 |

| | |
|--|----|
| 2.5.2 Inmarsat..... | 56 |
| 2.5.3 Iridium..... | 57 |
| 2.5.4 Thuraya..... | 58 |
| 2.5.5 OneWeb..... | 59 |
| 2.5.6 Starlink | 60 |
| Κεφάλαιο 3: 5G και Μη Επίγεια Δίκτυα (NTN)..... | 63 |
| 3.1 Εισαγωγή και Χρήσεις | 63 |
| 3.2 Αρχιτεκτονική και Υποδομή | 65 |
| 3.2.1. Διαφανής Αρχιτεκτονική (Transparent/Bent - Pipe) | 65 |
| 3.3.2. Αναγεννητική Αρχιτεκτονική (Regenerative) | 66 |
| 3.4 Τεχνικές Διαχωρισμού Ζεύξης στις Δορυφορικές Επικοινωνίες | 69 |
| 3.5 Τεχνολογίες Συνδέσμων: Οπτικοί και Ραδιοσυχνότητες | 70 |
| 3.6 Εφαρμογή NB-IoT σε Μη Επίγεια 5G Δίκτυα..... | 71 |
| Κεφάλαιο 4: Εισαγωγή στο Δορυφορικό Σενάριο | 71 |
| 4.1 Περιθώριο Συνδέσμου σε Οπτικές Επικοινωνίες..... | 72 |
| 4.2 Προϋπολογισμός Ζεύξης Οπτικής Σύνδεσης Μεταξύ Δορυφόρων (ISL)..... | 72 |
| 4.3 Προϋπολογισμός Ζεύξης Ανερχόμενης και Κατερχόμενης Σύνδεσης..... | 74 |
| 4.4 Εξασθένιση Σήματος σε Ανερχόμενη και Κατερχόμενη Σύνδεση..... | 75 |
| 4.5 Λόγος Σήματος προς Θόρυβο (CNR) και Θεωρητική Τιμή Αναφοράς (Reference CNR) | 76 |
| 4.5.1 Τιμή Αναφοράς CNR (Reference CNR) | 76 |
| 4.5.2 Λόγος Σήματος προς Θόρυβο (CNR)..... | 78 |
| 4.6 Φαινόμενο Doppler | 80 |
| Κεφάλαιο 5: Προσομοίωση και Ανάλυση Δορυφορικού Σεναρίου στο MATLAB | 82 |
| 5.1 Μοντελοποίηση Αστερισμού Starlink στο MATLAB | 82 |
| 5.2 Ανάλυση Δορυφορικής Επικοινωνίας Ραδιοσυχνότητων | 85 |
| 5.2.1 Ανάλυση Ανερχόμενης Ζεύξης στο Satellite Link Budget Analyzer App..... | 89 |
| 5.2.2 Ανάλυση Κατερχόμενης Ζεύξης στο Satellite Link Budget Analyzer App..... | 90 |
| 5.2.3 Περιθώριο Συνδέσμου Επί του Χρόνου | 91 |

| | |
|---|-----|
| 5.3 Ανάλυση Οπτικής Δορυφορικής Επικοινωνίας..... | 92 |
| 5.3.1 Υπολογισμός Περιθωρίου Συνδέσμου Οπτικής Επικοινωνίας ISL..... | 93 |
| 5.3.2 Υπολογισμός Περιθωρίου Συνδέσμου Οπτικής Επικοινωνίας Ανερχόμενης και Κατερχόμενης Ζεύξης | 94 |
| 5.3.3 Αποτελέσματα και Παρατηρήσεις..... | 95 |
| 5.4 Ανάλυση Ζεύξης NB-IoT NTN..... | 97 |
| 5.4.1 Υπολογισμός Αναφερόμενου CNR..... | 98 |
| 5.4.2 Υπολογισμός CNR | 99 |
| 5.4.3 Υπολογισμός Περιθωρίου Συνδέσμου και Επαναλήψεων NB-IoT..... | 99 |
| 5.4.4 Αποτελέσματα και Παρατηρήσεις..... | 100 |
| 5.5 Ανάλυση Doppler Shift | 102 |
| Κεφάλαιο 6: Μελλοντικές Προεκτάσεις και Συμπεράσματα | 105 |
| Παράρτημα Α' | 108 |
| Παράρτημα Β' | 120 |
| Βιβλιογραφία..... | 121 |

Κατάλογος Εικόνων

| | |
|---|----|
| Εικόνα 1: Ο πρώτος τεχνητός δορυφόρος Sputnik 1 [71]. | 39 |
| Εικόνα 2: Ο πρώτος τηλεπικοινωνιακός δορυφόρος Telstar 1 [73]. | 40 |
| Εικόνα 3: Syncom 3, ο πρώτος δορυφόρος σε γεωσύγχρονη τροχιά [67]. | 41 |
| Εικόνα 4: Οι δορυφορικές τροχιές περί της Γης. | 42 |
| Εικόνα 5: Αρχιτεκτονική Αστερισμού Δορυφόρων LEO [50]. | 44 |
| Εικόνα 6: Απεικόνιση της Τροχιάς και του Υψομέτρου ενός Γεωσύγχρονου Δορυφόρου προς τη Γη [76]. | 48 |
| Εικόνα 7: Απεικόνιση των Τριών Τροχιών με ενδεικτικές τιμές του υψομέτρου και του χρόνου καθυστέρησης. | 52 |
| Εικόνα 8: Απεικόνιση του Δικτύου OneWeb [98]. | 59 |
| Εικόνα 9: Απεικόνιση του Δικτύου Starlink [99]. | 61 |
| Εικόνα 10: Αρχιτεκτονική Συστήματος Starlink [101]. | 62 |
| Εικόνα 11: Η Διαφανής Αρχιτεκτονική ενός 5G NTN [111]. | 66 |
| Εικόνα 12: Η Αναγεννητική Αρχιτεκτονική ενός 5G NTN [111]. | 67 |
| Εικόνα 13: Απεικόνιση Επίδρασης Doppler Shift [122]. | 81 |
| Εικόνα 14: Μοντελοποίηση και απεικόνιση αστερισμού Starlink στο MATLAB. | 83 |
| Εικόνα 15: Απεικόνιση Δέσμης και Ισχύς Πομπών Starlink στο MATLAB. | 84 |
| Εικόνα 16: Προσομοίωση Ανερχόμενης Ζεύξης στο MATLAB. | 86 |
| Εικόνα 17: Προσομοίωση Κατερχόμενης Ζεύξης στο MATLAB. | 87 |
| Εικόνα 18: Εισαγωγή Σεναρίου στην Εφαρμογή του MATLAB για Ανάλυση. | 88 |

Κατάλογος Πινάκων

| | |
|--|-----|
| Πίνακας 1: Σύγκριση των GEO, MEO, LEO..... | 52 |
| Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά των Βασικών Ζωνών Συχνοτήτων στις Δορυφορικές Επικοινωνίες..... | 54 |
| Πίνακας 3: Σύγκριση Διαφανής και Αναγεννητικής Αρχιτεκτονικής για 5G NTN..... | 69 |
| Πίνακας 4: Αποτελέσματα Ανερχόμενης Ζεύξης. | 89 |
| Πίνακας 5: Αποτελέσματα Κατερχόμενης Ζεύξης..... | 90 |
| Πίνακας 6: Γράφημα Περιθωρίου Συνδέσμων Επί του Χρόνου. | 92 |
| Πίνακας 7: Περιθώριο Συνδέσμου ISL Οπτικής Σύνδεσης επί του Χρόνου. | 94 |
| Πίνακας 8: Περιθώριο Συνδέσμου Ανερχόμενης Οπτικής Σύνδεσης επί του Χρόνου. | 96 |
| Πίνακας 9: Περιθώριο Συνδέσμου Κατερχόμενης Οπτικής Σύνδεσης επί του Χρόνου. | 96 |
| Πίνακας 10: Αποτελέσματα Ανάλυσης Σύνδεσης NB-IoT NTN..... | 101 |
| Πίνακας 11: CNR συναρτήσει κάθε γωνίας ανύψωσης. | 102 |
| Πίνακας 12: Αποτελέσματα Μετατόπισης Doppler..... | 103 |
| Πίνακας 13: Μεταβολή Doppler Shift Συναρτήσει της Γωνίας Ανύψωσης. | 104 |

Συντομογραφίες

0G - Μηδενική Γενιά

1G - Πρώτη Γενιά

2G - Δεύτερη Γενιά

3G - Τρίτη Γενιά

4G - Τέταρτη Γενιά

5G - Πέμπτη Γενιά

B5G - Πέρα της Πέμπτης Γενιάς

6G - Έκτη Γενιά

MTS - Σύστημα Κινητής Τηλεφωνίας

PTT - Πίεση Για Ομιλία

IMTS - Βελτιωμένο Σύστημα Κινητής Τηλεφωνίας

AMTS - Προηγμένο Σύστημα Κινητής Τηλεφωνίας

FDMA - Διαίρεση Συχνότητας Πολλαπλής Πρόσβασης

NTT - Nippon Τηλεφωνία και Τηλέγραφος

NMT - Σκανδιναβική Κινητή Τηλεφωνία

TACS - Σύστημα Επικοινωνίας Ολικής Πρόσβασης

RTMI - Ενσωματωμένο Ραδιόφωνο Κινητού Τηλεφώνου

AMPS - Προηγμένο Σύστημα Κινητής Τηλεφωνίας

FM - Διαμόρφωση Συχνότητας

MTSO - Γραφείο Μεταγωγής Κινητών Τηλεπικοινωνιών

RF – Ραδιοσυχνότητα

GSM - Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών

ETSI - Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων

TDMA - Διαίρεση Χρόνου Πολλαπλής Πρόσβασης

CDMA - Διαίρεση Κώδικα Πολλαπλής Πρόσβασης

GPRS - Γενική Υπηρεσία Ραδιοφώνου Πακέτων

EDGE - Ενισχυμένοι Ρυθμοί Δεδομένων για την Εξέλιξη GSM

IoT - Διαδίκτυο των Πραγμάτων

ITU - Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών

GPS - Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού

IPTV - Πρωτόκολλο Διαδικτύου Τηλεόρασης

LAN - Τοπικό δίκτυο

WCDMA - Ευρυζωνική Διαίρεση Κώδικα Πολλαπλής Πρόσβασης

UMTS - Διεθνής Σύστημα Κινητών Τηλεπικοινωνιών

FOMA - Ελευθερία Πρόσβασης Πολυμέσων για Κινητά

EV-DO - Βελτιωμένη Εξέλιξη Δεδομένων

HSPA - Πρόσβαση Πακέτων Υψηλής Ταχύτητας

HSDPA - Πρόσβαση Πακέτων Υψηλής Ταχύτητα Κατερχόμενης Ζεύξης

HSUPA - Πρόσβαση Πακέτων Υψηλής Ταχύτητα Ανερχόμενης Ζεύξης

ITU-R - Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών - Τομέας Ραδιοεπικοινωνιών

IP - Πρωτόκολλο Διαδικτύου

RAN - Δίκτυα Πρόσβασης Ραδιοφώνου

MIMO - Πολλαπλή Είσοδος Πολλαπλή Έξοδος

LTE – Μακροπρόθεσμη Εξέλιξη

WiMAX - Παγκόσμια Δια λειτουργικότητα για Πρόσβαση σε Μικροκύματα

3GPP - Σχέδιο Συνεργασίας 3ης Γενιάς

OFDMA - Ορθογώνια Διαίρεση Συχνότητας Πολλαπλής Πρόσβασης

SCFDMA - Μονός Φορέας Διαίρεση Συχνότητας Πολλαπλής Πρόσβασης

FDD - Διαίρεση Συχνότητας Διπλής Ζεύξης

TDD - Διαίρεση Χρόνου Διπλής Ζεύξης

QoS - Ποιότητα Υπηρεσίας

LTE Advanced - Προηγμένη Μακροπρόθεσμη Εξέλιξη

AES - Προηγμένο Πρότυπο Κρυπτογράφησης

DES - Πρότυπο Κρυπτογράφησης Δεδομένων

VPN - Εικονικό Ιδιωτικό Δίκτυο

DSL - Ψηφιακή Συνδρομητική Γραμμή

NR - Νέα Ραδιοεπικοινωνία

VR - Εικονική Πραγματικότητα

SDN - Δικτύωση Ορισμένη Από Λογισμικό

VNF - Εικονικές Λειτουργίες Δικτύου

MCS - Σχέδιο Διαμόρφωσης και Κωδικοποίησης

EMI - Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές

EMC - Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα

FCC - Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών

FAA - Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Αεροπορίας

LEO - Χαμηλή Περί τη Γη Τροχιά

MEO - Μεσαία Περί τη Γη Τροχιά

GEO - Γεωσύγχρονη Τροχιά

ISL - Διαδορυφορικές Συνδέσεις

SS-MEO - Ηλίο-Σύγχρονη Μεσαία Περί τη Γη Τροχιά

GOES - Γεωστατικός Επιχειρησιακός Περιβαλλοντικός Δορυφόρος

BH - Εναλλαγή Δεσμών

HTS - Δορυφόρος Υψηλής Απόδοσης

CH - Εναλλαγή Συμπλεγμάτων

AI - Τεχνητή Νοημοσύνη

DRL - Βαθιά Ενισχυτική Μάθηση

TOMRA - Εκφόρτωση και Πολυδιάστατη Κατανομή Πόρων

VHF - Πολύ Υψηλή Συχνότητα

VSAT - Τερματικός Σταθμός Πολύ Μικρού Διαμετρήματος

LNB - Χαμηλού Θορύβου Μετατροπέας Συχνοτήτων Καθόδου

BUC - Μετατροπέας Συχνοτήτων Ανόδου

VoIP - Φωνή μέσω IP

Inmarsat - Διεθνής Ναυτιλιακός Δορυφορικός Οργανισμός

BGAN - Ευρυζωνικό Παγκόσμιο Δίκτυο Περιοχής

GX - Διεθνές Εξπρές

NGS - Σύστημα Επόμενης Γενιάς

MSS - Κινητές Δορυφορικές Υπηρεσίες

M2M - Μηχανή-σε-Μηχανή

ESA - Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος

PoE - Τροφοδοσία μέσω Ethernet

NTN - Μη Επίγεια Δίκτυα

MTC - Επικοινωνία Τύπου Μηχανήματος

UE - Εξοπλισμός Χρήστη

D/C - Μετατροπή προς τα κάτω

RTT - Χρόνο Μετάβασης Μετ' Επιστροφής

S&F - Αποθήκευση και προώθηση

gNB - Σταθμός Βάσης Νέας Γενιάς

LM - Περιθώριο Συνδέσμου

BER - Ποσοστό Σφάλματος Bit

CNR - Λόγος Σήματος Φορέα προς Θόρυβο

HARQ - Υβριδικό Αίτημα Αυτόματης Επανάληψης

NB - Στενή Ζώνη Σήματος

TLE - Στοιχείο Δύο Γραμμών

SPG4 - Απλοποιημένο Μοντέλο Γενικής Διαταραχής 4

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Από τις πρώτες αναλογικές μορφές επικοινωνίας έως και τις ψηφιακές μορφές που χρησιμοποιούμε σήμερα, η εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών έχει διαδραματίσει αυστηρά τη σύγχρονη κοινωνία και τον τρόπο με τον οποίο ζούμε. Στο πρώτο κεφάλαιο λοιπόν, θα δούμε τα πρώτα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας που έθεσαν τα θεμέλια για την ανάπτυξη έως και τη μετάβαση σε ψηφιακές και σύγχρονες τεχνολογίες που ενίσχυσε την ποιότητα και την ασφάλεια των επικοινωνιακών υπηρεσιών.

Από την πρώτη λειτουργία του κινητού τηλεφώνου το 1972 και την δημιουργία της μηδενικής γενιάς 0G, οι ασύρματες επικοινωνίες έχουν γίνει πηγή μετάδοσης πληροφορίας και σήματος και έπειτα από εκεί γράφτηκε ιστορία. Το “G” αναφέρεται στην γενιά (generation). Όσο αυτές οι τεχνολογίες μας έχουν βοηθήσει στην καθημερινότητά μας, πρέπει να κατανοήσουμε τις μεγάλες εξελίξεις που συνέβησαν κυρίως από 0G έως 4G [1]. Μεγάλη σχέση και συνεργασία με τις γενιές που θα αναφερθούν λεπτομερώς παρακάτω έχουν τα δορυφορικά συστήματα. Με επίκεντρο στην βοήθεια της ναυτιλίας και την ανάγκη επικοινωνίας του πλοίου με την ξηρά και με τη σειρά της, της ξηράς με το πλοίο. Οι δορυφόροι πλέον όχι μόνο χρησιμοποιούνται στην ναυτιλία αλλά και στην καθημερινότητά μας, εξυπηρετώντας σκοπούς όπως τηλεπικοινωνίες, πλοήγηση GPS, παρακολούθηση καιρού, τηλεσκόπηση και άλλα. Η παρουσία της δορυφορικής τεχνολογίας έχει αλλάξει θεμελιωδώς τον τρόπο με τον οποίο επικοινωνούμε, διεξάγουμε επιχειρήσεις και περιηγούμαστε στον κόσμο γύρω μας.

Όπως εξελίχτηκε κάθε προηγούμενη γενιά, την ίδια προοπτική και μελλοντική προσέγγιση έχει και η πρόσφατη πέμπτη γενιά και οι δορυφορικές επικοινωνίες. Σε αυτό το κεφάλαιο θα δώσουμε το θεωρητικό υπόβαθρο για την κατανόηση των κινητών δικτύων και τις προκλήσεις και δυνατότητες που προκύπτουν από τη συνεργασία τους με δορυφορικά δίκτυα.

1.1 Μηδενική Γενιά (0G)

Γνωστή ως η γενιά προ-ψηφιακής επικοινωνίας και χρήσης τηλεφώνων πριν τα κυβελωτά δίκτυα, όρισε την αρχή της εξέλιξης για τις κινητές επικοινωνίες. Η μετάδοση σήματος πραγματοποιούνταν μέσω αναλογικών συστημάτων και η χρήση της κυρίως έγινε σε συστήματα κινητής ραδιοτηλεφωνίας, όπου το δίκτυο ενεργοποιούσε την ασύρματη επικοινωνία ανάμεσα στους χρήστες μέσω σταθμών και πομποδέκτη.

Ήταν ογκώδεις συσκευές και απαιτούσαν να συνδεθεί μια ξεχωριστή κεραία για να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν για την πραγματοποίηση κλήσεων. Έτσι, ο πομποδέκτης της συσκευής φυλάσσονταν στο πορτοπαγκάκι του αυτοκινήτου ενώ η κεφαλή της συσκευής συνήθως στηριζόταν στο κάθισμα. Τα δύο συνδέονταν και ξεκινούσε η μεταφορά σήματος και δεδομένων [3].

Το επίτευγμα που ξεκίνησε την μηδενική γενιά ήταν η ανάπτυξη και κατασκευή του πρώτου κινητού τηλεφώνου από τον Martin Cooper το 1973 και μετέπειτα το 1983 η Motorola διένειμε τις πρώτες συσκευές στην αγορά. Τότε με αυτό το πολύ σημαντικό ορόσημο στον κόσμο της τεχνολογίας, αναγνωρίστηκε η αναγκαιότητα για φορητά τηλέφωνα και άνοιξε ο δρόμος για τις μελλοντικές γενιές. Επίσης, η υλοποίηση και εφαρμογή τεχνολογιών όπως push-to-talk έθεσε τις βάσεις για προηγμένες δυνατότητες που εμφανίστηκαν στις επόμενες γενιές [1].

Αν και πρόωμη για τα σημερινά δεδομένα, η γενιά 0G ήταν κρίσιμη για την μετάβαση από την ενσύρματη τηλεφωνία στα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας που αποτελούν τον βασικό συντελεστή των σύγχρονων δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Περιλαμβάνει συστήματα όπως Push-to-Talk (PTT), Σύστημα Κινητής Τηλεφωνίας (MTS), Βελτιωμένο Σύστημα Κινητής Τηλεφωνίας (IMTS) και Προηγμένο Σύστημα Κινητής Τηλεφωνίας (AMTS). Αυτά τα πρώιμα συστήματα ήταν κυρίως αναλογικά και έθεσαν τα θεμέλια για μελλοντικές τεχνολογικές εξελίξεις και κυρίως τη μετάβαση στην πρώτη γενιά [2].

1.2 Πρώτη Γενιά (1G)

Η τεχνολογία κινητής επικοινωνίας πρώτης γενιάς, ενώ επίσης ήταν αναλογική όπως η 0G, με τη χρήση των κυψελοειδή δικτύων βελτίωσε την ραδιοτηλεφωνία με πολλούς τρόπους. Το 1G εισήχθη τη δεκαετία του 1980 με την πώληση των πρώτων ασύρματων συσκευών που επέτρεπαν την κινητή φωνητική επικοινωνία χρησιμοποιώντας αναλογικά σήματα. Αυτή η τεχνολογία διαδέχθηκε τα προηγούμενα συστήματα 0G, τα οποία περιλάμβαναν κινητά ραδιοτηλέφωνα. Η εισαγωγή του 1G έθεσε τα θεμέλια για την ιδέα του κυψελοειδούς δικτύου και επέτρεψε στους χρήστες να πραγματοποιούν φωνητικές κλήσεις ενώ βρίσκονταν εν κινήσει, μια επαναστατική πρόοδος εκείνη την εποχή [1] [2] [4].

Τα συστήματα 1G επικεντρώθηκαν κυρίως στην παροχή υπηρεσιών επικοινωνίας μέσω αναλογικού σήματος. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούσαν Διαίρεση Συχνότητας Πολλαπλής Πρόσβασης (FDMA) για την εκχώρηση καναλιών, επιτρέποντας σε πολλούς χρήστες να επικοινωνούν ταυτόχρονα διαιρώντας το διαθέσιμο εύρος ζώνης σε ξεχωριστές ζώνες συχνοτήτων καθώς μια φωνητική κλήση διαμορφώνεται σε υψηλότερη συχνότητα περίπου 150 MHz και άνω καθώς μεταδίδεται μεταξύ πύργων. Ουσιαστικά, η κάλυψη γινόταν σε "κελιά" (cells), αντί μεγάλων πύργων, που διαιρούσαν μια περιοχή σε μικρότερες περιοχές και χειρίζονταν ανεξάρτητα την κυκλοφορία σήματος της περιοχής. Αυτοί οι νέοι σταθμοί βελτίωσαν σημαντικά τη χρήση του φάσματος συχνοτήτων μειώνοντας παράλληλα τις παρεμβολές μεταξύ των κυψελών. Μία επίσης σημαντική και νέα τεχνική που συναντήθηκε κυρίως στο δίκτυο AMTS όπως θα αναφέρουμε παρακάτω, το "handover" ή "handoff" επέτρεπε στους χρήστες να αλλάζουν πρόσβαση στον πιο κοντινό σταθμό ανάλογα την περιοχή που βρίσκονται κατά την μετακίνησή τους, διευκολύνοντας την μετάδοση σήματος σε περίπτωση που ένας χρήστης ταξίδευε πολύ μακριά από τον αρχικό σταθμό σήματος. Η τεχνολογία 1G λειτουργούσε σε συχνότητα 800 MHz και παρείχε ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων μόνο 2,4 Kbps. Όμως, τα συστήματα 1G υπέφεραν από χαμηλή χωρητικότητα, αναξιοπιστία, κακή ποιότητα φωνής και έλλειψη ασφάλειας, καθώς οι φωνητικές κλήσεις μπορούσαν να υποκλαπούν εύκολα και υπόκεινται σε παρεμβολές [3] [5] [6].

Το πρώτο κυψελωτό δίκτυο παρουσιάστηκε στην αγορά της Ιαπωνίας το 1979 από την εταιρεία Nippon Τηλεφωνία και Τηλεγράφος (NTT). Οι σκανδιναβικές χώρες χρησιμοποιούσαν το δίκτυο που αναπτύχθηκε υπό την Σκανδιναβική Κινητή Τηλεφωνία (NMT). Άλλες χώρες ανέπτυξαν επίσης τα δικά τους δίκτυα, όπως το Σύστημα Επικοινωνίας Ολικής Πρόσβασης (TACS) στο Ηνωμένο Βασίλειο, το Ενσωματωμένο Ραδιόφωνο Κινητού Τηλεφώνου (RTMI) που χρησιμοποιήθηκε στην Ιταλία και το Radiocom 2000 στη Γαλλία. Το πιο γνωστό δίκτυο όμως αναπτύχθηκε το 1978 στο Σικάγο από την AT&T και ακολούθησε η κυκλοφορία του το 1983 στις Ηνωμένες Πολιτείες, γνωστό ως Προηγμένο Σύστημα Κινητής Τηλεφωνίας (AMPS) [4] [5].

Το δίκτυο AMPS είναι ένα κυψελοειδές ραδιοσύστημα FM (Διαμόρφωση Συχνότητας) που χρησιμοποιεί έναν κεντρικό υπολογιστή ελέγχου και ένα σύστημα μεταγωγής. Η κάθε βάση κυψέλης συνδέεται με ένα Γραφείο Μεταγωγής Κινητών Τηλεπικοινωνιών (MTSO). Επιπλέον, υπάρχουν συνδέσεις δεδομένων 2400 bit/s μεταξύ του MTSO και κάθε βάσης κυψέλης για τη μετάδοση ψηφιακών σημάτων ελέγχου. Η κάθε κυψέλη χρησιμοποιεί κεραίες με εύρος δέσμης RF (Ραδιοσυχνότητα) 120 μοιρών, επιτρέποντας κάλυψη 360 μοιρών. Με το AMPS, με χρήση της τεχνικής handoff όπως είπαμε, διασφαλίζεται επίσης η σύνδεση και μεταφορά σήματος χωρίς διακοπή καθώς όσο τα κινητά τηλέφωνα κινούνται έξω από το εύρος που εξυπηρετεί μία βάση κυψέλης γίνεται μεταβίβαση στην επόμενη πιο κοντινή κυψέλη. [6]

Τα δίκτυα και οι τεχνολογίες που αναφέραμε, αν και με πολλά ελαττώματα και προβλήματα ήταν ζωτικής σημασίας για την παγκόσμια εξέλιξη και πρόοδο της τεχνολογίας κινητών επικοινωνιών, παρέχοντας σε μακρινές ακόμη και πολύ ερημικές περιοχές λύσεις που ανταποκρίνονται στις ανάγκες τους. Συνοπτικά, η εισαγωγή της γενιάς 1G είναι ίσως το πιο σημαντικό κεφάλαιο στην ιστορία της ασύρματης επικοινωνίας. Ενώ είχε τους περιορισμούς της, η εφαρμογή αυτών των συστημάτων προσέφερε στους χρήστες την ελευθερία να πραγματοποιούν κλήσεις σχεδόν οπουδήποτε εντός της περιοχής κάλυψης του δικτύου, αλλάζοντας ουσιαστικά τον τρόπο επικοινωνίας τους. Οι εξελίξεις που έγιναν κατά τη διάρκεια αυτής της εποχής έθεσαν τις βάσεις για την ανάπτυξη πιο προηγμένων συστημάτων και οδήγησε στη ανάπτυξη του ψηφιακού σήματος. Η μετάβαση από το 1G στο 2G, για παράδειγμα, ήταν ένα άλμα από τα αναλογικά στα ψηφιακά σήματα, βελτιώνοντας σημαντικά την απόδοση, τη χωρητικότητα και την ασφάλεια των δικτύων κινητής τηλεφωνίας όπως θα δούμε παρακάτω. Η κληρονομιά του 1G συνεχίζει να επηρεάζει τις σύγχρονες τεχνολογίες κινητής επικοινωνίας. [2] [4].

1.3 Δεύτερη Γενιά (2G)

Η δεύτερη γενιά ασύρματης τεχνολογίας ήταν ένα σημαντικό άλμα εξέλιξης σε σχέση με τα αναλογικά συστήματα που προσέφερε το 1G. Το 2G εισήχθη άρχισε να αναπτύσσεται στα τέλη δεκαετίας 1980 και κυκλοφόρησε πρώτη φορά στη Φινλανδία το 1991 από την Radiolinja, και βασίστηκε στο Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών (GSM) ένα πρότυπο που αναπτύχθηκε από το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ETSI). Όπως και με το 1G χρησιμοποιεί ψηφιακή σηματοδότηση για να συνδεθούν οι κυψέλες με το υπόλοιπο σύστημα δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Ήταν η πρώτη γενιά που χρησιμοποίησε ψηφιακά σήματα για κινητές επικοινωνίες και προσέφερε πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα αναλογικά συστήματα της 1G, όπως βελτιωμένη ποιότητα ήχου, καλύτερη ασφάλεια μέσω ψηφιακής κρυπτογράφησης και δυνατότητα υποστήριξης νέων υπηρεσιών όπως μηνύματα SMS και αποστολή εικόνων [1] [5].

Ανάλογα την πολυπλεξία που χρησιμοποιείται, οι τεχνολογίες 2G βασίζονται σε δύο μεθόδους πολυπλεξίας, είτε σε Διαίρεση Χρόνου Πολλαπλής Πρόσβασης (TDMA) είτε σε Διαίρεση Κώδικα Πολλαπλής Πρόσβασης (CDMA). Η διαίρεση χρόνου επέτρεπε σε πολλούς χρήστες να μοιράζονται το ίδιο κανάλι συχνότητας διαιρώντας το σήμα σε χρονοθυρίδες, ενώ η διαίρεση κώδικα ανέθετε μοναδικούς κωδικούς σε κάθε χρήστη, επιτρέποντας την ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων στο ίδιο κανάλι συχνότητας. Ανάμεσα στις πολλές διαφορετικές τεχνολογίες TDMA, όπως οι PDC, iDEN και IS-136, το GSM αναγνωρίστηκε ως το πιο αποδοτικό και τεχνολογικά εξελίξιμο σύστημα κινητής τηλεφωνίας [4].

Το GSM είναι μία ψηφιακή κυψελοειδής τεχνολογία που χρησιμοποίησε ψηφιακή διαμόρφωση για να βελτιώσει την ποιότητα της φωνής και προσέφερε ισχυρά χαρακτηριστικά ασφαλείας. Διαιρεί κάθε κανάλι 200 kHz σε οκτώ χρονοθυρίδες των 25 kHz και εκτός από τη χρήση TDMA ως τεχνική πολλαπλής πρόσβασης, το σύστημα χρησιμοποιεί επίσης FDMA, εκχωρώντας διαφορετικές συχνότητες μεταξύ κυψελών. Το GSM υποστηρίζει ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων έως και 9,6 kbps, επιτρέποντας τη μετάδοση βασικών υπηρεσιών δεδομένων, όπως μηνύματα SMS. Τα δίκτυα απαιτούσαν εύρος ζώνης περίπου 30-200 kHz και λειτουργούσαν στο φάσμα των 900 και 1800 MHz. [2]

Οι πιο αξιοσημείωτες εξελίξεις της τεχνολογίας 2G περιλάμβαναν αυξημένη χωρητικότητα και βελτιωμένους μηχανισμούς μεταβίβασης (handoff). Σε αντίθεση με το 1G, το οποίο είχε χαμηλή χωρητικότητα και αναξιόπιστες μεταβιβάσεις, τα δίκτυα 2G μπορούσαν να φιλοξενήσουν περισσότερους χρήστες ταυτόχρονα και παρείχαν ομαλότερες μεταβάσεις μεταξύ πύργων κυψέλης. Η χρήση ψηφιακών σημάτων στο 2G προσέφερε επίσης πιο αξιόπιστη και σαφέστερη φωνητική επικοινωνία, βελτιώνοντας σημαντικά την εμπειρία του χρήστη. Επιπλέον, η εισαγωγή της ψηφιακής κρυπτογράφησης για τα μηνύματα κειμένου εξασφάλισε ότι οι επικοινωνίες ήταν πιο ασφαλείς και λιγότερο επιρρεπείς σε υποκλοπές ή παρεμβολές από τρίτους [4].

Παρά τα πολλά πλεονεκτήματά της, η τεχνολογία 2G είχε επίσης τους περιορισμούς της. Ενώ παρείχε βελτιωμένη ποιότητα φωνής και ασφάλεια σε σχέση με την 1G, είχε σχετικά χαμηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων. Η ανάπτυξη των τεχνολογιών GPRS (Γενική Υπηρεσία Ραδιοφώνου Πακέτων) και EDGE (Ενισχυμένοι Ρυθμοί Δεδομένων για την Εξέλιξη GSM), επίσης αναφερόμενα ως 2.5G και 2.75G αντίστοιχα, είχαν ως στόχο να βελτιώσουν αυτά τα προβλήματα προσφέροντας υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων, επεκτείνοντας έτσι τη χρησιμότητα των δικτύων 2G πριν από την ευρεία ανάπτυξη και χρήση του 3G. Με την εισαγωγή της υπηρεσίας GPRS το 2000, βελτιώθηκαν οι ρυθμοί δεδομένων στα 56-114 kbps. Ενώ λίγα χρόνια αργότερα, το 2003 κυκλοφόρησαν τα δίκτυα EDGE από την AT&T, επιτυγχάνοντας ταχύτητες δεδομένων έως και 473 kbps [2].

Συμπερασματικά, η τεχνολογία 2G αποτέλεσε ένα μεγάλο βήμα στην εξέλιξη των κινητών επικοινωνιών. Με τη μετάβαση από την αναλογική στην ψηφιακή τεχνολογία, πραγματοποιήθηκε βελτιωμένη ποιότητα ήχου, ασφάλεια και αξιοπιστία και μια σειρά νέων υπηρεσιών που βελτίωσαν σημαντικά την εμπειρία του χρήστη. Οι βελτιώσεις στο εύρος ζώνης, φάσματος και τις μεθόδους πολυπλεξίας στήριξαν την ταχεία ανάπτυξη και την παγκόσμια υιοθέτηση των κινητών επικοινωνιών. Τελικά όμως, το 2G έχει φτάσει στο τέλος του κύκλου ζωής του αφού οι εταιρίες έχουν σταματήσει να το υποστηρίζουν και να το ενημερώνουν [2] [4] [5].

1.4 Τρίτη Γενιά (3G)

Η τρίτη γενιά (3G) της κινητής τηλεφωνίας αποτελεί σημαντικό άλμα σε σχέση με τις προηγούμενες, 1G και 2G, προσφέροντας βελτιωμένες δυνατότητες πολυμέσων και υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων. Αρχικά καθορίστηκε από τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) στο πλαίσιο του IMT-2000, το 3G είχε ως στόχο να παρέχει ένα παγκόσμιο πρότυπο για τις κινητές επικοινωνίες, παρέχοντας μεγαλύτερο εύρος ζώνης και υποστηρίζοντας περισσότερες εφαρμογές από τις προηγούμενες γενιές. Το 3G χρησιμοποιείται στην ασύρματη τηλεφωνία, στην κινητή πρόσβαση στο Διαδίκτυο, στη σταθερή ασύρματη πρόσβαση στο Διαδίκτυο, στις βιντεοκλήσεις και στην τηλεόραση. Αυτές οι υπηρεσίες 3G κυριάρχησαν στην αγορά για πολλά χρόνια όπως θα αναφέρουμε παρακάτω, αφού χρησιμοποιήθηκαν κυρίως σε εφαρμογές για κινητά, παρακολούθηση βίντεο στο διαδίκτυο και για το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού (GPS) [4].

Η μετάβαση στην 3G ήταν μία πρόκληση καθώς έπρεπε να αλλάξουν και να αναβαθμιστούν τα ήδη υπάρχον δίκτυα. Όπως είπαμε είχε ήδη ξεκινήσει η αναβάθμιση του 2G με τη χρήση των GPRS και EDGE, έτσι η μετάβαση στο 3G όχι μόνο προσφέρει στους χρήστες βελτίωση στην επικοινωνία τους αλλά και πολλές νέες υπηρεσίες όπως περιήγηση στο Διαδίκτυο μέσω του κινητού, email, ανταλλαγή άμεσων μηνυμάτων, τηλεδιάσκεψη και παροχή τηλεόρασης μέσω Internet (IPTV). Η βασική εξέλιξη από το 2G και το 2,5G στο 3G είναι η μεγαλύτερη ταχύτητα σύνδεσης και το ευρύτερο εύρος ζώνης. Το 3G ήταν ικανό να παρέχει υπηρεσίες πολυμέσων κινητής τηλεφωνίας με ρυθμό μετάδοσης 144 kbps με υψηλή ταχύτητα, περίπου 384 kbps σε εξωτερικούς χώρους και 2 Mbps σε εσωτερικούς χώρους. Επιπλέον, τα δίκτυα 3G μπορούν να προσφέρουν ταχύτερη μετάδοση δεδομένων από την πιο αργή σύνδεση LAN (Τοπικό Δίκτυο) στα 256 kbps και GPRS που συνήθως προσφέρει ταχύτητα μεταφοράς 40 kbps έως 55 kbps [7].

Λόγω των παραπάνω, τα δίκτυα 3G έδωσαν μεγάλη προοπτική στις νέες συσκευές κινητών τηλεφώνων (smartphones). Τελικά, οι τυπικές ταχύτητες λήψης μετριούνται από 1,1 έως 20 Mbps και οι τυπικές ταχύτητες μεταφόρτωσης είναι 300 kbps έως 3 Mbps. Αργότερα οι τεχνολογίες βελτιώθηκαν να επιτρέπουν ταχύτητες έως και 14 Mbps με τη χρήση της τεχνικής packet switching. Χρησιμοποιούσε Wide Band Wireless Network και λειτουργούσε σε εύρος 2100 MHz με εύρος ζώνης 15-20 MHz.

Τα συστήματα 3G βασίζονται κυρίως στην τεχνολογία CDMA. Αναπτύχθηκαν κυρίως δύο πρότυπα framework: η Ευρυζωνική Διαίρεση Κώδικα Πολλαπλής Πρόσβασης (Wideband Code Division Multiple Access), που αποτέλεσε τη βάση για το UMTS (Διεθνές Σύστημα Κινητών Τηλεπικοινωνιών) στην Ευρώπη, και το CDMA2000 στη Βόρεια Αμερική και σε τμήματα της Ασίας. Άλλες παραλλαγές όπως το FOMA (Freedom of Mobile Multimedia Access) της NTT DoCoMo και το TD-SCDMA της Κίνας συνέβαλαν επίσης στο 3G [7] [2].

Το WCDMA, με πλάτος καναλιού 5 MHz, υποστήριξε ταχύτητες δεδομένων έως και 2 Mbps. Κυκλοφόρησε για πρώτη φορά στην Ιαπωνία από την NTT DoCoMo το 2001 υπό την υπηρεσία FOMA. Το συγκεκριμένο UMTS πρότυπο κυριάρχησε τότε την παγκόσμια αγορά και χρησιμοποιήθηκε κυρίως στην Ευρώπη, Ιαπωνία, Κίνα και Σιγκαπούρη [3] [7]. Το δεύτερο framework για την ασύρματη τεχνολογία, CDMA2000, αναπτύχθηκε από την Ομάδα Ασύρματων Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων της Βόρειας Αμερικής για αποστολή δεδομένων, σηματοδότηση μεταξύ κινητών τηλεφώνων και τοποθεσιών κινητής τηλεφωνίας (cell site), και είχε αρκετές εξελίξεις, όπως 1xRTT, EV-DO (Βελτιωμένη Εξέλιξη Δεδομένων).

Χρησιμοποιήθηκε κυρίως στην Βόρεια Αμερική και στην Νότια Κορέα. Το 1xRTT σχεδόν διπλασίασε το εύρος ζώνης προσθέτοντας 64 ακόμη κανάλια κυκλοφορίας στην εμπρόσθια σύνδεση. Ενώ, το EV-DO χρησιμοποίησε τεχνικές πολυπλεξίας που έχουμε ήδη αναφέρει, όπως CDMA και TDMA, για να μεγιστοποιήσει τόσο την απόδοση του μεμονωμένου χρήστη όσο και τη συνολική απόδοση του συστήματος. Αυτά τα πρότυπα αύξησαν σταδιακά τις ταχύτητες δεδομένων, επιτρέποντας εφαρμογές όπως η ροή βίντεο, η ψηφιακή τηλεόραση και η προηγμένη ανταλλαγή πολυμέσων [7].

Η εξέλιξη του 3G οδήγησε στην ανάπτυξη της Πρόσβασης Πακέτων Υψηλής Ταχύτητας (HSPA), που συχνά αναφέρεται ως 3.5G, συγκεκριμένα των τεχνολογιών HSDPA (Πρόσβαση Πακέτων Υψηλής Ταχύτητα Κατερχόμενη Ζεύξης) και HSUPA (Πρόσβαση Πακέτων Υψηλής Ταχύτητα Ανερχόμενη Ζεύξης) για κατερχόμενη και ανερχόμενη ζεύξη 3G αντίστοιχα. Το HSDPA παρέχει ταχύτητες downlink έως και 14 Mbps, ενώ το HSUPA το συμπληρώνει ενισχύοντας τις ταχύτητες uplink μέχρι 5.76 Mbps, απαραίτητες για εφαρμογές που απαιτούν υψηλό εύρος ζώνης, όπως βιντεοκλήσεις και παιχνίδια που εξυπηρετούσαν παραπάνω από έναν παίκτη [5].

Παρά τις τεχνολογικές της εξελίξεις, η υιοθέτηση του 3G αντιμετώπισε προκλήσεις. Αν και κυρίευσε στην αγορά, υπήρχαν αδυναμίες οικονομικά όσον αφορά την τιμολόγηση και τη διαθεσιμότητα οικονομικών τηλεφώνων. Πέρα από αυτό, ο κάθε χρήστης έπρεπε να πληρώνει τον πάροχο του κάθε μήνα για την παροχή 3G στο κινητό του τηλέφωνο. Αρχικές τιμές ήταν 15-20 ευρώ στην Ευρώπη για 100Mbps τον μήνα, αλλά πολλές φορές και γινόταν αύξηση ανάλογα με την κατανάλωση. Οι χρήστες δεν άργησαν να αποδεχτούν αυτό το νέο “τιμολόγιο”. Οι πάροχοι όμως αντιμετώπισαν προβλήματα καθώς κυρίως τις βραδινές ώρες υπήρχε πολύ μεγάλη χωρητικότητα στα δίκτυα λόγω της ταυτόχρονης σύνδεσης πολλών χρηστών με αποτέλεσμα η ταχύτητα σύνδεσης να είναι πολύ αργή, το οποίο πολλές φορές οδηγούσε σε παράπονα από τους χρήστες [7].

Η εξέλιξη του 3G αποτέλεσε σημαντικό ορόσημο στην ανάπτυξη των κινητών επικοινωνιών, προσφέροντας αυξημένες ταχύτητες δεδομένων και ευρύτερο φάσμα υπηρεσιών σε σύγκριση με τις προηγούμενες γενιές. Ενώ η πορεία από το 1G στο 3G περιλάμβανε σημαντικές τεχνολογικές εξελίξεις, η επίπτωση του 3G στα παγκόσμια πρότυπα επικοινωνίας σχολιάζεται μέχρι και σήμερα, αφού η μεγάλη αποδοχή και κατανάλωση από την αγορά και τις εταιρείες δείχνει πως είναι ίσως η πιο σημαντική γενιά της κινητής τεχνολογίας. Οι περισσότεροι πάροχοι και εταιρείες σε όλες τις χώρες παγκοσμίως έχουν τερματίσει τα δίκτυα 3G και έχουν σταματήσει την υποστήριξή τους από το 2022 μέχρι και το 2023, αναγκάζοντας πολλούς ανθρώπους να αναβαθμίσουν τα κινητά τους τηλέφωνα και με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούν είτε 4G ή 5G όπως θα δούμε παρακάτω [4] [7].

1.5 Τέταρτη Γενιά (4G)

Με την γρήγορη εξέλιξη κάθε γενιάς, αυξήθηκαν και οι προσδοκίες για κάθε επόμενη. Έτσι τον Νοέμβριο του 2008, η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών - Τομέας Ραδιοεπικοινωνιών (ITU-R) έθεσε προϋποθέσεις και απαιτήσεις για την νέα γενιά 4G. Βασική προϋπόθεση ήταν να εξυπηρετεί πολύ υψηλές ταχύτητες μετάδοσης, να βασίζεται σε δίκτυα που εφαρμόζουν μεταγωγή πακέτων μέσω IP (Πρωτόκολλο Διαδικτύου) και να υπάρχουν συγκεκριμένοι ρυθμοί μετάδοσης για κατάσταση υψηλής και χαμηλής κίνησης. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες γενιές, το 4G σχεδιάστηκε για πολύ υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων, και με την προϋπόθεση ότι οι χρήστες μπορούν να έχουν πρόσβαση σε κάθε υπηρεσία οποτεδήποτε και οπουδήποτε. Στόχος ήταν να παρέχει εύκολη συνδεσιμότητα με βελτιωμένη απόδοση, υποστηρίζοντας ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από τη ροή βίντεο υψηλής ανάλυσης έως παιχνίδια και προηγμένες υπηρεσίες πολυμέσων. Τα παραπάνω έγιναν δυνατά επειδή η τεχνολογία βασίστηκε σε επικοινωνίες IP αντί μεταγωγής κυκλωμάτων όπως συνέβαινε στις προηγούμενες γενιές. Είχε πάνω κάτω τις ίδιες υπηρεσίες με το 3G αλλά πρόσφερε πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες και αντιμετώπισε προκλήσεις όπου το 3G ήταν αδύναμο, όπως ασφάλεια, χαμηλός ρυθμός δεδομένων και άλλα όπως θα δούμε παρακάτω [1][8].

Τα δίκτυα 4G έφεραν υψηλότερο εύρος ζώνης, καλύτερη χρήση φάσματος και πολύ μικρότερη καθυστέρηση (latency). Ίσως το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό του 4G όμως είναι το ότι η σύνδεση του δικτύου παραμένει πολύ ισχυρή ακόμη και όταν ο χρήστης βρίσκεται σε κίνηση και σε μεγάλη ταχύτητα (σε αυτοκίνητο, τρένο κλπ.) και αλλάζει συνεχώς σταθμούς. Αυτό οφείλεται στην σύνθετη αρχιτεκτονική των 4G, όπως θα δούμε παρακάτω. Τα 4G είναι ενσωματωμένα με ένα βασικό δίκτυο και πολλά δίκτυα πρόσβασης ραδιοφώνου (RAN), παρέχει δίκτυα βασισμένα σε IP και ταχύτητες 100 Mbps έως 1 Gbps με συχνότητα 2–8 GHz. Λόγω των υψηλών ταχυτήτων, το εύρος κάλυψης γινόταν όλο και μικρότερο και λύση δόθηκε με την τεχνολογία MIMO (Πολλαπλή Είσοδος Πολλαπλή Έξοδος) όπως θα δούμε παρακάτω [11]. Τα δύο συστήματα του 4G είναι το LTE (Μακροπρόθεσμη Εξέλιξη) και το WiMAX (Παγκόσμια Δια-Λειτουργικότητα για Πρόσβαση σε Μικροκύματα), τα οποία εγκρίθηκαν από το ITU ως προεκτάσεις του 4G [8] [9].

Αν και ουσιαστικά δεν είναι σύστημα 4G, το LTE αναπτύχθηκε από το Σχέδιο Συνεργασίας 3ης Γενιάς (3GPP). Η πρόταση του έγινε αρχικά το 2004 και ξεκίνησε επίσημα το 2006. Η αρχιτεκτονική του βασίζεται σε IP και παρέχει ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων έως και 150Mbps χρησιμοποιώντας OFDMA (Ορθογώνια Διαίρεση Συχνότητας Πολλαπλής Πρόσβασης) και MIMO για καλύτερη ποιότητα σήματος και βελτιωμένη απόδοση φάσματος [10] [8]. Χρησιμοποιεί OFDMA για την κατερχόμενη ζεύξη και SCFDMA (Μονός Φορέας Διαίρεση Συχνότητας Πολλαπλής Πρόσβασης) για την ανερχόμενη ζεύξη, με αποτέλεσμα να υποστηρίζει ταχύτητες ανερχόμενης ζεύξης 300 Mb/s και ταχύτητες κατερχόμενης ζεύξης 1 Gb/s με εύρος ζώνης περίπου 100 MHz [10]. Η τεχνολογία MIMO χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραίες για τη μετάδοση παράλληλων ροών δεδομένων σε πολλούς χρήστες ταυτόχρονα στον ίδιο χώρο. Αυτό ενισχύει σημαντικά την χωρητικότητα και τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων του συστήματος, βελτιστοποιώντας τη χρήση των πόρων και βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα της μετάδοσης δεδομένων [9].

Το OFDMA χωρίζει κάθε κανάλι σε πολλές στενές ζώνες. Κάθε μία από αυτές τις στενές ζώνες μπορεί να μεταφέρει πακέτα δεδομένων ταυτόχρονα, επιτρέποντας μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα και υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων. Αυτή η διαίρεση του καναλιού σε μικρότερα, ορθογώνια υποκανάλια ελαχιστοποιεί τις παρεμβολές και βελτιστοποιεί τη χρήση του διαθέσιμου φάσματος, οδηγώντας σε βελτιωμένη απόδοση και μικρότερη καθυστέρηση [4]. Επίσης, το LTE υποστηρίζει παράλληλα δύο τεχνικές για τη διαχείριση φάσματος, την Διαίρεση Συχνότητας Διπλής Όψης (FDD) και την Διαίρεση Χρόνου Διπλής Όψης (TDD). Το FDD επιτρέπει την ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη σε διαφορετικές συχνότητες, ενώ το TDD χρησιμοποιεί την ίδια συχνότητα, αλλά διαχωρίζει τις μεταδόσεις άνω και κάτω ζεύξης με βάση το χρόνο. Όσο αφορά την Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS) του LTE, η ροή και μεταφορά δεδομένων είναι πάρα πολύ καλή και σταθερή σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές. Το LTE είναι κατάλληλο για τη μετάδοση βίντεο μέσω κινητού, την παροχή τηλεοπτικού περιεχομένου υψηλής ποιότητας, τη βιντεοκλήση καθώς και τη ζωντανή μετάδοση βίντεο. [11]

Το LTE Advanced (Προηγμένη Μακροπρόθεσμη Εξέλιξη) κυκλοφόρησε το 2013 και το G3PP που το ανέπτυξε είχε ως στόχο να ξεπεράσει τις απαιτήσεις που είχε ορίσει το ITU όπως είπαμε και αποτελεί την εξέλιξη στο LTE. [12] Το LTE-A προσφέρει ακόμα υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, με μέγιστες ταχύτητες 1 Gbps στην κατερχόμενη ζεύξη και 500 Mbps στην ανερχόμενη. Τα βασικά χαρακτηριστικά του LTE-A είναι η αυξημένη απόδοση φάσματος, η χαμηλή καθυστέρηση και οι βελτιωμένες αποδόσεις. Το LTE-A χρησιμοποιεί προηγμένες τεχνικές MIMO για την περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης δεδομένων και της ποιότητας του σήματος [13].

Το WiMAX αποτέλεσε μεγάλος ανταγωνιστής του LTE. Σε αντίθεση με το LTE που βελτίωσε τα ήδη υπάρχον δίκτυα, το WiMAX ήταν σχετικά μία νέα και διαφορετική τεχνολογία χωρίς μεγάλη χρήση μέχρι που ανταγωνίστηκε το LTE για τη θέση του προτύπου στο 4G [14]. Το WiMAX είναι μια ασύρματη ευρυζωνική τεχνολογία που παρέχει ασύρματη ευρυζωνική σύνδεση σε σταθερά και κινητά τερματικά, οι συνδέσεις αυτές είναι γνωστές ως Fixed Wimax και Mobile Wimax αντίστοιχα [17]. Θεωρείται τεχνολογία 4G και βασίζεται στα πρότυπα του IEEE, τα IEEE 802.16-2004 και IEEE 802.16-2005 [15]. Σημαντικά χαρακτηριστικά του WiMAX στο 4G, είναι:

- **Κινητό WiMAX για Εφαρμογές Πραγματικού Χρόνου:** Υποστηρίζει βελτιστοποιημένα σχήματα μεταπομπής με χαμηλές καθυστερήσεις για να διασφαλίσει ότι οι εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπως το VoIP (Φωνή μέσω IP), εκτελούνται χωρίς υποβάθμιση της υπηρεσίας.
- **Ποιότητα Υπηρεσίας (Quality of Service):** Προσφέρει εγγυημένη ποιότητα υπηρεσίας παρόμοια με τα κυψελοειδή συστήματα 2G ή 3G, επιτρέποντας την παροχή διαφορετικών τύπων υπηρεσιών.
- **Μηχανισμοί Ασφαλείας:** Υποστηρίζεται κρυπτογράφηση και προστασία ιδιωτικών δεδομένων μέσω βιομηχανικών μέτρων. Επίσης, με τα πιστοποιητικά X.509 και EAP γίνεται ταυτοποίηση. Υποστηρίζει την πιστοποίηση SIM και soft SIM. Τέλος η κρυπτογράφηση γίνεται με AES (Προηγμένο Πρότυπο Κρυπτογράφησης) και τριπλό DES (Πρότυπο Κρυπτογράφησης Δεδομένων) ακόμη και VPN (Εικονικό Ιδιωτικό Δίκτυο).

- **Εφαρμογές Σταθερού WiMAX:** Σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν υποδομές για ευρυζωνικά δίκτυα μπορεί να αντικαταστήσει ένα DSL (Ψηφιακή Συνδρομητική Γραμμή) [16].

Το πρότυπο IEEE 802.16 του WiMAX περιλαμβάνει τόσο σταθερά όσο και κινητά ασύρματα δίκτυα, προσφέροντας χαρακτηριστικά όπως LOS (Line of Sight) και NLOS (Non Line of Sight), δυνατότητα να επιλέγεται το εύρος ζώνης καναλιού και υποστηρίζεται η σταθερή σύνδεση εν κινήσει. Το Fixed WiMAX, βασισμένο στο IEEE 802.16d, έχει σχεδιαστεί για σταθερή πρόσβαση, ενώ το Mobile WiMAX, βασισμένο στο IEEE 802.16e, υποστηρίζει τεχνικές handoff καθώς οι χρήστες μετακινούνται μεταξύ των σταθμών σήματος. Έπειτα υπήρξαν εξελίξεις, όπως τα πρότυπα IEEE 802.16j και IEEE 802.16m, που βελτίωσαν περαιτέρω τις δυνατότητες του WiMAX, παρέχοντας ταχύτερες ταχύτητες και βελτιωμένες επιδόσεις για τους χρήστες. Έτσι έγινε μεγάλος ανταγωνιστής του LTE για το ποιος θα κυριαρχήσει στο 4G [17]. Το Fixed έχει εύρος 2GHz - 66 GHz ενώ το Mobile 2GHz – 6GHz [18].

Τελικά το LTE κυριάρχησε το WiMAX λόγω πολλών παραγόντων. Ένας βασικός παράγοντας ήταν η συμβατότητα του LTE με τις υπάρχουσες υποδομές δικτύων και την υπάρχουσα χρήση τους από τους πελάτες στις προηγούμενες γενιές, έτσι υιοθετήθηκε πολύ πιο εύκολα σε σχέση με το WiMAX. Εστίασε επίσης στην ευρεία κάλυψη, την υπηρεσία δικτύου οπουδήποτε και οποτεδήποτε και σταδιακά ενσωμάτωσε βασικά χαρακτηριστικά όπως το OFDMA, το TDD, την IP και τους υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων [19]. Φυσικά το WiMAX ακόμα χρησιμοποιείται και υποστηρίζεται. Με την έκδοση WiMAX 2+ είναι πλέον συμβατό με το LTE και πιθανώς κάποια στιγμή θα ενσωματωθεί η χρήση του στο 5G NR (New Radio) [20]. Ανεξάρτητα αν το WiMAX ή το LTE είναι καλύτερα, το 4G συνυπάρχει με το 5G και ακόμη χρησιμοποιείται παγκοσμίως. Καλύπτει πλήρως πάρα πολλές περιοχές και ακόμη κυριαρχεί στην αγορά και στην χρήση. Επομένως δεν κινδυνεύει να αντικατασταθεί τελείως από το 5G για τουλάχιστον ακόμη πέντε χρόνια, αφού σχεδόν όλα τα κινητά συνεχίζουν να υποστηρίζουν το 4G και καθώς είναι και πιο οικονομικά πολλοί χρήστες δεν έχουν μεταφερθεί στα 5G ακόμη. Από την άλλη πλευρά πολλοί χρήστες προτιμούν τις μεγαλύτερες ταχύτητες που προσφέρει το 5G και έτσι αγοράζουν τα πιο καινούργια κινητά τηλέφωνα.

1.6 Πέμπτη Γενιά (5G)

Με τις συνεχές απαιτήσεις για ταχύτερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων, χαμηλότερη καθυστέρηση και αυξημένη χωρητικότητα δικτύου για την υποστήριξη του αυξανόμενου αριθμού συνδεδεμένων συσκευών και αναδυόμενων εφαρμογών, όπως το IoT, τα έξυπνα αυτοκίνητα, οι έξυπνες πόλεις και η εικονική πραγματικότητα (VR), δημιουργήθηκε η ανάγκη για την πέμπτη γενιά 5G της κινητής τεχνολογίας. Το 5G είχε ως στόχο να επιφέρει σημαντικές βελτιώσεις σε σχέση με τους προκατόχους του, όπως το 4G LTE, παρέχοντας ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων έως και 20 Gbps, καθυστέρηση μικρότερη από 1 ms και υποστήριξη τεράστιου αριθμού συσκευών. Όπως και με το 4G, το ITU έθεσε συγκεκριμένες απαιτήσεις για την τεχνολογία 5ης γενιάς βασισμένη στο πρότυπό IMT-2020 [21]. Βάση των νέων προδιαγραφών ένα σύστημα 5G πρέπει αναγκαστικά να χρησιμοποιεί τεχνολογίες 5G NR με σκοπό την παροχή ασύγκριτης σύνδεσης για διάφορες χρήσεις και νέες εφαρμογές, με έμφαση στους υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, τη χαμηλή καθυστέρηση, την αξιοπιστία και τη βελτίωση της κάλυψης ανά περιοχή. Το 5G, το οποίο βασίζεται στις προδιαγραφές της Έκδοσης 15 (Rel-15) που αναπτύχθηκε από το 3GPP, αναπτύσσεται παγκοσμίως σε συχνότητες κάτω των 6 GHz και σε υψηλότερες συχνότητες χρησιμοποιώντας τα νέα φάσματα mmWave [22]. Το 5G NR λοιπόν έχει καθιερωθεί ως το παγκόσμιο πρότυπο για τα 3GPP 5G δίκτυα και στοχεύει για την επίτευξη πολύ υψηλών συχνοτήτων σε ευρυζωνικά δίκτυα [23].

Στις συχνότητες κάτω των 6GHz, η NR χρησιμοποιεί MIMO για τη βελτίωση των επιδόσεων του δικτύου, όπως και ο προκατόχός της 4G LTE. Επιτρέποντας έτσι την αποδοτικότερη χρήση του φάσματος και την καλύτερη ποιότητα σήματος. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των χαμηλότερων συχνοτήτων είναι πως το σήμα διεισδύει και μέσα από εμπόδια και τοίχους [25]. Πιο συγκεκριμένα, οι δύο ζώνες συχνοτήτων μέχρι τα 6GHz είναι γνωστές ως χαμηλή ζώνη (low-band) και μεσαία ζώνη (mid-band). Η χαμηλή ζώνη λειτουργεί σε συχνότητες κάτω του 1 GHz, που συνήθως κυμαίνονται από 600 MHz έως 1 GHz [26]. Αν και το συγκεκριμένο φάσμα δεν έχει μεγάλες βελτιώσεις στην ταχύτητα σε σχέση με το 4G, παρέχει κάλυψη σε μεγάλες εκτάσεις [27]. Έτσι είναι κατάλληλο στην κάλυψη σε μεγάλες περιοχές και σε αγροτικές τοποθεσίες ακόμη και στη χρήση εφαρμογών IoT [28]. Η μεσαία ζώνη 5G λειτουργεί στις συχνότητες 2,4 GHz έως 4,2 GHz και παρέχει καλές ταχύτητες, καλό εύρος ζώνης και ικανοποιητική κάλυψη [26]. Είναι κατάλληλη για αστικές και προαστιακές περιοχές και κυριαρχεί στην χρήση [28]. Η μεσαία ζώνη κυριαρχεί στην αγορά της Κίνας καθώς αξιοποιεί περισσότερο τις συχνότητες μεταξύ 2,6 GHz και 3,5 GHz ως οι πιο κατάλληλες και στις Ηνωμένες Πολιτείες πάροχοι όπως η AT&T, T-Mobile και Verizon επεκτείνουν συνεχώς τα δίκτυά τους για να καλύπτουν εκατομμύρια ανθρώπους [27]. Επίσης αφού είναι ανάμεσα σε αυτές τις συχνότητες, η μεσαία ζώνη λειτουργεί και στο φάσμα γνωστό ως C-band (3.7 GHz - 4.2 GHz), στο οποίο λειτουργούν και πολλοί δορυφόροι όπως θα δούμε και στα επόμενα κεφάλαια [26].

Από την άλλη πλευρά, στην μεγάλη ζώνη και στις μεγαλύτερες συχνότητες mmWave από 24 GHz και πάνω, το 5G NR παρέχει ακόμη ταχύτερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων αλλά σε μικρότερες αποστάσεις σε σχέση με τις μικρότερες ζώνες [27]. Οι συχνότητες mmWave καταφέρνουν τη μεταφορά περισσότερων δεδομένων με υψηλές ταχύτητες και χαμηλότερη καθυστέρηση και απόδοση δικτύου έως και 20 Gbps [24]. Όμως, έχουν μικρότερη εμβέλεια μέχρι περίπου στα 300 μέτρα καθώς απαιτούν πολλές μικρές κυψέλες και έχουν κακή διείσδυση μέσα από εμπόδια και τοίχους [23]. Το 5G μεγάλης ζώνης υπερέχει σε ταχύτητα θυσιάζοντας εμβέλεια σε σχέση με τα χαμηλότερα φάσματα, και έτσι είναι ιδανικό για πυκνές περιοχές και πολυσύχναστους χώρους όπου υπάρχει μεγάλη χρήση [26].

Καθώς οι ταχύτητες αυξάνονται και το 5G κυριαρχεί σιγά σιγά την αγορά, πολλοί πάροχοι όπως η T-Mobile, η Qualcomm και Verizon βρίσκονται σε πόλεμο για το ποιος θα ξεπεράσει τα όρια του 5G και θα πετύχει πρωτοφανείς ρυθμούς δεδομένων. Με το προβάδισμα να το κατέχει η T-Mobile με μέση ταχύτητα κατερχόμενης σύνδεσης 186.3 Mbps και ανερχόμενης σύνδεσης 17.9 Mbps, με την Verizon να ακολουθεί δεύτερη με μικρή διαφορά [29]. Η Qualcomm από την άλλη πλευρά, ανέπτυξε και κυκλοφόρησε το πρώτο 3GPP Rel-16 μόντεμ που φτάνει ρυθμούς μετάδοσης έως και 10 Gbps στην κατερχόμενη [30]. Αξιοσημείωτες ταχύτητες επίσης σημειώνονται στην Νότια Κορέα με μέσο αριθμό 432.7 Mbps κατερχόμενης, και με πάνω από 120.000 σταθμούς παροχής 5G στο φάσμα 3.5 GHz [31]. Όπως είπαμε στόχος του 5G ήταν να πετύχει καθυστερήσεις μικρότερες από 1 ms, μέσω της βελτιστοποίησης της επεξεργασίας και δρομολόγησης δεδομένων. Κάποιες τεχνολογίες που βοηθούν στην μείωση της καθυστέρησης είναι: το edge computing, network slicing, δικτύωση ορισμένη από λογισμικό (SDN) και οι εικονικές λειτουργίες δικτύου (VNF) [32]. Αν και το 5G προσφέρει πολύ μικρότερες καθυστερήσεις σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές κυψελωδών τεχνολογιών, η καθυστέρηση έχει μετρηθεί μικρότερη από 30 ms, 23 ms λιγότερα από τις μέσες τιμές του 4G [33]. Επίσης, καθώς στα δίκτυα 5G συχνά αποτελούν πρόβλημα η παρεμβολή σήματος, η εξασθένιση και η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Για την καταπολέμηση αυτών των σφαλμάτων και την βελτίωση απόδοσης, τα 5G χρησιμοποιούν την τεχνική κωδικοποίησης MCS (Σχέδιο Διαμόρφωσης και Κωδικοποίησης). Το δίκτυο με βάση τους δείκτες ποιότητας κάθε καναλιού, όπως το σήμα προς θόρυβο και η ισχύς του σήματος, επιλέγει το κατάλληλο MCS για την μετάδοση που παρέχει την καλύτερη και αξιόπιστη εμπειρία στους χρήστες [34].

Αν και το 5G έχει συμβάλει στην εξέλιξη της τεχνολογίας και έχει αλλάξει την καθημερινότητα μας, έχει προκαλέσει επίσης ανησυχίες και ακόμη και προπαγάνδες εναντίον της χρήσης του, με πολλούς ακτιβιστές να κάνουν διαμαρτυρίες για τις επιπτώσεις του 5G στην υγεία του ανθρώπου και πως αυξάνει τις πιθανότητες καρκίνου και άλλων ασθενειών λόγω της μεγάλης “ακτινοβολίας”. Επίσης εξαιτίας του ότι το 5G ξεκίνησε την ίδια περίπου περίοδο με την εξάπλωση της πανδημίας COVID-19, υπήρξαν ακόμη και θεωρίες συνωμοσίας πως το 5G ήταν η αιτία της πανδημίας. Φυσικά όλα τα παραπάνω είναι απλά ένας μύθος αλλά ας δούμε τις αληθινές παρεμβολές που προκαλεί το 5G.

Με την εισαγωγή της πέμπτης γενιάς, χρησιμοποιούνται πολύ υψηλές συχνότητες στην μεγάλη ζώνη όπως ήδη αναφέραμε με αποτέλεσμα να εμφανιστούν ανησυχίες σχετικά με πιθανές παρεμβολές σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία [35]. Αυτά τα προβλήματα σχετίζονται με τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI) και την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) όπου τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μπορούν να προκαλέσουν μεγάλες παρεμβολές και ακτινοβολίες [36]. Οι ανησυχίες αφορούν κυρίως τον κλάδο της αεροπορίας καθώς μπορεί να υπάρξουν επιβλαβείς παρεμβολές στα ηλεκτρονικά συστήματα των αεροσκαφών, όπως τα ραντάρ. Για παράδειγμα, η χρήση της ζώνης συχνοτήτων 3,7-3,98 GHz για εφαρμογές 5G αποτελεί σημαντικό κίνδυνο παρεμβολών με τη γειτονική ζώνη συχνοτήτων που χρησιμοποιείται από ραντάρ αεροσκαφών [35]. Για την επίλυση των παραπάνω, η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC) έλαβε διάφορα μέτρα για να χειριστεί τις παρεμβολές του 5G στην αεροπορία. Αρχικά, η FCC διαφώνησε με την Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Αεροπορίας (FAA) σχετικά με πιθανές παρεμβολές μεταξύ σημάτων 5G και του εξοπλισμού αεροπλάνων. Ωστόσο, μετά την ακύρωση πολλών πτήσεων λόγω ανησυχιών, η FCC συνεργάστηκε με την AT&T και τη Verizon για την αντιμετώπιση του ζητήματος. Η FCC συμφώνησε να καθυστερήσει την κυκλοφορία του 5G χρησιμοποιώντας το φάσμα της C ζώνης, να εφαρμόσει όρια ισχύος για έξι μήνες και να δημιουργήσει ζώνες αποκλεισμού γύρω από τα αεροδρόμια για να μετριάσει τους πιθανούς κινδύνους παρεμβολών. Από την άλλη πλευρά, η FAA ανέλαβε δράση κατά των παρεμβολών 5G στην αεροπορία, εκδίδοντας προειδοποιήσεις σχετικά με πιθανές παρεμβολές κοντά σε αεροδρόμια και προτρέποντας για καθυστερήσεις στην ανάπτυξη του 5G. Η AT&T και η Verizon αρχικά απέρριψαν καθυστερήσεις, αλλά τελικά συμφώνησαν σε μια καθυστέρηση δύο εβδομάδων για την ανάπτυξη του 5G και εφάρμοσαν ζώνες αποκλεισμού 1,5 μίλια γύρω από ορισμένα αεροδρόμια. Παρά την αρχική αντίσταση, η AT&T και η Verizon προσάρμοσαν τα σχέδια χρήσης 5G γύρω από τα αεροδρόμια για να αντιμετωπίσουν τις ανησυχίες της FAA για την ασφάλεια και να αποτρέψουν διακοπές στα αεροπορικά ταξίδια και τη ναυτιλία [38] [39]. Επίσης, είπαμε πως οι δορυφόροι που λειτουργούν στο φάσμα C και επίσης οι καιρικοί δορυφόροι που λειτουργούν σε πολύ υψηλές συχνότητες 24 GHz δέχονται παρεμβολές από τα δίκτυα 5G που λειτουργούν στην μεσαία ζώνη, με αποτέλεσμα τα δεδομένα να είναι πολύ ευάλωτα [37].

Πέρα λοιπόν από τις αμφιβολίες και τις ανησυχίες που έχει προκαλέσει η πέμπτη γενιά, είναι αδιαμφισβήτητο πως εξελίσσεται ταχέως, με σημαντική αύξηση στη διαθεσιμότητα και την υιοθέτησή της από την κυκλοφορία της το 2019. Κατασκευαστές όπως η Apple αξιοποιούν τη συμβατότητα 5G στις συσκευές τους, με αποτέλεσμα το 62% των smartphone να κατασκευάζεται τώρα με συνδεσιμότητα 5G. Δημοφιλείς πάροχοι Διαδικτύου όπως η Verizon, η Google και η AT&T προσφέρουν επίσης συνδεσιμότητα 5G σε σπίτια και επιχειρήσεις, διευρύνοντας περαιτέρω την εμβέλεια της. Μόνο στις ΗΠΑ, σχεδόν 120 εκατομμύρια συσκευές 5G μπήκαν στην αγορά μέχρι το τέλος του 2023, με αύξηση 155 εκατομμύρια μονάδες να προβλέπεται έως το 2027. Σε παγκόσμιο επίπεδο, η χρήση των smartphone συμβατών με 5G αναμένεται να ξεπεράσει τα 82% έως το 2027. Ακόμη το 5G φέρνει πολλές βελτιώσεις και στην υγειονομική περίθαλψη [40]. Πλέον γίνονται έρευνες και αναπτύσσονται ιδέες για την κυκλοφορία του 5G+ και τεχνολογιών πέρα του 5G.

1.7 Πέρα της Πέμπτης Γενιάς (Beyond 5G)

Ένας όρος που θα χρησιμοποιήσουμε αρκετά σε αυτή την εργασία είναι οι γενιές και οι τεχνολογίες “Πέρα του 5G” (5G Beyond). Όταν γίνεται αναφορά σε αυτόν τον όρο, εννοούμε την εξερεύνηση και την ανάπτυξη τεχνολογιών ασύρματης επικοινωνίας που υπερβαίνουν τις δυνατότητες των υπάρχων δικτύων 5G [41]. Οι επόμενες γενιές θα εστιάζουν βελτιώσεις σε υπηρεσίες όσον αφορά την κάλυψη, το ρυθμό δεδομένων, την υψηλή ασφάλεια, το απόρρητο και την πανταχού παρούσα συνδεσιμότητα [42]. Οι έρευνες πέρα του 5G και προς το 6G περιλαμβάνουν συζητήσεις για προηγμένες τεχνολογίες όπως η χρήση ζώνης συχνοτήτων Terahertz (THz) (0,1-10 THz), η τεχνητή νοημοσύνη και άλλες τεχνολογίες, οι οποίες αναμένεται να φέρουν επανάσταση στις ασύρματες επικοινωνίες [41] [42]. Πολλές χώρες και οργανισμοί έχουν ήδη ξεκινήσει ερευνητικά έργα και συνεργασίες για να προωθήσουν την ανάπτυξη των τεχνολογιών 5G beyond, με στόχο την παροχή παγκόσμιας συνδεσιμότητας και απρόσκοπτης επικοινωνίας [42]. Στις τεχνολογίες Beyond 5G, υπάρχουν σχέδια για την ενοποίηση ασύρματων κινητών συστημάτων 5G με δορυφορικά δίκτυα για παγκόσμια κάλυψη. Αυτή η ενοποίηση στοχεύει να αξιοποιήσει τις δυνατότητες τόσο των επίγειων όσο και των δορυφορικών συστημάτων επικοινωνίας για την παροχή ασταμάτητης συνδεσιμότητας και μεταφοράς δεδομένων υψηλής ταχύτητας παγκοσμίως [43]. Για όλα τα παραπάνω και κυρίως περισσότερα για την συνεργασία δορυφορικών συστημάτων με επίγεια δίκτυα, θα αναλυθούν στο τρίτο κεφάλαιο καθώς είναι και η βασική εστίαση της εργασίας.

1.8 Στόχος Εργασίας

Ο βασικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση και βελτιστοποίηση των δορυφορικών επικοινωνιών στο πλαίσιο των μη επίγειων δικτύων, καθώς και η διερεύνηση του ρόλου τους στη μετάβαση προς τα 5G-Beyond. Δεδομένου ότι τα μη επίγεια δίκτυα αποτελούν το κλειδί για την παγκόσμια κάλυψη και τη συνδεσιμότητα σε απομακρυσμένες περιοχές, η εργασία επικεντρώνεται στην κατανόηση των προκλήσεων και στη μελέτη των τεχνολογιών που μπορούν να τις αντιμετωπίσουν.

Συγκεκριμένα, μελετώνται κρίσιμοι παράμετροι όπως οι επιδράσεις του Doppler Shift, οι απώλειες (path loss) και ο σχεδιασμός του link budget, προκειμένου να αξιολογηθεί η αξιοπιστία και αποδοτικότητα των δορυφορικών ζεύξεων. Επιπλέον, εξετάζονται νέες τεχνολογίες, όπως οι οπτικοί σύνδεσμοι επικοινωνίας, οι αναγεννητικές αρχιτεκτονικές δορυφόρων και η ενσωμάτωση του NB-IoT σε δορυφορικά συστήματα, που επιτρέπουν την αύξηση της αποδοτικότητας των δορυφορικών δικτύων και τη μείωση της καθυστέρησης επικοινωνίας.

Ο τελικός στόχος της εργασίας, λοιπόν, είναι να προσφερθεί μια ολοκληρωμένη κατανόηση των δυνατοτήτων και των προοπτικών των μη επίγειων δικτύων, να αναδειχθούν βέλτιστες στρατηγικές βελτίωσης της απόδοσης τους και να σημειωθεί ο ρόλος τους στην εξέλιξη προς το μέλλον, όπου η δορυφορική τεχνολογία θα είναι πλήρως ενσωματωμένη στα παγκόσμια δίκτυα κινητών επικοινωνιών.

Κεφάλαιο 2: Δορυφορικά Συστήματα

2.1 Η Έννοια του Δορυφόρου

Ένας τεχνητός δορυφόρος είναι μια τεχνητή συσκευή που περιφέρεται γύρω από ένα μεγαλύτερο αντικείμενο και εκτοξεύεται στο διάστημα με σκοπό την επίτευξη διαφόρων στόχων. Οι δορυφόροι χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως η τηλεσκοπηση, η πλοήγηση (π.χ. GPS), η αστρονομία, οι τηλεπικοινωνίες, οι προγνώσεις καιρού, και οι στρατιωτικές υπηρεσίες. Σε αντίθεση με τους φυσικούς δορυφόρους, όπως το φεγγάρι, οι τεχνητοί δορυφόροι σχεδιάζονται και αναπτύσσονται ειδικά για να τοποθετηθούν σε τροχιά γύρω από τη Γη ή άλλα ουράνια σώματα [43]. Ένας τεχνητός δορυφόρος αποτελείται από διάφορα υποσυστήματα και διακρίνεται σε δύο κύρια τμήματα: το “λεωφορείο” του δορυφόρου και το φορτίο του δορυφόρου (payload). Το “λεωφορείο” του δορυφόρου ελέγχει τη δομή, την ισχύ, τη θερμοκρασία και τη σταθερότητα της πτήσης, ενώ το φορτίο εκτελεί την κύρια λειτουργία του δορυφόρου, όπως η επικοινωνία ή η παρατήρηση της Γης [44]. Τα κύρια υποσυστήματα που απαρτίζουν έναν δορυφόρο είναι τα εξής:

- **Σύστημα Ισχύος:** Οι δορυφόροι χρησιμοποιούν ηλιακούς συλλέκτες ή, σπανιότερα, πυρηνική ενέργεια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα ηλιακά πάνελ, που είναι τα πιο συνηθισμένα, μετατρέπουν το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια, τροφοδοτώντας τα συστήματα του δορυφόρου και φορτίζοντας τις μπαταρίες για χρήση σε περιόδους χωρίς ηλιακό φως. Η συνεχής τροφοδοσία είναι κρίσιμη για τη διάρκεια ζωής και τη λειτουργία των τηλεπικοινωνιακών δορυφόρων.
- **Έλεγχος Τροχιάς:** Για να διατηρηθεί ένας δορυφόρος στη σωστή θέση και σε σταθερή λειτουργία, χρησιμοποιούνται προωθητικές συσκευές και τροχοί αντίδρασης, οι οποίοι ρυθμίζουν την ταχύτητα και την κατεύθυνση του δορυφόρου. Παράλληλα, ειδικοί αισθητήρες βοηθούν στην προσαρμογή της θέσης του δορυφόρου.
- **Σύστημα Επικοινωνίας:** Οι δορυφόροι διαθέτουν κεραίες και εξοπλισμό για τη μετάδοση και λήψη δεδομένων, τα οποία μεταφέρονται από και προς επίγειους σταθμούς ή άλλους δορυφόρους. Τα συστήματα αυτά επιτρέπουν την ανταλλαγή πληροφοριών με υψηλή ταχύτητα και αξιοπιστία.
- **Φορτίο:** Περιλαμβάνει τον ειδικό εξοπλισμό που συλλέγει και επεξεργάζεται τα δεδομένα. Ο τύπος του φορτίου εξαρτάται από τη συγκεκριμένη αποστολή του δορυφόρου. Για παράδειγμα, στους τηλεπικοινωνιακούς δορυφόρους, αυτό το τμήμα περιλαμβάνει αναμεταδότες ενώ αν πρόκειται για μετεωρολογικό δορυφόρο, μπορεί να περιλαμβάνει ραντάρ ή κάμερες υψηλής ανάλυσης. [45][46].

Οι δορυφόροι εκτοξεύονται στο διάστημα μέσω πυραύλων ή διαστημικών λεωφορείων. Μόλις φτάσουν στην επιθυμητή τροχιά, παραμένουν εκεί λόγω της ισορροπίας ανάμεσα στη βαρυτική έλξη της Γης και στη φυγόκεντρη δύναμη που δημιουργείται από την υψηλή ταχύτητά τους. Η βαρυτική δύναμη τους “έλκει” προς τη Γη, ενώ η ταχύτητά τους δημιουργεί μια αντίθετη δύναμη, εμποδίζοντας την πτώση τους. Αυτή η ισορροπία είναι θεμελιώδης για τη λειτουργία των δορυφόρων [45].

Οι δορυφόροι διακρίνονται σε διάφορους τύπους, ανάλογα με τη χρήση τους και τις αποστολές που εξυπηρετούν:

- **Τηλεπικοινωνιακοί Δορυφόροι:** Χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση σημάτων τηλεπικοινωνίας, προσφέροντας δορυφορικό Internet, τηλεόραση και επικοινωνία σε απομακρυσμένες περιοχές.
- **Μετεωρολογικοί Δορυφόροι:** Καταγράφουν και μεταδίδουν μετεωρολογικά δεδομένα, όπως θερμοκρασία, σύννεφα και βροχοπτώσεις, βοηθώντας στην πρόγνωση καιρού.
- **Δορυφόροι Πλοήγησης (GPS):** Βασίζονται σε αστερισμούς δορυφόρων και προσφέρουν ακριβή γεωγραφικά δεδομένα και πληροφορίες χρόνου, χρησιμοποιούμενοι κυρίως για πλοήγηση.
- **Επιστημονικοί Δορυφόροι:** Σχεδιάζονται για τη μελέτη φυσικών φαινομένων, όπως η παρατήρηση της γης ή η εξερεύνηση του διαστήματος.
- **Στρατιωτικοί Δορυφόροι:** Χρησιμοποιούνται από τις ένοπλες δυνάμεις για σκοπούς στρατηγικής παρακολούθησης, επικοινωνίας και πλοήγησης.

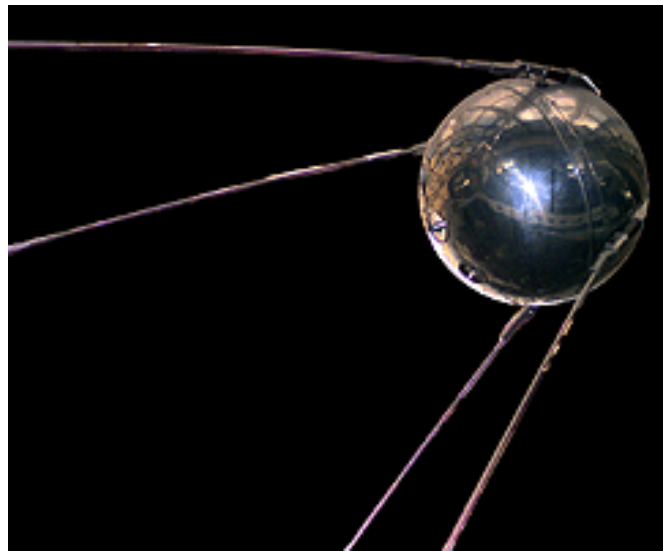
Οι δορυφορικές τροχιές καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από τους νόμους αστρικών περιφορών του Γερμανού αστρονόμου Johannes Kepler, οι οποίοι περιγράφουν την κίνηση των πλανητών γύρω από τον ήλιο και εφαρμόζονται και στους δορυφόρους. Οι νόμοι αυτοί επιτρέπουν ακριβείς υπολογισμούς για τις τροχιές, βελτιστοποιώντας την κάλυψη, την ακρίβεια τοποθέτησης και τη συνολική απόδοση των δορυφόρων. Τα συστήματα πλοήγησης, όπως το GPS, βασίζονται σε αυτούς τους νόμους για να παρέχουν ακριβείς υπηρεσίες εντοπισμού και πλοήγησης [44]. Ας κάνουμε μία συνοπτική αναφορά στους νόμους του Kepler:

- **Πρώτος Νόμος (Νόμος των Ελλείψεων):** Οι πλανήτες και οι δορυφόροι περιφέρονται γύρω από τον ήλιο ή άλλα ουράνια σώματα κατά μήκος μιας ελλειπτικής διαδρομής, με τον ήλιο ή το κεντρικό σώμα να βρίσκεται σε μία από τις εστίες της έλλειψης. Αυτή η αρχή βοηθά στην κατανόηση του σχήματος και του προσανατολισμού των τροχιών των δορυφόρων.
- **Δεύτερος νόμος (Νόμος Ίσων Περιοχών):** Σύμφωνα με τον νόμο αυτό, μια γραμμή που συνδέει έναν δορυφόρο με το κεντρικό σώμα σαρώνει ίσες περιοχές σε ίσους χρόνους. Αυτό σημαίνει ότι η ταχύτητα του δορυφόρου μεταβάλλεται, κινείται πιο γρήγορα όταν βρίσκεται πιο κοντά στη Γη (περίγειο) και πιο αργά όταν απομακρύνεται (απόγειο). Η μεταβλητή ταχύτητα επηρεάζει την ποιότητα και τη σταθερότητα των επικοινωνιών, ειδικά για δορυφόρους σε ελλειπτικές τροχιές.

- **Τρίτος Νόμος (Νόμος των Αρμονιών):** Σύμφωνα με τον τρίτο νόμο, το τετράγωνο της τροχιακής περιόδου ενός πλανήτη ή δορυφόρου είναι ανάλογο με τον κύβο του μείζων άξονα της τροχιάς του. Αυτή η σχέση επιτρέπει την πρόβλεψη τροχιακών περιόδων και αποστάσεων, απαραίτητο για τον σχεδιασμό εκτοξεύσεων δορυφόρων και τη διατήρηση τροχιακών διαδρομών.

2.2 Ιστορική Αναδρομή

Η ιστορία των δορυφόρων ξεκίνησε το 1957 με την εκτόξευση του Sputnik 1 (Εικόνα 1) από τη Σοβιετική Ένωση, ο οποίος ήταν ο πρώτος τεχνητός δορυφόρος σε τροχιά γύρω από τη Γη. Η εκτόξευση αυτή ξεκίνησε την ιστορία των δορυφορικών επικοινωνιών, δημιουργώντας τις βάσεις για την ανάπτυξη της διαστημικής τεχνολογίας και την έναρξη του Διαστημικού Αγώνα (Space Race) [69].



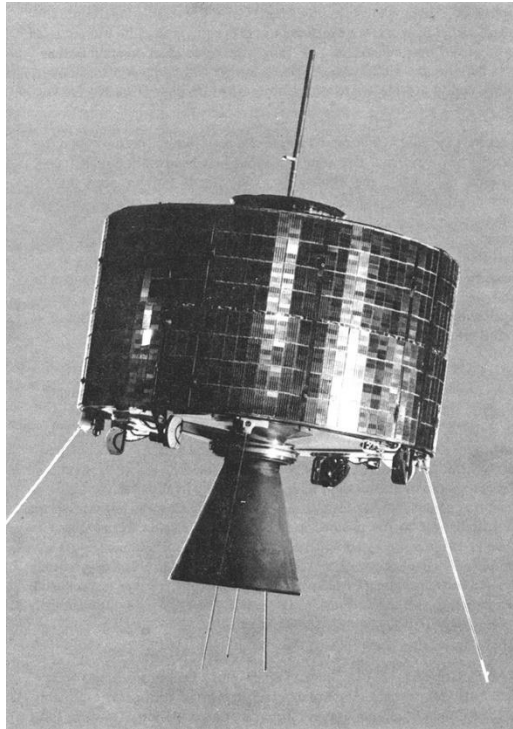
Εικόνα 1: Ο πρώτος τεχνητός δορυφόρος Sputnik 1 [71].

Μετά την επιτυχία του Sputnik 1, οι Ηνωμένες Πολιτείες εκτόξευσαν τον πρώτο τους δορυφόρο, τον Explorer 1, το 1958. Αυτός ο δορυφόρος ανακάλυψε τις ζώνες ακτινοβολίας Van Allen, που πήραν το όνομα από τον ερευνητή James Van Allen [70]. Έπειτα, το 1962 εκτοξεύτηκε ο πρώτος τηλεπικοινωνιακός δορυφόρος, Telstar 1 (Εικόνα 2), ο οποίος αναπτύχθηκε σε συνεργασία της AT&T και της NASA. Με μεγάλη επιτυχία λειτούργησε την πρώτη ζωντανή τηλεοπτική μετάδοση μεταξύ Ευρώπης και Ηνωμένων Πολιτειών, αποτελώντας τον πρώτο εμπορικό δορυφόρο επικοινωνίας. Ο Telstar 1 λειτούργησε σε χαμηλή τροχιά γύρω από τη Γη (LEO), αν και περιορισμένος κατάφερε να αποδείξει τις δυνατότητες των δορυφορικών επικοινωνιών [72]. Εκτός από τη χρήση για τηλεπικοινωνίες, ο Telstar 1 είχε επίσης επιστημονικό σκοπό, καθώς χρησιμοποιήθηκε από την NASA για την παρακολούθηση της κατανομής πρωτονίων και ηλεκτρονίων στις ζώνες ακτινοβολίας Van Allen. Παρά τις σημαντικές τεχνικές δυσκολίες, όπως η ζημιά από τη ραδιενέργεια που προκλήθηκε από την πυρηνική δοκιμή του Starfish Prime, ο δορυφόρος συνέχισε να λειτουργεί μέχρι το 1963 [73].



Εικόνα 2: Ο πρώτος τηλεπικοινωνιακός δορυφόρος Telstar 1 [73].

Τέλος, αξίζει να αναφέρουμε τους δορυφόρους *Syncom* στην ιστορική μας αναδρομή. Αναπτύχθηκαν από τον Δρ. Χάρολντ Ρόζεν και την ομάδα του στην Hughes Aircraft. Το 1963, ο *Syncom 2* έγινε ο πρώτος δορυφόρος που λειτούργησε σε γεωσύγχρονη τροχιά. Αποτέλεσε σημαντική εξέλιξη για την ανάπτυξη των δορυφορικών επικοινωνιών, καθώς επέτρεπε συνεχή κάλυψη και σύνδεση για μακρινές αποστάσεις, κάτι που οι προηγούμενοι δορυφόροι δεν μπορούσαν να προσφέρουν. Η επιτυχία του *Syncom 2* επέτρεψε την υποστήριξη πολλαπλών φωνητικών κυκλωμάτων και τηλεοπτικών καναλιών, που αποτελούσαν σημαντική ανακάλυψη σε σύγκριση με τις διαθέσιμες υποθαλάσσιες καλωδιακές συνδέσεις της εποχής. Με αυτήν την καινοτομία, ο δορυφόρος έθεσε τις βάσεις για τη δορυφορική τηλεπικοινωνία, ενώ η λειτουργία του τράβηξε το ενδιαφέρον της Comsat Corporation, η οποία άρχισε να αναζητά συνεργασίες για την κατασκευή ακόμα πιο εξελιγμένων δορυφόρων που θα μπορούσαν να υποστηρίξουν τις ανάγκες επικοινωνίας σε παγκόσμια κλίμακα [74]. Ο *Syncom 3* (Εικόνα 3), που εκτοξεύθηκε το 1964, ήταν ο πρώτος δορυφόρος που μετέδωσε ζωντανά τηλεοπτικό σήμα μεταξύ ΗΠΑ και Ιαπωνίας, κατά τη διάρκεια των Ολυμπιακών Αγώνων του Τόκιο, κάνοντας έτσι ένα ακόμη βήμα προς την παγκοσμιοποίηση των τηλεπικοινωνιών [66].



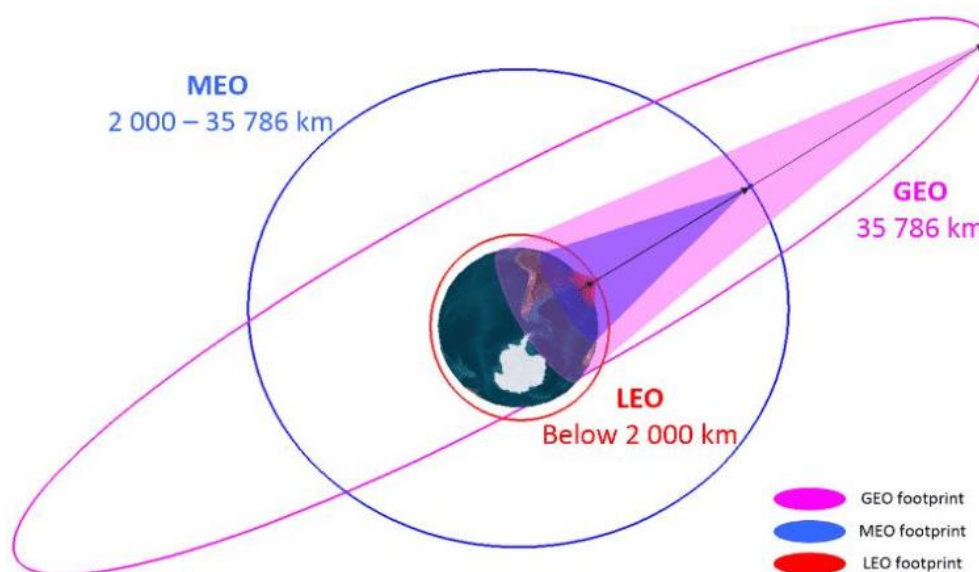
Εικόνα 3: Syncom 3, ο πρώτος δορυφόρος σε γεωσύγχρονη τροχιά [67].

Σήμερα, οι δορυφόροι χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλούς τομείς, όπως η πλοήγηση (GPS), οι στρατιωτικές επικοινωνίες, η πρόγνωση καιρού και η επιστημονική έρευνα. Το GPS, που αρχικά αναπτύχθηκε από το Υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ, έχει εξελιχθεί σε παγκόσμια υποδομή που χρησιμοποιείται από κυβερνήσεις, επιχειρήσεις και ιδιώτες για ακριβή καθοδήγηση θέσης και χρόνου. Η ανάπτυξη των σύγχρονων δορυφορικών αστερισμών, όπως το *Starlink* της SpaceX και το OneWeb, φέρνει νέες δυνατότητες στον τομέα των επικοινωνιών, παρέχοντας υπηρεσίες διαδικτύου υψηλής ταχύτητας σε απομακρυσμένες και αγροτικές περιοχές. Αυτές οι εξελίξεις, με την είσοδο των δορυφόρων σε συστήματα 5G και πέρα, επεκτείνουν τις δυνατότητες των δορυφόρων και αναμένεται να διαμορφώσουν τον τρόπο με τον οποίο οι δορυφορικές επικοινωνίες θα ενσωματωθούν στις καθημερινές μας ζωές στο μέλλον.

2.3 Τροχιές Δορυφόρων

Οι δορυφόροι κατηγοριοποιούνται συνήθως με βάση την τροχιά και το ύψος τους, δηλαδή την απόσταση από την επιφάνεια της Γης, το οποίο επηρεάζει άμεσα την κάλυψή τους και την ταχύτητα με την οποία ταξιδεύουν γύρω από τον πλανήτη. Όπως είπαμε όταν εκτοξευτεί ένας δορυφόρος, κατευθείαν θα μπει στην τροχιά του και βάση των μηχανισμών που ήδη αναφέραμε θα παραμείνει σε αυτή την τροχιά για συγκεκριμένους σκοπούς. Ανάλογα κάθε τύπο δορυφόρου, οι κατασκευαστές και οι προγραμματιστές λαμβάνουν υπόψη τις λειτουργίες και τον προορισμό του, τις υπηρεσίες που πρέπει να καλύψει, το κόστος, την εμβέλεια, τις ταχύτητες και τις καθυστερήσεις. Όλα τα παραπάνω διαφέρουν ανάλογα τους τρεις κύριους τύπους δορυφόρων με βάση τις τροχιές τους, ο καθένας έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και εξυπηρετεί διαφορετικούς σκοπούς και βρίσκονται σε διαφορετικά υψόμετρα. Οι τεχνητοί δορυφόροι λειτουργούν σε διαφορετικές τροχιές όπως θα δούμε και παρακάτω πιο αναλυτικά, ο καθένας εξυπηρετεί διαφορετικούς σκοπούς και ποικίλλει σε υψόμετρο. Οι τρεις τύποι δορυφόρων με βάση τις τροχιές τους λοιπόν είναι:

- **Χαμηλή περί της Γης Τροχιά (LEO):** Λειτουργούν σε υψόμετρο από 200 έως 2000 χιλιόμετρα, η τροχιά LEO χρησιμοποιείται συνήθως για παρατήρηση της γης, επιστημονική έρευνα και στρατιωτικές έρευνες. Οι δορυφόροι σε αυτή την τροχιά ολοκληρώνουν μια τροχιά περίπου κάθε 90-120 λεπτά.
- **Μεσαία περί της Γης Τροχιά (MEO):** Βρίσκεται μεταξύ 2000 και 35.786 χιλιομέτρων, το MEO χρησιμοποιείται συνήθως για δορυφόρους πλοήγησης (GPS), με περιόδους τροχιάς που κυμαίνονται από 6 έως 24 ώρες .
- **Γεωσύγχρονη Τροχιά (GEO):** Περίπου 35.786 χιλιόμετρα πάνω από τον Ισημερινό, η συγκεκριμένη τροχιά επιτρέπει στους δορυφόρους να παραμένουν σε σταθερή θέση σε σχέση με την επιφάνεια της Γης, καθιστώντας τον ιδανικό για δορυφόρους επικοινωνίας [44].



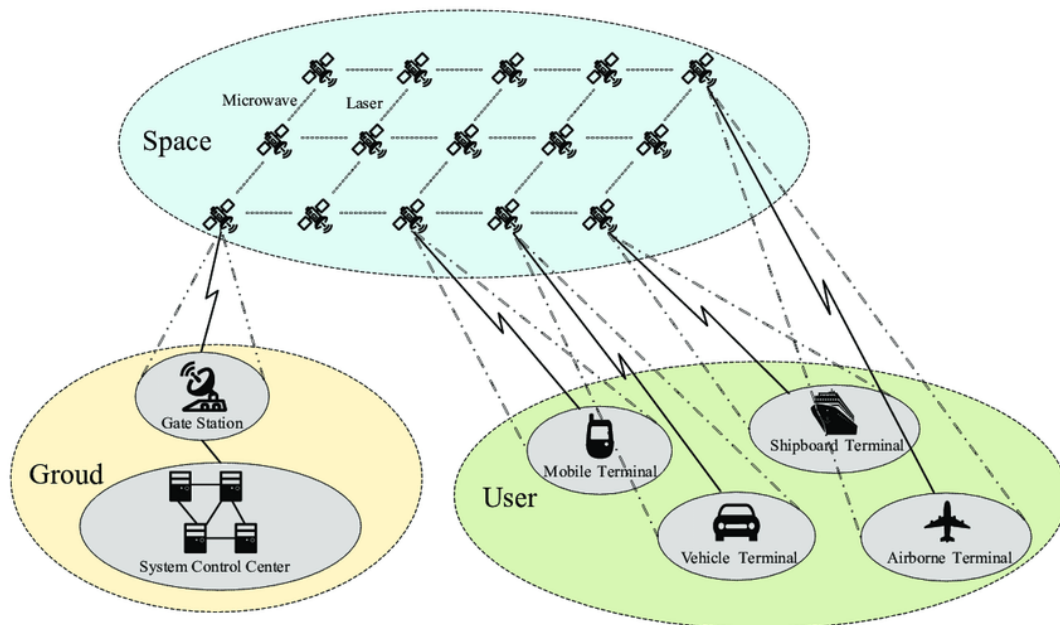
Εικόνα 4: Οι δορυφορικές τροχιές περί της Γης.

2.3.1 Χαμηλή περί της Γης Τροχιά (LEO)

Οι δορυφόροι LEO αποτελούν μια σημαντική καινοτομία στη δορυφορική τεχνολογία, οι οποίοι βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τη Γη σε υψόμετρο μεταξύ 500 και 2000 χιλιομέτρων [48]. Λόγω του χαμηλού υψομέτρου, τα σήματα που μεταδίδονται από και προς τους δορυφόρους LEO έχουν μικρότερη απόσταση να διανύσουν, με αποτέλεσμα να μειώνονται οι καθυστερήσεις διάδοσης του σήματος. Αντίθετα, οι γεωστατικοί δορυφόροι, που βρίσκονται πολύ πιο μακριά, έχουν μεγαλύτερη καθυστέρηση λόγω του μεγαλύτερου χρόνου διαδρομής του σήματος [51].

Αναπτύσσονται κυρίως για την παροχή και κάλυψη παγκόσμιας πρόσβασης στο Διαδίκτυο σε απομακρυσμένες και αγροτικές περιοχές και γενικότερα περιοχές όπου τα επίγεια ευρυζωνικά δίκτυα δεν είναι διαθέσιμα ή είναι αδύναμα. Ξεκίνησαν σαν μία εναλλακτική λύση σταθερής ασύρματης πρόσβασης στο Διαδίκτυο που απαιτούσε την τοποθέτηση ενός δορυφορικού πιάτου σε κτίρια [52]. Με την εξέλιξή τους σήμερα, εταιρείες όπως η Space X παρέχουν πιάτα ανθεκτικά στις καιρικές συνθήκες που μπορούν να τοποθετηθούν ακόμη και σε πλοία και σκάφη, επιτρέποντας σε ναυτιλιακές εταιρίες και οργανισμούς να διατηρήσουν τη συνδεσιμότητα όπου κι αν πάνε. Μαζί με την SpaceX, εταιρίες όπως η OneWeb, η Telesat και το Project Kuiper της Amazon πρωτοστατούν στην εκτόξευση αστερισμών LEO[48]. Πέρα από τη συνδεσιμότητα στο Διαδίκτυο, οι δορυφόροι LEO παίζουν σημαντικό ρόλο στην παρατήρηση και τηλεσκόπηση της Γης, στην πρόγνωση του καιρού ακόμη και στις στρατιωτικές υπηρεσίες [49].

Σε αντίθεση με τους γεωστατικούς δορυφόρους, οι οποίοι παραμένουν σταθεροί σε σχέση με ένα σημείο της Γης, οι δορυφόροι LEO περιφέρονται σε μεγάλες ταχύτητες περίπου των 7.8 km/s, ολοκληρώνοντας τροχιές σε περίπου 90 έως 110 λεπτά. Λόγω της μεγάλης ταχύτητάς τους και καθώς κινούνται συνεχώς εκτός και εντός εμβέλειας, για μεγαλύτερη κάλυψη και συνεχή συνδεσιμότητα χωρίς διακοπές, χρησιμοποιούνται αστερισμοί δορυφόρων, δηλαδή χιλιάδες δορυφόροι σε χαμηλή τροχιά που επικοινωνούν και συνεργάζονται μεταξύ τους, σχηματίζοντας έτσι ένα δίκτυο στο διάστημα. Αυτοί οι δορυφόροι επικοινωνούν έπειτα με τερματικούς επίγειους σταθμούς στη Γη που είναι εξοπλισμένοι με κεραίες για να επικοινωνούν με τους δορυφόρους στην εμβέλειά τους. Μέσω της τεχνολογίας ISL (Διαδορυφορικές Συνδέσεις), οι δορυφόροι μέσα στον ίδιο αστερισμό ανταλλάσσουν και μεταδίδουν τα δεδομένα μεταξύ τους μέχρι να φτάσουν στον πιο κοντινό δορυφόρο εντός εμβέλειας του σταθμού ο οποίος θα στείλει τα δεδομένα στον επίγειο σταθμό. Έτσι οι χρήστες παραμένουν συνδεδεμένοι ακόμη και σε περιοχές χωρίς τοπικούς επίγειους σταθμούς. Οι αστερισμοί είναι τοποθετημένοι σε διάφορες τροχιές για να παρέχουν παγκόσμια κάλυψη, εξασφαλίζοντας ότι αν ένας δορυφόρος απομακρύνεται από την εμβέλεια, ένας άλλος μπαίνει στο οπτικό πεδίο, διευκολύνοντας τις απρόσκοπτες μεταβιβάσεις και τη συνεχή εξυπηρέτηση. Αυτό το πλεονέκτημα του handoff καθιστά τους LEO δορυφόρους κατάλληλους για κινούμενα αντικείμενα και συσκευές IoT [48] [49].



Εικόνα 5: Αρχιτεκτονική Αστερισμού Δορυφόρων LEO [50].

Ένα από τα σημαντικότερα προτερήματα των δορυφόρων LEO είναι η ικανότητά τους να παρέχουν συνδέσεις Internet χαμηλής καθυστέρησης και υψηλής ταχύτητας. Επειδή οι δορυφόροι LEO βρίσκονται πιο κοντά στη Γη αντίθετα με τους γεωσύγχρονους έχουν πολύ μειωμένη καθυστέρηση στο χρόνο μετάδοσης δεδομένων, με αποτέλεσμα η καθυστέρηση να είναι μόλις 20-40 χιλιοστά του δευτερολέπτου (ms), κάτι που καθιστά τις υπηρεσίες των LEO κατάλληλες για τηλεδιασκέψεις, διαδικτυακά παιχνίδια, εφαρμογές IoT και άλλα [51]. Οι ταχύτητες Internet που επιτυγχάνουν οι δορυφόροι LEO ποικίλουν ανάλογα με την τοποθεσία, τα εμπόδια, τον πάροχο καθώς και την αρχιτεκτονική και τη ζώνη συχνότητας που χρησιμοποιούν. Τυπικές ταχύτητες λήψης σημειώνονται από 50 έως 250 Mbps σε βέλτιστες συνθήκες όπου δεν υπάρχουν πολλά εμπόδια [52]. Οι δορυφόροι LEO έχουν επίσης μεγαλύτερο εύρος ζώνης από τους GEO, συνεπώς όσο αφορά τις ζώνες συχνοτήτων, οι LEO λειτουργούν συνήθως στις Ka band (26 - 40 GHz) και Ku band (12-18 GHz). Λόγω της αναφοράς που κάναμε, παρακάτω οι πιο γνωστές εταιρείες παροχής LEO και η ζώνη συχνότητας που χρησιμοποιούν:

- Το Starlink της SpaceX: Χρησιμοποιεί τα Ku και Ka bands για να παρέχει παγκόσμια κάλυψη στο Διαδίκτυο.
- OneWeb: Χρησιμοποιεί Ku Band στον αστερισμό του.
- Telesat: Χρησιμοποιεί το Ka-Band για τους αστερισμούς τους, παρέχοντας παγκόσμια, υψηλής ταχύτητας ευρυζωνική σύνδεση στο Διαδίκτυο.
- Project Kuiper της Amazon: Χρησιμοποιεί το Ka-Band.

Για τα παραπάνω, περισσότερα θα αναλυθούν αργότερα στο κεφάλαιο. Πέρα από την χαμηλή καθυστέρηση, υψηλές ταχύτητες και παγκόσμια κάλυψη που προσφέρουν οι δορυφόροι χαμηλής τροχιάς, αντιμετωπίζουν και πάρα πολλές προκλήσεις σχετικά με τις τροχιές τους, τα κόστη, την ασφάλεια και άλλα.

Αρχικά, μία σημαντική πρόκληση είναι το κόστος και η πολυπλοκότητα της εκτόξευσης και της διατήρησης ενός μεγάλου αστερισμού δορυφόρων. Οι δορυφόροι LEO έχουν μικρότερη διάρκεια ζωής από τους δορυφόρους GEO, λόγω της ατμοσφαιρικής αντίστασης και των τροχιακών υπολειμμάτων που υποβαθμίζουν την απόδοσή τους και αυξάνουν τον κίνδυνο σύγκρουσης. Για παράδειγμα το 2022, η Starlink έχασε περισσότερους από 40 δορυφόρους από μία ηλιακή καταιγίδα. Οι δορυφόροι σε αστερισμούς πρέπει να αναπληρώνονται σε τακτική βάση καθώς γίνονται ελαττωματικοί ή φτάνουν στο τέλος της ζωής τους. Έτσι μόνο για τη συντήρηση των δορυφόρων το κόστος γίνεται πολύ υψηλό καθώς και για τον αυξημένο αριθμό επίγειων σταθμών που χρειάζονται οι αστερισμοί αφού πολύ δορυφόροι είναι πιθανό να μην διαθέτουν τεχνολογίες ISL.

Επίσης σημαντική πρόκληση για τους δορυφόρους LEO στην ευρυζωνική σύνδεση είναι η διαχείριση του φάσματος. Η εγγύτητα του LEO στη Γη περιπλέκει τον συντονισμό συχνοτήτων με τα επίγεια δίκτυα. Για αυτό αναπτύσσονται καινοτόμες στρατηγικές κοινής χρήσης φάσματος και αποφυγής παρεμβολών, ειδικά με την επέκταση των δικτύων 5G. Υπάρχει μεγάλη ζήτηση για φάσμα και περιορισμένες επιλογές καθώς δορυφορικά και επίγεια δίκτυα μοιράζονται τις ζώνες συχνοτήτων. Έχει γίνει ένας διαχωρισμός για τις ζώνες Ku και Ka τις οποίες μοιράζονται επίγεια και δορυφορικά δίκτυα. Και πάλι όμως υπάρχει μεγάλη συμφόρηση του φάσματος με την εκτόξευση και χρήση παραπάνω δορυφόρων τα τελευταία χρόνια, με αποτέλεσμα οι εταιρείες να εξετάζουν την υποστήριξη υψηλότερων φασμάτων. Τέλος, το χαμηλότερο υψόμετρο των δορυφόρων LEO τους καθιστά πιο ευάλωτους σε παρεμβολές από επίγειες πηγές και κυβερνοεπιθέσεις, θέτοντας προκλήσεις για την ασφάλεια τους [49].

Συνοπτικά, οι δορυφόροι LEO έχουν μεταμορφώσει το μέλλον της συνδεσιμότητας και των επικοινωνιών με τη δυνατότητα παροχής υψηλής ταχύτητας, χαμηλής καθυστέρησης σύνδεσης στο Διαδίκτυο παγκοσμίως, ωφελώντας ιδιαίτερα τις απομακρυσμένες και υπό-εξυπηρετούμενες περιοχές. Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, οι προκλήσεις των περιορισμένων πόρων, των κινδύνων ασφαλείας και των διαστημικών συγκρούσεων πρέπει να αντιμετωπιστούν για να διασφαλιστεί η βιώσιμη ανάπτυξη των αστερισμών LEO. Ο κύριος στόχος για την εξέλιξη τους, είναι οι αστερισμοί LEO να συμπληρώσουν την επίγεια υποδομή 5G για να αυξήσουν την κάλυψη του δικτύου και να παρέχουν εφεδρική υποστήριξη σε περίπτωση φυσικών καταστροφών όπως σεισμοί, πλημμύρες και τυφώνες. Επιπλέον, θα βοηθήσουν στην ανάπτυξη προηγμένων κινητών συσκευών και συσκευών IoT επόμενης γενιάς, παρέχοντας υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων και χαμηλές καθυστερήσεις. Ο αγώνας δρόμου για την ανάπτυξη δορυφόρων με δυνατότητα 5G έχει ήδη ξεκινήσει με πρωταγωνιστή τον Elon Musk και την Space X όπως θα δούμε πιο αναλυτικά παρακάτω.

2.3.2 Μεσαία περί της Γης Τροχιά (ΜΕΟ)

Οι δορυφόροι Μεσαίας περί της Γης Τροχιάς (ΜΕΟ) προσφέρουν μια ισορροπία μεταξύ μεγάλης κάλυψης και χαμηλής καθυστέρησης. Λειτουργούν σε υψόμετρα περίπου μεταξύ 2.000 έως 36.000 χιλιομέτρων πάνω από την επιφάνεια της Γης, παρέχοντας μια ισορροπία μεταξύ των χαρακτηριστικών των LEO δορυφόρων και των GEO δορυφόρων [53]. Οι δορυφόροι ΜΕΟ χρησιμοποιούνται κυρίως για συγκεκριμένες εφαρμογές επικοινωνίας, όπως κινητές δορυφορικές υπηρεσίες, ευρυζωνικές υπηρεσίες πολυμέσων. Το ενδιαμέσο υψόμετρο τους επιτρέπει να παρέχουν ακριβείς πληροφορίες θέσης και καλύτερη κάλυψη σε σύγκριση με τους δορυφόρους LEO [54]. Έτσι αξιοσημείωτη εφαρμογή τους είναι στα παγκόσμια συστήματα πλοήγησης, με πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης (GPS) μαζί με άλλα παγκόσμια δορυφορικά συστήματα πλοήγησης όπως το Galileo, το GLONASS και το BeiDou. Η Διαστημική Δύναμη των ΗΠΑ μέχρι στιγμής λειτουργεί έναν αστερισμό 24 δορυφόρων GPS σε υψόμετρο περίπου 20.200 χιλιομέτρων. Πέρα από την πλοήγηση, οι δορυφόροι ΜΕΟ αναγνωρίζονται όλο και περισσότερο για τις δυνατότητές τους στην ενίσχυση των επικοινωνιών, ιδιαίτερα σε περιοχές μεγάλου πλάτους όπως η Βόρεια Ρωσία, ο Καναδάς και η Αλάσκα χάρη της τροχιάς Molniya εντός του ΜΕΟ που επιτρέπει βελτιωμένη κάλυψη σήματος σε αυτές τις περιοχές για παρακολούθηση καιρού και ενίσχυση των επικοινωνιών [62].

Έχουν μεγαλύτερες περιόδους τροχιάς και μεγαλύτερη κάλυψη από τους LEO, με αποτέλεσμα οι αστερισμοί ΜΕΟ να απαιτούν λιγότερους δορυφόρους για πλήρη κάλυψη της Γης σε σύγκριση με τους χιλιάδες δορυφόρους που απαιτούνται για τους LEO. Οι δορυφόροι ΜΕΟ είναι ορατοί για πολύ μεγαλύτερες χρονικές περιόδους από τους δορυφόρους LEO, συνήθως μεταξύ 2 και 8 ωρών και πραγματοποιούν μία μεταβίβαση στον επόμενο δορυφόρο ανά μία ώρα. Λόγω των λιγότερων μεταβιβάσεων που απαιτούν οι ΜΕΟ, παρέχουν σταθερό και αξιόπιστο δίκτυο με καλύτερη ισχύ και αξιοπιστία σήματος και επίσης παρέχουν πιο ακριβείς πληροφορίες σε σχέση με τους GEO χάρη στο υψόμετρό τους, για αυτό και χρησιμοποιούνται ευρέως στα συστήματα GPS όπως είπαμε και επικοινωνούν με τους επίγειους δείκτες εξασφαλίζοντας ότι οι χρήστες λαμβάνουν ακριβείς πληροφορίες τοποθεσίας για πλοήγηση και άλλες εφαρμογές. Προσφέρουν επίσης χαμηλότερο χρόνο καθυστέρησης σήματος σε σύγκριση με τους δορυφόρους GEO λόγω της πιο κοντινής τους απόστασης από τη Γη, αν και δεν ξεπερνούν τα χαμηλά επίπεδα καθυστέρησης του LEO [54].

Μέχρι στιγμής η κυρίαρχη εταιρεία στην Μεσαία Τροχιά είναι ο πάροχος δορυφορικού δικτύου τηλεπικοινωνιών SES. Παρέχουν μετάδοση βίντεο και δεδομένων παγκοσμίως σε ραδιοηλεκτρονικούς φορείς, παρόχους Internet, εταιρείες κινητών και σταθερών δικτύων και άλλα [55]. Η πρώτη γενιά αστερισμών ΜΕΟ που εκτόξευσε η SES το 2013 είναι γνωστή ως O3b. Ο αστερισμός των δορυφόρων O3b λειτουργεί στα 8000 km πάνω από τον Ισημερινό. Σε αυτό το υψόμετρο, η καθυστέρηση σήματος είναι συνήθως κάτω από 130 msec. Κάθε δορυφόρος χρησιμοποιεί Ka Band κεραίες (26 - 40 GHz) με διάμετρο 700 km και έχει συνολική χωρητικότητα 16 Gbit/s. Το σύστημα O3b παρέχει ταχύτητες συνδεσιμότητας μέχρι και 62 Mbps με κύριο στόχο τις ναυτιλιακές υπηρεσίες [57]. Η εξέλιξη του O3b είναι ο αστερισμός O3b mPOWER που λειτούργησε πρώτη φορά το 2022 σε συνεργασία με την Boeing. Αποτελείται από 6 δορυφόρους και παρέχει ταχύτητες από 50 Mbps έως και 10 Gbps και αξιοποιεί πλήρως το φάσμα Ka band [59]. Μέχρι πρόσφατα, ο αστερισμός της SES καλύπτει το 96% της Γης και έχουν περισσότερα σχέδια για απομακρυσμένες και αγροτικές περιοχές [58].

Παρά τα πλεονεκτήματά των MEO που αναφέραμε, αντιμετωπίζουν και την μεγάλη πρόκληση της ακτινοβολίας. Οι δορυφόροι MEO λειτουργούν σε υψόμετρα όπου εκτίθενται σε υψηλότερα επίπεδα ακτινοβολίας σε σύγκριση με τους δορυφόρους LEO. Επίσης, υπάρχει έντονη παρουσία περιβαλλόντων έντονης ακτινοβολίας όπως οι ζώνες Van Allen. Για να αντιμετωπιστούν αυτά τα φαινόμενα, οι δορυφόροι πρέπει να κατασκευάζονται με ηλεκτρονικά υποσυστήματα και εξοπλισμούς κατά της ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα το κόστος των MEO να είναι πολύ υψηλό και να είναι πιο δαπανηροί ως προς την λειτουργία και συντήρησή τους σε σύγκριση με τους LEO [60].

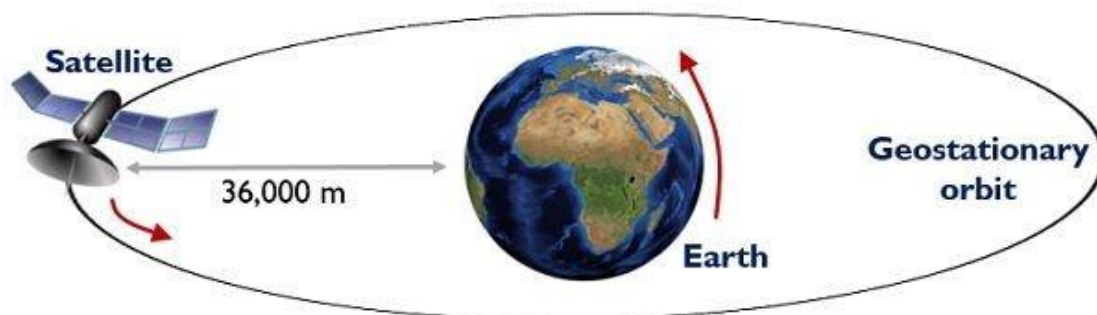
Τα επίπεδα ακτινοβολίας στους δορυφόρους MEO παρακολουθούνται σχολαστικά για την αξιολόγηση των επιπτώσεων των γεωμαγνητικών καταιγίδων και των διαταραχών του διαστήματος για να υπάρχει άμεση αντιμετώπιση των προκλήσεων. Για παράδειγμα, ο δορυφόρος BD3-M15 MEO, που εκτοξεύτηκε τον Οκτώβριο του 2018, περιλαμβάνει τρεις ανιχνευτές ακτινοβολίας σε διαφορετικούς άξονες κατά μήκος για τη μέτρηση του συνολικού ποσοστού ακτινοβολίας. Οι γεωμαγνητικές καταιγίδες επηρεάζουν σημαντικά την ακτινοβολία σε τροχιές MEO οπότε η συνεχής παρακολούθηση και ανίχνευση αυτών των φαινομένων βοηθάει τους μηχανικούς κάθε εταιρείας να κατανοήσουν καλύτερα τις επιπτώσεις και να μετριάσουν τα προβλήματα της ακτινοβολίας στους δορυφόρους, με αποτέλεσμα να ενισχύουν την μακροζωία και την αξιοπιστία των MEO [59].

Οι κίνδυνοι της ακτινοβολίας στις τροχιές MEO προκαλούνται από διάφορες πηγές, όπως γεωμαγνητικά σωματίδια, ηλιακά σωματίδια και άλλα. Αυτά συμβάλλουν στη συνολική ακτινοβολία που επηρεάζει τους δορυφόρους και θέτει σε κίνδυνο τα περισσότερα συστήματα που διαθέτουν. Για την αντιμετώπιση και διαχείριση αυτών των κινδύνων, οι μηχανικοί τελευταία χρησιμοποιούν εργαλεία όπως το λογισμικό Space Radiation 4.0 για να προσομοιώσουν την έκθεση του σκάφους σε διαφορετικά σενάρια κάτω από μεγάλα ποσοστά ακτινοβολίας. Αυτό βοηθά στην αξιολόγηση των κινδύνων και στην εφαρμογή των απαραίτητων προφυλάξεων, όπως ασπίδες ακτινοβολίας και ανθεκτικών εξαρτημάτων στην ακτινοβολία. Μέτρα όπως τα παραπάνω είναι απαραίτητα για την προστασία των ευαίσθητων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων από ζημιές που προκαλούνται από την ακτινοβολία, αλλά προσθέτουν επίσης στο συνολικό κόστος ανάπτυξης και εκτόξευσης δορυφόρων [60]. Για την αντιμετώπιση της ακτινοβολίας έχουν γίνει δοκιμές για να προσαρμοστούν οι μεσαίες τροχιές για να αποφεύγουν τις ζώνες ακτινοβολίας Van Allen, όπως η τροχιά SS-MEO (Ηλίο-Σύγχρονη Μεσαία Περί τη Γη Τροχιά) που είναι κατάλληλη για μετριάσμο των κινδύνων της ακτινοβολίας [61]. Τελικά όμως παρά τα πολλά μέτρα τα φαινόμενα αυτά συνεχίζουν να προκαλούν την αξιοπιστία και την ακρίβεια εντοπισμού θέσης GPS από τους MEO και τους καθιστούν πολύ ακριβούς. Παρά αυτές τις προκλήσεις, η αποτελεσματική διαχείριση των κινδύνων ακτινοβολίας είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της αξιόπιστης λειτουργίας των δορυφόρων MEO, οι οποίοι διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στα παγκόσμια συστήματα επικοινωνίας και πλοήγησης.

Συνοψίζοντας, παρά την πλεονεκτική θέση τους μεταξύ LEO και GEO, παραμένουν οι MEO ανεπαρκώς αξιοποιημένοι και η συγκεκριμένη τροχιά δεν χρησιμοποιείται από πολλές εταιρείες. Μέχρι στιγμής υπάρχει πολύ περιορισμένη χρήση, με περίπου κάτω από 200 δορυφόρους να λειτουργούν στην τροχιά MEO. Συνεχίζουν να κατέχουν καλύτερη καθυστέρηση από τους δορυφόρους GEO και μεγαλύτερη κάλυψη εδάφους από τους δορυφόρους LEO, και μέχρι στιγμής η πιο αξιοσημείωτη λειτουργία τους είναι το GPS. Η εμπορική χρήση του MEO είναι πολύ μικρή σε σύγκριση με το LEO και το GEO, αλλά αυτό μπορεί να αλλάξει καθώς παρουσιάζονται παραπάνω ανάγκες για νέα δίκτυα. Εταιρείες όπως η SES με τον αστερισμό τους O3b που αναφέραμε και νέες παρουσίες σε αυτή την τροχιά όπως η SpaceLink και η Intelsat, εξερευνούν νέες δυνατότητες για να παρέχουν υψηλές ταχύτητες Διαδικτύου και να ελαττώσουν ακόμη περαιτέρω τους χρόνους καθυστέρησης. Καθώς η ζήτηση για ταχύτερες και πιο αξιόπιστες επικοινωνίες συνεχίζει να αυξάνεται, είναι πιθανό να δούμε μία μεγάλη εξέλιξη στα συστήματα MEO και νέες δυνατότητες για αυτή την τροχιά όσο εξελίσσεται η δορυφορική τεχνολογία [62].

2.3.3 Γεωσύγχρονη Τροχιά (GEO)

Η τρίτη δορυφορική τροχιά που θα αναφέρουμε και θα αναλύσουμε είναι η γεωστατική ή γεωσύγχρονη. Προτάθηκε αρχικά από τον Βρετανό συγγραφέα και επιστήμονα Arthur C. Clarke το 1945, ο οποίος οραματίστηκε τη χρήση δορυφόρων για την κάλυψη παγκόσμιων επικοινωνιακών αναγκών με σταθερή θέση. Η πρόταση του Clarke έθεσε τις βάσεις για τη δημιουργία μιας «ζώνης» γεωστατικών δορυφόρων, η οποία έκτοτε είναι γνωστή ως Ζώνη Clarke προς τιμή του [65]. Η γεωστατική τροχιά, που βρίσκεται στα περίπου 36.000 χιλιόμετρα πάνω από την επιφάνεια της Γης, προσφέρει στους δορυφόρους GEO την ιδιότητα να ολοκληρώνουν μία πλήρη περιστροφή γύρω από την Γη σε ακριβώς 24 ώρες. Επομένως, βρίσκονται σε σύγχρονη κίνηση με την περιστροφή της Γης, με αποτέλεσμα να φαίνονται «ακίνητοι» ως προς έναν παρατηρητή. Το συγκεκριμένο και σημαντικό χαρακτηριστικό της τροχιάς, καθιστά τους δορυφόρους GEO εξαιρετικά χρήσιμους για παροχή διαδικτύου και εφαρμογές που απαιτούν σταθερή κάλυψη μιας συγκεκριμένης περιοχής [64].



Εικόνα 6: Απεικόνιση της Τροχιάς και του Υψομέτρου ενός Γεωσύγχρονου Δορυφόρου προς τη Γη [76].

Οι δορυφόροι GEO τοποθετούνται ακριβώς πάνω από τον Ισημερινό, ώστε να διατηρούν την γεωστατική τους θέση. Η τροχιά τους είναι κυκλική και σταθερή, ωστόσο απαιτείται station-keeping τακτικά για να παραμένουν στην τροχιά παρά των βαρυτικών δυνάμεων και των επιδράσεων από το βαρυτικό πεδίο της Σελήνης και του Ήλιου. Αποδεκτή απόκλιση έχει οριστεί τυπικά $\pm 0,15$ μοίρες ανατολικά δυτικά και $\pm 0,15$ μοίρες βόρεια/νότια. Μικρές διορθωτικές κινήσεις λοιπών είναι απαραίτητες για την αποτελεσματικότητα και σταθερότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών τηλεπικοινωνίας και διαδικτύου. Ωστόσο έχει ως αποτέλεσμα να μειώνει τη διάρκεια ζωής των δορυφόρων GEO, συνήθως στα 10-15 χρόνια, ανάλογα με την ποιότητα και την κατασκευή τους [75].

Με τις δύο σημαντικές ιδιότητες της γεωστατικής τροχιάς, δηλαδή: της μεγάλης εμβέλειας και την σταθερή κάλυψη, οι δορυφόροι GEO είναι ιδανικοί για τηλεπικοινωνίες, παροχή σήματος τηλεόρασης. Ένας μόνο γεωστατικός δορυφόρος μπορεί να καλύψει το ένα τρίτο της επιφάνειας της Γης, επομένως χρειάζονται μόνο τρεις δορυφόροι για πλήρης κάλυψη της Γης για παγκόσμια μετάδοση σήματος. Επίσης, επειδή οι δορυφόροι GEO παραμένουν σταθεροί, απαιτούνται λιγότερες υποδομές για τη λήψη και μετάδοση σήματος, σε αντίθεση με τους δορυφόρους χαμηλής τροχιάς που απαιτούν πιο σύνθετα επίγεια συστήματα για να ακολουθούν συνεχώς την κίνηση των δορυφόρων [77] [78].

Λόγω των παραπάνω, οι δορυφόροι GEO χρησιμοποιούνται κυρίως στις παρακάτω εφαρμογές:

- **Τηλεπικοινωνίες:** Αξιοποιούνται ευρέως σε παγκόσμια δίκτυα επικοινωνιών, προσφέροντας υπηρεσίες τηλεφωνίας, τηλεόρασης και διαδικτύου σε παγκόσμια κλίμακα. Η σταθερή θέση τους τους καθιστά ιδανικούς για χρήση στη ναυτιλία. Όπως ο Immarsat.
- **Δορυφορική Τηλεόραση και Ραδιόφωνο:** Οι GEO δορυφόροι είναι τα κύρια μέσα παροχής τηλεοπτικού και ραδιοφωνικού σήματος, αφού η σταθερή τους θέση επιτρέπει τη συνεχή μετάδοση σε συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές.
- **Μετεωρολογική Χρήση:** Χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση καιρού, με τη μετάδοση συνεχών δεδομένων για την κίνηση νεφών, τυφώνες και ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως οι δορυφόροι της σειράς GOES (Γεωστατικός Επιχειρησιακός Περιβαλλοντικός Δορυφόρος).
- **Στρατιωτική Χρήση:** Οι GEO δορυφόροι χρησιμοποιούνται επίσης στη στρατιωτική επιτήρηση και πλοήγηση, προσφέροντας σταθερή κάλυψη για επικοινωνίες και συλλογή πληροφοριών.

Η μεγαλύτερη πρόκληση που αντιμετωπίζουν οι δορυφόροι γεωστατικής τροχιάς είναι ο υψηλός χρόνος καθυστέρησης σήματος που προκύπτει από το μεγάλο υψόμετρο της τροχιάς, καθώς ξεπερνάει σε μεγάλο βαθμό αυτή των MEO και LEO. Αυτή η καθυστέρηση, η οποία ξεκινάει από 200 ms και μπορεί να αγγίζει και τα 500 ms για μια διαδρομή Γη-δορυφόρος-Γη, επηρεάζει αρνητικά τις εφαρμογές όπως βιντεοκλήσεις, online gaming, υπηρεσίες IoT και live streaming. Επιπλέον, οι δορυφόροι GEO παρουσιάζουν δυσκολίες στο να καλύψουν τις πολικές περιοχές λόγω της θέσης τους πάνω από τον Ισημερινό και είναι ευάλωτοι σε διαταραχές που απαιτούν διόρθωση τροχιάς μέσω του station-keeping, γεγονός που επηρεάζει τη διάρκεια ζωής τους [78].

Ωστόσο, με σύγχρονες τεχνολογικές εξελίξεις έχουν αναπτυχθεί λύσεις και βελτιστοποιήσεις που στοχεύουν στη μείωση της καθυστέρησης σε GEO δορυφόρους, προσφέροντας πιο αποδοτικές επικοινωνιακές δυνατότητες και βελτιωμένες υπηρεσίες. Μία από τις πιο καινοτόμες τεχνικές για την αντιμετώπιση της καθυστέρησης είναι η ανάπτυξη edge computing στους ίδιους τους δορυφόρους. Με τη χρήση υπολογιστικών πόρων ενσωματωμένων σε δορυφόρους GEO, είναι δυνατή η επεξεργασία δεδομένων πλησιέστερα στις πηγές τους, μειώνοντας έτσι τον χρόνο μεταφοράς και επεξεργασίας. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει στις συσκευές IoT να διαχειρίζονται και να επεξεργάζονται δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, κάτι που είναι κρίσιμο για εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη ανταπόκριση, όπως οι ναυτιλιακές εφαρμογές και η παρακολούθηση εφοδιαστικής αλυσίδας [80].

Η συνδυαστική χρήση δορυφόρων σε γεωστατική και χαμηλή τροχιά προσφέρει έναν υβριδικό σχεδιασμό που βελτιώνει την απόκριση και μειώνει την καθυστέρηση. Οι δορυφόροι GEO παρέχουν συνεχή και σταθερή κάλυψη για εφαρμογές που απαιτούν αξιοπιστία, ενώ οι LEO δορυφόροι, που βρίσκονται σε μικρότερα υψόμετρα, μπορούν να προσφέρουν ταχύτερη επικοινωνία με χαμηλότερη καθυστέρηση. Η συνεργασία των δύο τύπων δορυφόρων επιτρέπει την κατανομή εργασιών και φορτίου μέσω δια-δορυφορικών συνδέσεων ISL, με τις εργασίες να διαμοιράζονται δυναμικά μεταξύ των LEO για την ταχύτερη εξυπηρέτηση [79]. Οι τεχνολογίες BH (Εναλλαγή Δεσμών) και precoding είναι δύο μέθοδοι που επιτρέπουν την αύξηση της αποδοτικότητας σε δορυφορικά συστήματα και τη μείωση της καθυστέρησης. Το Beam Hopping επιτρέπει την προσαρμογή της διαθέσιμης χωρητικότητας σε περιοχές με υψηλή ζήτηση, αυξάνοντας έτσι την ευελιξία στην κατανομή των πόρων και μειώνοντας τη συμφόρηση. Η τεχνική precoding, από την άλλη, ενισχύει την απόδοση του φάσματος μέσω καλύτερης διαχείρισης των σημάτων, με σκοπό τη μείωση της παρεμβολής μεταξύ των καναλιών. Ο συνδυασμός Beam Hopping με τεχνικές precoding σε συστήματα υψηλής χωρητικότητας (Δορυφόρος Υψηλής Απόδοσης - HTS) οδηγεί σε βελτιστοποίηση των πόρων και μείωση της καθυστέρησης. Μια νέα προσέγγιση που εφαρμόζεται είναι η Εναλλαγή Συμπλεγμάτων (CH), που ενεργοποιεί πολλαπλές δέσμες ταυτόχρονα, με αποτέλεσμα να βελτιώνεται η κάλυψη και να μειώνεται η καθυστέρηση [81]. Η Τεχνητή Νοημοσύνη (AI) και οι τεχνικές Deep Learning εφαρμόζονται επίσης σε σύγχρονα δορυφορικά συστήματα για την αντιμετώπιση της καθυστέρησης και την αποτελεσματική κατανομή των πόρων. Η Βαθιά Ενισχυτική Μάθηση (DRL) εφαρμόζεται για την αναγνώριση βέλτιστων προτύπων φωτισμού και την κατανομή εύρους ζώνης σε συστήματα με BH. Παράλληλα, έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι, όπως ο αλγόριθμος TOMRA (Εκφόρτωση και Πολυδιάστατη Κατανομή Πόρων), που χρησιμοποιεί συνδυαστικά τεχνικές DRL και βελτιστοποίηση για την κατανομή των υπολογιστικών πόρων και την εξισορρόπηση του φορτίου. Ο αλγόριθμος TOMRA επιτρέπει την έξυπνη μεταφορά εργασιών (task offloading) και την κατανομή πόρων, μειώνοντας τη συμφόρηση στους GEO δορυφόρους και διασφαλίζοντας τη διαθεσιμότητα για χρήσεις όπως το IoT, όπου απαιτούνται βελτιωμένες ταχύτητες και μικρότερη καθυστέρηση [79].

Οι παραπάνω τεχνολογικές εξελίξεις αποτελούν ένα σημαντικό βήμα για τη μείωση της καθυστέρησης και τη βελτίωση της αποδοτικότητας των γεωστατικών δορυφόρων σε εφαρμογές τηλεπικοινωνιών και IoT. Η χρήση υβριδικών συστημάτων GEO-LEO, η ανάπτυξη edge computing στους δορυφόρους, οι καινοτομίες στο Beam Hopping και η εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης συνεισφέρουν στη βελτίωση της ποιότητας των υπηρεσιών, επιτρέποντας τη χρήση δορυφορικών δικτύων σε εφαρμογές που απαιτούν χαμηλή καθυστέρηση.

2.3.4 Συγκρίσεις και Συμπεράσματα για τις Τρεις Τροχιές Δορυφόρων

Συνοπτικά λοιπόν, Οι τρεις τροχιές δορυφόρων προσφέρουν διαφορετικά χαρακτηριστικά, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα οποία επηρεάζουν την επιλογή τους για διάφορες εφαρμογές, όπως τηλεπικοινωνίες, γεωσκόπηση και πλοήγηση. Παρακάτω ακολουθεί μία σύνοψη των χαρακτηριστικών τους.

1. Υψόμετρο και Κάλυψη.

- Η GEO τροχιά βρίσκεται σε ύψος περίπου 35,786 χιλιομέτρων από την επιφάνεια της Γης, που της επιτρέπει να καλύπτει μεγάλες περιοχές, με μεγάλη εμβέλεια και σταθερή κάλυψη. Ωστόσο, η μεγάλη απόσταση από τη Γη οδηγεί σε υψηλές καθυστερήσεις και περιορίζει την χρήση σε ορισμένες εφαρμογές.
- Η MEO τροχιά, σε ύψος από 2,000 έως 35,000 χιλιόμετρα, προσφέρει καλύτερη ανάλυση και μειωμένη καθυστέρηση σε σύγκριση με την GEO, όμως απαιτεί περισσότερους δορυφόρους για μεγάλη κάλυψη της Γης και δεν συμφέρει τόσο οικονομικά.
- Η LEO τροχιά βρίσκεται σε ύψος από 200 έως 2,000 χιλιόμετρα, και επιτρέπει πολύ υψηλή ανάλυση με μικρότερη καθυστέρηση, αλλά απαιτεί εκατοντάδες δορυφόρους σε αστερισμό για συνεχή κάλυψη και μετάδοση δεδομένων μεταξύ τους έως να καταλήξουν στους σταθμούς στη Γη.

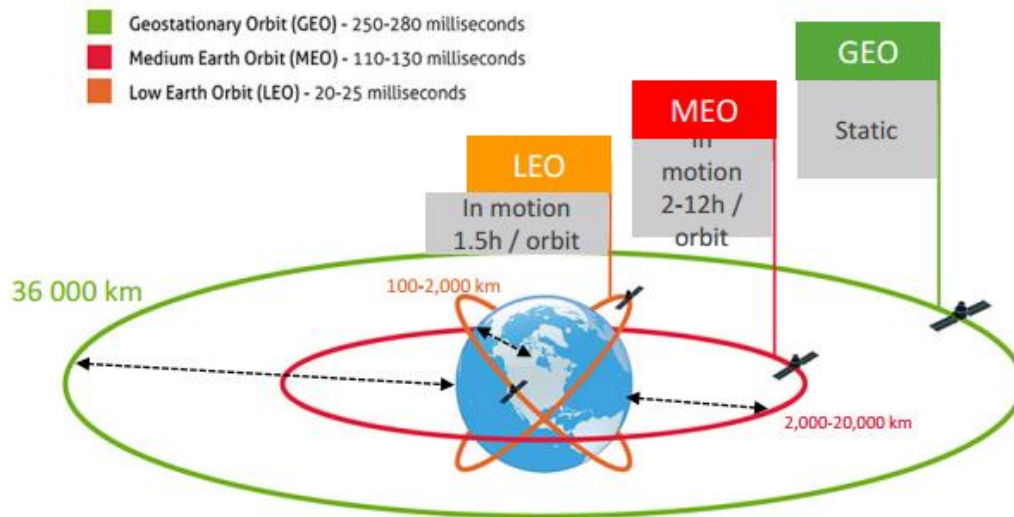
2. Χρονική Καθυστέρηση και Ποιότητα Σήματος.

- Οι δορυφόροι σε GEO παρουσιάζουν μεγαλύτερη καθυστέρηση, μέχρι και 500 ms, λόγω της μεγάλης απόστασης, κάτι που μπορεί να είναι ανεπιθύμητο σε εφαρμογές όπου η άμεση επικοινωνία είναι κρίσιμη.
- Η MEO τροχιά μειώνει την καθυστέρηση στο εύρος των 100-200 ms, και χρησιμοποιείται κυρίως για το GPS και άλλες μορφές πλοήγησης.
- Οι δορυφόροι LEO εμφανίζουν καθυστέρηση μόλις 20-40 ms, καθιστώντας τους εξαιρετικά αποδοτικούς για υπηρεσίες που απαιτούν ακρίβεια και αξιοπιστία σήματος με καλή ποιότητα, όπως η δορυφορική σύνδεση στο διαδίκτυο, αλλά απαιτούν πιο περίπλοκο σύστημα διαχείρισης.

3. Σταθερότητα και Συντήρηση.

- Στην GEO τροχιά, ο δορυφόρος παραμένει "σταθερός" σε μια θέση, κάτι που τον καθιστά πιο εύκολο στη συντήρηση, αλλά το κόστος εκτόξευσης και συντήρησης στο διάστημα είναι υψηλό λόγω του μεγάλου υψομέτρου.
- Οι MEO δορυφόροι απαιτούν πιο περίπλοκες διαδικασίες διατήρησης και κάλυψης, καθώς δεν είναι σταθεροί σε ένα σημείο, αλλά οι απαιτήσεις τους είναι λιγότερο περίπλοκες από τους LEO.

- Οι LEO δορυφόροι χρειάζονται συνεχή ανανέωση, συντήρηση και παρατήρηση λόγω της μικρής διάρκειας ζωής τους σε χαμηλά υψόμετρα, αλλά είναι οικονομικότεροι στην εκτόξευση.



Εικόνα 7: Απεικόνιση των Τριών Τροχιών με ενδεικτικές τιμές του υψομέτρου και του χρόνου καθυστέρησης.

| Χαρακτηριστικά | GEO | MEO | LEO |
|------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---|
| Υψόμετρο | ~35,786 χλμ | 2,000 - 20,000 χλμ | 200 - 2,000 χλμ |
| Περίοδος Τροχιάς | 24 ώρες | 4 - 12 ώρες | 1 - 2 ώρες |
| Χρονική Καθυστέρηση | Μεγάλη (~500 ms) | Μέτρια (100 - 200 ms) | Χαμηλή (20 - 40 ms) |
| Κάλυψη | Μεγάλη, σταθερή | Μέτρια, δυναμική | Περιορισμένη, δυναμική |
| Κόστος | Πολύ υψηλό | Μέτριο | Χαμηλό |
| Απαιτούμενοι Δορυφόροι | 3 | 6 | Εκατοντάδες - Χιλιάδες |
| Κύριες Χρήσεις | Τηλεπικοινωνίες, τηλεοπτική μετάδοση | GPS, πλοήγηση, στρατιωτικές εφαρμογές | Δίκτυα Internet, γεωσκόπηση, επικοινωνίες |
| Χρόνος Ζωής | 15 χρόνια | 12 χρόνια | 5-7 χρόνια |

Πίνακας 1: Σύγκριση των GEO, MEO, LEO.

Η επιλογή της κατάλληλης τροχιάς εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εφαρμογής σε όρους καθυστέρησης, ποιότητας σήματος, και κόστους. Η GEO τροχιά είναι η πιο κατάλληλη για σταθερές επικοινωνίες σε μεγάλη κλίμακα, ενώ η MEO τροχιά εξυπηρετεί εφαρμογές πλοήγησης και μετρήσεων με υψηλή ακρίβεια και μικρότερη καθυστέρηση. Η LEO τροχιά, λόγω του χαμηλού υψομέτρου και της χαμηλής καθυστέρησης, είναι ιδανική για εφαρμογές με απαιτήσεις σε αμεσότητα, αν και η συντήρησή της είναι πιο απαιτητική λόγω της ανάγκης για διαρκή ανανέωση του δικτύου δορυφόρων. Συμπερασματικά, τόσο οι δορυφόροι LEO όσο και οι δορυφόροι MEO αναμένεται να διαδραματίζουν ολοένα και πιο κρίσιμους ρόλους καθώς γινόμαστε περισσότερο εξαρτημένοι από διαστημικά στοιχεία.

2.4 Ζώνες Συχνοτήτων για Δορυφορικές Επικοινωνίες

Τα περισσότερα συστήματα δορυφορικής επικοινωνίας βασίζονται σε ραδιοσυχνότητες. Οι ζώνες συχνοτήτων αποτελούν σημαντικό παράγοντα για τον σχεδιασμό και την απόδοση των δορυφορικών επικοινωνιακών συστημάτων, καθώς η συχνότητα λειτουργίας επηρεάζει την αλληλεπίδραση του σήματος με την ατμόσφαιρα και συνεπώς τις υποβαθμίσεις στην ποιότητα του συνδέσμου. Η επιλογή συχνοτήτων ρυθμίζεται από ITU σε διεθνές επίπεδο, προκειμένου να αποφεύγονται οι παρεμβολές μεταξύ χρηστών και υπηρεσιών [82].

Οι ζώνες συχνοτήτων ορίζονται με δύο βασικούς τρόπους: από γράμματα (L, C, K) που χρησιμοποιούνται κυρίως σε ραντάρ και συστήματα επικοινωνιών από τη δεκαετία του 1940, και βάσει των δεκαδικών βημάτων του μήκους κύματος, που διακρίνονται για την ακρίβειά τους και χρησιμοποιούνται για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, όπως τα συστήματα τηλεπικοινωνιών VHF (Πολύ Υψηλή Συχνότητα). Το ραδιοφάσμα, από 3 Hz έως 300 GHz, υποδιαιρείται σε εύρη ή ζώνες στις οποίες έχουν αποδοθεί συγκεκριμένες συχνότητες (σε GHz ή MHz). Αυτές οι ζώνες γίνονται διαθέσιμες για τις διάφορες επικοινωνιακές χρήσεις σύμφωνα με τους Κανονισμούς Ραδιοεπικοινωνίας της ITU. Όσο αυξάνονται οι τεχνολογίες και οι απαιτήσεις χρήσης, τόσο περιορίζεται το διαθέσιμο ραδιοφάσμα, με αποτέλεσμα να μην τηρούνται πάντοτε τα όρια που ορίζει η ITU. Αυτό οδηγεί σε σημαντική επικάλυψη μεταξύ φασματικών ζωνών, γεγονός που προκαλεί παρεμβολές και δυσκολίες στη διαχείριση του φάσματος [83].

Οι δορυφόροι στις διαφορετικές τροχιές που αναφέραμε χρησιμοποιούν διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων για να εξυπηρετήσουν ειδικές εφαρμογές, με τις πιο συνηθισμένες να είναι οι C-band, L-band και K-band, η οποία διαχωρίζεται σε Ka-band (K-above) και Ku-band (K-lower). Η επιλογή της ζώνης για κάθε δορυφόρο γίνεται με βάση κάποιους παράγοντες και κάθε ζώνη έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά και εξυπηρετεί διαφορετικές υπηρεσίες και σκοπούς όπως αναφέρεται πιο κάτω [83].

- **C-Band (3.4 - 4.2 GHz και 5.925 - 6.425 GHz):** Χρησιμοποιείται κυρίως από δορυφόρους GEO λόγω της μεγάλης κάλυψης τους για ευρυζωνικές συνδέσεις και δορυφορική τηλεόραση. Λόγω της χαμηλής εξασθένησης από την ατμόσφαιρα, είναι ανθεκτική σε καιρικές συνθήκες, όπως βροχές και σύννεφα, καθιστώντας την κατάλληλη για εφαρμογές που απαιτούν σταθερή σύνδεση χωρίς παρεμβολές, όπως η τηλεοπτική μετάδοση.
- **L-Band (1 - 2 GHz):** Κατάλληλη για κινητές επικοινωνίες, GPS, IoT και εφαρμογές που λειτουργούν σε χαμηλές ταχύτητες. Χρησιμοποιείται κυρίως από δορυφόρους σε χαμηλή (LEO) και μέση (MEO) τροχιά. Είναι επίσης ιδανική για εφαρμογές σε ναυτιλία.
- **K-Band:** Η ζώνη K-Band είναι πολύ σημαντική για τις σύγχρονες εξελίξεις στις τηλεπικοινωνίες και στα συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών. Με την εξέλιξη ολοένα και παραπάνω δορυφορικών δικτύων, όπως Starlink και OneWeb, η K-Band είναι πλέον γνωστή και χρησιμοποιείται κυρίως για δορυφορικό Internet με υψηλές ταχύτητες σε απομακρυσμένες περιοχές.

Επίσης, καθώς το 5G λειτουργεί στο εύρος από 24 GHz έως 100 GHz, συμπίπτει με την Ka-Band με αποτέλεσμα να υποστηρίζονται συνδέσεις επικοινωνίας υψηλής χωρητικότητας και χαμηλής καθυστέρησης που είναι απαραίτητες για εφαρμογές 5G, ειδικά σε αστικές περιοχές όπου η ζήτηση για δεδομένα είναι υψηλή. Η K-Band λοιπόν χωρίζεται στις δύο παρακάτω:

- **Ku-Band (12 - 18 GHz):** Χρησιμοποιείται για δορυφορικές και για εφαρμογές που απαιτούν ταχύτητα και αξιοπιστία στις συνδέσεις δεδομένων, όπως τα VSAT (Τερματικός Σταθμός Πολύ Μικρού Διαμετρήματος). Η Ku Band επιτρέπει υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης, αλλά είναι πιο ευάλωτη στις διαταραχές από τη βροχή και άλλες ατμοσφαιρικές παρεμβολές. Χρησιμοποιείται κυρίως σε GEO δορυφόρους και, σε μικρότερη κλίμακα, σε LEO για κάλυψη απομακρυσμένων περιοχών.
- **Ka-Band (26.5 - 40 GHz):** Παίζει κρίσιμο ρόλο στην κάλυψη των σύγχρονων ευρυζωνικών απαιτήσεων και στην υποστήριξη της σύγκλισης των δορυφορικών επικοινωνιών και των δικτύων 5G, έτσι χαρακτηρίζεται ως συνδυαστικός κρίκος της τηλεπικοινωνιακής υποδομής για τις επόμενες γενιές. Προσφέρει εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες μετάδοσης και είναι ιδανική για εφαρμογές που απαιτούν μεγάλο εύρος ζώνης, όπως το δορυφορικό Διαδίκτυο και οι υπηρεσίες 5G. Επηρεάζεται από καιρικές συνθήκες και χρησιμοποιείται από σχεδόν όλους τους σύγχρονους δορυφόρους [82] [83].

| Ζώνη | Συχνότητες (GHz) | Ταχύτητες Μετάδοσης | Χρήσεις | Δορυφορική Κατηγοριοποίηση |
|---------|---------------------------|---------------------|---|----------------------------|
| C Band | 3.4 - 4.2 & 5.925 - 6.425 | Μεσαίες | Τηλεόραση, τηλεπικοινωνίες | GEO |
| L Band | 1 - 2 | Χαμηλές | GPS, κινητές επικοινωνίες | LEO, MEO |
| Ka Band | 26.5 - 40 | Πολύ υψηλές | Δορυφορικό Διαδίκτυο, 5G εφαρμογές | GEO, LEO, MEO |
| Ku Band | 12 - 18 | Υψηλές | Δορυφορική τηλεόραση, ευρυζωνικές συνδέσεις | GEO, LEO |

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά των Βασικών Ζωνών Συχνοτήτων στις Δορυφορικές Επικοινωνίες.

2.5 Τηλεπικοινωνιακοί Δορυφόροι

2.5.1 Vsat

Το σύστημα VSAT είναι ένα σύστημα επικοινωνίας με το οποίο ένας επίγειος σταθμός διπλής κατεύθυνσης με μια μικρή κεραία συνδέεται με έναν δορυφόρο που βρίσκεται σε γεωσύγχρονη GEO τροχιά από τη Γη για τη μετάδοση δεδομένων. Χρησιμοποιείται από απλούς χρήστες αλλά κυρίως από μεγάλες και μικρές ιδιωτικές εταιρείες καθώς το VSAT προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες επίγειες εναλλακτικές λύσεις. Η έννοια της τεχνολογίας ξεκίνησε το 1957 με την εκτόξευση του Sputnik και κατά τη δεκαετία του 1980 μπήκε στο εμπόριο και χρησιμοποιήθηκε από εταιρείες και οργανισμούς για ιδιωτικά δίκτυα επικοινωνίας [84].

Ένα σύστημα VSAT λειτουργεί στις ζώνες συχνοτήτων C-band (6/4 GHz), Ku-band (14/11-12 GHz) και Ka-band (30/20 GHz) [85]. Αποτελείται από τα παρακάτω βασικά εξαρτήματα:

- **Κεραία:** Η κεραία του VSAT έχει συνήθως διάμετρο από 0,75 έως 2,4 μέτρα, ανάλογα με τις συχνότητες λειτουργίας και την απαιτούμενη ποιότητα σήματος. Είναι σχεδιασμένη για να λαμβάνει και να εκπέμπει σήματα στις ζώνες C, Ku, και Ka [86].
- **Χαμηλού Θορύβου Μετατροπέας Συχνοτήτων Καθόδου (LNB):** Ο LNB είναι ένας δέκτης που συνδέεται στην κεραία και χρησιμοποιείται για τη λήψη του εισερχόμενου σήματος από τον δορυφόρο. Χαμηλώνει τη συχνότητα του σήματος ώστε να μπορεί να επεξεργαστεί και να μεταφερθεί με πιο αποδοτικό τρόπο στον τερματικό σταθμό (modem). Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται ο θόρυβος και βελτιώνεται η ποιότητα της λήψης [86].
- **Μετατροπέας Συχνοτήτων Ανόδου (BUC):** Ο BUC είναι υπεύθυνος για την ενίσχυση και μετατροπή του εξερχόμενου σήματος από τον τερματικό σταθμό σε υψηλότερη συχνότητα, κατάλληλη για να αποσταλεί στον δορυφόρο. Αυτός μετατρέπει τα χαμηλής συχνότητας σήματα που παράγονται από τον σταθμό σε σήματα υψηλότερης συχνότητας και ενισχύει την ισχύ εκπομπής, ώστε να εξασφαλίζεται αξιόπιστη μετάδοση [86].
- **Μόντεμ:** Το μόντεμ, δηλαδή ο τερματικός σταθμός, μετατρέπει τα ψηφιακά δεδομένα σε αναλογικό σήμα προς τον δορυφόρο και αντίστροφα. Διαχειρίζεται τη διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση (modulation/demodulation), τη διόρθωση σφαλμάτων και τη βελτιστοποίηση της σύνδεσης [86].
- **Δρομολογητής και Διεπαφή Δικτύου:** Ο δρομολογητής συνδέει το σύστημα VSAT με το τοπικό δίκτυο του χρήστη, διανέμοντας το σήμα σε πολλαπλές συσκευές. Η συνεργασία του δρομολογητή με το μόντεμ επιτρέπει την απρόσκοπτη πρόσβαση σε υπηρεσίες όπως ίντερνετ, τηλεφωνία μέσω διαδικτύου (VoIP) και άλλες εφαρμογές [86].

Η λειτουργία της μεταφοράς σημάτων μέσω ενός συστήματος VSAT ακολουθεί τη βασική αρχή της επικοινωνίας μέσω δορυφόρου, uplink και downlink:

- **Ανερχόμενη Ζεύξη (Uplink):** Όταν ένας χρήστης στέλνει δεδομένα το σήμα περνά από το router στο modem, το οποίο το μετατρέπει σε αναλογικό σήμα και το στέλνει στον BUC. Εκεί, το σήμα ενισχύεται και μετατρέπεται σε κατάλληλη συχνότητα για εκπομπή. Στη συνέχεια, η κεραία εκπέμπει το σήμα στον δορυφόρο, ο οποίος το λαμβάνει και το αναμεταδίδει πίσω στη Γη, συνήθως σε έναν κεντρικό δορυφορικό σταθμό (hub).
- **Κατερχόμενη Ζεύξη (Downlink):** Όταν ο κεντρικός σταθμός (ή ο δορυφόρος) στέλνει δεδομένα πίσω στον χρήστη, το σήμα κατεβαίνει μέσω του δορυφόρου και λαμβάνεται από την κεραία VSAT. Ο LNB αποκωδικοποιεί και μετατρέπει τη συχνότητα του σήματος ώστε να μπορεί να επεξεργαστεί από το modem, το οποίο το μετατρέπει ξανά σε ψηφιακή μορφή και το προωθεί στον router για διανομή [84].

Τα VSAT συνεχίζουν να παίζουν κρίσιμο ρόλο στις τηλεπικοινωνίες και έχουν μεγάλες προσδοκίες για το μέλλον καθώς με τη χρήση νέων τεχνικών, όπως η μορφοποίηση δέσμης και η δυναμική κατανομή πόρων, επιτρέπουν την αποτελεσματική χρήση του εύρους ζώνης και την αύξηση της απόδοσης του συστήματος με την υπόσχεση για μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης με ασφάλεια. Επίσης, με τους σύγχρονους αστερισμούς όπως το Starlink της SpaceX, αναμένεται να προσφέρουν χαμηλότερη καθυστέρηση και υψηλότερο εύρος ζώνης, επαναπροσδιορίζοντας το ρόλο της VSAT όχι μόνο ως μέσο επικοινωνίας αλλά ως θεμέλιο για την παγκόσμια συνδεσιμότητα. Καθώς το VSAT προσαρμόζεται στις αυξανόμενες απαιτήσεις για ταχύτητα και ποιότητα, φαίνεται πως θα διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στη σύνδεση απομακρυσμένων περιοχών και στη γεφύρωση του ψηφιακού χάσματος, αποτελώντας πυλώνα για το μέλλον [84] [86].

2.5.2 Inmarsat

Η Inmarsat (Διεθνής Ναυτιλιακός Δορυφορικός Οργανισμός) ιδρύθηκε το 1979 και δημιουργήθηκε αρχικά για τηλεπικοινωνίες για χρήση στην ναυτιλία. Μέχρι τη δεκαετία του 1980, τα συστήματα της Inmarsat παρείχαν υπηρεσίες φωνής, φαξ και δεδομένων σε χρήστες ναυτιλίας. Έπειτα, ο οργανισμός ιδιωτικοποιήθηκε το 1999 και μπήκε πιο πολύ στο εμπόριο. Σήμερα, η Inmarsat διαχειρίζεται έναν στόλο δορυφόρων υψηλής χωρητικότητας και είναι γνωστή για ευρυζωνικές υπηρεσίες σε παγκόσμια κλίμακα [87]. Το επόμενο βήμα είναι οι δορυφόροι GX5 και οι Inmarsat-6 που ενσωματώνουν δυνατότητες 5G για αυξημένες ταχύτητες και ευελιξία δικτύου. Στην ναυτιλία, η Inmarsat έφερε επανάσταση στις λειτουργίες παρέχοντας αξιόπιστες επικοινωνίες για πλοήγηση, ασφάλεια και μεταφορά δεδομένων. Βασικές υπηρεσίες όπως FleetBroadband και Fleet Xpress, παρέχουν δορυφορικό Διαδίκτυο, τηλεφωνία, SMS και δίκτυο ISDN σε εμπορικά πλοία παγκοσμίως.

Οι δορυφόροι Inmarsat βρίσκονται σε τροχιά GEO και λειτουργούν κυρίως στις ζώνες συχνότητες L-band και Ka-band που αντέχουν κυρίως σε αντίξοες καιρικές συνθήκες, κάτι που ευνοεί για χρήση στη ναυτιλία., που επιλέγονται για την αξιοπιστία τους σε αντίξοες καιρικές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, τα δύο βασικά δορυφορικά συστήματα που ανήκουν στην Inmarsat:

- **Ευρυζωνικό Παγκόσμιο Δίκτυο Περιοχής (BGAN):** Λειτουργεί στη ζώνη L-band και προσφέρει παγκόσμια κάλυψη κινητής τηλεφωνίας. Υποστηρίζει εφαρμογές IoT, φωνητική επικοινωνία και πρόσβαση στο διαδίκτυο. Η αξιοπιστία και η ανθεκτικότητα του BGAN το καθιστούν κατάλληλο για κρίσιμες λειτουργίες, ακόμη και σε δύσκολες καιρικές συνθήκες.
- **Διεθνές Xpress (GX):** Το δίκτυο GX της Inmarsat ξεκίνησε το 2015, γνωστό ως το πρώτο ευρυζωνικό δίκτυο υψηλής ταχύτητας παγκοσμίως διαθέσιμο από έναν μόνο χειριστή. Λειτουργεί στη ζώνη Ka-band και επιτυγχάνει ταχύτητες έως 50 mbps. Έτσι, προσφέρει υψηλή απόδοση, καθιστώντας το ιδανικό για εφαρμογές υψηλού εύρους ζώνης στις αεροπορικές, ναυτιλιακές και επιχειρηματικές αγορές [88].

Η Inmarsat παραμένει ένας μεγάλος ανταγωνιστής στις δορυφορικές τηλεπικοινωνίες καθώς επενδύει σε δορυφορικά συστήματα επόμενης γενιάς όπως το ORCHESTRA, τα οποία θα ενσωματώνουν δορυφόρους 5G, δορυφόρους χαμηλής τροχιάς και γεωστατικούς δορυφόρους για να ενισχύσουν τη χωρητικότητα, να μειώσουν τον χρόνο καθυστέρησης και να αυξήσουν την εμβέλεια [89].

2.5.3 Iridium

Το δίκτυο Iridium είναι από τα πιο σημαντικά συστήματα στις δορυφορικές επικοινωνίες. Ξεκίνησε τη δεκαετία του 1990, αναπτύχθηκε από την Iridium Communications και χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορους τομείς, όπως η ναυτιλία, η αεροπορία, οι στρατιωτικές επιχειρήσεις και οι εμπορικές εφαρμογές. Για παράδειγμα, στη ναυτιλία, το Iridium εξυπηρετεί την ανάγκη επικοινωνίας πλοίων που βρίσκονται μακριά από χερσαία δίκτυα, ενώ στην αεροπορία χρησιμοποιείται για την επικοινωνία και την παρακολούθηση πτήσεων που διασχίζουν απομακρυσμένες περιοχές [89].

Το σύστημα Iridium αποτελείται από 66 δορυφόρους που κινούνται σε χαμηλή τροχιά με περιφορά 30.000 χιλιόμετρα ανά ώρα. Λειτουργεί στην L-band, γεγονός που του επιτρέπει να προσφέρει αξιόπιστες υπηρεσίες φωνής και δεδομένων με ελάχιστες παρεμβολές από καιρικές συνθήκες καθώς η L-band είναι η πιο ανθεκτική ζώνη συχνοτήτων. Οι δορυφόροι επικοινωνούν τόσο με επίγειους σταθμούς όσο και μεταξύ τους. Το δίκτυο λειτουργεί με προηγμένες τεχνικές FDMA και TDMA για την αποτελεσματική διαχείριση του φάσματος, επιτρέποντας παγκόσμια κάλυψη. Επίσης επιτρέπει στους χρήστες να μπορούν να παραμείνουν συνδεδεμένοι ακόμη και σε απομακρυσμένες περιοχές όπου τα επίγεια δίκτυα δεν είναι διαθέσιμα και να διατηρούν συνεχή υπηρεσία καθώς μετακινούνται σε διαφορετικές περιοχές, καθιστώντας το Iridium πολύ χρήσιμο στην αεροπορία και ναυτιλία όπως είπαμε [89] [90].

Συμπερασματικά, συνεχίζει να αποτελεί τις πιο αξιόπιστες λύσεις για δορυφορική επικοινωνία και συνεχίζει να εξελίσσεται καθώς το 2019 μπήκε σε λειτουργία η νέα σειρά δορυφόρων της Iridium, η σειρά Iridium NEXT, που προσφέρει ταχύτητες δεδομένων που μπορούν να φτάσουν μέχρι 1,5 Mbps με χαμηλότερη καθυστέρηση για κινητές εφαρμογές, και εφαρμογές IoT [89].

2.5.4 Thuraya

Ένας ακόμη κορυφαίος φορέας δορυφορικών τηλεπικοινωνιών είναι η Thuraya, με έδρα στα Αραβικά Εμιράτα, σε ιδιοκτησία της Mubadala Investment Company. Ξεκίνησε τη λειτουργία της το 1997, προσφέροντας υπηρεσίες επικοινωνίας αρχικά στη Μέση Ανατολή, Αφρική και Ασία. Οι γεωσύγχρονοι δορυφόροι της Thuraya λειτουργούν στη ζώνη L-band και ο πάροχος προσφέρει υπηρεσίες όπως δορυφορικά τηλέφωνα, επικοινωνία σε πλοία και αεροσκάφη, ευρυζωνικές συνδέσεις, και υπηρεσίες IoT.

Η Yahsat Space Services, (Space 42) το 2020 ξεκίνησε την ανάπτυξη της νέας σειράς δορυφόρων επόμενης γενιάς, το Thuraya 4-NGS (Σύστημα Επόμενης Γενιάς). Είναι σχεδιασμένος να παρέχει πλήρης κάλυψη σε Ευρώπη, Μέση Ανατολή, Αφρική και Κεντρική Ασία. Ο δορυφόρος έχει τα παρακάτω νέα και βελτιωμένα χαρακτηριστικά:

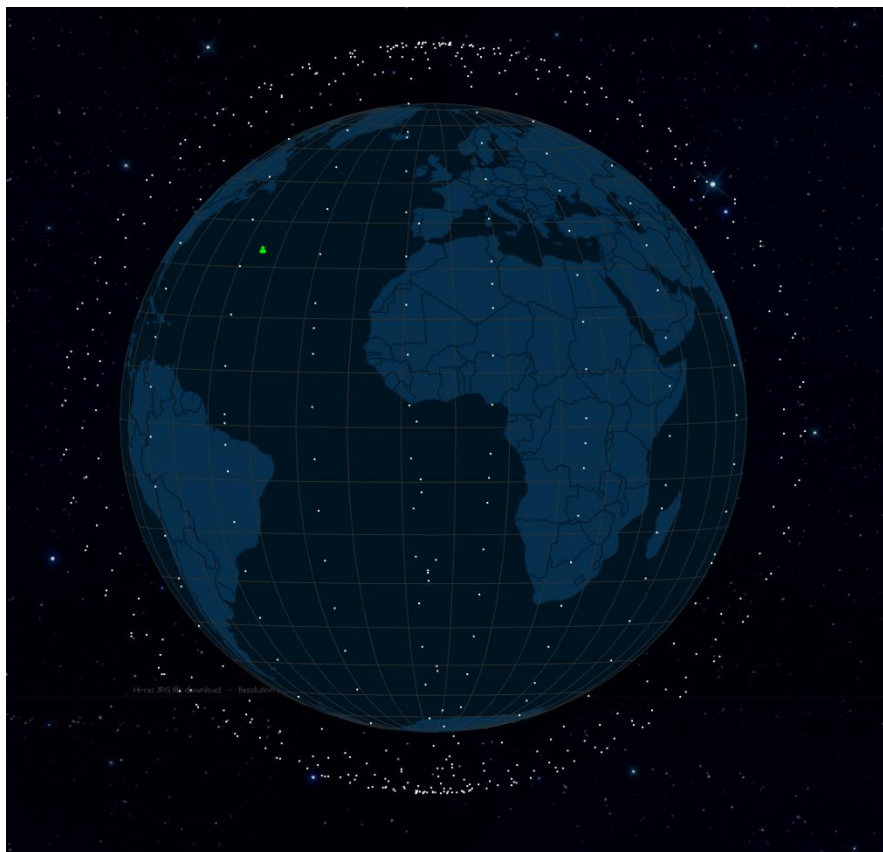
- **Υποστήριξη Πολλαπλών Τεχνολογιών (Air Interface):** Το Thuraya 4-NGS υποστηρίζει πολλές τεχνολογίες επικοινωνίας, προσφέροντας ευελιξία στις συνδέσεις μέσω διαφορετικών διεπαφών. Για παράδειγμα μπορεί ταυτόχρονα να υποστηρίξει παραδοσιακά συστήματα MSS (Κινητές Δορυφορικές Υπηρεσίες) αλλά και πιο σύγχρονες εφαρμογές, όπως IoT και M2M (Μηχανή-σε-Μηχανή).
- **Επαναδιαμορφώσιμο Φορτίο:** Όσο βρίσκεται σε τροχιά, το φορτίο του δορυφόρου υποστηρίζει την τροποποίηση εύρος ζώνης, μέγεθος καναλιών κλπ. Αυτό επιτρέπει στους παρόχους υπηρεσιών να προσαρμόζουν τις ρυθμίσεις με βάση τις ανάγκες των χρηστών, τη ζήτηση ή αλλαγές στις περιοχές που υποστηρίζονται.
- **Υψηλές Ταχύτητες Δεδομένων:** Ο δορυφόρος είναι σχεδιασμένος να παρέχει ρυθμούς δεδομένων που ξεπερνούν το 1 Mbps.
- **Υψηλή Ασφάλεια και Ανθεκτικότητα:** Η υποδομή του δορυφόρου περιλαμβάνει χαρακτηριστικά που αυξάνουν την ανθεκτικότητα στις παρεμβολές και τις κυβερνοεπιθέσεις. Επιπλέον, οι προηγμένες τεχνολογίες επεξεργασίας προσφέρουν ενισχυμένη προστασία των δεδομένων, καθιστώντας το Thuraya 4 ιδανικό για εφαρμογές που απαιτούν υψηλά επίπεδα ασφάλειας, όπως οι στρατιωτικές και κυβερνητικές υπηρεσίες [91] [92].

Ο δορυφόρος λοιπόν κατασκευάστηκε από τον γαλλικό όμιλο Airbus και έχει φτάσει στο Διαστημικό Κέντρο Kennedy στη Φλόριντα, όπου αναμένεται να εκτοξευθεί από τον πύραυλο Falcon 9 της SpaceX τον Δεκέμβριο του 2024 και ορίζεται για λειτουργία στις αρχές του 2025. Ο δορυφόρος θα επιτρέψει στη Space42 να επεκτείνει τις υπηρεσίες της, προσφέροντας περισσότερα από 15 νέα προϊόντα στους τομείς της άμυνας, της κυβέρνησης και των επιχειρήσεων. Ο Ali Al Hashemi, CEO της Yahsat, ενέκρινε και έθεσε αξιοσημείωτη τη χρήση προηγμένης διαστημικής τεχνολογίας και τεχνολογιών που αξιοποιούν την τεχνητή νοημοσύνη για την ανάπτυξη του Thuraya 4-NGS. Επίσης, ο Alain Fauré από την Airbus ανέφερε ότι το Thuraya 4 είναι ένας από τους μεγαλύτερους δορυφόρους κινητών δορυφορικών υπηρεσιών (MSS) παροχής υψηλών ταχυτήτων και ασφάλειας [93].

Συμπερασματικά, ο Thuraya 4-NGS αναμένεται να είναι κρίσιμος ανταγωνιστής στην παγκόσμια αγορά, αν ο δορυφόρος και οι τεχνολογίες του σταθούν ισάξιοι στους επαίνους και αξιολογήσεις των παραπάνω και προφανώς θα υπάρξουν νεότερες εξελίξεις και ενημερώσεις μετά της έναρξης της λειτουργίας του μέσα στο 2025[93].

2.5.5 OneWeb

Το σύστημα OneWeb ξεκίνησε το 2012 ως ένα πρωτοποριακό πρόγραμμα που στοχεύει στη διασύνδεση ανθρώπων, επιχειρήσεων και κυβερνήσεων παγκοσμίως μέσω ενός αστερισμού δορυφόρων τροχιάς LEO για την παροχή δορυφορικού διαδικτύου με χαμηλό χρόνο καθυστέρησης και με παγκόσμια κάλυψη. Αρχικά, ο αστερισμός της OneWeb είχε σχεδιαστεί να αποτελείται από 900 δορυφόρους τελικά όμως ο συνολικός αριθμός μειώθηκε στους 650 οι οποίοι έχουν ολοκληρωθεί και βρίσκονται σε τροχιά από το 2023. Ο αστερισμός OneWeb και η κάλυψη που παρέχει φαίνεται στην εικόνα 9. Οι δορυφόροι της OneWeb κατασκευάζονται από την Airbus και εκτοξεύονται στο διάστημα μέσω της SpaceX ως συνεργάτες [94] [95].



Εικόνα 8: Απεικόνιση του Δικτύου OneWeb [98].

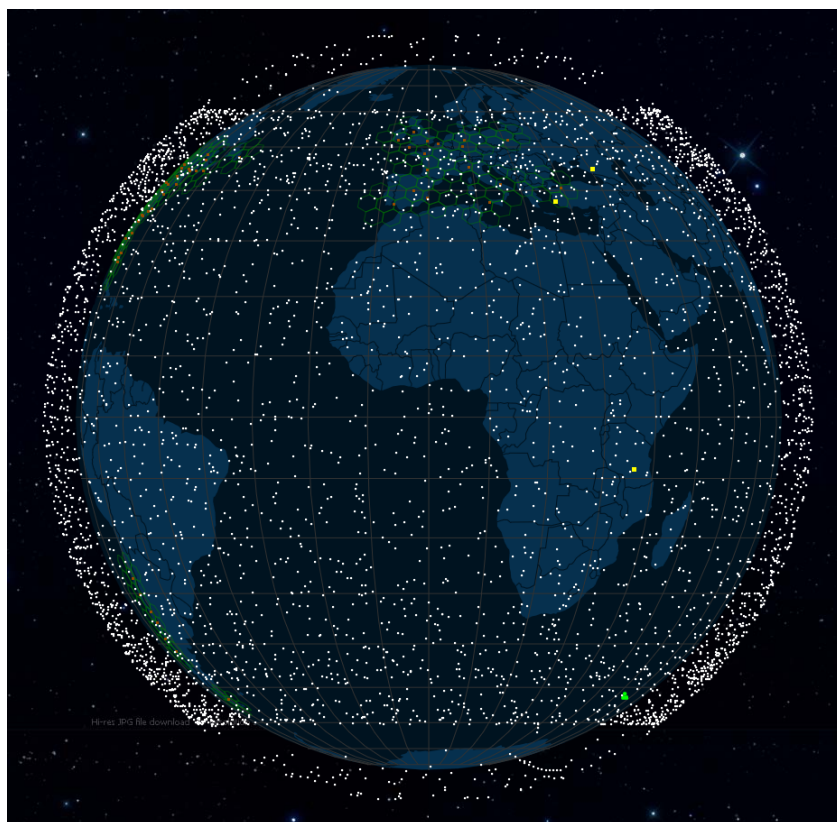
Οι δορυφόροι λειτουργούν σε υψόμετρο περίπου 1.200 χιλιομέτρων και ο χρόνος καθυστέρησης έχει υπολογιστεί κοντά στα 70 ms καθώς προσφέρουν ταχύτητες στα 150 Mbps. Ο OneWeb εκτός από τις γνωστές εφαρμογές σε τομείς όπως η ναυτιλία, η αεροπορία, οι τηλεπικοινωνίες, και η κυβερνητική χρήση, υποστηρίζει επίσης δίκτυα IoT [95]. Από το 2023 και έπειτα, η OneWeb συγχωνεύτηκε με την Eutelsat δημιουργώντας το Eutelsat OneWeb, ένα υβριδικό σύστημα που συνδυάζει τους δορυφόρους LEO και τους γεωστατικούς δορυφόρους διευρύνοντας τις δυνατότητες του δικτύου και την παγκόσμια κάλυψη [94]. Πρόσφατα τον Οκτώβριο του 2024, εκτοξευτήκαν και οι τελευταίοι 20 δορυφόροι της πρώτης γενιάς OneWeb από το Falcon 9 της SpaceX ολοκληρώνοντας έτσι τον αστερισμό πρώτης γενιάς [96].

Με καινούργιες ευκαιρίες και σε κατάσταση καινοτομίας και ανάπτυξης, η OneWeb το 2025 ξεκινάει την ανάπτυξη δεύτερης γενιάς δορυφόρων. Ο συγκεκριμένος αστερισμός πρόκειται να είναι μικρότερος αλλά με υβριδικούς δορυφόρους για την αύξησή της χωρητικότητας δικτύου. Το υβριδικό σύστημα για τον αστερισμό δεύτερης γενιάς θα αναπτυχθεί σε συνεργασία με το Ηνωμένο Βασίλειο και Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ESA) [94]. Στα μελλοντικά σχέδια περιλαμβάνεται επίσης η πώληση αυτόνομων δορυφορικών συστημάτων σε τρίτους, γεγονός που ενισχύει την αξιοποίηση της τεχνολογίας και καθιστά την εταιρεία έναν ισχυρό ανταγωνιστή στην αγορά. Τέλος, η OneWeb εξετάζει επίσης το μελλοντικό ενδεχόμενο για την παροχή δωρεάν υπηρεσιών στους πελάτες της, όπως τερματικά που θα δίνονται μέσω κάποιας σύμβασης [97].

Συμπερασματικά, Η OneWeb με τις καινούργιες καινοτομίες της και τη σημαντική συνεργασία της με την Eutelsat στοχεύει να φέρει επανάσταση στην δορυφορική συνδεσιμότητα. Βρίσκεται σε καλή θέση να επιτύχει τους φιλόδοξους στόχους της, παρέχοντας εξαιρετικά γρήγορες ταχύτητες, αξιόπιστη σύνδεση και πιο οικονομικές λύσεις για τους πελάτες της. Αναμένεται λοιπόν να δούμε την εξέλιξη της στο 2025 και αν θα σταθεί ισάξια ανάμεσα στους υπόλοιπους "κολοσσούς" που μάχονται για την πρώτη θέση στις δορυφορικές επικοινωνίες.

2.5.6 Starlink

Το πρόγραμμα **Starlink** της SpaceX αποτελεί μια πρωτοποριακή προσπάθεια για την παροχή ευρυζωνικής σύνδεσης στο Διαδίκτυο μέσω ενός τεράστιου δικτύου δορυφόρων χαμηλής τροχιάς. Πρωταγωνιστεί στην αντιμετώπιση του ψηφιακού χάσματος και στοχεύει στην παγκόσμια κάλυψη και παροχή συνδεσιμότητας σε όλες τις περιοχές. Υπό την ηγεσία του Elon Musk, η SpaceX έχει καινοτομήσει σε νέες τεχνολογίες που αλλάζουν τα δεδομένα στον τομέα της δορυφορικής επικοινωνίας, με αποτέλεσμα να ξεχωρίζει δραματικά με τους ανταγωνιστές που αναφέραμε παραπάνω. Για παράδειγμα καθώς η OneWeb επικεντρώνεται κυρίως σε επιχειρηματικές συνδέσεις και η Iridium παρέχει επικοινωνίες μέσω γεωστατικών δορυφόρων για ναυτιλία και αεροπλοΐα, το Starlink έχει στόχο την παγκόσμια κάλυψη για καταναλωτές και επιχειρήσεις με γρήγορες ταχύτητες και χαμηλές καθυστερήσεις, επεκτείνοντας την πρόσβαση στο Διαδίκτυο για κάθε χρήστη [100] [102]. Η επιτυχία του Starlink οφείλεται στον μεγάλο αριθμό δορυφόρων που σχηματίζουν τον αστερισμό του. Το σύστημα ξεκίνησε το 2015, με το πρώτο σύνολο δορυφόρων να εκτοξεύεται το 2019 και μέχρι το τέλος του 2024, υπάρχουν σε λειτουργία πάνω από 6.700 ενεργούς δορυφόρους LEO, σε ύψος 540-570 χλμ. από την Γη, ενώ το 2025 ο αριθμός αυτός προβλέπεται να ξεπεράσει τους 12.000 με στόχο τους 42.000 σε βάθος χρόνου. Στην εικόνα 10 βλέπουμε τον αστερισμό του Starlink και την παγκόσμια κάλυψη που προσφέρει, τεράστια και φανερά διαφορά σε σχέση με τον αστερισμό του OneWeb [102].



Εικόνα 9: Απεικόνιση του Δικτύου Starlink [99].

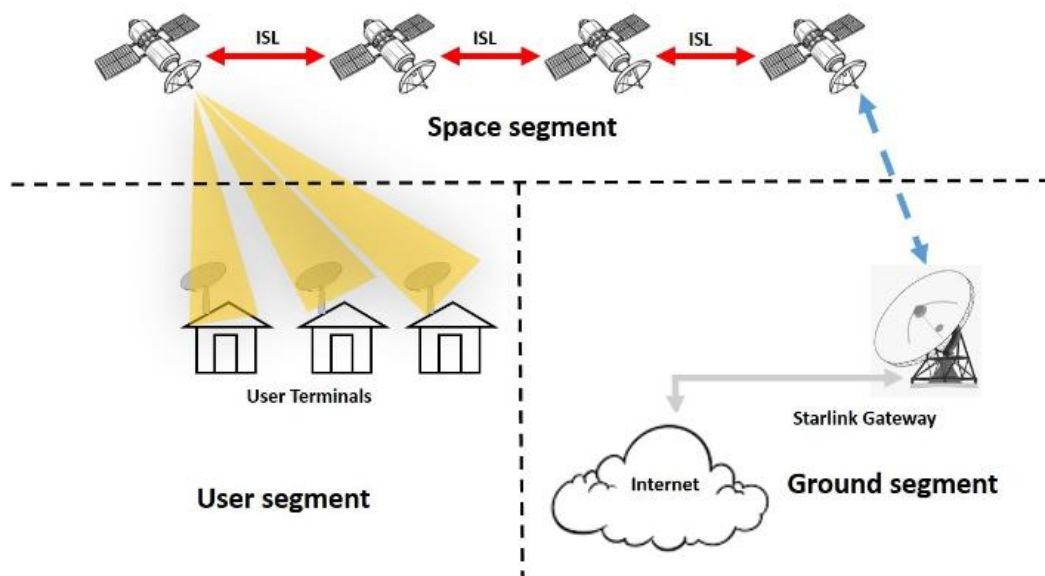
Οι ταχύτητες downlink που προσφέρει το πρόγραμμα Starlink κυμαίνονται από 50 Mbps έως και 350 Mbps μέγιστο, με μέσο όρο τα 170 Mbps καθώς οι περισσότεροι χρήστες παρατηρούν ταχύτητες έως και 100 Mbps ανάλογα την τοποθεσία τους. Ενώ οι ταχύτητες uplink φτάνουν μέχρι και τα 25 Mbps [101] [102]. Αυτές οι ταχύτητες και τα όρια αλλάζουν με βάση τα πακέτα που επιλέγονται, καθώς υπάρχουν διαφορετικά πακέτα και προγράμματα για οικιακή χρήση, για ναυτιλία, για επιχειρήσεις κλπ. [103]. Η καθυστέρηση (latency) σημειώνεται σε εξαιρετικά χαμηλό αριθμό όταν μιλάμε για δορυφορική σύνδεση σε σχέση με άλλους παρόχους, από 30 ms έως 60 ms στις περισσότερες περιοχές, και 100+ ms σε ορισμένες απομακρυσμένες τοποθεσίες (π.χ. ωκεανοί, νησιά, Ανταρκτική, Αλάσκα, Βόρειος Καναδάς, κ.λπ.). Σε κάθε περίπτωση το δίκτυο Starlink καθιστά δυνατή την παροχή υπηρεσιών όπως βιντεοκλήσεις, online gaming και streaming υψηλής ποιότητας [104].

Οι δορυφόροι της SpaceX διαφέρουν σε πολλούς παράγοντες σε σχέση με τους παραδοσιακούς παρόχους. Κάθε δορυφόρος είναι σχεδιασμένος για να προσφέρει υψηλές επιδόσεις και έτσι επιτυγχάνουν τις υψηλές ταχύτητες και χαμηλό χρόνο καθυστέρησης στο δορυφορικό Internet όπως αναφέραμε παραπάνω. Ορισμένα από τα πιο καινοτόμα και εξελιγμένα εξαρτήματα του δορυφόρου Starlink είναι τα εξής:

- **Αισθητήρες Πλοήγησης (Star Tracker):** Αισθητήρες πλοήγησης που επιτρέπουν τον ακριβή προσδιορισμό της τοποθεσίας, του ύψους και του προσανατολισμού του κάθε δορυφόρου.

- **Διαδορυφορικοί Σύνδεσμοι (ISL):** Το Starlink χρησιμοποιεί ISL για την επικοινωνία των δορυφόρων χωρίς την μεσολάβηση επίγειων σταθμών. Κάθε δορυφόρος διαθέτει τρία οπτικά λέιζερ που επιτρέπουν τη μετάδοση δεδομένων με ταχύτητες έως και 200 Gbps μεταξύ δορυφόρων.
- **Κεραίες Διάταξης:** Κάθε δορυφόρος είναι εξοπλισμένος με πέντε κεραίες διάταξης φάσης σε ζώνη Ku-band και τρεις κεραίες με διπλή ζώνη επικοινωνίας (Ka και E). Οι κεραίες αυτές επιτρέπουν στους δορυφόρους να παρέχουν εξαιρετική συνδεσιμότητα στους χρήστες του Starlink, με ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων υψηλής ευρυζωνικότητας [100].

Πως λειτουργεί λοιπόν το σύστημα του Starlink; Η αρχιτεκτονική του συστήματος Starlink φαίνεται στην εικόνα 11. Βασισμένο σε μία αρκετά απλή αρχιτεκτονική, το σύστημα περιλαμβάνει τη συνεργασία δορυφόρων, επίγειων σταθμών (gateways) και τα τερματικά που χρησιμοποιούν οι χρήστες (user terminal). Οι LEO δορυφόροι του επικοινωνούν συνεχώς με τους επίγειους σταθμούς μέσω ζωνών συχνοτήτων **Ku-band** (downlink) και **Ka-band** (uplink). Η μετάδοση δεδομένων γίνεται μέσω ραδιοφωνικών σημάτων με τη χρήση των δεσμών που παράγει κάθε δορυφόρος για να ενισχύσουν την χωρητικότητα του συστήματος. Στη συνέχεια, οι επίγειοι σταθμοί μεταδίδουν αυτά τα σήματα στους δορυφόρους, οι οποίοι αναμεταδίδουν τα δεδομένα στους χρήστες [101] [100].



Εικόνα 10: Αρχιτεκτονική Συστήματος Starlink [101].

Οι χρήστες συνδέονται στο δίκτυο μέσω εξοπλισμού που αποτελείται από:

- **Δορυφορικό πιάτο:** Έχει διάμετρο 23 ιντσών και είναι εξοπλισμένο με τις κεραίες φασικής διάταξης που αναφέραμε. Χρησιμοποιεί την τεχνολογία ψηφιακής δέσμης (phased-array technology) για να ευθυγραμμίζεται αυτόματα με τους δορυφόρους του Starlink. Το πιάτο μπορεί να τοποθετηθεί στο έδαφος ή σε οροφή και διαθέτει κινητήρες για αυτόματη ευθυγράμμιση με το μεγαλύτερο αριθμό δορυφόρων.
- **Δρομολογητή:** Παρέχει σύνδεση Wi-Fi με υποστήριξη έως και 128 συσκευών. Λειτουργεί στις ζώνες 2,4 GHz και 5 GHz βάση του πρότυπου IEEE 802.11. Η τροφοδοσία γίνεται μέσω Ethernet (PoE) στα 56 V DC.
- **Τροφοδοτικό:** Παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια για την ομαλή λειτουργία του εξοπλισμού [101].

Το σύστημα είναι λογικής plug and play που σημαίνει ότι είναι αρκετά εύκολο στην εγκατάσταση και χρήση. Συνεχώς κυκλοφορούν νέα μοντέλα, όπως το νέο φορητό μοντέλο “Starlink mini” με ενσωματωμένο δρομολογητή και τροφοδοτικό που μπορεί πολύ εύκολα να χωρέσει σε σακίδιο ή να μεταφέρεται στην πλάτη [105]. Συμπερασματικά, το Starlink έχει ήδη σημειώσει σημαντική πρόοδο στην παροχή ευρυζωνικής πρόσβασης στο διαδίκτυο, συνδέοντας εκατομμύρια χρήστες παγκοσμίως. Παίζει πλέον πρωταγωνιστικό ρόλο στις δορυφορικές επικοινωνίες και έχει αλλάξει τη ζωή εκατομμυρίων ανθρώπων, προσφέροντας διαθεσιμότητα σε απλούς χρήστες αλλά και σε επιχειρήσεις ακόμη και στρατιωτικές υπηρεσίες σε προσιτές τιμές για όλους με διάφορα πακέτα. Στο μέλλον, η SpaceX σχεδιάζει την έναρξη δεύτερης γενιάς δορυφόρων Starlink και επίσης τη σημαντική καινοτομία της ενσωμάτωσης του Starlink με το δίκτυο 5G, το οποίο θα εξεταστεί στο ακριβώς επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 3: 5G και Μη Επίγεια Δίκτυα (NTN)

3.1 Εισαγωγή και Χρήσεις

Στα προηγούμενα κεφάλαια, παρουσιάσαμε την εξέλιξη των κινητών επικοινωνιών, από τις γενιές 0G έως και 5G και πέρα αυτών. Επιπλέον στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύσαμε λεπτομερώς τα δορυφορικά συστήματα, περιλαμβάνοντας τους τύπους τροχιών και τα φάσματα συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται. Τέλος, αναφερθήκαμε σε σύγχρονα δίκτυα όπως το Starlink και το OneWeb τα οποία αναπτύσσουν αστερισμούς δορυφόρων συνδυάζοντας τις τεχνολογίες μη-επίγειων δικτύων με το 5G.

Το παρόν κεφάλαιο εστιάζει στον πυρήνα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, δηλαδή την συνεργασία των δορυφορικών επικοινωνιών και των δικτύων 5G. Πιο συγκεκριμένα θα εξετάσουμε τα συστήματα που ορίζονται ως 5G Μη-Επίγεια Δίκτυα Υποδομής (5G Non-Terrestrial Networks - NTN). Πρόκειται για μία σημαντική τεχνολογική εξέλιξη που στοχεύει στην επίτευξη παγκόσμιας κάλυψης με πολύ χαμηλές καθυστερήσεις και υψηλές ταχύτητες αφού συνδυάζει:

- Τις υψηλές ταχύτητες και τη χαμηλή καθυστέρηση των επίγειων δικτύων 5G.
- Την μεγάλη γεωγραφική κάλυψη που προσφέρουν τα μη-επίγεια δίκτυα δορυφόρων.

Θα αναλύσουμε την αρχιτεκτονική ενός 5G NTN και θα αναλύσουμε τα μαθηματικά μοντέλα και κρίσιμες παραμέτρους που επηρεάζουν την απόδοση αυτών των συστημάτων – οι οποίες αποτελούν και τη βάση για την προσομοίωση που θα ακολουθήσει στο MATLAB.

Το 5G NTN είναι η επόμενη γενιά δορυφορικών επικοινωνιών και θα ενσωματώνεται σε δίκτυα 5G. Τα επίγεια δίκτυα δεν μπορούν να καλύψουν απομακρυσμένες περιοχές πλήρως και σε περιπτώσεις ισχυρών σεισμών ή καταιγίδων είναι πολύ πιθανό να χαλάσει η υποδομή τους. Η ανάγκη για 5G NTN γίνεται ιδιαίτερα εμφανής σε περιπτώσεις όπου τα επίγεια δίκτυα δεν επαρκούν, όπως:

- **Αστικές Περιοχές:** Θα βοηθούν στην καλύτερη διαχείριση κυκλοφορίας λόγω μεγάλου φόρτου και κινητικότητας (traffic offload) και θα παρέχουν σταθερή πρόσβαση στο δίκτυο (Fixed wireless Access) [107]
- **Αγροτικές Περιοχές:** Παροχή ευρείας κάλυψης και υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης [107].
- **Απομακρυσμένες Περιοχές:** Σε περιοχές όπου οι επίγειες υποδομές έχουν καταστραφεί ή είναι αδύναμες λόγω φυσικών καταστροφών, τα 5G NTN θα εξασφαλίζουν δικτυακή επικοινωνία. [107].
- **Απομονωμένες Περιοχές:** Θαλάσσιες και αεροναυτικές εφαρμογές, όπου η 5G τεχνολογία θα ενισχύει τη σταθερότητα και την αξιοπιστία των υπάρχων μη-επίγειων δικτύων [107].

Ο οργανισμός 3GPP, είναι υπεύθυνος για τον καθορισμό των προδιαγραφών των κινητών δικτύων και έχει εντάξει τα NTN στο πλαίσιο των 5G συστημάτων ήδη από την έκδοση Release 17 του 2022. [108]. Έπειτα, μία από τις πιο καινούργιες εκδόσεις, το Release 18 εισήγαγε καλύτερη ενσωμάτωση 5G με μη-επίγεια δίκτυα, βελτιωμένη διαχείριση κινητικότητας, λειτουργίες σε IoT και μηχανικές επικοινωνίες (MTC), ενώ στο Release 19 ενισχύεται περαιτέρω η αυτόνομη λειτουργία των δορυφόρων [109].

Στις επόμενες ενότητες, παρουσιάζεται η υποδομή και η αρχιτεκτονική των 5G NTN, καθώς και οι τεχνολογικές προκλήσεις που προκύπτουν από τη συνεργασία επίγειων και δορυφορικών δικτύων.

3.2 Αρχιτεκτονική και Υποδομή

Το 3GPP σύμφωνα με την έκδοση TR 38.821 έκανε επίσημη την υποδομή ενός 5G NTN ως εξής, που δεν διαφέρει πολύ από ένα παραδοσιακό μη-επίγειο δίκτυο. Τα βασικά μέρη περιλαμβάνουν:

- **Δορυφόρους:** Λειτουργούν ως αναμεταδότες και αντίστοιχα με τον διαφορετικό τύπο δορυφόρου που έχουμε αναλύσει υπάρχουν διαφορές στα χαρακτηριστικά τους. Για παράδειγμα οι Γεωστατικοί Δορυφόροι υποστηρίζονται από έναν ή περισσότερους σταθμούς (gateway) ενώ τους LEO και MEO υποστηρίζουν πολλούς περισσότερους.
- **Σταθμοί:** Απαραίτητοι για τη σύνδεση του δορυφορικού δικτύου με το επίγειο δίκτυο.
- **Ζεύξη Τροφοδοσίας (Feeder Link):** Η ασύρματη ζεύξη μεταξύ του δορυφόρου και ενός σταθμού, χρησιμοποιεί κυρίως φάσμα NR-U.
- **Ζεύξη Υπηρεσίας (Service Link):** Η ζεύξη μεταξύ του εξοπλισμού του χρήστη (UE) και δορυφόρου για τη μετάδοση τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών.
- **Εξοπλισμός Χρήστη (User Equipment - UE):** Συσκευές όπως smartphones 5G, συσκευές/τερματικά IoT ή δορυφορικά τηλέφωνα.
- **VSATS:** Τερματικά για παροχή ευρυζωνικής σύνδεσης στις απομακρυσμένες περιοχές.
- **Διαδορυφορικές Συνδέσεις (ISL):** Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, είναι υπεύθυνα για την άμεση επικοινωνία μεταξύ δορυφόρων χωρίς την παρεμβολή επίγειου σταθμού [111].

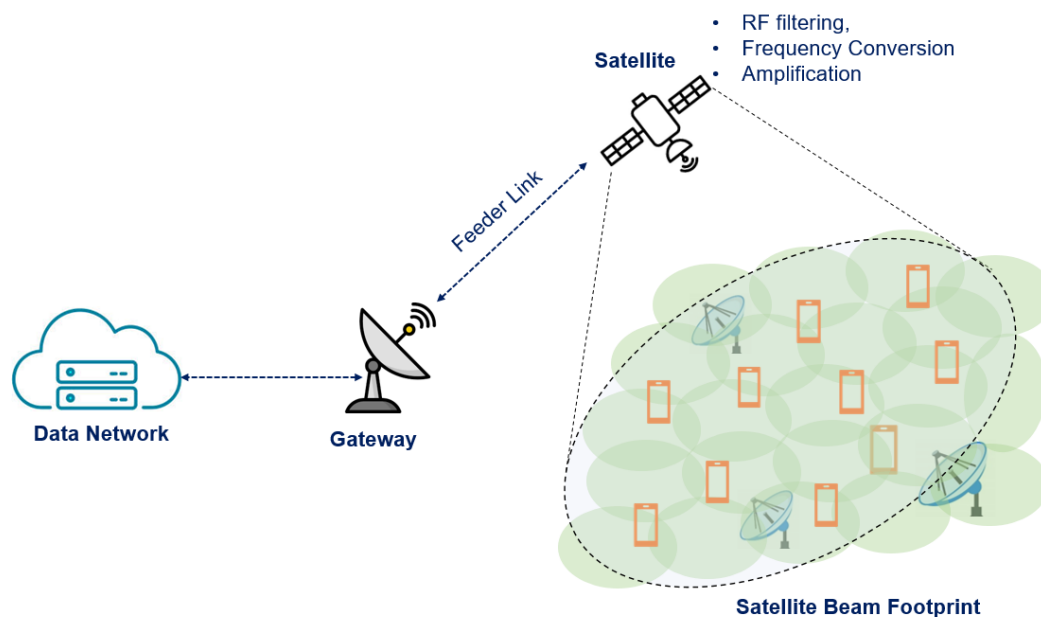
Όσον αφορά την αρχιτεκτονική ενός 5G NTN, το 3GPP έχει καθορίσει δύο κύριες αρχιτεκτονικές για τα δίκτυα και με κάθε Release βελτιώνονται με νέες λειτουργίες.

3.2.1. Διαφανής Αρχιτεκτονική (Transparent/Bent - Pipe)

Η διαφανής αρχιτεκτονική, γνωστή και ως "bent-pipe", είναι η πιο απλή αρχιτεκτονική με χαμηλή πολυπλοκότητα και μικρό κόστος. Εδώ, ο δορυφόρος λειτουργεί ως ένας αναμεταδότης με περιορισμένες λειτουργίες καθώς όταν λαμβάνει αναλογικά σήματα από τη Γη, τα ενισχύει και τα αναμεταδίδει πίσω στον σταθμό χωρίς να αλλάζει τη μορφή ή το περιεχόμενο του σήματος. Πιο συγκεκριμένα, ακολουθεί την παρακάτω διαδικασία:

- **Λήψη σήματος (Rx):** Ο δορυφόρος λαμβάνει το σήμα της ανερχόμενης ζεύξης από τον επίγειο σταθμό.
- **Μετατροπή Συχνότητας (D/C):** Το σήμα μετατρέπεται σε χαμηλότερη συχνότητα για εύκολη επεξεργασία και αναμετάδοση.
- **Μετάδοση (Tx):** Το σήμα ενισχύεται και μεταδίδεται προς τη Γη μέσω κατερχόμενης ζεύξης χωρίς αποδιαμόρφωση.

Αυτό σημαίνει ότι το σήμα 5G που μεταδίδεται από το έδαφος προς τον δορυφόρο και στη συνέχεια προς τον εξοπλισμό του χρήστη (UE) παραμένει αμετάβλητο [107]. Με το Release-17 η 3GPP επισημοποίησε την αρχιτεκτονική για το 5G NTN καθώς είναι πιο απλή από την αναγεννητική όπως θα δούμε παρακάτω, περαιτέρω βελτιώσεις έγιναν στο Release-18 ενώ πλέον με το Release-19 παραμένει στο παρασκήνιο για απλή υλοποίηση καθώς δίνεται έμφαση στην Αναγεννητική αρχιτεκτονική [108].



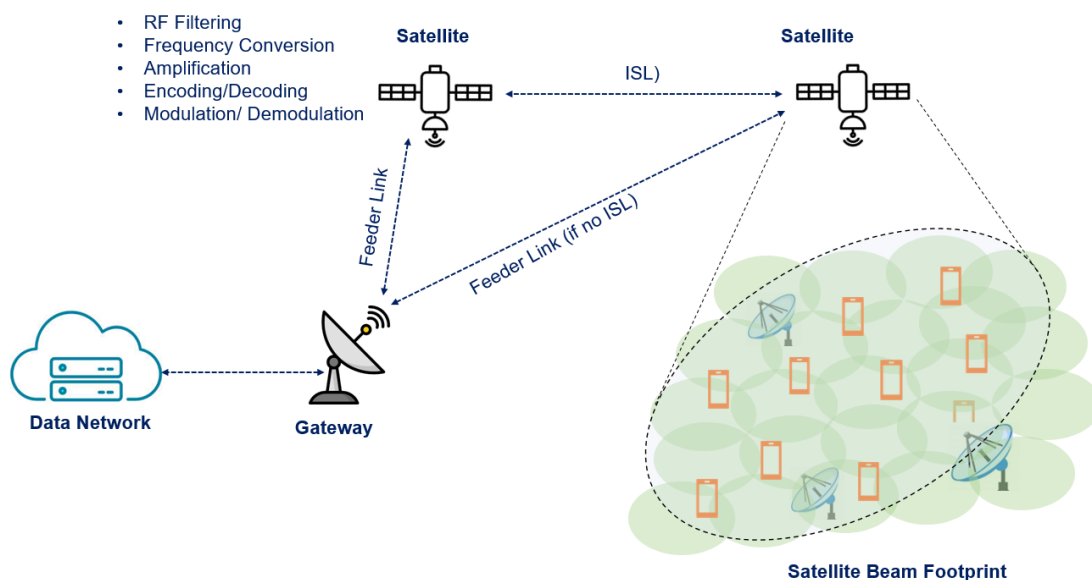
Εικόνα 11: Η Διαφανής Αρχιτεκτονική ενός 5G NTN [111].

Ο δορυφόρος στην συγκεκριμένη αρχιτεκτονική εκτελεί μόνο βασικές λειτουργίες, όπως φιλτράρισμα, ενίσχυση και μετατροπή συχνοτήτων, χωρίς να επεξεργάζεται το σήμα [2]. Επίσης δεν χρησιμοποιείται ISL με αποτέλεσμα η επικοινωνία να εξαρτάται αποκλειστικά από τους επίγειους σταθμούς και περιορίζεται η αποδοτικότητα του δικτύου. Τέλος, προσθέτει επιπλέον θόρυβο στο σήμα και δεν έχει ευελιξία στη δρομολόγηση. Παρά αυτά τα προβλήματα, είναι μία απλή προσέγγιση, φθηνή και απλή, καθώς απαιτεί λιγότερη πολυπλοκότητα στο δορυφορικό φορτίο και είναι συμβατή με υπάρχουσες δορυφορικές υποδομές [109] [110].

3.3.2. Αναγεννητική Αρχιτεκτονική (Regenerative)

Η αναγεννητική αρχιτεκτονική (Regenerative) ή μη-διαφανής, είναι πιο προηγμένη καθώς εδώ ο δορυφόρος διαθέτει ενσωματωμένες δυνατότητες επεξεργασίας. Εδώ ο δορυφόρος αποδιαμορφώνει τα εισερχόμενα σήματα, τα επεξεργάζεται (μεσολαβεί διόρθωση σφαλμάτων και δρομολόγηση) και στη συνέχεια αναδιαμορφώνει τα δεδομένα για μετάδοση κατερχόμενης ζεύξης [110] και έτσι δεν προσθέτει επιπλέον θόρυβο στο σήμα. Αναλυτικά, η διαδικασία μετάδοσης του σήματος σε μια αναγεννητική αρχιτεκτονική περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- **Λήψη (Rx):** Ο δορυφόρος λαμβάνει το εισερχόμενο σήμα.
- **Αποδιαμόρφωση (Demodulation):** Το λαμβανόμενο σήμα αποδιαμορφώνεται σε δυαδικά δεδομένα (bits).
- **Εναλλαγή & Δρομολόγηση (Switching & Rerouting):** Το σήμα επεξεργάζεται, γίνεται διόρθωση σφαλμάτων και δρομολογείται προς τον κατάλληλο προορισμό.
- **Επαναδιαμόρφωση (Remodulation):** Το σήμα στη συνέχεια διαμορφώνεται εκ νέου σε αναλογική κυματομορφή για μετάδοση.
- **Μετάδοση (Tx):** Το επεξεργασμένο σήμα μεταδίδεται πίσω στη Γη με την κατάλληλη συχνότητα μέσω κατερχόμενης ζεύξης.



Εικόνα 12: Η Αναγεννητική Αρχιτεκτονική ενός 5G NTN [111].

Βασική διαφορά σε σχέση με τη διαφανή αρχιτεκτονική είναι ότι, στην αναγεννητική, ο δορυφόρος αναλαμβάνει και εκτελεί λειτουργίες αντίστοιχες με εκείνες ενός επίγειου σταθμού βάσης gNodeB (gNB), επιτρέποντας την τοπική επεξεργασία και δρομολόγηση των δεδομένων. Ο gNB είναι η βασική μονάδα πρόσβασης στα δίκτυα 5G, υπεύθυνη για τη διαχείριση ραδιοσυνδέσεων και για την επικοινωνία μεταξύ χρηστών και του δικτύου. Η ενσωμάτωσή του απευθείας στον δορυφόρο καθιστά το σύστημα πιο ευέλικτο και αυτόνομο. Συνεπώς, με τη δυνατότητα δρομολόγησης πακέτων, βελτιώνεται η συνολική απόδοση του NTN και μειώνεται ο Χρόνος Μετάβασης Μετ' Επιστροφής (RTT) [108]. Επιπλέον, σε αντίθεση με τη διαφανή αρχιτεκτονική, εδώ χρησιμοποιούνται διαδορυφορικοί σύνδεσμοι (ISL), επιτρέποντας απευθείας επικοινωνία μεταξύ δορυφόρων χωρίς μεσολάβηση επίγειων σταθμών.

Ένα από τα πιο καινοτόμα χαρακτηριστικά της αναγεννητικής αρχιτεκτονικής είναι η λειτουργία Αποθήκευσης και Προώθησης (S&F), μέσω της οποίας οι δορυφόροι μπορούν να αποθηκεύουν και να προωθούν δεδομένα ακόμη και όταν η σύνδεση με το έδαφος έχει προσωρινά διακοπεί [110]. Τέλος, η διεπαφή Xn, η οποία συνδέει δύο σταθμούς βάσης gNB μεταξύ τους, εφαρμόζεται και στις δορυφορικές υλοποιήσεις για τη διαχείριση κινητικότητας, την ανταλλαγή δεδομένων και την εξισορρόπηση του φόρτου μεταξύ δορυφόρων. Η ύπαρξή της επιτρέπει την αποτελεσματική λειτουργία πολλαπλών gNBs, τη διαχείριση των πόρων του δικτύου και τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας. Οι τεχνολογίες αυτές ενισχύουν την ευελιξία του NTN και το καθιστούν περισσότερο συμβατό με τις υπάρχουσες επόμενες υποδομές του 5G [109] [110]. Ωστόσο, η αναγεννητική αρχιτεκτονική έχει και προκλήσεις. Η αυξημένη υπολογιστική ισχύς και η πολυπλοκότητα των δορυφόρων απαιτούν υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας, κάτι που επηρεάζει το σχεδιασμό και το κόστος των διαστημικών αποστολών. Επιπλέον, οι διαδορυφορικές συνδέσεις και η αποδοτική διαχείριση των gNB λειτουργιών στο διάστημα απαιτούν πρότυπα υψηλής ακρίβειας, τα οποία ακόμη βρίσκονται σε διαδικασία διαμόρφωσης μέσω των νέων εκδόσεων του 3GPP. [110]

Στην Έκδοση-17, η 3GPP αποφάσισε να επικεντρωθεί στην διαφανή προσέγγιση, κυρίως λόγω της απλότητας και της δυνατότητας ταχείας υλοποίησης. Παρόλο που η αναγεννητική αρχιτεκτονική δεν είχε τυποποιηθεί, η συζήτηση για τη χρήση της ξεκίνησε και αναγνωρίστηκαν τα πλεονεκτήματά της, ειδικά για περιπτώσεις χαμηλής καθυστέρησης και αυτόνομων δικτύων. Στο Release-19, η αναγεννητική αρχιτεκτονική απέκτησε πλέον επίσημη υποστήριξη και προχωρά η τυποποίησή της, ενσωματώνοντας την S&F λειτουργία και IoT NTN υποστήριξη. Τελικά, η αναγεννητική προσφέρει βελτιωμένη απόδοση με ελάχιστο θόρυβο και ευέλικτη δρομολόγηση αλλά απαιτεί μεγάλη πολυπλοκότητα και κόστος για τη ανάπτυξή της [108] [110].

Συμπερασματικά, η διαφανή αρχιτεκτονική είναι πιο απλή και εύκολη στην εφαρμογή και υλοποίηση ενώ η αναγεννητική προσφέρει καλύτερη ευελιξία στο δίκτυο, μειωμένη καθυστέρηση αλλά έχει πολύπλοκο σχεδιασμό και μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας.

| Χαρακτηριστικά | Transparent (Bent-Pipe) | Regenerative |
|--------------------------------|---|---|
| Επεξεργασία Σήματος | Επίγειο (στο Gateway/gNB) | Μη - Επίγειο (στον Δορυφόρο) |
| Καθυστέρηση (RTT) | Υψηλή | Χαμηλή |
| Λειτουργία | $Rx \rightarrow \text{Downconversion} \rightarrow Tx$ | $Rx \rightarrow \text{Demod} \rightarrow \text{Switch/Reroute} \rightarrow \text{Remod} \rightarrow Tx$ |
| Διαδορυφορικές Συνδέσεις (ISL) | Όχι | Ναι |
| Προσθήκη Θορύβου | Ναι | Όχι (Διόρθωση λαθών στον δορυφόρο) |
| Ευελιξία | Περιορισμένη | Υψηλή |
| Κόστος Υλοποίησης | Λιγότερο ακριβό | Ακριβό |
| Πρώτη Υλοποίηση | Release-17 | Release-19 |

Πίνακας 3: Σύγκριση Διαφανής και Αναγεννητικής Αρχιτεκτονικής για 5G NTN.

3.4 Τεχνικές Διαχωρισμού Ζεύξης στις Δορυφορικές Επικοινωνίες

Στο πλαίσιο των δορυφορικών επικοινωνιών και ειδικά των δικτύων 5G NTN, η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου ζεύξης (duplexing) μεταξύ ανερχόμενης και κατερχόμενης σύνδεσης είναι καθοριστική για την αποδοτικότητα του συστήματος. Οι τεχνικές Διαίρεσης Χρόνου Διπλής Ζεύξης (TDD) και Διαίρεσης Συχνότητας Διπλής Ζεύξης (FDD) διαχειρίζονται με διαφορετικό τρόπο τη μετάδοση και λήψη δεδομένων και επηρεάζουν άμεσα την καθυστέρηση, την αξιοπιστία και τη χρήση του φάσματος. Στα μη επίγεια δίκτυα, όπου οι καθυστερήσεις διάδοσης είναι σημαντικά μεγαλύτερες απ' ό,τι στα επίγεια, η επιλογή μεταξύ TDD και FDD αποκτά ιδιαίτερη σημασία. Για τον λόγο αυτό, η παρούσα ενότητα παρουσιάζει και συγκρίνει τις δύο μεθόδους, αναδεικνύοντας τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς τους στο περιβάλλον των 5G NTN:

- **Διαίρεση Χρόνου Διπλής Ζεύξης (TDD):** Το TDD μπορεί να αλλάξει μεταξύ κατερχόμενης και ανερχόμενης σύνδεσης στην ίδια ζώνη συχνοτήτων με αποτέλεσμα να απαιτούνται χρόνοι προστασίας για τη διαχείριση της εναλλαγής μεταξύ των δύο. Αυτό προκαλεί προβλήματα στους ήδη μεγάλους χρόνους καθυστέρησης και έτσι σε NTN δεν είναι τόσο αποτελεσματικό και αποδοτικό.

- **Διαίρεση Συχνότητας Διπλής Ζεύξης (FDD):** Από την άλλη, το FDD χρησιμοποιεί ξεχωριστές ζώνες συχνοτήτων για κατερχόμενη και ανερχόμενη αποφεύγοντας έτσι το μειονέκτημα του TDD. Το μόνο του μειονέκτημα είναι πως ακόμη δεν υπάρχει αμοιβαιότητα καναλιού για ανερχόμενη και κατερχόμενη σύνδεση.

Συνολικά, η επιλογή τεχνικής ζεύξης εξαρτάται από τις καθυστερήσεις διάδοσης, την πολυπλοκότητα του συστήματος και τις απαιτήσεις απόδοσης, με το FDD να επιλέγεται συχνά για εφαρμογές 5G NTN, λόγω της μεγαλύτερης σταθερότητας και της απλοποιημένης διαχείρισης καθυστέρησης. [112] [108] [109].

3.5 Τεχνολογίες Συνδέσμων: Οπτικοί και Ραδιοσυχνότητες

Οι δορυφορικές επικοινωνίες χρησιμοποιούν δύο διαφορετικές τεχνολογίες συνδέσεων: την σύνδεση ραδιοσυχνοτήτων (RF) και την οπτική σύνδεση. Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες σχεδιασμού σε ένα NTN είναι η επιλογή μεταξύ των δύο καθώς στα ISL μπορεί να υπάρξουν προβλήματα με παρεμβολές και αρχιτεκτονικές ανησυχίες. Θα επιλέγαμε λοιπόν οπτική δέσμη ή ραδιοσυχνοτήτων, ας δούμε αναλυτικά:

- **Οπτικοί Σύνδεσμοι Επικοινωνίας:** Χρησιμοποιώντας τεχνολογία που βασίζεται σε λέιζερ, οι οπτικοί σύνδεσμοι προσφέρουν σημαντικά υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων λόγω των υψηλότερων συχνοτήτων των κυμάτων φωτός. Είναι επίσης πιο ασφαλή, καθώς οι στενές ακτίνες λέιζερ είναι δύσκολο να αλλάξουν πορεία ή να μπλοκάρουν. Ωστόσο, οι οπτικοί σύνδεσμοι είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι στις ατμοσφαιρικές συνθήκες, παράγοντες όπως τα σύννεφα, η βροχή και οι ατμοσφαιρικές αναταράξεις μπορούν να υποβαθμίσουν σοβαρά την ποιότητα του σήματος [113].
- **Σύνδεσμοι Ραδιοσυχνοτήτων (RF):** Χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητικά κύματα στα φάσματα συχνοτήτων που έχουμε αναλύσει και κατευθυνόμενες κεραίες για μετάδοση και λήψη. Παρέχουν πιο χαμηλό εύρος ζώνης σε σύγκριση με τις οπτικές, με αποτέλεσμα να έχουν πιο αργούς ρυθμούς δεδομένων. Επίσης, είναι πιο ανθεκτικές σε αντίξοες καιρικές συνθήκες και μπορούν να διεισδύσουν στα σύννεφα και τη βροχή, διασφαλίζοντας πιο αξιόπιστη επικοινωνία σε διάφορα περιβάλλοντα.

Οι πρόσφατες εξελίξεις έχουν δείξει επιτυχείς μεταδόσεις υψηλής ταχύτητας δεδομένων χρησιμοποιώντας οπτικές επικοινωνίες. Για παράδειγμα, το 2023, η NASA πέτυχε μια πρωτοποριακή μετάδοση δεδομένων από έναν δορυφόρο στη Γη με ρυθμό 200 gigabit ανά δευτερόλεπτο χρησιμοποιώντας οπτικές επικοινωνίες, ξεπερνώντας σημαντικά τις προηγούμενες μεθόδους. Επίσης, οι περισσότεροι δορυφόροι Starlink χρησιμοποιούν οπτικούς συνδέσμους για να επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ISL, ενώ ο μεγαλύτερος αριθμός χρησιμοποιεί ακόμη RF. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να εφαρμοστεί συνδυασμός και των δύο τεχνολογιών ώστε να εξασφαλιστεί ταυτόχρονα υψηλός ρυθμός μετάδοσης και αξιοπιστία σε όλες τις καιρικές συνθήκες.

Συνοπτικά, η επιλογή μεταξύ οπτικών συνδέσεων επικοινωνίας και συνδέσεων ραδιοσυχνοτήτων εξαρτάται από παράγοντες όπως οι απαιτούμενοι ρυθμοί δεδομένων, οι περιβαλλοντικές συνθήκες και οι ανάγκες ασφαλείας, με κάθε τεχνολογία να προσφέρει ξεχωριστά οφέλη και περιορισμούς [108].

3.6 Εφαρμογή NB-IoT σε Μη Επίγεια 5G Δίκτυα

Μία σχετικά νέα τεχνολογία που έχει αναπτυχθεί και έχει εγκριθεί από το 3GPP για την ενσωμάτωση σε δίκτυα 5G NTN, είναι το Δίκτυο των Πραγμάτων Στενής Ζώνης (NB-IoT). Επιτρέπει συνδέσεις με χαμηλά κόστη καθώς παρέχει μεγάλη εμβέλεια σήματος για πολλαπλές συσκευές συνδεδεμένες την ίδια στιγμή. Στα επίγεια δίκτυα, χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλές εφαρμογές που είναι αυτοματοποιημένες. Ωστόσο, η ενσωμάτωση του NB-IoT σε μη επίγεια δίκτυα (NTN) πρόκειται να αλλάξει τα δεδομένα, αφού επιτρέπει τις συσκευές IoT να επικοινωνούν σε πλήρως απομακρυσμένες και αγροτικές περιοχές. Όμως, υπάρχουν και προκλήσεις λόγω των απωλειών διαδρομής, των μεγάλων καθυστερήσεων και των φαινομένων Doppler. Σημαντικός παράγοντας για μία αξιόπιστη και λειτουργική σύνδεση NB-IoT σε NTN είναι οι επαναλήψεις σημάτων. Το NB-IoT μεταδίδει πολλές φορές το ίδιο σήμα σε επιπλέον περιόδους χρόνου για να υπάρχει επαρκής ισχύς σήματος και να αποκωδικοποιηθεί σωστά το σήμα. Όσο μικρότερος είναι ο αριθμός των επαναλήψεων τόσο μικρότερη είναι η καθυστέρηση σήματος, οπότε είναι επίσης ένας παράγοντας που πρέπει κάπως να ισορροπηθεί. Η μετάδοση του σήματος NB-IoT εξαρτάται από την ισχύ του πομπού, τα κέρδη της κεραίας και τον λόγο CNR όπως θα δούμε παρακάτω στο δορυφορικό σενάριο [119] [123]. Τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν το NB-IoT σημαντικό αντικείμενο μελέτης στο πρακτικό μέρος της εργασίας, όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 4: Εισαγωγή στο Δορυφορικό Σενάριο

Αφού εξετάσαμε διεξοδικά τα θεωρητικά θεμέλια των δικτύων 5G NTN, στο παρόν κεφάλαιο εστιάζουμε στις προκλήσεις που παρουσιάζονται κατά την υλοποίησή τους, καθώς και στους τρόπους αντιμετώπισής τους μέσω κατάλληλης ανάλυσης και μοντελοποίησης. Η έμφαση δίνεται σε τεχνικά φαινόμενα που επηρεάζουν άμεσα την απόδοση των δορυφορικών επικοινωνιών.

Συγκεκριμένα, το φαινόμενο Doppler, το οποίο είναι ιδιαίτερα έντονο σε δορυφόρους χαμηλής τροχιάς (LEO), προκαλεί μετατοπίσεις συχνότητας της τάξης εκατοντάδων kHz, απαιτώντας προσαρμογές στη φάση και συχνότητα των κυματομορφών. Επιπλέον, οι απώλειες διαδρομής (path loss) είναι σημαντικά αυξημένες σε σύγκριση με μια επίγεια 5G σύνδεση, λόγω της μεγάλης απόστασης και των φυσικών εμποδίων. Παράλληλα, η διέλευση του σήματος μέσω της ιονόσφαιρας προκαλεί περιστροφή πόλωσης (polarization mismatch), οδηγώντας σε επιπρόσθετες απώλειες, οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη στον υπολογισμό του Link Budget.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές εξισώσεις που περιγράφουν τα παραπάνω φαινόμενα, παρέχοντας τη θεωρητική βάση για το επόμενο στάδιο της μελέτης. Στο πέμπτο κεφάλαιο, τα μοντέλα αυτά θα αξιοποιηθούν στην προσομοίωση ενός δορυφορικού σεναρίου στο MATLAB, με στόχο τη διερεύνηση της κάλυψης, της επίδρασης του Doppler, των παρεμβολών και άλλων κρίσιμων παραμέτρων. Μέσα από αυτή τη διαδικασία, θα επιδιώξουμε να διαμορφώσουμε στρατηγικές βελτιστοποίησης για την αποδοτική λειτουργία ενός συστήματος 5G NTN.

4.1 Περιθώριο Συνδέσμου σε Οπτικές Επικοινωνίες

Όπως αναφέραμε στο 3.5, οι οπτικοί σύνδεσμοι προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα. Όμως, για την ομαλή και βέλτιστη λειτουργία τους καθοριστικός παράγοντας είναι το περιθώριο συνδέσμου (link margin), το οποίο ορίζεται ως:

$$LM = Prx - Preq$$

[114]

Όπου:

- Prx : Η ισχύς του σήματος που λαμβάνει ο δορυφόρος ή ο σταθμός, σε dBm.
- $Preq$: Η ελάχιστη απαιτούμενη ισχύς για να πετύχουμε συγκεκριμένο ρυθμό σφάλματος bit (BER), σε dBm.

Εάν η τιμή του LM είναι θετική, τότε η θεωρείται αξιόπιστη και επαρκής. Αντίθετα, αρνητική τιμή υποδεικνύει πως το σήμα δεν είναι αρκετά ισχυρό για σταθερή επικοινωνία [116].

4.2 Προϋπολογισμός Ζεύξης Οπτικής Σύνδεσης Μεταξύ Δορυφόρων (ISL)

Οι ISL όπως είδαμε σε προηγούμενες ενότητες, αποτελούν σημαντικά στοιχεία των μη επίγειων δικτύων, ειδικά σε αστερισμούς χαμηλής τροχιάς όπως Starlink και OneWeb. Οι ISL επιτρέπουν την άμεση και αυτόνομη επικοινωνία μεταξύ δορυφόρων, χωρίς να μεσολαβούν επίγειοι σταθμοί, κάτι ιδιαίτερα χρήσιμο σε θαλάσσιες και απομονωμένες περιοχές. Για την αξιολόγηση της ποιότητας των οπτικών ISL, χρησιμοποιούμε προϋπολογισμό ζεύξης (link budget). Καθώς, παρόλο που το μέσο διάδοσης είναι το κενό του διαστήματος (δεν υπάρχει απορρόφηση), οι απώλειες προκύπτουν από παράγοντες όπως την ακρίβεια ευθυγράμμισης. Η λαμβανόμενη ισχύς (Prx) για μια οπτική διαδορυφορική σύνδεση υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο:

$$Prx = Ptx + OEtx + OErx + Gtx + Grx - LPtx - LPrx - LPS$$

[115]

Όπου:

- Ptx : Η λαμβανόμενη ισχύς, σε dBm.
- $OEtx$: Η απόδοση πομπού της οπτικής σύνδεσης, σε dB.
- $OErx$: Η απόδοση δέκτη της οπτικής σύνδεσης, σε dB.
- Gtx : Το κέρδος του πομπού (transmitter), σε dB.
- Grx : Το κέρδος του δέκτη (receiver), σε dB.

- LP_{tx} : Οι απώλειες του πομπού, σε dB.
- LP_{rx} : Οι απώλειες του δέκτη, σε dB.
- LPS : Η απώλεια free-space path loss μεταξύ δύο δορυφόρων, σε dB.

Τα κέρδη πομπού και δέκτη σε dB ορίζονται ως:

$$G_{tx} = 10 \log_{10}(g_{tx}),$$

$$G_{rx} = 10 \log_{10}(g_{rx}),$$

Όπου, g_{tx} το γραμμικό κέρδος του πομπού και g_{rx} το γραμμικό κέρδος του δέκτη, τα οποία ορίζονται ως:

$$\bullet \quad g_{tx} = \left(\frac{\pi d_{tx}}{\lambda} \right)^2,$$

$$\bullet \quad g_{rx} = \left(\frac{\pi d_{rx}}{\lambda} \right)^2,$$

Με τις παραμέτρους ως:

- λ : Μήκος κύματος, σε μέτρα.
- d_{tx} : Διάμετρος της κεραίας του πομπού, σε μέτρα.
- d_{rx} : Διάμετρος της κεραίας του δέκτη, σε μέτρα.

Τις απώλειες πομπού και δέκτη τις υπολογίζουμε χρησιμοποιώντας τα παρακάτω:

$$\bullet \quad LP_{tx} = 4.3429 x g_{tx} x (Pe_{tx})^2,$$

$$\bullet \quad LP_{rx} = 4.3429 x g_{rx} x (Pe_{rx})^2,$$

Όπου:

- Pe_{tx} : Τιμή σφάλματος του πομπού, σε ακτίνια.
- Pe_{rx} : Τιμή σφάλματος του δέκτη, σε ακτίνια.

Τέλος, για να βρούμε το free-space path loss (LPS), που είναι και ο πιο βασικός παράγοντας ενός ISL καθώς χρησιμοποιούνται ακτίνες λέιζερ υψηλής συχνότητας αντί για ραδιοκύματα που απαιτούν μεγάλη ακρίβεια κατεύθυνσης για να αποφύγουμε μεγάλες απώλειες, χρησιμοποιούμε:

$$L_{PS} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad [116]$$

4.3 Προϋπολογισμός Ζεύξης Ανερχόμενης και Κατερχόμενης Σύνδεσης

Για να αναλύσουμε τον προϋπολογισμό ζεύξης (link budget) σε μια τυπική ανερχόμενη και κατερχόμενη σύνδεση, λαμβάνουμε υπόψη παράγοντες όπως την απορρόφηση και διασπορά που προκύπτουν καθώς η δέσμη διαδίδεται μέσω της ιονόσφαιρας. Επομένως, για να υπολογίσουμε την λαμβανόμενη ισχύς για μία ανερχόμενη και κατερχόμενη σε dB, βασιζόμαστε στην ακόλουθη σχέση:

$$P_r = P_{tx} + OE_{tx} + OE_{rx} + G_{tx} + G_{rx} - LP_{tx} - LP_{rx} - L_{PG} - L_{abs} - L_{sca} \quad [116]$$

Όπου:

- L_{PG} : Απώλεια διάδοσης (Free-space path loss) μεταξύ επίγειου σταθμού και δορυφόρου, σε dB.
- L_{abs} : Εξασθένηση σήματος λόγω απορρόφησης (Absorption loss), σε dB.
- L_{sca} : Εξασθένηση σήματος λόγω διασποράς (Scattering loss), σε dB.

Η απώλεια διάδοσης στο διάστημα ορίζεται ως:

$$L_{PG} = 20 \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi d_{GS}} \right) \quad [117]$$

Όπου d_{GS} η απόσταση μεταξύ επίγειου σταθμού και δορυφόρου, σε km.

4.4 Εξασθένηση Σήματος σε Ανερχόμενη και Κατερχόμενη Σύνδεση

Η συνολική εξασθένηση σήματος λόγω διασποράς (L_{sca}) οφείλεται κυρίως σε δύο επιμέρους φαινόμενα:

- Γεωμετρική διασπορά (L_{geo})
- Διασπορά Mie (L_{mic})

Η γεωμετρική διασπορά L_{geo} προκαλείται όταν το μέγεθος των σωματιδίων της ατμόσφαιρας είναι αρκετά μεγαλύτερο από το μήκος του κύματος του μεταδιδόμενου σήματος. Εμφανίζεται κυρίως σε συνθήκες με ομίχλη και πυκνά σύννεφα όπου η δέσμη δεν περνάει με ασφάλεια. Εξαρτάται από τα παρακάτω:

- $A_{geo} = \frac{3.91}{V} x \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-\delta}$, τον συντελεστή εξασθένησης όπου V η ορατότητα σε km και δ το μέγεθος των σωματιδίων.
- d_T : Απόσταση διάδοσης της δέσμης στην ατμόσφαιρα, σε km.

Τελικά, η L_{geo} υπολογίζεται σε dB από την παρακάτω εξίσωση σύμφωνα με τον νόμο του Beers-Lambert:

$$L_{geo} = 4.3429 x A_{geo} x d_T$$

[118]

Η Mie διασπορά (L_{mic}), προκαλείται λόγω της διασποράς του φωτός κατά την κατεύθυνση της ακτινοβολίας. Εμφανίζεται κυρίως όταν τα σωματίδια έχουν ίδια διάμετρο με το μήκος κύματος του σήματος. Η εξασθένηση εξαρτάται από την γωνία από την αναλογία απώλειας ισχύος σήματος καθώς η οπτική δέσμη ταξιδεύει στην ατμόσφαιρα και ορίζεται ως ER_{mie} και υπολογίζεται με ατμοσφαιρικούς συντελεστές που περιγράφουν το υψόμετρο στην εξασθένηση του σήματος ως εξής:

$$ER_{mie} = ah_{GS}^3 + bh_{GS}^3 + ch_{GS} + d$$

[116]

Όπου:

- $a = 0.000487\lambda^3 - 0.002237\lambda^2 + 0.003864\lambda - 0.004442$
- $b = -0.00573\lambda^3 + 0.02639\lambda^2 - 0.04552\lambda + 0.05164$
- $c = 0.02565\lambda^3 - 0.1191\lambda^2 + 0.20385\lambda - 0.216$
- $d = -0.0638\lambda^3 + 0.3034\lambda^2 - 0.5083\lambda + 0.425$
- h_{GS} : Υψόμετρο από τον επίγειο σταθμό, σε km.

Η L_{mic} εξαρτάται επίσης από την γωνία ανύψωσης θ_E της οπτικής δέσμης προς τον δορυφόρο. Όταν η γωνία αυτή είναι μικρή τότε η οπτική δέσμη θα εκτελέσει μεγάλη απόσταση, προκαλώντας μεγαλύτερη διασπορά σήματος. Ενώ όταν είναι μεγάλη, η δέσμη έχει λιγότερες παρεμβολές με αποτέλεσμα να έχουμε μικρότερη διασπορά σήματος. Τελικά, η L_{mic} υπολογίζεται σε dB σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$L_{mie} = \frac{4.3429 \times ER_{mie}}{\sin(\theta_E)} \quad [117]$$

4.5 Λόγος Σήματος προς Θόρυβο (CNR) και Θεωρητική Τιμή Αναφοράς (Reference CNR)

Ο λόγος σήματος προς θόρυβο (CNR) αποτελεί βασική μετρική αξιολόγησης της ποιότητας ενός δορυφορικού συστήματος επικοινωνίας. Ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος προς την ισχύ του θορύβου στο δέκτη και εκφράζεται σε dB. Ένας υψηλός λόγος CNR υποδηλώνει ισχυρό σήμα, αξιόπιστη επικοινωνία και χαμηλό ρυθμό σφαλμάτων bit (BER), ενώ ένας χαμηλός λόγος ενδέχεται να οδηγήσει σε απώλειες δεδομένων και σφάλματα στη μετάδοση.

4.5.1 Τιμή Αναφοράς CNR (Reference CNR)

Η τιμή αναφοράς CNR $\left(\frac{C}{N}\right)_{ref}$ είναι μια θεωρητική τιμή που χρησιμοποιείται για σχεδιασμό και αξιολόγηση των δεσμών επικοινωνίας καθώς εδώ θεωρούμε ιδανικές συνθήκες όπου ο θόρυβος, οι παρεμβολές και οι παραμορφώσεις σήματος είναι ελάχιστες, κάτι που είναι σχεδόν απίθανο. Η εξίσωση της θεωρητικής τιμής είναι:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{ref} = \left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{ref} + 10\log_{10}(mR_{eff}) + 10\log_{10}\left(\frac{N_{DSC}}{N_{FFT}}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{T_d}{T_d + T_{CP}}\right) - 10\log_{10}(OSR) \quad [120]$$

Όπου:

- $\left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{ref}$: Τιμή σε dB για το βέλτιστο ποσοστό σφάλματος σε bit error rate (BER) με βάση τη μέθοδο διαμόρφωσης (BPSK, QPSK, 16-QAM).

- m : Βαθμός διαμόρφωσης (για παράδειγμα 2 για QPSK, 4 για 16-QAM)
- N_{DSC} : Αριθμός των δεδομένων που χρησιμοποιούνται.
- N_{FFT} : Συνολικός αριθμός μετασχηματισμών Fourier.
- T_d : Διάρκεια ενός δεδομένου συμβόλου σε δευτερόλεπτα.
- T_{CP} : Κυκλική διάρκεια prefix σε δευτερόλεπτα.
- OSR : ο συντελεστής δειγματοληψίας (συνήθως 1).
- R_{eff} : Ρυθμός κώδικα που εξαρτάται από:
- **Κατερχόμενη Ζεύξη:**
$$R_{eff} = \frac{N_{bits} + N_{CRC}}{N_{SF} N_{symbols} m N_{Rep}}$$
- **Ανερχόμενη Ζεύξη:**
$$R_{eff} = \frac{N_{bits} + N_{CRC}}{N_{RU} N_{symbols} m N_{Rep}}$$

Οπου:

- N_{bits} : Αριθμός των καλύτερων bits για μετάδοση σήματος.
- N_{CRC} : Αριθμός των bits που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του κώδικα.
- N_{SF} : Αριθμός των διαθέσιμων υποπλασιών (Μόνο για κατερχόμενη ζεύξη).
- N_{RU} : Αριθμός των πόρων που έχουν χρησιμοποιηθεί (Μόνο για ανερχόμενη ζεύξη).
- $N_{symbols}$: Σύνολο των συμβόλων.
- N_{Rep} : Αριθμός των απαιτούμενων επαναλήψεων.

4.5.2 Λόγος Σήματος προς Θόρυβο (CNR)

Για να βρούμε το πραγματικό λόγο CNR σε ένα link budget λαμβάνουμε υπόψιν τα τεχνικά χαρακτηριστικά και δεδομένα του δορυφόρου, του εξοπλισμού του χρήστη (UE), καθώς και τη γεωμετρική θέση του χρήστη σε σχέση με την εκπεμπόμενη δέσμη. Ακολουθούμε λοιπόν την παρακάτω εξίσωση:

$$CNR = EIRP + \frac{G}{T} - k - PL_{FS} - PL_A - PL_{SM} - PL_{SL} - PL_{AD} - B \quad [121]$$

Οπου:

- $EIRP$: Ισοτροπική ισχύς του πομπού, σε dBW.
- $\frac{G}{T}$: Κέρδος του θορύβου της κεραίας προς την θερμοκρασία, σε dB/K.
- k : Σταθερά Boltzmann για υπολογισμό του θορύβου, με τιμή -228.6 dBW/K/Hz.
- PL_{FS} : Απώλεια διάδοσης, σε dB.
- PL_A : Ατμοσφαιρικό path loss, σε dB.
- PL_{SM} : Περιθώριο (margin) λόγω σκιών, σε dB.
- PL_{SL} : Απώλεια σπινθηροβολίας, σε dB.
- PL_{AD} : Πρόσθετη απώλεια, σε dB.
- B : Εύρος ζώνης του καναλιού, σε dBHz.

Το κέρδος $\frac{G}{T}$ ορίζεται ως εξής:

$$\frac{G}{T} = G_R - N_f - 10\log_{10}\left(T_0 + (T_a - T_0)10^{-0.1N_f}\right) \quad [116] [121]$$

Οπου:

- G_R : Λαμβανόμενο κέρδος της κεραίας, σε dBi.

- N_f : Θόρυβος σήματος, σε dB.
- T_0 : Θερμοκρασία περιβάλλοντος, σε βαθμούς Kelvin (K).
- T_a : Θερμοκρασία της κεραίας, σε βαθμούς Kelvin (K).

Το κέρδος της κεραίας εξαρτάται από τον τύπο που χρησιμοποιείται και ευθύνεται για την απώλεια πόλωσης (polarization loss). Για να υπολογίσουμε την αποτελεσματική ιστροπική ισχύ σε dBW, χρησιμοποιούμε:

$$EIRP = P_T - L_C + G_T$$

Όπου:

- P_T : Ισχύς της κεραίας, σε dBW.
- G_T : Κέρδος της κεραίας πομπού, σε dBi.
- L_C : Απώλεια καλωδίου, σε dB.

[116] [121]

Εάν και μόνο αν ισχύει:

$$CNR > \left(\frac{C}{N} \right)_{ref}$$

Τότε το σήμα είναι επαρκές για αξιόπιστη αποκωδικοποίηση δεδομένων, χωρίς να χρειάζονται επιπλέον τεχνικές διόρθωσης σφαλμάτων (όπως HARQ). Πολύ σημαντικό για ένα σύστημα NTN καθώς οι δορυφόροι (κυρίως οι LEO) χρησιμοποιούν πολλές μεταδόσεις για να ρυθμίσουν τις απώλειες σήματος. Έτσι με ένα υψηλό CNR δεν χρειάζονται παραπάνω επαναλήψεις HARQ, με αποτέλεσμα να μειώνεται η καθυστέρηση και να βελτιώνεται η συνολική απόδοση του συστήματος.

4.6 Φαινόμενο Doppler

Λόγω της υψηλής ταχύτητας κίνησης των δορυφόρων, και κυρίως των LEO, παρατηρείται μία μετατόπιση συχνότητας γνωστή ως φαινόμενο Doppler. Αυτή η μετατόπιση οφείλεται στη σχετική κίνηση μεταξύ του δορυφόρου και του δέκτη και αποτελεί παράγοντα που επηρεάζει σημαντικά την απόδοση ενός συστήματος 5G NTN.

Συγκεκριμένα, οι LEO κινούνται περίπου σε ταχύτητες 7-8 km/s με αποτέλεσμα το Doppler να φτάνει ακόμη και σε εκατοντάδες kHz σε ζώνες συχνοτήτων όπως Ka-band και Ku-band, που χρησιμοποιούνται ευρέως στα μη επίγεια δίκτυα. Για αυτόν τον λόγο, η αντιστάθμιση και αντιμετώπιση της μετατόπισης Doppler είναι κρίσιμη για τη διατήρηση αξιόπιστης επικοινωνίας [122].

Το φαινόμενο Doppler υπολογίζεται ως:

$$f_d = \frac{u}{c} f_c \cos(\theta)$$

Όπου:

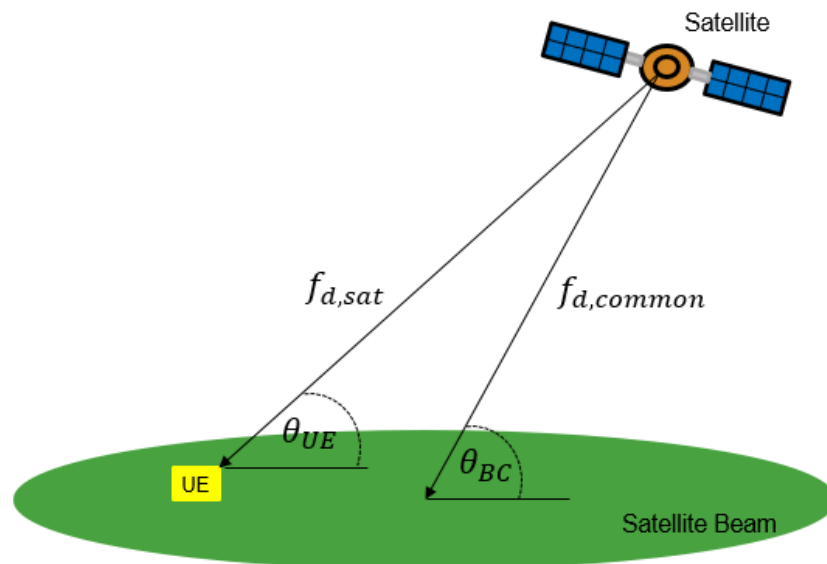
- f_d : Μετατόπιση Doppler, σε Hz.
- u : Σχετική ταχύτητα μεταξύ δορυφόρου και δέκτη.
- c : Ταχύτητα φωτός.
- f_c : Συχνότητα του μέσου μετάδοσης.
- θ : Γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης της δέσμης και της γραμμής όρασης (line of sight) προς τον δέκτη.

Για τον μετριασμό του Doppler εφαρμόζονται κυρίως δύο στρατηγικές:

- **Προ-αντιστάθμιση στον πομπό:** Ο πομπός διορθώνει προκαταβολικά τη συχνότητα μετάδοσης, γνωρίζοντας εκ των προτέρων την τροχιά και ταχύτητα του δορυφόρου. Η μέθοδος αυτή είναι πιο κατάλληλη για σταθερούς επίγειους σταθμούς.
- **Αντιστάθμιση στον δέκτη:** Ο δέκτης παρακολουθεί συνεχώς την τροχιά του δορυφόρου και ρυθμίζει τη συχνότητα σε πραγματικό χρόνο. Εφαρμόζεται κυρίως σε κινητούς χρήστες (UEs)

Στα 5G NTN, ο εξοπλισμός χρήστη (UE) σε μια δορυφορική δέσμη αντιμετωπίζει διαφορετικά φαινόμενα Doppler ανάλογα με τη θέση του μέσα στη δέσμη, για αυτό το λόγο έχουν οριστεί δύο τύποι φαινομένων Doppler:

- $f_{d,common}$: Η κοινή μετατόπιση Doppler που είναι η ίδια για όλους του χρήστες της ίδιας δέσμης. Εξαρτάται από τη γωνία θ_{sc} της δέσμης προς τη Γη [122].
- $f_{d,sat}$: Η μετατόπιση Doppler είναι ειδική για κάθε χρήστη, ανάλογα με τη σχετική του θέση μέσα στη δέσμη. Εξαρτάται από τη γωνία θ_{UE} του εξοπλισμού του χρήστη [122].



Εικόνα 13: Απεικόνιση Επίδρασης Doppler Shift [122].

Κεφάλαιο 5: Προσομοίωση και Ανάλυση Δορυφορικού Σεναρίου στο MATLAB

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η προσομοίωση ενός δορυφορικού σεναρίου στο περιβάλλον MATLAB, με στόχο την αξιολόγηση τεχνολογιών που προορίζονται για δίκτυα 5G NTN και Beyond 5G. Συγκεκριμένα, προσομοιώνεται ένας αστερισμός Starlink, ενώ πραγματοποιείται βασική ανάλυση της απόδοσης ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης μέσω της εφαρμογής Link Budget Analyzer App. Στη συνέχεια, εξετάζονται τροποποιήσεις του σεναρίου με στόχο την ενσωμάτωση τεχνολογιών όπως η οπτική επικοινωνία και το NB-IoT, και αξιολογούνται τα αποτελέσματα συγκριτικά με τις υφιστάμενες ραδιοτεχνολογίες. Τέλος, αναλύεται η επίδραση του φαινομένου Doppler στις δορυφορικές ζεύξεις και προτείνονται τεχνικές αντιστάθμισής του.

5.1 Μοντελοποίηση Αστερισμού Starlink στο MATLAB

Με τη χρήση του Satellite Communication Toolbox θα δημιουργήσουμε ένα δορυφορικό σενάριο και θα προσομοιώσουμε τον αστερισμό του Starlink, έπειτα θα προσθέσουμε επίγειους σταθμούς και θα αναλύσουμε το link budget. Αρχικά, ορίζουμε το σενάριο με την ημερομηνία του και το χρόνο διάρκειας.

```
startTime = datetime(2025,2,18,18,0,0); stopTime = startTime + hours(1);
sampleTime = 60; % seconds sc =
satelliteScenario(startTime,stopTime,sampleTime);
startTime = datetime(2025,2,18,18,0,0);
stopTime = startTime + hours(1);
sampleTime = 60; % seconds sc =
satelliteScenario(startTime,stopTime,sampleTime);
```

Εισάγουμε τους δορυφόρους και τις παραμέτρους τους μέσω αρχείου TLE (Two-Line Element):

```
tleFile = "starlink.tle";
starlinkSatellites = satellite(sc, tleFile);
```

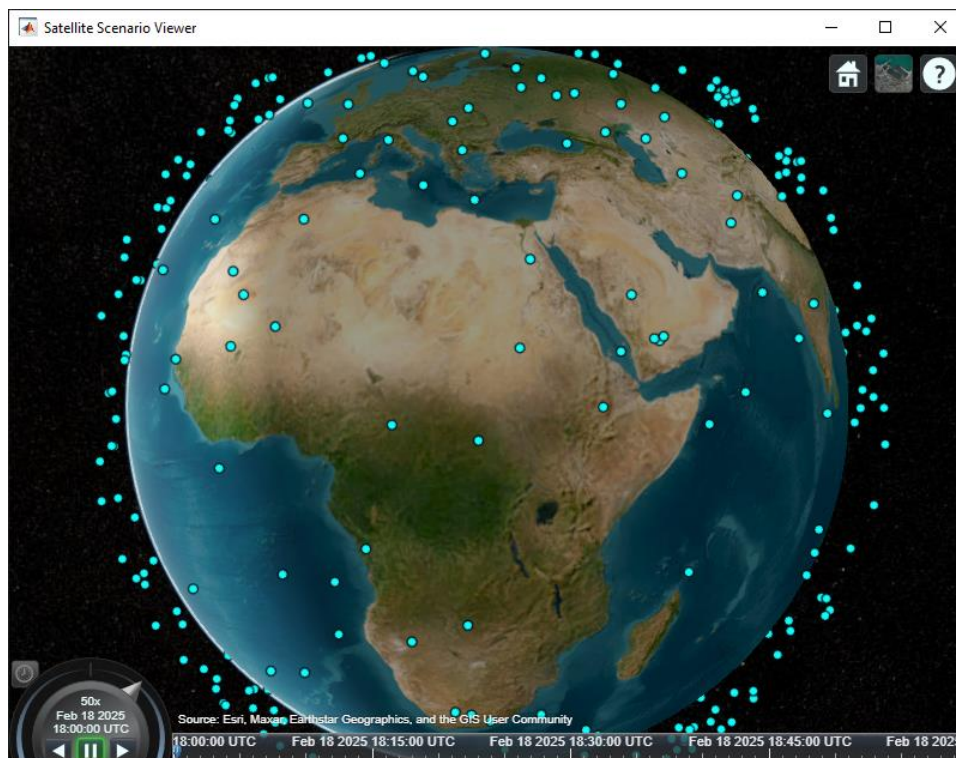
Οι πληροφορίες του αρχείου αντλήθηκαν από τη βάση Celestrak (<https://celestrak.org/NORAD/elements/supplemental/>) που περιλαμβάνει όλους τους δορυφόρους Starlink με επίσημες πληροφορίες σύμφωνα με το μοντέλο SPG4 (Απλοποιημένο Μοντέλο Γενικής Διαταραχής 4). Επειδή η προσομοίωση όλων των χιλιάδων δορυφόρων Starlink θα ήταν υπολογιστικά ασύμφορη, επιλέχθηκαν οι πρώτοι 500 δορυφόροι, οι οποίοι συμπεριλήφθηκαν στο αρχείο .tle. Κάθε εγγραφή του .tle περιέχει πληροφορίες για κάθε δορυφόρο σε τροχιά όπου:

- Η πρώτη γραμμή περιέχει το όνομα του δορυφόρου.
- Η δεύτερη γραμμή παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ταυτότητα του δορυφόρου, το έτος εκτόξευσης, πληροφορίες τροχιάς, κλπ.
- Η τρίτη γραμμή περιέχει τις τροχιακές πληροφορίες του δορυφόρου τα γνωστά Keplerian Elements, όπως RAAN, εκκεντρότητα, γωνίες και μοίρες τροχιάς κλπ.

Για παράδειγμα:

```
STARLINK-1008
1 44714C 19074B 25049.54979167 .00025364 00000+0 16980-2 0 490
2 44714 53.0519 111.0884 0001192 86.1291 238.2599 15.06405141 14
```

Αφού φορτωθούν τα δεδομένα και τρέξει η προσομοίωση, ο Viewer του MATLAB παρέχει την οπτική απεικόνιση του αστερισμού:



Εικόνα 14: Μοντελοποίηση και απεικόνιση αστερισμού Starlink στο MATLAB.

Στο επόμενο στάδιο του σεναρίου, προσθέτουμε πομπούς και δέκτες στους δορυφόρους με στόχο τη μοντελοποίηση κατερχόμενων ζεύξεων σε Ku-band. Ορίζονται οι βασικές παράμετροι εκπομπής ως εξής:

```
fq = 12e9; % 12 GHz (Ku-band συχνότητα)
txpower = 40; % dBW (ισχύς του πομπού)
antennaType = "Gaussian"; % Gaussian beam model
halfBeamWidth = 10; % Πλάτος ισχύος σε μοίρες
```

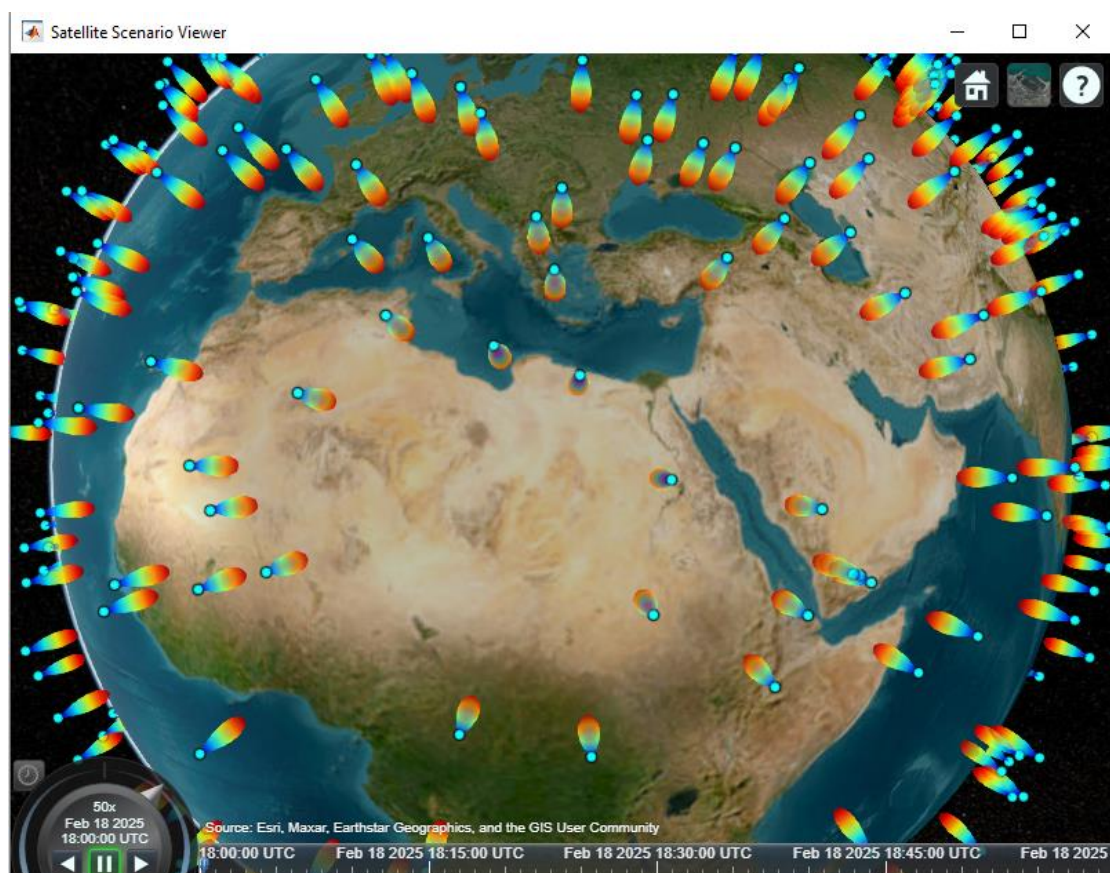
Ανάλυση παραμέτρων:

- **Συχνότητα:** Μοντελοποιούμε κατερχόμενη σύνδεση, και το Starlink για τα τερματικά χρησιμοποιεί Ku-band οπότε θέτουμε 12GHz.
- **Ισχύς πομπού:** 40dbW, η τιμή της ισχύος έχει μετρηθεί από 10 έως 80 watts οπότε 40 είναι μία λογική τιμή.

- **Τύπος δέσμης:** Κανονικά το Starlink χρησιμοποιεί phased array για το μοντέλου του αλλά καθώς το Satellite Communications Toolbox δεν το υποστηρίζει, θα χρησιμοποιήσουμε Gaussian για το μοντέλο δέσμης.
- **Πλάτος δέσμης σε μοίρες:** Χρησιμοποιούμε 10 μοίρες καθώς οι δέσμες του Starlink είναι πολύ στενές.

Για την απεικόνιση ισχύος των δορυφορικών πομπών, χρησιμοποιείται η εντολή:

```
pattern(tx,Size=500000);
```



Εικόνα 15: Απεικόνιση Δέσμης και Ισχύς Πομπών Starlink στο MATLAB.

5.2 Ανάλυση Δορυφορικής Επικοινωνίας Ραδιοσυχνοτήτων

Για την ανάλυση της απόδοσης σύνδεσης (link budget), επιλέγονται δύο δορυφόροι του αστερισμού Starlink: οι "STARLINK-1337" και "STARLINK-1293". Επιπλέον, προστίθενται δύο επίγειοι σταθμοί, ο ένας στην **Αθήνα** και ο άλλος στο **Βερολίνο**, όπως ορίζεται στον παρακάτω κώδικα:

```
gsAthens = groundStation(sc, 37.9838, 23.7275, Name="Athens GS");  
gsBerlin = groundStation(sc, 52.5200, 13.4050, Name="Berlin GS");
```

Στη συνέχεια, θα προσθέσουμε δύο **gimbals** στους δύο σταθμούς μας, τα οποία επιτρέπουν να ακολουθούμε την τροχιά των κεραιών και να μην χάνεται σήμα κατά την μετακίνηση των δορυφόρων, να υπάρχει δηλαδή συνεχής ευθυγράμμιση:

```
gimbalSat1 = gimbal(selectedSatellites(1));  
gimbalSat2 = gimbal(selectedSatellites(2));  
gimbalGsAthens = gimbal(gsAthens);  
gimbalGsBerlin = gimbal(gsBerlin);
```

Ορίζεται πομπός στον σταθμό της Αθήνας (uplink) και δέκτης στον σταθμό του Βερολίνου (downlink). Οι παράμετροι εκπομπής και λήψης έχουν ως εξής:

```
frequency = 30e9; % Hz  
power = 40; % dBW  
bitRate = 20; % Mbps  
txGsAthens = transmitter(gimbalGsAthens, Name="Athens GS Transmitter", ...  
    Frequency=frequency, Power=power, BitRate=bitRate); dishDiameterGs = 5; % m  
gaussianAntenna(txGsAthens, DishDiameter=dishDiameterGs);  
  
requiredEbNo = 14; % dB rxGsBerlin = receiver(gimbalGsBerlin, Name="Berlin  
GS Receiver", RequiredEbNo=requiredEbNo);  
gaussianAntenna(rxGsBerlin, DishDiameter=dishDiameterGs);
```

Στη συνέχεια, κατευθύνουμε τις κεραιές στους αντίστοιχους σταθμούς και παραμένουν εκεί συνεχώς για καλύτερη ποιότητα σύνδεσης. Χρησιμοποιούμε την εντολή "pointAt" για να ορίσουμε τα παρακάτω:

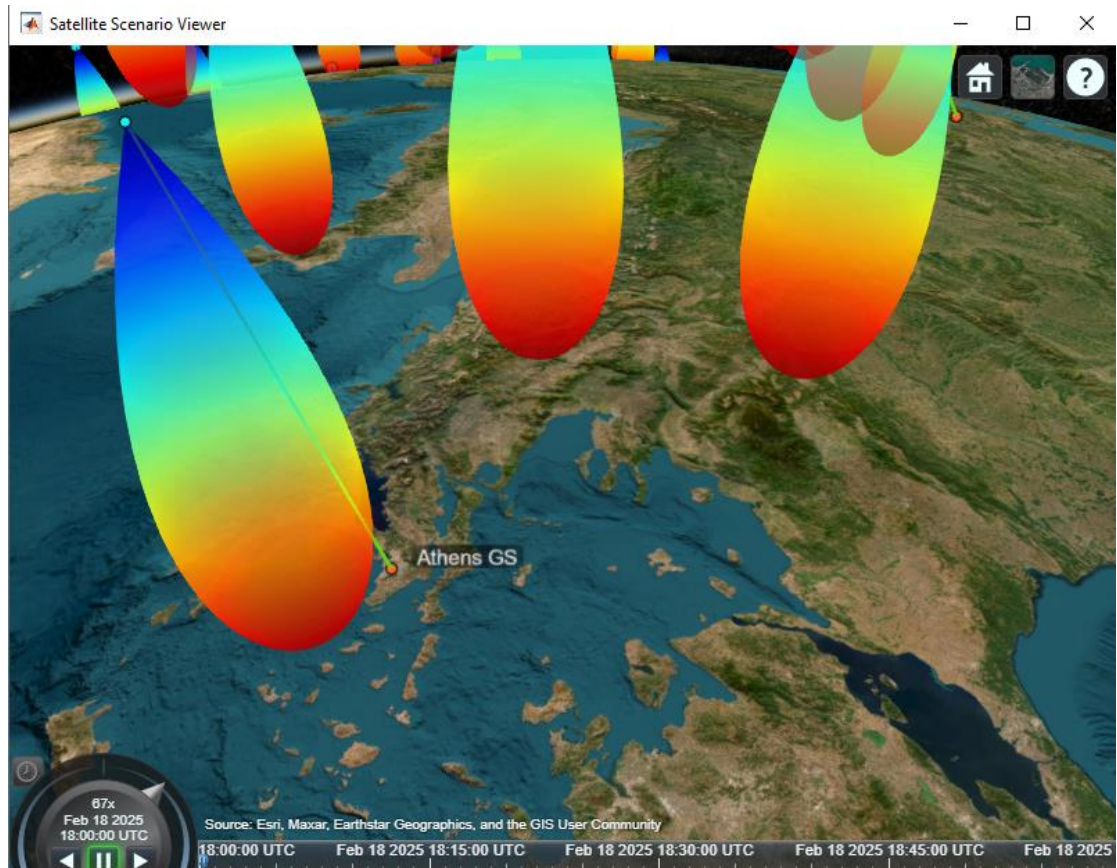
- Η κεραία πομπού του σταθμού της Αθήνας δείχνει στον πρώτο δορυφόρο.
- Η κεραία δέκτη στον πρώτο δορυφόρο δείχνει στον σταθμό της Αθήνας.
- Η κεραία πομπού στον δεύτερο δορυφόρο κατευθύνεται στον Σταθμό του Βερολίνου.
- Η κεραία δέκτη του Βερολίνου δείχνει στον δεύτερο δορυφόρο.

```
pointAt(gimbalGsAthens, selectedSatellites(1));  
pointAt(gimbalSat1, gsAthens);  
pointAt(gimbalSat2, gsBerlin);  
pointAt(gimbalGsBerlin, selectedSatellites(2));
```

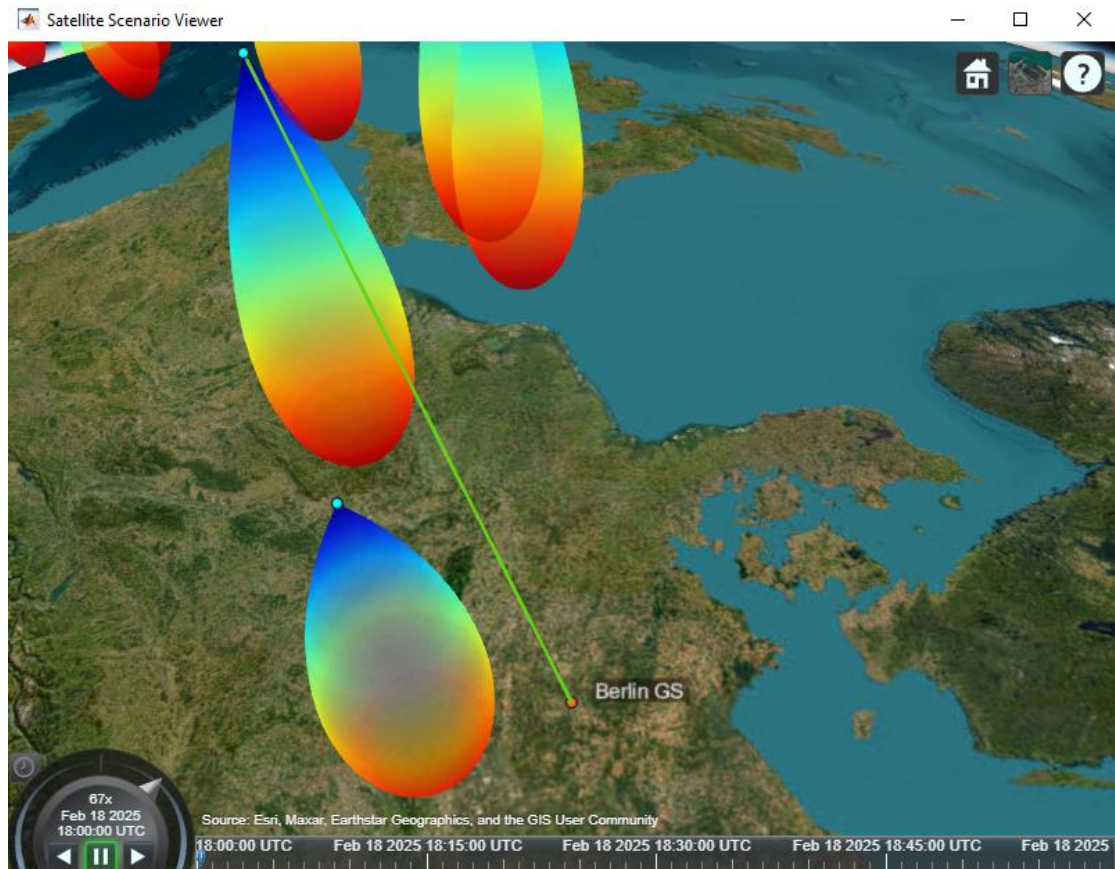

Με τις παρακάτω εντολές δημιουργούνται οι δύο ζεύξεις:

- **Ανερχόμενη (uplink)** από Αθήνα προς τον πρώτο δορυφόρο.
- **Κατερχόμενη (downlink)** από τον δεύτερο δορυφόρο προς το Βερολίνο.

```
uplink = link(txGsAthens, rxSat1);  
downlink = link(txSat2, rxGsBerlin);
```



Εικόνα 16: Προσομοίωση Ανερχόμενης Ζεύξης στο MATLAB.

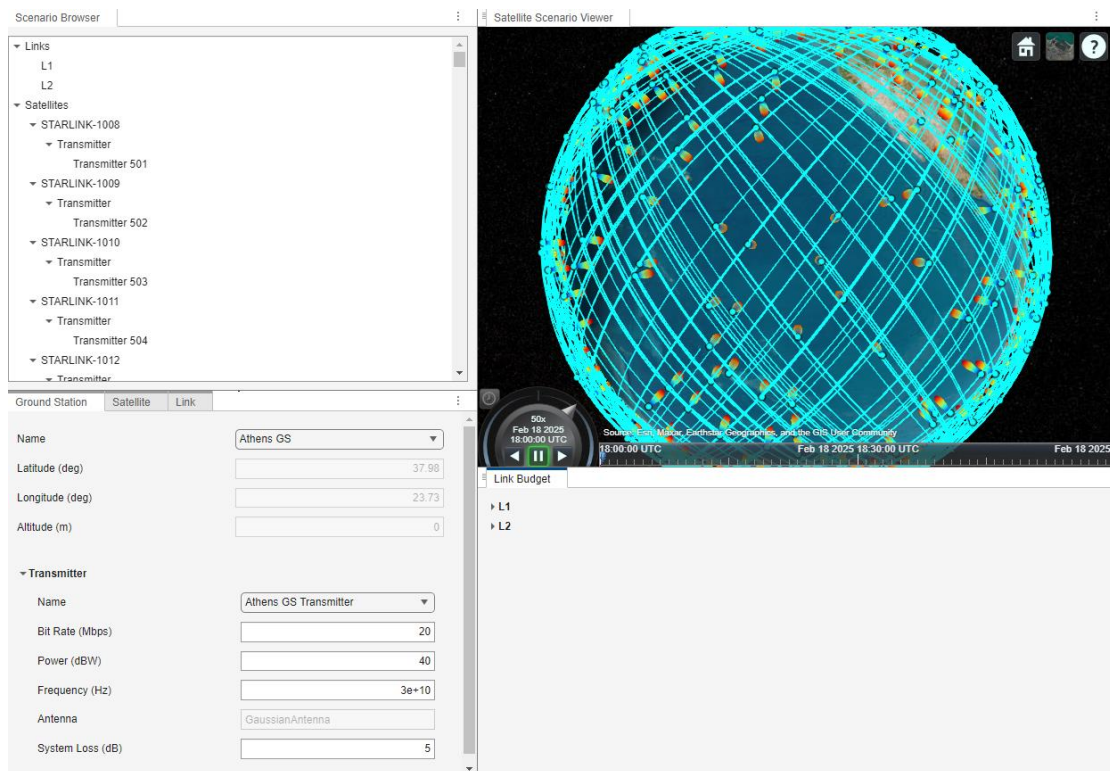


Εικόνα 17: Προσομοίωση Κατερχόμενης Ζεύξης στο MATLAB.

Τέλος με την παρακάτω εντολή, αποθηκεύουμε τα δεδομένα του σεναρίου σε ένα αρχείο το οποίο θα εισάγουμε στο Satellite Link Budget Analyzer App του Matlab για την ανάλυση του budget link.

```
save("StarlinkScenario.mat", "sc");
```

Αφού ανοίξουμε την εφαρμογή, επιλέγουμε την επιλογή “time-varying link budget analyzer” για να αναλύσουμε τους συνδέσμους με βάση την μεταβολή τους στο χρόνο. Στη γραμμή εργαλείων επιλέγουμε εισαγωγή σεναρίου και εισάγουμε το σενάριο μας “StarlinkScenario.mat”. Η εικόνα 18 δείχνει την ενημερωμένη απεικόνιση της εφαρμογής με το σενάριό μας.



Εικόνα 18: Εισαγωγή Σεναρίου στην Εφαρμογή του MATLAB για Ανάλυση.

5.2.1 Ανάλυση Ανερχόμενης Ζεύξης στο Satellite Link Budget Analyzer App

Η ανερχόμενη ζεύξη χρησιμοποιώντας RF στο σενάριό μας συμβαίνει από τον επίγειο σταθμό της Αθήνας προς τον δορυφόρο Starlink που λειτουργεί ως δέκτης. Έχουμε εξάγει λοιπόν, τον παρακάτω πίνακα αποτελεσμάτων από το Satellite Link Budget Analyzer.

| Χρόνος (s) | Απόσταση (km) | Γωνία Ανύψωσης (μοίρες) | EIRP (dBW) | FSPL (dB) | RIP (dBW) | CNR (dB-Hz) | Eb/No (dB) | Περιθώριο Συνδέσμου (dB) |
|-------------------|---------------|-------------------------|------------|-----------|-----------|-------------|------------|--------------------------|
| 18-Feb-2025 18:00 | 445.95 | 78.02 | 97.06 | 174.98 | -77.91 | 152.68 | 79.67 | 69.67 |
| 18-Feb-2025 18:01 | 559.47 | 49.87 | 97.06 | 176.94 | -79.88 | 150.71 | 77.70 | 67.70 |
| 18-Feb-2025 18:02 | 889.77 | 26.04 | 97.06 | 180.97 | -83.91 | 146.68 | 73.67 | 63.67 |
| 18-Feb-2025 18:03 | 1.277 | 14.74 | 97.06 | 184.11 | -87.06 | 143.54 | 70.52 | 60.52 |
| 18-Feb-2025 18:04 | 1.683.1 | 7.90 | 97.06 | 186.51 | -89.45 | 141.14 | 68.13 | 58.13 |
| 18-Feb-2025 18:05 | 2.094.4 | 3.01 | 97.06 | 188.41 | -91.35 | 139.24 | 66.24 | 56.24 |

Πίνακας 4: Αποτελέσματα Ανερχόμενης Ζεύξης.

Παρατηρήσεις:

- Απόσταση & Γωνία Ανύψωσης:** Με την σταδιακή απομάκρυνση του δορυφόρου από τον επίγειο σταθμό ανά δευτερόλεπτο, η γωνία ανύψωσης μειώνεται, το οποίο αυξάνει τη διαδρομή διάδοσης μεταξύ της ζεύξης.
- EIRP:** Η ιστροπική ισχύς του πομπού (επίγειος σταθμός) παραμένει σταθερή στα 97.06 dBW.
- FSPL (Free-Space Path Loss):** Αυξάνεται από 174.98 dB σε 188.41 dB, λόγω της αύξησης της απόστασης.
- CNR:** Ξεκινά από 152.68 dB-Hz και μειώνεται σε 139.24 dB-Hz, λόγω της αύξησης της απόστασης και του path loss. Εδώ το CNR δεν επηρεάζεται σημαντικά από την EIRP που μένει σταθερή.
- Eb/No:** Η τιμή σε dB για το βέλτιστο ποσοστό σφάλματος σε bit error rate (BER) παρουσιάζει μία πτώση από 79.67 dB σε 66.24 dB.

- **Margin (Περιθώριο Σύνδεσης):** Μειώνεται από 69.67 dB σε 56.24 dB και έχουμε μία θετική τιμή, που σημαίνει πως η σύνδεση παραμένει πολύ ισχυρή και σταθερή με αξιόπιστο σήμα.

5.2.2 Ανάλυση Κατερχόμενης Ζεύξης στο Satellite Link Budget Analyzer App

Έπειτα αναλύουμε την κατερχόμενη ζεύξη L2 από τον δορυφόρο προς τον επίγειο σταθμού του Βερολίνου ο οποίος λειτουργεί ως δέκτης της σύνδεσης.

| Χρόνος (s) | Απόσταση (km) | Γωνία Ανύψωσης (μοίρες) | EIRP (dBW) | FSPL (dB) | RIP (dBW) | CNR (dB-Hz) | Eb/No (dB) | Περιθώριο Συνδέσμου (dB) |
|-------------------|---------------|-------------------------|------------|-----------|-----------|-------------|------------|--------------------------|
| 18-Feb-2025 18:00 | 684.88 | 51.97 | 57.00 | 177.79 | -120.78 | 105.81 | 32.80 | 18.80 |
| 18-Feb-2025 18:01 | 557.51 | 81.95 | 57.00 | 176.00 | - 118.98 | 107.60 | 34.59 | 20.59 |
| 18-Feb-2025 18:02 | 710.66 | 49.08 | 57.00 | 178.10 | -121.10 | 105.49 | 32.48 | 18.48 |
| 18-Feb-2025 18:03 | 1.025 | 28.84 | 57.00 | 181.28 | -124.28 | 102.31 | 29.30 | 15.30 |
| 18-Feb-2025 18:04 | 1.349 | 17.71 | 57.00 | 183.96 | - 126.96 | 99.63 | 26.62 | 12.62 |
| 18-Feb-2025 18:05 | 1.785 | 10.56 | 57.00 | 186.10 | - 129.10 | 97.49 | 24.48 | 10.48 |
| 18-Feb-2025 18:06 | 2.183.5 | 5.34 | 57.00 | 187.85 | -130.86 | 95.74 | 22.73 | 8.73 |
| 18-Feb-2025 18:07 | 2.585.3 | 1.18 | 57.00 | 189.32 | -132.32 | 94.27 | 21.27 | 7.27 |

Πίνακας 5: Αποτελέσματα Κατερχόμενης Ζεύξης.

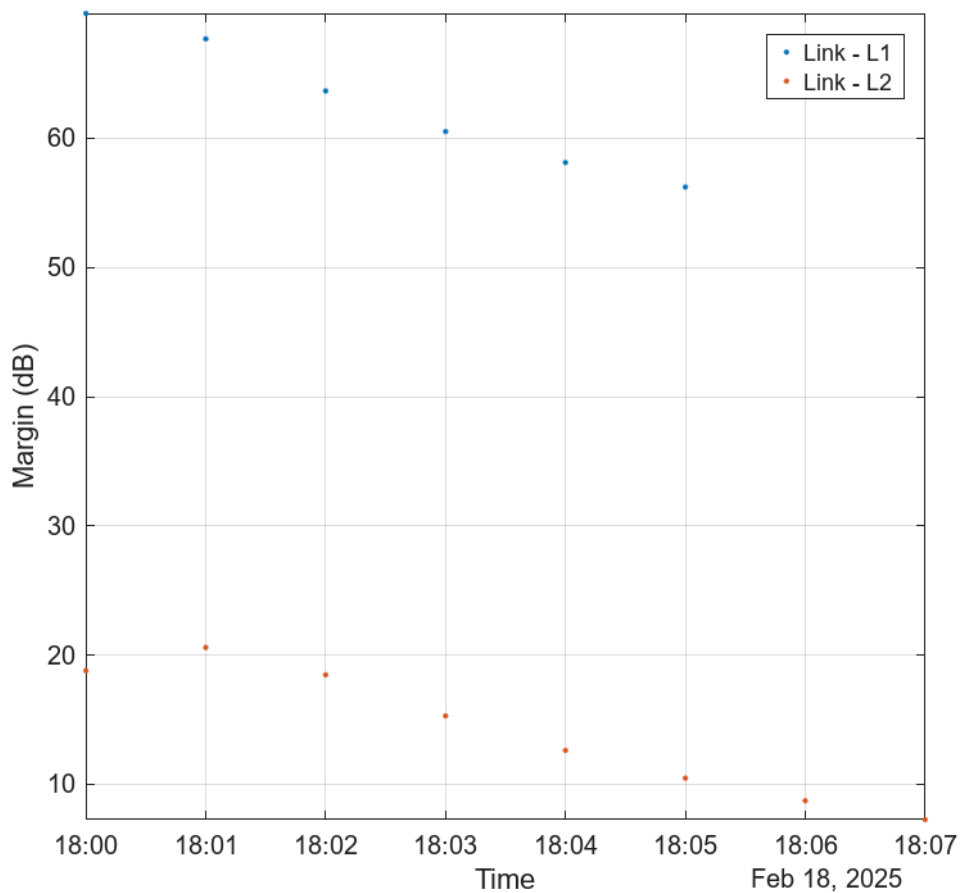
Παρατηρήσεις:

- **Απόσταση & Γωνία Ανύψωσης:** Με την σταδιακή απομάκρυνση του δορυφόρου από τον επίγειο σταθμό ανά δευτερόλεπτο, η γωνία ανύψωσης μειώνεται, το οποίο αυξάνει τη διαδρομή διάδοσης μεταξύ της ζεύξης.
- **EIRP:** Η ιστροπική ισχύς του πομπού (δορυφόρος) παραμένει σταθερή στα 57.00 dBW. Αρκετά πιο χαμηλή από την ανερχόμενη ζεύξη το οποίο είναι απόλυτα φυσιολογικό αφού οι επίγειοι σταθμοί έχουν πιο ισχυρούς πομπούς από ότι οι δορυφόροι.
- **FSPL (Free-Space Path Loss):** Αυξάνεται από 177.79 dB σε 189.32 dB, καθώς η απόσταση μεγαλώνει.
- **CNR:** Μειώνεται από 105.81 dB-Hz σε 94.27 dB-Hz, λόγω της εξασθένησης του σήματος.
- **Eb/No:** Μειώνεται από 105.81 dB-Hz σε 94.27 dB-Hz
- **Margin (Περιθώριο Ζεύξης):** Ξεκινά από 18.80 dB και καταλήγει σε 7.27 dB, κάτι που σημαίνει ότι η σύνδεση γίνεται πιο ασταθής καθώς ο δορυφόρος απομακρύνεται.

Συμπέρασμα: Η κατερχόμενη ζεύξη είναι σημαντικά πιο αδύναμη από την ανερχόμενη, καθώς η ισχύς του πομπού στον δορυφόρο είναι πολύ χαμηλή (57 dBW), ενώ το path loss είναι πολύ υψηλό.

5.2.3 Περιθώριο Συνδέσμου Επί του Χρόνου

Το παρακάτω γράφημα του Πίνακα 6, που έχουμε εξάγει από το Analyzer App, δείχνει πως μεταβάλλεται το περιθώριο των συνδέσμων L1 και L2 σε dB με την πάροδο του χρόνου σε δευτερόλεπτα. Παρατηρούμε ότι το περιθώριο της L1 ανερχόμενης (με μπλε) ξεκινάει σε υψηλή τιμή και μειώνεται σταδιακά, ενώ το περιθώριο της L2 κατερχόμενης (με κόκκινο) είναι εξ αρχής χαμηλό και μειώνεται πιο απότομα. Λαμβάνουμε υπόψη ότι χρησιμοποιούμε δύο σταθμούς σε διαφορετικό γεωγραφικό σημείο, οπότε είναι λογικό να επηρεάζει σημαντικά η απόσταση και επίσης ότι η L2 έχει μεγαλύτερη διάρκεια, λογικά γιατί υποστηρίζει μεγαλύτερη κάλυψη.



Πίνακας 6: Γράφημα Περιθωρίου Συνδέσμων Επί του Χρόνου.

5.3 Ανάλυση Οπτικής Δορυφορικής Επικοινωνίας

Αφού αναλύσαμε την επικοινωνία βασισμένη σε RF για Starlink, θα εξετάσουμε τη χρήση οπτικής επικοινωνίας μεταξύ των επίγειων σταθμών και δορυφόρων. Σκοπός είναι να συγκρίνουμε την απόδοση του οπτικού συνδέσμου με το RF και να αποδείξουμε ότι είναι η πιο κατάλληλη τεχνολογία για ένα 5G NTN. Θα αναλύσουμε τις ανερχόμενες και κατερχόμενες ζεύξεις καθώς και τις δια-δορυφορικές επικοινωνίες (ISL).

Αρχικά, ορίζουμε τις παραμέτρους στον κώδικά μας βασισμένοι στις εξισώσεις που έχουμε αναλύσει στα κεφάλαια 4.1, 4.2 και 4.3. Έπειτα με χρήση του κώδικας προχωράμε σε ανάλυση της σύνδεσης μέσω οπτικής ζεύξης για ανερχόμενη, κατερχόμενη ή ISL ανάλογα με το πεδίο “link.Type”. Για την ανερχόμενη και κατερχόμενη ζεύξη, η οπτική σύνδεση γίνεται μεταξύ του επίγειου σταθμού και του δορυφόρου A. Η ISL σύνδεση φυσικά γίνεται μεταξύ του δορυφόρου A και B.

```
% Επιλογή τύπου ζεύξης: "downlink", "uplink", "inter-satellite" link.Type =
"uplink";
link.CloudType = "Thin cirrus"; % Επιλογή τύπου νεφών (επηρεάζει τις
απώλειες), υπάρχει σχετικό function
%% Επιλογή Πομπού & Δέκτη ανάλογα με τον τύπο ζεύξης if link.Type ==
"downlink"    tx = satA;
    rx = gs;
elseif link.Type == "uplink"    tx = gs;
    rx = satA;
else    tx = satA;
    rx = satB;
end
```

Υπολογίζουμε τα κέρδη πομπού G_{tx} και δέκτη G_{rx} σε dB.

```
%% Υπολογισμός Κέρδους transmitter και receiver txGain = (pi *
tx.ApertureDiameter / link.Wavelength)^2;
Gtx = 10 * log10(txGain);
rxGain = (pi * rx.ApertureDiameter / link.Wavelength)^2;
Grx = 10 * log10(rxGain);
```

Υπολογίζουμε τις απώλειες πομπού L_{Ptx} και δέκτη L_{Prx} σε dB.

```
%% Υπολογισμός Απωλειών Κατεύθυνσης για πομπό και δέκτη (Pointing Loss)
txPointingLoss = 4.3429 * txGain * (tx.PointingError)^2;
rxPointingLoss = 4.3429 * rxGain * (rx.PointingError)^2;
```

5.3.1 Υπολογισμός Περιθωρίου Συνδέσμου Οπτικής Επικοινωνίας ISL

Για τα ISL, όπως είπαμε δεν χρειάζεται να λάβουμε υπόψιν ατμοσφαιρικές απώλειες καθώς οι δορυφόροι βρίσκονται στο διάστημα. Οπότε υπολογίζουμε κατευθείαν το LM αφού πρώτα βρούμε το LPS μεταξύ δύο δορυφόρων.

```
if link.Type == "inter-satellite"    % Απώλειες ελεύθερου χώρου μεταξύ των
δύο δορυφόρων (δεν έχουμε ατμοσφαιρικά φαινόμενα)
    pathLoss = fspl(link.SatDistance * 1e3, link.Wavelength);
    linkMargin = Ptx + 10*log10(tx.OpticsEfficiency) +
10*log10(rx.OpticsEfficiency) + ...
    Gtx + Grx - txPointingLoss - rxPointingLoss - pathLoss - Preq;
    disp("Link margin for inter-satellite link: " + num2str(linkMargin) + "
dB");

elseif (link.Type == "uplink") || (link.Type == "downlink")
```

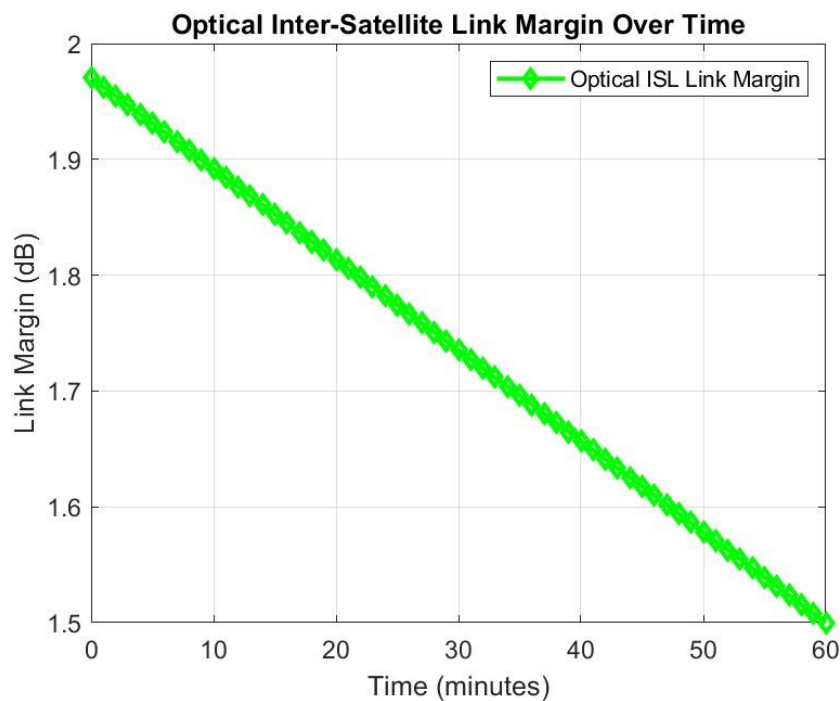
Τελικά έχουμε το παρακάτω αποτέλεσμα:

```
Link margin for inter-satellite link: 1.9703 dB
```

Η τιμή αυτή δείχνει λειτουργική αλλά οριακή απόδοση. Μπορούμε να πετύχουμε παραπάνω αν αυξήσουμε τις διαμέτρους της κεραίας ή αν αυξήσουμε την ισχύ του πομπού. Όμως, καθώς αναφερόμαστε σε Starlink, υπάρχουν χιλιάδες δορυφόροι που επικοινωνούν μεταξύ τους ανά δευτερόλεπτο, οπότε παραμένει μία πολύ ικανοποιητική απόδοση.

Στο παρακάτω κομμάτι κώδικα, παράγουμε το γράφημα που φαίνεται στον πίνακα 7 με το **LM** του ISL επί την πάροδο του χρόνου.

```
link_margin_isl = linspace(1.9703, 1.5, length(time)); % Μικρές
διακυμάνσεις
%% Γράφημα Περιθωρίου Σύνδεσης Δια-Δορυφορικής Ζεύξης (ISL)
figure;
plot(time / 60, link_margin_isl, 'gd-', 'LineWidth', 2, 'MarkerSize', 6);
xlabel('Time (minutes)');
ylabel('Link Margin (dB)');
title('Optical Inter-Satellite Link Margin Over Time');
grid on;
legend('Optical ISL Link Margin');
set(gca, 'FontSize', 11);
```



Πίνακας 7: Περιθώριο Συνδέσμου ISL Οπτικής Σύνδεσης επί του Χρόνου.

5.3.2 Υπολογισμός Περιθωρίου Συνδέσμου Οπτικής Επικοινωνίας Ανερχόμενης και Κατερχόμενης Ζεύξης

Λαμβάνουμε υπόψη την ατμοσφαιρική απορρόφηση και διασπορά που προκύπτει από την γεωγραφική διασπορά και τη διασπορά Μι όπως έχουμε εξηγήσει στο 4.3.

```
% Υπολογισμός της απόστασης της οπτικής δέσμης που διαδίδεται % στην
τροπόσφαιρα σε km dT = (link.TroposphereHeight - gs.Height) *
cscd(link.ElevationAngle);
% Υπολογισμός απόστασης μεταξύ επίγειου σταθμού και δορυφόρου σε m
dGS = slantRangeCircularOrbit(link.ElevationAngle, satA.Height*1e3,
gs.Height*1e3);
```

```
% Υπολογισμός απώλειας διαδρομής μεταξύ σταθμού και δορυφόρου σε dB
pathLoss = fspl(dGS, link.Wavelength);
```

Όπως φαίνεται στο κομμάτι κώδικα παραπάνω, υπολογίζουμε την απόσταση d_{GS} και d_T για να βρούμε το free space path loss L_{PG} . Έπειτα υπολογίζουμε την γεωμετρική διασπορά και τη διασπορά M_i , υπολογίζοντας και κάθε συντελεστή που τις επηρεάζει.

```
% Υπολογισμός γεωμετρικής διασποράς [cnc, lwc] =
getCloudParameters(link.CloudType);
visibility = 1.002 / ((lwc * cnc)^0.6473);
% Προσαρμόζουμε ορατότητα για ανερχόμενη και κατερχόμενη if
link.Type == "uplink" visibility = visibility * 0.8; % Μείωση
ορατότητας λόγω της πυκνότερης ατμόσφαιρας else visibility =
visibility * 1.2; % Αύξηση end delta = 1.3; % τιμή για καθαρό
ουρανό geoCoeff = (3.91 / visibility) * ((link.Wavelength * 1e9 / 550)^-
delta);
geoScaLoss = 4.3429 * geoCoeff * dT;
% Υπολογισμός διασποράς  $M_i$  lambda_mu = link.Wavelength * 1e6;
a = 0.000487 * lambda_mu^3 - 0.002237 * lambda_mu^2 + 0.003864 *
lambda_mu - 0.004442;
b = -0.00573 * lambda_mu^3 + 0.02639 * lambda_mu^2 - 0.04552 * lambda_mu
+ 0.05164;
c = 0.02565 * lambda_mu^3 - 0.1191 * lambda_mu^2 + 0.20385 * lambda_mu -
0.216;
d = -0.0638 * lambda_mu^3 + 0.3034 * lambda_mu^2 - 0.5083 * lambda_mu +
0.425;
mieER = a * gs.Height^3 + b * gs.Height^2 + c * gs.Height + d;
mieScaLoss = (4.3429 * mieER) / sind(link.ElevationAngle);
% Αλλαγή διασποράς  $M_i$  ανάλογα για ανερχόμενη και κατερχόμενη if
link.Type == "uplink" mieScaLoss = mieScaLoss * 1.2; else
mieScaLoss = mieScaLoss * 0.8; end
```

Τελικά, υπολογίζουμε την τελική τιμή του περιθωρίου συνδέσμου σε dB για ανερχόμενη ή κατερχόμενη.

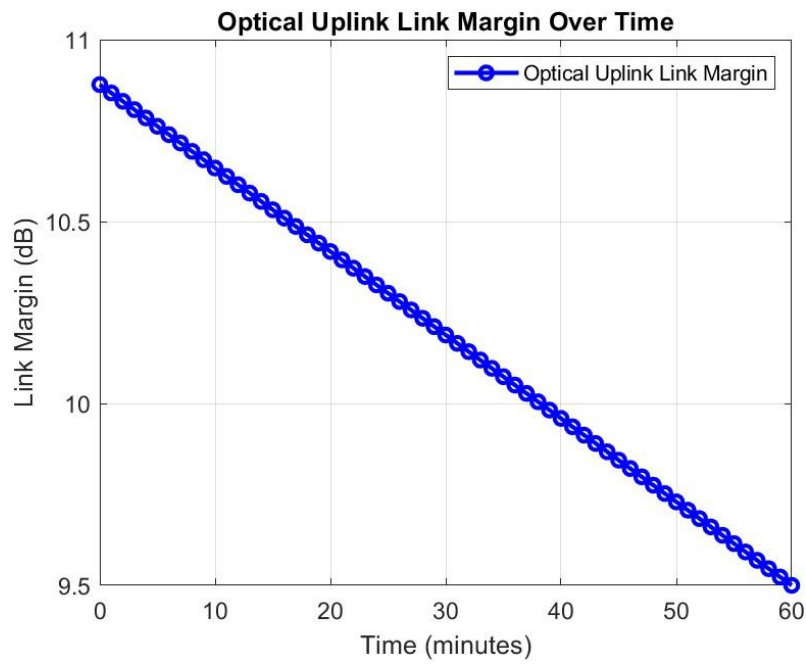
```
% Υπολογισμός τελικού περιθωρίου συνδέσμου σε dB linkMargin = Ptx +
10*log10(tx.OpticsEfficiency) + 10*log10(rx.OpticsEfficiency) + ...
Gtx + Grx - txPointingLoss - rxPointingLoss - pathLoss -
absorptionLoss - ...
geoScaLoss - mieScaLoss - Preq;
disp("Link margin for " + link.Type + " is " + num2str(linkMargin) + "
dB");
```

5.3.3 Αποτελέσματα και Παρατηρήσεις

Για Ανερχόμενη Ζεύξη έχουμε:

```
Link margin for uplink is 10.8765 dB
```

Δίνει υψηλή απόδοση, και υπερβαίνει αρκετά την τιμή σε επικοινωνία RF. Παρόμοια με το ISL, παράγουμε το γράφημα LM επί Χρόνου παρακάτω:

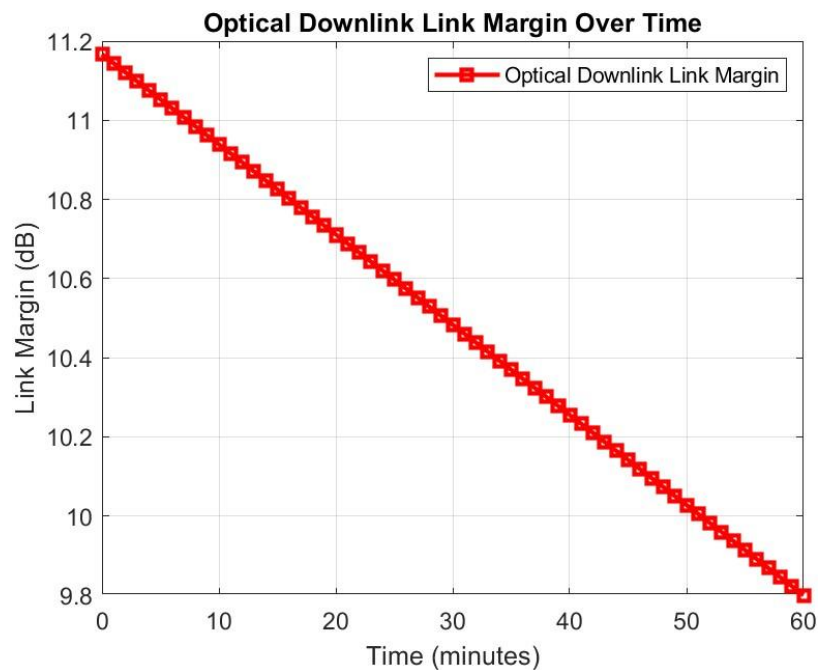


Πίνακας 8: Περιθώριο Συνδέσμου Ανερχόμενης Οπτικής Σύνδεσης επί του Χρόνου.

Για Κατερχόμενη Ζεύξη έχουμε:

Link margin for downlink is 11.1668 dB

Υποδηλώνει μία αξιόπιστη και σταθερή σύνδεση ακόμη και με τυπικές ατμοσφαιρικές απώλειες και παρεμβολές.



Πίνακας 9: Περιθώριο Συνδέσμου Κατερχόμενης Οπτικής Σύνδεσης επί του Χρόνου.

5.4 Ανάλυση Ζεύξης NB-IoT NTN

Όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο 3.6, το NB-IoT αναμένεται να χρησιμοποιηθεί στα 5G NTN. Θα υπολογίσουμε λοιπόν τον λόγο CNR για μία σύνδεση μεταξύ NB-IoT και UE, χρησιμοποιώντας ίδιους παραμέτρους από το δορυφορικό μας σενάριο που έχει εφαρμοστεί για να παρατηρήσουμε πως αλλάζει η απόδοση της σύνδεσης. Θα υπολογίσουμε επίσης τον ελάχιστο αριθμό επαναλήψεων που απαιτούνται για μία βέλτιστη μετάδοση σήματος.

Αρχικά, ορίζουμε τα χαρακτηριστικά του δορυφόρου “STARLINK-1337” με βάση τις παραμέτρους και εξισώσεις που έχουμε αναλύσει στο κεφάλαιο 4.5:

```
% Ορισμός Δορυφορικών Παραμέτρων (Starlink-1337)
satellite = struct;
satellite.EIRPDensity = 57; % EIRP από το Link Budget Analyzer (dBW/MHz)
satellite.RxGBYT = 15; % G/T για Starlink (εκτιμώμενο, dB/K)
satellite.Altitude = 550e3; % Υψόμετρο από το TLE (550 km)
% Ορισμός Παραμέτρων Επίγειου Τερματικού (UE - Χρήστης)
ue = struct;
ue.TxPower = 23; % Ισχύς μετάδοσης (dBm)
ue.TxGain = 0; % Κέρδος κεραίας πομπού (dBi)
ue.TxCableLoss = 0; % Απώλειες καλωδίων (dB)
ue.RxNoiseFigure = 7; % Παράγοντας θορύβου δέκτη (dB)
ue.RxGain = 0; % Κέρδος κεραίας δέκτη (dBi)
ue.RxAntennaTemperature = 290; % Θερμοκρασία κεραίας (K)
ue.RxAmbientTemperature = 290; % Θερμοκρασία περιβάλλοντος (K)
ue.Altitude = 0; % Ύψος τερματικού χρήστη (επίγειος σταθμός)
ue = struct;
ue.TxPower = 23; % dBm
ue.TxGain = 0; % dBi
ue.TxCableLoss = 0; % dB ue.RxNoiseFigure = 7; % dB
ue.RxGain = 0; % dBi
ue.RxAntennaTemperature = 290; % K
ue.RxAmbientTemperature = 290; % K
ue.Altitude = 0; % Ύψος τερματικού χρήστη (επίγειος σταθμός)
```

Ορίζουμε τα παρακάτω χαρακτηριστικά για την κατερχόμενη ζεύξη που θα αναλύσουμε. Παρόμοια χρησιμοποιούνται για την ανερχόμενη. Ως γωνίες ανύψωσης χρησιμοποιούμε τις τιμές από τον Πίνακα 5. Θέτουμε επίσης την κατάλληλη συχνότητα και εύρος ζώνης για σύνδεση Starlink σε Hz.

```
% Ορισμός Χαρακτηριστικών Ζεύξης link = struct;
link.Direction = "downlink"; % "uplink", "downlink" link.ElevationAngle =
[1.18 5.34 10.56 17.71 28.84 49.08 81.95 51.97]; %Μοίρες ανύψωσης όπως έχουν
υπολογιστεί από το analyzer app
%για κατερχόμενη σύνδεση link.Frequency = 12e9; %
Συχνότητα (Hz) - Starlink Ku-band link.Bandwidth = 240e6;
% Εύρος ζώνης (Hz)
link.ShadowMargin = 3; % Περιθώριο εξασθένησης λόγω
εμποδίων (dB)
link.AdditionalLosses = 2; % Πρόσθετες απώλειες (dB)
link.PolarizationLoss = 3; % Απώλειες λόγω πόλωσης (dB)
```

5.4.1 Υπολογισμός Αναφερόμενου CNR

Στη συνέχεια, για να υπολογίσουμε τον αναφερόμενο λόγο $\left(\frac{C}{N}\right)_{ref}$ όπως έχουμε αναλύσει στο κεφάλαιο 4.5.1 χρησιμοποιούμε τις κατάλληλες παραμέτρους.

```
modulation = "QPSK"; % Τύπος διαμόρφωσης nBits = 208;
% Αριθμός χρήσιμων bit (transport block size)
nSymbols = 160; % Αριθμός συμβόλων ανά μετάδοση nRep = 1;
% Αρχικός αριθμός επαναλήψεων nSF = 8; % Αριθμός
subframes στο downlink nRU = 1; % Αριθμός των
πόρων που έχουν χρησιμοποιηθεί (Μόνο για ανερχόμενη ζεύξη).
nDSC = 72; % Αριθμός των δεδομένων που
χρησιμοποιούνται nFFT = 128; % Μήκος FFT
tsamp = 1/1.92e6; % (s)
td = nFFT*tsamp; % Διάρκεια συμβόλου (s)
nCP = 9; % Αριθμός κυκλικών prefix δειγμάτων tCP =
nCP*tsamp; % Κυκλική διάρκεια prefix (s)
osr = 1; % Συντελεστής Δειγματοληψίας
```

Στο παρακάτω κομμάτι κώδικα, υπολογίζουμε την κατάλληλη τιμή $\left(\frac{E_b}{N_o}\right)$ ανάλογα με την μέθοδο διαμόρφωσης κώδικα που χρησιμοποιούμε. Καθώς εδώ χρησιμοποιούμε 16-QAM που πετυχαίνει ποσοστό σφάλματος bit 1e-6 ορίζουμε 14,4 dB.

```
% Eb/No σε dB if modulation == "16-QAM" % 16-QAM απαιτεί υψηλότερο Eb/No
ebnoRef = 14.4;
else % Για BPSK ή QPSK ebnoRef = 10.5;
end
```

Υπολογίζουμε τον λόγο $\left(\frac{C}{N}\right)_{ref}$ για την κατερχόμενη σύνδεση, χρησιμοποιώντας την εξίσωση

$$R_{eff} = \frac{N_{bits} + N_{CRC}}{N_{SF} N_{symbols} m N_{Rep}} \quad \text{όπως έχουμε δείξει στο 4.5.1.}$$

```
% Υπολογισμός reference CNR if link.Direction == "downlink" Reff =
(nBits + nCRC)/(nSF*nSymbols*m*nRep);
else % "uplink" Reff = (nBits + nCRC)/(nRU*nSymbols*m*nRep);
end cnrRef = ebnoRef + 10*log10(m*Reff) + 10*log10(nDSC/nFFT) + ...
10*log10(td/(td + tCP)) - 10*log10(osr);

disp("Reference CNR: " + cnrRef + " dB")
```

5.4.2 Υπολογισμός CNR

Υπολογίζουμε το *CNR* χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά του δορυφόρου, του UE και του συνδέσμου για κάθε γωνία ανύψωσης. Αρχικά υπολογίζουμε το *EIRP* του πομπού όπου εδώ είναι ο δορυφόρος καθώς αναλύουμε την κατερχόμενη σύνδεση. Υπολογίζουμε επίσης τις ατμοσφαιρικές απώλειες που επηρεάζουν το *CNR*.

```
% Υπολογισμός EIRP όταν ο δορυφόρος είναι πομπός (dB)
% Για να πάρουμε τιμή σε ντεσιμπέλ από πυκνότητα:
% Τιμή σε dB = Τιμή σε dB/MHz + 10*log10[BW σε MHz]
satellite.EIRP = satellite.EIRPDensity + 10*log10(link.Bandwidth/1e6);

% Υπολογισμός EIRP όταν το UE είναι πομπός (dB)
% Για να μετατρέψουμε μια τιμή σε ντεσιμπέλ από dBm: dB = dBm - 30 ue.EIRP =
(ue.TxPower-30) + ue.TxGain - ue.TxCableLoss;

% Υπολογισμός της θερμοκρασίας κέρδους σε θόρυβο ή την τιμή της αξίας για το
UE
% ως δέκτης.
ue.RxGBdT = ue.RxGain - ue.RxNoiseFigure ...
    - 10*log10(ue.RxAmbientTemperature + ...
    (ue.RxAntennaTemperature-ue.RxAmbientTemperature)*10^(-
0.1*ue.RxNoiseFigure));
```

Υπολογίζουμε το free space path loss PL_{FS} όπως φαίνεται στο παρακάτω κομμάτι κώδικα για κάθε γωνία ανύψωσης:

```
% Υπολογισμός CNR και free space path loss για κάθε γωνία
cnr = zeros(numElevAngles,1);
pathLoss = cnr;
for index = 1:numElevAngles    config.Distance = d(index)/1e3;
% km    config.MiscellaneousLoss = totalAtmosphericLoss(index) + ...
    link.PolarizationLoss + link.ShadowMargin + link.AdditionalLosses;
    [cnr(index),cnrInfo] = satelliteCNR(config);
    pathLoss(index) = cnrInfo.FSPL;
end
```

5.4.3 Υπολογισμός Περιθωρίου Συνδέσμου και Επαναλήψεων NB-IoT

Όπως έχουμε αναλύσει, όταν το περιθώριο συνδέσμου (LM) είναι θετικό τότε υποδηλώνει ότι η σύνδεσή μας είναι λειτουργική, σταθερή και αξιόπιστη. Ενώ όταν είναι αρνητική τιμή, απαιτούνται βελτιστοποιήσεις. Στην περίπτωση του NB-IoT, όταν το LM είναι αρνητικό τότε απαιτούνται παραπάνω επαναλήψεις μεταδόσεις σήματος για να έχουμε μία σταθερή σύνδεση, κάτι που επίσης αυξάνει χρόνους καθυστέρησης. Οπότε είναι σημαντικό να έχουμε όσους πιο ελάχιστους αριθμούς επαναλήψεων γίνεται. Το LM σε αυτή την περίπτωση υπολογίζεται ως:

$$LM = \frac{C}{N} - \left(\frac{C}{N} \right)_{ref}$$

Σε μία οπτική σύνδεση, αφαιρούμε την απαιτούμενη ισχύ από την ισχύ του σήματος που μεταδίδεται. Ενώ για NB-IoT, τα αντικαθιστούμε με τις τιμές του CNR και του αναφερόμενου CNR. Τον ελάχιστο αριθμό επαναλήψεων σήματος, τον υπολογίζουμε από:

$$N_{Rep} \left(10^{\frac{-LM}{10}} - 1 \right)$$

Όταν το LM γίνει μεγαλύτερο του 0 ή του 1 τότε η ζεύξη είναι επαρκής και δεν απαιτείται άλλη επανάληψη.

```
% Υπολογισμός περιθωρίου συνδέσμου linkMargin = cnr - cnrRef;

% Ελάχιστος αριθμός επιπλέον επαναλήψεων που απαιτούνται μέχρι το LM να
% είναι 0 ή 1 minRepetitions = 10.^(-linkMargin./10);
idx = linkMargin >= 0;
additionalRepetitions = minRepetitions;
additionalRepetitions(idx) = 0;
% Όταν το LM είναι αρνητικό, βελτιώνουμε το CNR προσθέτοντας επαναλήψεις.
% Υπολογίζουμε τον απαιτούμενο αριθμό πρόσθετων επαναλήψεων.
additionalRepetitions(~idx) = ceil(nRep*(additionalRepetitions(~idx)-1));
```

5.4.4 Αποτελέσματα και Παρατηρήσεις

Αφού τρέξουμε τον κώδικα για υπολογισμό του $\left(\frac{C}{N}\right)_{ref}$, λαμβάνουμε την παρακάτω

σταθερή θεωρητική τιμή για τη σύνδεση NB που αναλύσαμε:

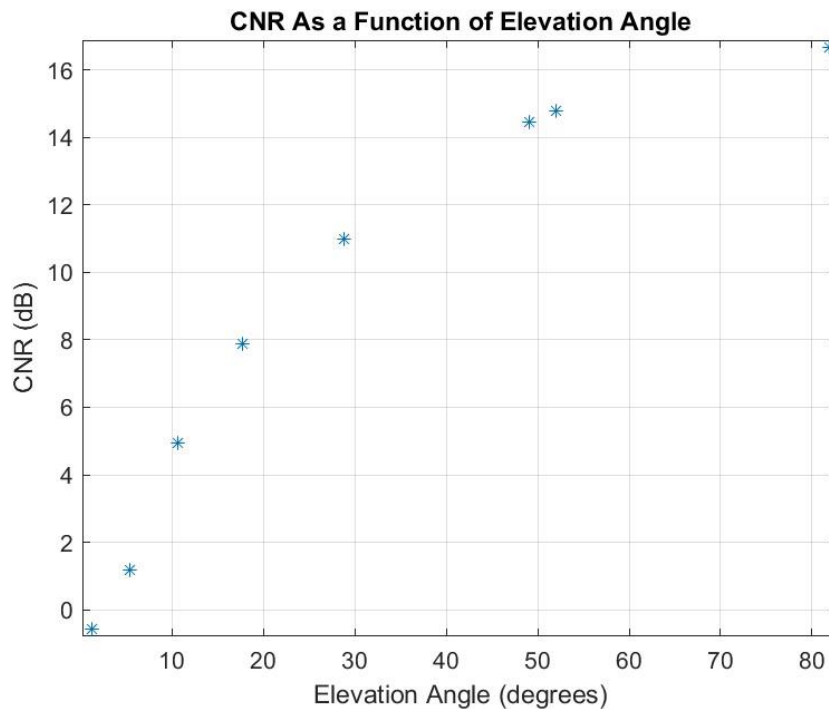
Reference CNR: 0.2889 dB

Το προβλεπόμενο CNR είναι αρκετά μεγαλύτερο από αυτή την τιμή για τις περισσότερες γωνίες μετάδοσης, οπότε η σύνδεση θεωρείται αξιόπιστη και θεωρητικά δεν θα απαιτούνται πολλές επαναλήψεις αλλά ας δούμε στον πίνακα αποτελεσμάτων παρακάτω καθώς αυτό εξαρτάται και από το LM.

| Γωνία Ανύψωσης (μοίρες) | CNR (dB) | FSPL (dB) | LM (dB) | NRep_Add |
|-------------------------------|-----------|-----------|----------|----------|
| 1.18 | - 0.58712 | 182.25 | -0.87602 | 1 |
| 5.34 | 1.1651 | 180.78 | 0.87617 | 0 |
| 10.56 | 4.9319 | 179.03 | 4.643 | 0 |
| 17.71 | 7.877 | 176.88 | 7.6881 | 0 |
| 28.84 | 10.995 | 174.2 | 10.706 | 0 |
| 49.08 | 14.452 | 171.02 | 14.163 | 0 |
| 51.97 | 14.79 | 170.71 | 14.501 | 0 |
| 81.95 | 16.682 | 168.92 | 16.393 | 0 |

Πίνακας 10: Αποτελέσματα Ανάλυσης Σύνδεσης NB-IoT NTN.

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι για την χαμηλότερη γωνία 1.18, το CNR είναι χαμηλότερο από το reference CNR, που σημαίνει ότι δεν έχουμε σταθερή σύνδεση. Επίσης, το LM είναι αρνητικό οπότε απαιτείται τουλάχιστον 1 επιπλέον μετάδοση σήματος για να διατηρηθεί η επικοινωνία. Η απώλεια FSPL είναι επίσης πολύ υψηλή. Καθώς όμως η γωνία αυξάνεται, το LM παίρνει θετική τιμή και η σύνδεση δεν χρειάζεται επανάληψη, μειώνοντας έτσι σημαντικά τους χρόνους καθυστέρησης, όπως φαίνεται το FSPL σταδιακά μειώνεται όσο αυξάνεται η γωνία ανύψωσης. Συμπερασματικά, με υψηλότερη γωνία έχουμε και μία σταθερή και βελτιστοποιημένη σύνδεση με ελάχιστες καθυστερήσεις και απώλειες. Παρακάτω απεικονίζεται σε γράφημα η μεταβολή του CNR σε συνάρτηση με την γωνία σε μοίρες:



Πίνακας 11: CNR συναρτήσει κάθε γωνίας ανύψωσης.

5.5 Ανάλυση Doppler Shift

Θα υπολογίσουμε την μετατόπιση Doppler για τη ζεύξη μεταξύ του δορυφόρου “STARLINK-1337” και του επίγειου σταθμού χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους που έχουμε ήδη ορίσει.

```
% 1. Ορισμός Σταθερών c = 3.0e8; % Ταχύτητα φωτός (m/s)
f0 = 12e9; % Συχνότητα φορέα (Hz), από τις παραμέτρους Starlink

% 2. Ορισμός Δορυφορικών και Επίγειων Παραμέτρων altitude = 550e3; % Ύψος
του Starlink (m) από το TLE inclination = 53.0552; % Κλίση τροχιάς από το
TLE earth_radius = 6371e3; % Ακτίνα της Γης (m)
```

Παρακάτω, υπολογίζουμε την ταχύτητα δορυφόρου περί της Γης χρησιμοποιώντας τον νόμο του Κέπλερ. Επίσης χρησιμοποιούμε τις ίδιες γωνίες ανύψωσης κατερχόμενης. Τέλος, υπολογίζουμε την επίδραση Doppler σε Hz και το παρουσιάζουμε σε γράφημα σχετικά με την γωνία.

```
% 3. Υπολογισμός Ταχύτητας Δορυφόρου
% Χρησιμοποιούμε τον νόμο του Κέπλερ για να εκτιμήσουμε την ταχύτητα mu =
3.986e14; % Γεωκεντρική σταθερά βαρύτητας (m^3/s^2)
orbital_radius = earth_radius + altitude; % Απόσταση από το κέντρο της Γης
v_sat = sqrt(mu / orbital_radius); % Υπολογισμός ταχύτητας δορυφόρου (m/s)

% 4. Ορισμός Γωνιών Ανύψωσης (Elevation Angles)
% Αυτές είναι οι ίδιες γωνίες που χρησιμοποιήσαμε στο link budget elevAngles
= [1.18 5.34 10.56 17.71 28.84 49.08 51.97];

% 5. Υπολογισμός Doppler Shift για κάθε γωνία ανύψωσης doppler_shift =
zeros(size(elevAngles)); % Δημιουργία πίνακα για τις τιμές
```

```

for i = 1:length(elevAngles)
    theta = deg2rad(elevAngles(i)); % Μετατροπή γωνίας από μοίρες σε ακτίνια
    v_rel = v_sat * cos(theta); % Υπολογισμός σχετικής ταχύτητας
    doppler_shift(i) = (v_rel / c) * f0; % Υπολογισμός μετατόπισης Doppler (Hz)
end

```

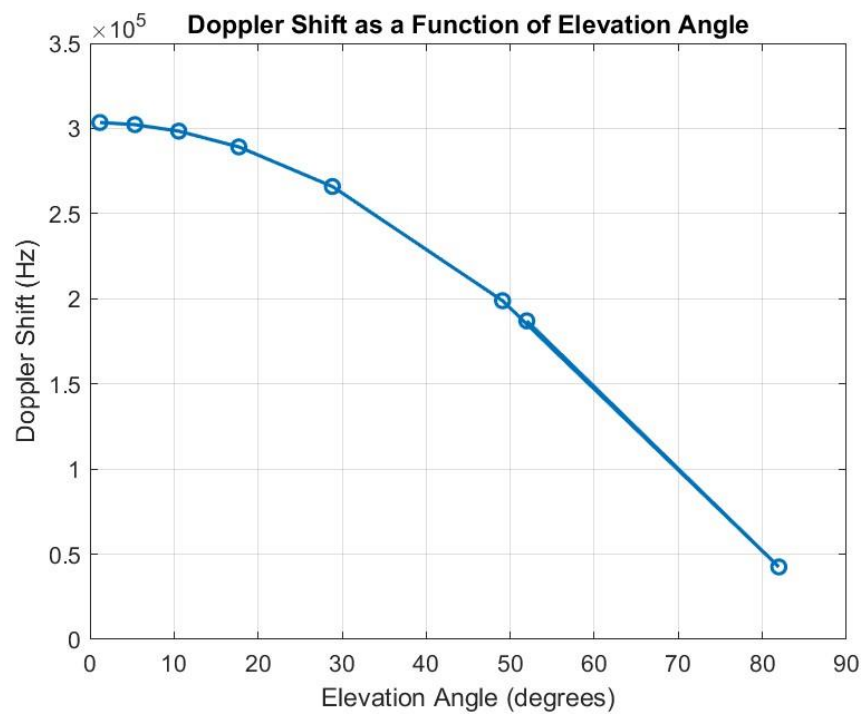
| Γωνία Ανύψωσης (μοίρες) | Μετατόπιση Doppler (Hz) |
|-------------------------------|-------------------------------|
| 1.18 | 3.035e+05 |
| 5.34 | 3.0224e+05 |
| 10.56 | 2.9842e+05 |
| 17.71 | 2.8917e+05 |
| 28.84 | 2.6591e+05 |
| 49.08 | 1.9883e+05 |
| 51.97 | 1.8702e+05 |
| 81.95 | 42510 |

Πίνακας 12: Αποτελέσματα Μετατόπισης Doppler.

Παρατηρούμε ότι όταν η γωνία είναι μικρή, το Doppler είναι μεγαλύτερο, λογικό καθώς ο δορυφόρος κινείται σχεδόν ευθεία προς τον δορυφόρο. Ενώ όταν δορυφόρος είναι σχεδόν πάνω από τον σταθμό με μεγάλη γωνία, η μετατόπιση είναι χαμηλή αφού η ταχύτητα προς τον σταθμό είναι μικρότερη. Σε δορυφορικά δίκτυα όπως Starlink, η μετατόπιση Doppler μπορεί να φτάσει εκατοντάδες kHz, και απαιτεί βελτιώσεις και διορθώσεις.

Στρατηγικές αντιστάθμισης Doppler περιλαμβάνουν:

- **Προ-αντιστάθμιση στον πομπό:** Προσαρμογή της συχνότητας πριν τη μετάδοση.
- **Δυναμική παρακολούθηση στο δέκτη:** Συνεχής παρακολούθηση και προσαρμογή του σήματος.



Πίνακας 13: Μεταβολή Doppler Shift Συναρτήσει της Γωνίας Ανύψωσης.

Κεφάλαιο 6: Μελλοντικές Προεκτάσεις και Συμπεράσματα

Τα 5G Μη-Επίγεια Δίκτυα (NTN) βρίσκονται σε συνεχή εξέλιξη, γίνονται συνεχώς βελτιώσεις για να αντιμετωπιστούν οι προκλήσεις που έχουμε ήδη αναλύσει καθώς και να ενσωματωθούν νέες δυνατότητες από την 3GPP.

Σημαντική εξέλιξη θα είναι η ανάπτυξη και ολοκλήρωση της regenerative αρχιτεκτονικής αντί της transparent. Οι regenerative δορυφόροι και με χρήση οπτικών διαδορυφορικών συνδέσεων θα επικοινωνούν μεταξύ τους αυτόνομα και θα μπορούν να επεξεργάζονται σήματα, να τα αποθηκεύουν και να τα προωθούν, αυξάνοντας έτσι την αξιοπιστία του συστήματος.

Όπως επισημάνθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, τα συστήματα 5G NTN έρχονται αντιμέτωπα με ορισμένες προκλήσεις που δεν εμφανίζονται στα επίγεια δίκτυα. Οι κύριες προκλήσεις περιλαμβάνουν το σημαντικό Doppler shift λόγω της μεγάλης ταχύτητας κίνησης των δορυφόρων, τις απώλειες free space path loss που επηρεάζει το Link Budget, καθώς και την ενσωμάτωση NB-IoT. Το Doppler shift ενδέχεται να αντιμετωπιστεί με τις προ-διορθώσεις συχνότητας. Για να γίνει αυτό, το 3GPP στο Rel-17 έχει θέσει αναγκαία τη χρήση δέκτη GNSS για κάθε συσκευή 5G NTN για να υπάρχει συγχρονισμός και εκτίμηση της ταχύτητας του δορυφόρου, έτσι ώστε η προβλεπόμενη μετατόπιση να αντισταθμίζεται πρώτου φτάσει το σήμα στη Γη. Όσον αφορά τα NB-IoT, το 3GPP δείχνει μεγάλο ενδιαφέρον στην τεχνολογία καθώς εκτιμούν πως θα ανοίξει το δρόμο για να συνδέονται εκατομμύρια συσκευές IoT απευθείας μέσω δορυφόρου. Βασικό πλεονέκτημα είναι η διευρυμένη κάλυψη καθώς θα υπάρχει 100% κάλυψη και συνδεσιμότητα όπου και να βρίσκονται οι συσκευές IoT. Αισθητήρες θα συνδυάζονται με δορυφορικές συνδέσεις και θα λειτουργούν αδιάλειπτα, για παράδειγμα μία αγροτική περιοχή διαθέτει ένα δίκτυο για τους αισθητήρες αυτόματου ποτίσματος, ή για την κατάσταση του καιρού και του εδάφους. Θα διαθέτει επίσης ένα gateway που θα ανεβάζει τα δεδομένα σε ένα cloud μέσω του δορυφόρου χωρίς να κινδυνεύει η επίγεια σύνδεση από καιρικές συνθήκες ή καταστροφές. Τέλος, με την έλευση του 6G, αναμένεται το SatIoT (Satellite-based IoT) να ενταχθεί πλήρως στο πλαίσιο μιας ενοποιημένης δικτυακής υποδομής, όπου οι συσκευές IoT θα συνδέονται απρόσκοπτα από το ένα μέσο στο άλλο. Θα επιτρέψει στους δορυφόρους να λειτουργούν ως έξυπνοι κόμβοι του δικτύου, μειώνοντας τις καθυστερήσεις και ενισχύοντας τη δυναμική δρομολόγηση δεδομένων.

Παράλληλα, η υιοθέτηση οπτικών συνδέσμων επικοινωνιών στα ISL θα προσφέρει υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων και μειωμένες παρεμβολές, ενισχύοντας την αποδοτικότητα των δορυφορικών δικτύων. Ήδη πολλά δίκτυα ενσωματώνουν ζεύξεις laser μεταξύ των δορυφόρων τους για βελτίωση της απόδοσης. Οι οπτικές επικοινωνίες θα ενισχύσουν τα 5G NTN όσο δοκιμάζονται και αναπτύσσονται αντί των παραδοσιακών ραδιοσυχνοτήτων.

Σχετικά με τις εξελίξεις του 3GPP στα 5G NTN, με την ολοκλήρωση του Rel-17 το 2022, ξεκίνησε η υποστήριξη των μη επίγειων δικτύων στα πρότυπα 5G. Καθορίστηκαν οι βασικές αρχιτεκτονικές για 5G NR για ευρυζωνικές επικοινωνίες αλλά και NB-IoT για δορυφορική πρόσβαση IoT. Το Rel-18 εξετάζει τις βελτιώσεις στα NTN όσο και στα NB-IoT. Αυτό όμως που θα οριστικοποιήσει την αναγεννητική αρχιτεκτονική ως το πρότυπο των 5G NTN είναι το Rel-19 που αναμένεται να ολοκληρωθεί μέχρι το 2025, και το Rel-20 θα θέσει τις βάσεις για την μετάβαση στο 6G, όπου τα NTN θα αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα του δικτύου.

Συνοψίζοντας, οι νέες εκδόσεις του 3GPP θα διασφαλίσουν ότι οι τεχνολογίες που έχουμε ήδη αναλύσει και προσομοιώσει: link budget, NB-IoT, οπτικοί σύνδεσμοι επικοινωνίας, αναγεννητικοί δορυφόροι. Σκοπός είναι να εντάξουν όλες αυτές τις τεχνολογίες σε ένα κοινό πλαίσιο ώστε όλοι οι κατασκευαστές και πάροχοι να υλοποιούν συμβατές λύσεις για να αναπτυχθούν τα 5G NTN σε παγκόσμια κλίμακα και μετέπειτα το 6G. Με την ολοκλήρωση των 5G NTN και την κατεύθυνση προς το 6G τα επόμενα χρόνια, αναμένεται οι επίγειες επικοινωνίες να ενσωματωθούν πλήρως στα μη επίγεια δίκτυα.

Κλείνοντας την παρούσα διπλωματική μετά από σκληρή μελέτη και ανάλυση των νέων τεχνολογιών στις δορυφορικές επικοινωνίες. Τα δίκτυα 5G NTN βρίσκονται στο κατώφλι της ευρείας υιοθέτησής τους. Με τις συνεχείς βελτιώσεις σε τεχνολογικό επίπεδο και την ωρίμανση των προτύπων, σχεδόν έχουν υλοποιηθεί πλήρως. Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης υποδεικνύουν ότι ένα καλοσχεδιασμένο 5G δορυφορικό δίκτυο μπορεί να προσφέρει αξιόπιστες και υψηλής ταχύτητας υπηρεσίες, συμπληρώνοντας τα επίγεια δίκτυα και καλύπτοντας περιοχές και περιπτώσεις όπου η παραδοσιακή κάλυψη αδυνατεί. Καθώς οδεύουμε προς την εποχή του 6G, είναι πλέον φανερό ότι τα NTN θα αποτελούν θεμέλιο λίθο της αρχιτεκτονικής των μελλοντικών δικτύων - όχι ως ξεχωριστά “εξειδικευμένα” δίκτυα, αλλά ως αναπόσπαστο κομμάτι ενός ενοποιημένου οικοσυστήματος επικοινωνιών που θα προσφέρει συνδεσιμότητα παντού, πάντα και για όλους. Οι γνώσεις που αποκτήθηκαν και οι τεχνικές που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο του 5G NTN θα αποτελέσουν πολύτιμη παρακαταθήκη για την σχεδίαση των επόμενων γενιών δικτύων, φέρνοντάς μας πιο κοντά σε έναν πραγματικά διασυνδεδεμένο κόσμο χωρίς σύνορα στην επικοινωνία.

Παράρτημα Α'

A.1 starlink_scenario.m

```
% =====  
% ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ ΜΕ STARLINK  
% =====  
% Αυτό το script δημιουργεί ένα απλό δορυφορικό σενάριο στο  
MATLAB χρησιμοποιώντας  
% το Satellite Communications Toolbox. Οι δορυφόροι του  
αστερισμού Starlink  
% φορτώνονται από ένα αρχείο TLE.  
% Ορισμός χρονικού διαστήματος προσομοίωσης startTime =  
datetime(2025,2,18,18,0,0);  
stopTime = startTime + hours(1);  
sampleTime = 60; % δευτερόλεπτα sc =  
satelliteScenario(startTime,stopTime,sampleTime);  
% Δημιουργία Viewer viewer = satelliteScenarioViewer(sc,  
ShowDetails=false);  
% Εισαγωγή του αστερισμού Starlink μέσω αρχείου TLE tleFile =  
"starlink.tle";  
starlinkSatellites = satellite(sc, tleFile);  
% Ορισμός παραμέτρων εκπομπής του Starlink fq = 12e9; %  
Συχνότητα εκπομπής: 12 GHz (Ku-band)  
txpower = 40; % Ισχύς πομπού: 40 dBW antennaType = "Gaussian";  
halfBeamWidth = 10; % Μοίρες πλάτους beam  
% Προσθήκη πομπών στους δορυφόρους if antennaType ==  
"Gaussian" lambda = physconst('lightspeed')/fq; % meters dishD  
= (70*lambda)/(2*halfBeamWidth); % meters tx =  
transmitter(starlinkSatellites, ...  
Frequency=fq, ...  
Power=txpower);  
gaussianAntenna(tx,DishDiameter=dishD);  
end if antennaType == "Custom 48-Beam" antenna =  
helperCustom48BeamAntenna(fq);  
tx = transmitter(starlinkSatellites, ...  
Frequency=fq, ...  
MountingAngles=[0,-90,0], ... % [yaw, pitch, roll] with -90  
using Phased Array System Toolbox convention Power=txpower,  
...  
Antenna=antenna); end  
% Προβολή κεραίας και ισχύς isotropic = arrayConfig(Size=[1  
1]);  
pattern(tx,Size=500000);
```

A.2 starlink_link_budget.m

```
% =====  
% ΑΝΑΛΥΣΗ LINK BUDGET ΣΕ STARLINK ΣΥΝΔΕΣΗ  
% =====  
% Επιλογή συγκεκριμένων δορυφόρων από το TLE selectedNames =  
["STARLINK-1337", "STARLINK-1293"];  
selectedSatellites = [];  
for i = 1:length(starlinkSatellites)  
    if ismember(starlinkSatellites(i).Name, selectedNames)  
        selectedSatellites = [selectedSatellites,  
            starlinkSatellites(i)];  
    end end  
% Προσθήκη επίγειων σταθμών για την ανάλυση ζεύξης gsAthens =  
groundStation(sc, 37.9838, 23.7275, Name="Athens GS");  
gsBerlin = groundStation(sc, 52.5200, 13.4050, Name="Berlin  
GS");  
% Προσθήκη gimbals στους δορυφόρους και σταθμούς εδάφους  
gimbalSat1 = gimbal(selectedSatellites(1));  
gimbalSat2 = gimbal(selectedSatellites(2));  
gimbalGsAthens = gimbal(gsAthens);  
gimbalGsBerlin = gimbal(gsBerlin);  
%% Προσθήκη δεκτών και πομπών στους δορυφόρους  
% Πομπός στον δορυφόρο 2 gainToNoiseTemperatureRatio = 5; %  
dB/K systemLoss = 3; % dB rxSat1 = receiver(gimbalSat1,  
Name="Satellite 1 Receiver", ...  
GainToNoiseTemperatureRatio=gainToNoiseTemperatureRatio, ...  
SystemLoss=systemLoss);  
dishDiameter = 0.5; % m apertureEfficiency = 0.5;  
gaussianAntenna(rxSat1, DishDiameter=dishDiameter,  
ApertureEfficiency=apertureEfficiency);  
% Πομπός στον δορυφόρο 2 frequency = 27e9; % Hz power = 20; %  
dBW bitRate = 20; % Mbps txSat2 = transmitter(gimbalSat2,  
Name="Satellite 2 Transmitter", ...  
Frequency=frequency, Power=power, BitRate=bitRate,  
SystemLoss=systemLoss);  
gaussianAntenna(txSat2, DishDiameter=dishDiameter,  
ApertureEfficiency=apertureEfficiency);  
% Πομπός στον σταθμό της Αθήνας frequency = 30e9; % Hz power =  
40; % dBW bitRate = 20; % Mbps txGsAthens =  
transmitter(gimbalGsAthens, Name="Athens GS Transmitter", ...  
Frequency=frequency, Power=power, BitRate=bitRate);  
dishDiameterGs = 5; % m gaussianAntenna(txGsAthens,  
DishDiameter=dishDiameterGs);  
% Δέκτης στον σταθμό του Βερολίνου requiredEbNo = 14; % dB  
rxGsBerlin = receiver(gimbalGsBerlin, Name="Berlin GS  
Receiver", RequiredEbNo=requiredEbNo);  
gaussianAntenna(rxGsBerlin, DishDiameter=dishDiameterGs);  
% Ευθυγράμμιση κεραίων (Tracking)
```

```

pointAt(gimbalGsAthens, selectedSatellites(1));
pointAt(gimbalSat1, gsAthens);
pointAt(gimbalSat2, gsBerlin);
pointAt(gimbalGsBerlin, selectedSatellites(2));
% Δημιουργία uplink και downlink ζεύξεων uplink =
link(txGsAthens, rxSat1);
downlink = link(txSat2, rxGsBerlin);
% Αποθήκευση του σεναρίου για ανάλυση στο Link Budget Analyzer
save("importScenarioExample.mat","sc");

```

A.3 optical_link_calculation.m

```

%% =====
% Ανάλυση Link Budget για Οπτική Δορυφορική Επικοινωνία
Starlink
% =====
% Το παρόν script αναλύει το link budget για τις οπτικές
επικοινωνίες
% (uplink, downlink και inter-satellite link) στο δίκτυο
Starlink.
% Περιλαμβάνει ατμοσφαιρικές απώλειες, απώλειες ελεύθερου
χώρου,
% και παράγοντες απόδοσης του πομπού και του δέκτη.
%% Ορισμός Βασικών Παραμέτρων Preq = -35.5; % Απαιτούμενη
ισχύς λήψης σε dBm για αξιόπιστη επικοινωνία Ptx = 22; %
Ισχύς εκπομπής του πομπού σε dBm

%% Παράμετροι Επίγειου Σταθμού gs = struct;
gs.Height = 1; % Ύψος πάνω από την επιφάνεια
της θάλασσας σε km gs.OpticsEfficiency = 0.8; % Οπτική
Απόδοση Κεραίας gs.ApertureDiameter = 1; % Διάμετρος
κεραίας gs.PointingError = 1e-6; % Σφάλμα κατεύθυνσης σε
rad

%% Παράμετροι Δορυφόρου Starlink satA = struct;
satA.Height = 550; % Ύψος δορυφόρου Starlink σε km
satA.OpticsEfficiency = 0.8; % Οπτική Απόδοση Κεραίας
satA.ApertureDiameter = 0.07; % Διάμετρος κεραίας (μικρότερη
λόγω περιορισμού βάρους)
satA.PointingError = 1e-6; % Σφάλμα κατεύθυνσης σε rad

satB = struct;
satB.OpticsEfficiency = 0.8;
satB.ApertureDiameter = 0.06;
satB.PointingError = 1e-6;

%% Παράμετροι Ζεύξης link = struct;
link.Wavelength = 1550e-9; % Μήκος κύματος σε μέτρα

```

```

link.TroposphereHeight = 20; % Ύψος τροπόσφαιρας σε km
link.ElevationAngle = 50; % Γωνία ανύψωσης ζεύξης σε
μοίρες link.SatDistance = 1000; % Απόσταση μεταξύ
δορυφόρων σε km (για τα ISL)

% Επιλογή τύπου ζεύξης: "downlink", "uplink", "inter-
satellite" link.Type = "downlink";
link.CloudType = "Thin cirrus"; % Επιλογή τύπου νεφών
(επηρεάζει τις απώλειες), υπάρχει σχετικό function

%% Επιλογή Πομπού & Δέκτη ανάλογα με τον τύπο ζεύξης if
link.Type == "downlink" tx = satA;
    rx = gs;
elseif link.Type == "uplink" tx = gs;
    rx = satA;
else tx = satA;
    rx = satB;
end

%% Υπολογισμός Κέρδους transmitter και receiver txGain = (pi *
tx.ApertureDiameter / link.Wavelength)^2;
Gtx = 10 * log10(txGain);
rxGain = (pi * rx.ApertureDiameter / link.Wavelength)^2;
Grx = 10 * log10(rxGain);

%% Υπολογισμός Απωλειών Κατεύθυνσης για πομπό και δέκτη
(Pointing Loss)
txPointingLoss = 4.3429 * txGain * (tx.PointingError)^2;
rxPointingLoss = 4.3429 * rxGain * (rx.PointingError)^2;

%% Υπολογισμός Απωλειών Διάδοσης (Path Loss)
if link.Type == "inter-satellite" % Απώλειες ελεύθερου
χώρου μεταξύ των δύο δορυφόρων (δεν έχουμε ατμοσφαιρικά
φαινόμενα)
    pathLoss = fspl(link.SatDistance * 1e3, link.Wavelength);
    linkMargin = Ptx + 10*log10(tx.OpticsEfficiency) +
10*log10(rx.OpticsEfficiency) + ...
Gtx + Grx - txPointingLoss - rxPointingLoss - pathLoss
- Preq;
    disp("Link margin for inter-satellite link: " +
num2str(linkMargin) + " dB");

elseif (link.Type == "uplink") || (link.Type == "downlink")
%%αν έχουμε downlink ή uplink
%% Υπολογισμός Απωλειών Ατμόσφαιρας absorptionLoss = 0.01; %
Απώλεια απορρόφησης σε dB

```

```

    % Υπολογισμός της απόστασης της οπτικής δέσμης που
    διαδίδεται % στην τροπόσφαιρα σε km dT =
    (link.TroposphereHeight - gs.Height) *
    cscd(link.ElevationAngle);
    % Υπολογισμός απόστασης μεταξύ επίγειου σταθμού και
    δορυφόρου σε m dGS =
    slantRangeCircularOrbit(link.ElevationAngle, satA.Height*1e3,
    gs.Height*1e3);
    % Υπολογισμός απώλειας διαδρομής μεταξύ σταθμού και
    δορυφόρου σε dB pathLoss = fspl(dGS, link.Wavelength);
    % Υπολογισμός γεωμετρικής διασποράς [cnc, lwc] =
    getCloudParameters(link.CloudType);
    visibility = 1.002 / ((lwc * cnc)^0.6473);
    % Προσαρμόζουμε ορατότητα για ανερχόμενη και
    κατερχόμενη if link.Type == "uplink" visibility =
    visibility * 0.8; % Μείωση ορατότητας λόγω της πυκνότερης
    ατμόσφαιρας else visibility = visibility * 1.2; %
    Αύξηση end delta = 1.3; % τιμή για καθαρό ουρανό
    geoCoeff = (3.91 / visibility) * ((link.Wavelength * 1e9 /
    550)^-delta);
    geoScaLoss = 4.3429 * geoCoeff * dT;
    % Υπολογισμός διασποράς Mi lambda_mu =
    link.Wavelength * 1e6;
    a = 0.000487 * lambda_mu^3 - 0.002237 * lambda_mu^2 +
    0.003864 * lambda_mu - 0.004442;
    b = -0.00573 * lambda_mu^3 + 0.02639 * lambda_mu^2 -
    0.04552 * lambda_mu + 0.05164;
    c = 0.02565 * lambda_mu^3 - 0.1191 * lambda_mu^2 + 0.20385
    * lambda_mu - 0.216;
    d = -0.0638 * lambda_mu^3 + 0.3034 * lambda_mu^2 - 0.5083
    * lambda_mu + 0.425;
    mieER = a * gs.Height^3 + b * gs.Height^2 + c * gs.Height
    + d;
    mieScaLoss = (4.3429 * mieER) / sind(link.ElevationAngle);
    % Αλλαγή διασποράς Mi ανάλογα για ανερχόμενη και
    κατερχόμενη if link.Type == "uplink" mieScaLoss =
    mieScaLoss * 1.2; else mieScaLoss = mieScaLoss *
    0.8; end % Υπολογισμός τελικού περιθώριου
    συνδέσμου σε dB linkMargin = Ptx +
    10*log10(tx.OpticsEfficiency) + 10*log10(rx.OpticsEfficiency)
    + ...
    Gtx + Grx - txPointingLoss - rxPointingLoss - pathLoss
    - absorptionLoss - ...
    geoScaLoss - mieScaLoss - Preq;
    disp("Link margin for " + link.Type + " is " +
    num2str(linkMargin) + " dB");
end

```


A.4 link_margin_plots.m

```
%% =====  
% Γράφημα Περιθωρίου Σύνδεσης (Link Margin) σε Συνάρτηση με το  
Χρόνο  
% =====  
% Το παρόν script χρησιμοποιεί τα υπολογισμένα περιθώρια  
σύνδεσης  
% (uplink, downlink, inter-satellite) και τα απεικονίζει σε  
ξεχωριστά  
% γραφήματα με την πάροδο του χρόνου.  
  
%% Ορισμός Χρονικού Διαστήματος Προσομοίωσης  
% Ορίζουμε το χρονικό διάστημα σε μία ώρα με διαστήματα των 60  
δευτερολέπτων.  
time = 0:60:3600; % Χρόνος σε δευτερόλεπτα (0 έως 3600 δευτ.)  
  
%% Χρήση των Υπολογισμένων Περιθωρίων Σύνδεσης  
% Χρησιμοποιούμε τα αποτελέσματα από το MATLAB script που  
υπολογίζει το link margin link_margin_uplink =  
linspace(10.8765, 9.5, length(time)); % Υποθέτουμε σταδιακή  
μείωση link_margin_downlink = linspace(11.1668, 9.8,  
length(time)); % Υποθέτουμε σταδιακή μείωση link_margin_isl =  
linspace(1.9703, 1.5, length(time)); % Μικρές  
διακυμάνσεις στο ISL  
  
%% Γράφημα Περιθωρίου Σύνδεσης Ανερχόμενης Ζεύξης (Uplink)  
figure;  
plot(time / 60, link_margin_uplink, 'bo-', 'LineWidth', 2,  
'MarkerSize', 6);  
xlabel('Time (minutes)');  
ylabel('Link Margin (dB)');  
title('Optical Uplink Link Margin Over Time');  
grid on;  
legend('Optical Uplink Link Margin');  
set(gca, 'FontSize', 11);  
  
%% Γράφημα Περιθωρίου Σύνδεσης Κατερχόμενης Ζεύξης (Downlink)  
figure;  
plot(time / 60, link_margin_downlink, 'rs-', 'LineWidth', 2,  
'MarkerSize', 6);  
xlabel('Time (minutes)');  
ylabel('Link Margin (dB)');  
title('Optical Downlink Link Margin Over Time');  
grid on;  
legend('Optical Downlink Link Margin');  
set(gca, 'FontSize', 11);
```

```

%% Γράφημα Περιθωρίου Σύνδεσης Δια-Δορυφορικής Ζεύξης (ISL)
figure;
plot(time / 60, link_margin_isl, 'gd-', 'LineWidth', 2,
'MarkerSize', 6);
xlabel('Time (minutes)');
ylabel('Link Margin (dB)');
title('Optical Inter-Satellite Link Margin Over Time');
grid on;
legend('Optical ISL Link Margin');
set(gca, 'FontSize', 11);

```

A.5 nb_iot_analysis.m

```

% Ορισμός Δορυφορικών Παραμέτρων (Starlink-1337)
satellite = struct;
satellite.EIRPDensity = 57; % EIRP από το Link Budget
Analyzer (dBW/MHz)
satellite.RxGBYT = 15; % G/T για Starlink (εκτιμώμενο,
dB/K)
satellite.Altitude = 550e3; % Υψόμετρο από το TLE (550 km)

% Ορισμός Παραμέτρων Επίγειου Τερματικού (UE - Χρήστης)
ue = struct;
ue.TxPower = 23; % Ισχύς μετάδοσης (dBm)
ue.TxGain = 0; % Κέρδος κεραίας πομπού (dBi)
ue.TxCableLoss = 0; % Απώλειες καλωδίων (dB)
ue.RxNoiseFigure = 7; % Παράγοντας θορύβου δέκτη (dB)
ue.RxGain = 0; % Κέρδος κεραίας δέκτη (dBi)
ue.RxAntennaTemperature = 290; % Θερμοκρασία κεραίας (K)
ue.RxAmbientTemperature = 290; % Θερμοκρασία περιβάλλοντος (K)
ue.Altitude = 0; % Ύψος τερματικού χρήστη
(επίγειος σταθμός)

% 1 = Χρήση ITU-R P.618, 0 = Σταθερές απώλειες
useP618PropagationLosses = 1; % 0 (false), 1 (true)

% Ορισμός Χαρακτηριστικών Ζεύξης link = struct;
link.Direction = "downlink"; % "uplink", "downlink"
link.ElevationAngle = [1.18 5.34 10.56 17.71 28.84 49.08 81.95
51.97]; %Μοίρες ανύψωσης όπως έχουν υπολογιστεί από το
analyzer app
%για κατερχόμενη σύνδεση link.Frequency = 12e9;
% Συχνότητα (Hz) - Starlink Ku-band link.Bandwidth = 240e6;
% Εύρος ζώνης (Hz)
link.ShadowMargin = 3; % Περιθώριο
εξασθένησης λόγω εμποδίων (dB)

```

```

link.AdditionalLosses = 2; % Πρόσθετες απώλειες
(dB)
link.PolarizationLoss = 3; % Απώλειες λόγω
πόλωσης (dB)

% Ορισμός Ατμοσφαιρικών Απωλειών if useP618PropagationLosses
== 0 % Χρήση σταθερών τιμών όταν ΔΕΝ χρησιμοποιείται ITU-R
P.618 link.ScintillationLosses = 1.5; % Απώλειες
από σπινθηροβολία (dB)
link.AtmosphericLosses = 1.0; % Ατμοσφαιρικές
απώλειες (dB)
else % Χρήση ITU-R P.618 για δυναμικό υπολογισμό απωλειών
link.P618Configuration = p618Config;
link.P618Configuration.Latitude = 37.98; %
Συντεταγμένες σταθμού Athens GS
link.P618Configuration.Longitude = 23.73; %
Συντεταγμένες σταθμού Athens GS
link.P618Configuration.GasAnnualExceedance = 1;
link.P618Configuration.CloudAnnualExceedance = 1;
link.P618Configuration.ScintillationAnnualExceedance = 1;
link.P618Configuration.TotalAnnualExceedance = 1;
link.P618Configuration.PolarizationTiltAngle = 0; % σε
μοίρες link.P618Configuration.AntennaDiameter = 1;
% Διάμετρος κεραίας σταθμού (m)
link.P618Configuration.AntennaEfficiency = 0.5;
end modulation = "QPSK"; % Τύπος διαμόρφωσης nBits = 208;
% Αριθμός χρήσιμων bit (transport block size)
nSymbols = 160; % Αριθμός συμβόλων ανά
μετάδοση nRep = 1; % Αρχικός αριθμός
επαναλήψεων nSF = 8; % Αριθμός
subframes στο downlink nRU = 1; %
Αριθμός των πόρων που έχουν χρησιμοποιηθεί (Μόνο για
ανερχόμενη ζεύξη).
nDSC = 72; % Αριθμός των δεδομένων που
χρησιμοποιούνται nFFT = 128; % Μήκος
FFT
tsamp = 1/1.92e6; % (s)
td = nFFT*tsamp; % Διάρκεια συμβόλου (s)
nCP = 9; % Αριθμός κυκλικών prefix
δειγμάτων tCP = nCP*tsamp; % Κυκλική
διάρκεια prefix (s)
osr = 1; % Συντελεστής
Δειγματοληψίας
% Eb/No σε dB if modulation == "16-QAM" % 16-QAM απαιτεί
υψηλότερο Eb/No ebnoRef = 14.4;
else % Για BPSK ή QPSK ebnoRef = 10.5;
end m = 1;
if modulation == "QPSK" m = 2;

```

```

elseif modulation == "16-QAM"      m = 4;
end

% Number of CRC bits nCRC = 24;

% Υπολογισμός reference CNR if link.Direction == "downlink"
Reff = (nBits + nCRC)/(nSF*nSymbols*m*nRep);
else % "uplink"      Reff = (nBits +
nCRC)/(nRU*nSymbols*m*nRep);
end cnrRef = ebnoRef + 10*log10(m*Reff) + 10*log10(nDSC/nFFT)
+ ...
    10*log10(td/(td + tCP)) - 10*log10(osr);

disp("Reference CNR: " + cnrRef + " dB")

% Υπολογισμός EIRP όταν ο δορυφόρος είναι πομπός (dB)
% Για να πάρουμε τιμή σε ντεσιμπέλ από πυκνότητα:
% Τιμή σε dB = Τιμή σε dB/MHz + 10*log10[BW σε MHz]
satellite.EIRP = satellite.EIRPDensity +
10*log10(link.Bandwidth/1e6);

% Υπολογισμός EIRP όταν το UE είναι πομπός (dB)
% Για να μετατρέψουμε μια τιμή σε ντεσιμπέλ από dBm: dB = dBm
- 30 ue.EIRP = (ue.TxPower-30) + ue.TxGain - ue.TxCableLoss;

% Υπολογισμός της θερμοκρασίας κέρδους σε θόρυβο ή την τιμή
της αξίας για το UE
% ως δέκτης.
ue.RxGBdT = ue.RxGain - ue.RxNoiseFigure ...
    - 10*log10(ue.RxAmbientTemperature + ...
    (ue.RxAntennaTemperature-ue.RxAmbientTemperature)*10^(-
0.1*ue.RxNoiseFigure));

% Ρύθμιση των πομπό και τον δέκτη με βάση την κατεύθυνση
σύνδεσης if link.Direction == "uplink"      tx = ue;
    rx = satellite;
else      tx = satellite;
    rx = ue;
end

% Εύρος γωνιών ανύψωσης elevAngles = link.ElevationAngle(:);
numElevAngles = numel(elevAngles);

% Υπολογίζουμε την απόσταση από τον δορυφόρο στο UE για όλες
τις γωνίες d =
slantRangeCircularOrbit(elevAngles,satellite.Altitude,ue.Altit
ude); % m

```

```

% Συνολικές ατμοσφαιρικές απώλειες για κάθε γωνία ανύψωσης
totalAtmosphericLoss = zeros(numElevAngles,1);
if useP618PropagationLosses == 1      maps =
exist("maps.mat","file");
    p836 = exist("p836.mat","file");
    p837 = exist("p837.mat","file");
    p840 = exist("p840.mat","file");
    matFiles = [maps p836 p837 p840];
    if ~all(matFiles)
        if ~exist("ITURDigitalMaps.tar.gz","file")
            url =
"https://www.mathworks.com/supportfiles/spc/P618/ITURDigitalMa
ps.tar.gz";
            websave("ITURDigitalMaps.tar.gz",url);
            untar("ITURDigitalMaps.tar.gz")
        else
            untar("ITURDigitalMaps.tar.gz")
        end
        link.P618Configuration.Frequency =
link.Frequency;
        elevAnglesToConsider = elevAngles;
        if any(elevAngles < 5)
            warning("The prediction method for scintillation
losses is valid for elevation " + ...           "angle
greater than 5 degree. For elevation angle less than 5 degree,
the " + ...           "nearest valid value of 5 degree will
be used in the computation.")
            elevAnglesToConsider(elevAngles < 5) = 5;
        end
        for index = 1:numElevAngles
link.P618Configuration.ElevationAngle =
elevAnglesToConsider(index);
            pl = p618PropagationLosses(link.P618Configuration);
            totalAtmosphericLoss(index) = pl.At;
        end else
            totalAtmosphericLoss(:) =
link.AtmosphericLosses + link.ScintillationLosses;
        end

% Ορισμός παραμέτρων διαμόρφωσης config = satelliteCNRConfig;
config.TransmitterPower = tx.EIRP;
config.TransmitterAntennaGain = 0;
config.Frequency = link.Frequency/1e9;           % GHz
config.GainToNoiseTemperatureRatio = rx.RxGBdT;
config.Bandwidth = link.Bandwidth/1e6;           % MHz

% Υπολογισμός CNR και free space path loss για κάθε γωνία
cnr = zeros(numElevAngles,1);
pathLoss = cnr;
for index = 1:numElevAngles      config.Distance =
d(index)/1e3;                     % km
config.MiscellaneousLoss = totalAtmosphericLoss(index) + ...

```

```

        link.PolarizationLoss + link.ShadowMargin +
link.AdditionalLosses;
        [cnr(index),cnrInfo] = satelliteCNR(config);
        pathLoss(index) = cnrInfo.FSPL;
end

% Βάζουμε τα αποτελέσματα σε πίνακα
table(elevAngles,cnr,pathLoss,VariableNames=["Elevation Angle
(degrees)", "CNR (dB)", "FSPL (dB)"])
% Γράφημα του CNR ως συνάρτηση της γωνίας ανύψωσης
plot(elevAngles,cnr,"*")
title("CNR As a Function of Elevation Angle")
xlabel("Elevation Angle (degrees)")
ylabel("CNR (dB)")
ylim([min(cnr)-0.2 max(cnr)+0.2])
xlim([min(elevAngles)-1 max(elevAngles)+1])
grid on

% Υπολογισμός περιθωρίου συνδέσμου linkMargin = cnr - cnrRef;

% Ελάχιστος αριθμός επιπλέον επαναλήψεων που απαιτούνται μέχρι
το LM να
% είναι 0 ή 1 minRepetitions = 10.^(-linkMargin./10);
idx = linkMargin >= 0;
additionalRepetitions = minRepetitions;
additionalRepetitions(idx) = 0;
% Όταν το LM είναι αρνητικό, βελτιώνουμε το CNR προσθέτοντας
επαναλήψεις.
% Υπολογίζουμε τον απαιτούμενο αριθμό πρόσθετων επαναλήψεων.
additionalRepetitions(~idx) =
ceil(nRep*(additionalRepetitions(~idx)-1));

% Γωνία | LM | Ελάχ. απαιτούμενες επαναλήψεις
table(elevAngles,linkMargin,additionalRepetitions, ...
    VariableNames=["Elevation Angle (degrees)", ...
    "Link Margin (dB)", "NRep_Add"])

```

A6 doppler_shift_effect.m

```
%% === Υπολογισμός Μετατόπισης Doppler για Starlink ===
% 1. Ορισμός Σταθερών c = 3.0e8; % Ταχύτητα φωτός (m/s)
f0 = 12e9; % Συχνότητα φορέα (Hz), από τις παραμέτρους
Starlink

% 2. Ορισμός Δορυφορικών και Επίγειων Παραμέτρων altitude =
550e3; % Ύψος του Starlink (m) από το TLE inclination =
53.0552; % Κλίση τροχιάς από το TLE earth_radius = 6371e3; %
Ακτίνα της Γης (m)

% 3. Υπολογισμός Ταχύτητας Δορυφόρου
% Χρησιμοποιούμε τον νόμο του Κέπλερ για να εκτιμήσουμε την
ταχύτητα mu = 3.986e14; % Γεωκεντρική σταθερά βαρύτητας
(m^3/s^2)
orbital_radius = earth_radius + altitude; % Απόσταση από το
κέντρο της Γης v_sat = sqrt(mu / orbital_radius); %
Υπολογισμός ταχύτητας δορυφόρου (m/s)

% 4. Ορισμός Γωνιών Ανύψωσης (Elevation Angles)
% Αυτές είναι οι ίδιες γωνίες που χρησιμοποιήσαμε στο link
budget elevAngles = [1.18 5.34 10.56 17.71 28.84 49.08 81.95
51.97];

% 5. Υπολογισμός Doppler Shift για κάθε γωνία ανύψωσης
doppler_shift = zeros(size(elevAngles)); % Δημιουργία πίνακα
για τις τιμές

for i = 1:length(elevAngles)
    theta = deg2rad(elevAngles(i)); % Μετατροπή γωνίας από
μοίρες σε ακτίνια v_rel = v_sat * cos(theta); %
Υπολογισμός σχετικής ταχύτητας doppler_shift(i) = (v_rel /
c) * f0; % Υπολογισμός μετατόπισης Doppler (Hz)
end

% 6. Εμφάνιση Αποτελεσμάτων σε Πίνακα
disp("Doppler Shift για διάφορες γωνίες ανύψωσης:")
table(elevAngles', doppler_shift', 'VariableNames', ...
["Elevation Angle (degrees)", "Doppler Shift (Hz)"])

% 7. Γράφημα Μετατόπισης Doppler figure;
plot(elevAngles, doppler_shift, 'o-', 'LineWidth', 1.5);
title("Doppler Shift as a Function of Elevation Angle");
xlabel("Elevation Angle (degrees)");
ylabel("Doppler Shift (Hz)");
grid on;
```

Παράρτημα Β'

B.1 getCloudParameters.m

```
function [cnc,lwc] = getCloudParameters(cloudType)
% cnc - Cloud number concentration in 1/cm^3
% lwc - Liquid water content g/m^3 switch cloudType      case
"Cumulus"          cnc = 250;
    lwc = 1;
case "Stratus"      cnc = 250;
    lwc = 0.29;
case "Stratocumulus" cnc = 250;
    lwc = 0.15;
case "Altostratus"  cnc = 400;
    lwc = 0.41;
case "Nimbostratus" cnc = 200;
    lwc = 0.65;
case "Cirrus"       cnc = 0.025;
    lwc = 0.06405;
case "Thin cirrus"  cnc = 0.5;
    lwc = 3.128*1e-4;
end end
```


Βιβλιογραφία

- [1] Dr. Hridaya, Nand Sah, "A brief history of Mobile Generations and Satellite Wireless Communication System", *International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, vol. 4, no. 12, pp. 1211-1214, 2017.
- [2] Haard Mehta et al., "0G to 5G Mobile Technology: A Survey", *Journal of Basic and Applied Engineering Research*, vol. 1, no. 6, pp. 56-60, 2014.
- [3] Adnan Majeed M.Phil, "Comparative Studies of 3G, 4G & 5G Mobile Network & Data Offloading Method a Survey", *International Journal of Research in Information Technology*, vol. 3, no. 5, pp. 421-427, 2015.
- [4] Jitender Singh, "Generations of Wireless Technology", *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 3, no. 10, 2018.
- [5] S. Mukhopadhyay, V. Agarwal, S. Sharma and V. Gupta, "A Study On Wireless Communication Networks Based On Different Generations," *International Journal of Current Trends in Engineering & Research (IJCTER)*, vol. 2, pp. 300-304, May 2016.
- [6] Franklin H. Blecher, "Advanced Mobile Phone Service", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. VT-29, no. 2, pp. 238-244, May 1980.
- [7] Heikki Karjaluo, "An Investigation of Third Generation (3G) Mobile Technologies and Services", *Contemporary Management Research*, vol. 2, no. 2, pp. 91-104, September 2006.
- [8] Sumukh Bhandarkar, Ranjana Kammar, "4G TECHNOLOGY", *International Journal of Scientific Research and Modern Education (IJSRME)*, vol. I, no. II, pp. 96-99, 2016.
- [9] Dr. Vidyaa Thulasiraman, Mr. G.Manikandan, "4G Technology and Its Application An Overview", *International Journal of Recent Research in Mathematics Computer Science and Information Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 23-27, September 2016.
- [10] Emna Hajlaoui, Aida Zaier, Abdelhakim Khelifi, Jihed Ghodhbane, Mouna Ben Hamed, Lassâad Sbita, "4G and 5G technologies: A Comparative Study", *5th International Conference on Advanced Technologies*, September 2020.
- [11] Kanchei Loa et al., "MT-advanced relay standards [WiMAX/LTE Update]," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 8, pp. 40-48, August 2010.
- [12] Wikipedia, "4G," Available: https://en.wikipedia.org/wiki/4G#LTE_Advanced.
- [13] B.I. Bakare, W. N. Abidde, "A Technical Review of Long Term Evolution (LTE) Operations", *American Journal of Engineering Research (AJER)*, vol. 11, no.04, pp. 132-137, 2022

- [14] Tom Jowitt, "Tales In Tech History: WiMax" silicon.co.uk.
<https://www.silicon.co.uk/networks/tales-tech-history-wimax-227889> (Accessed May 26, 2024)
- [15] Anita Garhwal1, Partha Pratim Bhattacharya, "A review on WiMAX Technology", *International Journal Of Advances In Computing and Information Technology*, vol 1, pp. 167-173, 2012.
- [16] Er. Paramveer Kaur Sran, "Wimax :Its Features and Applications", *2nd National Conference on Communications and Networking*, March 2009.
- [17] Mahdieh Danandeh Oskouei, Seyed Naser Razavi, "A Study on WiMAX: IEEE 802.16 Standard", *International Journal of Computer Applications (0975 – 8887)*, vol. 131, no. 8, pp. 22-27, December 2015.
- [18] EMF, "WiMax", *Mobile communications and radio applications*, emf-portal.org.
<https://www.emf-portal.org/en/emf-source/390> (Accessed May 26, 2024).
- [19] Ismat Aldmour, "LTE and WiMAX: Comparison and Future Perspective", *Communications and Network*, vol. 5, pp. 360-368, 2013.
- [20] Daniel Noworatzky, "What's so great about WiMAX" teledynamics.com.
<https://info.teledynamics.com/blog/whats-so-great-about-wimax> (Accessed May 26, 2024).
- [21] A. Shaji George, Sagayarajan Fernando, "Exploring the Potential and Limitations of 5G Technology: A Unique Perspective", *Partners Universal International Innovation Journal (PUIIJ)*, vol. 1, no. 2, pp. 160-170, 2023.
- [22] Amitabha Ghosh et al., "5G Evolution: A View on 5G Cellular Technology Beyond 3GPP Release 15", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 127639-127651, 2019.
- [23] Qualcomm Technologies, "5G NR is the foundation to what's next.", qualcomm.com.
<https://www.qualcomm.com/research/5g/5g-nr> (Accessed May 27, 2024).
- [24] A10, "5G Key Technologies", a10networks.com.
<https://www.a10networks.com/blog/5g-key-technologies/> (Accessed May 27, 2024).
- [25] Sanae El Hassani, Abdelfatteh Haidine, Hayat Jebbar, "Road to 5G: Key Enabling Technologies", *Journal of Communications*, vol. 14, no. 11, pp. 1034-1047, November 2019.
- [26] Verizon, "5G spectrum and frequency bands: What they are and why they matter", verizon.com. <https://www.verizon.com/about/news/5g-frequency-bands-explained> (Accessed May 28, 2024)
- [27] Nokia, "5G spectrum bands explained - low, mid and high band" nokia.com.
<https://www.nokia.com/thought-leadership/articles/spectrum-bands-5g-world/> (Accessed May 28, 2024).

- [28] Cablefree, “5G Frequency Bands & Spectrum Allocations”, cablefree.net.
<https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/4glte/5g-frequency-bands-lte/> (Accessed May 28, 2024).
- [29] Opensignal, “5G Experience Report”, opensignal.com.
<https://www.opensignal.com/reports/2023/01/usa/mobile-network-experience-1> (Accessed May 28, 2024).
- [30] Qualcomm, “Everything you need to know about 5G.”, qualcomm.com.
<https://www.qualcomm.com/5g/what-is-5g> (Accessed May 28, 2024).
- [31] Ian Fogg, “Benchmarking the Global 5G Experience — June 2022”, opensignal.com.
<https://www.opensignal.com/2022/06/22/benchmarking-the-global-5g-experience-june-2022> (Accessed May 28, 2024).
- [32] Xuan Du et. al, “Definition and Evaluation of Latency in 5G: A Framework Approach”, *2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF)*, pp. 135 – 140, 2019.
- [33] Verizon, “What is the Latency of 5G?”, verizon.com.
<https://www.verizon.com/about/our-company/5g/5g-latency> (Accessed May 28, 2024).
- [34] Yuehong Gao et. al, “Study on MCS Selection and Spectrum Allocation for URLLC Traffic under Delay and Reliability Constraint in 5G Network”, pp. 2-5, January 2021.
- [35] Idrissa Abubakar, Jafri Din, Manhal Alhilali, Hong Yin Lam, “Interference and Electromagnetic Compatibility Challenges in 5G Wireless Network Deployments”, *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 5, no. 3, , pp. 612 - 621, March 2017.
- [36] Maxim Solkina, “Electromagnetic interference hazards in flight and the 5G mobile phone: Review of critical issues in aviation security”, *10th International Conference on Air Transport*, pp. 310–318, 2021.
- [37] David Hosansky, “5G wireless networks threaten weather forecasts, NCAR expert tells Congress”, ucar.edu, <https://news.ucar.edu/132801/5g-wireless-networks-threaten-weather-forecasts-ncar-expert-tells-congress> (Accessed May 28, 2024).
- [38] Marguerite Reardon, “How the FAA went to war against 5G”, cnet.com,
<https://www.cnet.com/tech/mobile/how-the-faa-went-to-war-against-5g/> (Accessed May 28, 2024).
- [39] Mitchell Clark, “AT&T and Verizon are limiting C-band 5G expansion around airports even more”, theverge.com, <https://www.theverge.com/2022/1/18/22889664/att-5g-limits-c-band-expansion-airports-further-carrier-airline> (Accessed May 28, 2024).
- [40] Mesh Flinders, “The future of 5G: What to expect from this transformational technology”, ibm.com, <https://www.ibm.com/blog/5g-future/> (Accessed May 28, 2024).

- [41] Elayan, Hadeel, Amin, Osama Shubair, Raed M. Alouini, Mohamed-Slim, “Terahertz communication: The opportunities of wireless technology beyond 5G”, *International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking*, pp. 1-5, 2018.
- [42] Shuping Dang, Osama Amin, “What should 6G be?”, pp. 1-12, 2019.
- [43] Shanzhi Chen, “System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication —the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G”, vol. 17 pp. 156-171, 2020.
- [44] Lakhindra Kumar, “Satellite”, March 2019.
- [45] Reham Reda et. al, “BASIC PRINCIPLES AND MECHANICAL CONSIDERATIONS OF SATELLITES: A SHORT REVIEW”, *Transactions on Aerospace Research*, vol. 272, no. 3, pp. 33-53, 2023.
- [46] Xie Yifei, “Research on the development of artificial satellites”, *Proceedings of the 3rd International Conference on Computing Innovation and Applied Physics*, vol. 30, pp. 275-279, 2024.
- [47] Elizabeth Howell, Ben Biggs, “What is a satellite?”, space.com, <https://www.space.com/24839-satellites.html> (Accessed June 5, 2024).
- [48] Internet Society, “Perspectives on LEO Satellites”, November 2022.
- [49] Fujitsu, “LEO Satellite Broadband”, fujitsu.com, <https://www.fujitsu.com/global/vision/insights/22-leo-satellite-broadband/> (Accessed June 10, 2024).
- [50] Chan Liu, “Modeling of Satellite Constellation in Modelica and a PHM System Framework Driven by Model Data Hybrid”, *Electronics*, vol. 11, no. 2155, pp. 1-20, 2022.
- [51] Donal McCarthy, “The Internet from Space: RFIC Advances in High Capacity, Low Latency LEO Satellite User and Ground Terminals”, vol. 56, no. 4, pp. 2-6, November 2022.
- [52] BlueWireless, “Exploring the Key Differences Between LEO Satellites and 5G”, bluewireless.com, <https://www.bluewireless.com/news-and-insights/exploring-the-key-differences-between-leo-satellites-and-5g> (Accessed June 10, 2024).
- [53] Kenneth M. Peterson, “Satellite Communications”.
- [54] Yue Pingyue et. al, “Low Earth Orbit Satellite Security and Reliability: Issues, Solutions, and the Road Ahead”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 25, no. 3, pp. 1604 – 1652, July 2023.
- [55] SES, “About Us”, ses.com, <https://www.ses.com/about-us> (Accessed June 11, 2024).

- [56] SES, “The Power of Medium Earth Orbit (MEO) Satellites”, ses.com, <https://www.ses.com/power-medium-earth-orbit-meo-satellites> (Accessed June 11, 2024).
- [57] “Communication using Medium Earth Orbit (MEO) Satellites”, *Telecommunication Engineering Center (Radio Division)*.
- [58] Boeing, “Boeing to Build Four Additional 702X Satellites for SES’s O3b mPOWER Fleet” <https://boeing.mediaroom.com/2020-08-07-Boeing-to-Build-Four-Additional-702X-Satellites-for-SES> (Accessed June 11, 2024).
- [59] Juyu Wang et. al, “Detection and Analysis of Radiation Doses in Multiple Orbital Space during Solar Minimum”, *Aerospace*, vol. 10, no. 11, 2023.
- [60] Jennifer A. Bolin, “Comparative Analysis of Selected Radiation Effects in Medium Earth Orbits”, December 1997.
- [61] Atsuo TSUIKI, Masayoshi Utashima, et. al, “A Study on Medium Earth Orbit Utilization”, *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan*, vol. 12, no. 29, pp. 17 - 21, 2014.
- [62] Kratos Defense “Is MEO Poised for New Growth As Satellite Market Shifts?”, [kratosdefense.com, https://www.kratosdefense.com/constellations/articles/is-meo-poised-for-new-growth-as-satellite-market-shifts](https://www.kratosdefense.com/constellations/articles/is-meo-poised-for-new-growth-as-satellite-market-shifts) (Accessed June 11, 2024).
- [63] Geoff Varral, “Orbital Value” .linkedin.com <https://www.linkedin.com/pulse/orbital-value-geoff-varrall> (Accessed October 17, 2024).
- [64] S C Pascall, “51 - Communication satellites and systems,” in *Telecommunications Engineer's Reference Book*, 1993, ch. 51, pp. 51-1-51-20.
- [65] Yannick Borthomieu, “Satellite Lithium-Ion Batteries,” in *Lithium-Ion Batteries*, 2014, ch. 14, pp. 311-344.
- [66] NASA, “The First Geosynchronous Satellite”, nasa.gov <https://www.nasa.gov/image-article/first-geosynchronous-satellite/> (Accessed October 17, 2024).
- [67] NASA, “Syncom 3”, nssdc.gsfc.nasa.gov <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1964-047A> (Accessed October 17, 2024).
- [68] INTELSAT, “Meet Intelsat 1”, www.intelsat <https://www.intelsat.com/homepage/about-us/our-story/meet-intelsat-1/> (Accessed October 17, 2024).
- [69] NASA, “Sputnik and The Dawn of the Space Age”, <https://www.nasa.gov/history/sputnik/index.html> (Accessed October 17, 2024).
- [70] Britannica, “Explorer” <https://www.britannica.com/technology/Explorer-satellites> (Accessed October 17, 2024).

[71] NASA Space Science Data Coordinated Archive, "Sputnik 1," Available: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1957-001B>. (Accessed October 17, 2024).

[72] D. Prouse, "Telstar - the birth of transatlantic satellite communications," *Institution of Engineering and Technology Seminar on the Story of Transatlantic Communications 2008*, Manchester, 2008, pp. 85-85.

[73] NASA Space Science Data Coordinated Archive, "Telstar 1," Available: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1962-029A>. (Accessed October 17, 2024).

[74] J. N. Pelton, "The start of commercial satellite communications [History of communications]," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 3, pp. 24-31, March 2010.

[75] SATSIG Network. "Satellite Station-Keeping." <https://www.satsig.net/pointing/satellite-station-keeping.htm>. (Accessed October 17, 2024).

[76] Electronics Desk, "Geostationary Orbit," *Electronics Desk*. Available: <https://electronicsdesk.com/geostationary-orbit.html> (Accessed October 17, 2024).

[77] Interseas, "LEO and GEO satellites: Differences, advantages, and challenges in satellite connectivity," <https://interseas.es/en/leo-and-geo-satellites-differences-advantages-and-challenges-in-satellite-connectivity/> (Accessed October 17, 2024).

[78] RF Wireless World, "Advantages and Disadvantages of GEO (Geosynchronous orbit)," *RF Wireless World*, 2023. <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Advantages-and-Disadvantages-of-GEO-Geosynchronous-orbit.html> (Accessed October 17, 2024).

[79] G. Cui, P. Duan, L. Xu and W. Wang, "Latency Optimization for Hybrid GEO–LEO Satellite-Assisted IoT Networks," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, no. 7, pp. 6286-6297, April 2023.

[80] V. K. Gupta, V. N. Ha, E. Lagunas, H. Al-Hraishawi, L. Chen and S. Chatzinotas, "Combining Time-Flexible GEO Satellite Payload With Precoding: The Cluster Hopping Approach," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 72, no. 12, pp. 16508-16523, Dec. 2023.

[81] M. G. Kibria, E. Lagunas, N. Maturo, D. Spano and S. Chatzinotas, "Precoded Cluster Hopping in Multi-Beam High Throughput Satellite Systems," *2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Waikoloa, HI, USA, 2019, pp. 1-6.

[82] Digital Regulation Platform, "Regulation of NGSO Satellite Constellations," *Digital Regulation Platform*, Available: <https://digitalregulation.org/regulation-of-ngso-satellite-constellations/>. (Accessed October 17, 2024).

[83] L. J. Ippolito Jr., *Satellite Communications Systems Engineering: Atmospheric Effects, Satellite Link Design, and System Performance*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2008.

[84] Steely Communications, "The History of VSAT: Bridging Global Divides," Available: <https://www.steely.cc/articles/history-of-vsats>. (Accessed October 17, 2024).

[85] *Multi-gateway Satellite Systems: Reference Report*, ITU Radiocommunication Sector, ITU-R Report S.2278, 2013.

[86] Testbook VSAT: Definition, Working, Components, and Advantages," Available: <https://testbook.com/ias-preparation/vsat>. (Accessed October 17, 2024).

[87] Inmarsat, "About Us," Inmarsat, 2023. Available: <https://www.inmarsat.com/en/about.html>. (Accessed October 17, 2024).

[88] ITU, "Next-generation of satellites on the move," May 2020. Available: <https://www.itu.int/hub/2020/05/next-generation-of-satellites-on-the-move/>. (Accessed October 17, 2024).

[89] Iridium Communications, "Iridium Network," [Online]. Available: <https://www.iridium.com/network/>. (Accessed October 17, 2024).

[90] Peter Swan, "Overview of IRIDIUM satellite network", *Proceedings of WESCON'95*, San Francisco, CA, USA, 1995, pp. 483 - 489.

[91] Thuraya, "Thuraya 4-NGS," [Online]. Available: <https://www.thuraya.com/en/services/thuraya-4-ngs>. (Accessed October 17, 2024).

[92] Gulf Today, "Yahsat to launch Thuraya-4 satellite in Q4 of 2024," [Online]. Available: <https://www.gulftoday.ae/news/2024/08/26/yahsat-to-launch-thuraya-4-satellite-in-q4-of-2024>. (Accessed October 17, 2024).

[93] Airbus, "Airbus delivers Space42's Thuraya 4 satellite to launch site," Available: <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2024-12-airbus-delivers-space42s-thuraya-4-satellite-to-launch-site>. (Accessed October 17, 2024).

[94] New Space Economy, "OneWeb Satellite Constellation: A Quick Overview," Apr. 27, 2024. [Online]. Available: <https://newspaceeconomy.ca/2024/04/27/oneweb-satellite-constellation-a-quick-overview/>. (Accessed October 17, 2024)

[95] Speedcast, "OneWeb VSAT Satellite," [Online]. Available: <https://www.speedcast.com/our-solution/product/vsat-satellite/oneweb/>. (Accessed October 17, 2024)

[96] Satellite Today, "20 New OneWeb Satellites on the Way to Orbit," Oct. 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.satellitetoday.com/connectivity/2024/10/21/20-new-oneweb-satellites-on-the-way-to-orbit/>. (Accessed October 17, 2024)

- [97] SatNews, "OneWeb Examined in Detail," Oct. 22, 2024. [Online]. Available: <https://news.satnews.com/2024/10/22/oneweb-examined-in-detail/>. (Accessed October 17, 2024).
- [98] "Satellite Map - OneWeb Constellation," Satellite Map, <https://satellitemap.space/?constellation=oneweb>. (Accessed: Dec. 14, 2024).
- [99] "Satellite Map - Starlink Constellation," Satellite Map, <https://satellitemap.space/?constellation=starlink>. (Accessed: Dec. 14, 2024).
- [100] "Technology," Starlink, <https://www.starlink.com/technology>. (Accessed December 14, 2024).
- [101] H. M. V. R. Herath, "Starlink: A solution to the digital connectivity divide in education in the Global South," *Department of Electrical and Electronic Engineering*, University of Peradeniya, Sri Lanka.
- [102] "Starlink Technology," *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, Aug. 2023, vol. 10, no. 8, pp. 25.
- [103] Shaengchart, Yarnaphat & Kraiwanit, Tanpat. "The SpaceX Starlink Satellite Project: Business Strategies and Perspectives". *Corporate and Business Strategy Review*. vol. 5. pp. 30-37.
- [104] SpaceX, *Starlink Terms of Service*. <https://www.starlink.com/legal/documents/DOC-1400-28829-70>. (Accessed December 14, 2024).
- [105] SpaceX, "Starlink Roam," Starlink, <https://www.starlink.com/gr/roam>. (Accessed December 14, 2024).
- [107] 5G Americas, *5G Non-Terrestrial Networks*, Jan. 2022. [Online]. Available: <https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2022/01/5G-Non-Terrestrial-Networks-2022-WP-Id.pdf>. (Accessed February 7, 2025).
- [108] 3GPP, "5G Non-Terrestrial Networks," [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/news-events/partner-news/5ga-paper-ntn>. (Accessed February 7, 2025).
- [109] 3GPP, "Release 18," [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-18>. (Accessed February 7, 2025).
- [110] G. Masini, "How we reached a common vision on the architecture for 5G non-terrestrial networks in 3GPP Rel-19," Ericsson Blog, 2024.
- [111] Techplayon, "5G Satellites Architecture: Transparent & Regenerative," *Techplayon*, Available: <https://www.techplayon.com/5g-satellites-architecture-transparent-regenerative/>. (Accessed February 7, 2025).

- [112] A. Guidotti, *The Evolution of 3GPP NTN from 5G to 5G-Advanced and 6G: Space Softwarization from Physical Layer to Services: A New Paradigmatic Vision of Space Networks*, CNIT, presented at the Summer School "Frontier Technologies for 6G and Beyond," Aug. 30, 2023.
- [113] NASA, "State-of-the-Art Small Spacecraft Technology," 2024. Available: <https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/> (Accessed February 7, 2025).
- [114] J. Liang, A. U. Chaudhry, E. Erdogan, and H. Yanikomeroglu, "Link Budget Analysis for Free-Space Optical Satellite Networks," in *Proc. 2022 IEEE 23rd International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, Belfast, United Kingdom, 2022, pp. 471–476.
- [115] International Telecommunication Union Radiocommunication Sector (ITU-R), *Technical and operational characteristics of satellites operating in the range 20-375 THz*, Recommendation ITU-R S.1590 (09/2022). Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-S.1590-0-200209-I/en>.
- [116] MathWorks, "Optical Satellite Communication Link Budget Analysis," *MATLAB & Simulink Documentation*, Available: https://www.mathworks.com/help/satcom/ug/optical_satellite_communication_link_budget_analysis.html#mw_rtc_OpticalLinkBudgetAnalysisExample_M_1E9A65BE. <https://www.mathworks.com/help/satcom/ug/nb-iot-ntn-link-budget-analysis.html> (Accessed February 7, 2025).
- [117] International Telecommunication Union Radiocommunication Sector (ITU-R), *Propagation data required for the design of Earth-space systems operating between 20 THz and 375 THz*, Recommendation ITU-R P.1621-2 (07/2015). Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1621-2-201507-I/en>.
- [118] M. S. Awan, Marzuki, E. Leitgeb, B. Hillbrand, F. Nadeem, and M. S. Khan, "Cloud Attenuations for Free-Space Optical Links," in *Proc. 2009 International Workshop on Satellite and Space Communications (IWSSC)*, Siena, Italy, 2009, pp. 274–278.
- [119] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), *Solutions for NR to Support Non-Terrestrial Networks (NTN)*, 3GPP TR 38.821. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3525> (Accessed February 7, 2025).
- [120] MathWorks, *NB-IoT NTN Link Budget Analysis*. Available: <https://www.mathworks.com/help/satcom/ug/nb-iot-ntn-link-budget-analysis.html> (Accessed February 7, 2025).
- [121] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), *Solutions for NR to Support Non-Terrestrial Networks (NTN)*, 3GPP TR 38.821. Available: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3525> (Accessed February 7, 2025).

[122] MathWorks, "NR NTN PDSCH Throughput," *MATLAB & Simulink - Satellite Communications Toolbox*, MathWorks. Available: <https://www.mathworks.com/help/satcom/ug/nr-ntn-pdsch-throughput.html> (Accessed February 7, 2025).

[123] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), *Study on Narrow-Band Internet of Things (NB-IoT)/Enhanced Machine Type Communication (eMTC) Support for Non-Terrestrial Networks (NTN)*, 3GPP TR 36.763.