



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΥΛΙΚΩΝ**

**Σχεδίαση Μη Επίγειου Συστήματος Επικοινωνιών με χρήση  
Δορυφόρων Χαμηλής Τροχιάς (LEO)**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Παπανικόλας Φ. Νικόλαος**

**Επιβλέπων: Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος  
Καθηγητής ΕΜΠ**

Αθήνα, Οκτώβριος 2024





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΥΛΙΚΩΝ**

**Σχεδίαση Μη Επίγειου Συστήματος Επικοινωνιών με χρήση  
Δορυφόρων Χαμηλής Τροχιάς (LEO)**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Παπανικόλας Φ. Νικόλαος**

**Επιβλέπων: Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος**  
**Καθηγητής ΕΜΠ**

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 24<sup>η</sup> Οκτ 2024

.....  
Αθ. Δ. Παναγόπουλος  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Γ. Φικιώρης  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Γ. Ματσόπουλος  
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2024



.....  
Παπανικόλας Φ. Νικόλαος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Ηλεκτρονικών Υπολογιστών

Copyright © Παπανικόλας Φ. Νικόλαος, 2024.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται στο συγγραφέα στην ηλεκτρονική διεύθυνση [nikos.smnnp@gmail.com](mailto:nikos.smnnp@gmail.com).

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.



## Περίληψη

Στη σημερινή εποχή, τα κινητά τερματικά έχουν μπει για τα καλά στην καθημερινότητά μας. Δεδομένης της φορητότητάς τους και ενσωματώνοντας αξιόλογες υπολογιστικές δυνατότητες, σε συνδυασμό με την τεχνητή νοημοσύνη και την εύκολη πρόσβαση στο διαδίκτυο, έχουν οδηγήσει τους τελικούς χρήστες στην ευρεία χρήση εφαρμογών και υπηρεσιών με υψηλές απαιτήσεις σε μεταφορά δεδομένων μεγάλου όγκου, αξιόπιστα και με χαμηλές καθυστερήσεις. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την ανάγκη για παροχή υπηρεσιών επικοινωνίας σε όλα τα γεωγραφικά μήκη και πλάτη της Γης, έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη των GAS (Ground-Air-Space) δικτύων, τα οποία εξ ορισμού ενσωματώνουν NT (Non Terrestrial) στοιχεία. Σύγχρονες εταιρίες κολοσσοί δραστηριοποιούνται τα τελευταία χρόνια στην ανάπτυξη NTN (Non Terrestrial Networks), αναπτύσσοντας πλήθος δορυφόρων σε τροχιά για την δημιουργία δικτύων επικοινωνιών, τα οποία έχουν τη δυνατότητα παροχής κάλυψης ακόμα και σε περιοχές χωρίς υφιστάμενα επίγεια με ιδιαίτερη έμφαση να δίνεται στην ανάπτυξη αστερισμών σε πολλαπλά τροχιακά επίπεδα, με σημαντικότερο αυτό των LEO δορυφόρων. Στο πλαίσιο των παραπάνω, η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την περιγραφή και μελέτη βασικών εννοιών σχετικά με τα NTN, την ενσωμάτωση σε αυτά συστημάτων δορυφόρων χαμηλής τροχιάς (LEO) και την ανάλυση ορισμένων βασικών χαρακτηριστικών σχεδίασης LEO αστερισμών. Έτσι λοιπόν, στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση κάποιων βασικών χαρακτηριστικών των σύγχρονων δικτύων επικοινωνιών και των δορυφορικών αστερισμών γενικότερα, ενώ στα επόμενα κεφάλαια γίνεται ενδελεχής ανάλυση χαρακτηριστικών που αφορούν αμιγώς δορυφορικά δίκτυα. Πιο αναλυτικά, στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις χρησιμοποιούμενες δορυφορικές συχνότητες, τα πλεονεκτήματα και τους τομείς χρησιμοποίησης της εκάστοτε μπάντας, ενώ στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μελέτη των παραμέτρων καθορισμού της τροχιάς ενός δορυφόρου. Επιπλέον παρουσιάζονται οι επιμέρους κατηγορίες τροχιών, τα πλεονεκτήματα / μειονεκτήματα και οι τομείς εφαρμογής της κάθε μίας εξ αυτών ενώ ακολούθως, γίνεται ανάλυση παραμέτρων προσδιορισμού της περιοχής κάλυψης ενός δορυφόρου. Στα επόμενα δύο κεφάλαια αναλύονται θέματα προϋπολογισμού δορυφορικών ζεύξεων, χαρακτηρισμού των δορυφορικών καναλιών και μεθοδολογίας υπολογισμού των εκάστοτε απωλειών. Στα τελευταία δύο κεφάλαια γίνεται σύντομη παρουσίαση κάποιων διάσημων αστερισμών, κατά κύριο λόγο βασισμένων σε LEO δορυφόρους, ενώ στη συνέχεια αναλύονται και υλοποιούνται βασικές εξισώσεις σχεδίασης ορισμένων πτυχών των δορυφορικών συστημάτων, κάνοντας χρήση συναφών δεδομένων και εκτιμήσεων. Τέλος, γίνεται παρουσίαση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων των παραπάνω, καθώς επίσης και εξαγωγή γενικού συμπεράσματος.

## Λέξεις Κλειδιά

Μη Επίγεια Δίκτυα, Δορυφόροι Χαμηλής Τροχιάς, Μπάντες Συχνότητων, Τροχιακές Παράμετροι, Δορυφορική Κάλυψη, Προϋπολογισμός Ζεύξης, Δορυφορικά Κανάλια, Απώλειες, Αποσβέσεις, Διαλείψεις

## **Abstract**

In today's era, mobile terminals have entered our daily lives for good. Given their portability and by incorporating remarkable computing capabilities, combined with artificial intelligence and easy access to the internet, they enable end users to widely use applications and services with high information demands concerning high volume data transfer, with reliability and low delays. This fact combined with the need to provide communication services in all the geographical longitudes and latitudes of the Earth, has led to the development of GAS (Ground-Air-Space) networks, which by definition incorporate NT (Non-Terrestrial) components. In recent years modern giant companies have been active in the development of NTN (Non-Terrestrial Networks), deploying a number of satellites in orbit to create communication networks, which have the ability to provide coverage even in distanced or sparsely populated areas without existing networks or in areas affected by some natural disaster. Thus, the aerospace sector has experienced great growth in recent years, with several technological achievements and with particular emphasis on the development of constellations at multiple orbital levels, with the most important of them being that of LEO satellites. This fact is due to the inherent characteristics presented by the specific satellites which make them more suitable for certain applications, compared to the rest of the categories. In the context of the above, this thesis deals with the description and study of basic concepts related to NTNs, the integration of Low Earth Orbit (LEO) satellites into these systems and the analysis of some key features of LEO landing designs. So, in the first chapter, some basic characteristics of modern communication networks and satellite systems in general are presented, while in the following chapters, a thorough analysis of characteristics that refer to purely satellite networks is carried out. In more detail, the second chapter refers to the used satellite frequencies, the advantages and the areas of use of each band, while the third chapter studies the parameters for determining the orbit of a satellite. In addition, the individual categories of orbits, the advantages / disadvantages and the application sectors of each one of them are presented, while subsequently, an analysis of parameters for determining the coverage area of a satellite is carried out. In the next two chapters, satellite link budget issues, characterization of satellite channels and methodology for calculating the respective losses are analyzed. In the last two chapters, a brief presentation of some famous satellite constellations, mainly based on LEO satellites, is given while subsequently basic design equations of some aspects of the satellite systems are analyzed and created, using relevant data and estimations. Finally, the results and comments are presented.

## **Keywords**

Non-Terrestrial Networks, Low Orbit Satellites, Frequency Bands, Orbital Parameters, Satellite Coverage, Link Budget, Satellite Channels, Losses, Fading, Dropouts





## Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Αθανάσιο Δ. Παναγόπουλο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση της παρούσας εργασίας, την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ εκτενέστερα με το συγκεκριμένο αντικείμενο, καθώς επίσης και για την βοήθεια, την κατανόηση και τη συνεχή του καθοδήγηση κατά τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Παναγιώτη Γ. Κωττή, ο οποίος ήταν ο πρώτος καθηγητής που με εισήγαγε στην επιστήμη των τηλεπικοινωνιών και με ενέπνευσε να ακολουθήσω τη συγκεκριμένη κατεύθυνση. Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Φώτιο και Αглаΐα, καθώς επίσης τις αδερφές μου Νεκταρία, Ευμορφία και Ελένη, για την πλήρη στήριξη και την αγάπη τους όλα αυτά τα χρόνια. Μαζί με αυτούς ευχαριστώ όλους τους φίλους μου και τους ανθρώπους εντός του στενού κοινωνικού μου κύκλου, που μου στάθηκαν σε όλες αυτές τις στιγμές και με βοήθησαν να φτάσω εδώ σήμερα.

Η παρούσα Διπλωματική αφιερώνεται στην οικογένειά μου.



## Πίνακας Περιεχομένων

|                                                                           |        |
|---------------------------------------------------------------------------|--------|
| <u>Περίληψη</u> .....                                                     | σελ.i  |
| <u>Λέξεις Κλειδιά</u> .....                                               | σελ.i  |
| <u>Abstract</u> .....                                                     | σελ.ii |
| <u>Keywords</u> .....                                                     | σελ.ii |
| <u>Πίνακας Περιεχομένων</u> .....                                         | σελ.1  |
| <u>Πίνακας Συντμήσεων</u> .....                                           | σελ.5  |
| <u>Ευρετήριο Εικόνων-Σχημάτων</u> .....                                   | σελ.7  |
| <u>Ευρετήριο Πινάκων</u> .....                                            | σελ.9  |
| <u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή στα Μη Επίγεια Δίκτυα</u> .....                   | σελ.10 |
| 1.1 Σκοπός Εργασίας.....                                                  | σελ.10 |
| 1.2 Πλεονεκτήματα και εφαρμογές NTNs.....                                 | σελ.10 |
| 1.3 Ενσωμάτωση Δορυφόρων σε NTN δίκτυα.....                               | σελ.13 |
| 1.4 Αντικείμενα Σύγχρονων Ερευνών.....                                    | σελ.17 |
| <u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Δορυφορικές Συχνότητες</u> .....                           | σελ.24 |
| 2.1 Εφαρμογές-Υπηρεσίες βασισμένες σε Δορυφορικές Μπάντες Συχνότητων..... | σελ.24 |
| 2.2 Κατανομή Δορυφορικών Συχνότητων σε Μπάντες.....                       | σελ.26 |
| 2.2.1 L-Band.....                                                         | σελ.26 |
| 2.2.2 S-Band.....                                                         | σελ.27 |
| 2.2.3 C-Band.....                                                         | σελ.27 |
| 2.2.4 X-Band.....                                                         | σελ.27 |
| 2.2.5 Ku-Band.....                                                        | σελ.28 |
| 2.2.6 Ka-Band.....                                                        | σελ.28 |
| 2.2.7 V-Band.....                                                         | σελ.28 |

|                                                             |                                                   |        |
|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------|
| 2.2.8                                                       | Q/V-Band .....                                    | σελ.29 |
| <b><u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Δορυφορικές Τροχιές</u></b> .....σελ.31   |                                                   |        |
| 3.1                                                         | Γενικές Πληροφορίες περί Δορυφορικών Τροχιών..... | σελ.31 |
| 3.2                                                         | Στοιχεία Προσδιορισμού Τροχιάς.....               | σελ.33 |
| 3.3                                                         | Είδη και Χαρακτηρισμός Δορυφορικών Τροχιών.....   | σελ.36 |
| 3.3.1                                                       | Χαμηλή τροχιά της γης (LEO) .....                 | σελ.37 |
| 3.3.2                                                       | Μέση τροχιά της γης (MEO) .....                   | σελ.39 |
| 3.3.3                                                       | Γεωστατική τροχιά (GEO) .....                     | σελ.40 |
| 3.3.4                                                       | Υψηλή Ελλειπτική τροχιά της γης (HEO) .....       | σελ.42 |
| 3.3.5                                                       | Πολική τροχιά:.....                               | σελ.42 |
| 3.4                                                         | Λογισμικά Προσδιορισμού Τροχιακών Παραμέτρων..... | σελ.43 |
| <b><u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Κάλυψη</u></b> .....σελ.44                |                                                   |        |
| 4.1                                                         | Γενικά περί Δορυφορικής Κάλυψης.....              | σελ.44 |
| 4.2                                                         | Βασικά Στοιχεία και Εξισώσεις.....                | σελ.45 |
| <b><u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Προϋπολογισμός Ζεύξης</u></b> .....σελ.53 |                                                   |        |
| 5.1                                                         | Γενικά περί Link Budget.....                      | σελ.53 |
| 5.2                                                         | Απώλειες Ελευθέρου Χώρου.....                     | σελ.53 |
| 5.3                                                         | Ισχύς Λαμβανόμενου Σήματος.....                   | σελ.55 |
| 5.4                                                         | Ατμοσφαιρικές απώλειες.....                       | σελ.56 |
| 5.5                                                         | Ισχύς Θορύβου και SNIR.....                       | σελ.64 |
| <b><u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Κανάλια</u></b> .....σελ.68               |                                                   |        |
| 6.1                                                         | Γενικά περί Χαρακτηρισμού Καναλιών.....           | σελ.68 |
| 6.2                                                         | Κανάλι Στενής Ζώνης.....                          | σελ.70 |
| 6.2.1                                                       | Παράγοντας Απωλειών Διάδοσης.....                 | σελ.72 |
| 6.2.2                                                       | Απώλειες Σκίασης.....                             | σελ.74 |
| 6.2.3                                                       | Διαλείψεις Πολυδιαδρομικής Διάδοσης.....          | σελ.75 |
| 6.2.3.1                                                     | Rayleigh κατανομή: .....                          | σελ.75 |
| 6.2.3.2                                                     | Ricean κατανομή.....                              | σελ.76 |
| 6.2.4                                                       | Απώλεια-Διακοπή Σήματος.....                      | σελ.77 |

|       |                                                                      |
|-------|----------------------------------------------------------------------|
| 6.2.5 | Μικτές Συνθήκες Διάδοσης.....σελ.79                                  |
| 6.3   | Κανάλι Ευρείας Ζώνης.....σελ.80                                      |
| 6.4   | Τεχνικές Μετριασμού Απωλειών – Fade Mitigation Techniques.....σελ.81 |

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Δορυφορικοί Αστερισμοί.....σελ.83**

|       |                                                   |
|-------|---------------------------------------------------|
| 7.1   | Γενικά Περί Αστερισμών Χαμηλής Τροχιάς.....σελ.83 |
| 7.2   | Πληροφορίες Αστερισμών.....σελ.83                 |
| 7.2.1 | Starlink .....σελ.84                              |
| 7.2.2 | Kuiper.....σελ.84                                 |
| 7.2.3 | Telesat Lightspeed.....σελ.85                     |
| 7.2.4 | OneWeb.....σελ.85                                 |
| 7.2.5 | Iridium NEXT.....σελ.85                           |
| 7.2.6 | Globalstar.....σελ.86                             |
| 7.2.7 | Guowang.....σελ.86                                |
| 7.2.8 | O3B.....σελ.86                                    |

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Αποτελέσματα Υπολογισμών.....σελ.88**

|        |                                                                  |
|--------|------------------------------------------------------------------|
| 8.1    | Μεθοδολογίες και Δεδομένα.....σελ.88                             |
| 8.1.1  | Μέγιστες Αποστάσεις Δορυφόρων-Επίγειων Σταθμών.....σελ.88        |
| 8.1.2  | Απώλειες Ελευθέρου Χώρου .....σελ.89                             |
| 8.1.3  | Ισχύς Σήματος Λήψης.....σελ.91                                   |
| 8.1.4  | Περιοχές Κάλυψης.....σελ.92                                      |
| 8.1.5  | Απαιτούμενος Αριθμός Δορυφόρων.....σελ.93                        |
| 8.1.6  | Μέγιστη Φασματική Απόδοση.....σελ.94                             |
| 8.1.7  | Μέγιστος Ρυθμός Μετάδοσης.....σελ.94                             |
| 8.1.8  | Σχήματα Διαμόρφωσης.....σελ.95                                   |
| 8.1.9  | Μέγιστος Συνολικός Ρυθμός Μετάδοσης.....σελ.96                   |
| 8.1.10 | Διαγράμματα Ακτινοβολίας Κεραιών Φασικής Διάταξης .....σελ.97    |
| 8.2    | Αποτελέσματα Υπολογισμών.....σελ.97                              |
| 8.2.1  | Αποτελέσματα Υπολογισμών Μέγιστων Αποστάσεων.....σελ.98          |
| 8.2.2  | Αποτελέσματα Υπολογισμών Απωλειών Ελευθέρου Χώρου.....σελ.99     |
| 8.2.3  | Αποτελέσματα Υπολογισμών Ισχύος Λαμβανόμενου Σήματος.....σελ.101 |
| 8.2.4  | Αποτελέσματα Υπολογισμών Περιοχών Κάλυψης .....σελ.105           |
| 8.2.5  | Αποτελέσματα Ελάχιστου Αριθμού Δορυφόρων Κάλυψης.....σελ.107     |

|            |                                                                                 |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 8.2.6      | Αποτελέσματα Φασματικής Απόδοσης.....σελ.110                                    |
| 8.2.7      | Αποτελέσματα Υπολογισμού Μέγιστων Ρυθμών Μετάδοσης.....σελ.111                  |
| 8.2.8      | Αποτελέσματα Υπολογισμών Βέλτιστων Σχημάτων<br>Διαμόρφωσης.....σελ.111          |
| 8.2.9      | Αποτελέσματα Μέγιστων Συνολικών Ρυθμών Μετάδοσης.....σελ.112                    |
| 8.2.10     | Αποτελέσματα Διαγραμμάτων ακτινοβολίας Κεραιών Φασικής Διάταξης<br>.....σελ.113 |
| <b>8.3</b> | <b><u>Γενικό Συμπέρασμα</u></b> .....σελ.116                                    |
|            | <b><u>Βιβλιογραφία</u></b> .....σελ.118                                         |

## Πίνακας Συντμήσεων

| ΑΚΡΩΝΥΜΙΟ | ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ                                                           |
|-----------|---------------------------------------------------------------------|
| 3GPP      | 3rd Generation Partnership Project                                  |
| 5G        | 5th Generation                                                      |
| 6G        | 6th Generation                                                      |
| AOS       | Acquisition of Satellite                                            |
| AMSS      | Air Mobile Satellite Services                                       |
| ARIB      | Association of Radio Industries and Businesses                      |
| ATIS      | Alliance for Telecommunications Industry Solutions                  |
| BER       | Bit Error Ratio                                                     |
| BS        | Base Station                                                        |
| CCSA      | China Communications Standards Association                          |
| DTH       | Direct-to-Home                                                      |
| DSL       | Digital Subscriber Line                                             |
| DVB       | Digital Video Broadcasting                                          |
| DVB-S2    | Digital Video Broadcasting - Satellite - Second Generation          |
| DVB-S2X   | Digital Video Broadcasting - Satellite - Second Generation Extended |
| EE        | European Union (Ευρωπαϊκή Ένωση)                                    |
| ESA       | European Space Agency                                               |
| ETSI      | European Telecommunications Standards Institute                     |
| GAS       | Ground-Air-Station                                                  |
| GEO       | Geostationary Earth Orbit                                           |
| GNSS      | Global Navigation Satellite System                                  |
| GPS       | Global Positioning System                                           |
| GSO       | Geosynchronous Orbit                                                |
| HAP       | High Altitude Platforms                                             |
| HEO       | High Elliptical Orbit                                               |
| IEEE      | Institute of Electrical and Electronics Engineers                   |
| IoT       | Internet of Things                                                  |
| ISL       | Inter-Satellite Link                                                |
| ISS       | International Space Station                                         |
| ITU       | International Telecommunication Union                               |
| LEO       | Low Earth Orbit                                                     |
| LMSS      | Land Mobile Satellite Services                                      |
| LOS       | Loss of Satellite                                                   |
| LoS       | Line of Sight                                                       |
| MEC       | Mobile Edge Computing                                               |
| MEA       | Unmanned Aerial Vehicles (Μη Επανδρωμένα Αεροχήματα)                |
| MEO       | Medium Earth Orbit                                                  |
| MMSS      | Maritime Mobile Satellite Services                                  |
| MSS       | Mobile Satellite Services                                           |
| NTN       | Non-Terrestrial Network                                             |
| QoS       | Quality of Service                                                  |
| RTT       | Round-Trip Time                                                     |



|       |                                                         |
|-------|---------------------------------------------------------|
| SSO   | Sun-Synchronous Orbit                                   |
| SSA   | Space Situational Awareness                             |
| SST   | Space Surveillance and Tracking                         |
| TCP   | Transmission Control Protocol                           |
| TSDSI | Telecommunications Standards Development Society, India |
| TTA   | Telecommunications Technology Association               |
| TTC   | Telecommunication Technology Committee                  |
| UAV   | Unmanned Air Vehicle                                    |
| UHD   | Ultra High Definition                                   |
| UE    | User End                                                |
| VSAT  | Very Small Aperture Terminal                            |

## Ευρετήριο Εικόνων-Σχημάτων

- Σχήμα 1. Ελλειψοειδής Δορυφορική Τροχιά [16], σελ.32
- Σχήμα 2. Ελλειψοειδής Δορυφορική Τροχιά [16], σελ.32
- Σχήμα 3. Άξονες Ελλειψοειδούς Δορυφορικής Τροχιάς [16], σελ. 34
- Σχήμα 4. Στοιχεία Προσδιορισμού επί Δορυφορικής Τροχιάς [16], σελ.35
- Σχήμα 5. Βασική Γεωμετρία Επίγειου Σταθμού-Δορυφόρου [20],σελ.47
- Σχήμα 6. Βασική Γεωμετρία Περιοχής Κάλυψης Δορυφόρου [17], σελ.48
- Σχήμα 7. Βασική Γεωμετρία Επιπέδου Ορίζοντα Παρατηρητή [20], σελ.50
- Σχήμα 8. Συνολική απόσβεση λόγω αερίων συναρτήσει συχνότητας για γωνίες ανύψωσης από 5° έως 3°  
Τοποθεσία, Washington DC [16], σελ.58
- Σχήμα 9. Διάγραμμα Ειδικής Απόσβεσης από το Οξυγόνο και τους Υδρατμούς Συναρτήσει Συχνότητας [33], σελ. 59
- Σχήμα 10. Διάγραμμα Πιθανότητας Υπέρβασης συναρτήσει Εξασθένησης λόγω Σύννεφων, Αθήνα  
Ελλάδα, κατερχόμενη Ζεύξη , Hellas Sat (39° E)[34], σελ. 60
- Σχήμα 11. Διάγραμμα Πιθανότητας Υπέρβασης συναρτήσει Εξασθένησης λόγω Βροχής, Αθήνα Ελλάδα,  
κατερχόμενη Ζεύξη , Hellas Sat (39° E)[34], σελ. 61
- Σχήμα 12. Διάγραμμα Συσχέτισης Μηχανισμών Απωλειών Διάδοσης[16], σελ. 64
- Σχήμα 13. Διάγραμμα Ισοδύναμης Θερμοκρασίας Θορύβου συναρτήσει Συχνότητας[35],σελ. 66
- Σχήμα 14. Διάγραμμα Ισχύος Σήματος Λήψης συναρτήσει του Χρόνου για Κανάλι Κινητού Χρήστη Στενής  
Ζώνης Αποσβέσεων [16], σελ. 71
- Σχήμα 15. Απεικόνιση Περιβάλλοντος Απώλειας Σήματος [36], σελ.78
- Σχήμα 16. Απεικόνιση Σεναρίου Απώλειας Σήματος [36], σελ. 79
- Σχήμα 17. Διάγραμμα Μήκους Μονοπατιού συναρτήσει Δορ.. Υψομέτρου, σελ. 98
- Σχήμα 18. Διάγραμμα Μήκους Μονοπατιού συναρτήσει Γων. Ανύψωσης, σελ. 98
- Σχήμα 19.Μήκη Μονοπατιών Αστερισμών, σελ. 99
- Σχήμα 20.FSPL για Δορ. Μπάντες Συχνοτήτων, σελ. 100
- Σχήμα 21.Αποτελέσματα FSPL για ονομαστικό υψόμετρο τροχιών σελ. 100
- Σχήμα 22.Αποτελέσματα FSPL για μέγιστο μήκος μονοπατιού (maximum slant path) σελ. 101
- Σχήμα 23.Αποτελέσματα Λαμβανόμενης Ισχύος Κατερχόμενων Ζεύξεων ανά Μπάντα Συχνοτήτων  
σελ.102
- Σχήμα 24.Αποτελέσματα Λαμβανόμενης Ισχύος Ανερχόμενων Ζεύξεων ανά Μπάντα Συχνοτήτων  
σελ.102

- Σχήμα 25.Αποτελέσματα Λαμβανόμενης Ισχύος (dB) Κατερχόμενων Ζεύξεων ανά Μπάντα Συχνοτήτων  
σελ. 102
- Σχήμα 26.Αποτελέσματα Λαμβανόμενης Ισχύος (dB)Ανερχόμενων Ζεύξεων ανά Μπάντα Συχνοτήτων  
σελ. 103
- Σχήμα 27.Αποτελέσματα Λαμβανόμενης Ισχύος για κατερχόμενες ζεύξεις των Αστερισμών σελ. 104
- Σχήμα 28.Λαμβανόμενη Ισχύς συναρτήσει Υψομέτρου και Γωνίας Ανύψωσης σελ. 104
- Σχήμα 29.Διάγραμμα Περιοχής Κάλυψης συναρτήσει Δορ. Υψομέτρου σελ. 106
- Σχήμα 30.Διάγραμμα Περιοχής Κάλυψης συναρτήσει Γωνίας Ανύψωσης σελ. 106
- Σχήμα 31. Περιοχή Κάλυψη ανά Αστερισμό σελ. 107
- Σχήμα 32.Αριθμός Δορυφόρων Συναρτήσει Υψομέτρου σελ. 108
- Σχήμα 33.Αριθμός Δορυφόρων Συναρτήσει Γων. Ανύψωσης σελ. 108
- Σχήμα 34.Αριθμός Δορυφόρων Συναρτήσει Παράγοντα Επικάλυψης σελ. 109
- Σχήμα 35.Απεικόνιση Ελάχιστου Αριθμού δορυφόρων ανά Αστερισμό σελ. 109
- Σχήμα 36. Απεικόνιση Φασματικών Αποδόσεων ανά Αστερισμό σελ. 110
- Σχήμα 37. Απεικόνιση Μέγιστων Ρυθμών Μετάδοσης Αστερισμών σελ. 111
- Σχήμα 38.Αποτελέσματα Συνολικού Αριθμού Μετάδοσης Αστερισμών σελ. 113
- Σχήμα 39. 1ο Διάγραμμα Ακτινοβολίας Κεραίας για διαφορετικό  $d$  σελ. 113
- Σχήμα 40. 2ο Διάγραμμα Ακτινοβολίας Κεραίας για διαφορετικό  $d$  σελ. 114
- Σχήμα 41. Διάγραμμα Ακτινοβολίας Κεραίας για διαφορετικά  $N$  σελ. 114
- Σχήμα 42. Διαγράμματα Ακτινοβολίας Κεραίας για  $N=25,50,100,200$  σελ. 115
- Σχήμα 43. Διαγράμματα Ακτινοβολίας Κεραίας για  $N=400,800$  σελ. 116

## Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1.Γενική Τεχνική Σύγκριση Μεταξύ Επίγειων και Μη Επίγειων Δικτύων Τροποποιημένος από [2], σελ.11

Πίνακας 2.Γενική Σύγκριση Μεταξύ Επίγειου/Εναέριου/Διαστημικού MEC Τροποποιημένος από [2],σελ.12

Πίνακας 3.Ενδεικτικά Παραδείγματα Μικρών Δορυφόρων, σελ.16

Πίνακας 4.Τροχιακές Περίοδοι και Υψόμετρα Τροποποιημένο από[16],σελ. 45

Πίνακας 5. Βασικές Παράμετροι Εξεταζόμενων Δορυφόρων [20], σελ.51

Πίνακας 6. Προσαρμοσμένος από ITU-R.P/618-11,Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών,Γενεύη,2013, σελ. 57

Πίνακας 7. ITU Μοντέλα Ατμοσφαιρικών Απωλειών - Προσαρμοσμένος από [34], σελ. 63

Πίνακας 8.Δεδομένα 1<sup>ο</sup> Υπολογισμού σελ. 89

Πίνακας 9.Δεδομένα 2<sup>ο</sup> Υπολογισμού σελ. 90

Πίνακας 10.Δεδομένα 3<sup>ο</sup> Υπολογισμού σελ. 91

Πίνακας 11.Δεδομένα 4<sup>ο</sup> Υπολογισμού σελ. 93

Πίνακας 12.Δεδομένα 6<sup>ο</sup> Υπολογισμού σελ. 94

Πίνακας 13.Δεδομένα 7<sup>ο</sup> Υπολογισμού σελ. 95

Πίνακας 14.Δεδομένα 8<sup>ο</sup> Υπολογισμού σελ. 95

Πίνακας 15.Δεδομένα 9<sup>ο</sup> Υπολογισμού σελ. 96

Πίνακας 16. Αποτελέσματα Σχημάτων Διαμόρφωσης Αστερισμών σελ. 111

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή στα Μη Επίγεια Δίκτυα**

### **1.1 Σκοπός Εργασίας**

Σύμφωνα με τον επίσημο ορισμό του 3rd Generation Partnership Project-3GPP [1] τα Μη Επίγεια Δίκτυα (Non-Terrestrial Networks- NTN) αποτελούνται μερικώς ή εξολοκλήρου από διαστημικά οχήματα όπως δορυφόροι, ή εναέρια οχήματα όπως πλατφόρμες μεγάλου υψομέτρου (High Altitude Platforms-HAPs) και μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (Unmanned Air Vehicles-UAVs). Ως γνωστόν τα NTN μέχρι και πρόσφατα είχαν περιορισμένη χρήση και χρησιμοποιούνταν για συγκεκριμένες εφαρμογές όπως η ύπαρξη διαύλου επικοινωνιών σε περιπτώσεις διαχείρισης κρίσεων και καταστροφών, η πλοήγηση, η ευρυεκπομπή τηλεόρασης και η τηλεπισκόπηση (remote sensing). Ωστόσο οι σύγχρονες τεχνολογικές εξελίξεις στους τομείς του αεροδιαστήματος, η ραγδαία αύξηση των υπολογιστικών δυνατοτήτων των μηχανημάτων, η επίτευξη χαμηλότερου κόστους κατασκευής και εκτόξευσης δορυφόρων, μικροδορυφόρων και UAVs, όσο και η κατακόρυφη αύξηση των αναγκών των χρηστών για επικοινωνίες οι οποίες επιτρέπουν την γρήγορη, ασφαλή και αδιάλειπτη μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων, έχουν οδηγήσει στην ολοένα και αυξανόμενη χρήση των NTN, παράλληλα με την ανάπτυξη των 5G δικτύων. Ειδικότερα, τα δίκτυα αυτά και ο συνδυασμός αυτών με τα ευρέως χρησιμοποιούμενα έως τώρα TN, αναμένεται να παίξουν πρωταγωνιστικό ρόλο στην ανάπτυξη των beyond 5G δικτύων και στην ανάπτυξη του 6G οικοσυστήματος τηλεπικοινωνιών στο μέλλον.

Τα παραπάνω έχουν οδηγήσει στην ευρεία χρήση δορυφορικών αστερισμών που κάνουν χρήση διαφορετικών τροχιών, με αποτέλεσμα την σήμερα ημέρα να υπολογίζεται ότι πάνω από 9000 δορυφόροι βρίσκονται σε τροχιά, με την συντριπτική πλειονότητα αυτών να βρίσκεται σε χαμηλά υψόμετρα (LEO) καλύπτοντας πάνω από το 80% του συνολικού αριθμού. Στο πλαίσιο αυτό, σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η μελέτη και παρουσίαση των απαραίτητων εννοιών σχετικά με βασικά χαρακτηριστικά σύγχρονων συστημάτων επικοινωνιών βασισμένων σε NTN, τα οποία όπως αναφέρθηκε προηγουμένως κατά κύριο λόγο βασίζονται σε LEO δορυφόρους. Επιπλέον, γίνεται ανάλυση βασικών εννοιών όπως το δορυφορικό φάσμα και οι δορυφορικές τροχιές. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται επίσης στην παρεχόμενη κάλυψη από τους δορυφόρους, στον προϋπολογισμό ζεύξης και στον χαρακτηρισμό των δορυφορικών καναλιών. Τέλος γίνεται υλοποίηση κάποιων εξισώσεων που αφορούν βασικά χαρακτηριστικά σχεδίασης επικοινωνιών LEO συστημάτων, βάσει δεδομένων και παραμέτρων γνωστών LEO αστερισμών.

### **1.2 Πλεονεκτήματα και εφαρμογές NTN**

Το βασικότερο πλεονέκτημα των NTN προέρχεται από την εγγενή αδυναμία των TN να παρέχουν δυνατότητα επικοινωνίας σε περιοχές οι οποίες είτε είναι δυσπρόσιτες όπως ορεινές και δασικές περιοχές, έρημοι και ωκεανοί, είτε έχουν πληγεί από κάποια φυσική καταστροφή ή ανθρώπινη παρέμβαση, είτε απλά το εγχείρημα ανάπτυξης αυτού του είδους των δικτύων είναι οικονομικά ασύμφορο, λόγω ύπαρξης περιορισμένου αριθμού χρηστών και παράλληλα υψηλού κόστους κατασκευής και συντήρησης. Έτσι τα NTN πολλές φορές αποτελούν την βέλτιστη λύση, πόσο μάλλον δε όταν αυτά χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τα TN για την αύξηση των δυνατοτήτων αυτών και την επίτευξη επεκτασιμότητας αλλά και αξιοπιστίας. Μάλιστα με τον παραπάνω τρόπο, εκτός από την ευελιξία του συστήματος, μπορούν να σημειωθούν και σημαντικές βελτιώσεις όσον αφορά την κάλυψη του εκάστοτε δικτύου, την χωρητικότητα διαύλου, την μείωση της καθυστέρησης αποστολής και λήψης δεδομένων και την αύξηση της ποιότητας υπηρεσιών (Quality of Service-QoS) γενικότερα.

Ενδεικτικά παρουσιάζεται πίνακας του [2] στον οποίο γίνεται μία σύντομη σύγκριση ορισμένων χαρακτηριστικών μεταξύ TNs και NTNs:

| Τεχνικό Χαρακτηριστικό             | Επίγεια Δίκτυα                                                    | Μη Επίγεια Δίκτυα                                                        |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| <b>Κάλυψη στη Γη</b>               | Έως 100 χλμ                                                       | Έως 3500 χλμ (δορυφόρος GEO)                                             |
| <b>Καθυστέρηση Διάδοσης</b>        | Έως 0.67 ms (κυψέλη 100 χλμ)                                      | Έως 540 ms (δορυφόρος GEO με διαφανές ωφέλιμο φορτίο)                    |
| <b>Απώλειες Διαδρομής Διάδοσης</b> | $\approx 138$ dB (κυψέλη 100 χλμ & 2 GHz fc)                      | $\approx 190$ dB (δορυφόρος GEO & 2 GHz fc)                              |
| <b>Μετατόπιση Doppler</b>          | $\approx 1$ KHz (τρένο υψηλής ταχύτητας & 2 GHz fc)               | $\approx 48$ KHz (δορυφόρος LEO σε τροχιακό υψόμετρο 600 χλμ & 2 GHz fc) |
| <b>Διαδικασίες Μεταγωγής</b>       | Προκαλούνται όταν οι χρήστες μετακινούνται από μία κυψέλη σε άλλη | Περιοδικές μεταβιβάσεις λόγω της κίνησης του δορυφόρου NGSO              |
| <b>Ανάπτυξη Δικτύου</b>            | Μακροχρόνια ανάπτυξη                                              | Προσωρινή ή μακροχρόνια ανάπτυξη ανάλογα με την πλατφόρμα NTN            |

**Πίνακας 1. Γενική Τεχνική Σύγκριση Μεταξύ επίγειων και Μη Επίγειων Δικτύων**  
**Τροποποιημένος από [2]**

Μία ακόμα χρησιμότητα των NTN δικτύων είναι η εξασφάλιση συνδεσιμότητας μεταξύ συσκευών Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT-Internet of Things) είτε κάνοντας χρήση UAVs για την παροχή ευέλικτων και γρήγορων λύσεων αλλά παράλληλα περιορισμένων δυνατοτήτων και για μικρό χρονικό διάστημα, σε περιοχές με έλλειψη επίγειου δικτύου, είτε κάνοντας χρήση δορυφόρων οι οποίοι έχουν πολύ μεγαλύτερες δυνατότητες κάλυψης. Μάλιστα, οι περιπτώσεις οι οποίες μελετώνται ως επί το πλείστον αφορούν τη χρήση δορυφόρου ο οποίος παρέχει απευθείας σύνδεση σε επίγειους IoT

χρήστες . Σύμφωνα με την [3] ανάλογα με το μέγεθος της περιοχής ανάπτυξης του NTN δικτύου μπορούμε να έχουμε υπηρεσίες ευρείας περιοχής (wide area) που αφορούν πολλούς διασυνδεδεμένους δορυφόρους που παρέχουν σύνδεση σε IoT συσκευές και τοπικής περιοχής (local area) που αφορούν την ύπαρξη ενός δορυφόρου ο οποίος εξυπηρετεί συγκεκριμένες συσκευές σε εφαρμογές, όπως τα έξυπνα δίκτυα (smart grids).

Μια επιπλέον χρήσιμη εφαρμογή των NTN είναι σε συνδυασμό με τον Κινητό Υπολογισμό στα Άκρα (Mobile Edge Computing-MEC) καθώς μπορεί να προσφέρει πολλά οφέλη, ειδικά για στις συσκευές – κόμβους των δικτύων με περιορισμένους πόρους υπολογισμών, επεξεργασίας ή αποθήκευσης, είτε αυτοί βρίσκονται στο έδαφος είτε στον αέρα. Για NTN, και ειδικότερα για εναέρια δίκτυα, η χρήση του MEC είναι πολλά υποσχόμενη αφού μπορεί να ξεπεράσει τους περιορισμούς που επιβάλλει σε διαφορετική περίπτωση η πραγματοποίηση των επί του σκάφους υπολογισμών (onboard computations) στα UAVs και γενικά στους τελικούς χρήστες (User Ends-UE) και με αυτόν τον τρόπο συντελεί στην αύξηση της λειτουργικότητά τους και της διάρκειας ζωής τους, μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο τα UAVs και οι UE έχουν τη δυνατότητα χρησιμοποίησης των επίγειων ή διαστημικών MEC εξυπηρετητών για την εκφόρτωση βαριών διεργασιών (offloading heavy tasks). Παρόλο που σε αντίθεση με το TN MEC, η εκφόρτωση στο δορυφορικό MEC μπορεί να έχει μεγαλύτερη καθυστέρηση, αυτό αποδεικνύεται πολύ χρήσιμο σε εφαρμογές όπου το TN δεν είναι προσβάσιμο. Παρ' όλ' αυτά η χρήση δορυφορικού MEC οδηγεί σε αρχιτεκτονικές μεγάλης πολυπλοκότητας και συνεπώς αυξημένο κόστος, ενώ παράλληλα σημαντική πρόκληση αποτελεί η έγκαιρη συντήρηση των δορυφορικών εξυπηρετητών . Τέλος, οι λειτουργίες MEC σε ένα NTN δίκτυο μπορούν επίσης να ενισχυθούν με τη χρήση UAVs για ευέλικτη ανάπτυξη σε πολύπλοκα εδάφη ή ερήμους όπου δεν υπάρχει ένα αντίστοιχο TN MEC, ωστόσο η δυσκολία σε αυτή την περίπτωση έγκειται στη περιορισμένη χωρητικότητα ωφέλιμου φορτίου (payload capacity) καθώς και στην κατανάλωση ενέργειας των UAVs.

Ακολουθεί ενδεικτικός Πίνακας του [2] στον οποίο παρουσιάζονται διάφορα θέματα της ενσωμάτωσης των NTN δικτύων στο MEC:

| Πτυχή                                   | Επίγειο MEC | Εναέριο MEC | Διαστημικό MEC |
|-----------------------------------------|-------------|-------------|----------------|
| <b>Υπολογιστική Ικανότητα</b>           | Υψηλή       | Χαμηλή      | Μεσαία         |
| <b>Ρυθμιστικές Αντιξοότητες-Εμπόδια</b> | Χαμηλά      | Υψηλά       | Μέτρια         |

|                                                        |                                    |                                                                              |                                                        |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| <b>Κύριο Πλεονέκτημα</b>                               | Χαμηλή καθυστέρηση                 | Ευέλικτη ανάπτυξη<br>κατ' απαίτηση                                           | Εκτεταμένη παρουσία σε<br>απομακρυσμένες<br>τοποθεσίες |
| <b>Ανασταλτικοί<br/>Παράγοντες-<br/>Περιορισμοί</b>    | Ενσωμάτωση με<br>υπάρχουσα υποδομή | Περιορισμένη<br>χωρητικότητα<br>ωφέλιμου φορτίου και<br>κατανάλωση ενέργειας | Κατανάλωση ενέργειας και<br>υψηλό κόστος               |
| <b>Πολυπλοκότητα<br/>Αρχιτεκτονικής και<br/>Κόστος</b> | Μέτρια                             | Χαμηλά                                                                       | Υψηλά                                                  |

**Πίνακας 2. Γενική Σύγκριση Μεταξύ Επίγειου/Εναέριου/Διαστημικού MEC**

**Τροποποιημένος από [2]**

Για τους λόγους που προαναφέρθηκαν η ανάπτυξη NTNs και GAS (ground- air -space) εναέριων-επίγειων-δορυφορικών (Ground- Air- Space - GAS) δικτύων καθώς και η ενσωμάτωση πρόσβασης στα 5G δίκτυα μέσω UAVs και δορυφόρων αποτελεί αντικείμενο σύγχρονων μελετών ,τόσο ακαδημαϊκών ιδρυμάτων όσο και διεθνών οργανισμών τηλεπικοινωνιών και προτυποποίησης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο IEEE ή το 3GPP (3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project) το οποίο ενώνει επτά οργανισμούς ανάπτυξης προτύπων τηλεπικοινωνιών (ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TSDSI, TTA, TTC), γνωστοί και ως “Organizational Partners” και των οποίων οι προδιαγραφές καλύπτουν τεχνολογίες κυψελωτών τηλεπικοινωνιών, πρόσβασης στο ραδιοφάσμα, δικτύων κορμού και δυνατοτήτων υπηρεσιών, παρέχοντας μία πλήρη συστημική περιγραφή για τις κινητές τηλεπικοινωνίες.

### **1.3 Ενσωμάτωση Δορυφόρων σε NTN δίκτυα**

Ως γνωστόν τα NTNs και τα GAS δίκτυα αποτελούν πολύ σημαντικά αντικείμενα ερευνών την σήμερον ημέρα λόγω του ότι μπορούν να εξασφαλίσουν την ύπαρξη συνδεσιμότητας και την παροχή επικοινωνίας σε μεμακρυσμένες ή δυσπρόσιτες περιοχές, καθώς και σε περιοχές οι οποίες θα απαιτούσαν τεράστια χρηματικά ποσά για την εγκατάσταση επίγειων δικτύων, το μεγαλύτερο μέρος των οποίων θα αφορούσε εργασίες διάνοιξης τάφρων και εργασίες πολιτικών μηχανικών γενικότερα. Με τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι η χρησιμότητα των NTN δικτύων είναι ολοένα και αυξανόμενη πλέον, γεγονός το οποίο οδηγεί στην επιτακτική ανάγκη ενσωμάτωσής τους στα ήδη υπάρχοντα TNs. Η ενσωμάτωση αυτή μπορεί να γίνει είτε στο φυσικό επίπεδο, είτε στο επίπεδο δικτύου. Στη μεν πρώτη περίπτωση το NTN σύστημα χρησιμοποιεί την ίδια τεχνολογία πρόσβασης στο ραδιοφάσμα με το υπόλοιπο επίγειο δίκτυο [1],[2],[5] στη δε δεύτερη καθίσταται δυνατή η χρήση διαφορετικών τεχνολογιών πχ επικοινωνία DVB δορυφορικού δικτύου με ένα επίγειο 3GPP δίκτυο και ανάλογα με τη τοποθέτηση και χρήση του NTN συστήματος διακρίνονται οι παρακάτω **αρχιτεκτονικές** [2]:



- α) NT πλατφόρμα ως τελικός χρήστης (κυρίως UAVs)
- β) NT πλατφόρμα ως κόμβος αναμετάδοσης, είτε μεταξύ σταθμού βάσης και δικτύου κορμού, είτε μεταξύ σταθμού βάσης και τελικών χρηστών.
- γ) NT πλατφόρμα ως σταθμός βάσης, όπου σε αυτή την περίπτωση θα ενσωματώνεται αντίστοιχη τεχνολογία επεξεργασίας δεδομένων
- δ) Μεικτές αρχιτεκτονικές

Την σημερινή εποχή υπολογίζεται ότι περίπου 9000 δορυφόροι βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τη Γη, αριθμός ο οποίος αναμένεται να φτάσει τις 50.000 στα επόμενα 10 χρόνια χάρη στην ραγδαία τεχνολογική εξέλιξη. Ωστόσο, η ανάπτυξη και επίτευξη αυτού του είδους των δικτύων απαιτεί έρευνες και μελέτες σχετικά με την τεχνολογία που θα ενσωματώνουν οι πομποί και οι δέκτες, την βέλτιστη διαμόρφωση σήματος, τη παραμόρφωση που αυτό θα υφίσταται κατά τη μετάδοσή του στον διάυλο, αλγορίθμους και πρωτόκολλα δρομολόγησης των πακέτων δεδομένων μεταξύ κόμβων στο εκάστοτε δίκτυο, αλγορίθμους διαδικασιών μεταγωγής (handovers) για αδιάλειπτη επικοινωνία των UE με τους σταθμούς βάσης (Base Stations-BS) και τους ενδιάμεσους κόμβους, την κάλυψη που θα προσφέρει ο εκάστοτε κόμβος του δικτύου στην περιοχή ζήτησης, τον αριθμό απαιτούμενων κόμβων για την επίτευξη ζεύξης σε μεμακρυσμένα σημεία και του επιθυμητού ποσοστού κάλυψης, την εκφόρτωση δεδομένων (data offloading) και άλλα πολλά ανεξερευνήτα ακόμα πεδία.

Όσον αφορά το **είδος των δορυφόρων** που χρησιμοποιούνται ως κόμβοι NTN δικτύων, αυτοί χωρίζονται σε **3 κατηγορίες ανάλογα με το υψόμετρο** στο οποίο βρίσκονται, με την πρώτη να είναι οι Γεωστατικοί Δορυφόροι (Geostationary Earth Orbit-GEO) σε υψόμετρο 35.000 km από την επιφάνεια της Γης και οι Μη Γεωστατικοί (Non-Geostationary) οι οποίοι χωρίζονται με τη σειρά τους σε Μέσης Τροχιάς (Medium Earth Orbit- MEO) και Χαμηλής Τροχιάς (Low Earth Orbit- LEO) δορυφόρους. Οι Γεωστατικοί Δορυφόροι (GEO) ονομάζονται έτσι λόγω του ότι φαίνονται να είναι σταθεροί πάνω από ένα συγκεκριμένο σημείο της Γης, γεγονός το οποίο οφείλεται στο ότι έχουν την ίδια ταχύτητα περιστροφής με αυτήν. Αντιθέτως οι MEO και LEO δορυφόροι έχουν μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής γύρω από την Γη, γεγονός το οποίο οφείλεται στο ότι βρίσκονται σε μικρότερα υψόμετρα από την επιφάνεια αυτής (7.000 -25.000 Km για MEO και 300-1.500 km για LEO) με αποτέλεσμα να ασκούνται σε αυτούς μεγαλύτερες βαρυτικές δυνάμεις. Ωστόσο οι δυνάμεις αυτές αντισταθμίζονται από τις μεγαλύτερες φυγόκεντρες δυνάμεις που αναπτύσσονται λόγω των υψηλών ταχυτήτων περιστροφής των δορυφόρων γύρω από το κέντρο της Γης. Αυτό φυσικά έχει ως αποτέλεσμα να φαίνονται ως ταχέως κινούμενα αντικείμενα από την πλευρά των επίγειων χρηστών και καθιστούν επιτακτική την ανάγκη πιο γρήγορων και συχνών διαδικασιών μεταγωγής (handovers) της ζεύξης μεταξύ τους. Φυσικά στο τελευταίο, εκτός από τη σχετική ταχύτητα κίνησης μεταξύ των δορυφόρων και των χρηστών, σημαντικό ρόλο παίζει και το υψόμετρο, το οποίο λόγω γεωμετρίας επηρεάζει το μέγεθος της περιοχής κάλυψης που παρέχει κάθε δορυφόρος [6] με τους GEO δορυφόρους να έχουν τη μέγιστη περιοχή κάλυψης και τους LEO την ελάχιστη. Από την άλλη πλευρά η airborne κατηγορία περιλαμβάνει UAS(unmanned

aircraft system) πλατφόρμες με τις πιο γνωστές κατηγορίες να αποτελούν οι πλατφόρμες μεγάλων υψομέτρων-(High Altitude Platforms- HAPs) που χρησιμοποιούνται σε υψόμετρο 20 km και UAVs σε υψόμετρα μερικών εκατοντάδων μέτρων.

Επιπρόσθετα, εκτός από την χρήση δορυφόρων σε διαφορετικά υψόμετρα, τα NTN μπορούν να αναπτύξουν ένα μείγμα δορυφόρων διαφορετικού μεγέθους στους αστερισμούς τους για να επιτύχουν τους επιχειρησιακούς τους στόχους, αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα κάθε κατηγορίας με βάση τις συγκεκριμένες απαιτήσεις του εκάστοτε δικτύου. Έτσι λοιπόν οι δορυφόροι που χρησιμοποιούνται σε μη επίγεια δίκτυα μπορεί να ποικίλλουν **σε μέγεθος** ανάλογα με την αποστολή τους και μπορούν να ταξινομηθούν βάσει αυτού στις ακόλουθες **κατηγορίες**:

α) Μακροδορυφόροι: γνωστοί και ως μεγάλοι δορυφόροι, είναι συνήθως οι μεγαλύτεροι σε μέγεθος και βάρος καθώς μπορούν να ζυγίζουν από 500 kg έως αρκετούς τόνους και να έχουν σημαντικές διαστάσεις. Οι μακροδορυφόροι χρησιμοποιούνται συχνά για επικοινωνία υψηλής χωρητικότητας, ευρυεκπομπή και άλλες εφαρμογές με μεγάλες απαιτήσεις δεδομένων σε NTN. Μπορεί να φιλοξενούν τεχνολογικά προηγμένα ωφέλιμα φορτία επικοινωνίας και εξελιγμένο εξοπλισμό για επεξεργασία σήματος και διαχείριση δεδομένων.

β) Μικροδορυφόροι: ονομάζονται επίσης νανοδορυφόροι ή μικροί δορυφόροι και χαρακτηρίζονται από το μικρό τους μέγεθος και μάζα. Γενικά κυμαίνονται από μερικά κιλά έως το πολύ 500 κιλά και χρησιμοποιούνται συνήθως σε NTN για την εκτέλεση διαφόρων εργασιών όπως η παρατήρηση της γης, η επιστημονική έρευνα και η επικοινωνία. Συχνά αξιοποιούν μικροσκοπικά εξαρτήματα και καινοτόμες τεχνολογίες για να επιτύχουν τους στόχους τους.

γ) Κυβοειδείς Δορυφόροι- CubeSats: Οι CubeSats είναι μια συγκεκριμένη κατηγορία μικροδορυφόρων που συμμορφώνονται με έναν συγκεκριμένο πρότυπο κατασκευής αφού κατασκευάζονται από μικρές μονάδες σε σχήμα κύβου που ονομάζονται "U" (μονάδα) ή "μονάδες CubeSat". Μια τυπική μονάδα CubeSat έχει διαστάσεις 10 cm x 10 cm x 10 cm, αλλά μπορούν να δημιουργηθούν μεγαλύτεροι CubeSats συνδυάζοντας πολλαπλές μονάδες. Τα CubeSats αναπτύσσονται συχνά σε NTN για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένης της παρατήρησης της Γης, των πειραμάτων τεχνολογίας, των εκπαιδευτικών έργων και των πειραμάτων επικοινωνίας.

δ) Pico Δορυφόροι: Οι δορυφόροι Pico είναι ακόμη μικρότεροι από τους μικροδορυφόρους και συνήθως ζυγίζουν λιγότερο από 1 κιλό. Αυτοί οι μικροσκοπικοί δορυφόροι χρησιμοποιούνται συχνά για επιστημονική έρευνα, δοκιμές τεχνολογίας και εκπαιδευτικούς σκοπούς σε NTN. Οι δορυφόροι Pico μπορεί να έχουν περιορισμένες δυνατότητες λόγω των περιορισμών μεγέθους και μάζας τους, αλλά παρέχουν ένα οικονομικά αποδοτικό μέσο για τη διεξαγωγή πειραμάτων και αποστολών στο διάστημα.

Μάλιστα η πρόοδος στη μικροηλεκτρονική, στα σύνθετα υλικά, στα εμπορικά διαθέσιμα ηλεκτρονικά, όπως και η προσφορά πολλών νέων διαστημικών φορέων όπως της SpaceX/Falcon-9, έχει ως αποτέλεσμα οι μικροί δορυφόροι να αποτελούν πλέον χρήσιμο και σημαντικό εργαλείο για την σχεδίαση και εκπλήρωση διαστημικών αποστολών σε σύντομο χρονικό διάστημα (< 24 μήνες) και με αρκετά χαμηλότερο κόστους σε σχέση με συμβατικούς και μεγαλύτερους δορυφόρους (σε μάζα, όγκο και πολυπλοκότητα). Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των μικρών δορυφόρων είναι το χαμηλό κόστος εκτόξευσης σε σχέση με τους συμβατικούς, αφού χαρακτηριστικά το κόστος εκτόξευσης για την περίπτωση του Falcon 9 της Space X ήταν μερικές χιλιάδες ευρώ ανά kg, ενώ πλέον η τακτική και συχνή πρόσβαση στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό (International Space Station- ISS) αλλά και η αύξηση του ρυθμού εκτοξεύσεων έχει μειώσει το κόστος εκτόξευσης το οποίο για την περίπτωση των μικροδορυφόρων ανέρχεται στις 15.000 ευρώ ανά κιλό. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα ορισμένες ανεξάρτητες μελέτες να καταλήγουν στο ότι η αναλογία επιστροφής επένδυσης στην τεχνολογία και αποστολές μικρών δορυφόρων είναι 1 προς 10, η υψηλότερη στον τομέα του διαστήματος.

| Μέγεθος/Πλατφόρμα               | Νανοδορυφόρος                      | Μικροδορυφόρος                           | Μινιδορυφόρος                            |
|---------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
| <b>Μάζα (kg)</b>                | 3-20                               | 20-100                                   | 100-350                                  |
| <b>Αισθητήρες</b>               | Optical (Pan/Multi, Hyperspectral) | Optical, Multi, Hyperspectral, IR, Radar | Optical, Multi, Hyperspectral, IR, Radar |
| <b>Διακριτική Ικανότητα (m)</b> | 1-3 m @ 400 km                     | 0.5-10 m @ 450 km                        | 0.3-10 m @ 450-500 km                    |
| <b>Προώθηση</b>                 | Cold gas, Resistojet               | Cold gas, Resistojet, electric           | Cold gas, Resistojet, electric           |
| <b>Διαστάσεις (cm)</b>          | 10 x 10 x 30                       | 40 x 40 x 30                             | 80 x 40 x 40                             |
| <b>RF (Συχνότητες)</b>          | S/X/VHF/UHF                        | S/X/VHF/UHF/Ka                           | S/X/VHF/UHF/Ka                           |
| <b>Payload (kg)</b>             | 1-10                               | 5-40                                     | 40-130                                   |
| <b>Ενδεικτικό Κόστος (EM)</b>   | 0.3-1                              | 1-10                                     | 10-50                                    |

**Πίνακας 3. Ενδεικτικά Παραδείγματα Μικρών Δορυφόρων**

Στη χώρα μας παρουσιάζεται τα τελευταία χρόνια έντονο ενδιαφέρον για τη διαμόρφωση πλαισίου υλοποίησης ενός Εθνικού προγράμματος Δορυφόρων το οποίο δύναται να έχει επιπτώσεις και να υποστηρίξει πολλαπλές πολιτικές και στρατηγικές σε πολλούς διαφορετικούς τομείς εφαρμογών, καθώς και την ενιαία και αναζητούμενη από τη χώρα πολιτική ανάπτυξης των ιδίων δυνατοτήτων και αντίστοιχων πολλαπλασιαστών ισχύος. Ορισμένες εφαρμογές οι οποίες ευνοούνται από την υλοποίηση ενός τέτοιου προγράμματος είναι:

- α) Υπηρεσίες υποστήριξης ενεργειών διαχείρισης Κρίσεων και Φυσικών Καταστροφών

- β) Υπηρεσίες υποστήριξης Γεωργικού τομέα
- γ) Ενίσχυση της ικανότητας της Ελλάδας να διαχειρίζεται πυρκαγιές
- δ) Μικροδορυφόροι για εφαρμογές Παρατήρησης της Γης
- ε) Εντοπισμός θέσης δορυφόρων με τη χρήση δορυφορικού συστήματος παγκόσμιας πλοήγησης
- στ) Παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα πλοήγησης (Global Navigation Satellite System-GNSS)
- ζ) Ανάπτυξη Εθνικής Μονάδας Βαθμονόμησης και Διακρίβωσης μελλοντικών διαστημικών αποστολών
- η) Εφαρμογές Ασφάλειας (Security) όπως πχ επιτήρηση φάσματος και συνόρων

Σε εθνικό επίπεδο υπάρχει συμμετοχή και πρόσβαση σε σχετικές υπηρεσίες προγραμμάτων της ΕΕ , τεχνογνωσία και ερευνητικά προγράμματα- δραστηριότητες σχεδίασης και χρήσης νανοδορυφόρων και μικροδορυφόρων, καθώς επίσης και επίγειο τμήμα που συμπεριλαμβάνει σταθμούς εδάφους απευθείας υποστήριξης των διαφόρων δορυφορικών συστημάτων ή/και άμεσης ή έμμεσης συλλογής δορυφορικών δεδομένων και υποστήριξης εφαρμογών. Επιπλέον ο ιδιωτικός τομέας παρουσιάζει επίσης μια αξιόλογη παρουσία στην ανάληψη και υλοποίηση δραστηριοτήτων σχετικών με τις δορυφορικές τεχνολογίες και εφαρμογές, κυρίως από τους τομείς των δορυφορικών τηλεπικοινωνιών, της τηλεπισκόπησης και των παγκόσμιων συστημάτων εντοπισμού και πλοήγησης GNSS.

Μάλιστα, μελέτες δείχνουν ότι παρά την ύπαρξη επιμέρους εναλλακτικών λύσεων για την ικανοποίηση των εθνικών αναγκών και την διεκπεραίωση των αντίστοιχων αποστολών , όπως η χρήση Μη Επανδρωμένων Αεροχημάτων (MEA) και HAPS ή προμήθεια μεμονωμένων προϊόντων για τον κατά περίπτωση επιμερισμό του κόστους, αυτές δεν αποτελούν μακροπρόθεσμα ισοδύναμες λύσεις σε σχέση με ένα Εθνικό Πρόγραμμα, διότι δεν εξυπηρετούν τους εθνικούς σκοπούς και στόχους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το γεγονός ότι σε σύγκριση με σμήνη μικρών δορυφόρων για εφαρμογές παρατήρησης, συστήματα MEA/HAPS έχουν επιχειρησιακούς περιορισμούς στην εμβέλεια/κάλυψη λόγω περιορισμών στη στόχευση και στις δυνατότητες παρατήρησης θέατρων επιχειρήσεων. Επιπλέον επειδή στην περίπτωσή τους είναι υπαρκτός ο κίνδυνος πιθανών παρεμβολών ή κατάρριψης, αυτό τα καθιστά ευάλωτα σε περιπτώσεις επιχειρησιακής χρήσης.

#### 1.4 Αντικείμενα Σύγχρονων Ερευνών

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, μερικά από τα κύρια αντικείμενα των σύγχρονων ερευνών, αφορούν τα **βασικά χαρακτηριστικά** των NTN δικτύων και κατά συνέπεια των δορυφορικών

συστημάτων που έχουν ενσωματωθεί σε αυτά, αλλά και το πώς αυτά διαφοροποιούνται σε σχέση με τα αντίστοιχα επίγεια δίκτυα.

Πιο αναλυτικά, το **κόστος** του εκάστοτε δορυφόρου-μικροδορυφόρου διαμορφώνεται ανάλογα με τον εξοπλισμό τον οποίο φέρει προκειμένου να φέρει εις πέρας την αποστολή του. Έτσι στα προβλεπόμενα κόστη υλοποίησης και λειτουργίας ενός συστήματος δορυφόρων και μικροδορυφόρων συμπεριλαμβάνονται έξοδα αναφορικά με τα επιμέρους υποσυστήματα, όπως το σύστημα απεικόνισης, οι κεραίες και τυχόν κάμερες ή αισθητήρες που φέρει, η τηλεπικοινωνιακή σύνδεση τόσο με τον σταθμό εδάφους όσο και με άλλους δορυφόρους, η ανάπτυξη του απαραίτητου λογισμικού και τα υπολογιστικά συστήματα (servers) λήψης και επεξεργασίας των πρωτογενών δεδομένων, η ύπαρξη επι του σκάφους (onboard) ενσωματωμένου υπολογιστή/επεξεργαστή, συσκευές GNSS εντοπισμού και πλοήγησης για τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης και της ταχύτητας του δορυφόρου, το σύστημα ισχύος, το σύστημα ελέγχου και το σύστημα προώθησης, καθώς και κόστη διαστημικών υπηρεσιών SST και διατήρησης της πτήσης σε τροχιά. Στα κόστη πρέπει να συμπεριληφθούν επίσης και επενδύσεις υποδομών σε αρχεία και υπολογιστικό σύννεφο (cloud) για την αρχειοθέτηση των δεδομένων, αλλά και κόστη ανάπτυξης εξελιγμένων, με βάση τα σύγχρονα τεχνολογικά δεδομένα, συστημάτων αποθήκευσης και ανάκτησης των εικονικών δεδομένων τύπου datacube/raster βάσεις δεδομένων.

Προφανώς στο παραπάνω πλαίσιο δεν θα μπορούσε να λείπει το αντικείμενο της μελέτης του **δορυφορικού διαύλου** και του προϋπολογισμού ζεύξης. Οι απώλειες διάδοσης οι οποίες αυξάνονται αισθητά με την αύξηση του υψομέτρου της εκάστοτε πλατφόρμας – κόμβου αποτελούν ανασταλτικό παράγοντα για χρήση υπερ-αξιόπιστων και χαμηλής καθυστέρησης υπηρεσιών επικοινωνιών (ultra Reliable and Low Latency Communications- uRLLC) όπου είναι απαιτούμενη η ύπαρξη πολύ μικρής καθυστέρησης. Όπως είναι λογικό τα φαινόμενα αυτά είναι μέγιστα στην περίπτωση χρήσης των GEO δορυφόρων λόγω του ότι σε αυτή την περίπτωση έχουμε τη μέγιστη διαδρομή του εκπεμπόμενου σήματος. Επιπλέον η μελέτη της επιρροής ενός δικτύου από διαστημικά καιρικά φαινόμενα είναι εξίσου σημαντική, αφού η ατμόσφαιρα της Γης διασχίζεται από κοσμική και ηλιακή ακτινοβολία, καθώς και από ζώνες γνωστές ως ζώνες Van Allen, οι οποίες περιέχουν ισχυρά πεδία ακτινοβολίας και επηρεάζουν αισθητά το δίκτυο, κυρίως όταν αυτό περιέχει κόμβους (δορυφόρους) οι οποίοι βρίσκονται σε μέση τροχιά (MEO). Όσον αφορά τους LEO δορυφόρους βέβαια, αυτοί δεν επηρεάζονται τόσο άμεσα αφού βρίσκονται σε τροχιές κάτω από τις συγκεκριμένες ζώνες [7].

Επιπλέον σημαντικές είναι οι επιδράσεις του φαινομένου Doppler, το οποίο εμφανίζεται τόσο στα TNs όσο και στα NTNs και το οποίο προέρχεται από την σχετική κίνηση μεταξύ τελικών χρηστών και σταθμών βάσης. Ωστόσο στην περίπτωση των GAS δικτύων, αυτού του είδους τα φαινόμενα αυξάνονται κατακόρυφα λόγω των κατά πολύ μεγαλύτερων ταχυτήτων που αναπτύσσονται μεταξύ των κόμβων του δικτύου με χειρότερη περίπτωση αυτή της χρήσης LEO δορυφόρων, οι οποίοι αναπτύσσουν τις μεγαλύτερες ταχύτητες σε σχέση με τις υπόλοιπες κατηγορίες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα

αποτελούν τα αποτελέσματα της έρευνας [8] τα οποία δείχνουν ότι η μετατόπιση Doppler που υφίσταται ένα σήμα σε μία LEO ζεύξη συγκεκριμένων χαρακτηριστικών, είναι 10 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με την μετατόπιση που υφίσταται ένα σήμα, του οποίου ο τελικός χρήστης- παραλήπτης βρίσκεται σε ένα κινούμενο τρένο. Μάλιστα, για τον παραπάνω λόγο σε πολλές προσομοιώσεις, επειδή η κινητικότητα των χρηστών σε ένα TN δίκτυο είναι πολύ μικρότερη από την κινητικότητα σε ένα NTN, αντιμετωπίζεται ως μηδενική. Ενδεικτικά, προκειμένου ένας δορυφόρος να παραμείνει σε κυκλική τροχιά γύρω από τη Γη, θα πρέπει να αναπτύξει αρκετή γωνιακή ταχύτητα, τέτοια ώστε η φυγόκεντρος δύναμη  $F_{out}$  που αναπτύσσεται (αντίθετη της κεντρομόλου) να είναι ίδιου μέτρου και αντίθετη με την βαρυτική δύναμη  $F_{in}$  που ασκείται στον δορυφόρο. Έχοντας αυτό ως δεδομένο ισχύει:

$$F_{in} = m(\mu / r^2) \quad (1.1)$$

και

$$F_{out} = m(v^2 / r) \quad (1.2)$$

Όπου:

$m$  = μάζα του δορυφόρου

$v$  = ταχύτητα του δορυφόρου στο επίπεδο της τροχιάς

$r$  = απόσταση από το κέντρο της Γης (ακτίνα τροχιάς)

$\mu$  = Σταθερά του Kepler (ή Γεωκεντρική Βαρυτική Σταθερά) =  $3.986004 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2$

Συνεπώς :

$$F_{in} = F_{out} \quad (1.3)$$

Άρα

$$v = (\mu / r)^{\frac{1}{2}} \quad (1.4)$$

Από τον παραπάνω τύπο εύκολα υπολογίζεται η γωνιακή ταχύτητα που απαιτείται για τη διατήρηση ενός δορυφόρου στην ακτίνα τροχιάς  $r$ . Αξίζει να σημειωθεί ωστόσο ότι για στους παραπάνω υπολογισμούς δεν λαμβάνονται υπόψιν τυχόν άλλες δυνάμεις οι οποίες ενεργούν στον δορυφόρο, όπως οι βαρυτικές δυνάμεις από τη Σελήνη, τον Ήλιο και άλλα σώματα.

Οι καθυστερήσεις είναι επίσης ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά τα οποία συνδέονται με τον δίαυλο και καθορίζουν την ποιότητα μίας ζεύξης και την επίδοση των συστημάτων. Είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με την απόσταση την οποία διανύει κάθε φορά το σήμα και όπως είναι λογικό αύξηση του υψομέτρου της εκάστοτε πλατφόρμας οδηγεί σε αύξηση του φαινομένου των Two-way καθυστερήσεων. Φυσικά η όξυνση του φαινομένου αυτή επιφέρει και αντίστοιχη υποβάθμιση των

υπηρεσιών που βασίζονται στο TCP πρωτόκολλο. Έτσι λοιπόν στην περίπτωση των MEO και κυρίως των GEO δορυφόρων έχουμε RTT της τάξεως των μερικών χιλιάδων milliseconds. Στην περίπτωση των LEO δορυφόρων οι χρόνοι μειώνονται αισθητά φτάνοντας τις μερικές δεκάδες milliseconds ενώ στην περίπτωση των HAPs έχουμε περαιτέρω μείωση, όπου μπορούμε να επιτύχουμε χρόνους RTT μέχρι και μερικά milliseconds. Μάλιστα 4 εταιρείες κολοσσοί (Telesat, Tesla's Starlink, One Web, Amazon Kuiper) έχουν εστιάσει στην ανάπτυξη αστερισμών LEO δορυφόρων για τον παραπάνω λόγο.

Επιπλέον οι παρεμβολές ίσως είναι ένα από τα σημαντικότερα προς μελέτη φαινόμενα που αφορούν τον τηλεπικοινωνιακό δίαυλο σε GAS δίκτυα, αφού λόγω των διαφορετικών επιπέδων στα οποία αναπτύσσονται οι διάφορες NTN πλατφόρμες και των διαφορετικών αλλά διασταυρούμενων τροχιών που αυτές έχουν, συμβαίνει συχνά μία συγκεκριμένη περιοχή της επιφάνειας της Γης να βρίσκεται εντός της περιοχής κάλυψης παραπάνω από μίας πλατφόρμας, γεγονός το οποίο αυξάνει τις ανάγκες για σωστή διαχείριση του ραδιοφάσματος, την αναχρησιμοποίηση συχνοτήτων και τη δημιουργία κατευθυντικών κεραιών για συρρίκνωση και διαμόρφωση δεσμών δορυφόρων (satellite beams) με ακρίβεια.

Η **κάλυψη** είναι ένα ακόμα χαρακτηριστικό το οποίο επηρεάζεται από το υψόμετρο της εκάστοτε πλατφόρμας και τις γωνίες ανύψωσης, αφού αύξηση του υψομέτρου οδηγεί λόγω γεωμετρίας σε αύξηση του μεγέθους του αποτυπώματος της εκάστοτε δέσμης. Χαρακτηριστικά είναι τα μεγέθη που ακολουθούν σύμφωνα με τα οποία οι GEO δορυφόροι έχουν μέγεθος αποτυπώματος από 200 έως 3500 km, οι MEO από 300 έως 1500 km και οι LEO από 100 έως 1000 km. Προφανώς τα μεγέθη αυτά μικραίνουν ακόμα περισσότερο όταν μιλάμε για HAPs και UAVs. Ωστόσο σημαντικό προς μελέτη πρόβλημα είναι αυτό της ασυνέχειας μεταξύ των περιοχών κάλυψης των δορυφόρων, λόγω της σχετικής κίνησης μεταξύ τους, το οποίο όμως επιλύεται με τη προσεκτική μελέτη των επιθυμητών περιοχών κάλυψης και τη σωστή σχεδίαση του αστερισμού των δορυφόρων, δηλαδή του δικτύου-πλέγματος.

Σε συνέχεια του παραπάνω, πολύ σημαντικό πεδίο μελέτης αποτελεί η **διαδικασία μεταγωγής (Handover)** η οποία είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την περιοχή κάλυψης. Η υψηλή κινητικότητα των κόμβων και των τελικών χρηστών ενός NTN δικτύου σε σχέση με τους σταθμούς βάσης αλλά και μεταξύ τους, έχει καταστήσει επιτακτική την ανάγκη τόσο για την μεγάλη ακρίβεια στην ανίχνευση και πρόβλεψη των θέσεων των δορυφόρων, όσο και για τη συχνή, γρήγορη αλλά και αξιόπιστη υλοποίηση handover διαδικασιών. Οι διαδικασίες αυτές προϋποθέτουν την ύπαρξη μεγάλου όγκου δεδομένων και πολύπλοκων υπολογισμών για την επεξεργασία αυτών, τη μελέτη και χρήση πολύπλοκων αλγορίθμων επιλογής κόμβων-δορυφόρων με σκοπό την επιλογή βέλτιστης διαδρομής, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε παρεχόμενης υπηρεσίας καθώς και τη χρήση έξυπνων, ασφαλών και γρήγορων πρωτοκόλλων δρομολόγησης δεδομένων.

Τέλος η **ανάπτυξη** στο χώρο τελικού προορισμού (Deployment) αποτελεί έναν πολύ μεγάλο αντικείμενο ερευνών των NTN δικτύων, καθώς σε αντίθεση με την ανάπτυξη δικτύου βασιζόμενο σε

UAVs και HAPs, η δημιουργία δικτύου κάνοντας χρήση δορυφόρων είναι αρκετά πιο πολύπλοκη αφού χρειάζεται αφενός πολύ περισσότερο χρόνο προετοιμασίας σε σχέση με ένα δίκτυο εναέριων μέσων, αφετέρου απαιτεί πολύ μεγαλύτερο κόστος εκτόξευσης και ανάπτυξης σε τροχιά. Ωστόσο αποτελούν ενδεδειγμένη λύση για μακροπρόθεσμη χρήση και κάλυψη πολύ μεγαλύτερων σε έκταση περιοχών.

Τέλος, η σωστή **χρήση και αξιοποίηση του ραδιοφάσματος** αποτελεί παράγοντα ζωτικής σημασίας καθώς η ανάπτυξη των 5G και Beyond 5G δικτύων, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη των NTNς, η επιτακτική ανάγκη για γρήγορες ταχύτητες και η απαίτηση για μεταφορά ολοένα και μεγαλύτερου όγκου δεδομένων, έχει οδηγήσει στη μετάβαση σε πολύ υψηλότερες συχνότητες σε σχέση με το παρελθόν. Σύμφωνα με το [9] η νέα τάση στη χρήση ραδιοφάσματος είναι μεταξύ 24,25 και 52,60 GHz, συχνότητες οι οποίες επιτρέπουν ταχύτητες παρόμοιες με τις ταχύτητες ενός δικτύου οπτικών ινών. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι η ταχύτητα το φωτός στον αέρα είναι 300.000 km/sec ενώ σε μία ίνα πυριτίου (οπτική ίνα) φτάνει έως τις 200.000 km/sec. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η μετάδοση του φωτός είναι κατά 50 % ταχύτερη στον αέρα σε σχέση με τις οπτικές ίνες, το οποίο μεταφράζεται σε 3.33 μs/km για επικοινωνίες ελεύθερου χώρου και 5 μs/km για επικοινωνίες μέσω οπτικών ινών [10]. Μάλιστα σε κάποιες περιπτώσεις που αφορούν σενάρια μεγάλων περιοχών κάλυψης πάνω από 1000 km υποστηρίζεται ότι οι δορυφορικές επικοινωνίες είναι ταχύτερες και προτιμότερες σε σχέση με τις επικοινωνίες μέσω ινών.

Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών καθορίζει και διανέμει τις διάφορες ζώνες συχνοτήτων με σκοπό την διασφάλιση της αποδοτικής χρήσης του ραδιοφάσματος και την μείωση και ει δυνατόν την εξάλειψη των παρεμβολών. Έτσι λοιπόν έχουμε τις ακόλουθες μπάντες συχνοτήτων κατά αύξουσα σειρά:

- α) L-Band (GEO): μεταξύ 1518-1559 MHz για Downlink και 1626.5-1660.5 MHz ή 1668-1675 MHz για Uplink.
- β) L-Band (Non-GEO): μεταξύ 1613.8-1626.5 MHz για Downlink και 1610-1626.5 MHz για Uplink.
- γ) S-Band: μεταξύ 2160-2200 MHz ή 2483.5-2500 MHz για Downlink και 1980-2025 MHz για Uplink..
- δ) C-Band: μεταξύ 3400-4200 MHz ή 4500-4800 MHz για Downlink και 5725-7025 MHz για Uplink.
- ε) Ku-Band: μεταξύ 10,7-12,75 GHz για Downlink και 12,75-13,25 GHz ή 13,75-14,5 GHz για Uplink.
- στ) Ka-Band (GEO): μεταξύ 17,3-20,2 GHz για Downlink και 27-30 GHz ή 1668-1675 MHz για Uplink.
- ζ) Ka-Band (Non-GEO): μεταξύ 17,7-20,2 GHz για Downlink και 27,0-29,1 GHz ή 29,5-30,0 GHz για Uplink.



η) Q/V-Band: μεταξύ 37,5-42,5 GHz ή 47,5-47,9 GHz ή 48,2-48,54 GHz ή 49,44-50,2 GHz για Downlink και 42,5-43,5 GHz ή 47,2-50,2 GHz ή 50,4-51,4 GHz για Uplink.

Όπως διαφαίνεται από τα παραπάνω κάνοντας χρήση των Ku και Ka μπαντών πλησιάζουμε σε ταχύτητες που προσομοιάζουν αυτές των DSL συνδέσεων (20 Mbps) ή ακόμα και των ταχυτήτων οπτικής ίνα στο σπίτι (fiber-to-home) (100 Mbps) ειδικά με τη χρήση κατευθυντικών κεραιών [10]. Όσον αφορά την τελευταία κατηγορία όπως αναφέρθηκε και παραπάνω συναντάμε την Q και V μπάντα, με την μεν πρώτη να εκτείνεται κατά προσέγγιση μεταξύ 33-50 GHz για Uplink και 40-55 GHz για Downlink και τη δεύτερη να καταλαμβάνει εύρος ζώνης μεταξύ 40-75 GHz. Ωστόσο επειδή και οι δύο αφορούν χιλιοστομετρικά μήκη κύματος, η χρήση τους συνεπάγεται με μεγάλες απώλειες διάδοσης λόγω απορρόφησης από την ατμόσφαιρα και απωλειών βροχής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σε ζεύξεις σημείου προς σημείο και γι' αυτόν τον λόγο πολλές εταιρείες πλέον χρησιμοποιούν τη V μπάντα για συνδέσεις μόνο μεταξύ δορυφόρων (intersatellite links- ISL) πάνω από τα σύννεφα. Επίσης σε αρκετά χαμηλότερες συχνότητες πλέον των παραπάνω υπάρχει και η X- Band: 7,25-7,75 GHz για Uplink και 7,9-8,4 GHz για Downlink η οποία χρησιμοποιείται σε στρατιωτικές και κυβερνητικές εφαρμογές, όπως και σε συστήματα ραντάρ. Τέλος υπάρχει και η W μπάντα η οποία καταλαμβάνει ζώνες συχνοτήτων μεταξύ 75 και 110 GHz και της οποίας οι εφαρμογές βρίσκονται ακόμα σε πειραματικό στάδιο και θα αφορούν ζεύξεις σημείου προς σημείο που απαιτούν μεγάλο εύρος ζώνης και βρίσκονται σε μικρές αποστάσεις μεταξύ τους, όπως εντός κτηρίων ή μεταξύ εγκαταστάσεων σε σχετικά κοντινή απόσταση, ενώ σύμφωνα με το [10] προσφέρεται και αυτή για ζεύξεις ISL.

Ωστόσο η μετάβαση σε υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων δεν έρχεται χωρίς κανέναν αντίκτυπο, αφού τα χιλιοστομετρικά κύματα έχουν πολύ διαφορετική συμπεριφορά κατά τη διάδοσή τους σε σχέση με κύματα μεγαλύτερου μήκους και χαμηλότερης συχνότητας. Φαινόμενα όπως η σκίαση ή οι απώλειες διάδοσης και μονοπατιού επιδρούν διαφορετικά.[10]-[13] με αποτέλεσμα την ανάγκη για εκ νέου εξέταση αυτών των φαινομένων. Μάλιστα, η δημιουργία ενός πλαισίου ευέλικτης κατανομής καναλιών και συχνοτήτων ανάλογα με τη ζήτηση φαίνεται να αποτελεί μία καλή και αποτελεσματική λύση στο πρόβλημα εκμετάλλευσης του ραδιοφάσματος σύμφωνα με την έρευνα [14]. Βέβαια, όπως είναι λογικό, η κατανομή και η δέσμευση των συχνοτήτων και των εύρων ζώνης στις διάφορες δέσμες με σκοπό την αναχρησιμοποίηση αυτών και την εξασφάλιση υψηλών ταχυτήτων και χωρητικότητας, πρέπει να γίνεται κατόπιν σωστής και προσεκτικής σχεδίασης των αλγορίθμων οι οποίοι θα αναλαμβάνουν τη διαδικασία αυτή.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως το μειονέκτημα της χρήσης δορυφόρων είναι η υψηλή round-trip καθυστέρηση διάδοσης στον επικοινωνιακό δίαυλο, η οποία προέρχεται από το μεγάλο υψόμετρο στο οποίο βρίσκεται η εκάστοτε βαθμίδα και κατά συνέπεια στο μεγάλο μήκος μονοπατιού το οποίο πρέπει να διασχίσει το σήμα, φαινόμενο το οποίο είναι σαφώς εντονότερο στους GEO

δορυφόρους, ενώ στην περίπτωση των LEO δορυφόρων έχουμε σαφώς πολύ μικρότερους χρόνους round-trip καθώς και απώλειες μονοπατιού. Ωστόσο στην τελευταία περίπτωση οξύνεται κατά πολύ το πρόβλημα των συχνών handovers λόγω υψηλής κινητικότητας. Στο παραπάνω προστίθεται φυσικά το φαινόμενο της έντονης μετατόπισης Doppler που υφίσταται το σήμα λόγω της υψηλής ταχύτητας των LEO δορυφόρων σε σχέση με τους επίγειους χρήστες.

Όσον αφορά την επίλυση του προβλήματος σχετικά με την τεράστια μετατόπιση Doppler την οποία υφίσταται το σήμα κυρίως στους LEO δορυφόρους, αλλά και την μεγάλη καθυστέρηση, σύμφωνα με τις κύριες προτάσεις στο 3GPP η λύση μπορεί να βρίσκεται στη χρήση στοιχείων και δυνατοτήτων του Παγκόσμιου δορυφορικού συστήματος πλοήγησης (GNSS) και την παράλληλη γνώση των στοιχείων της τροχιάς των δορυφόρων (ephemeris data). Αυτό θα επιτρέπει τον εκ των προτέρων υπολογισμό και αντιστάθμιση ενός μεγάλου μέρους της μετατόπισης Doppler και της καθυστέρησης, πλησιάζοντας κατά πολύ τα μεγέθη που συναντώνται σε ζεύξεις επίγειων δικτύων [2]. Επιπρόσθετα, έχουν προταθεί και λύσεις οι οποίες εκτός από την μετατροπή και προσαρμογή των υπάρχοντων πρωτοκόλλων IoT, αφορούν την εφαρμογή καινοτόμων τεχνολογιών επικοινωνίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Δορυφορικές Συχνότητες

### **2.1 Εφαρμογές-Υπηρεσίες βασισμένες σε Δορυφορικές Μπάντες Συχνότητων**

Οι δορυφορικές μπάντες αναφέρονται στις μεμονωμένες ζώνες συχνότητων στις οποίες έχει διαχωριστεί και κατανεμηθεί το διαθέσιμο ραδιοφάσμα, σύμφωνα πάντα με τους σχετικούς διεθνείς κανονισμούς. Σκοπός των κανονισμών αυτών είναι η βέλτιστη διαχείριση των ραδιοσυχνότητων και η αποφυγή παρεμβολών μεταξύ διαφορετικών σημάτων, ούτως ώστε να επιτυγχάνεται η αδιάλειπτη παροχή ενός ευρέος φάσματος εφαρμογών, εξυπηρετώντας πολλούς διαφορετικούς σκοπούς και τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας. Με αυτόν τον τρόπο κάθε είδος υπηρεσίας είθισται να χρησιμοποιεί μία συγκεκριμένη ζώνη συχνότητων με κάποιες από τις σημαντικότερες υπηρεσίες δορυφορικών επικοινωνιών να είναι οι ακόλουθες:

- α) Δορυφορική Τηλεφωνία: παρέχει στους χρήστες τη δυνατότητα πραγματοποίησης κλήσεων και αποστολής μηνυμάτων σε περιοχές χωρίς επίγεια κάλυψη κινητής τηλεφωνίας, όπως απομακρυσμένες περιοχές ή περιοχές που έχουν πληγεί από φυσικές καταστροφές, κάνοντας χρήση κινητών τηλεφώνων που βασίζονται σε δορυφόρους.
- β) Μία από τις πιο γνωστές δορυφορικές υπηρεσίες είναι η δορυφορική τηλεόραση απευθείας στο σπίτι (DTH), η οποία καθιστά δυνατή την παροχή τηλεοπτικών καναλιών και προγραμμάτων απευθείας στα σπίτια των χρηστών μέσω δορυφόρου. Για τη λήψη των σημάτων γίνεται χρήση από τη μεριά των χρηστών ενός δορυφορικού πιάτου και ενός αποκωδικοποιητή.
- γ) Μία ακόμα σημαντική υπηρεσία είναι αυτή του δορυφορικού ραδιοφώνου, η οποία προσφέρει ηχητικό περιεχόμενο, συμπεριλαμβανομένης μουσικής, ειδήσεων, εκπομπών συζήτησης και ψυχαγωγίας, μέσω δορυφόρου στους δέκτες των συνδρομητών. Κάνοντας χρήση αυτής της υπηρεσίας οι ακροατές μπορούν να έχουν πρόσβαση σε μια μεγάλη ποικιλία καναλιών με ήχο υψηλής ποιότητας.
- δ) Σημαντικότατο τομέα ανάπτυξης και χρήσης πλέον των δορυφορικών υπηρεσιών αποτελεί το Δορυφορικό Διαδίκτυο, αφού μέσω των δορυφορικών επικοινωνιών καθίσταται δυνατή η σύνδεση στο Διαδίκτυο με υψηλές ταχύτητες σε τοποθεσίες όπου η επίγεια διασύνδεση είναι περιορισμένη ή μη διαθέσιμη. Για τη χρήση αυτής της υπηρεσίας οι χρήστες συνδέονται στο διαδίκτυο μέσω δορυφορικού πιάτου και δορυφορικού μόντεμ.
- ε) Επιπλέον, μία ακόμα πολύ σημαντική κατηγορία αποτελούν οι κινητές δορυφορικές υπηρεσίες (MSS) που αφορούν υπηρεσίες επικοινωνίας φωνής και δεδομένων σε χρήστες εν κινήσει, όπως ναυτιλιακούς, αεροπορικούς και χερσαίους χρήστες σε απομακρυσμένες ή

υποεξυπηρετούμενες περιοχές. Μέσω αυτών επιτρέπεται η αξιόπιστη επικοινωνία σε απομακρυσμένες περιοχές καθώς και σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης.

στ) Επιπρόσθετα η χρήση δορυφόρων δίνει τη δυνατότητα παροχής δορυφορικής πλοήγησης μέσω υπηρεσιών εντοπισμού θέσης ακριβείας, πλοήγησης και χρονισμού σε χρήστες παγκοσμίως, οι οποίες υιοθετούνται από τα παγκόσμια δορυφορικά συστήματα πλοήγησης (GNSS), όπως το ευρέως χρησιμοποιούμενο σύστημα GPS. Την σήμερα υπάρχει πληθώρα συσκευών με δυνατότητα χρήσης αυτού του συστήματος και οι οποίες προκειμένου να προσδιορίσουν τη θέση τους και να πλοηγηθούν με ακρίβεια χρησιμοποιούν σήματα από δορυφόρους.

ζ) Ακόμα, οι Υπηρεσίες VSAT (Very Small Aperture Terminal) παρέχουν αμφίδρομες υπηρεσίες επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένης της μετάδοσης δεδομένων, της φωνητικής επικοινωνίας και της σύνδεσης στο Διαδίκτυο σε απομακρυσμένες τοποθεσίες και επιχειρήσεις. Για να επιτευχθεί αυτό γίνεται χρήση δικτύων VSAT με μικρά δορυφορικά πιάτα στους εκάστοτε τελικούς χρήστες.

η) Επίσης, μία ακόμα εφαρμογή των Δορυφορικών Τηλεπικοινωνιών είναι η Τηλεπισκόπηση και Παρατήρηση της Γης, κατά την οποία δορυφόροι κατάλληλα εξοπλισμένοι με αισθητήρες και κάμερες καταγράφουν εικόνες και δεδομένα στην επιφάνεια της Γης. Με αυτόν τον τρόπο παρέχονται πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την παρακολούθηση το περιβάλλοντος, τη γεωργία, τον αστικό σχεδιασμό και τη διαχείριση καταστροφών.

θ) Επιπλέον, ολοένα και αυξανόμενη χρήση έχει η δορυφορική μετάδοση και διανομή περιεχομένου κατά την οποία δορυφόροι χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση ζωντανών εκδηλώσεων, ειδήσεων και περιεχομένου ψυχαγωγίας σε ευρύ κοινό πχ. ζωντανές αθλητικές εκδηλώσεις, συναυλίες και παγκόσμια κάλυψη ειδήσεων.

ι) Ακόμα, υπάρχουν εταιρείες που ασχολούνται με Υπηρεσίες δορυφορικής απεικόνισης και χαρτογράφησης προσφέροντας εικόνες υψηλής ανάλυσης και δεδομένα χαρτογράφησης, τα οποία με τη σειρά τους χρησιμοποιούνται σε διάφορες άλλες εφαρμογές όπως η γεωργία, η δασοκομία και στρατιωτικές εφαρμογές.

ια) Αξίζει να σημειωθεί επίσης ότι οι δορυφόροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την παροχή συνδεσιμότητας σε συσκευές IoT, επιτρέποντας τη συλλογή και επικοινωνία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο σε απομακρυσμένες και δυσπρόσιτες περιοχές.

ιβ) Τέλος, οι Στρατιωτικές και Αμυντικές Επικοινωνίες είναι ένας κρίσιμος τομέας στο πλαίσιο του οποίου γίνεται κατά κόρον χρήση δορυφόρων για την σχεδίαση, διεξαγωγή, παρακολούθηση και συντονισμό των εκάστοτε στρατιωτικών επιχειρήσεων, αφού επιτρέπεται με αυτόν τον τρόπο η παροχή ασφαλών και αξιόπιστων συνδέσεων επικοινωνίας.

Αυτά είναι μερικά μόνο παραδείγματα των διαφορετικών υπηρεσιών δορυφορικής επικοινωνίας που διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο σε διάφορους κλάδους και τομείς παγκοσμίως με τις παραπάνω υπηρεσίες να αποτελούν και τον λόγο για τον οποίο η δορυφορική τεχνολογία συνεχίζει να προοδεύει, επιτρέποντας νέες εφαρμογές και βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα και τις δυνατότητες των υπαρχουσών υπηρεσιών. Παράλληλα αποτελούν απόδειξη του πόσο σημαντική είναι η σωστή διαχείριση και χρήση του ραδιοφάσματος και των καναλιών αυτού.

## **2.2 Κατανομή Δορυφορικών Συχνοτήτων σε Μπάντες**

Όσον αφορά τη βέλτιστη διαχείριση και χρήση του ραδιοφάσματος που αναφέρθηκε προηγουμένως, αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ρύθμισης από διεθνείς φορείς συντονισμού συχνοτήτων, όπως η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union -ITU), οι οποίες έχουν ως σκοπό τη διασφάλιση της αποτελεσματικής χρήσης του ραδιοφάσματος και την αποφυγή παρεμβολών μεταξύ διαφορετικών συστημάτων. Στη συνέχεια ακολουθεί μια επισκόπηση των κύριων δορυφορικών μπαντών-ζωνών συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται για δορυφορικές επικοινωνίες σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (European Space Agency).

### **2.2.1 L-Band**

Η μπάντα L είναι μία μικροκυματική ζώνη συχνοτήτων η οποία λειτουργεί στην περιοχή περί τα 1-2 GHz. Χρησιμοποιείται ευρέως και γι' αυτόν τον λόγο θεωρείται βασική ζώνη συχνοτήτων, αφού περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών δορυφορικής επικοινωνίας και εντοπισμού θέσης και πλοήγησης, όπως το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης (Global Positioning System- GPS), το Galileo και άλλα αντίστοιχα παγκόσμια δορυφορικά συστήματα πλοήγησης (GNSS). Σημαντικότερες εφαρμογές επικοινωνίας είναι υπηρεσίες μετάδοσης δεδομένων, φωνητικής επικοινωνίας και μηνυμάτων, δορυφορικού ραδιοφώνου, δορυφορικών τηλεφωνικών συστημάτων και κινητές δορυφορικές υπηρεσίες (Mobile Satellite Service-MSS) για την παράδοση δεδομένων επικοινωνίας σε χρήστες κινητών τερματικών, συμπεριλαμβανομένων των ναυτιλιακών, αεροπορικών και χερσαίων επικοινωνιών χρηστών σε απομακρυσμένες ή υπο-εξυπηρετούμενες περιοχές. Μάλιστα ορισμένοι φορείς εκμετάλλευσης δορυφόρων, συμπεριλαμβανομένων των εταιρειών Iridium και Globalstar αναπτύσσουν αστερισμούς δορυφόρων χαμηλής τροχιάς Γης (LEO) για την παροχή παγκόσμιας κάλυψης, κάνοντας χρήση της συγκεκριμένης μπάντας στις κινητές δορυφορικές υπηρεσίες τους. Το γεγονός ότι λειτουργεί σε χαμηλότερες συχνότητες από άλλες μπάντες συχνοτήτων, την καθιστά κατάλληλη για συγκεκριμένες υπηρεσίες επικοινωνίας, αφού βασικό πλεονέκτημά της είναι η μεγάλη διεισδυτικότητα, υπό διάφορες συνθήκες διαύλου, καθιστώντας τη με αυτόν τον τρόπο λιγότερο επιρρεπή σε απώλειες λόγω σκίασης ή απώλειες λόγω ατμοσφαιρικών φαινομένων όπως η βροχή. Έτσι, καθίσταται πολύτιμη για εξειδικευμένες υπηρεσίες επικοινωνίας, ωστόσο υπάρχουν και αρκετές

προκλήσεις, αφού λόγω των χαμηλότερων συχνοτήτων της συγκεκριμένης μπάντας, το εύρος ζώνης, το οποίο είναι ανάλογο της ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων, είναι περιορισμένο.

### 2.2.2 S-Band

Η συγκεκριμένη μπάντα λειτουργεί στην περιοχή συχνοτήτων από τα 2 έως 4 GHz περίπου, συνεπώς σε συχνότητες υψηλότερες από της L, προσφέροντας συγκεκριμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με αυτήν όπως είναι οι υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων. Χρησιμοποιείται σε δορυφορικές επικοινωνίες, συστήματα ραντάρ και διάφορες επιστημονικές και στρατιωτικές εφαρμογές. Σε αυτές συμπεριλαμβάνονται οι δορυφορικές συνδέσεις για μετάδοση δεδομένων, φωνητική επικοινωνία αλλά και άλλες υπηρεσίες, όπως επίσης και εφαρμογές επιστημονικής έρευνας, π.χ. τηλεπισκόπηση και αποστολές παρατήρησης στο διάστημα. Επιπλέον χρησιμοποιείται σε ραντάρ καιρού για μετεωρολογικές παρατηρήσεις, όπως η ανίχνευση βροχοπτώσεων, καταιγίδων και άλλων καιρικών φαινομένων, ραντάρ ναυτιλίας και αεροπορίας για σκοπούς πλοήγησης, αποφυγής σύγκρουσης, επιτήρησης, εξερεύνησης του διαστήματος και κατά την επικοινωνία μεταξύ διαστημικών σκαφών και επίγειων σταθμών, επιτρέποντας τη μετάδοση επιστημονικών δεδομένων, τηλεμετρίας και εντολών. Τα σήματα της συγκεκριμένης μπάντας συχνοτήτων παρέχουν καλή διείσδυση υπό διάφορες ατμοσφαιρικές συνθήκες σε σχέση με υψηλότερες ζώνες του φάσματος, επιτρέποντας την αξιόπιστη επικοινωνία και τις παρατηρήσεις των ραντάρ.

### 2.2.3 C-Band

Η C μπάντα είναι μια από τις παλαιότερες και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες ζώνες δορυφορικών συχνοτήτων. Λειτουργεί στην περιοχή συχνοτήτων περί τα 4-8 GHz. Είθισται για κατερχόμενη δορυφορική ζεύξη (δορυφόρος προς δέκτη) να χρησιμοποιείται η περιοχή κοντά στα 4 GHz ενώ η περιοχή μεταξύ 5,8 και 6,4 GHz περίπου για ανερχόμενη (δέκτης προς δορυφόρο). Χρησιμοποιείται για εφαρμογές όπως η ευρυεκτομή δορυφορικής τηλεόρασης, η μετάδοση δεδομένων και η παροχή διαδικτυακών υπηρεσιών καθώς και για αεροναυτικές και θαλάσσιες επικοινωνίες. Επιπλέον συχνά γίνεται χρήση αυτής σε τροπικές περιοχές ή περιοχές με συχνές και μεγάλης έντασης βροχοπτώσεις λόγω του ότι είναι λιγότερο επιρρεπής σε απώλειες λόγω βροχής σε σχέση με άλλες μπάντες.

### 2.2.4 X-Band

Λειτουργεί στην περιοχή συχνοτήτων περί τα 8-12 GHz, εκ των οποίων η ζώνη περί τα 8 GHz χρησιμοποιείται για κατερχόμενη ζεύξη, ενώ οι υψηλότερες συχνότητες μέχρι τα 12 GHz χρησιμοποιούνται για ανερχόμενες ζεύξεις. Χρησιμοποιείται κυρίως για στρατιωτικές και κρατικές-κυβερνητικές εφαρμογές επικοινωνίας, όπως επίσης για ραντάρ, παρατήρηση της Γης και τηλεπισκόπηση, σε επικοινωνίες ναυτιλίας και αεροπλοΐας όπως ο έλεγχος εναέριας κίνησης, καθώς και για επιστημονικές εφαρμογές και επικοινωνίες διαστήματος (Deep Space Communications).

### 2.2.5 Ku-Band

Είναι μια ακόμα ευρέως χρησιμοποιούμενη ζώνη δορυφορικών συχνοτήτων η οποία λειτουργεί περί τα 12-18 GHz . Στην Ευρώπη η χρησιμοποιούμενη ζώνη συχνοτήτων για κατερχόμενη ζεύξη είναι από 10.7 έως 12.75 GHz .Συνήθως έχει εφαρμογή στη δορυφορική τηλεοπτική μετάδοση απευθείας στο σπίτι (Direct to Home-DTH), σε επικοινωνίες VSAT (Very Small Aperture Terminal) αλλά και σε άλλες εφαρμογές όπως η ευρυζωνική πρόσβαση στο διαδίκτυο, τα δίκτυα VSAT (Very Small Aperture Terminal) και η ευρυζωνική συνδεσιμότητα κινητής τηλεφωνίας (Mobile Broadband Connectivity).

### 2.2.6 Ka-Band

Εκτείνεται και λειτουργεί στην περιοχή συχνοτήτων περί τα 26-40 GHz, χρησιμοποιώντας το εύρος 27,5-31 GHz για ανερχόμενες ζεύξεις. Προσφέρει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων σε σύγκριση με τις C-Band και Ku-Band, καθιστώντας την κατάλληλη για ευρυζωνικές υπηρεσίες διαδικτύου, συμπεριλαμβανομένου του δορυφορικού διαδικτύου.

### 2.2.7 V-Band

Είναι μια ακόμα μικροκυματική ζώνη συχνοτήτων η οποία λειτουργεί περίπου από τα 40 έως τα 75 gigahertz (GHz). Προσφέρει εξαιρετικά υψηλή χωρητικότητα δεδομένων και χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές επικοινωνίας που απαιτούν μετάδοση δεδομένων υψηλής ταχύτητας, όπως συνδέσεις επικοινωνίας σημείου προς σημείο, πχ. σύνδεση κέντρων δεδομένων ή παροχή επικοινωνίας υψηλής ταχύτητας μεταξύ σταθερών τοποθεσιών, καθώς και ασύρματα ή δορυφορικά δίκτυα δεδομένων υψηλής χωρητικότητας. Επίσης είναι κατάλληλη για εφαρμογές σε δίκτυα 5G και διανομή βίντεο εξαιρετικά υψηλής ευκρίνειας (UHD). Ωστόσο λόγω της υψηλότερης συχνότητάς, τα σήματα V-Band έχουν περιορισμένη εμβέλεια και μπορεί να είναι ευαίσθητα στην ατμοσφαιρική απορρόφηση, γεγονός το οποίο επηρεάζει την απόσταση και την περιοχή κάλυψης των συνδέσεων επικοινωνίας. Επίσης, ένας ακόμα σοβαρός περιορισμός της συγκεκριμένης μπάντας συχνοτήτων είναι ότι οι συνδέσεις απαιτούν μια σαφή οπτική επαφή μεταξύ των κεραιών εκπομπής και λήψης χωρίς εμπόδια στη διαδρομή του σήματος, όπως δέντρα ή κτήρια, τα οποία δύναται να επηρεάσουν σημαντικά την ποιότητα του σήματος. Παρ' όλ' αυτά, η εξέλιξη της τεχνολογίας και η ανάπτυξη νέων κεραιών, καθιστά τη συγκεκριμένη μπάντα συχνοτήτων αρκετά πρακτική για ορισμένες εφαρμογές, με αποτέλεσμα να θεωρείται πλέον ως μία πιθανή ζώνη για τη βελτίωση των δικτύων 5G, παρέχοντας πρόσθετη χωρητικότητα για την αυξανόμενη ζήτηση εφαρμογών με απαιτήσεις έντασης δεδομένων. Τα τελευταία χρόνια διερευνάται η χρήση της συγκεκριμένης μπάντας για ασύρματα δίκτυα δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων ασύρματων ευρυζωνικών υπηρεσιών και ασύρματων συνδέσεων επικοινωνίας μικρής εμβέλειας.

### 2.2.8 Q/V-Band

Είναι ένας συνδυασμός δύο ζωνών συχνοτήτων μικροκυμάτων, της Q-Band και της V-Band, που χρησιμοποιούνται σε δορυφορικές επικοινωνίες και άλλες εφαρμογές που απαιτούν εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η V-Band λειτουργεί στην περιοχή συχνοτήτων από περίπου 40 έως 75 GHz ενώ η Q-Band λειτουργεί στην περιοχή συχνοτήτων από περίπου 37 έως 41 GHz σύμφωνα με τη NASA. Ο συνδυασμός αυτών των ζωνών οδηγεί σε υψηλότερες συχνότητες από τις υπόλοιπες μπάντες, προσφέροντας τη δυνατότητα για εξαιρετικά υψηλή χωρητικότητα δεδομένων και υποστηρίζοντας εφαρμογές που απαιτούν τεράστιους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων. Έτσι η Q/V-Band χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές επικοινωνίας που απαιτούν μετάδοση δεδομένων εξαιρετικά υψηλής ταχύτητας, όπως δίκτυα 5G, ασύρματες συνδέσεις δεδομένων κορμού (backhaul) για τη σύνδεση σταθμών βάσης κινητής τηλεφωνίας και κόμβων δικτύου, καθώς και τη διανομή βίντεο εξαιρετικά υψηλής ευκρίνειας (UHD) αφού η υψηλή χωρητικότητα δεδομένων επιτρέπει τη ροή και τη διανομή βίντεο υψηλής ποιότητας με ελάχιστο λανθάνοντα χρόνο. Επιπλέον διερευνάται η χρήση της σε δίκτυα 5G για τη βελτίωση της χωρητικότητας και των ρυθμών μεταφοράς δεδομένων, υποστηρίζοντας την αυξανόμενη ζήτηση για δεδομένα κινητής τηλεφωνίας υψηλής ταχύτητας. Από την άλλη πλευρά βέβαια λόγω του εξαιρετικά υψηλού εύρους συχνοτήτων, τα σήματα Q/V-Band έχουν μικρότερη εμβέλεια και μπορεί να είναι πιο ευαίσθητα στην ατμοσφαιρική απορρόφηση ή την μεσολάβηση εμποδίων. Γι' αυτόν τον λόγο η τήρηση οπτικής επαφής είναι κρίσιμη για τη διατήρηση της ποιότητας του σήματος και χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό για τοπική κάλυψη, συνδέοντας τοποθεσίες σε σχετικά μικρές αποστάσεις. Ωστόσο η δυνατότητα παροχής τεράστιας χωρητικότητας δεδομένων την καθιστά ελκυστική επιλογή για την κάλυψη των αυξανόμενων απαιτήσεων μεταφοράς δεδομένων υψηλής ταχύτητας, επιτρέποντας προόδους σε διάφορους τομείς, όμως η υιοθέτησή της για εμπορικές εφαρμογές βρίσκεται ακόμη σε φάση έρευνας και ανάπτυξης αφού, όπως και σε άλλες ζώνες υψηλών συχνοτήτων, απαιτείται προσεκτική εξέταση για τη διάδοση και την κάλυψη του σήματος λόγω της μικρότερης εμβέλειας και της ευαισθησίας στις ατμοσφαιρικές επιδράσεις.

Οι μπάντες συχνοτήτων που αναφέρθηκαν παραπάνω χρησιμοποιούνται ευρέως στις σημερινές ασύρματες και δορυφορικές επικοινωνίες, παίζοντας σημαντικότατο ρόλο στην ανάπτυξη των σύγχρονων NTN και GAS δικτύων, η διαχείριση των οποίων αποτελεί παράγοντα ζωτικής σημασίας για την εξασφάλιση αξιόπιστων και αδιάλειπτων επικοινωνιών και η σωστή εκμετάλλευσή τους να παίζει σημαντικό ρόλο στην εξασφάλιση της QoS κάθε σύγχρονης υπηρεσίας. Για αυτόν το λόγο σύμφωνα με το [15] και βάσει των απαιτήσεων της ITU και των διάφορων εθνικών ρυθμιστικών φορέων ραδιοφάσματος, έχει καθιερωθεί ότι η προτεραιότητα των δορυφορικών επικοινωνιών υψηλής τροχιάς στις περισσότερες ζώνες συχνοτήτων είναι υψηλότερη από εκείνη των δορυφορικών επικοινωνιών χαμηλής τροχιάς, με αποτέλεσμα οι δορυφόροι χαμηλής τροχιάς να υποχρεώνονται σε μεταγωγή (handover) συχνοτήτων όταν διέρχονται από ορισμένες επιλεγμένες περιοχές ή αλλαγή στη γωνία της



κεραίας με σκοπό την αποφυγή παρεμβολών σε δορυφορικές επικοινωνίες υψηλής τροχιάς. Επιπλέον σύμφωνα με το [34] η χρήση των Ku και Ka μπαντών στις δορυφορικές επικοινωνίες περιορίζεται σε υπηρεσίες στατικού χαρακτήρα.

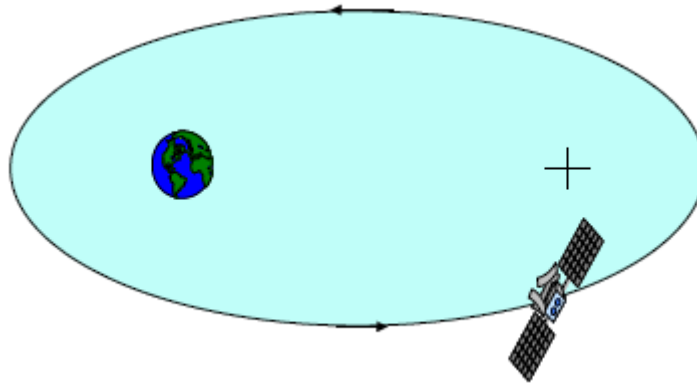
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Δορυφορικές Τροχιές

### 3.1 Γενικές Πληροφορίες περί Δορυφορικών Τροχιών

Οι δορυφορικές τροχιές αναφέρονται στα μονοπάτια που ακολουθούν οι δορυφόροι καθώς περιστρέφονται γύρω από τη Γη ή άλλα ουράνια σώματα και ταξινομούνται σε διάφορες κατηγορίες με βάση το υψόμετρο, την κλίση τους και τον σκοπό που εξυπηρετούν. Κάθε τύπος τροχιάς έχει συγκεκριμένα πλεονεκτήματά και επιλέγεται κάθε φορά βάσει συγκεκριμένων απαιτήσεων αποστολής, περιοχής κάλυψης και σκοπού. Στη σημερινή εποχή η αύξηση της ζήτησης και η ανάπτυξη των δορυφορικών και NTN δικτύων έχουν οδηγήσει στη χρήση δορυφορικών αστερισμών διαφορετικών τροχιών καθώς και συνδυασμών αυτών για την επίτευξη παγκόσμιας κάλυψης και εκπλήρωση των επιχειρησιακών τους στόχων.

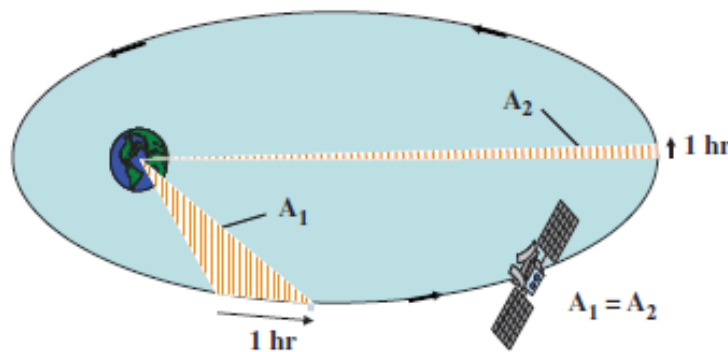
Οι τροχιές των δορυφόρων δύνανται να επηρεαστούν από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των βαρυτικών δυνάμεων, της ατμοσφαιρικής αντίστασης και των συστημάτων πρόωσης που χρησιμοποιούνται για τη συντήρηση ή την επανατοποθέτηση των δορυφόρων σε τροχιά. Για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητος ο προσεκτικός υπολογισμός και σχεδιασμός διάφορων παραμέτρων συμπεριλαμβανομένης της περιοχής κάλυψης, των χρόνων επανεπίσκεψης και της τροχιακής σταθερότητας, πριν από κάθε εκτόξευση στις τροχιές, για την επίτευξη των εκάστοτε στόχων αποστολής. Σε κάθε περίπτωση ωστόσο, λαμβάνονται υπόψιν οι ισχύοντες νόμοι του Kepler, οι οποίοι έχουν καταρχήν εφαρμογή σε οποιαδήποτε περίπτωση αλληλεπίδρασης μεταξύ δύο σωμάτων στο διάστημα μέσω βαρυτικών δυνάμεων, ως εξής:

- α) **Πρώτος Νόμος Kepler-Νόμος των Ελλείψεων:** «Η τροχιά κάθε πλανήτη είναι μια έλλειψη, με τον Ήλιο να βρίσκεται σε μία από τις δύο εστίες.» Αυτός ο νόμος σημαίνει ότι η απόσταση μεταξύ του εκάστοτε πλανήτη και του Ήλιου αλλάζει καθώς ο πλανήτης κινείται στην τροχιά του. Το παραπάνω έχει εφαρμογή και στην περίπτωση της Γης με τους τεχνητούς δορυφόρους, το οποίο πρακτικά σημαίνει ότι το κέντρο μάζας της Γης αποτελεί και τη μία εκ των δύο εστιών της εκάστοτε τροχιακής έλλειψης, το μέγεθος της οποίας εξαρτάται κάθε φορά από τη γραμμική ταχύτητα του δορυφόρου (θεωρητικά εφόσον μιλάμε για ελλειψοειδείς τροχιές η γωνιακή ταχύτητα του δορυφόρου αλλάζει, σε αντίθεση με τη γραμμική ταχύτητα η οποία δύναται να παραμείνει σταθερή). Το γεγονός αυτό διαφαίνεται και στο σχήμα του [16]. Φυσικά, η ύπαρξη ελλειψοειδούς τροχιάς προϋποθέτει την απουσία τυχόν άλλων ασκούμενων στο δορυφόρο δυνάμεων (είτε βαρυτικές από άλλους πλανήτες, είτε τεχνητές-δυνάμεις ελέγχου τροχιάς).



Σχήμα 1. Ελλειπσοειδής Δορυφορική Τροχιά [16]

β) **Δεύτερος Νόμος Kepler- Νόμος των Ίσων Εμβαδών:** «Ένα ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει έναν πλανήτη με τον Ήλιο διαγράφει ίσα εμβαδά σε ίσα χρονικά διαστήματα.» Στην περίπτωση των δορυφόρων σε τροχιά γύρω από τη Γη, το τόξο που διαγράφεται κατά την κίνηση του δορυφόρου και ενώνεται με το κέντρο της Γης, σχηματίζει εμβαδόν ίσο με οποιοδήποτε άλλο εμβαδόν σχηματίζεται με τον ίδιο δορυφόρο στην εν λόγω τροχιά για το ίδιο χρονικό διάστημα κίνησης. Αυτό φαίνεται και στο σχήμα του [16] όπου  $A_1 = A_2$ .



Σχήμα 2. Ελλειπσοειδής Δορυφορική Τροχιά [16]

γ) **Τρίτος Νόμος Kepler- Νόμος των Αρμονιών:** «Το τετράγωνο της περιόδου περιφοράς ενός πλανήτη είναι ανάλογο με τον κύβο του ημιμεγάλου άξονα της τροχιάς του.» Με άλλα λόγια η τροχιακή περίοδος ενός δορυφόρου είναι ανάλογη του κύβου της μέσης απόστασης μεταξύ γης και δορυφόρου. Αυτό μαθηματικά εκφράζεται ως εξής:

$$T^2 = \left[ \frac{4(\pi^2)}{\mu} \right] a^3 \quad (3.1)$$

όπου:

$T$  = Τροχιακή Περίοδος σε sec

$\alpha$  = Μέση απόσταση μεταξύ Γης και Δορυφόρου σε km

$\mu$  = Σταθερά Kepler=βαρυτική παράμετρος του κεντρικού σώματος (εν προκειμένω της Γης)=  $3.986004 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{s}^2$

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι εάν η τροχιά είναι κυκλική, τότε  $\alpha = r$ , οπότε:

$$\alpha = r = \left( \frac{\mu}{4\pi^2} \right)^{\frac{1}{3}} \times T^{\frac{2}{3}} \quad (3.2)$$

Οι παραπάνω σχέσεις συνδέουν την τροχιακή περίοδο ενός δορυφόρου με την μέση απόσταση μεταξύ αυτού και της Γης, επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο τη σωστή σχεδίαση και επιλογή τροχιάς. Δεδομένου λοιπόν ότι ένας δορυφόρος κατά τη διάρκεια της ελλειψοειδούς του κίνησης κινείται πολύ πιο γρήγορα όταν βρίσκεται κοντά στη Γη και επιβραδύνει την κίνησή του καθώς απομακρύνεται από αυτή (παρατηρώντας τον από τη Γη), διανύει πολύ περισσότερο χρόνο παρατηρώντας-εξυπηρετώντας περιοχές που βρίσκονται κοντά στο απόγειο της τροχιάς του (μακρινότερο σημείο). Με αυτόν τον τρόπο και ανάλογα με την εκάστοτε αποστολή και τις περιοχές στις οποίες υπάρχει μεγαλύτερη ανάγκη εξυπηρέτησης/παρατήρησης επιλέγονται αντίστοιχα τα υψόμετρα αλλά και άλλες τροχιακές παράμετροι που θα συζητηθούν στη συνέχεια.

### 3.2 Στοιχεία Προσδιορισμού Τροχιάς

Η τροχιά ενός δορυφόρου καθορίζεται πλήρως από τις τροχιακές του παραμέτρους, γνωστές και ως στοιχεία Kepler (Kepler's elements), οι οποίες αποτελούν μαθηματικές παραμέτρους που χρησιμοποιούνται να για περιγράψουν τόσο κυκλικές όσο και ελλειπτικές τροχιές ουράνιων σωμάτων και δορυφόρων καθώς και να προβλέψουν την θέση ενός δορυφόρου σε δεδομένη μελλοντική στιγμή. Μερικές από τις πιο σημαντικές είναι η κλίση, η εκκεντρότητα και η τροχιακή ακτίνα (για κυκλικές τροχιές), με το τελευταίο να αποτελεί κύριο χαρακτηριστικό, συνδεδεμένο με το υψόμετρο και την απόσταση μεταξύ δορυφόρου και επίγειου σταθμού. Πιο αναλυτικά και σύμφωνα με το [16] υπάρχουν διάφορες παράμετροι οι οποίες χαρακτηρίζουν μία δορυφορική τροχιά αναλόγως της οπτικής από την οποία αυτή εξετάζεται. Στη μεν πρώτη όπως διαφαίνεται στο σχήμα έχουμε τις εξής παραμέτρους:

α) **Απόγειο:** Το μακρινότερο σημείο της τροχιάς από τη Γη.

β) **Περίγειο:** Το κοντινότερο σημείο της τροχιάς στη Γη.

γ) **Line of Ap-sides- «Γραμμή των Αψίδων»:** Ο άξονας που διέρχεται από το κέντρο της Γης και ενώνει το Απόγειο με το Περίγειο της δορυφορικής τροχιάς.

δ) **Εκκεντρότητα  $e$ :** Παράμετρος η οποία περιγράφει το σχήμα της έλλειψης, παίρνοντας τιμές από 0 έως 1. Στην ειδική περίπτωση όπου η εκκεντρότητα είναι 0, η δορυφορική τροχιά σχηματίζει τέλειο κύκλο, με τους Μέγιστο και Ελάχιστο άξονες να είναι απολύτως ίσοι, ενώ όσο πλησιάζει το 1, η τροχιά γίνεται ελλειψοειδής και περισσότερο επιμήκης. Μαθηματικά ορίζεται ως:

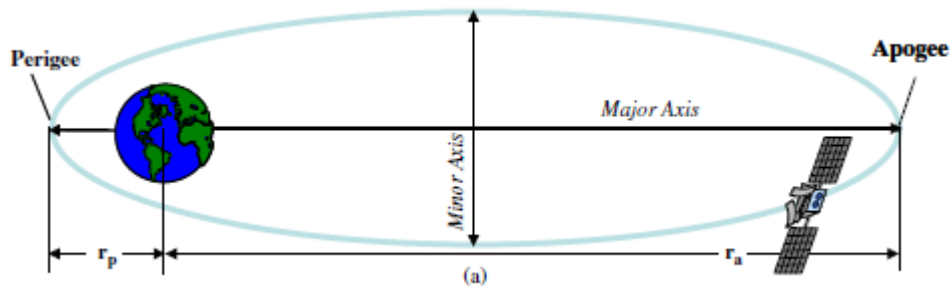
$$e = (r_a - r_p) / (r_a + r_p) \quad (3.3)$$

όπου

$e$  = η εκκεντρότητα της τροχιάς

$r_a$  = η απόσταση μεταξύ του κέντρου της Γης και του Απογείου

$r_p$  = η απόσταση μεταξύ του κέντρου της Γης και του Περιγείου



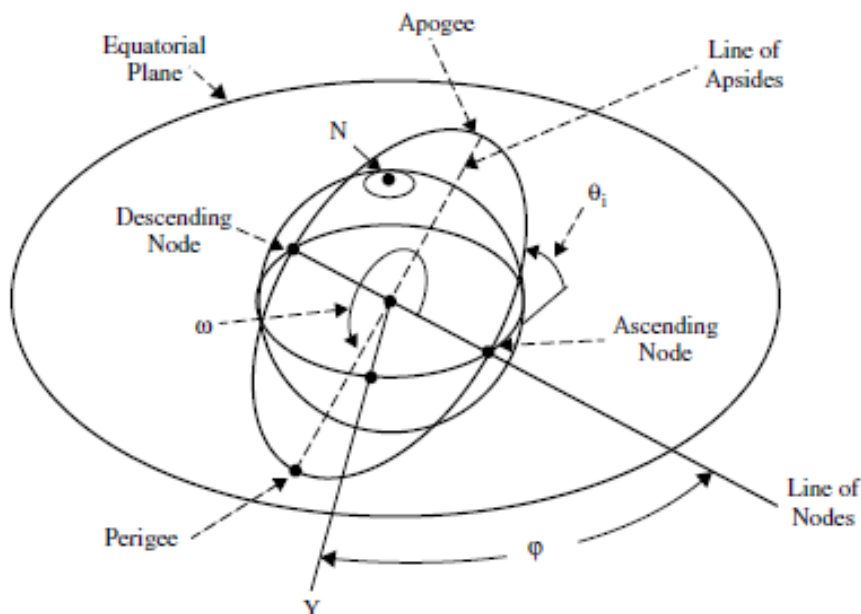
Σχήμα 3. Άξονες Ελλειψοειδούς Δορυφορικής Τροχιάς [16]

Παράλληλα, βάσει της δεύτερης οπτικής του σχήματος που παρατίθεται στη συνέχεια, σημαντικές προς εξέταση παράμετροι είναι οι εξής:

- α) **Line of Ap-sides- «Άξονας των Αψίδων»:** όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι ο άξονας που διέρχεται από το κέντρο της Γης και ενώνει το Απόγειο με το Περίγειο της δορυφορικής τροχιάς.
- β) **Ανερχόμενος Κόμβος:** το σημείο στο οποίο η τροχιά τέμνει το επίπεδο του Ισημερινού με κατεύθυνση από το Νότο προς το Βορρά.
- γ) **Κατερχόμενος Κόμβος:** το σημείο στο οποίο η τροχιά τέμνει το επίπεδο του Ισημερινού με κατεύθυνση από το Βορρά προς το Νότο.
- δ) **Άξονας των Κόμβων:** ο άξονας ο οποίος διέρχεται από το κέντρο της Γης και ενώνει τον ανερχόμενο με τον κατερχόμενο κόμβο
- ε) **Όρισμα Περιγείου,  $\omega$ :** η γωνία πάνω που σχηματίζεται πάνω στο τροχιακό επίπεδο μεταξύ Ανερχόμενου Κόμβου και Περιγείου.

στ) **Γωνία Ορθής Ανέλιξης Ανερχόμενου Κόμβου,  $\phi$**  – η γωνία μετρούμενη πάνω στο επίπεδο του Ισημερινού, αρχόμενη από τον άξονα του πρώτου σημείου του Κριού (Υ), έως τον Ανερχόμενο Κόμβο.

Τέλος μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους αποτελεί η **Γωνία Κλίσης Τροχιάς  $\theta_i$** , η οποία εκτείνεται μεταξύ του τροχιακού επιπέδου και του επιπέδου του Ισημερινού. Ένα δορυφόρος ο οποίος βρίσκεται σε τροχιά με συγκεκριμένη γωνία κλίσης  $\theta_i$  λέγεται ότι βρίσκεται σε ανυψωμένη τροχιά. Στην ειδική περίπτωση όπου η γωνία κλίσης της τροχιάς είναι  $\theta_i=0$ , τότε ονομάζεται Ισημερινή Τροχιά. Αντιθέτως, όταν η γωνία είναι  $\theta_i=90$ , τότε ο δορυφόρος βρίσκεται σε Πολική τροχιά. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4. Στοιχεία Προσδιορισμού επί Δορυφορικής Τροχιάς [16]

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η τροχιά ενός δορυφόρου μπορεί να είναι ελλειψοειδής ή κυκλική, αναλόγως της τροχιακής ταχύτητας και της κατεύθυνσης κίνησης η οποία δόθηκε στον δορυφόρο κατά την εισαγωγή του σε τροχιά. Ωστόσο υπάρχει μία ακόμα διάκριση μεταξύ των δορυφορικών τροχιών ανάλογα με τη φορά κίνησης του εκάστοτε δορυφόρου. Όταν ένας δορυφόρος κινείται με κατεύθυνση ίδια με αυτήν της περιστροφής της Γης, τότε η δορυφορική τροχιά ονομάζεται «Τροχιά Ορθής Φοράς-Prograde Orbit», κατά την οποία η γωνία κλίσης τροχιάς κυμαίνεται μεταξύ 0 και 90 μοιρών. Αντιθέτως, όταν ο δορυφόρος κινείται με κατεύθυνση αντίθετη της περιστροφής της Γης, τότε κινείται σε «Τροχιά Ανάστροφης Φοράς- Retrograde Orbit» με γωνία κλίσης μεταξύ 90 και 180 μοιρών. Η πλειονότητα των δορυφόρων εκτοξεύονται σε τροχιές Ορθής Φοράς, αφού η ταχύτητα

περιστροφής της Γης αυξάνει την τροχιακή ταχύτητα του δορυφόρου, μειώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο την απαιτούμενη για εκτόξευση και τοποθέτηση σε τροχιά ενέργεια.

Σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα συνδυασμών τροχιακών παραμέτρων, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την μοναδική περιγραφή της κίνησης και της ακριβούς θέσης ενός δορυφόρου για κάθε στιγμή  $t$  και οι οποίες ονομάζονται «**Τροχιακά Στοιχεία- *Orbital Elements***». Ο ελάχιστος αριθμός τροχιακών παραμέτρων κάθε φορά είναι έξι και σύμφωνα με το [16] είναι οι εξής ακόλουθες:

- α) Εκκεντρότητα
- β) Ημι-Μέγιστος άξονας (Semi-Major Axis)
- γ) Όρισμα Περιγείου  $\omega$
- δ) Ορθή Ανέλιξη Ανερχόμενου Κόμβου
- ε) Γωνία Κλίσης Τροχιάς
- ζ) Χρόνος Περιγείου

Ο τελευταίος όρος αναφέρεται στην ακριβή χρονική στιγμή που ένας δορυφόρος ή άλλο ουράνιο σώμα βρίσκεται στο πλησιέστερο σημείο της τροχιάς του γύρω από τη Γη. Μπορεί να μετρηθεί ή να υπολογιστεί με διάφορους τρόπους, ανάλογα με τα δεδομένα και τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται, όπως τροχιακοί υπολογισμοί, δεδομένα παρατήρησης ή αναγωγή από τη Μέση Ανωμαλία (τροχιακό στοιχείο που περιγράφει τη θέση του σώματος κατά μήκος της τροχιάς σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή). Μονάδες μέτρησης του εν λόγω στοιχείου είναι συνήθως τα δευτερόλεπτα, λεπτά, ώρες ή ημερομηνίες και συχνά εκφράζεται σε UTC (Coordinated Universal Time)(πχ. 2024-09-10 12:34:56 UTC).

Από τα παραπάνω, καθίσταται εύκολα κατανοητό ότι υπάρχουν άπειροι συνδυασμοί δορυφορικών τροχιακών παραμέτρων που οδηγούν σε ξεχωριστά μοτίβα τροχιάς, καθένα από τα οποία εξυπηρετεί συγκεκριμένους σκοπούς και εφαρμογές. Μάλιστα, αναλόγως της αποστολής τους και κατά συνέπεια της αρχιτεκτονικής τους στο διάστημα, τα δορυφορικά δίκτυα σύμφωνα με το [17] κατηγοριοποιούνται σε δίκτυα ενός στρώματος (ενός κελύφους ή επιπέδου) και πολυεπίπεδα δίκτυα.

### 3.3 Είδη και Χαρακτηρισμός Δορυφορικών Τροχιών

Ένα δίκτυο ενός επιπέδου παρέχει επικοινωνία μόνο μεταξύ δορυφόρων που βρίσκονται στο ίδιο υψόμετρο, ενώ τα πολυεπίπεδα δίκτυα επιτρέπουν την επικοινωνία μεταξύ δορυφόρων σε διαφορετικά κελύφη. Η πολυεπίπεδη δικτύωση είναι σαφώς πιο περίπλοκη από την δικτύωση ενός

επιπέδου, αλλά υποστηρίζεται λόγω της ευελιξίας που παρέχει όσον αφορά την βιώσιμη παγκόσμια κάλυψη, τις απρόσκοπτες παραδόσεις δεδομένων και την εξασφάλιση αξιόπιστων επικοινωνιών. Κατά συνέπεια διακρίνουμε τις παρακάτω κατηγορίες δορυφορικών τροχιών με τους αντίστοιχους δορυφόρους, οι οποίοι κι αυτοί με τη σειρά τους διαφοροποιούνται αναλόγως της αποστολής τους, του μεγέθους τους και του εξοπλισμού τον οποίο φέρουν:

### 3.3.1 Χαμηλή τροχιά της γης (LEO)

Ονομάζεται η δορυφορική τροχιά η οποία κυμαίνεται από τα 160 χιλιόμετρα (99 μίλια) έως 2.000 χιλιόμετρα (1.240 μίλια) περίπου πάνω από την επιφάνεια της Γης και η κλίση της οποίας ποικίλει αναλόγως της αποστολής, με τη συνηθέστερη ωστόσο να βρίσκεται κοντά στο επίπεδο του Ισημερινού. Αποτελεί την χαμηλότερη τροχιακή ζώνη και βρίσκεται κάτω από τη Μέση Τροχιά της Γης (MEO) και σημαντικά χαμηλότερα από τη Γεωστατική τροχιά (GEO). Οι τροχιές των δορυφόρων σε αυτό το επίπεδο (LEO) εμφανίζονται ως ταχέως μεταβαλλόμενα τόξα στον ουρανό, παρέχοντας χαμηλή καθυστέρηση και συχνές δορυφορικές διελεύσεις σε οποιαδήποτε δεδομένη τοποθεσία. Μάλιστα, η ταχύτητά τους είναι τόσο υψηλή που οδηγεί πολλές φορές, σε πολλές προσομοιώσεις να μην λαμβάνεται υπόψιν η κίνηση των επίγειων χρηστών, αφού η ταχύτητά τους σε σχέση με αυτήν των δορυφόρων που βρίσκονται σε LEO τροχιές θεωρείται αμελητέα και αγνοείται.

Οι δορυφόροι LEO κινούνται με υψηλές ταχύτητες, ολοκληρώνοντας μια τροχιά γύρω από τη Γη σε περίπου 90 λεπτά έως μερικές ώρες, διάστημα το οποίο είναι το μικρότερο σε σχέση με τις περιόδους των δορυφόρων σε υψηλότερα τροχιακά επίπεδα. Σύμφωνα με το [17] η ταχύτητά τους αγγίζει τα 7,5 km/s σε σχέση με ένα σταθερό σημείο στη Γη (σταθμός εδάφους) και η τροχιακή τους περίοδος κυμαίνεται στο εύρος των 90–110 λεπτών. Η επικοινωνία μεταξύ δορυφόρου και επίγειου σταθμού ενεργοποιείται μόνο όταν ο δορυφόρος είναι σταθεροποιημένος στη διαστημική του τροχιά και είναι ορατός από τον επίγειο σταθμό (χρήστης). Η διάρκεια επικοινωνίας μεταξύ των δορυφόρων και των εκάστοτε επίγειων σταθμών διαρκεί κατά μέσο όρο μεταξύ 5–15 λεπτών, για 6–8 φορές κατά τη διάρκεια της ημέρας (Cakaj και Malaric, 2007). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble, το οποίο λειτουργεί σε υψόμετρο περίπου 610 km, με τροχιακή περίοδο 97 λεπτών (Oberright, 2004). Μάλιστα, LEO δορυφόροι με κατάλληλα δοσμένη κλίση μπορούν να προσφέρουν κάλυψη σε περιοχές μεγάλου γεωγραφικού πλάτους, συμπεριλαμβανομένων και των πολικών περιοχών, όπου η κάλυψη μέσω GEO δορυφόρων, όπως θα δούμε και στη συνέχεια, είναι αδύνατη. Σύμφωνα με το [16] ορισμένα σύγχρονα δορυφορικά δίκτυα για να επιτύχουν αυτού του είδους την κάλυψη χρησιμοποιούν 12, 24 είτε 66 LEO δορυφόρους.

Επιπρόσθετα, η πεπλατυσμένη (μη σφαιρική) μορφή της Γης οδηγεί σε δύο κύριες διαταραχές όσον αφορά στη τροχιά των LEO δορυφόρων. Η πρώτη συνδέεται με το σημείο του Ισημερινού, στο οποίο ο δορυφόρος τέμνει το νοητό επίπεδο με κατεύθυνση από το Νότο προς το Βορρά (Ανερχόμενος Κόμβος), και το οποίο μετατοπίζεται δυτικά μερικές μοίρες ανά ημέρα. Η δεύτερη κύρια διαταραχή



αφορά στη περιστροφή του Μέγιστου Άξονα στο τροχιακό επίπεδο είτε ωρολογιακά είτε ανθρωρολογιακά. Ωστόσο, εάν η κλίση είναι περίπου 63 μοίρες, οι δυνάμεις που προκαλούν αυτή την περιστροφή εξισορροποούνται και η κατεύθυνση του μεγάλου άξονα παραμένει σταθερή. Βάσει των παραπάνω και σύμφωνα με το [17], παράλληλα με την κίνηση των δορυφόρων στις τροχιές τους γύρω από τη Γη, πραγματοποιείται και περιστροφή της Γης γύρω από τον B-N άξονά της. Ως εκ τούτου, ο επίγειος σταθμός στην επιφάνεια της Γης φαίνεται να αλλάζει τη θέση του σε σχέση με το χωρικό τροχιακό επίπεδο, με αποτέλεσμα η στόχευση του δορυφόρου από τον επίγειο σταθμό (χρήστη) να μην είναι ίδια μεταξύ των διαφορετικών δορυφορικών περασμάτων της ίδια τροχιάς κατά τη διάρκεια της ημέρας. Έτσι, η προβολή του δορυφόρου διαφέρει για κάθε ημερήσιο πέρασμα σε σχέση με τον επίγειο σταθμό (χρήστη), με αποτέλεσμα οι διαφορετικές θεάσεις του δορυφόρου από αυτόν (σταθμός εδάφους) να σημαίνουν διαφορετικής διάρκειας ορατότητα μεταξύ αυτού και του δορυφόρου, και κατά συνέπεια διαφορετικής διάρκειας επικοινωνία μεταξύ των τροχιακών περασμάτων, το οποίο αποτελεί σημαντικό προς μελέτη χαρακτηριστικό για τις LEO τροχιές. Συμπερασματικά, από έναν επίγειο σταθμό σε συγκεκριμένο σημείο στην επιφάνεια της Γης (σημείο τοποθεσίας χρήστη), ο δορυφόρος στην τροχιά του φαίνεται διαφορετικά για κάθε δορυφορικό πέρασμα, με αποτέλεσμα κάθε φορά να παρέχεται και διαφορετικής διάρκειας επικοινωνίας στο χρήστη (Cakaj και Malaric, 2007), γεγονός το οποίο ισχύει για οποιονδήποτε σταθμό (χρήστη) στην επιφάνεια της Γης.

Όσον αφορά στο υψόμετρο στη Χαμηλή τροχιά της Γης, αυτό περιορίζεται στο κάτω όριο του από την ατμόσφαιρα, αφού ξεκινάει από το άνω επίπεδο της ατμόσφαιρας της Γης όπου δεν υπάρχει σχεδόν καθόλου αέρας με σκοπό την αποφυγή της μείωσης της ταχύτητας του δορυφόρου και της βαρυτικής έλξης και εκτείνεται έως την εσωτερική ζώνη Van Allen (Ζώνη ακτινοβολίας Van Allen, 2020). Η ζώνη αυτή είναι γνωστή ως ζώνη διαστημικής ακτινοβολίας και έχει ανεπιθύμητες επιπτώσεις στις πλατφόρμες και τα ωφέλιμα φορτία των δορυφόρων, αφού είναι ικανή να προξενήσει σημαντικές βλάβες σε ηλεκτρονικά εξαρτήματα και ηλιακά πάνελς και για τον λόγο αυτό καθίσταται απαγορευτική η χρήση της. Παρ' όλ' αυτά οι δορυφόροι LEO αντιμετωπίζουν ατμοσφαιρική έλξη (atmospheric drag) ακόμα και σε αυτά τα υψόμετρα, με αποτέλεσμα να χάνουν σταδιακά ενέργεια και τελικά να εισέρχονται ξανά στην ατμόσφαιρα της Γης, όπου καίγονται κατά την επανείσοδο.

Οι δορυφόροι LEO χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της παρατήρησης της Γης, της τηλεπισκόπησης, της επιστημονικής έρευνας και ορισμένων υπηρεσιών επικοινωνίας. Μάλιστα σύμφωνα με το [17] συνήθως, οι δορυφόροι LEO που προορίζονται για επιστημονικούς σκοπούς ή εφαρμογές τηλεπισκόπησης φιλοξενούνται σε ειδικά σχεδιασμένες τροχιές, γνωστές ως Τροχιές συγχρονισμένες με τον Ήλιο (Sun Synchronized). Οι δορυφόροι στις SSO (Sun Synchronized Orbits) έχουν κλίση η οποία ποικίλει, ωστόσο διατηρούν μια σταθερή γωνία σε σχέση με τον Ήλιο καθώς περνούν από την ίδια γεωγραφική θέση την ίδια τοπική ηλιακή ώρα κατά τη διάρκεια κάθε τροχιάς και χρησιμοποιούνται συχνά για παρατήρηση της Γης και περιβαλλοντική

παρακολούθηση, καθώς εξασφαλίζουν σταθερές συνθήκες φωτισμού κατά την απεικόνιση (Cakaj κ.α, 2005; Cakaj κ.α, 2009).

Επιπλέον, λόγω χαμηλού υψομέτρου, οι LEO δορυφόροι προσφέρουν υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων και χαμηλή καθυστέρηση, που σημαίνει ότι ο χρόνος διαδρομής του σήματος μεταξύ επίγειων σταθμών και δορυφόρων είναι σχετικά σύντομος. Το γεγονός αυτό τους καθιστά κατάλληλους για υπηρεσίες επικοινωνίας σε πραγματικό χρόνο, όπως φωνητικές κλήσεις και βιντεοκλήσεις, διαδικτυακά παιχνίδια, τηλεδιάσκεψη και γενικότερα σύνδεση στο Διαδίκτυο, με αποτέλεσμα πολλές εταιρείες την σήμερον ημέρα να στρέφουν την προσοχή τους στην ανάπτυξη LEO συστημάτων για την παροχή παγκόσμιας κάλυψης και παροχή υπηρεσιών με απαιτήσεις στην μετάδοση δεδομένων.

Ωστόσο, οι δορυφόροι LEO μεμονωμένα παρέχουν περιορισμένη κάλυψη σε σχέση με τους δορυφόρους σε υψηλότερες τροχιές, πράγμα που σημαίνει ότι μπορούν να επικοινωνούν κάθε φορά μόνο με μια συγκεκριμένη περιοχή στην επιφάνεια της Γης κατά τη διάρκεια κάθε περάσματος. Έτσι, για την επίτευξη συνεχούς παγκόσμιας κάλυψης απαιτείται η ανάπτυξη δορυφορικών αστερισμών με πολλαπλούς δορυφόρους, καθώς και ο συντονισμός αυτών για την μετάδοση δεδομένων επικοινωνίας μεταξύ τους, παράλληλα με την κίνησή τους στις τροχιές. Πολλά σύγχρονα συστήματα δορυφορικής επικοινωνίας και εταιρείες, όπως η Starlink, η SpaceX και η OneWeb, βασίζονται σε δορυφορικούς μεγα-αστερισμούς LEO οι οποίοι αποτελούνται από εκατοντάδες ή και χιλιάδες δορυφόρους που συνεργάζονται για την εξασφάλιση της παγκόσμιας παροχής υπηρεσιών διαδικτύου και επικοινωνίας.

Αυτό φυσικά έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους των δορυφορικών έργων και της πολυπλοκότητας των επίγειων σταθμών που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία με τους ταχέως κινούμενους δορυφόρους στον ουρανό. Ο λόγος είναι ότι απαιτείται η ύπαρξη πιο εξελιγμένων συστημάτων εντοπισμού και παρακολούθησης, με σκοπό την διατήρηση σταθερής σύνδεσης με τους δορυφόρους, αλλά και πιο εξελιγμένα συστήματα γενικότερα για τον συντονισμό και πραγματοποίηση συχνότερων μεταγωγών, εξαιτίας του πλήθους των δορυφόρων του εκάστοτε αστερισμού που κινούνται σε διαφορετικά υψόμετρα και με διαφορετικές ταχύτητες μεταξύ τους. Από την άλλη πλευρά ωστόσο, το κόστος αυτό περιορίζεται μερικώς από το χαμηλό κόστος εκτόξευσης που απαιτείται για τους LEO δορυφόρους στις τροχιές τους, οι οποίες βρίσκονται σε χαμηλότερα υψόμετρα σε σχέση με τις υπόλοιπες κατηγορίες.

### 3.3.2 Μέση τροχιά της γης (MEO)

Ως Μέση τροχιά της Γης (MEO) ορίζεται κάθε δορυφορική τροχιά η οποία βρίσκεται σε υψόμετρο από 2.000 (1.240 μίλια) έως 35.786 χιλιόμετρα (22.236 μίλια) πάνω από την επιφάνεια της Γης, ζώνη η οποία βρίσκεται μεταξύ της χαμηλής (LEO) και της γεωστατικής τροχιάς (GEO) της Γης. Οι τροχιακές περίοδοι των MEO δορυφόρων είναι κατά κανόνα πιο αργές από τις τροχιές των LEO, καθώς κυμαίνονται μεταξύ 2 και 24 ωρών αναλόγως του υψομέτρου στο οποίο βρίσκονται και η κλίση

τους ποικίλει, αλλά συχνά χρησιμοποιούνται κεκλιμένες τροχιές κυρίως για δορυφόρους πλοήγησης. Σύμφωνα με το [16] οι MEO δορυφόροι παρέχουν 1 με 2 ώρες χρόνο παρατήρησης σε ένα τερματικό επί σταθερού σημείου πάνω στη Γη. Αποτελούν τη μέση λύση μεταξύ των LEO και GEO δορυφόρων, αφού εν συγκρίσει με την πρώτη κατηγορία παρουσιάζουν υψηλότερη καθυστέρηση μετάδοσης δεδομένων, παρέχοντας όμως ταυτόχρονα μεγαλύτερη περιοχή κάλυψης για κάθε δορυφόρο μεμονωμένα, καθιστώντας τους κατάλληλους για παροχή παγκόσμιων ή περιφερειακών υπηρεσιών επικοινωνίας που απαιτούν συνεχή κάλυψη σε μεγάλη γεωγραφική έκταση. Επίσης, η καθυστέρηση μετάδοσης δεδομένων που παρουσιάζουν είναι σημαντικά μικρότερη σε σχέση με τους Γεωστατικούς Δορυφόρους και γι' αυτό τον λόγο θεωρούνται επωφελείς για εφαρμογές που απαιτούν επικοινωνία σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο, όπως φωνητικές κλήσεις, τηλεδιάσκεψη και εφαρμογές παιχνιδιών, πόσο μάλλον δε όταν χρησιμοποιούνται σε πολυεπίπεδες αρχιτεκτονικές και συνδυάζονται σε αστερισμούς με δορυφόρους χαμηλότερης τροχιάς.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός τέτοιου αστερισμού αποτελεί ο O3B («Other 3 Billion»-«Άλλα 3 δισεκατομμύρια»), ο οποίος είναι ένας δορυφορικός αστερισμός που λειτουργεί από τη SES Networks, με σκοπό την παροχή υπηρεσιών διαδικτύου και τηλεπικοινωνιών υψηλής ταχύτητας και χαμηλής καθυστέρησης σε περιοχές με περιορισμένη ή καθόλου επίγεια υποδομή, κυρίως σε αναπτυσσόμενες χώρες. Επιπρόσθετα, το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης (GPS) χρησιμοποιεί επίσης δορυφόρους MEO (όπως και το σύστημα GLONASS), σε τροχιά περί τα 20.200 χιλιόμετρα (12.550 μίλια) για την παροχή υπηρεσιών με ακρίβεια εντοπισμού θέσης, πλοήγησης και χρονισμού για τους επίγειους τελικούς χρήστες στη Γη. Όπως είναι φυσικό η πολυπλοκότητα των επίγειων σταθμών είναι όπως και στην περίπτωση των LEO δορυφόρων υψηλή, αφού απαιτείται ο ακριβής εντοπισμός και παρακολούθηση των εν κινήσει MEO δορυφόρων και μάλιστα σε υψόμετρα μεγαλύτερα από αυτά των δορυφόρων χαμηλής τροχιάς.

### 3.3.3 Γεωστατική τροχιά (GEO)

Γεωστατική τροχιά (GEO) ονομάζεται κάθε τροχιά η οποία βρίσκεται σε υψόμετρο περί τα 35.786 χιλιόμετρα (22.236 μίλια) πάνω από τον ισημερινό της Γης και έχει μηδενική κλίση. Οι δορυφόροι σε αυτές τις τροχιές έχουν ταχύτητα η οποία ταιριάζει με την ταχύτητα περιστροφής της Γης και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζονται ως σταθερά σημεία στον ουρανό, όταν το σημείο παρατήρησης είναι σταθερό στην επιφάνεια της Γης. Μία Γεωστατική τροχιά παρέχει σταθερή διαδρομή από το έδαφος προς τον δορυφόρο, με αποτέλεσμα την ύπαρξη ελάχιστων ή και καθόλου απαιτήσεων για παρακολούθηση του δορυφόρου από το έδαφος. Θεωρητικά ένας δορυφόρος σε γεωστατική τροχιά "βλέπει" περίπου το ένα τρίτο της επιφάνειας της Γης, οπότε τρεις γεωστατικοί δορυφόροι, τοποθετημένοι 120° μακριά ο ένας από τον άλλον στο ισημερινό επίπεδο, θα μπορούσαν να παρέχουν παγκόσμια κάλυψη, εκτός από τις περιοχές των πόλων (λόγω της καμπυλότητας της Γης). Ωστόσο η περίπτωση των GEO δορυφόρων αποτελεί μία ιδανική περίπτωση, η οποία δεν δύναται να επιτευχθεί υπό πραγματικές συνθήκες, λόγω της ύπαρξης πολλών επιπλέον δυνάμεων, πέραν της

βαρυτικής έλξης, οι οποίες ασκούνται σε έναν δορυφόρο κατά τη διάρκεια της κίνησής του στο τροχιακό επίπεδο. Συνεπώς μία τέτοια προσπάθεια θα απαιτούσε την ύπαρξη εκτενούς ελέγχου της θέσης του δορυφόρου και υπέρογκων ποσοτήτων καυσίμων για επανατοποθέτηση σε τροχιά και διατήρηση αυτής.

Τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα οι τροχιές οι οποίες επιτυγχάνονται υπό πραγματικές συνθήκες να αφορούν τροχιές με κλίσεις και εκκεντρότητες ελαφρώς μεγαλύτερες από το 0, οι οποίες ονομάζονται «Γεωσύγχρονες Τροχιές» (*«geosynchronous earth orbit (GSO)»*). Σύμφωνα με το [16] το υψηλότερο γεωγραφικό πλάτος στο οποίο δύναται να γίνει παρατήρηση GSO δορυφόρων από έναν επίγειο σταθμό είναι 70° Βόρεια ή Νότια υποθέτοντας κεραία επίγειου παρατηρητή υπό γωνία ανύψωσης 10°. Οι προαναφερθείσες τροχιές αδυνατούν να προσφέρουν κάλυψη σε περιοχές μεγαλύτερου γεωγραφικού πλάτους, λόγω τεράστιας αύξησης τόσο του κόστους όσο και της συνολικής πολυπλοκότητας του συστήματος προκειμένου να είναι εφικτή η παρακολούθηση της κεραίας εδάφους. Επίσης, η κατανομή των γεωστατικών τροχιακών θέσεων (slots) ρυθμίζεται από διεθνείς συνθήκες, μέσω της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών, παράλληλα φυσικά με την κατανομή ζωνών συχνοτήτων και υπηρεσιών.

Όπως είναι λογικό, επειδή οι δορυφόροι βρίσκονται σε υψηλότερο υψόμετρο σε σχέση με τις τροχιές των υπόλοιπων κατηγοριών, σε αυτή την κατηγορία παρουσιάζονται οι μεγαλύτερες απώλειες διαδρομής αλλά και η μεγαλύτερη καθυστέρηση διάδοσης δεδομένων, αφού λόγω υψόμετρου η διαδρομή την οποία πρέπει να διασχίσει ένα σήμα είναι η μεγαλύτερη σε σχέση με των υπόλοιπων κατηγοριών. Ωστόσο για τον ίδιο λόγο επίσης παρουσιάζουν και τη μεγαλύτερη περιοχή κάλυψης. Έτσι οι δορυφόροι GEO παρέχουν συνεχή κάλυψη σε συγκεκριμένες περιοχές, καθιστώντας τους ιδανικούς για διάφορες εφαρμογές όπως τηλεοπτικές εκπομπές, παρακολούθηση καιρού και υπηρεσίες επικοινωνίας οι οποίες δεν είναι ευαίσθητες στην καθυστέρηση.

Επιπλέον, σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των δορυφόρων σε LEO και MEO τροχιές, είναι ότι στη συγκεκριμένη κατηγορία σχεδόν εξαλείφεται το φαινόμενο Doppler ενώ επίσης, βάσει των απαιτήσεων της ITU και των διάφορων εθνικών ρυθμιστικών φορέων ραδιοφάσματος, η προτεραιότητα των δορυφορικών επικοινωνιών υψηλής τροχιάς στις περισσότερες ζώνες συχνοτήτων είναι υψηλότερη από εκείνη των δορυφορικών επικοινωνιών χαμηλής τροχιάς, με αποτέλεσμα οι Γεωστατικοί Δορυφόροι να μην υποχρεούνται σε συχνές μεταγωγές συχνοτήτων (handovers), με ό,τι συνεπάγεται αυτό στον υπολογιστικό φόρτο, τον απαιτούμενο εξοπλισμό και το κόστος αυτού. Φυσικά το κόστος κατασκευής και εκτόξευσης ενός τέτοιου δορυφόρου είναι κατ' αρχήν υψηλότερο σε σχέση με δορυφόρους σε χαμηλότερες τροχιές, ωστόσο σχετικά πρόσφατα κατέστη δυνατή η εκτόξευση νανοδορυφόρων από τον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό (International Space Station- ISS) (List of spacecrafts deployed from the International Space Station, 2020) και σύμφωνα με το (Cakaj κα., 2015) οι LEO τροχιές μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο στην εκτόξευση GEO δορυφόρων, αποτελώντας

το πρώτο επίπεδο σε μία διαδικασία μεταφοράς σε τρία βήματα (Hohmann transfer), εξοικονομώντας με αυτόν τον τρόπο από την απαιτούμενη ενέργεια τοποθέτησης ενός GEO δορυφόρου σε τροχιά. Μάλιστα οι σύγχρονες εξελίξεις συνεισφέρουν στην αύξηση του όγκου δεδομένων μετάδοσης των Γεωστατικών δορυφόρων αλλά και του χρόνου ζωής τους στο διάστημα το οποίο αγγίζει τα 20 και πλέον έτη.

### 3.3.4 Υψηλή Ελλειπτική τροχιά της γης (HEO)

Σε αυτή την κατηγορία η κλίση των τροχιών διαφέρει αναλόγως της αποστολής των δορυφόρων, ωστόσο σύμφωνα με το [Mallard Bousquet] οι HEO τροχιές έχουν κλίση  $64^\circ$  ως προς το επίπεδο του ισημερινού. Το υψόμετρό τους ξεπερνάει σε ορισμένα τμήματα τα 35.786 χιλιόμετρα, με αυτό να μεταβάλλεται σημαντικά μεταξύ του απογείου (υψηλότερο σημείο ελλειψοειδούς τροχιάς) και του περιγείου (χαμηλότερο σημείο τροχιάς). Οι τροχιές αυτές είναι ιδιαίτερα ευσταθείς σε ό,τι αφορά τις ιδιομορφίες του γήινου βαρυτικού πεδίου και λόγω της κλίσης τους, επιτρέπουν στους δορυφόρους να καλύπτουν περιοχές με μεγάλο γεωγραφικό πλάτος, κατά τη διάρκεια ενός μεγάλου μέρους της τροχιακής περιόδου, καθώς αυτοί περνούν από το απόγειό τους. Χρησιμοποιούνται συνήθως για εξειδικευμένες εφαρμογές επικοινωνίας, παρατήρηση καιρού και επιτήρηση, κυρίως σε πολικές περιοχές και είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για επικοινωνία δορυφορικών συστημάτων με κινητούς σταθμούς, όταν οι γωνίες ανύψωσης είναι μικρότερες των  $30^\circ$  και παρεμβάλλονται εμπόδια ή υπάρχουν εμφανείς επιπτώσεις από την πολλαπλότητα της διαδρομής.

Για τους παραπάνω λόγους αυτού του είδους οι τροχιές υιοθετήθηκαν από τη Σοβιετική Ένωση για τους δορυφόρους του συστήματος Molniya, οι οποίοι έχουν εξαιρετικά ελλειπτικές και κεκλιμένες τροχιές. Είναι σχεδιασμένες να παρέχουν εκτεταμένη κάλυψη σε περιοχές μεγάλου γεωγραφικού πλάτους, όπως η βόρεια Ρωσία και διαθέτουν δορυφόρους αργής κίνησης στα απόγεία τους, παρέχοντας παρατεταμένους χρόνους παραμονής σε συγκεκριμένες περιοχές, με τροχιακή περίοδο 12 ωρών.[Bousquet]. Μια τυπική Molniya τροχιά έχει ύψος περιγείου περίπου 1000 χλμ και ύψος απόγειου σχεδόν 40.000 χλμ. Αυτό αντιστοιχεί σε εκκεντρότητα περίπου 0,722. Η κλίση επιλέγεται στις  $63,4^\circ$  για να αποτραπεί η περιστροφή του κύριου άξονα, όπως περιγράφεται σε προηγούμενη ενότητα. Μάλιστα 3 δορυφόροι τοποθετημένοι σε αυτές τις τροχιές με κατάλληλη σχετική φάση είναι αρκετοί για την παροχή συνεχούς κάλυψης, αφού κάθε δορυφόρος παραμένει πάνω από τις περιοχές που βρίσκονται κάτω από το απόγειό του για διάστημα της τάξεως των 8 ωρών. Επιπλέον υπάρχουν μελέτες οι οποίες αναφέρονται σε ελλειπτικές τροχιές με ακόμα μεγαλύτερες τροχιακές περιόδους, πολλαπλασίες των 12 ωρών, όπως οι Τροχιές TUNDRA με περίοδο που φτάνει έως και 24 ώρες.

### 3.3.5 Πολική τροχιά

Οι δορυφόροι που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία τροχιών παρέχουν κάλυψη ολόκληρης της υδρογείου, περνώντας κοντά ή πάνω από τους πόλους της Γης σε κάθε τροχιακή περίοδο, με κλίση

τροχιάς κοντά στις  $90^\circ$ . Οι συνηθέστερες αποστολές σε αυτήν την κατηγορία είναι η παρατήρηση και απεικόνιση της Γης, αποστολές τηλεπισκόπησης και επιστημονικές έρευνες. Σύμφωνα με το [16] για παράδειγμα, η Landsat, επιχειρούσε σε υψόμετρο περί τα 912 km, με τροχιακή περίοδο 103 λεπτών, διαγράφοντας 14 δορυφορικές περιφορές ανά ημέρα. Κάθε μέρα η τροχιά μετατοπιζόταν περί τα 160 km δυτικά στο Ισημερινό επίπεδο, επιστρέφοντας στην αρχική του θέση μετά από 18 ημέρες και 252 περιφορές-δορυφορικά περάσματα.

### 3.4 Λογισμικά Προσδιορισμού Τροχιακών Παραμέτρων

Υπάρχουν αρκετά πακέτα λογισμικού που είναι διαθέσιμα για τον προσδιορισμό των παραμέτρων τροχιάς για δίκτυα δορυφόρων τόσο σε GSO όσο και NGSO τροχιές και τα οποία αποτελούν εργαλεία ζωτικής σημασίας για τους διαχειριστές δορυφόρων, τους προγραμματιστές αποστολών και τους μηχανικούς καθώς επιτρέπουν τον προσδιορισμό της θέσης, της ταχύτητας και των συνολικών παραμέτρων τροχιάς του δορυφόρου. Ανάλογα με τη φύση, την πολυπλοκότητα της εκάστοτε αποστολής και τις ανάγκες ακρίβειας ανάλυσης, η επιλογή του λογισμικού ποικίλει από λογισμικό υψηλής ακρίβειας για ανάλυση αποστολών (π.χ., STK, GMAT, Orekit) έως βιβλιοθήκες ανοιχτού κώδικα (π.χ., Orekit, GMAT) και εξειδικευμένο λογισμικό βασισμένο σε TLE προβλέψεις τροχιακής θέσης δορυφόρου (π.χ., SGP4, Skyfield).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Κάλυψη

### 4.1 Γενικά περί Δορυφορικής Κάλυψης

Από την οπτική των τηλεπικοινωνιών , βασικός στόχος για το μέλλον, ο οποίος έχει ήδη αρχίσει να υλοποιείται από διάφορες εταιρείες, είναι η ανάπτυξη συστημάτων επικοινωνίας τα οποία έχουν την δυνατότητα παροχής υψηλής ποιότητας ευρυζωνικών υπηρεσιών με παγκόσμια κάλυψη [18,19] και ένα από τα βασικά εργαλεία υλοποίησης αυτών των συστημάτων είναι οι δορυφορικοί αστερισμοί. Ο δορυφορικός αστερισμός είναι ένα σύστημα πανομοιότυπων δορυφόρων που εκτοξεύονται σε πολλά τροχιακά επίπεδα με τις τροχιές να έχουν το ίδιο ή και διαφορετικό ύψος (συνήθως χαμηλής (LEO) ή μέσης τροχιάς (MEO) ή συνδυασμός αυτών ) και αποτελεί μια βολική λύση δικτύου για παγκόσμια κάλυψη σε πραγματικό χρόνο.

Οι επίγειοι σταθμοί μπορούν να επικοινωνούν με δορυφόρους μόνο όταν ο δορυφόρος βρίσκεται στην περιοχή ορατότητάς τους. Η επικοινωνία αυτή ξεκινάει όταν ο δορυφόρος τοποθετηθεί στην τροχιακή του θέση και η διάρκεια της ορατότητας και της επικοινωνίας ποικίλλει για κάθε δορυφορικό πέρασμα πάνω από το σταθμό όταν μιλάμε για LEO και MEO δορυφόρους. Σύμφωνα με το [19] Οι LEO δορυφόροι έχουν περίοδο τροχιάς από 90 έως 110 min. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι λόγω της πολύ υψηλής τους ταχύτητας σε σχέση με άλλους δορυφόρους η κεραία του επίγειου σταθμού θα πρέπει να ακολουθεί την πορεία του εκάστοτε δορυφόρου με μεγάλη ακρίβεια στόχευσης. Η διάρκεια επαφής της επικοινωνίας μεταξύ ενός τέτοιου δορυφόρου και ενός επίγειου σταθμού κυμαίνεται μεταξύ 5 και 15 λεπτών για 6 με 8 φορές ανά ημέρα.

Η περιοχή κάλυψης του δορυφόρου ορίζεται ως μια περιοχή της Γης (συνήθως κυκλική) όπου ο δορυφόρος φαίνεται από τον επίγειο σταθμό, από μια ελάχιστη προκαθορισμένη γωνία ανύψωσης, η οποία προσδιορίζεται από τις προδιαγραφές του link budget του εκάστοτε συστήματος και εξαρτάται από τροχιακές παραμέτρους. Συνήθως η περιοχή κάλυψης εκφράζεται σε ποσοστό, ως κλάσμα της επιφάνειας της Γης [20],[21]-[23]. Μάλιστα, η σύγχρονη τεχνολογική εξέλιξη στον τομέα σχεδίασης των κεραιών σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η κατανομή των User Terminals σε διαφορετικές περιοχές και χώρες, καθώς και η κατανομή ζήτησης υπηρεσιών, παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους, έχουν οδηγήσει πλέον στη δημιουργία ευέλικτων δορυφορικών συστημάτων πολλαπλής δέσμης, η οποία επιτρέπει τον διαχωρισμό της περιοχής κάλυψης ενός δορυφόρου σε πολλά κελιά, καθιστώντας με αυτόν τον τρόπο εφικτή την αναχρησιμοποίηση συχνότητας εντός της περιοχής αυτής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Space-X η οποία χρησιμοποιεί phased-array κεραίες για την παροχή μεγάλου αριθμού spot-beams για επίτευξη ευέλικτης κάλυψης. Φυσικά με αυτόν τον τρόπο

αποφεύγεται η κατασπατάληση πόρων, ωστόσο δημιουργείται η ανάγκη για ευέλικτη διαχείριση και χρήση αυτών καθώς και η ανάγκη για on-board υπολογισμούς.

## 4.2 Βασικά Στοιχεία και Εξισώσεις

Ως γνωστόν οι LEO αλλά και οι MEO δορυφόροι κινούνται έχοντας ως σημείο αναφοράς ένα συγκεκριμένο σταθερό σημείο στην επιφάνεια της γης, και μαζί με την κίνηση του δορυφόρου αλλάζει συνεχώς και η περιοχή κάλυψης, σχηματίζοντας έτσι μία ολόκληρη ζώνη κάλυψης, η μετατόπιση της οποίας βέβαια οδηγεί τον εκάστοτε δορυφόρο στο να χάνεται σιγά σιγά από το οπτικό πεδίο ενός επίγειου σταθμού, ενώ ταυτόχρονα εισέρχεται στο οπτικό πεδίο ενός άλλου. Με αυτόν τον τρόπο δορυφόροι οι οποίοι βρίσκονται σε ίδιο υψόμετρο και σε διαφορετική κλίση σχηματίζουν διαφορετικές ζώνες επιτυγχάνοντας με αυτόν τον τρόπο παγκόσμια κάλυψη [19]. Ουσιαστικά το μοντέλο παγκόσμιας κάλυψης βασίζεται στους δορυφορικούς αστερισμούς οι οποίοι ουσιαστικά βασίζονται με τη σειρά τους στη δικτύωση της κάλυψης μεμονωμένων δορυφόρων [20],[24]-[27]. Μάλιστα, για την επίτευξη παγκόσμιας κάλυψης, θα πρέπει θεωρητικά το άθροισμα των περιοχών κάλυψης του συνόλου των δορυφόρων ενός αστερισμού να είναι τουλάχιστον ίσο με τη συνολική επιφάνεια της Γης. Στην πράξη ωστόσο θεωρείται απαραίτητη η ύπαρξη επικάλυψης ανάμεσα σε γειτονικούς δορυφόρους (με τον συντελεστή επικάλυψης να διαφέρει για κάθε σύστημα), ώστε να επιτυγχάνεται η αδιάλειπτη και συνεχής παροχή υπηρεσιών πραγματικού χρόνου [10],[28].

Σύμφωνα με το [16] τα τροχιακά υψόμετρα κυκλικών δορυφορικών τροχιών τα οποία απαιτούνται για την επίτευξη συγκεκριμένου αριθμού επαναλαμβανόμενων δορυφορικών περασμάτων, έχουν όπως στον πίνακα :

| Περιστροφές/ημέρα | Ονομαστική Περίοδος (ώρες) | Ονομαστικό Υψόμετρο (km) |
|-------------------|----------------------------|--------------------------|
| 1                 | 24                         | 36000                    |
| 2                 | 12                         | 20200                    |
| 3                 | 8                          | 13900                    |
| 4                 | 6                          | 10400                    |
| 6                 | 4                          | 6400                     |
| 8                 | 3                          | 4200                     |

**Πίνακας 4. Τροχιακές Περίοδοι και Υψόμετρα**

**Τροποποιημένο από [16]**

Σύμφωνα με το [20] η θέση ενός δορυφόρου εντός της τροχιάς του με σημείο αναφοράς τον επίγειο σταθμό που τον παρακολουθεί, προσδιορίζεται από το Αζιμούθιο (Az) και την Γωνία ανύψωσης



(Εο), η οποία αποτελεί και τη σημαντικότερη παράμετρο προσδιορισμού της περιοχής κάλυψης στη Γη. Ωστόσο υπάρχουν και άλλες παράμετροι οι οποίες παίζουν σημαντικό ρόλο και οι οποίες αναλύονται παρακάτω:

α) Ως αζιμούθιο ορίζεται η γωνία μεταξύ του δορυφόρου και του γεωγραφικού βορρά, μετρούμενη στο επίπεδο του ορίζοντα κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού, το εύρος του οποίου κυμαίνεται από 0° έως 360°.

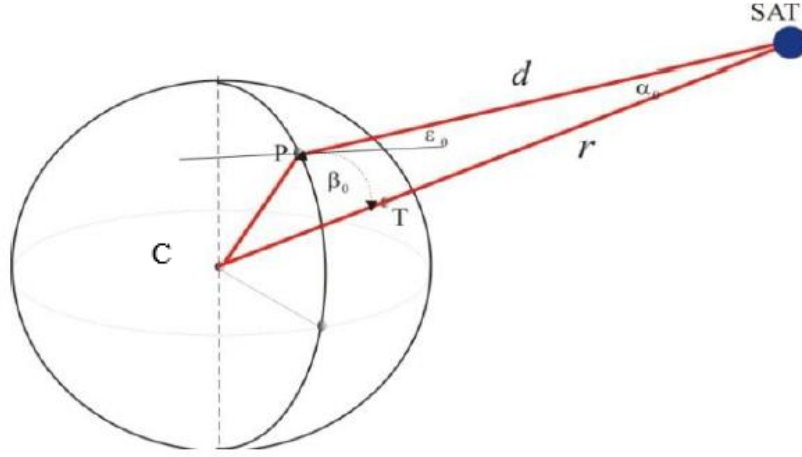
β) Η γωνία ανύψωσης ορίζεται ως η γωνία μεταξύ του δορυφόρου και του επιπέδου του ορίζοντα του παρατηρητή (επίγειο σταθμού) και κυμαίνεται μεταξύ 0° και 90°. Θεωρητικά η μέγιστη επιφάνεια κάλυψης επιτυγχάνεται σε γωνία ανύψωσης 0°, στην πράξη όμως επειδή η επιφάνεια της Γης δεν είναι τελείως επίπεδη και η επικοινωνία κάτω από γωνίες χαμηλής ανύψωσης μπορεί να παρεμποδιστεί από φυσικά εμπόδια τα οποία παρεμβάλλονται μεταξύ δορυφόρου και επίγειου σταθμού, επιλέγεται η ελάχιστη γωνία ανύψωσης να είναι μεταξύ 2° και 10°. Η δορυφορική κάλυψη εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη γωνία ανύψωσης.

γ) Η πιο σημαντική παράμετρος σύμφωνα με το [20] είναι το μήκος μονοπατιού (slant range)(απόσταση από τον επίγειο σταθμό μέχρι τον δορυφόρο), το οποίο χρησιμοποιείται κατά κόρον και για τον υπολογισμό του link budget της ζεύξης και εκφράζεται εμμέσως στους μαθηματικούς τύπους μέσω της γωνίας ανύψωσης καταλήγοντας στον τύπο:

$$d(\varepsilon_0) = R_e \left[ \sqrt{\left( \frac{H + R_e}{R_e} \right)^2 - \cos^2 \varepsilon_0} - \sin \varepsilon_0 \right] \quad (4.1)$$

Μάλιστα Για ασφαλή επικοινωνία και για εξοικονόμηση πόρων σε έναν προϋπολογισμό σύνδεσης, η κάλυψη σε πολύ χαμηλό υψόμετρο δεν παρέχεται πάντα.

Σύμφωνα με το (Cakaj, 2009, Cakaj κ.α, 2011) από την οπτική ενός επίγειο σταθμού (χρήστη) η θέση ενός δορυφόρου ενώ βρίσκεται στην τροχιά το στο διάστημα προσδιορίζεται βάσει του Αζιμουθίου και της γωνίας Ανύψωσης. Επίσης, σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα η βασική γεωμετρία μεταξύ ενός δορυφόρου και ενός επίγειου σταθμού η οποία χρειάζεται για τον υπολογισμό της επιφάνειας κάλυψης και του link budget είναι η ακόλουθη:



Σχήμα 5. Βασική Γεωμετρία Επίγειου Σταθμού-Δορυφόρου [20]

Όπου  $\varepsilon_0$  είναι η γωνία ανύψωσης,  $\alpha_0$  η γωνία ναδίρ,  $\beta_0$  η κεντρική γωνία και  $d$  είναι το μήκος μονοπατιού, SAT η θέση του δορυφόρου, P η θέση του επίγειου σταθμού και C το κέντρο της Γης. Μάλιστα στην ίδια πηγή αναφέρεται ότι αν είναι γνωστές 2 από τις παραπάνω ποσότητες, οι άλλες δύο υπολογίζονται εύκολα από τους τύπους:

$$\varepsilon_0 + \alpha_0 + \beta_0 = 90^\circ \quad (4.2)$$

$$d \cos \varepsilon_0 = r \sin \beta_0 \quad (4.3)$$

$$d \sin \alpha_0 = R_e \sin \beta_0 \quad (4.4)$$

Επιπλέον για δοσμένο υψόμετρο, εύκολα υπολογίζεται η γωνία κάλυψης για μέγιστη επιφάνεια κάλυψης, αν όπου  $\varepsilon_0 = 0^\circ$  στον παρακάτω τύπο:

$$\sin \alpha_0 = \frac{R_e}{R_e + H} \times \cos \varepsilon_0 \quad (4.5)$$

Ενώ η επιφάνεια κάλυψης δίνεται από τον τύπο:

$$S_{Coverage} = 2\pi R_e^2 (1 - \cos \beta_0) \quad (4.6)$$

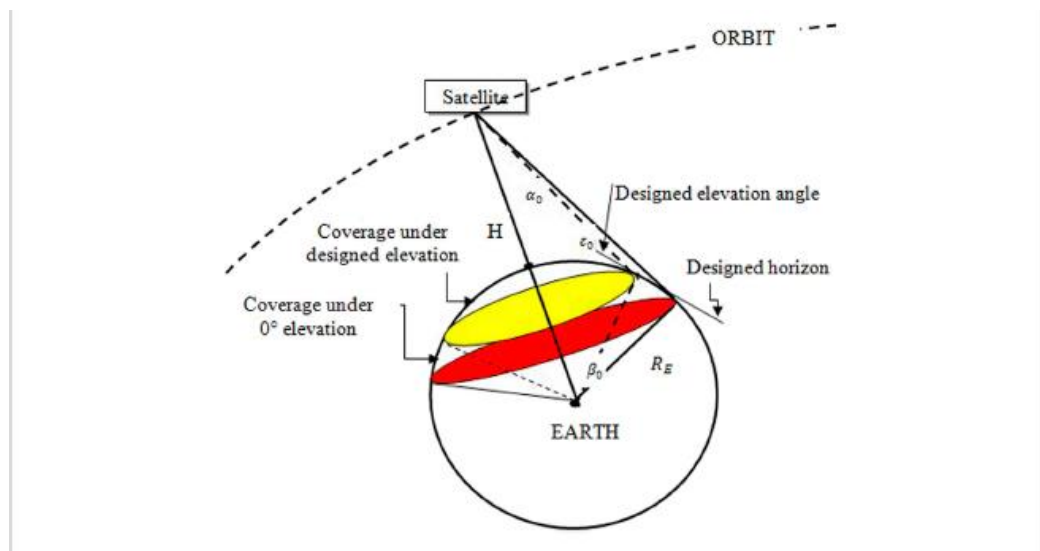
Και η επιφάνεια κάλυψης ως κλάσμα της επιφάνειας της Γης από τον τύπο :

$$Coverage(\%) = \frac{S_{Coverage}}{S_{Earth}} = \frac{2\pi R_e^2 (1 - \cos \beta_0)}{4\pi R_e^2} \quad (4.7)$$

Η από τον τύπο:

$$Coverage(\%) = \frac{1}{2}(1 - \cos \beta_0) \quad (4.8)$$

Ενδεικτικά, ακολουθώντας αντίστοιχες σχέσεις και τρόπο υπολογισμών το [17] καταλήγει στο συμπέρασμα ότι με έναν δορυφόρο LEO σε υψόμετρο 550 km και υπό γωνία ανύψωσης  $40^\circ$ , η περιοχή κάλυψης στην επιφάνεια της Γης είναι 1,05 εκατομμύρια km<sup>2</sup>, με ακτίνα περίπου 580 km (θεωρώντας ότι μιλάμε για LEO δορυφόρους με κυκλικές περιοχές κάλυψης). Επίσης, σύμφωνα με το [20] επιβεβαιώνεται ότι για δοσμένο υψόμετρο H, η αύξηση της γωνίας ανύψωσης οδηγεί σε μείωση της επιφάνειας κάλυψης του δορυφόρου καθώς επίσης επιβεβαιώνεται ότι για δοσμένη γωνία ανύψωσης, αύξηση του υψομέτρου οδηγεί σε αύξηση της επιφάνειας κάλυψης όπως είναι λογικό βάσει της γεωμετρίας μεταξύ δορυφόρου που αναλύθηκε προηγουμένως. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το σχήμα του [17] το οποίο ακολουθεί και στο οποίο αποτυπώνονται δύο διαφορετικά τρίγωνα όπως παρακάτω:



Σχήμα 6. Βασική Γεωμετρία Περιοχής Κάλυψης Δορυφόρου [17]

Για τα δύο τρίγωνα που παρουσιάζονται παραπάνω ισχύει ότι  $\varepsilon_0$ = γωνία ανύψωσης,  $\alpha_0$ = γωνία ναδύρ,  $\beta_0$ = κεντρική γωνία,  $d$ =μήκος μονοπατιού,  $H$ = υψόμετρο τροχιάς και  $R_E$  η ακτίνα της Γης ( $=6.371$  km). Τα δύο διαφορετικά τρίγωνα αντιστοιχούν σε δύο διαφορετικές περιοχές κάλυψης ενός δορυφόρου, με τη μεν πρώτη (κόκκινη) να αντιστοιχεί με τη σειρά της σε γωνία ανύψωσης  $\varepsilon_0 = 0^\circ$  και τη δε δεύτερη (κίτρινη) σε περιοχή κάλυψης υπό γωνία ανύψωσης βάσει σχεδίασης του συστήματος ( $\varepsilon_0 > 0^\circ$ ). Η πρώτη περίπτωση αποτελεί και το βέλτιστο σενάριο με τη μεγαλύτερη περιοχή κάλυψης, το οποίο όμως δεν έχει πρακτική εφαρμογή λόγω του ότι η επιφάνεια της Γης δεν είναι τελείως επίπεδη.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι συχνά υπάρχει σύγχυση μεταξύ της περιοχής κάλυψης ενός δορυφόρου (δηλαδή του αποτυπώματός του στην επιφάνεια της Γης) και του επιπέδου ορίζοντα ενός χρήστη, το οποίο ορίζεται ως το κάθετο επίπεδο στο άξονα που σχηματίζεται μεταξύ του κέντρου της Γης και του επίγειου χρήστη και εφάπτεται στην επιφάνεια της Γης. Θεωρητικά κάθε σημείο στην επιφάνεια της Γης έχει διαφορετικό επίπεδο ορίζοντα, το οποίο πρακτικά σημαίνει ότι οι γωνίες από τις οποίες φαίνεται και στοχεύεται ο δορυφόρος είναι διαφορετικές. Συνεπώς κάθε επίγειος χρήστης ο οποίος βρίσκεται εντός της περιοχής κάλυψης ενός δορυφόρου έχει το δικό του ξεχωριστό, ιδανικό και σχεδιασμένο, επίπεδο ορίζοντα. Αυτό οδηγεί με τη σειρά του σε διαφορετικά μονοπάτια επικοινωνίας και συνεπώς διαφορετικούς χρόνους επικοινωνίας με τον συγκεκριμένο δορυφόρο.

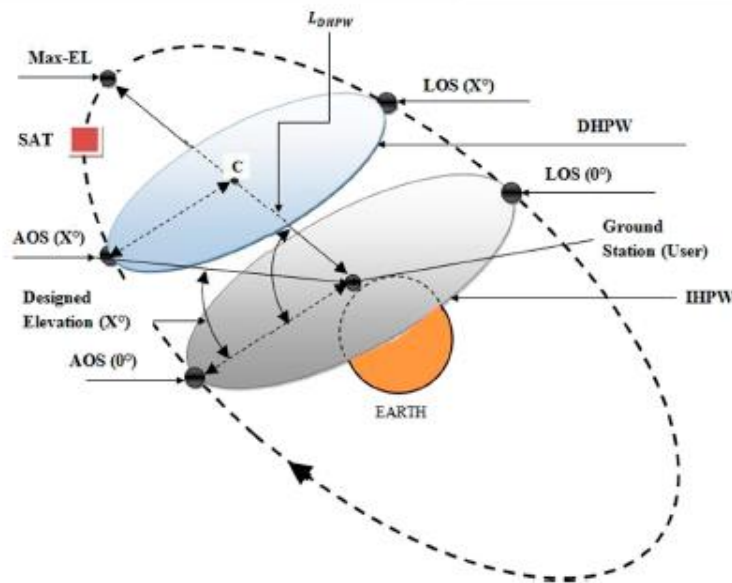
Όπως και στη περίπτωση της περιοχής κάλυψης, το ιδανικό επίπεδο ορίζοντα ουσιαστικά αντιπροσωπεύει την περιοχή ορατότητας, υπό ιδανικές συνθήκες και υπό γωνία ανύψωσης  $\varepsilon_0=0^\circ$  για την κεραία ενός επίγειου σταθμού- χρήστη. Στην πραγματικότητα για πολύ χαμηλές γωνίες ανύψωσης υπάρχει πάντα παρεμβολή εμποδίων, φυσικών ή τεχνητών, στη LOS μεταξύ δορυφόρου και επίγειου σταθμού, με αποτέλεσμα να καθίσταται αδύνατη η επικοινωνία μεταξύ τους. Γι' αυτόν το λόγο πάντα υπάρχει διαφορά μεταξύ του ιδανικού και του σχεδιασμένου επιπέδων ορίζοντα, όντας παράλληλα πάντα μεταξύ τους σε απόσταση L. Μάλιστα όπως είναι αναμενόμενο η απόσταση αυτή καθορίζεται από την εκάστοτε σχεδιασμένη γωνία ανύψωσης, η οποία είναι πάντα  $>0^\circ$ , με ελάχιστο το οποίο καθορίζεται εξ αρχής και διαφέρει αναλόγως του συστήματος που χρησιμοποιείται και της τοποθεσίας του χρήστη.

Γενικά ισχύει, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ότι η επικοινωνία μεταξύ δορυφόρου και επίγειου χρήστη ξεκινάει από τη στιγμή που ο επίγειος χρήστης αποκτά οπτική επαφή με τον δορυφόρο. Έτσι στο [17] γίνεται αναφορά σε 3 διαφορετικά στάδια, τα οποία συμβαίνουν πάντα με την ίδια σειρά, κατά τη διάρκεια της έναρξης και λήξης της μεταξύ τους επικοινωνίας. Αρχικά, όταν ο δορυφόρος εισέρχεται στο σχεδιασμένο επίπεδο ορίζοντα του χρήστη (υπό τη σχεδιασμένη ελάχιστη γωνία ανύψωσης) γίνεται έναρξη και εγκαθίδρυση της επικοινωνίας μεταξύ τους, γεγονός το οποίο ονομάζεται Acquisition of the Satellite (AOS). Στη συνέχεια ο δορυφόρος κινείται εντός του HP (Horizon Plane) του χρήστη με τη γωνία ανύψωσης να αυξάνεται έως ότου φτάσει στο μέγιστο (Max Elevation Angle), από όπου θα συνεχίσει τη πορεία του με τη γωνία ανύψωσης στο εξής να μειώνεται. Τέλος το τρίτο στάδιο πραγματοποιείται με την έξοδο του δορυφόρου από το επίπεδο ορίζοντα του χρήστη και κατά συνέπεια την απώλεια της οπτικής επαφής και της μεταξύ τους ζεύξης το οποίο ονομάζεται LOS (Loss of the Satellite). Μάλιστα στο [17] το επίπεδο ορίζοντα ενός επίγειου χρήστη παρουσιάζεται για καλύτερη κατανόηση, ως ένας κώνος με κορυφή του τον ίδιο τον χρήστη, βάση του το επίπεδο ορίζοντα αυτού και διάμετρο (αν υποθέσουμε ότι είναι κυκλικός) η οποία βρίσκεται από τον παρακάτω τύπο:

$$DHPW = d_{AOS(X)} + d_{LOS(X)} = 2d_{AOS(X)} = 2d(\varepsilon_0 = X^\circ) \sin(90 - X) = 2d(\varepsilon_0 = X^\circ) \cos(X) \quad (4.9)$$

Όπου DHPW = Ευρύτητα Σχεδιασμένου Επιπέδου Ορίζοντα  
(Designed Horizon Plane Wideness)

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα άλλο σχήμα του ίδιου άρθρου, στο οποίο απεικονίζονται το ιδανικό και το σχεδιασμένο επίπεδο ορίζοντα ενός επίγειου χρήστη καθώς και τα σημεία που ορίζουν τα 3 στάδια πραγματοποίησης ζεύξης με έναν δορυφόρο (AOS, Max-El, LOS):



Σχήμα 7. Βασική Γεωμετρία Επιπέδου Ορίζοντα Παρατηρητή [20]

Κάθε τροχιακό πέρασμα ενός δορυφόρου πάνω από έναν συγκεκριμένο επίγειο σταθμό χαρακτηρίζεται από την Μέγιστη Γωνία Ανύψωσης από την πλευρά του χρήστη και η διάρκεια της επικοινωνίας μεταξύ αυτών εξαρτάται από αυτά τα τρία στάδια. Γενικά ισχύει ότι για ίδιες γωνίες AOS και LOS, αύξηση της Max-El οδηγεί σε αύξηση της χρονικής περιόδου επικοινωνίας και το αντίθετο.

Ενδεικτικά στο [15] διερευνώνται διάφορες παράμετροι δορυφορικής ζεύξης όπως χαρακτηριστικά κάλυψης δέσμης, κατανομή χρηστών, γίνεται συνδυασμός του μοντέλου κίνησης της ζήτησης υπηρεσιών χρηστών και του μοντέλου δέσμης κάλυψης χαμηλής δορυφορικής τροχιάς, αναλύεται η επίδραση των χαρακτηριστικών της δέσμης κάλυψης στην απόδοση δορυφορικών συστημάτων χαμηλής τροχιάς και χρησιμοποιούνται διάφορες μετρικές για την επαλήθευση και μέτρηση της επίδρασης της δέσμης κάλυψης σχετικά με την απόδοση των δορυφορικών συστημάτων LEO. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται σύγκριση των επιδόσεων των δεσμών κάλυψης μεταξύ των

συστημάτων της OneWeb και της SpaceX, λαμβάνοντας υπόψιν και ατμοσφαιρικές συνθήκες, σκοπεύοντας στην εξαγωγή ολοκληρωμένου συμπεράσματος σχετικά με την επίδοση των συστημάτων. Κατά την προσομοίωση αναπτύσσονται δύο μοντέλα, με το μεν πρώτο να προσομοιάζει την κατανομή του φόρτου ζήτησης υπηρεσιών των τελικών χρηστών και το δε δεύτερο, την γεωγραφική τους κατανομή στην επιφάνεια της Γης.

Τα αποτελέσματα τα οποία παρήχθησαν παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον, αφού από την πρώτη προσομοίωση προέκυψε ότι ανεξαρτήτως κατανομής ζήτησης υπηρεσιών (κανονικής ή ομοιόμορφης), αύξηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης χρηστών οδηγεί και τα δύο συστήματα σε αύξηση της καθυστέρησης και μείωση της πιθανότητας επιτυχούς πρόσβασης. Επιπλέον τα αποτελέσματα αναδεικνύουν ότι υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες και όταν παρουσιάζεται αύξηση του φόρτου εργασίας και άνιση κατανομή των αναγκών των χρηστών, η SpaceX μπορούσε να ανταποκριθεί καλύτερα με το σύστημα έξυπνων πολλαπλών κυκλικών δεσμών που υιοθετούσε, κάνοντας πιο ευέλικτη διαχείριση πόρων σε σχέση με το σύστημα πολλαπλών σταθερών ελλειπτικών δεσμών της OneWeb.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της γεωγραφικής κατανομής των χρηστών ανά την υφήλιο, αυτά έδειξαν ότι η επίδοση του συστήματος έξυπνων δεσμών κάλυψης της SpaceX είναι καλύτερη σε σχέση με αυτή της OneWeb, αφού η πρώτη παρουσίασε δυνατότητα καλύτερης προσαρμογής υπό διαφορετικές κατανομές γεωγραφικής θέσης τελικών χρηστών και καλύτερη προσαρμογή υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες. Από την άλλη μεριά το σύστημα της OneWeb ήταν κι αυτό επαρκώς ευέλικτο, ωστόσο υστερούσε αρκετά σε σχέση με της Space X όταν οι χρήστες ήταν πιο αραιά κατανομημένοι. Παρ' όλ' αυτά υπήρχαν κάποιες περιπτώσεις στις οποίες η OneWeb παρουσίαζε καλύτερα αποτελέσματα, γεγονός το οποίο μας οδηγεί στο γενικότερο συμπέρασμα ότι δεδομένων των διαφορετικών επιδόσεων των δύο συστημάτων κατά τις προσομοιώσεις και υπό διαφορετικές συνθήκες και κατανομές, κάθε τύπος δέσμης θα πρέπει να εστιάζει σε συγκεκριμένες κατάλληλες υπηρεσίες και εφαρμογές.

Ενδεικτικά στο [20] πραγματοποιείται μία συγκριτική ανάλυση των περιοχών κάλυψης και των επιπέδων ορίζοντα για διάφορα δορυφορικά συστήματα τα οποία βασίζονται σε LEO, MEO, GEO και HEO δορυφόρους. Πιο λεπτομερώς, η ανάλυση αυτή αφορούσε συνολικά 18 συστήματα δορυφόρων, εκ των οποίων τα 6 βασίζονταν σε LEO δορυφόρους, 5 σε MEO, 2 σε GEO και 5 σε HEO δορυφόρους, λαμβάνοντας υπόψιν τα τροχιακά τους υψόμετρα και τις εκάστοτε γωνίες ανύψωσης, όπως παρουσιάζεται και στον παρακάτω πίνακα:

| A/A | Όνομα Δορυφόρου | Αριθμός NORAD | Σκοπός       | Τύπος Τροχιάς | Περίοδος (λεπτά) | Hs (km) | Rs (km) |
|-----|-----------------|---------------|--------------|---------------|------------------|---------|---------|
| 1   | Starlink-1246   | 45235         | Επικοινωνίες | LEO           | 89,9             | 269,62  | 6647,6  |

|    |                   |       |                               |     |         |          |          |
|----|-------------------|-------|-------------------------------|-----|---------|----------|----------|
| 2  | KIPP-1            | 43157 | Επικοινωνίες                  | LEO | 95,3    | 533,23   | 6911,2   |
| 3  | FORTÉ             | 24920 | Παρατήρηση Γης                | LEO | 101     | 806,13   | 7184,1   |
| 4  | Yaogan 16C        | 39013 | Παρατήρηση Γης                | LEO | 106,33  | 1056,7   | 7434,7   |
| 5  | Sentinel 6        | 46984 | Παρατήρηση Γης                | LEO | 112,4   | 1337     | 7715     |
| 6  | Globalstar M089   | 37744 | Επικοινωνίες                  | LEO | 118,2   | 1600,2   | 7978,2   |
| 7  | SPIRALE B         | 33752 | Στρατιωτικός                  | MEO | 509,7   | 14758,66 | 21136,66 |
| 8  | USA 168           | 27704 | Πλοήγηση/Παγκόσμια Θέση       | MEO | 720,65  | 20248,23 | 26626,23 |
| 9  | Galileo FOC FM8   | 41175 | Πλοήγηση/Παγκόσμια Θέση       | MEO | 860,51  | 23590,43 | 29968,43 |
| 10 | POLAR             | 23802 | Διαστημική και Γήινη Επιστήμη | MEO | 1109    | 29112,69 | 35490,69 |
| 11 | BSAT-3B           | 37207 | Επικοινωνίες                  | GEO | 1365,61 | 34395,48 | 40773,48 |
| 12 | Eutelsat Quantum  | 49056 | Επικοινωνίες                  | GEO | 1436    | 35784,82 | 42162,82 |
| 13 | C1DRS             | 32779 | Επικοινωνία                   | HEO | 1478,2  | 36606,86 | 42984,86 |
| 14 | O3b FM20          | 44112 | Επικοινωνίες                  | MEO | 280,73  | 44112    | 14202,1  |
| 15 | CLUSTER II-FM6    | 26410 | Διαστημική και Γήινη Επιστήμη | HEO | 3260,3  | 66454,65 | 72833,65 |
| 16 | MMS 4             | 40485 | Διαστημική και Γήινη Επιστήμη | HEO | 5065,5  | 91322,32 | 97703,32 |
| 17 | OPS 6679 (VELA 8) | 2766  | Στρατιωτικός                  | HEO | 6770,8  | 112172,5 | 118555,5 |
| 18 | TESS              | 43435 | Διαστημική και Γήινη Επιστήμη | HEO | 19848,6 | 236454,9 | 242836,9 |

**Πίνακας 5. Βασικές Παράμετροι Εξεταζόμενων Δορυφόρων [20]**

Όπως ήταν αναμενόμενο, το συμπέρασμα το οποίο εξήχθη από αυτή την ανάλυση είναι ότι η μέγιστη περιοχή κάλυψης ενός δορυφόρου σημειώνεται για γωνία ανύψωσης  $0^\circ$  καθώς και ότι ο ρυθμός αύξησης του τροχιακού υψομέτρου είναι υψηλότερος από τον ποσοστιαίο ρυθμό αύξησης της περιοχής κάλυψης ενός δορυφόρου. Επίσης ο ρυθμός αύξησης του επιπέδου ορίζοντα είναι χαμηλότερος από τον ρυθμό αύξησης της περιοχής κάλυψης. Τέλος εξάγεται το συμπέρασμα ότι στην περίπτωση των HEO δορυφόρων, όταν αυτοί φτάνουν σε υψομετρικό μέγιστο, η περιοχή κάλυψης η οποία προσφέρουν μπορεί να πλησιάσει και το 50%. Επίσης, όπως έχει αναφερθεί και πιο πάνω, εξυπακούεται ότι για δεδομένη γωνία ανύψωσης, αύξηση του υψομέτρου τροχιάς ενός δορυφόρου οδηγεί σε αύξηση της περιοχής κάλυψης αυτού. Έτσι εν συγκρίσει με τις υπόλοιπες κατηγορίες (MEO, GEO και HEO) οι αστερισμοί που βασίζονται σε LEO δορυφόρους απαιτούν μεγαλύτερους αριθμούς κόμβων (δορυφόρων) για την επίτευξη δικτύου παγκόσμιας κάλυψης. [20],[29]-[32].

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Προϋπολογισμός Ζεύξης**

### **5.1 Γενικά περί Link Budget**

Στις δορυφορικές επικοινωνίες, ο προϋπολογισμός ζεύξης είναι ένα ζωτικής σημασίας εργαλείο που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της συνολικής απόδοσης και προσδιορισμό της ευρωστίας μιας τηλεπικοινωνιακής ζεύξης, μεταξύ ενός δορυφόρου και ενός επίγειου σταθμού ή τερματικού χρήστη. Ουσιαστικά αποτελεί έναν ισολογισμό ισχύος μεταξύ των κερδών και των απωλειών που παρουσιάζονται σε μια τηλεπικοινωνιακή ζεύξη και οι οποίες είναι παράγωγο του περιβάλλοντος του επίγειου χρήστη, της συχνότητας λειτουργίας, του τοπικού ανάγλυφου και καιρικών συνθηκών, του είδους της μετάδοσης, του υψομέτρου του δορυφόρου και της χρησιμοποιούμενης γωνίας ανύψωσης. Μέσω αυτού προσδιορίζεται το αναμενόμενο επίπεδο λαμβανόμενης ισχύος (ισχύς λαμβανόμενου σήματος) στον εκάστοτε δέκτη και με αυτόν το τρόπο καθίσταται δυνατός ο προσδιορισμός από τους μηχανικούς κατά τη διάρκεια της σχεδίασης του συστήματος, του κατά πόσο η ζεύξη θα είναι αξιόπιστη, κάνοντας σύγκριση του κατώτατου υπολογιζόμενου επιπέδου ισχύος λήψης, με το ελάχιστο απαιτούμενο επίπεδο ισχύος (ευαισθησία δέκτη) για την εκάστοτε ποιότητα υπηρεσιών που πρέπει να επιτευχθεί, υπό διάφορες συνθήκες διαύλου και παρεμβολών. Κατά συνέπεια υπάρχουν πολλές διαφορετικές παράμετροι οι οποίες πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν κατά τον υπολογισμό του Link Budget μιας ζεύξης.

### **5.2 Απώλειες Ελευθέρου Χώρου**

Αρχικά λοιπόν το πρώτο μέγεθος το οποίο προσδιορίζεται με σκοπό τη σωστή παραμετροποίηση και υπολογισμό των εκάστοτε απωλειών κατά τη ζεύξη είναι το μήκος της διαδρομής του σήματος, το οποίο μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της κίνησης ενός δορυφόρου και κυμαίνεται μεταξύ ενός μεγίστου και ελαχίστου μήκους αναλόγως του τροχιακού υψομέτρου και της χρησιμοποιούμενης ελάχιστης και μέγιστης γωνίας ανύψωσης. Έτσι, ένας δορυφόρος σε τροχιά, προσεγγίζων το σχεδιασμένο επίπεδο ορίζοντα ενός επίγειου χρήστη δεν έχει ορατότητα και κατά συνέπεια ούτε επικοινωνία με τον επίγειο σταθμό πριν το σημείο AOS, το οποίο αναφέρθηκε προηγουμένως. Εισερχόμενος στο σχεδιασμένο επίπεδο ορίζοντα συναντά πρώτα το σημείο “απόκτησης” του Δορυφόρου (AOS) υπό την ελάχιστη σχεδιασμένη γωνία ανύψωσης ( $X^\circ$ ) και στη συνέχεια κινείται προς το σημείο μέγιστης ανύψωσης (Max Elevation) με την γωνία ανύψωσης συνεχώς να αυξάνεται. Ωστόσο αύξηση της γωνίας ανύψωσης οδηγεί σε μείωση του μήκους της απόστασης μεταξύ δορυφόρου και χρήστη, το οποίο φτάνει σε ελάχιστο όταν  $\epsilon_0 = \text{MaxEl}$ . Κατά συνέπεια η μείωση



της διαδρομής αυτής που διανύει το σήμα οδηγεί τελικά και σε μείωση των απωλειών διάδοσης. Φυσικά το αντίθετο συμβαίνει από τη στιγμή που ο δορυφόρος περάσει το σημείο μέγιστης ανύψωσης, μέχρι το σημείο απώλειας του δορυφόρου (LOS). Σε αυτό το στάδιο η γωνία ανύψωσης συνεχώς μειώνεται μέχρις ότου  $\varepsilon_0 = X^\circ$ , ενώ ταυτόχρονα η απόσταση δορυφόρου και επίγειου χρήστη ολοένα και αυξάνεται. Έτσι λοιπόν στο σημείο LOS (όπως και στο AOS) έχουμε μέγιστες απώλειες διάδοσης σήματος λόγω του μεγίστου μήκους μονοπατιού (slant distance), το οποίο δίνεται κάθε φορά από τον παρακάτω μαθηματικό τύπο:

$$d = R_e \left[ \sqrt{\left( \frac{H + R_e}{R_e} \right)^2 - \cos^2 \varepsilon_0} - \sin \varepsilon_0 \right] \quad (5.1)$$

Όπου  $d$  είναι το μήκος μονοπατιού υπό γωνία ανύψωσης  $\varepsilon_0$ ,  $H$  είναι το τροχιακό υψόμετρο και  $R_e$  η ακτίνα της Γης ίση με 6371 km. Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει ότι για  $\varepsilon_0=0$  η μέγιστη απόσταση μονοπατιού είναι ίση με:

$$d_{\max} = d(\varepsilon_0 = 0) = \sqrt{H + 2R_e} \quad (5.2)$$

Εν προκειμένω λοιπόν έχουμε το χειρότερο αποτέλεσμα προϋπολογισμού ζεύξης λόγω των μέγιστων απωλειών ισχύος σήματος που προκύπτουν κατά τη μετάδοση. Αντιστρόφως η γωνία ανύψωσης δίνεται συναρτήσει του μήκους μονοπατιού  $d$  από τον τύπο:

$$\sin \varepsilon_0 = \frac{H(H + 2R_e) - d^2}{2dR_e} \quad (5.3)$$

Επιπρόσθετα, αξίζει να σημειωθεί ότι η αυξομείωση του μήκους μονοπατιού (slant range) κατά την κίνηση ενός δορυφόρου εντός του επιπέδου ορίζοντα ενός χρήστη, οδηγεί ταυτόχρονα και σε αυξομειώσεις στην καθυστέρηση του σήματος λήψης. Το παραπάνω φαινόμενο, θεωρώντας μονόδρομη επικοινωνία και σύμφωνα με το [17], εκφράζεται με την παρακάτω σχέση, όπου με  $\tau$  συμβολίζεται η καθυστέρηση του σήματος από την πλευρά του επίγειου σταθμού-δέκτη:

$$\tau_{\min}(\text{due to } d_{\min}) < \tau < \tau_{\max}(\text{due to } d_{\max}) \quad (5.4)$$

Για τον υπολογισμό του Link Budget μιας ζεύξης, μία από τις κυριότερες προς μελέτη παραμέτρους είναι η απώλεια ελεύθερου χώρου (Free Space Loss). Ορίζεται ως το φαινόμενο εξασθένισης του σήματος κατά τη μετάδοσή του μέσα στον τηλεπικοινωνιακό δίαυλο, είναι ανάλογη του τετραγώνου του γινομένου της συχνότητας του φέροντος σήματος και της απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη, σύμφωνα με τον τύπο:

$$FSPL = \left( \frac{4\pi df}{c} \right)^2 \quad (5.5)$$

$$FSPL(dB) = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi}{c} \right) \quad (5.6)$$

Όπου εν προκειμένω ως  $d$  ορίζεται η απόσταση μεταξύ του δορυφόρου και του επίγειου σταθμού (ή απόσταση μονοπατιού – slant range),  $f$  η συχνότητα μετάδοσης του σήματος και  $c$  η ταχύτητα μετάδοσης του φωτός σε κενό χώρο.

### 5.3 Ισχύς Λαμβανόμενου Σήματος

Από την παραπάνω σχέση καθίσταται φανερό ότι η μετάβαση των σύγχρονων δορυφορικών δικτύων επικοινωνιών σε υψηλότερες μπάντες συχνοτήτων (από L/S σε Ku/ Ka και Q/V) εκτός από την επίτευξη μεγαλύτερου throughput επιφέρουν και σημαντικά υψηλότερα επίπεδα απωλειών μετάδοσης ελευθέρου χώρου, με ό,τι συνέπεια συνεπάγεται αυτό στον τελικό ισολογισμό ισχύος.

Σε ένα ισολογισμό ισχύος ορισμένες από τις κυριότερες παραμέτρους είναι η ισχύς εκπομπής του σήματος ( $P_t$ ) καθώς επίσης και τα εκάστοτε κέρδη των κεραιών πομπού ( $G_t$ ) και δέκτη ( $G_r$ ). Ως γνωστόν η ισχύς λήψης ενός σήματος είναι ανάλογη της ισχύος εκπομπής αυτού, καθώς επίσης γνωρίζουμε ότι λόγω των πολύ υψηλών συχνοτήτων και των μεγάλων αποστάσεων που παρεμβάλλονται στα NTN δίκτυα μεταξύ επίγειων σταθμών- χρηστών και δορυφόρων, καθίσταται απαραίτητη η χρησιμοποίηση κατευθυντικών κεραιών με μεγάλη ακρίβεια στόχευσης, για την αποφυγή κατασπατάλησης ισχύος. Μάλιστα, σε περίπτωση που τελικά αποδειχθεί ότι ο απαιτούμενος σηματοθορυβικός λόγος στην είσοδο του κυκλώματος απόφασης του εκάστοτε δέκτη είναι χαμηλότερος από τον αντίστοιχο σηματοθορυβικό λόγο κατωφλίου, ο οποίος έχει θεσπιστεί βάσει των επιθυμητών υπηρεσιών και του επιθυμητού QoS, μία από τις συνηθέστερες λύσεις είναι είτε η αύξηση της ισχύος εκπομπής του σήματος, είτε η χρήση πιο κατευθυντικών κεραιών με μεγαλύτερα κέρδη. Έτσι μία καλή αρχική θεώρηση μιας δορυφορικής ζεύξης δίδεται από την εξίσωση του Friis η οποία αφορά ζεύξη με οπτική επαφή (Line of Sight) μεταξύ πομπού και δέκτη, εν προκειμένω δορυφόρου και επίγειου σταθμού ή χρήστη, όπως παρακάτω.

$$P_{received} = P_t \times G_t \times G_r \times \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (5.7)$$

$$P_{received}(dB) = P_t(dB) + G_t(dB) + G_r(dB) - 20 \log_{10}(d) - 20 \log_{10}(f) - 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi}{c} \right) \quad (5.8)$$

Σημειώνεται ότι στη συγκεκριμένη εξίσωση λαμβάνονται υπόψιν μόνο οι απώλειες διάδοσης ελευθέρου χώρου οι οποίες αποτελούν και τον κυριότερο παράγοντα απωλειών. Ωστόσο, στις δορυφορικές επικοινωνίες, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός και άλλων μορφών απωλειών οι οποίες προκύπτουν λόγω της μεγάλης απόστασης που διανύει το σήμα μέσα από την ατμόσφαιρα αλλά και του μεταβαλλόμενου περιβάλλοντος του επίγειου χρήστη όταν μιλάμε για κατερχόμενη ή ανερχόμενη ζεύξη σε δορυφορικές υπηρεσίες κινητού χρήστη [user downlink/uplink σε Mobile Satellite Service (MSS)]. Έτσι η εξίσωση προϋπολογισμού ισχύος διαμορφώνεται ως εξής:

$$P_{received} (dB) = P_{transmitted} + G_{transmitter} + G_{receiver} - L_{FSPL} - L_{Other} \quad (5.9)$$

$$P_{received} (Watts) = 10^{\frac{P_{received} (dBm)}{10}} \times 10^{-3} \quad (5.10)$$

Όπου ο παράγοντας  $L_{Other}$  αναλύεται στις επιμέρους απώλειες λόγω ύπαρξης διαφόρων φαινομένων στο δίαυλο, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη συχνότητα μετάδοσης, το περιβάλλον του χρήστη και τις επικρατούσες συνθήκες της ατμόσφαιρας στο μελετούμενο γεωγραφικό μήκος και πλάτος, ως εξής:

- Απορρόφηση λόγω της ύπαρξης αερίων στην ατμόσφαιρα
- Αποσβεση και αποπόλωση λόγω βροχής
- Αποσβεση και αποπόλωση από τα σύννεφα και την ομίχλη
- Αποπόλωση λόγω παγοκρυστάλλων
- Απώλειες λόγω μη σωστής ευθυγράμμισης των κεραιών πομπού και δέκτη
- Απώλειες λόγω Πολυδιαδρομικής διάδοσης
- Απώλειες Λόγω Σκίασης
- Απώλειες Λόγω Εμποδίων-Βλάστησης στο περιβάλλον του δέκτη που οδηγούν σε παντελή απόκρυψη της οπτικής επαφής πομπού και δέκτη

#### 5.4 Ατμοσφαιρικές απώλειες

Σύμφωνα με το [33] τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα τα οποία επηρεάζουν κατά κύριο λόγο μία δορυφορική ζεύξη δημιουργούνται στα στρώματα της τροπόσφαιρας και της ιονόσφαιρας της Γης. Τα τροποσφαιρικά φαινόμενα επηρεάζουν περισσότερο σήματα σε συχνότητες μεγαλύτερες των 3 GHz και γι' αυτό μελετώνται σε μεγαλύτερο βαθμό όσον αφορά τις σύγχρονες δορυφορικές επικοινωνίες. Ωστόσο σημαντικές είναι και οι ιονοσφαιρικές επιπτώσεις που αφορούν κυρίως σήματα που λειτουργούν σε ζώνες συχνοτήτων χαμηλότερες των 3 GHz..

Επειδή διαφορετικά τμήματα της ηλιακής ακτινοβολίας απορροφώνται σε διαφορετικά υψόμετρα, η ιονόσφαιρα αποτελείται από στρώματα σε διαφορετικά υψόμετρα γνωστά ως στρώματα D, E και F, κάθε ένα εκ των οποίων παρουσιάζει διαφορετική πυκνότητα ιόντων. Έτσι λοιπόν, για **συχνότητες μικρότερες των 3 Ghz** σύμφωνα με το ITU-R P.618-11,2013 τα κυριότερα φαινόμενα

που λαμβάνουν χώρα κατά τη μετάδοση ενός κύματος, είναι φαινόμενα καθυστέρησης ομάδας και φάσης λόγω συνολικού φορτίου ηλεκτρονίων κατά μήκος του μονοπατιού καθώς επίσης και η περιστροφή Faraday (περιστροφή του επιπέδου της πόλωσης, λόγω διαφορετικών ταχυτήτων διάδοσης των δύο στοιχείων του κύματος διαμέσω της ιονόσφαιρας) εξαιτίας της ύπαρξης ελεύθερων ηλεκτρονίων και της αλληλεπίδρασης του εκπεμπόμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος με το ιονισμένο μέσο εντός του μαγνητικού πεδίου της Γης. Το φαινόμενο αυτό είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας μετάδοσης του σήματος και αντιμετωπίζεται με τη χρήση κυκλικής πόλωσης. Επιπλέον, η γρήγορη διακύμανση πλάτους και φάσης (σπινθηρισμοί) του σήματος λόγω ανωμαλιών στην πυκνότητα ηλεκτρονίων στην ιονόσφαιρα, επηρεάζονται αρνητικά από την ηλιακή δραστηριότητα-ακτινοβολία ενώ παράλληλα σημειώνεται και αλλαγή στην αναμενόμενη κατεύθυνση άφιξης λόγω διάθλασης. Σύμφωνα με το [16] ο δείκτης ποσοτικοποίησης των σπινθηρισμών στην ιονόσφαιρα είναι ο ακόλουθος:

$$S_4 \cong 0.07197 P_{p-p}^{0.794} \quad (5.11)$$

Όπου  $S_4$  ο δείκτης σπινθηρισμών και  $P_{p-p}$  η διακύμανση από κορυφή σε κορυφή σε dB του σήματος της ζεύξης. Γενικά ισχύει ότι οι περιοχές στις οποίες παρουσιάζεται εντονότερα το φαινόμενο των σπινθηρισμών είναι οι περιοχές υψηλών γεωγραφικών πλατών και οι περιοχές που βρίσκονται κοντά στον μαγνητικό ισημερινό. Ένα τυπικό φαινόμενο σπινθηρισμών ξεκινά μετά το τοπικό ηλιοβασίλεμα στην ιονόσφαιρα και. Τα φαινόμενα αυτά εμφανίζονται σχεδόν κάθε βράδυ μετά τη δύση του ηλίου για τις ισημερινές περιοχές κατά τα έτη μέγιστης ηλιακής δραστηριότητας και μπορούν να διαρκέσουν από 30 λεπτά έως αρκετές ώρες.

Τέλος, κατά τη μετάδοση ενός σήματος συχνότητας <3Gh παρουσιάζονται φαινόμενα Doppler λόγω μη γραμμικών περιστροφών πόλωσης και χρονικών καθυστερήσεων. Στη συνέχεια παρουσιάζεται πίνακας του [33] στον οποίο φαίνεται η εξάρτηση μεταξύ των κυριότερων ιονοσφαιρικών φαινομένων και της φέρουσας συχνότητας σήματος.

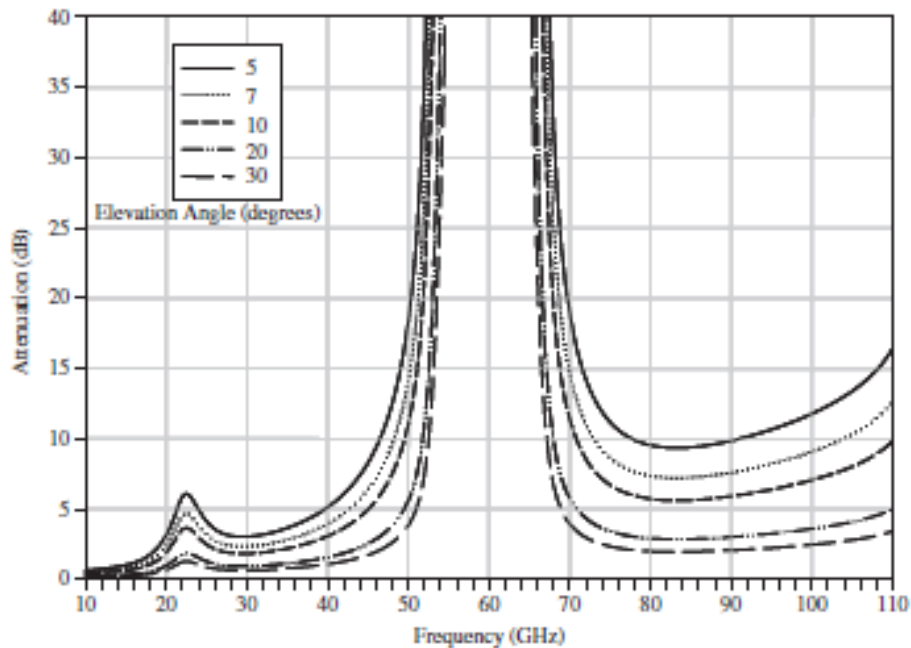
| Ιονοσφαιρική Επίδραση                 | Εξάρτηση από τη Συχνότητα |
|---------------------------------------|---------------------------|
| Περιστροφή Faraday                    | $=1/f^2$                  |
| Καθυστέρηση διάδοσης                  | $=1/f^2$                  |
| Διάθλαση                              | $=1/f^2$                  |
| Μεταβολή στην κατεύθυνση άφιξης (rms) | $=1/f^2$                  |
| Απορρόφηση                            | $\approx 1/f^2$           |
| Διασπορά                              | $1/f^3$                   |

**Πίνακας 6. Προσαρμοσμένος από ITU-R.P/618-11,**

**Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών, Γενεύη, 2013**

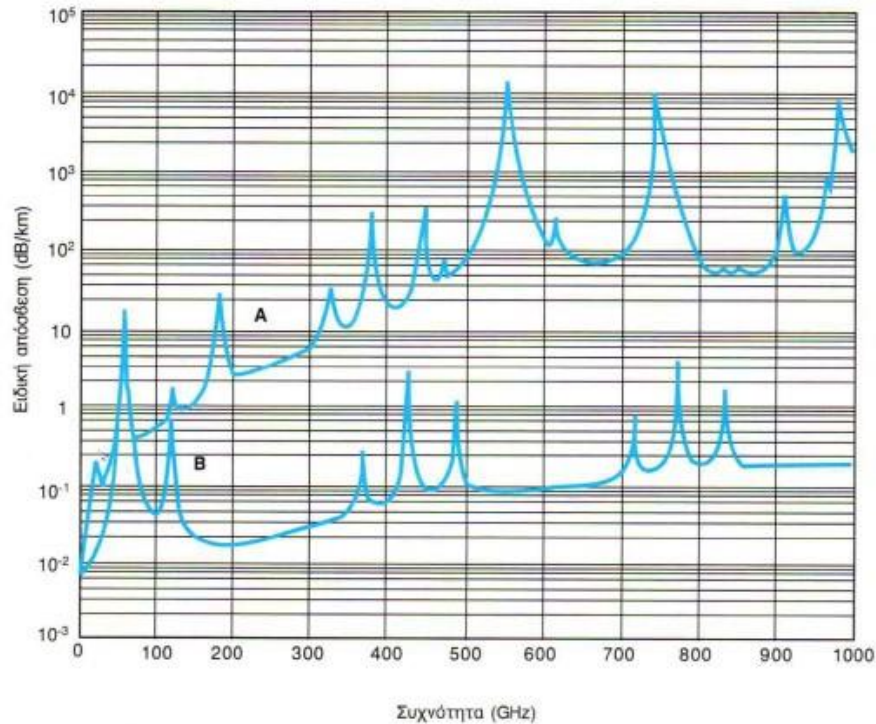
Για **συχνότητες μετάδοσης υψηλότερες των 3 GHz** και σύμφωνα με το [33] τα ραδιοκύματα διαπερνούν το στρώμα της ιονόσφαιρας χωρίς να επηρεάζονται από αυτό, ενώ οι βασικοί παράγοντες που επιδρούν σε αυτά προέρχονται από το επίπεδο της τροπόσφαιρας. Αυτά είναι η απόσβεση λόγω ύπαρξης αερίων στην ατμόσφαιρα, οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις και η αποπόλωση.

Από την άλλη μεριά, για **συχνότητες μεγαλύτερες των 10 GHz** τα ιονοσφαιρικά φαινόμενα θεωρούνται αμελητέα, ενώ τα τροποσφαιρικά είναι κυρίαρχα για την συγκεκριμένη περιοχή συχνοτήτων. Ένα εξ αυτών είναι η μείωση του πλάτους του σήματος εξαιτίας της **απόσβεσης λόγω ύπαρξης αερίων στην ατμόσφαιρα**, με ορισμένες περιοχές συχνοτήτων να παρουσιάζουν υψηλότερα επίπεδα απορρόφησης σε σχέση με άλλες, κυριότερη εκ των οποίων είναι η περιοχή περί τα 60 GHz, η οποία θεωρείται απαγορευτική για χρήση λόγω κατακόρυφης αύξησης των απωλειών εξαιτίας αυτού φαινομένου, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα του [16]:



Σχήμα 8. Συνολική απόσβεση λόγω αερίων συναρτήσει συχνότητας για γωνίες ανύψωσης από 5° έως 3°  
Τοποθεσία, Washington DC [16]

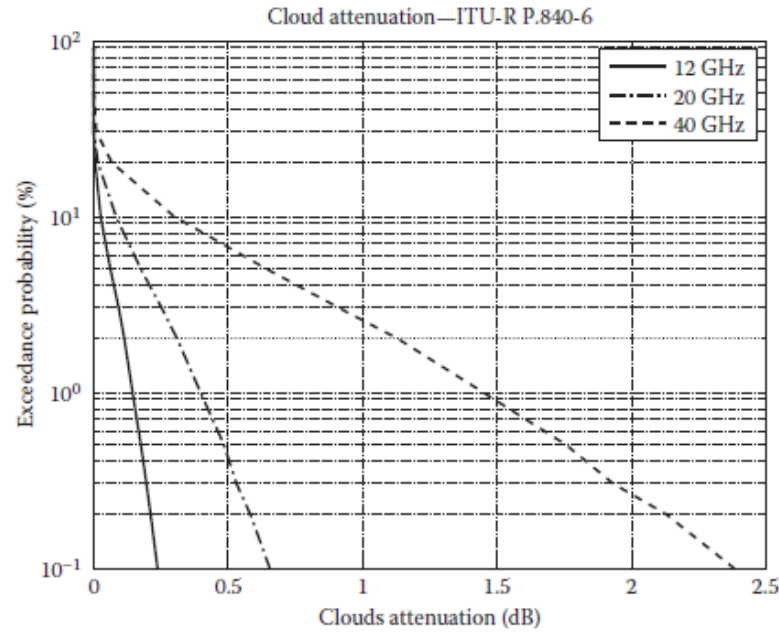
Ακολουθώς παρουσιάζεται διάγραμμα του [33] στο οποίο απεικονίζεται με καμπύλες η σχέση μεταξύ συχνοτήτων λειτουργίας ενός συστήματος και της ειδικής απόσβεσης ενός σήματος λόγω της απορρόφησης ισχύος την οποία υφίσταται ένα σήμα από το οξυγόνο και τους υδρατμούς. Μάλιστα, η καμπύλη Α αντιστοιχεί σε απορρόφηση ατμόσφαιρας με μέση υγρασία 7,5 gr/m<sup>3</sup>, ενώ η καμπύλη Β σε απορρόφηση σήματος διερχόμενο από ξηρή ατμόσφαιρα :



*Σχήμα 9. Διάγραμμα Ειδικής Απόσβεσης από το Οξυγόνο και τους Υδρατμούς Συναρτήσει Συχνότητας [33]*

Στο πρότυπο ITU R P.676-10, 2013 παρουσιάζεται μία πλήρης μεθοδολογία για τον υπολογισμό αυτού του είδους των απωλειών. Μάλιστα, σύμφωνα με αυτό (ITU P.676-10) η προκαλούμενη απόσβεση σε αυτή την κατηγορία εξαρτάται κυρίως από το υψόμετρο πάνω από το επίπεδο της θάλασσας, τη συχνότητα, τη θερμοκρασία, την πίεση και την πυκνότητα υδρατμών.

Επιπλέον, σημαντική είναι η **απόσβεση λόγω των σύννεφων** στην ατμόσφαιρα η οποία αυξάνεται ανάλογα με τη συχνότητα λειτουργίας και η οποία θεωρείται αμελητέα για συχνότητες εντός της Ku μπάντας συχνοτήτων ή χαμηλότερες, αλλά σύμφωνα με (Παναγόπουλος κ.α., 2004a) για μπάντες όπως οι Ka, Q/V και W αποτελούν σημαντικό παράγοντα απωλειών και πρέπει να υπολογίζονται προσεκτικά. Παρακάτω παρατίθεται διάγραμμα του [34] το οποίο απεικονίζει τις απώλειες λόγω σύννεφων συναρτήσει της πιθανότητας υπέρβασης του προς μελέτη επιπέδου απωλειών για 3 διαφορετικές συχνότητες μετάδοσης, σύμφωνα με το μοντέλο της ITU-T P.840-6,2013).



Σχήμα 10. Διάγραμμα Πιθανότητας Υπέρβασης συναρτήσει Εξασθένησης λόγω Σύννεφων, Αθήνα Ελλάδα, κατερχόμενη Ζεύξη , Hellas Sat (39° E)[34]

Επιπρόσθετα, **ένα σήμα το οποίο διέρχεται από το στρώμα τήξης του πάγου** (το επίπεδο της ατμόσφαιρας πάνω από το ενεργό επίπεδο βροχής, στο οποίο παρατηρείται λιώσιμο του πάγου και η μετατροπή του σε μορφή βροχής), υφίσταται μεταβολή της διαφορικής του φάσης και απόσβεση εξαιτίας της μη σφαιρικής μορφής των σκεδαστών (παγοκρυστάλλων και σταγόνων βροχής) που βρίσκονται στο συγκεκριμένο επίπεδο της ατμόσφαιρας. Αυτό έχει ως τελικό αποτέλεσμα την ύπαρξη απωλειών λόγω **αποπόλωσης** του σήματος, στην οποία γίνεται αναφορά σε διάφορες βιβλιογραφικές πηγές όπως η ITU-R P.530-18 και η ITU-R P.618-13.

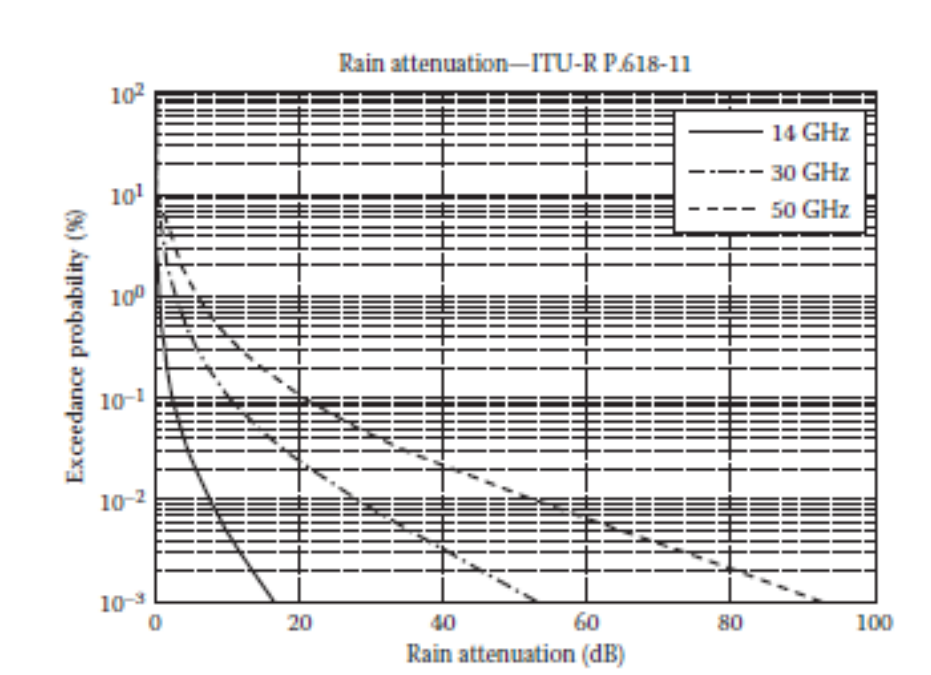
Ωστόσο, το ατμοσφαιρικό φαινόμενο που επηρεάζει περισσότερο μία ζεύξη είναι οι **υδρομετεωρικές κατακρημνίσεις**, κοινώς βροχοπτώσεις, οι οποίες προκαλούν υψηλά επίπεδα απόσβεσης στο μεταδιδόμενο σήμα, λόγω σκέδασης και απορρόφησης της προσπίπτουσας στις σταγόνες βροχής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Τα επίπεδα των απωλειών εξαρτώνται κάθε φορά από τον ρυθμό βροχόπτωσης και την κατανομή μεγέθους των σταγόνων, καθώς επίσης και από το ενεργό μέτωπο της βροχής και τη χρησιμοποιούμενη γωνία ανύψωσης, με τα δύο τελευταία να καθορίζουν το μήκος του μονοπατιού εντός του οποίου το σήμα επηρεάζεται από αυτό το φαινόμενο. Σύμφωνα με το (Βιβλίο Δορυφορικές) η μαθηματική περιγραφή της ειδικής απόσβεσης λόγω βροχόπτωσης γίνεται από τη σχέση :

$$A_0 = a \times r^b \quad (5.12)$$

Όπου  $r$  είναι το ύψος της βροχόπτωσης (mm/h) και  $a, b$  παράμετροι του προτύπου ITU-R. P. 838-3, 2005 που υπολογίζονται μέσω συστήματος εξισώσεων, έτσι ώστε η  $A$  να προσεγγίζει εμπειρικά δεδομένα προερχόμενα από την εκάστοτε προς μελέτη περιοχή. Σύμφωνα με την ίδια πηγή, η ειδική απόσβεση αυξάνεται με τη συχνότητα, για δεδομένο επίπεδο ρυθμού βροχόπτωσης, ενώ όπως είναι αναμενόμενο, το ενεργό μήκος της διαδρομής του σήματος εντός της περιοχής βροχόπτωσης αυξάνεται με τη μείωση της χρησιμοποιούμενης γωνίας ανύψωσης. Τέλος, η συνολική απόσβεση εντός της εν λόγω διαδρομής δίδεται από τον τύπο:

$$A(\text{dB}) = \int_0^L A_0(x) dx \quad (5.13)$$

Όπου  $A_0$  η ειδική απόσβεση λόγω βροχής όπως υπολογίσθηκε παραπάνω και  $L$  το ενεργό μήκος διαδρομής εντός της περιοχής βροχόπτωσης. Στη συνέχεια παρατίθεται διάγραμμα του [34] το οποίο δείχνει σύμφωνα με το πρότυπο ITU-R P.618-11 τις απώλειες λόγω βροχόπτωσης συναρτήσει της πιθανότητας υπέρβασης για 3 διαφορετικές συχνότητες μετάδοσης.



Σχήμα 11. Διάγραμμα Πιθανότητας Υπέρβασης συναρτήσει Εξασθένησης λόγω Βροχής, Αθήνα Ελλάδα, κατερχόμενη Ζεύξη, Hellas Sat (39° E)[34]



Η απόσβεση λόγω σκέδασης και η αποπόλωση λόγω ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων (βροχής και σωματιδίων πάγου) αυξάνονται κατακόρυφα για συχνότητες υψηλότερες των 30 GHz αφού είναι ανάλογη του τετραγώνου της συχνότητας.

Μάλιστα όταν η γωνία ανύψωσης **είναι χαμηλότερη από 10°**, σημαντική είναι η παρουσία φαινομένων λόγω μεταβολής του δείκτη διάθλασης του μέσου, όπως η διάχυση και ο σπινθηρισμός (γρήγορες διακυμάνσεις του πλάτους και της φάσης του δορυφορικού σήματος), τα οποία αυξάνονται για αύξηση της συχνότητας και του μήκους διαδρομής και μειώνονται για αύξηση της κατευθυντικότητας της κεραίας και μείωση του πλάτους της δέσμης αυτής. Οι σπινθηρισμοί αυτοί μπορούν να ενταχθούν σε δύο κατηγορίες με τη μεν πρώτη να αφορά σπινθηρισμούς υπό συνθήκες ξηρού κλίματος ενώ η δεύτερη σπινθηρισμούς υπό συνθήκες βροχής. Ένα καλό μοντέλο υπολογισμού αυτού του φαινομένου είναι αυτό που προτείνεται από το πρότυπο ITU-R P. 618-11.

Ένα ακόμα σημαντικό φαινόμενο, το οποίο όμως δεν επηρεάζει τα σήματα μονής πόλωσης, είναι αυτό της αποπόλωσης, η οποία προκαλείται από το μη σφαιρικό σχήμα σκεδαστών, όπως οι σταγόνες βροχής και οι παγοκρύσταλλοι και επιφέρει διαφορική απόσβεση και ολίσθηση φάσης στο σήμα. Το φαινόμενο αυτό έχει επίπτωση σε συστήματα που χρησιμοποιούν δύο ορθογώνιες πολώσεις και οδηγεί στην ύπαρξη παρεμβολών αντίθετης ορθογωνίας πόλωσης (cross-polar interference). Δείκτες μετρήσεως αυτού του φαινομένου αποτελούν ο διαχωρισμός διασταύρωσης πόλωσης XPD και η απομόνωση διασταύρωσης πόλωσης XPI οι οποίοι δίνονται από τους παρακάτω τύπους σε dB:

$$XPD = 20 \log(E_{cc} / E_{cx}) \quad (5.14)$$

και

$$XPI = 20 \log(E_{cc} / E_{xc}) \quad (5.15)$$

Όπου  $E_{xc}$  είναι το πλάτος του ηλεκτρικού πεδίου που λαμβάνεται κατά διεύθυνση κάθετη προς τη διεύθυνση αναφοράς,  $E_{cx}$  είναι το πλάτος του ηλεκτρικού πεδίου που λαμβάνεται κατά διεύθυνση αναφοράς ως παρεμβολή προερχόμενη από το ορθογώνιο κανάλι και  $E_{cc}$  είναι το πλάτος του ηλεκτρικού πεδίου που λαμβάνεται κατά διεύθυνση αναφοράς από το κανάλι που υφίσταται την παρεμβολή. Στο πρότυπο της ITU-R P.618-11 υπάρχει ένα κοινώς αποδεκτό εμπειρικό μοντέλο το οποίο έχει εφαρμογή στον υπολογισμό του XPD συναρτήσει της απόσβεσης ίδιας πόλωσης λόγω βροχής. Η συνολική διασταύρωση πόλωσης βρίσκεται από τον παρακάτω τύπο:

$$XPD_t^{-1} = XPD_E^{-1} + XPD_S^{-1} \quad (5.16)$$

Όπου  $XPDE$  και  $XPDS$  ο διαχωρισμός διασταύρωσης πόλωσης της κεραίας του επίγειου σταθμού και του δορυφόρου αντίστοιχα. Μάλιστα στο [33] αναφέρεται ότι αν η οφειλόμενη στην αποπόλωση ισχύς παρεμβολής θεωρηθεί προσθετικός θόρυβος, τότε η σηματοθορυβικό λόγος διαμορφώνεται ως εξής:

$$CNR = \frac{P_r}{N + P_r \times 10^{\frac{-XPD}{10}}} \quad (5.17)$$

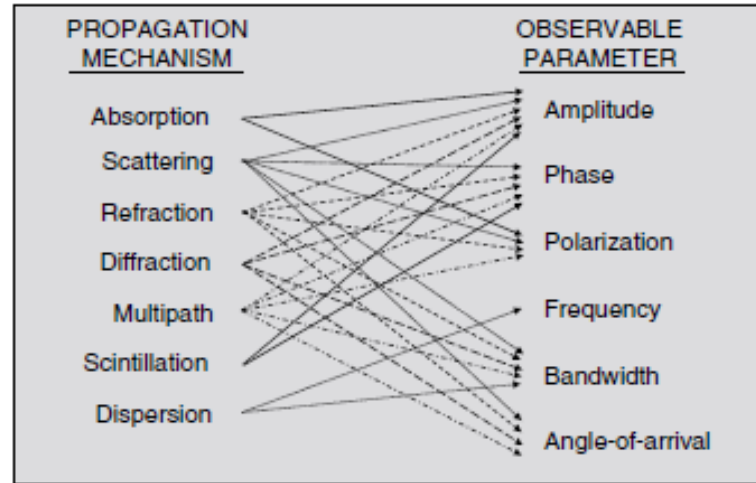
Όπου  $N$  η ισχύς θορύβου λήψης και  $P_r$  η ισχύς σήματος λήψης από το ομοπολικό κανάλι.

Παρακάτω παρατίθεται πίνακας του [34] στον οποίο παρουσιάζονται μοντέλα υπολογισμών τροποσφαιρικών φαινομένων της ITU:

| Επίδραση Διάδοσης<br>– Στοιχείο<br>Εξασθένησης                | Σύσταση<br>ITU-R      | Παράμετροι Μοντέλου και<br>Εύρος Επικύρωσης                                      | Εύρος Εγκυρότητας |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Εξασθένηση<br>οξυγόνου                                        | P.676-10<br>(09/2013) | Θερμοκρασία και πίεση στο<br>έδαφος ή στο προφίλ                                 | Έως 350 GHz       |
| Εξασθένηση<br>υδρατμών                                        | P.676-10<br>(09/2013) | Πίεση, θερμοκρασία και<br>πυκνότητα υδρατμών στο έδαφος<br>ή στο προφίλ IWVC pdf | Έως 350 GHz       |
| Εξασθένηση από<br>νέφη                                        | P.840-6<br>(09/2013)  | ILWC pdf                                                                         | Έως 200 GHz       |
| Εξασθένηση βροχής                                             | P.618-11<br>(09/2013) | Ύψος βροχής                                                                      | Έως 55 GHz        |
| Μακροχρόνια<br>εξασθένηση βροχής –<br>κλιμάκωση<br>συχνότητας | P.618-11<br>(09/2013) | Εξασθένηση, συχνότητα                                                            | Από 7 έως 55 GHz  |
| Σπινθηροβολία                                                 | P.618-11<br>(09/2013) | Υγρός όρος<br>ραδιοδιαθλασιμότητας, $N_{wet}$                                    | 4–20 GHz          |
| Αποπόλωση από<br>βροχή και<br>κρυστάλλους πάγου               | P.618-11<br>(2013)    | Εξασθένηση                                                                       | 6–55 GHz          |

**Πίνακας 7. ITU Μοντέλα Ατμοσφαιρικών Απωλειών - Προσαρμοσμένος από [34]**

Τέλος, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως όλα τα παραπάνω φαινόμενα διάδοσης οδηγούν σε υποβάθμιση του προς μετάδοση σήματος και λειτουργούν αθροιστικά. Ωστόσο η απομόνωση αυτών και η ξεχωριστή μελέτη τους ως ανεξάρτητα μεταξύ τους, δεν αποτελεί τη βέλτιστη οδό, αφού αποδεικνύεται ότι πολλά εξ αυτών παρουσιάζουν βαθμούς συσχέτισης με άλλα, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα του [16]:



Σχήμα 12. Διάγραμμα Συσχέτισης Μηχανισμών Απωλειών Διάδοσης[16]

Για τον λόγο αυτό η ITU πρότεινε με το ITU-R P.618 την άθροιση των επί μέρους απωλειών, θεωρώντας ότι αυτές είναι μερικώς ασυσχέτιστες μεταξύ τους ως εξής:

$$A_T(P) = A_G(P) + \sqrt{(A_R(P) + A_C(P))^2 + A_S^2(P)} \quad (5.18)$$

Όπου  $A_T$ ,  $A_G$ ,  $A_R$ ,  $A_C$ , και  $A_S$ , η συνολική εξασθένιση, η απόσβεση λόγω αερίων, η απόσβεση λόγω βροχής και νεφώσεων και η εξασθένιση λόγω σπινθηρισμών αντίστοιχα για δοσμένη πιθανότητα.

## 5.5 Ισχύς Θορύβου και SNIR

Για τον ακριβή υπολογισμό του SNR θα πρέπει να λαμβάνεται κάθε φορά υπόψιν η στατιστικά μεταβαλλόμενη συμπεριφορά των επιμέρους φαινομένων διάδοσης, αναλόγως των συνθηκών που επικρατούν στο εκάστοτε περιβάλλον του διαύλου. Δεδομένου λοιπόν ότι ο υπολογισμός των απωλειών έχει γίνει σωστά, ο σηματοθορυβικός λόγος στην είσοδο του δέκτη βρίσκεται ως εξής:

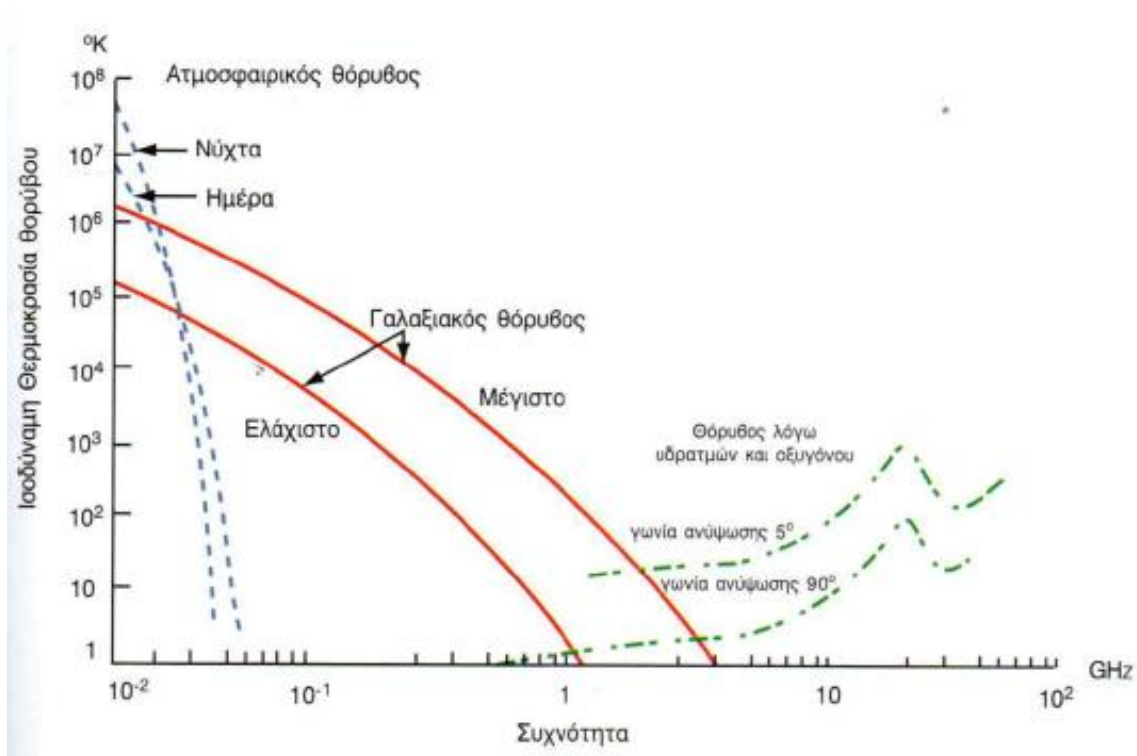
$$SNR_{\text{είσοδου}} = \frac{P_r}{N} \quad (5.19)$$

Όπου  $P_r$  η ισχύς του σήματος λήψης στην είσοδο του δέκτη, υπολογισμένη βάσει του τύπου (5.10) και  $N$  η ισχύς θορύβου η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$N = kTB \quad (5.20)$$

με  $k$ =σταθερά Boltzman,  $T$ = ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου σε  $K^\circ$  στην είσοδο του δέκτη και  $B$ =εύρος ζώνης της ζεύξης σε Hz.

Ωστόσο, σε αντίθεση με την εξασθένιση ελευθέρου χώρου η οποία για αύξηση της συχνότητας μετάδοσης οδηγεί σε μείωση της ισχύος του σήματος πληροφορίας που φτάνει στο δέκτη, η ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου ενός συστήματος, δηλαδή ο θόρυβος ο οποίος υπεισέρχεται στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα και τον οποίο μελετάμε έτσι ώστε να μπορούμε να πετύχουμε καλύτερη διαχείριση και περιορισμό αυτού, δεν μεταβάλλεται μόνο από την συχνότητα αυτή καθ' αυτή αλλά και από την περιοχή συχνοτήτων στην οποία βρισκόμαστε και η οποία επηρεάζεται διαφορετικά από τα διάφορα φυσικά φαινόμενα καθώς το σήμα διέρχεται από την ατμόσφαιρα της Γης. Οι επιπτώσεις αυτού του είδους των φαινομένων στην ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου ενός συστήματος φαίνονται ξεκάθαρα στο σχήμα του [35] το οποίο παρατίθεται στη συνέχεια. Στο εν λόγω σχήμα παρατηρούμε ότι για συχνότητες μεγαλύτερες των 100 MHz που μας ενδιαφέρουν επικρατεί μόνο ο γαλαξιακός θόρυβος, τα επίπεδα του οποίου έχουν μέγιστες και ελάχιστες τιμές θερμοκρασίας θορύβου οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ δύο φθινουσών καμπυλών. Επίσης παρατηρώντας το σχήμα βλέπουμε και μία ακόμα περιοχή, αυτή περί τα 22 GHz, στην οποία πραγματοποιείται συντονισμός των υδρατμών και των μορίων οξυγόνου της ατμόσφαιρας, γεγονός το οποίο οδηγεί σε πρόσθετη θορυβοποίηση του διαύλου. Για τον λόγο αυτόν αποφεύγεται η χρήση της περιοχής αυτής στις ασύρματες επικοινωνίες. Μάλιστα, και εδώ βλέπουμε δύο καμπύλες θερμοκρασιών θορύβου, με την πάνω να αντιστοιχεί σε γωνία ανύψωσης κεραίας  $= 5^\circ$  και την κάτω για γωνία ανύψωσης κεραίας  $90^\circ$ . Το τελευταίο επιβεβαιώνεται και από το [34] σύμφωνα με το οποίο η απορρόφηση από τους υδρατμούς και το οξυγόνο της ατμόσφαιρας συμβάλλει στη συνολική απόσβεση των ραδιοκυμάτων, ιδιαίτερα όταν η γωνία ανύψωσης είναι μικρή.



Σχήμα 13. Διάγραμμα Ισοδύναμης Θερμοκρασίας Θορύβου συναρτήσει Συχνότητας[35]

Η αύξηση της θερμοκρασίας θορύβου του ουρανού οφείλεται στα επιμέρους φαινόμενα διάχυσης στην ατμόσφαιρα, κυρίως λόγω ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων. Σύμφωνα με το (Κουρογιώργας κ.α, 2015a) λαμβάνοντας υπόψιν ότι ο κύριος μηχανισμός απόσβεσης είναι η απόσβεση λόγω βροχής, για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας θορύβου του ουρανού μπορεί να εφαρμοστεί η ακόλουθη φόρμουλα:

$$T_{sky} = T_{cosmic} 10^{\frac{-A_R}{10}} + T_{equiv} \left( 1 - 10^{\frac{-A_R}{10}} \right) \quad (5.21)$$

Όπου  $T_{cosmic}=3^\circ$  για τον κοσμικό θόρυβο και  $T_{equiv}$ = η ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου του δέκτη υπό συνθήκες καθαρού ουρανού λαμβάνοντας υπόψιν την επίδραση των υδρατμών και του οξυγόνου, βάσει της παρακάτω εξίσωσης:

$$T_{equiv} = 275(1 - 10^{-(A_{wv} + A_{ox})/10}) \quad (5.22)$$

Σύμφωνα με το [16] για συχνότητες υψηλότερες των ραδιοσυχνοτήτων επικρατεί ο κβαντικός θόρυβος (quantum noise) και όχι ο θερμικός, το οποίο σημαίνει ότι πρέπει να χρησιμοποιείται και η αντίστοιχη φόρμουλα για τον υπολογισμό αυτού.

Τέλος, ένα ακόμα σημαντικό φαινόμενο το οποίο έχει μεγάλο αντίκτυπο στον σηματοθορυβικό λόγο στην είσοδο του δέκτη είναι οι παρεμβολές, οι οποίες παρουσιάζονται όταν δύο συστήματα λειτουργούν στην ίδια ζώνη συχνότητας. Σύμφωνα με το [34], υπό συνθήκες καθαρού ουρανού, οι παρεμβολές οφείλονται στη διαρροή σήματος από τους πλευρικούς λοβούς των κεραιών των συστημάτων επικοινωνίας, γεγονός το οποίο οξύνεται όταν τα συστήματα αυτά είναι γειτονικά, πχ. όταν δύο δορυφόροι που επικοινωνούν με έναν επίγειο σταθμό βρίσκονται σε γειτονικές θέσεις. Στη γενική περίπτωση, η παρεμβολή μεταξύ συστημάτων μπορεί να προκαλέσει όλες τις μορφές παρεμβολής: ομοκαναλική και ομοπολική παρεμβολή καθώς και παρεμβολή διασταυρούμενης πόλωσης. Οι ποσοτικοί δείκτες μέτρησης της παρεμβολής μεταξύ συστημάτων είναι οι ακόλουθοι:

$$\text{Αναλογία Σήματος προς Παρεμβολή: } SIR = S / I \quad (5.23)$$

Όπου S η ισχύς σήματος και I η ισχύς παρεμβολής

$$\text{Αναλογία Παρεμβολής προς Θόρυβο: } INR = I / N \quad (5.24)$$

$$\text{Αναλογία Σήματος προς Θόρυβο και Παρεμβολή: } SNIR = S / (N + I) \quad (5.25)$$

$$\text{Αναλογία Σήματος προς Θόρυβο και συνολική Παρεμβολή: } SNTIR = S / (N + I_{tot}) \quad (5.26)$$

Όπου στον τελευταίο τύπο συμπεριλαμβάνονται και τα αποτελέσματα αποπόλωσης τα οποία αναφέρθηκαν προηγουμένως λόγω ατμοσφαιρικών φαινομένων διάδοσης. Σημαντική πηγή σχετικά με τα δεδομένα τα οποία χρειάζονται για την εκτίμηση παρεμβολών μεταξύ επίγειων και διαστημικών σταθμών είναι το πρότυπο ITU-R P.619-5.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Κανάλια**

### **6.1 Γενικά περί Χαρακτηρισμού Καναλιών**

Ως γνωστόν, το σύγχρονο περιβάλλον των δορυφορικών επικοινωνιών ολοένα και επεκτείνεται με την συνεχή και αδιάκοπη τοποθέτηση δορυφόρων σε τροχιές, με σκοπό την παροχή πληθώρας υπηρεσιών οι οποίες απαιτούν μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης και χαμηλές καθυστερήσεις. Φυσικά για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο πρέπει πρωτίστως να προηγηθεί ορθή κατανόηση των μηχανισμών που επιδρούν στο δορυφορικό δίαυλο, με σκοπό τη σωστή σχεδίαση του συστήματος, έτσι ώστε κάθε φορά να επιτυγχάνεται το επιθυμητό επίπεδο ισχύος του σήματος μετάδοσης στην είσοδο του εκάστοτε δέκτη, βάσει των διεθνών προτύπων για τις εκάστοτε υπηρεσίες και QoS. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η ποσοτικοποίηση της επίδρασης των επιμέρους φαινομένων, όπως αυτά αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, τόσο μέσω πειραματικών δεδομένων, όσο και μέσω αναλυτικών θεωρητικών μοντέλων και εμπειρικών ή ημιεμπειρικών μοντέλων (Crane, 2003).

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε ανάλυση των επί μέρους ατμοσφαιρικών απωλειών που υφίσταται ένα σήμα κατά τη διάδοσή του στο δορυφορικό δίαυλο. Σκοπίμως δεν έγινε ανάλυση άλλων φαινομένων τα οποία ωστόσο αναφέρθηκαν στην αρχή, λόγω του ότι θεωρούσαμε δορυφορικές επικοινωνίες με σταθερό επίγειο χρήστη, το οποίο πρακτικά συνεπάγεται ύπαρξη συνεχούς οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη. Ωστόσο, στο σύγχρονο περιβάλλον επικοινωνιών κάτι τέτοιο δεν είναι πάντα σίγουρο, αφού πλέον οι επίγειοι χρήστες χαρακτηρίζονται από έντονη κινητικότητα, η οποία επιφέρει την είσοδο νέων φαινομένων στο δίαυλο τα οποία χρήζουν προσεκτικής μελέτης και υπολογισμών. Υπό αυτές τις συνθήκες το περιβάλλον του χρήστη παίζει μείζονα ρόλο στον χαρακτηρισμό του τηλεπικοινωνιακού καναλιού αφού επιβάλει την μελέτη νέων φαινομένων τα οποία οφείλονται στην κίνηση του επίγειου χρήστη σε συνδυασμό με το ανάγλυφο του εδάφους και τυχόν φυσικά ή τεχνητά εμπόδια. Στα παραπάνω έρχεται να προστεθεί και το χαμηλό ή και μηδενικό κέρδος των κεραιών των κινητών τερματικών με σκοπό τη λήψη από πάσα κατεύθυνση.

Τα σύγχρονα δίκτυα κινητών δορυφορικών υπηρεσιών χωρίζονται σε 3 μεγάλες κατηγορίες, κάθε μία από τις οποίες έχει τα δικά της ξεχωριστά χαρακτηριστικά. Αυτές είναι τα δίκτυα Δορυφορικών Κινητών Υπηρεσιών Ξηράς, Θαλάσσης και Αέρος. Η παρούσα εργασία εστιάζει στην πρώτη κατηγορία, η οποία αφορά συχνότητες από την μπάντα L έως τις μπάντες Ku και Ka και περιλαμβάνει εκτός των άλλων νομαδικά ή φορητά τερματικά χειρός. Οι ζεύξεις μεταξύ πομπού και δέκτη σε ένα τέτοιο δίκτυο διασχίζουν τα στρώματα της τροπόσφαιρας και της ιονόσφαιρας και φτάνουν έως το τοπικό περιβάλλον του δέκτη. Τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα τα οποία επιδρούν πάνω στο σήμα αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ωστόσο τα φαινόμενα που προέρχονται από το τοπικό

περιβάλλον του τερματικού, προκαλούν επιπλέον απώλειες οι οποίες έρχονται να προστεθούν στον όρο των υπάρχουσών απωλειών της εξίσωσης (5.9) και οι οποίες αναλύονται ως εξής:

**α) Απώλειες λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης (multipath fading):** είναι οι απώλειες οι οποίες οφείλονται στη δημιουργία πολλαπλών ακτινών του σήματος, οι οποίες φτάνουν στο δέκτη πλέον της κύριας συνιστώσας αυτού, σε διαφορετικό χρόνο η κάθε μία λόγω διαφορετικού μήκους διαδρομής σε σχέση με τις υπόλοιπες και δημιουργούν παρεμβολές προσθετικού ή αφαιρετικού χαρακτήρα με τελικό αποτέλεσμα την εξασθένηση του σήματος,. Δημιουργούνται είτε από την ανάκλαση του σήματος σε λείες επιφάνειες όπως οι τοίχοι κτηρίων ή μεταλλικές πινακίδες στο εγγύς περιβάλλον του δέκτη, είτε από φαινόμενα περίθλασης από αιχμηρές ακμές όπως οι οροφές κτιρίων και οι κορυφές βουνών, είτε από φαινόμενα σκέδασης από τραχιές επιφάνειες, όπως οι δρόμοι και τα δέντρα.

**β) Απώλειες λόγω σκίασης:** είναι μορφές απωλειών οι οποίες οφείλονται στη μετάδοση του σήματος με υποβαθμισμένα χαρακτηριστικά (εξασθένηση ισχύος σήματος) διαμέσου εμποδίων, όπως το φύλλωμα των δέντρων και κτήρια.

**γ) Απώλειες παντελούς παρεμπόδισης-απόκρυψης του σήματος (signal blockage)** λόγω παρεμβαλλόμενων εμποδίων μεταξύ πομπού και δέκτη, με αποτέλεσμα την απουσία άμεσης ακτίνας σήματος (LoS) η οποία να αφικνείται στο κινητό τερματικό.

Από τις παραπάνω κατηγορίες, η περίπτωση της πολυδιαδρομικής διάδοσης είναι αυτή με την με τη μεγαλύτερη παρουσία σε ένα περιβάλλον κινητών δορυφορικών υπηρεσιών (Mobile Satellite Service) και η οποία παρουσιάζει τη μεγαλύτερη δυσκολία όσον αφορά την πρόβλεψη και μοντελοποίησή της. Επιπλέον τα παραπάνω φαινόμενα μπορούν να δρουν ανεξάρτητα ή και ταυτόχρονα στο προς μετάδοση σήμα κατά την κίνηση του τερματικού. Για τον λόγο αυτό υπάρχει πληθώρα μοντέλων εκτίμησης αυτών των απωλειών με τα περισσότερα από αυτά να είναι συνδυασμός εμπειρικών και στατιστικών μοντέλων βασισμένα σε υπάρχουσες μετρήσεις για την στατιστική περιγραφή αυτών των φαινομένων.

Η απόσβεση του σήματος λόγω πολλαπλών διαδρομών διάδοσης κατηγοριοποιείται βάσει των χαρακτηριστικών και της τοποθεσίας των σκεδαστών σε σχέση με το κινητό τερματικό σε 2 κατηγορίες:

- Απόσβεση Στενής Ζώνης (narrowband fading)
- Απόσβεση Ευρείας Ζώνης (wideband fading)

Κάνοντας μία γενική αρχική κατάταξη, θα μπορούσε να πει κανείς ότι τα κανάλια φωνής και χαμηλών ρυθμών μετάδοσης θεωρούνται κανάλια στενής ζώνης, ενώ κανάλια χρήσης πολυμέσων και υψηλών ρυθμών μετάδοσης με εύρος ζώνης από μερικά MHz έως μερικά GHz, θεωρούνται κανάλια



ευρείας ζώνης. Σε κάθε περίπτωση το λαμβανόμενο σήμα αποτελείται από το άθροισμα των επί μέρους κυμάτων, προερχόμενων από τους  $N$  σκεδαστές σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$y = a_1 e^{j(\omega\tau_1 + \theta_1)} + a_2 e^{j(\omega\tau_2 + \theta_2)} + \dots + a_N e^{j(\omega\tau_N + \theta_N)} \quad (6.1)$$

Όπου  $a_i$  το πλάτος της εκάστοτε ακτίνας με την αντίστοιχη φάση εντός παρενθέσεων  $()$  και  $\tau_i$  η αντίστοιχη χρονική καθυστέρηση.

## 6.2 Κανάλι Στενής Ζώνης

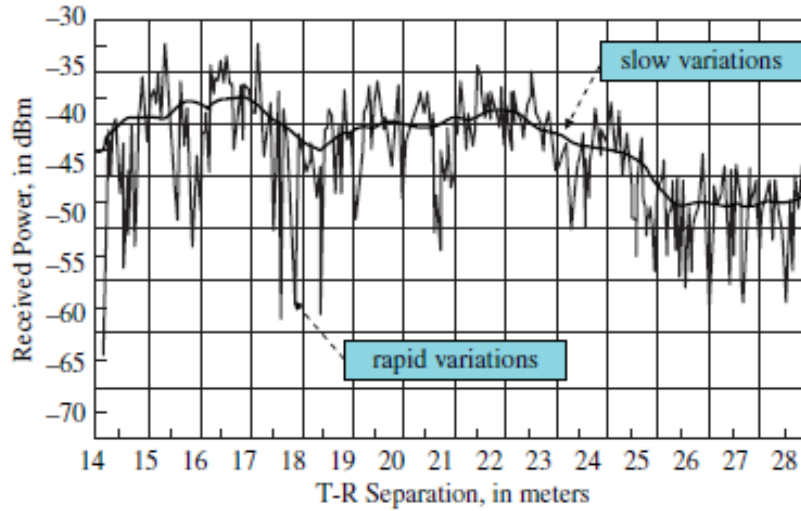
Στην πρώτη κατηγορία, οι αποσβέσεις είναι προϊόν των μικρών διαφορών μεταξύ των μηκών διαδρομής των ακτινών (της τάξεως μερικών μηκών κύματος) που προέρχονται από τον εγγύς χώρο του κινητού δέκτη, οι οποίες οδηγούν σε ολίσθηση φάσης. Ωστόσο επειδή οι ακτίνες φτάνουν πρακτικά στο δέκτη την ίδια χρονική στιγμή, όλες οι συχνότητες εντός του χρησιμοποιούμενου εύρους ζώνης επηρεάζονται το ίδιο από το φαινόμενο αυτό. Συνεπώς το κανάλι χαρακτηρίζεται ως Κανάλι Αποσβέσεων Στενής Ζώνης (Narrowband Fading Channel) και ισχύει ότι:  $\tau_1 \approx \tau_2 \approx \dots = \tau$ .

Σε αυτήν την κατηγορία, παρατηρώντας το λαμβανόμενο σήμα, βάσει της ταχύτητας των διακυμάνσεων που παρουσιάζονται σε αυτό, βλέπουμε δύο είδη διαλείψεων που εμφανίζονται σε διαφορετικά επίπεδα, ως ακολούθως:

α) **Διαλείψεις σκίασης ή διαλείψεις μεγάλης κλίμακας:** Εμφανίζονται για πολλά μήκη κύματος της κίνησης του χρήστη και οφείλονται σε μεγάλες αλλαγές στο περιβάλλον αυτού, όπως η εμφάνιση εμποδίων μεγάλης κλίμακας/μεγέθους κατά την κίνησή του π.χ. κτήρια. Αναφέρονται σε σταδιακές αλλαγές στην ισχύ του σήματος και εξελίσσονται αργά σε σχέση με τον χρόνο μετάδοσης αυτού.

β) **Γρήγορες διαλείψεις ή διαλείψεις πολυδιαδρομικής διάδοσης ή διαλείψεις μικρής κλίμακας:** Παρουσιάζονται σε πολύ μικρότερη κλίμακα της κίνησης του χρήστη (μικρότερη του ενός μήκους κύματος) εξαιτίας της πολλαπλότητας διαδρομών των αφικνούμενων σε αυτών ακτίνων. Δημιουργούνται λόγω της ύπαρξης ισχυρών σκεδαστών στο περιβάλλον του κινητού τερματικού και έχουν μεγαλύτερη επίπτωση στο λαμβανόμενο σήμα.

Στη συνέχεια παρατίθεται σχήμα στο οποίο φαίνεται πως τα δύο προαναφερθέντα είδη διαλείψεων επιδρούν στο μεταδιδόμενο σήμα, έχοντας συσσωρευτικό χαρακτήρα:



Σχήμα 14. Διάγραμμα Ισχύος Σήματος Λήψης συναρτήσει του Χρόνου για Κανάλι Κινητού Χρήστη Στενής Ζώνης Αποσβέσεων [16]

Η μέση ισχύς του λαμβανόμενου σήματος εξαιτίας αυτών των φαινομένων, μετρούμενη για μία σχετικά μεγάλη απόσταση, εΐθισται να μειώνεται με ρυθμό μεγαλύτερο από τον ρυθμό μετάδοσης σε ελεύθερο χώρο ( $1/r^2$ ), το οποίο είναι λογικό αν σκεφτεί κανείς ότι τα φαινόμενα αυτά λειτουργούν προσθετικά στις απώλειες και γι' αυτόν τον λόγο πρέπει να συνυπολογίζονται κατά τον προϋπολογισμό ζεύξης. Έτσι λοιπόν και σύμφωνα με το [16] η εξίσωση (5.7) μετατρέπεται ως εξής:

$$P_R = \bar{p}_r \times 10^{\frac{x}{10}} \times a^2 \quad (6.2)$$

$$P_R = p_t \times g_t \times g_r \times g(r) \times 10^{\frac{x}{10}} \times a^2 \quad (6.3)$$

Όπου  $g(r)$  ο παράγοντας απωλειών διάδοσης που αναλύεται εκτενώς στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου. Επιπλέον στην παραπάνω εξίσωση προϋπολογισμού ισχύος έχουν προστεθεί δύο νέοι όροι ως ακολούθως:

- $10^{x/10}$  ο παράγοντας απωλειών λόγω διαλείψεων σκίασης, ο οποίος σε dB δίνεται από το  $x(\text{dB})$
- $a^2$  ο παράγοντας απωλειών λόγω γρήγορων διαλείψεων-διαλείψεων πολυδιαδρομικής διάδοσης

Η ίδια σχέση σε dB εκφράζεται ως εξής:

$$P_R = \bar{p}_r + x + 20 \log(a) \quad (6.4)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι και οι δύο παραπάνω όροι είναι τυχαίες μεταβλητές αφού περιγράφουν τυχαία μεταβαλλόμενα φαινόμενα κατά τη ζεύξη. Για τον λόγο αυτόν, κατά τη σχεδίαση ενός συστήματος, πάντα λαμβάνεται υπόψιν ένα περιθώριο ισχύος για την αντιστάθμιση αυτών των τυχαίων απωλειών, βάσει επιθυμητό ποσοστό διαθεσιμότητας αναλόγως της παρεχόμενης υπηρεσίας και των διεθνών προτύπων. Έτσι, κάθε φορά γίνεται υπολογισμός του αναμενόμενου επιπέδου απωλειών, με σκοπό την αντιμετώπιση αυτών και την επίτευξη συγκεκριμένης πιθανότητας αποκοπής (Pout) του συστήματος.

### 6.2.1 Παράγοντας Απωλειών Διάδοσης

Όπως είναι γνωστό, τα σύγχρονα LMSS χαρακτηρίζονται από έντονη κινητικότητα των επίγειων τερματικών, γεγονός το οποίο συνεπάγεται με συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες διάδοσης στο δίαυλο και την επίδραση τυχαίως μεταβαλλόμενων φαινομένων στη ζεύξη. Στο πλαίσιο αυτό, δεν γίνεται να μην επηρεαστεί ο παράγοντας απωλειών μονοπατιού, ο οποίος έως τώρα θεωρούσαμε ότι ήταν ίδιος με αυτόν της μετάδοσης σήματος σε ελεύθερο-κενό χώρο θεωρώντας ότι υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη. Στην πραγματικότητα όμως το σενάριο δεν είναι τόσο ιδανικό, αφού το περιβάλλον του κινητού τερματικού και κατά συνέπεια οι συνθήκες διάδοσης συνεχώς μεταβάλλονται. Αυτό φυσικά έχει ως αποτέλεσμα την επίδραση με τυχαίο τρόπο φαινομένων διάδοσης στο σήμα, ένα εκ των οποίων είναι και η συνεχής μετάβαση μεταξύ καταστάσεων εμφάνισης και απόκρυψης της γραμμής οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην κατά διαστήματα εμφάνιση μεταξύ αυτών ισχυρών εμποδίων καθ' όλη τη διάρκεια μιας ζεύξης. Έτσι λοιπόν για μεταβαλλόμενο περιβάλλον κινητού χρήστη στο οποίο παρουσιάζεται απώλεια οπτικής επαφής μεταξύ επίγειου κινητού τερματικού και δορυφόρου, η εξίσωση προϋπολογισμού αλλάζει ελαφρώς, καθώς ο όρος  $g(r)$  που αφορά τις απώλειες ελευθέρου χώρου όπως τον μελετούσαμε μέχρι τώρα, δεν καλύπτει τη συγκεκριμένη περίπτωση. Για τον λόγο αυτό θεωρώντας ότι ο παράγοντας απωλειών μονοπατιού στη γενική του μορφή εκφράζεται ως ακολούθως:

$$g(r) = kr^{-n} \quad (6.5)$$

Όπου  $k$  σταθερά διάδοσης ίση με  $(\lambda / 4\pi)^2$  για ελεύθερο-κενό χώρο και  $r$  η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Η μεταβλητή η οποία εκφράζει την εξασθένιση του σήματος ( $n$ ) επηρεάζεται από το περιβάλλον του δέκτη, την ύπαρξη εμποδίων εντός αυτού και την ύπαρξη ή μη οπτικής επαφής. Έτσι λοιπόν για κενό χώρο η μεταβλητή  $n=2$ , ενώ για αστικά ή ημιαστικά περιβάλλοντα παίρνει τιμές από 2.7 έως 3.5, με την τιμή αυτή να φτάνει έως και 5 για πυκνά αστικά περιβάλλοντα. Οι αναφερόμενες αυτές τιμές αποτελούν προϊόν εμπειρικών μετρήσεων σε διάφορα περιβάλλοντα και μεταβάλλονται κάθε φορά αναλόγως. Προφανώς αποτέλεσμα των παραπάνω φαινομένων είναι τελικά το σήμα να

εξασθενεί με μεγαλύτερο ρυθμό από αυτόν του ελευθέρου χώρου. Αυτό εκφράζεται μέσω εμπειρικών μοντέλων και με τον ακόλουθο τύπο:

$$L(d) = L_{FS}(d) + L_{excess} \quad (6.6)$$

όπου  $L$  οι απώλειες διάδοσης,  $L_{fs}$  οι απώλειες εξασθένησης ελευθέρου χώρου και  $L_{excess}$  οι επιπλέον απώλειες λόγω συνεχούς μετάβασης του διαύλου μεταξύ των καταστάσεων απόκτησης και απώλειας του LoS.

Επιπλέον, για τις ίδιες περιπτώσεις συχνά γίνεται χρήση του μοντέλου δύο κλίσεων όπως παρακάτω:

$$\text{Απώλειες Εγγύς Περιοχής (d < d_{bp}):} \quad L(d) = L_0 \left( \frac{d}{d_0} \right)^{n_1} \quad (6.7)$$

$$\text{Απώλειες Μεμακρυσμένης Περιοχής (d > d_{bp}):} \quad L(d) = L_0 \left( \frac{d_{bp}}{d_0} \right)^{n_1} \left( \frac{d}{d_{bp}} \right)^{n_2} \quad (6.8)$$

και οι ίδιες απώλειες σε dB εκφράζονται ως εξής:

$$\text{Απώλειες Εγγύς Περιοχής (d < d_{bp}):} \quad L(d) = L_0 + 10n_1 \log_{10}(d) \quad (6.9)$$

$$\text{Απώλειες Μεμακρυσμένης Περιοχής (d > d_{bp}):} \quad L(d) = L_0 + 10n_1 \log_{10}(d_{bp}) + 10n_2 \log_{10}\left(\frac{d}{d_{bp}}\right) \quad (6.10)$$

Όπου  $d_{bp} = \frac{4h_t h_r}{\lambda}$  η απόσταση του σημείου καμπής κλίσης στο οποίο γίνεται ο διαχωρισμός

μεταξύ της εγγύς και της μεμακρυσμένης περιοχής,  $L(d)$  η απώλεια μονοπατιού,  $L_0$  η απώλεια μονοπατιού για δεδομένη απόσταση αναφοράς  $d_0$  (συνήθως 1m),  $d$  η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη μετρούμενη από τον πομπό,  $n_1$  ο εκθέτης απωλειών για την εγγύς περιοχή και  $n_2$  ο αντίστοιχος για την μεμακρυσμένη.

Σύμφωνα με το [16] το μοντέλο δύο ακτίνων χρησιμοποιείται συχνά, μετά από πολλές παραδοχές, για την ανάλυση κινητών επικοινωνιών αφού αντιπροσωπεύει ένα ευρύ φάσμα μετρήσεων, προερχόμενες τόσο από χερσαία κυψελωτά δίκτυα, όσο και από συστήματα δορυφορικών κινητών επικοινωνιών. Ωστόσο σύμφωνα με άλλες βιβλιογραφικές πηγές αυτό χρησιμοποιείται όταν υπάρχει οπτική επαφή πομπού και δέκτη, η απόσταση  $d$  είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τα ύψη των κεραιών αυτών και η γωνία πρόσπτωσης  $\theta$  λαμβάνει αρκετά χαμηλές τιμές. υπό αυτές τις συνθήκες ο παράγοντας απωλειών μονοπατιού γίνεται:

$$g(r) = [(h_t \times h_r)^2] / d^4 \quad (6.11)$$

Όπου για μεγάλες τιμές της απόστασης  $d$  βλέπουμε ότι η λαμβανόμενη ισχύς και οι αποσβέσεις διαδρομής είναι ανεξάρτητες της συχνότητας.

Σε πρακτικό επίπεδο συχνά γίνεται χρήση των εμπειρικών μοντέλων Lutz και ITU-R P.681-11, τα οποία εφαρμόζονται για LMSS λαμβάνοντας υπόψιν το φαινόμενο απώλειας της LoS.

### 6.2.2 Απώλειες Σκίασης

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στην εξίσωση (6.2), ο όρος που περιγράφει τις διαλείψεις του διαύλου λόγω σκίασης είναι ο  $10^{(x/10)}$ , όπου το  $x$  (dB) είναι τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί Γκαουσιανή κατανομή με μηδενική μέση τιμή και διακύμανση  $\sigma^2$ , όπως παρακάτω:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6.12)$$

Εν προκειμένω η τυπική απόκλιση είθισται να κυμαίνεται μεταξύ των τιμών από 4-6 dB για ημιαστικά περιβάλλοντα έως 10-12 dB για πυκνά αστικά περιβάλλοντα, λόγω ύπαρξης περισσότερων εμποδίων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ισχύς λήψης του μεταδιδόμενου σήματος, όταν δεν λαμβάνονται υπόψιν απώλειες από άλλα τυχαίως μεταβαλλόμενα φαινόμενα, να ακολουθεί τη λογαριθμική-κανονική κατανομή με κέντρο τη μέση τιμή αυτής.

Ξεκινώντας από το παραπάνω δεδομένο και έχοντας υπόψιν ότι

$$P_R = \bar{P}_r \times 10^{x/10} \times a^2 \quad (6.13)$$

Όπου :

$$\bar{P}_r = p_t \times g_t \times g_r \times g(r) \quad (6.14)$$

και

$$P_{SF} = \bar{P}_r (10^{x/10}) \quad (6.15)$$

Αν θεωρήσουμε ότι η ελάχιστη επιθυμητή τιμή ισχύος σήματος λήψης είναι  $P_0$ , τότε η πιθανότητα η λαμβανόμενη ισχύς σήματος (λαμβάνοντας υπόψιν τις απώλειες σκίασης αλλά όχι τις απώλειες πολυδιαδρομικής διάδοσης) να είναι ίση ή μεγαλύτερη αυτής βρίσκεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$P[P_{SF} \geq P_0] = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{P_0 - \bar{P}_{SF}}{\sqrt{2}\sigma}\right) \quad (6.16)$$

Όπου

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-x^2} dx = \text{Συνάρτηση Σφάλματος} \quad (6.17)$$

Αν  $P_{\text{threshold}} = P_0$  η ελάχιστη απαιτούμενη ισχύς λαμβανόμενου σήματος έτσι ώστε να ικανοποιείται ο σηματοθορυβικός λόγος κατωφλίου τότε η πιθανότητα  $P_{SF} < P_0$  δίνεται από τον τύπο:

$$P[P_{SF} < P_0] = 1 - P[P_{SF} \geq P_0] = P_{\text{outage}} \quad (6.18)$$

ή

$$P_{\text{outage}} = P(R < R_{\min}) = Q\left(\frac{R_{\min} - \mu}{\sigma}\right) \quad (6.19)$$

Όπου  $Q()$  η συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος της Γκαουσιανής κατανομής.

Στη συνέχεια γίνεται αναφορά σε κάποια συχνά χρησιμοποιούμενα μοντέλα υπολογισμού αποσβέσεων λόγω σκίασης:

1. Εμπειρικό Μοντέλο για Σκίαση Δίπλα στο Δρόμο, το οποίο αναπτύχθηκε από τη NASA (NASA Ref. Doc 1274) και αφορά μεθοδολογία πρόβλεψης απωλειών λόγω σκίασης εγγύς δρόμου, βασιζόμενο σε μετρήσεις των Goldhirsch και Vogel για κανάλια LMSS και συχνότητες 870 MHz και 1.5 GHz. Στη συνέχεια υιοθετήθηκε από το πρότυπο ITU-R P.681-9 επιτρέποντας τις προβλέψεις για συχνότητες από 800 MHz έως 20 GHz και γωνίες ανύψωσης από 7° έως 90°.

2. Μοντέλο της σύστασης ITU-R P.681-9 για απώλειες σκίασης από κτήρια δίπλα στον δρόμο με εφαρμογή σε αστικά περιβάλλοντα.

### 6.2.3 Διαλείψεις Πολυδιαδρομικής Διάδοσης

Όπως και πριν, στην εξίσωση (6.2), ο όρος που περιγράφει τις γρήγορες διαλείψεις του διαύλου λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης είναι το  $\alpha^2$ , όπου το  $\alpha$  είναι τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί:

a) Rayleigh κατανομή, όταν δεν υπάρχει ακτίνα οπτικής επαφής και το σήμα φτάνει στον δέκτη μέσω άλλων διαδρομών (σύμφωνα με τον Swartz κ.α. το κανάλι παρουσιάζει στατιστικά χαρακτηριστικά αυτής της κατανομής όταν ο αριθμός των αφικνούμενων ακτινών είναι  $L \geq 6$ )

b) Ricean κατανομή, όταν εκτός από τις επί μέρους ακτίνες λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης, υπάρχει και ακτίνα οπτικής επαφής.

#### 6.2.3.1 Rayleigh κατανομή

Στην περίπτωση της Rayleigh κατανομής θεωρούμε μηδενική μέση τιμή και διακύμανση  $\sigma^2$ , όπως παρακάτω:

$$f_a(a) = \frac{a}{\sigma_r^2} e^{-\frac{a^2}{2\sigma_r^2}} \quad (6.20)$$

Όπου  $f_a(a)$  η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της  $a$ , και  $2\sigma_r^2$  η μέση αναμενόμενη τιμή του  $a^2$ . Στη συνέχεια έχοντας υπόψιν τους τύπους (6.13), (6.14) και (6.15) έχουμε ότι:

$$P_R = P_{SF} \times a^2 \quad (6.21)$$

καταλήγουμε ότι συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της λαμβανόμενης ισχύος  $P_R$  ακολουθεί εκθετική κατανομή με μέση τιμή ίση με την  $P_{SF}$  και εκφράζεται ως ακολούθως:

$$f(p_R) = \frac{1}{P_{SF}} e^{-\frac{p_R}{P_{SF}}} \quad (6.22)$$

Αν θεωρήσουμε ότι η ελάχιστη επιθυμητή τιμή ισχύος σήματος λήψης είναι  $P_0$ , τότε η πιθανότητα η λαμβανόμενη ισχύς σήματος να είναι ίση ή μεγαλύτερη αυτής βρίσκεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$P(P_R \geq P_{threshold}) = e^{-\frac{P_{threshold}}{P_{SF}}} \quad (6.23)$$

Δεδομένου ότι η Συσσωρευτική Συνάρτηση Εκθετικής Κατανομής = Πιθανότητα Αποκοπής Συστήματος ( $P_{out}$ ) έχουμε:

$$F(P_{threshold}) = 1 - e^{-\frac{P_{threshold}}{P_{SF}}} = P_{out} \quad (6.24)$$

Εν προκειμένω τα περιθώρια ισχύος τα οποία είθισται να τηρούνται για την αντιστάθμιση των συγκεκριμένων διαλείψεων είναι από 5-15 dB για αγροτικές περιοχές, 10-20 dB για ημιαστικές περιοχές, 20-30 dB για αστικά περιβάλλοντα και τιμές που υπερβαίνουν τα 30 dB για πυκνές αστικές περιοχές (π.χ. κέντρα πόλεων).

### 6.2.3.2 Ricean κατανομή

Από την άλλη μεριά, για την περίπτωση που αφορά την Ricean κατανομή, αυτή χαρακτηρίζεται από τον Ricean παράγοντα  $K$  ο οποίος βάσει μετρήσεων κυμαίνεται μεταξύ 6 -30 dB (σύμφωνα με το Schwartz για αντιπροσωπευτικά κυψελωτά περιβάλλοντα) και ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$K \equiv \frac{A^2}{2\sigma_R^2} \quad (6.25)$$

Όπου  $A$  η μέση ισχύς του LoS σήματος και  $2\sigma_R^2$  η μέση ισχύς των υπόλοιπων ακτινών

Θεωρώντας και πάλι ότι ισχύουν οι σχέσεις (6.15) και (6.21), η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της συνολικής στιγμιαίας ισχύος του σήματος δίνεται από τη σχέση:

$$f_{P_R}(P_R) = \frac{(1+K)e^{-K}}{P_{SF}} \exp\left(-\frac{(1+K)P_R}{P_{SF}}\right) I_0\left(2\sqrt{\frac{K(1+K)P_R}{P_{SF}}}\right) \quad (6.26)$$

Όπου  $I_0()$  η συνάρτηση Bessel πρώτου είδους και μηδενικής τάξης

$$P(P_R \geq P_{threshold}) = Q_1\left(\sqrt{2K}, \sqrt{2(1+K)\frac{P_{threshold}}{P_{SF}}}\right) \quad (6.27)$$

Όπου  $Q_1()$  η συνάρτηση Marquim-Q η οποία δίδεται από τον γενικό τύπο:

$$Q_1(a,b) = \int_b^{\infty} x \exp\left(-\frac{x^2 + a^2}{2}\right) I_0(a,x) dx \quad (6.28)$$

Με  $a, b$  μη αρνητικούς πραγματικούς αριθμούς.

Τέλος, η Συσσωρευτική Συνάρτηση Εκθετικής Κατανομής = Πιθανότητα Αποκοπής ( $P_{out}$ ) δίνεται από τον τύπο:

$$F_{P_R}(P_{threshold}) = 1 - Q_1\left(\sqrt{2K}, \sqrt{2(1+K)\frac{P_{threshold}}{P_{SF}}}\right) \quad (6.29)$$

Στη συνέχεια γίνεται αναφορά σε κάποια συχνά χρησιμοποιούμενα μοντέλα υπολογισμού διαλείψεων πολυδιαδρομικής διάδοσης:

α. Μοντέλο πολυδιαδρομικών διαλείψεων σε ορεινό περιβάλλον: εμπειρικό μοντέλο πρόβλεψης των απωλειών σε περιβάλλον με βουνά το οποίο αναπτύχθηκε από τους Vogel και Goldhirsh και ισχύει όταν οι αποσβέσεις λόγω σκίασης είναι αμελητέες. Στη συνέχεια υιοθετήθηκε από την ITU στη σύσταση P.681 για τον σχεδιασμό επίγειων-διαστημικών κινητών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

β. Εμπειρικό Μοντέλο Πολυδιαδρομικής διάδοσης λόγω δέντρων δίπλα στο δρόμο το οποίο αναπτύχθηκε μετά από μετρήσεις από τους Vogel και Goldhirsh και στη συνέχεια συμπεριλήφθηκε στη σύσταση της P.681-9 της ITU-R.

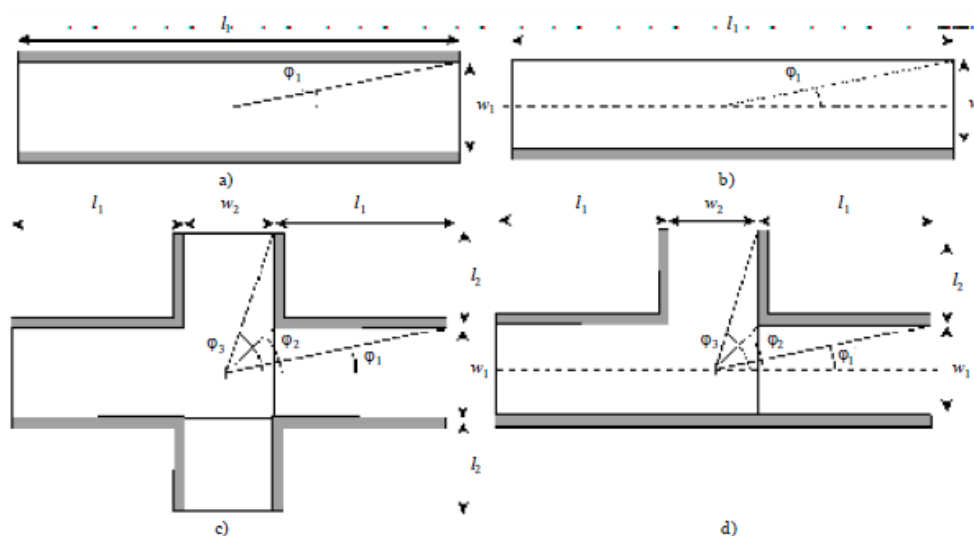
## 6.2.4 Απώλεια-Διακοπή Σήματος

Η διακοπή-πλήρης απώλεια του σήματος (blockage) είναι ένα φαινόμενο το οποίο εμφανίζεται συχνά στα LMSS και οφείλεται στην παρεμπόδιση της άφιξης του σήματος στον δέκτη εξαιτίας της ύπαρξης ισχυρών εμποδίων, π.χ. βουνά, μεγάλα κτήρια, υπόγειες εγκαταστάσεις και ισχυρές βροχοπτώσεις. Το ίδιο μπορεί να συμβεί και σε κινητά φορητά τερματικά εξαιτίας της απόκρυψης του



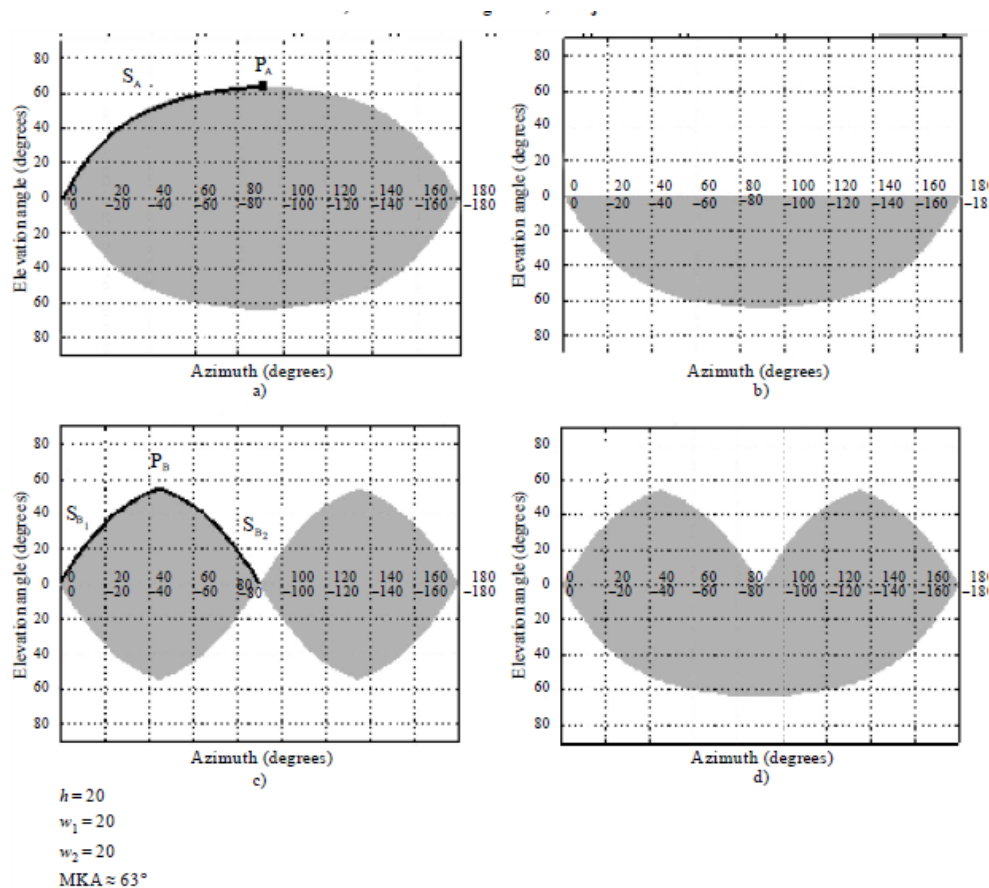
σήματος από το ανθρώπινο σώμα λόγω παρεμβολής αυτού στο κοντινό πεδίο της κεραίας του τερματικού και της κατά συνέπεια αλλαγής τους διαγράμματος ακτινοβολίας. Μάλιστα εάν η διάρκεια αυτού του φαινομένου είναι για εκτεταμένο χρονικό διάστημα, οδηγεί σε διακοπές ή ακόμα και πλήρη απώλεια της επικοινωνίας.

Στη συνέχεια παρατίθενται ενδεικτικά διαγράμματα σύμφωνα με τη σύσταση της ITU-R P.681-11 στα οποία φαίνεται η λειτουργία του μηχανισμού διακοπής σήματος.



Σχήμα 15. Απεικόνιση Περιβάλλοντος Απώλειας Σήματος [36]

Στο παραπάνω σχήμα γίνεται απεικόνιση 4 διαφορετικών σεναρίων τα οποία αφορούν αστικά περιβάλλοντα και στα οποία κάθε φορά ο χρήστης βρίσκεται στο κέντρο οδικών διατάξεων που περιβάλλονται από κτήρια-τεχνητά εμπόδια. Στη συνέχεια γίνεται παραγωγή καμπυλών που οριοθετούν τις «απαγορευμένες» ζώνες οι οποίες ορίζονται από τμήματα και σημεία και στις οποίες ο χρήστης φαίνεται να παρουσιάζει πλήρη απώλεια σήματος.



Σχήμα 16. Απεικόνιση Σεναρίου Απώλειας Σήματος [36]

### 6.2.5 Μικτές Συνθήκες Διάδοσης

Σύμφωνα με το [16] οι LMSS ζεύξεις οι οποίες πραγματοποιούνται εντός ημιαστικών ή αστικών περιοχών πολλές φορές παρουσιάζουν πολλά από τα φαινόμενα τα οποία αναλύθηκαν παραπάνω, οδηγώντας την μετάβαση μεταξύ καταστάσεων ύπαρξης οπτικής επαφής, απώλειας αυτής και παντελούς διακοπής λαμβανόμενου σήματος. Η ITU με το πρότυπο ITU-R P.681-11 ανέπτυξε ένα μοντέλο στο οποίο ορίζονται τρεις καταστάσεις : α) κατάσταση ύπαρξης οπτικής επαφής, β) κατάσταση ύπαρξης μερικής σκίασης, γ) κατάσταση πλήρους απώλειας σήματος ,για την αξιοποίηση ζεύξεων κινητών δορυφορικών επικοινωνιών και των φαινομένων διάδοσης αυτών, θεωρώντας ότι το φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης είναι υπαρκτό και στις 3 περιπτώσεις. Με το συγκεκριμένο μοντέλο γίνεται εφικτή η εκτίμηση των στατιστικών χαρακτηριστικών των αποσβέσεων για γωνίες ανύψωσης από  $10^\circ$  έως  $90^\circ$  και συχνότητες μετάδοσης έως και 30 GHz.

Σύμφωνα με το [34] για την μοντελοποίηση LMSS καναλιών που αφορούν μικρής κλίμακας διαδρομές, οι απλές κατανομές είναι επαρκείς, π.χ. Rayleigh, Ricean, Nakagami, ενώ για μεγαλύτερες διαδρομές απαιτείται η χρήση μικτών κατανομών, π.χ. Suzuki, Loo κ.α. Από την άλλη μεριά, στην

περίπτωση διαδρομών δεκάδων χιλιάδων χιλιομέτρων είναι απαραίτητη η μοντελοποίηση κάνοντας χρήση μοντέλων πολλαπλών καταστάσεων π.χ. Lutz.

### 6.3 Κανάλι Ευρείας Ζώνης

Η δεύτερη μεγάλη κατηγορία αποσβέσεων προκύπτει όταν οι σχετικές καθυστερήσεις των πολλαπλών διαδρομών είναι μεγάλες σε σύγκριση με την περίοδο μετάδοσης συμβόλων του αρχικού σήματος, με αποτέλεσμα αυτό να υφίσταται σοβαρή αλλοίωση κατά μήκος του χρησιμοποιούμενου εύρους ζώνης και κάθε συχνότητα εντός αυτού να επηρεάζεται διαφορετικά (selective fading). Κάτι τέτοιο συμβαίνει όταν υπάρχει άφιξη ακτινών στο δέκτη προερχόμενων από διαδρομές που διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό από την κύρια/άμεση διαδρομή (LoS) του σήματος, με αποτέλεσμα την ύπαρξη μεγάλων διαφορών στους χρόνους άφιξης. Εν προκειμένω λοιπόν το κανάλι χαρακτηρίζεται ως Κανάλι Αποσβέσεων Ευρείας Ζώνης (Wideband Fading Channel).

Στην περίπτωση αυτή το σήμα έχει και πάλι τη μορφή της εξίσωσης (6.1), ωστόσο αυτή τη φορά οι χρονικές καθυστερήσεις τι των επί μέρους όρων διαφέρουν αρκετά μεταξύ τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη μεγάλης εξάπλωσης καθυστέρησης, την εξάρτηση της απόκρισης του καναλιού από τη συχνότητα και την κατά συνέπεια αλλοίωση του σήματος. Μάλιστα σημαντικές είναι και οι επιπτώσεις αυτού του φαινομένου στην αναλογία λανθασμένων bit (Bit Error Ratio) καθώς εάν η εξάπλωση αυτή είναι μεγαλύτερη της διάρκειας συμβόλου, τότε τα στοιχεία καθυστέρησης προηγούμενων συμβόλων παρεμβάλλονται στα επόμενα, προκαλώντας διασυμβολική παρεμβολή και κατά συνέπεια μεγαλύτερη πιθανότητα λανθασμένων bit.

Γενικά ισχύει ότι η διασπορά καθυστέρησης που παρατηρείται στα δορυφορικά κανάλια κινητών τηλεπικοινωνιών είναι αρκετά μικρότερη από τις αντίστοιχες στα επίγεια κανάλια κινητών, αφενός λόγω της μεγάλης απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη και αφετέρου λόγω του ότι είθισται σε αυτού του είδους τα συστήματα επικοινωνιών να υπάρχει σήμα οπτικής επαφής, το οποίο κυριαρχεί σε σχέση με τα υπόλοιπα κύματα που προέρχονται από σκεδαστές στο περιβάλλον του χρήστη. Φυσικά αυτό συνεπάγεται ότι τα κινητά δορυφορικά συστήματα ξηράς (land mobile satellite systems) παρουσιάζουν και μικρότερα επίπεδα διασυμβολικής παρεμβολής, άρα και ποσοστού λανθασμένων bits σε σχέση με τα συστήματα χερσαίων κινητών τηλεπικοινωνιών. Επιπρόσθετα, σημαντική παρατήρηση σύμφωνα με το [16] αποτελεί το γεγονός ότι καθώς η διασπορά καθυστέρησης  $\Delta t$  αυξάνεται, το BER υποβαθμίζεται και δημιουργείται ένα κατώτατο όριο σφάλματος, το οποίο ουσιαστικά είναι ανεξάρτητο της αύξησης του σηματοθορυβικού λόγου και η αύξηση της ισχύος εκπομπής δεν επιφέρει καμία βελτίωση σε αυτό. Το παραπάνω, σύμφωνα με την ίδια πηγή, έρχεται σε

πλήρη αντίθεση με την απόσβεση στενού εύρους ζώνης, όπου αύξηση του σηματοθορυβικού λόγου επιφέρει συνεχή βελτίωση του BER.

## 6.4 Τεχνικές Μετριασμού Απωλειών – Fade Mitigation Techniques

Όπως είναι γνωστό, η ανάπτυξη σύγχρονων NTNs και η αύξηση των απαιτούμενων ρυθμών μετάδοσης πληροφορίας, έχει οδηγήσει στην ενσωμάτωση NGS δορυφόρων στα συστήματα MSS με σκοπό την αδιάπτωτη παροχή υπηρεσιών υψηλών ταχυτήτων και χαμηλής καθυστέρησης. Αυτό ωστόσο οδηγεί στην εμφάνιση διάφορων φαινομένων μετάδοσης τα οποία αυξάνουν την πολυπλοκότητα του διαύλου επικοινωνιών και των απαραίτητων κατά τη σχεδίαση των εν λόγω συστημάτων υπολογισμών. Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει στην επιτακτική ανάγκη χρησιμοποίησης τεχνικών μετριασμού των αποσβέσεων-απωλειών διαύλου (Fade Mitigation Techniques-FMTs) για την αντιμετώπιση και την εξασφάλιση της εκάστοτε απαιτούμενης ποιότητας υπηρεσιών (QoS).

Μία από τις σημαντικότερες εξ αυτών των τεχνικών είναι η υιοθέτηση πολλαπλότητας δορυφόρων (Satellite Diversity), γνωστή και ως πολλαπλότητα τροχιών και γωνιών ανύψωσης (orbital and angle diversity). Αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση δορυφορικών αστερισμών με πλήθος δορυφόρων σε διαφορετικές θέσεις και τροχιακά επίπεδα. Σε αυτό το πλαίσιο και μέσω κατάλληλων πρωτοκόλλων και αλγορίθμων δρομολόγησης, επιλέγεται κάθε φορά ο δορυφόρος με την καλύτερη διαθέσιμη ζεύξη, αφού οι διαδρομές του σήματος και κατά συνέπεια οι συνθήκες διαύλου μεταξύ του επίγειου χρήστη και δορυφόρων, εντός του επιπέδου ορίζοντα αυτού, μπορεί να παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές. Στην ίδια κατηγορία ανήκει και η πολλαπλότητα τοποθεσίας (Site Diversity) που αφορά την ύπαρξη πλήθους επίγειων σταθμών εντός της περιοχής κάλυψης του ίδιου δορυφόρου, σε διαφορετικά όμως γεωγραφικά μήκη και πλάτη. Ωστόσο, η επιλογή της καταλληλότερης ζεύξης αποτελεί μία αρκετά πολύπλοκη διαδικασία, δεδομένου ότι οι επικρατούσες συνθήκες στους εκάστοτε διαύλους εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το τοπικό περιβάλλον των επίγειων σταθμών/ χρηστών και οι επιμέρους υφιστάμενες απώλειες συχνά εμφανίζουν μεγάλο βαθμό συσχέτισης. Γενικά ισχύει ότι οι διαλείψεις λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης μπορούν να θεωρηθούν ασυσχέτιστες μεταξύ των διαύλων των δορυφόρων σε διαφορετικές τοποθεσίες, ωστόσο δεν συμβαίνει το ίδιο και με τις απώλειες λόγω σκίασης, οι οποίες αναλόγως του περιβάλλοντος δύναται να παρουσιάσουν διάφορους βαθμούς συσχέτισης.

Επιπρόσθετα, σημαντική είναι η υιοθέτηση προσαρμοστικής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (Adaptive Modulation and Coding), η οποία είναι τυποποιημένη σε πρωτόκολλα δορυφορικών επικοινωνιών όπως το DVB-S2, το DVB-S2X και το DVB-RCS2 και η οποία επιτρέπει την δυναμική προσαρμογή των παραμέτρων μετάδοσης, όπως η διαμόρφωση και η κωδικοποίηση, ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες στο δίαυλο. Επιπλέον πολύ σημαντικός είναι ο έλεγχος ισχύος, τόσο κατά τις

ανερχόμενες ζεύξεις για την αντιστάθμιση απωλειών, όπως οι απώλειες εξαιτίας δυσμενών καιρικών συνθηκών, όσο και στις κατερχόμενες ζεύξεις, με την εκ νέου κατανομή ισχύος στις διαθέσιμες δέσμες κάλυψης του εκάστοτε δορυφόρου. Ακόμα, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η τεχνική ανακατεύθυνσης και αναπροσαρμογής της μορφής των δεσμών των δορυφόρων, με σκοπό την βέλτιστη χρήση του φάσματος, την αποφυγή παρεμβολών σε άλλα συστήματα και την παροχή κάλυψης στις περιοχές ενδιαφέροντος, αναλόγως των απαιτήσεων ζήτησης και ποιότητας ζεύξης. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι η διαδικασία μεταγωγών των ζεύξεων μεταξύ γειτονικών δορυφόρων, η οποία επιβάλλεται λόγω της κίνησής τους, παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην παρεχόμενη ποιότητα υπηρεσίας και αποτελεί μεγάλο πεδίο σύγχρονων μελετών.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Δορυφορικοί Αστερισμοί**

### **7.1 Γενικά Περί Αστερισμών Χαμηλής Τροχιάς**

Τη σημερινή εποχή, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια, οι σύγχρονες και ραγδαίως εξελισσόμενες τεχνολογικές εξελίξεις σε συνδυασμό με την κατακόρυφη αύξηση των αναγκών των χρηστών για υπηρεσίες επικοινωνίας, οι οποίες προϋποθέτουν την μεταφορά τεράστιου όγκου δεδομένων, με χαμηλές καθυστερήσεις, έχουν οδηγήσει στην συνεχώς αυξανόμενη χρήση των GAS δικτύων. Έτσι, παράλληλα με την ανάπτυξη των δικτύων 5G, πολλές εταιρείες-κολοσσοί έχουν στραφεί στην ανάπτυξη δορυφορικών αστερισμών, κυρίως σε χαμηλά τροχιακά επίπεδα, για την εξασφάλιση ευέλικτης κάλυψης και την παροχή επικοινωνιών χαμηλής καθυστέρησης και υψηλών ταχυτήτων σχεδόν παγκοσμίως. Με αυτόν το τρόπο σήμερα έχει καταστεί δυνατή η μαζική παραγωγή και εκτόξευση μικρότερων σε όγκο δορυφόρων στο διάστημα με χαμηλό κόστος και με περισσότερες δυνατότητες. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την ευρεία υιοθέτηση του Υπολογισμού στα Άκρα (Edge Computing) και των επί του σκάφους υπολογισμών με ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης, έχει οδηγήσει στην επίτευξη τεράστιων ρυθμών μετάδοσης δεδομένων.

Κατά συνέπεια υπολογίζεται ότι μέχρι το 2030 ο αριθμός των δορυφόρων σε τροχιά μπορεί να ξεπερνάει τους 50.000. Το γεγονός αυτό ωστόσο έχει εγείρει πολλές ανησυχίες σχετικά με τη δημιουργία όγκου διαστημικών απορριμμάτων και κατά συνέπεια σχετικά με τη περιβαλλοντική και διαστημική αειφορία. Για τον λόγο αυτό δίνεται αυξανόμενη έμφαση στη διαχείριση της διαστημικής κυκλοφορίας, στις στρατηγικές εκτόξευσης δορυφόρων σε τροχίες αλλά και στα σχέδια απόρριψης αυτών στο τέλος του κύκλου ζωής τους, για την ελαχιστοποίηση των διαστημικών συντριμμιών. Οι νέες πρωτοβουλίες επικεντρώνονται στην απομάκρυνση συντριμμιών και στην ανάπτυξη δορυφόρων με αυτοματοποιημένες δυνατότητες αποφυγής σύγκρουσης για τη μείωση του κινδύνου συγκρούσεων κατά την κίνησή τους σε τροχιά.

### **7.2 Πληροφορίες Αστερισμών**

Στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου παρουσιάζονται πληροφορίες σχετικά με ορισμένους αρκετά διάσημους δορυφορικούς (κατά κύριο λόγο LEO) αστερισμούς και εταιρείες οι οποίες δραστηριοποιούνται στον τομέα παροχής δορυφορικών επικοινωνιών και ανάπτυξης NTN σε παγκόσμιο επίπεδο.

### 7.2.1 Starlink

Ο συγκεκριμένος αστερισμός ανήκει στην εταιρεία SpaceX του Elon Musk και έχει ως στόχο την παροχή πρόσβασης στο διαδίκτυο, η οποία χαρακτηρίζεται από υψηλές ταχύτητες και χαμηλή καθυστέρηση ανά την υφήλιο, εστιάζοντας σε μεμακρυσμένες και υπο-εξυπηρετούμενες περιοχές, καθώς επίσης σε εφαρμογές ευρυζωνικού διαδικτύου (broadband internet) και σε υπηρεσίες αντιμετώπισης εκτάκτων αναγκών. Αποτελείται από χιλιάδες LEO δορυφόρους (πάνω από 4.000 με τα σημερινά δεδομένα) και αποσκοπεί στην τοποθέτηση σε τροχιά δεκάδων χιλιάδων ακόμα σε διάφορα κελύφη με υψόμετρα από 340 έως 1200 km και σε τροχιές υπό κλίσεις 53, 70 και 97 μοιρών. Κάνει χρήση αρχιτεκτονικών που επιτρέπουν την επεκτασιμότητα και τις μελλοντικές αναβαθμίσεις και επιτυγχάνει υψηλό ποσοστό πλεονασμού για ταυτόχρονη κάλυψη περιοχών από πολλούς δορυφόρους.

Όσον αφορά τη μετάδοση δεδομένων, οι ζεύξεις της Starlink χαρακτηρίζονται από χαμηλές καθυστερήσεις μεταξύ 10 και 40 ms και ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων άνω των 100 Mbps, ενώ χρησιμοποιεί ζεύξεις με laser για τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ των δορυφόρων του αστερισμού. Κάνει χρήση των Ku και Ka μπαντών τόσο για ανερχόμενες όσο και για κατερχόμενες ζεύξεις. Ακόμα, χρησιμοποιεί εξελιγμένα σχήματα διαμόρφωσης, όπως 64-QAM και προσαρμοστικό κώδικα ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες των ζεύξεων. Τέλος κάνει χρήση κεραιών φασικής διάταξης για τη δημιουργία δεσμών κάλυψης με δυνατότητα ανακατεύθυνσης και αναπροσαρμογής του σχήματος αυτών για βέλτιστη χρήση του φάσματος ανάλογα με τις απαιτήσεις ζήτησης εντός της περιοχής κάλυψης.

### 7.2.2 Kuiper

Ο συγκεκριμένος αστερισμός αποτελεί προϊόν πρωτοβουλίας της Amazon με σκοπό την παροχή υπηρεσιών ευρυζωνικού Internet, υψηλών ταχυτήτων και χαμηλών καθυστερήσεων σε μεμακρυσμένες και υπο-εξυπηρετούμενες περιοχές, όπως στην περίπτωση της Starlink. Την παρούσα χρονική στιγμή δεν βρίσκεται ακόμα σε λειτουργία καθώς βρίσκεται στη φάση της ανάπτυξης, ωστόσο οι πρώτοι δορυφόροι αναμένεται να εκτοξευθούν σύντομα με τον τελικό αριθμό τους να εκτιμάται ότι θα είναι πάνω από 3.000, για την επίτευξη πλεονάζοντος αριθμού δορυφόρων και επικάλυψης μεταξύ αυτών για αδιάπτωτη παροχή υπηρεσιών. Τα υψόμετρα των δορυφορικών τροχιών αναμένεται να είναι μεταξύ των 590 και 630 km με κλίση τροχιάς 51.9°.

Σχετικά με τη μετάδοση δεδομένων, σχεδιάζεται η χρήση της Ka μπάντας συχνοτήτων σε συνδυασμό με σχήματα διαμόρφωσης QPSK υψηλότερων τάξεων με σκοπό την επίτευξη ρυθμών μετάδοσης οι οποίοι θα φτάνουν έως και 400 Mbps καθώς και καθυστερήσεων της τάξεως των 25-40 ms. Τέλος θα χρησιμοποιούνται και εδώ κεραίες φασικής διάταξης για τη διαμόρφωση δεσμών κάλυψης και την κατεύθυνση αυτών.

### 7.2.3 Telesat Lightspeed

Ο αστερισμός Lightspeed της Telesat είναι ακόμα υπό σχεδίαση εξαιτίας κάποιων αλλαγών και καθυστερήσεων στα αρχικά σχέδια, ωστόσο αναμένεται η έναρξη της ανάπτυξής του εντός του 2026, ενώ μέχρι τότε θα παρέχει δορυφορικές υπηρεσίες με τους GEO δορυφόρους που διαθέτει ήδη. Στόχος στο μέλλον θα είναι η παροχή broadband Internet σε παγκόσμιο επίπεδο με επικέντρωση σε λύσεις δικτύων κορμού και κυβερνητικές υπηρεσίες. θα αποσκοπεί στην επίτευξη πλεονασμού μέσω υιοθέτησης πολλαπλότητας επίγειων σταθμών και διαδορυφορικών ζεύξεων. Ο αναμενόμενος αριθμός δορυφόρων είναι λίγο λιγότερο από 300 και τα τροχιακά υψόμετρα θα είναι μεταξύ 1.000 και 1200 km περίπου.

Για την επίτευξη του επιθυμητού ρυθμού μετάδοσης θα γίνεται χρήση πολλαπλών δεσμών κάλυψης και εξελιγμένων σχημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, σε συνδυασμό με τη χρήση της Ka μπάντας για ανερχόμενες αλλά και κατερχόμενες ζεύξεις. Με αυτόν τον τρόπο αναμένεται η επίτευξη πολύ υψηλών ταχυτήτων μετάδοσης και καθυστερήσεων μικρότερων των 50 ms.

### 7.2.4 OneWeb

Ο αστερισμός της εταιρείας OneWeb αποτελείται από περίπου 650 LEO δορυφόρους σε υψόμετρο 1.200 km και σε τροχιές οι οποίες επιτρέπουν την κάλυψη περιοχών σε αρκετά υψηλά γεωγραφικά πλάτη της Γης όπως η Αλάσκα και η Βόρεια Ευρώπη. Αφορά εφαρμογές παροχής broadband internet αλλά και κυβερνητικές ή άλλες εμπορικές εφαρμογές. Ακόμα μία φορά γίνεται χρήση πλήθους δορυφόρων για την επίτευξη πλεονασμού και επικάλυψης, ωστόσο προς το παρόν δεν γίνεται ευρεία χρήση των διαδορυφορικών συνδέσεων.

Πάλι, γίνεται χρήση πολλαπλών δεσμών κάλυψης με δυνατότητα ηλεκτρονικής ανακατεύθυνσης αυτών, ωστόσο σε αυτή την περίπτωση γίνεται χρήση τη Ku μπάντας συχνοτήτων καθώς και σχημάτων διαμόρφωσης QPSK και 16-QAM. Στόχος είναι η επίτευξη ταχυτήτων έως 400 Mbps ανά τερματικό και καθυστερήσεις 50-70 ms.

### 7.2.5 Iridium NEXT

Ο αστερισμός Iridium Next αποτελείται από 66 ενεργούς δορυφόρους τοποθετημένους σε LEO τροχιά περί τα 780 km, μαζί με κάποιους ακόμα πλεονάζοντες και με κλίση  $86.4^{\circ}$ . Παρέχει υπηρεσίες επικοινωνίας φωνής και δεδομένων σε παγκόσμιο επίπεδο, συμπεριλαμβανομένων και των πολικών περιοχών, γεγονός το οποίο τον καθιστά μοναδικό. Η αρχική ανάπτυξη σε τροχιά ολοκληρώθηκε το 1990, ενώ η αντικατάσταση των αρχικών δορυφόρων με νέους, πιο εξελιγμένους τεχνολογικά ολοκληρώθηκε το 2019.



Εν προκειμένω αξιοποιείται η L μπάντα συχνοτήτων για ανερχόμενη και κατερχόμενη ζεύξη, ενώ ταυτόχρονα γίνεται χρήση του QPSK σχήματος διαμόρφωσης. Δεν υποστηρίζεται η μετακίνηση και ανακατεύθυνση των δεσμών του δορυφόρου, ενώ οι υποστηριζόμενοι ρυθμοί μετάδοσης είναι μέχρι το 1.4 Mbps και η καθυστέρηση περί τα 50 ms.

#### 7.2.6 Globalstar

Ο αστερισμός της Globalstar αποτελείται από 48 ενεργούς δορυφόρους σε χαμηλή τροχιά γύρω από τη Γη, προσφέροντας υπηρεσίες φωνής και δεδομένων και συνδεσιμότητα στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) με εστίαση στη Βόρεια Αμερική, την Ευρώπη και θαλάσσιες περιοχές. Το υψόμετρο των δορυφόρων είναι περί τα 1.400 km και η κλίση τροχιάς 52° .

Εξαιτίας της χρήσης της L μπάντας συχνοτήτων και του BPSK σχήματος διαμόρφωσης επιτυγχάνει χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, της τάξεως των 256 kbps για ορισμένες υπηρεσίες. Χρησιμοποιεί σταθερές δέσμες κάλυψης και οι καθυστερήσεις κυμαίνονται μεταξύ 60 και 100 ms.

#### 7.2.7 Guowang

Η κινεζική κυβέρνηση έχει ανακοινώσει φιλόδοξα σχέδια για τον αστερισμό GuoWang, ο οποίος δεν είναι ακόμα σε λειτουργία, αλλά βρίσκεται στο στάδιο του σχεδιασμού. Στόχος είναι η ανάπτυξη περίπου 13.000 δορυφόρων σε χαμηλή τροχιά γύρω από τη Γη (LEO) εντός των επόμενων ετών, για την παροχή υπηρεσιών ευρυζωνικού διαδικτύου, την πρόσβαση στο IoT και την παροχή κυβερνητικών εφαρμογών. Αναμένεται ότι θα χρησιμοποιηθούν τροχιές από τα 500 έως 1.200 km οι οποίες θα παρέχουν κάλυψη σε παγκόσμιο επίπεδο, εστιάζοντας στην Κίνα. Επιπλέον, λόγω της χρήσης μεγάλου αριθμού δορυφόρων και διαδορυφορικών συνδέσεων αναμένεται η επίτευξη μεγάλου ποσοστού πλεονασμού κάλυψης.

Όσον αφορά τις χρησιμοποιούμενες συχνότητες, σχεδιάζεται η αξιοποίηση των Ka και V μπαντών οι οποίες σε συνδυασμό με εξελιγμένα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης αναμένεται να καθιστούν εφικτά πολύ υψηλά επίπεδα ρυθμών μετάδοσης δεδομένων της τάξεως των gbps, ενώ οι καθυστερήσεις υπολογίζονται περί τα 20 με 50 ms. Τέλος αναμένεται να γίνεται χρήση πολλαπλών δεσμών κάλυψης με δυνατότητα αναδιαμόρφωσης και ανακατεύθυνσης αυτών.

#### 7.2.8 O3B

Ο O3B είναι ένας αστερισμός της SES Networks ο οποίος αποτελείται από 20 δορυφόρους τοποθετημένους σε MEO τροχιά με υψόμετρο περί τα 8.000 km. Παρέχει ευρυζωνικές υπηρεσίες

διαδικτύου, υπηρεσίες κυβερνητικών επικοινωνιών και άλλες εμπορικές εφαρμογές, με κύρια εστίαση σε περιοχές κοντά στον ισημερινό και σε μεσαία γεωγραφικά πλάτη. Επιτυγχάνει πλεονασμό αριθμού δορυφόρων και κάλυψης, ωστόσο δεν χρησιμοποιεί διαδορυφορικές συνδέσεις και η επικοινωνία επιτυγχάνεται μόνο μέσω των επίγειων σταθμών.

Σχετικά με το σχήμα διαμόρφωσης χρησιμοποιεί Q-PSK ή άλλα σχήματα υψηλότερης τάξης και αξιοποιεί για ανερχόμενες και κατερχόμενες ζεύξεις την Κ<sub>a</sub> μπάντα συχνοτήτων. Επιπλέον, κάνει χρήση πολλαπλών δεσμών κάλυψης και επιτυγχάνει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης οι οποίοι αναμένεται να αυξηθούν έτι περισσότερο με την υλοποίηση του σχεδίου επέκτασης mPOWER. Τέλος επιτυγχάνει καθυστερήσεις περί τα 150 ms εξαιτίας του υψηλότερου υψομέτρου σε σχέση με τους υπόλοιπους αστερισμούς που εξετάστηκαν παραπάνω.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup> : Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Μετρήσεων**

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα βήματα υλοποίησης υπολογισμών ορισμένων βασικών χαρακτηριστικών σχεδίασης για συστήματα LEO δορυφόρων. Οι μεθοδολογίες που εφαρμόστηκαν σχετίζονται άμεσα με τις αναλύσεις των προηγούμενων κεφαλαίων της παρούσης εργασίας και τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε βήμα για την υλοποίηση των υπολογισμών, αφορούν μεγάλες εταιρείες επικοινωνιών, οι οποίες δραστηριοποιούνται τη σήμερον ημέρα στον τομέα της ανάπτυξης δικτύων επικοινωνιών με χρήση LEO δορυφόρων. Τα δεδομένα αυτά προήλθαν τόσο από επίσημες βιβλιογραφικές πηγές και διαδικτυακούς ιστοτόπους, όσο και σε μεγάλο βαθμό από προσωπικές εκτιμήσεις, βασιζόμενες στη μελέτη των προαναφερθιστών πηγών στο πλαίσιο της παρούσης εργασίας [36]-[61], λαμβάνοντας υπόψιν τις υπάρχουσες τάσεις και κατευθύνσεις στο περιβάλλον των δορυφορικών επικοινωνιών και των Μη Επίγειων Δικτύων Επικοινωνίας (Non Terrestrial Networks). Το τελευταίο οφείλεται στο γεγονός ότι αρκετά από τα προς εξέταση δεδομένα αποτελούν εξειδικευμένα τεχνικά χαρακτηριστικά των εκάστοτε εταιρειών, τα οποία δεν είναι διαθέσιμα στο ευρύ κοινό. Έτσι λοιπόν, σε πρώτο στάδιο παρουσιάζονται τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κάθε φορά μαζί με βασικούς τύπους εξισώσεων και στη συνέχεια τα εκάστοτε αποτελέσματα με παρατηρήσεις και σχόλια επί αυτών. Σε κάθε περίπτωση ωστόσο, επισημαίνεται ότι τα εν λόγω αποτελέσματα, ενώ αποτελούν μια αξιόλογη εκτίμηση των εξετασθέντων τεχνικών χαρακτηριστικών, για την ενίσχυση της αξιοπιστίας τους χρήζουν επαλήθευσης μέσω περαιτέρω αναλύσεων, λόγω της φύσης των δεδομένων και των παραδοχών που έγιναν.

### **8.1 Μεθοδολογίες και Δεδομένα**

Στη συνέχεια του παρόντος, ακολουθεί παρουσίαση των προς μελέτη μεγεθών, των εξισώσεων για τον υπολογισμό αυτών, καθώς και των δεδομένων των εξεταζόμενων αστερισμών τα οποία χρησιμοποιήθηκαν.

#### **8.1.1 Μέγιστες Αποστάσεις Δορυφόρων-Επίγειων Σταθμών**

Τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν αρχικά αφορούν στοιχεία τα οποία σχετίζονται με τα υψόμετρα των τροχιών των εκάστοτε εταιρειών, καθώς και των ελάχιστων γωνιών ανύψωσης των δορυφόρων αυτών. Σκοπός των υπολογισμών είναι η εύρεση του μέγιστου μονοπατιού, δηλαδή της μέγιστης απόστασης μεταξύ δορυφόρου και επίγειου σταθμού /χρήστη, καθώς και η σχέση αυτού με τα προαναφερθέντα μεγέθη. Τονίζεται ότι το μέγιστο μήκος διαδρομής που διανύει το σήμα για κάθε ξεχωριστή περίπτωση είναι ένα από τα βασικότερα προς μελέτη χαρακτηριστικά κατά τη σχεδίαση ενός

δορυφορικού συστήματος, αφού το εν λόγω μέγεθος επηρεάζει τον προϋπολογισμό της ζεύξης, την επιφάνεια κάλυψης του εκάστοτε δορυφόρου, τις καθυστερήσεις μετάδοσης του σήματος, το κόστος εκτόξευσης, τοποθέτησης και διατήρησης σε τροχιά καθώς και άλλα πολλά χαρακτηριστικά σχεδίασης. Έτσι λοιπόν τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το βήμα έχουν όπως παρακάτω:

| <u>Δορυφορικός<br/>Αστερισμός</u> | <u>Υψόμετρο<br/>(km)</u> | <u>Μέσο<br/>Υψόμετρο<br/>(km)</u> | <u>Ελάχιστη<br/>Γωνία<br/>Ανύψωσης<br/>(°)</u> | <u>Μέση Τιμή<br/>Ελάχιστης<br/>Γωνίας<br/>Ανύψωσης (°)</u> |
|-----------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Starlink (S1)                     | 550,00                   | 550,00                            | 25,00                                          | 25,00                                                      |
| Starlink (S2)                     | 540,00                   | 540,00                            | 25,00                                          | 25,00                                                      |
| Starlink (S3)                     | 570,00                   | 570,00                            | 25,00                                          | 25,00                                                      |
| Starlink (S4)                     | 560,00                   | 560,00                            | 25,00                                          | 25,00                                                      |
| Starlink (S5)                     | 340-614                  | 477,00                            | 25,00                                          | 25,00                                                      |
| Kuiper (K1)                       | 630,00                   | 630,00                            | 30,00                                          | 30,00                                                      |
| Kuiper (K2)                       | 610,00                   | 610,00                            | 30,00                                          | 30,00                                                      |
| Kuiper (K3)                       | 590,00                   | 590,00                            | 30,00                                          | 30,00                                                      |
| Telesat (T1)                      | 1015,00                  | 1015,00                           | 20,00                                          | 20,00                                                      |
| Telesat (T2)                      | 1325,00                  | 1325,00                           | 20,00                                          | 20,00                                                      |
| OneWeb                            | 1200,00                  | 1200,00                           | 30,00                                          | 30,00                                                      |
| Iridium<br>NEXT                   | 780,00                   | 780,00                            | 8,00                                           | 8,00                                                       |
| Globalstar                        | 1414,00                  | 1414,00                           | 10,00                                          | 10,00                                                      |
| GuoWang                           | 500-1200                 | 850,00                            | 20-30                                          | 25,00                                                      |
| O3B                               | 8063,00                  | 8063,00                           | 5,00                                           | 5,00                                                       |

**Πίνακας 8.Δεδομένα 1<sup>ov</sup> Υπολογισμού**

Για την εύρεση του μεγίστου μονοπατιού χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες σχέσεις :

$$\theta_{rad} = \frac{\pi}{180} \times \theta_d \quad (8.1)$$

$$d = R_e \left( \sqrt{\left( \frac{H + R_e}{R_e} \right)^2 - \cos(\theta)^2} - \sin(\theta) \right) \quad (8.2)$$

Όπου :

$d$  = Μέγιστο Μήκος Μονοπατιού/Διαδρομής (Max Slant Path)

$R_e$  = Διάμετρος Γης= 6371 km

$H$  = Μέσο Υψόμετρο Τροχιάς

$\theta$  = Μέση Γωνία Ανύψωσης

### 8.1.2 Απώλειες Ελευθέρου Χώρου

Στη συνέχεια γίνεται υπολογισμός των Απωλειών Μονοπατιού Ελευθέρου Χώρου ( Free Space Path Loss) μέσω της γνωστής εξίσωσης για ενδεικτικό μήκος μονοπατιού LEO δορυφόρων και συχνότητες, ενώ αμέσως μετά γίνεται υπολογισμός των Απωλειών Μονοπατιού Ελευθέρου Χώρου ( Free Space Path Loss) για τα μέγιστα μήκη μονοπατιών του προηγούμενου βήματος, βάσει των συχνοτήτων μετάδοσης κάθε κελύφους αστερισμού για Κατερχόμενη Ζεύξη (Downlink -DL) . Τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν είναι τα ακόλουθα:

| <u>Δορυφορικός<br/>Αστερισμός</u> | <u>Μέγιστο Μήκος<br/>Μονοπατιού<br/>(km)</u> | <u>Συχνότητα<br/>Κατερχόμενης<br/>Ζεύξης (DL)</u> | <u>Μέση Συχνότητα<br/>Κατερχόμενης<br/>Ζεύξης (GHz)</u> | <u>Μπάντα<br/>Συχνοτήτων</u> |
|-----------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------|
| Starlink (S1)                     | 1123,28                                      | 10.7 – 12.7 GHz                                   | 11,70                                                   | Ku-band                      |
|                                   |                                              | 17.8 – 18.6 GHz                                   | 18,20                                                   | Ka-band                      |
|                                   |                                              | 18.8 – 19.3 GHz                                   | 19,05                                                   | Ka-band                      |
| Starlink (S2)                     | 1105,11                                      | 10.7 – 12.7 GHz                                   | 11,70                                                   | Ku-band                      |
|                                   |                                              | 17.8 – 18.6 GHz                                   | 18,20                                                   | Ka-band                      |
|                                   |                                              | 18.8 – 19.3 GHz                                   | 19,05                                                   | Ka-band                      |
| Starlink (S3)                     | 1159,43                                      | 10.7 – 12.7 GHz                                   | 11,70                                                   | Ku-band                      |
|                                   |                                              | 17.8 – 18.6 GHz                                   | 18,20                                                   | Ka-band                      |
|                                   |                                              | 18.8 – 19.3 GHz                                   | 19,05                                                   | Ka-band                      |
| Starlink (S4)                     | 1141,38                                      | 10.7 – 12.7 GHz                                   | 11,70                                                   | Ku-band                      |
|                                   |                                              | 17.8 – 18.6 GHz                                   | 18,20                                                   | Ka-band                      |
|                                   |                                              | 18.8 – 19.3 GHz                                   | 19,05                                                   | Ka-band                      |
| Starlink (S5)                     | 989,21                                       | 10.7 – 12.7 GHz                                   | 11,70                                                   | Ku-band                      |
|                                   |                                              | 17.8 – 18.6 GHz                                   | 18,20                                                   | Ka-band                      |
|                                   |                                              | 18.8 – 19.3 GHz                                   | 19,05                                                   | Ka-band                      |
| Kuiper (K1)                       | 1124,00                                      | 17.7 – 18.6 GHz                                   | 18,15                                                   | Ka-band                      |
|                                   |                                              | 18.8 – 19.3 GHz                                   | 19,05                                                   | Ka-band                      |
| Kuiper (K2)                       | 1091,43                                      | 17.7 – 18.6 GHz                                   | 18,15                                                   | Ka-band                      |
|                                   |                                              | 18.8 – 19.3 GHz                                   | 19,05                                                   | Ka-band                      |
| Kuiper (K3)                       | 1058,71                                      | 17.7 – 18.6 GHz                                   | 18,15                                                   | Ka-band                      |
|                                   |                                              | 18.8 – 19.3 GHz                                   | 19,05                                                   | Ka-band                      |
| Telesat (T1)                      | 2146,66                                      | 17.8 – 18.6 GHz                                   | 18,15                                                   | Ka-band                      |
|                                   |                                              | 18.8 – 19.3 GHz                                   | 19,05                                                   | Ka-band                      |
| Telesat (T2)                      | 2656,99                                      | 17.8 – 18.6 GHz                                   | 18,15                                                   | Ka-band                      |
|                                   |                                              | 18.8 – 19.3 GHz                                   | 19,05                                                   | Ka-band                      |
| OneWeb                            | 1998,88                                      | 10.7-12.7 GHz                                     | 11,70                                                   | (Ku-band)                    |
| Iridium NEXT                      | 2479,83                                      | 1616 – 1626.5 MHz                                 | 1,62                                                    | L-band                       |
| Globalstar                        | 2529,20                                      | 2483.5-2500 MHz                                   | 2,49                                                    | (S-band)                     |
| GuoWang                           | 1858,47                                      | 17.7 – 19.7 GHz                                   | 18,70                                                   | Ka-band                      |
|                                   |                                              | 10.7 – 12.7 GHz<br>(proposed)                     | 11,70                                                   | Ku-band                      |
| O3B                               | 12408,49                                     | 17.8 – 18.6 GHz                                   | 18,20                                                   | Ka-band                      |
|                                   |                                              | 18.8 – 19.3 GHz                                   | 19,05                                                   | Ka-band                      |

**Πίνακας 9.Δεδομένα 2<sup>ο</sup> Υπολογισμού**

Σε αυτό το στάδιο η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε αφορά τον υπολογισμό απωλειών μετάδοσης σε ελεύθερο χώρο, όπως παρακάτω:

$$FSPL(dB) = \left( 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi}{c} \right) \right) \quad (8.3)$$

Όπου:

$d$  = Μέγιστο μήκος μονοπατιού/διαδρομής (Max Slant Path) (m)

$f$  = Φέρουσα συχνότητα μετάδοσης (Hz)

$c$  = Ταχύτητα του φωτός στο κενό=  $3 \cdot 10^8$  m/s

### 8.1.3 Ισχύς Σήματος Λήψης

Ακολουθώς, γίνεται υπολογισμός της ενδεικτικής Ισχύος Λήψης των συστημάτων υπό ιδανικές συνθήκες για διαφορετικές μπάντες συχνοτήτων, με εφαρμογή της εξίσωσης του Φρις, χωρίς να λαμβάνονται υπόψιν άλλες απώλειες, εκτός από τις απώλειες μετάδοσης σε ελεύθερο χώρο. Μετά από αυτό πραγματοποιούνται αντίστοιχοι υπολογισμοί για τον προσδιορισμό των εκάστοτε ισχύων λήψεως, λαμβάνοντας υπόψιν τις προαναφερθείσες μέσες συχνότητες εκπομπής των εκάστοτε αστερισμών. Επιπλέον ως μήκη διαδρομής σήματος θεωρήθηκαν τα ονομαστικά υψόμετρα όπως προηγουμένως, καθώς και τα παρακάτω δεδομένα:

| Δορυφορικός Αστερισμός | FSPL (dB) | Μέσο Κέρδος Κεραίας Εκπομπής (dBi) | Μέσο Κέρδος Κεραίας Λήψης (dBi) | Μέση Ισχύς Εκπομπής (Watts) |
|------------------------|-----------|------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| Starlink (S1)          | 174,82    | 36,5                               | 35                              | 30                          |
| Starlink (S1)          | 178,65    | 38                                 | 36,67                           | 30                          |
| Starlink (S1)          | 179,05    | 38                                 | 36,67                           | 30                          |
| Starlink (S2)          | 174,67    | 35,5                               | 33,5                            | 30                          |
| Starlink (S2)          | 178,51    | 37                                 | 35                              | 30                          |
| Starlink (S2)          | 178,91    | 37                                 | 35                              | 30                          |
| Starlink (S3)          | 175,09    | 38,5                               | 38,5                            | 30                          |
| Starlink (S3)          | 178,93    | 40                                 | 40                              | 30                          |
| Starlink (S3)          | 179,32    | 40                                 | 40                              | 30                          |
| Starlink (S4)          | 174,95    | 37,5                               | 36,84                           | 30                          |
| Starlink (S4)          | 178,79    | 39                                 | 38,34                           | 30                          |
| Starlink (S4)          | 179,19    | 39                                 | 38,34                           | 30                          |
| Starlink (S5)          | 173,71    | 33,5                               | 33                              | 30                          |
| Starlink (S5)          | 177,55    | 35                                 | 34,5                            | 30                          |
| Starlink (S5)          | 177,95    | 35                                 | 34,5                            | 30                          |
| Kuiper (K1)            | 178,63    | 41                                 | 37,1                            | 25                          |
| Kuiper (K1)            | 179,05    | 41                                 | 37,1                            | 25                          |
| Kuiper (K2)            | 178,38    | 40                                 | 37,1                            | 25                          |

|                   |        |      |      |      |
|-------------------|--------|------|------|------|
| Kuiper (K2)       | 178,80 | 40   | 37,1 | 25   |
| Kuiper (K3)       | 178,11 | 39   | 37,1 | 25   |
| Kuiper (K3)       | 178,54 | 39   | 37,1 | 25   |
| Telesat (T1)      | 184,25 | 40,5 | 39   | 30   |
| Telesat (T1)      | 184,67 | 40,5 | 39   | 30   |
| Telesat (T2)      | 186,11 | 41   | 40   | 30   |
| Telesat (T2)      | 186,53 | 41   | 40   | 30   |
| OneWeb (OW)       | 179,82 | 38   | 37   | 14   |
| Iridium NEXT (IN) | 164,52 | 16   | 10   | 12,5 |
| Globalstar (GS)   | 168,43 | 12   | 10   | 10   |
| GuoWang (GW)      | 183,26 | 43.9 | 38   | 25   |
| GuoWang (GW)      | 179,19 | 37.5 | 36,5 | 25   |
| O3B               | 199,52 | 38.3 | 38   | 35   |
| O3B               | 199,91 | 38.3 | 38   | 35   |

**Πίνακας 10. Δεδομένα 3<sup>ου</sup> Υπολογισμού**

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η βασική εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το στάδιο είναι η πολύ γνωστή Εξίσωση του Φρις:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - FSPL \quad (8.4)$$

ή

$$P_r = P_t \times \frac{G_t \times G_r \times \lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad (8.5)$$

Όπου:

$P_r$  = Ισχύς Λήψης (dBW)

$P_t$  = Ισχύς Εκπομπής (dBW)

$G_r$  = Κέρδος Κεραίας Εκπομπής (dBi)

$G_t$  = Κέρδος Κεραίας Λήψης (dBi)

$FSPL$  = απώλειες Διάδοσης Ελευθέρου Χώρου (dB)

#### 8.1.4 Περιοχές Κάλυψης

Στη συνέχεια γίνεται υπολογισμός της περιοχής κάλυψης κάθε δορυφόρου βάσει της γωνίας ανύψωσης αυτού και του υψομέτρου της εκάστοτε τροχιάς, θεωρώντας ότι αυτές είναι κυκλικές και λαμβάνοντας υπόψιν την καμπυλότητα της Γης κάνοντας χρήση των παρακάτω δεδομένων:

| Δορυφορικός<br>Αστερισμός         | S1  | S2  | S3  | S4  | S5  | K1  | K2  | K3  | T1   | T2   | OW   | IN  | GS   | GW  | O3B  |
|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|-----|------|-----|------|
| Υψόμετρο (km)                     | 550 | 540 | 570 | 560 | 477 | 630 | 610 | 590 | 1015 | 1325 | 1200 | 780 | 1414 | 850 | 8063 |
| Ελάχιστη<br>Γωνία<br>Ανύψωσης (°) | 25  | 25  | 25  | 25  | 25  | 30  | 30  | 30  | 20   | 20   | 30   | 8   | 10   | 25  | 5    |

Πίνακας 11. Δεδομένα 4<sup>ου</sup> Υπολογισμού

Οι βασικές εξισώσεις οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν είναι οι κάτωθι:

$$\sin(a_0) = \frac{R}{R+h} \times \cos(\varepsilon_0) \quad (8.6)$$

$$\beta_0 = 90^\circ - (\varepsilon_0 + \alpha_0) \quad (8.7)$$

$$CoverageArea = 2\pi R^2 (1 - \cos(\beta_0)) \quad (8.8)$$

Όπου :

$R$  = ακτίνα της Γης

$h$  = υψόμετρο τροχιάς δορυφόρου

$\varepsilon_0$  = γωνία ανύψωσης

### 8.1.5 Απαιτούμενος Αριθμός Δορυφόρων

Οι επόμενοι υπολογισμοί οι οποίοι πραγματοποιήθηκαν αφορούν τη μεταβολή του ελάχιστου αριθμού δορυφόρων για την επίτευξη κάλυψης ολόκληρης της επιφάνειας της Γης για ενδεικτικές τιμές υψομέτρων, γωνιών ανύψωσης και ποσοστών επικάλυψης LEO δορυφόρων. Έπειτα γίνεται παρουσίαση του ελάχιστου αριθμού δορυφόρων που απαιτούνται για την επίτευξη παγκόσμιας κάλυψης, θεωρώντας ότι οι προς μελέτη αστερισμοί έχουν διαφορετικό ποσοστό επικάλυψης περιοχών μεταξύ των γειτονικών δορυφόρων τους για την επίτευξη συνεχούς και αδιάπτωτης κάλυψης καθώς και ότι θεωρητικά καλύπτουν το 100% της συνολικής επιφάνειας της Γης, το οποίο δεν συμβαίνει για όλους τους αστερισμούς στη πραγματικότητα.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το σημείο είναι οι περιοχές κάλυψης των δορυφόρων των εκάστοτε αστερισμών, καθώς επίσης θεωρήθηκε ότι ο παράγοντας επικάλυψης όλων των αστερισμών είναι 10%.



Παρακάτω ακολουθούν οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το βήμα και αφορούν την ενεργό περιοχή κάλυψης των δορυφόρων καθώς και τον ελάχιστο απαιτούμενο αριθμό αυτών, λαμβάνοντας υπόψιν τον παράγοντα επικάλυψης του εκάστοτε αστερισμού:

$$EffectiveCoverage = CoverageArea \times (1 - OverlapFactor) \quad (8.9)$$

$$NumberofSatellites = \frac{Earth'sSurfaceArea}{EffectiveCoverage} \quad (8.10)$$

### 8.1.6 Μέγιστη Φασματική Απόδοση

Σε αυτό το βήμα γίνονται υπολογισμοί της φασματική απόδοση κάθε ζεύξης βάσει του εκτιμώμενου σηματοθορυβικού λόγου κατωφλίου (SNR threshold) για κάθε αστερισμό. τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν έχουν ως ακολούθως:

| Δορυφορικός Αστερισμός    | Starlink-Ku Band | Starlink-Ka Band | Kuiper-Ka band | Telesat-Ka Band | OneWeb-Ku Band | Iridium NEXT-L Band | Globalstar-S Band | GuoWang-Ka band | GuoWang-Ku band | O3B-Ka Band |
|---------------------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|----------------|---------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------|
| <b>SNR Threshold (dB)</b> | 8                | 10               | 10,5           | 9               | 8              | 5,5                 | 5                 | 10,5            | 8               | 11,5        |

Πίνακας 12. Δεδομένα 6<sup>ου</sup> Υπολογισμού

Η βασική εξίσωση που αφορά τη φασματική απόδοση για δεδομένο SNR είναι η ακόλουθη:

$$\beta_{\max} = \log_2(1 + SNR) \quad (8.11)$$

Όπου:

$\beta_{\max}$  = Μέγιστη Φασματική Απόδοση (bps/Hz)

$SNR = SNR \text{ threshold}$  = Σηματοθορυβικός Λόγος Κατωφλίου

### 8.1.7 Μέγιστος Ρυθμός Μετάδοσης

Στη συνέχεια γίνεται υπολογισμός του μέγιστου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων για κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις, λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα σχετικά με τις εκάστοτε

φασματικές αποδόσεις που παρήχθησαν προηγουμένως, καθώς και το χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης, όπως παρακάτω:

| Δορυφορικός<br>Αστερισμός | Starlink-<br>Ku<br>Band | Starlink-<br>Ka<br>Band | Kuiper-<br>Ka<br>band | Telesat-<br>Ka<br>Band | OneWeb-<br>Ku Band | Iridium<br>NEXT-<br>L Band | Globalstar-<br>S Band | GuoWang-<br>Ka band | GuoWang-<br>Ku band | O3B-<br>Ka<br>Band |
|---------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| Εύρος<br>Ζώνης<br>(GHz)   | 0,75                    | 1,5                     | 1,5                   | 1,5                    | 0,5                | 0,015                      | 0,015                 | 0,75                | 0,5                 | 1,5                |

**Πίνακας 13. Δεδομένα 7<sup>ου</sup> Υπολογισμού**

Η εξίσωση στην οποία βασίστηκε ο υπολογισμός του μέγιστου ρυθμού μετάδοσης είναι αυτή του θεωρήματος Shannon :

$$R_{\max} < C = B \log_2(1 + \text{SNR}) \quad (8.12)$$

Όπου:

- $C$  = Μέγιστη Χωρητικότητα Διαύλου
- $R_{\max}$  = Μέγιστος Ρυθμός Μετάδοσης
- $B$  = Εύρος Ζώνης (Bandwidth)

### 8.1.8 Σχήματα Διαμόρφωσης

Στη συνέχεια έγινε επιλογή των καταλληλότερων σχημάτων διαμόρφωσης βάσει των SNR threshold των επί μέρους συστημάτων, όπως αυτά παρουσιάστηκαν προηγουμένως, καθώς και των νέων τιμών φασματικής απόδοσης οι οποίες προκύπτουν από την χρήση αυτών, όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

| MODCOD                                           | APSK<br>1/2 | CPSK<br>1/4 | CPSK<br>1/2 | CPSK<br>3/4  | DPSK<br>1/4  | DPSK<br>1/2  | DPSK<br>3/4  | DPSK<br>5/6  | DPSK<br>7/8   | QPSK<br>1/2   |
|--------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| Φασματική<br>Απόδοση<br>(Spectral<br>Efficiency) | 0,4         | 0,5         | 0,6         | 0,65         | 0,75         | 0,9          | 1,05         | 1,25         | 1,5           | 0,8           |
| Ελάχιστο<br>Απαιτούμενο<br>SNR                   | -2          | 0           | 1           | 2            | 3            | 4            | 6            | 7            | 9             | 0,5           |
| MODCOD                                           | QPSK<br>3/4 | 8PSK<br>2/3 | 8PSK<br>3/4 | 16QAM<br>1/2 | 16QAM<br>3/4 | 32QAM<br>3/4 | 64QAM<br>2/3 | 64QAM<br>5/6 | 256QAM<br>3/4 | 256QAM<br>7/8 |

|                                                            |     |     |     |     |     |      |     |    |     |    |
|------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|----|-----|----|
| <b>Φασματική<br/>Απόδοση<br/>(Spectral<br/>Efficiency)</b> | 1   | 1,8 | 2,1 | 2,4 | 3,6 | 4,5  | 5,5 | 6  | 7,2 | 8  |
| <b>Ελάχιστο<br/>Απαιτούμενο<br/>SNR</b>                    | 1,5 | 4   | 5,5 | 7   | 10  | 12,5 | 14  | 15 | 18  | 20 |

**Πίνακας 14.Δεδομένα 8<sup>ov</sup> Υπολογισμού**

### 8.1.9 Μέγιστος Συνολικός Ρυθμός Μετάδοσης

Στη συνέχεια γίνεται υπολογισμός του Μέγιστου Συνολικού Ρυθμού Μετάδοσης Δεδομένων (Rtotal) για τα σχήματα διαμόρφωσης που επιλέχθηκαν παραπάνω και κατά συνέπεια των επί μέρους φασματικών αποδόσεων, λαμβάνοντας υπόψιν το εύρος ζώνης, τους αριθμούς δεσμών ανά δορυφόρο, τον αριθμό των χρησιμοποιούμενων πολώσεων ανά δέσμη, τον αριθμό χρωμάτων συχνότητας και τον δείκτη πλεονάζοντος εύρους ζώνης.

| <b>Δορυφορικός<br/>Αστερισμός</b> | <b>Δέσμες<br/>ανά<br/>Δορυφόρο<br/>(Nb)</b> | <b>Απόδοση<br/>Φάσματος βάσει<br/>MODCOD<br/>(bps/Hz)</b> | <b>Αριθμός<br/>Πολώσεων<br/>(Np)</b> | <b>Δείκτης<br/>Αναχρησιμοποίησης<br/>Συχνοτήτων (Nc)</b> | <b>Δείκτης<br/>Πλεονάζοντος<br/>Φάσματος<br/>(Eta_guard)</b> |
|-----------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Starlink - Ku<br>Band             | 6,00                                        | 2,4                                                       | 2                                    | 6,00                                                     | 0,150                                                        |
| Starlink - Ka<br>Band             | 20,00                                       | 2,4                                                       | 2                                    | 6,00                                                     | 0,150                                                        |
| Kuiper - Ka<br>Band               | 32,00                                       | 3,6                                                       | 2                                    | 5,00                                                     | 0,150                                                        |
| Telesat - Ka<br>Band              | 24,00                                       | 2,4                                                       | 2                                    | 4,00                                                     | 0,125                                                        |
| OneWeb - Ku<br>Band               | 16,00                                       | 2,4                                                       | 2                                    | 4,00                                                     | 0,150                                                        |
| Iridium NEXT<br>- L Band          | 48,00                                       | 2,1                                                       | 1                                    | 1,00                                                     | 0,075                                                        |
| Globalstar - S<br>Band            | 16,00                                       | 1,8                                                       | 1                                    | 1,00                                                     | 0,075                                                        |
| GuoWang -<br>Ku Band              | 45,00                                       | 3,6                                                       | 2                                    | 6,00                                                     | 0,150                                                        |
| GuoWang -<br>Ka Band              | 45,00                                       | 2,4                                                       | 2                                    | 6,00                                                     | 0,150                                                        |
| O3B - Ka<br>Band                  | 10,00                                       | 3,6                                                       | 2                                    | 3,00                                                     | 0,125                                                        |

**Πίνακας 15.Δεδομένα 9<sup>ov</sup> Υπολογισμού**

Η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψιν τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά είναι η ακόλουθη:

$$R_{tot} = \beta \times Bw \times \left( \frac{N_p \times N_b}{N_c} \right) \times (1 - n_{guard}) \quad (8.13)$$

Όπου:

$\beta$  = δείκτης φασματικής απόδοσης (bps/Hz)

$Bw$  = Εύρος Ζώνης (Bandwidth) (Hz)

$N_p$  = Αριθμός πολώσεων σήματος (number of polarizations)

$N_b$  = Αριθμός Δεσμών Δορυφόρου (number of beams)

$N_c$  = Αριθμός Χρωμάτων Συχνότητας (number of frequency colors = αριθμός αναχρησιμοποίησης συχνοτήτων ανά δέσμη)

$N_{guard}$  = Δείκτης ο οποίος δείχνει το ποσοστό του χρησιμοποιούμενου εύρους ζώνης το οποίο τηρείται ως πλεονάζον για την αποφυγή παρεμβολών γειτονικών καναλιών.

#### 8.1.10 Διαγράμματα Ακτινοβολίας Κεραιών Φασικής Διάταξης

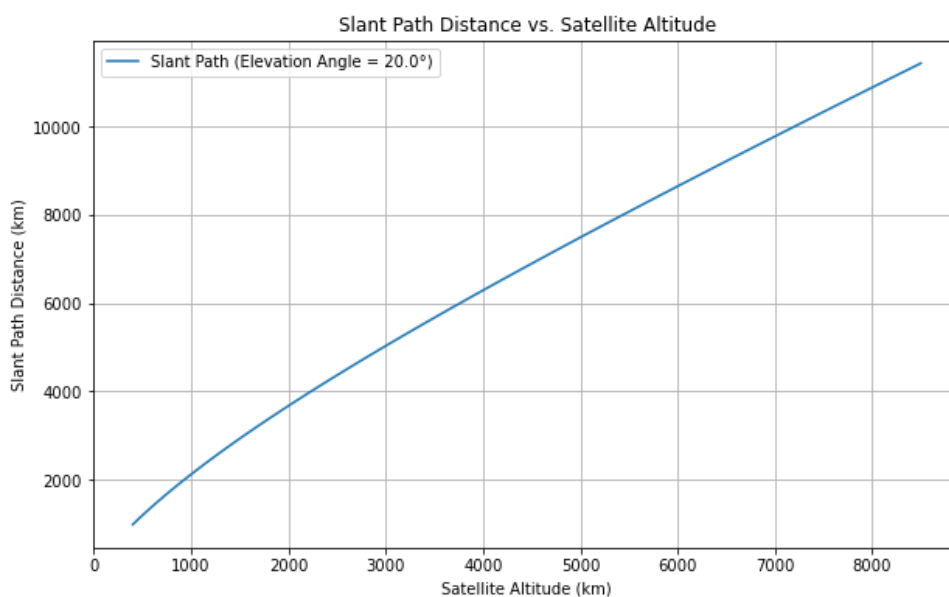
Τέλος, σε ένα δορυφορικό σύστημα μία από τις κυριότερες παραμέτρους οι οποίες πρέπει να αξιολογηθούν και να επιλεγθούν κατάλληλα κάθε φορά είναι οι κεραίες εκπομπής και λήψης, καθώς τα κέρδη και τα διαγράμματα ακτινοβολίας αυτών, επηρεάζουν άμεσα τον προϋπολογισμό ζεύξης και μέσω αυτών επιτυγχάνεται η αποφυγή παρεμβολών γειτονικού διαύλου και η επίτευξη του επιθυμητού SNR εισόδου στο δέκτη. Στο τελευταίο βήμα γίνεται παρουσίαση ενδεικτικών διαγραμμάτων ακτινοβολίας δορυφορικών κεραιών, όταν αυτές είναι κεραίες φασικής διάταξης (phased array antennas) λαμβάνοντας υπόψιν τον αριθμό των στοιχείων από τα οποία αποτελούνται, τη μεταξύ τους απόσταση και τη φέρουσα συχνότητα του σήματος.

## 8.2 Αποτελέσματα Υπολογισμών

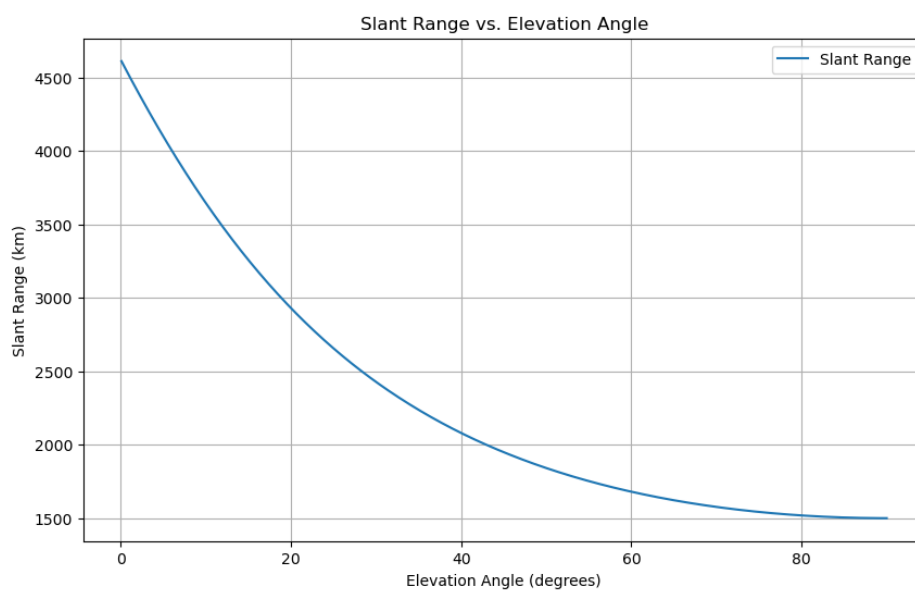
Στη συνέχεια ακολουθεί παρουσίαση των αποτελεσμάτων των υλοποιηθέντων υπολογισμών για τα εξεταζόμενα χαρακτηριστικά των εκάστοτε αστερισμών, καθώς επίσης σχολιασμός και παρατηρήσεις επί αυτών.

### 8.2.1 Αποτελέσματα Υπολογισμών Μέγιστων Αποστάσεων

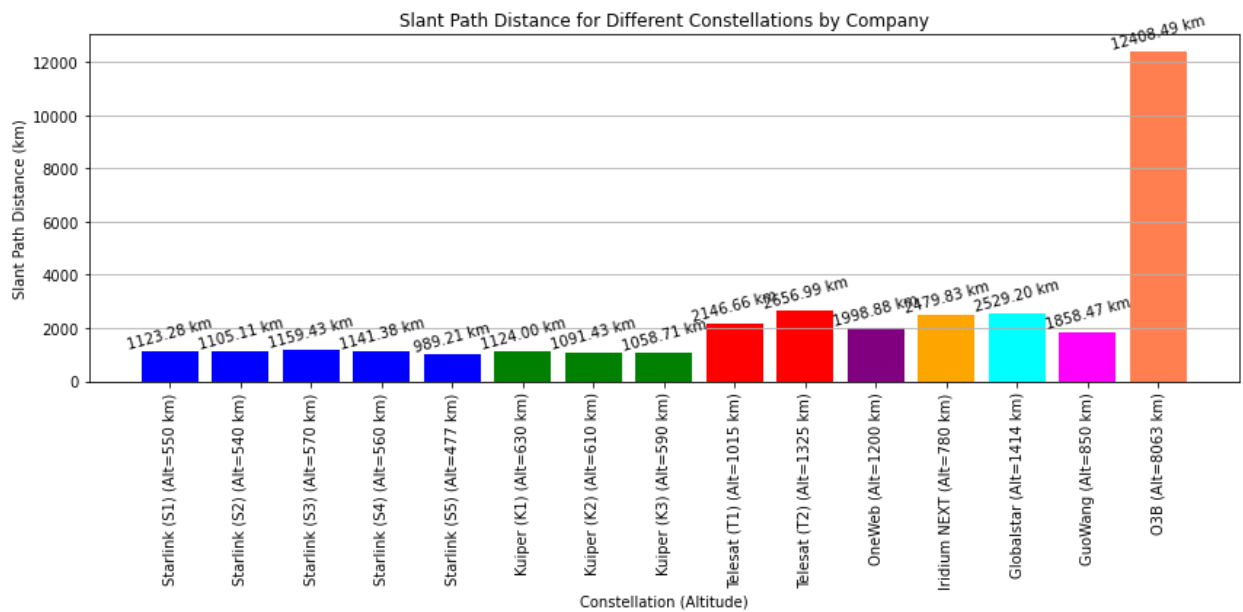
Σε αυτό το βήμα βλέπουμε, βάσει των αποτελεσμάτων των εξισώσεων, τις σχέσεις μεταξύ μήκους μονοπατιού, υψομέτρου τροχιάς και γωνίας ανύψωσης όπως αυτές απεικονίζονται στα διαγράμματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια. Στο μεν πρώτο βλέπουμε ότι η σχέση μεταξύ μήκους μονοπατιού και υψομέτρου, για δεδομένη γωνία ανύψωσης, είναι γνησίως αύξουσα και μη γραμμική. Στο δε δεύτερο φαίνεται ότι η σχέση μεταξύ μήκους μονοπατιού και γωνίας ανύψωσης για δεδομένο υψόμετρο είναι και πάλι μη γραμμική αλλά γνησίως φθίνουσα αυτή τη φορά.



Σχήμα 17. Διάγραμμα Μήκους Μονοπατιού συναρτήσει Δορ. Υψομέτρου



Σχήμα 18. Διάγραμμα Μήκους Μονοπατιού συναρτήσει Γων. Ανύψωσης

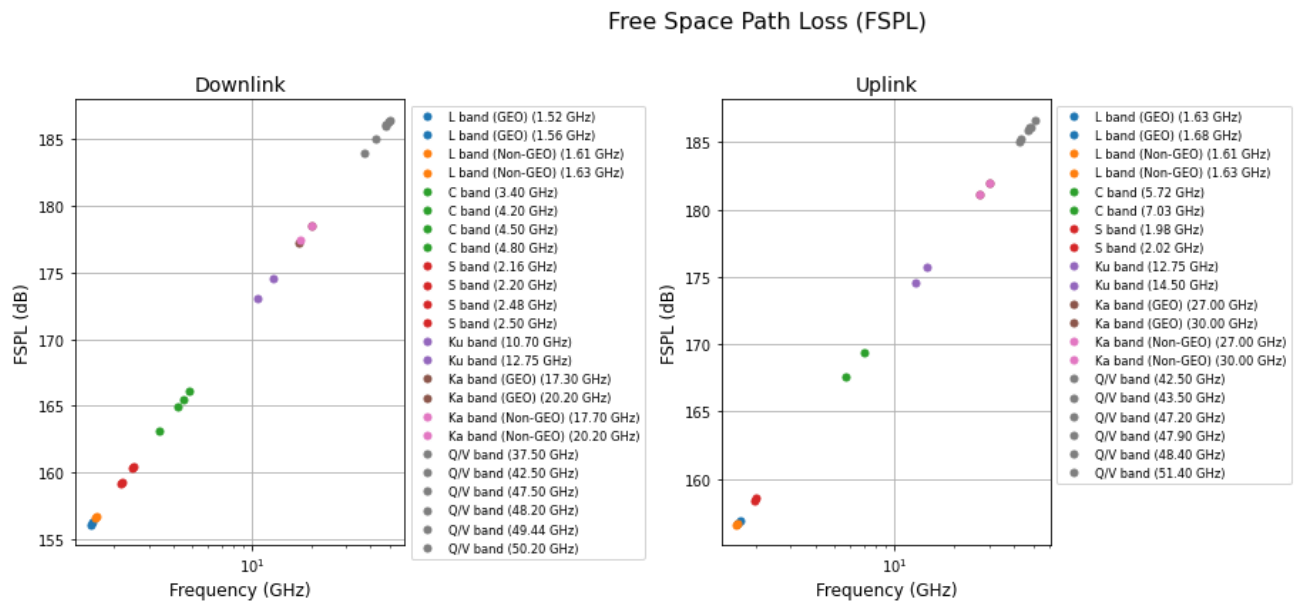


Σχήμα 19.Μήκη Μονοπατιών Αστερισμών

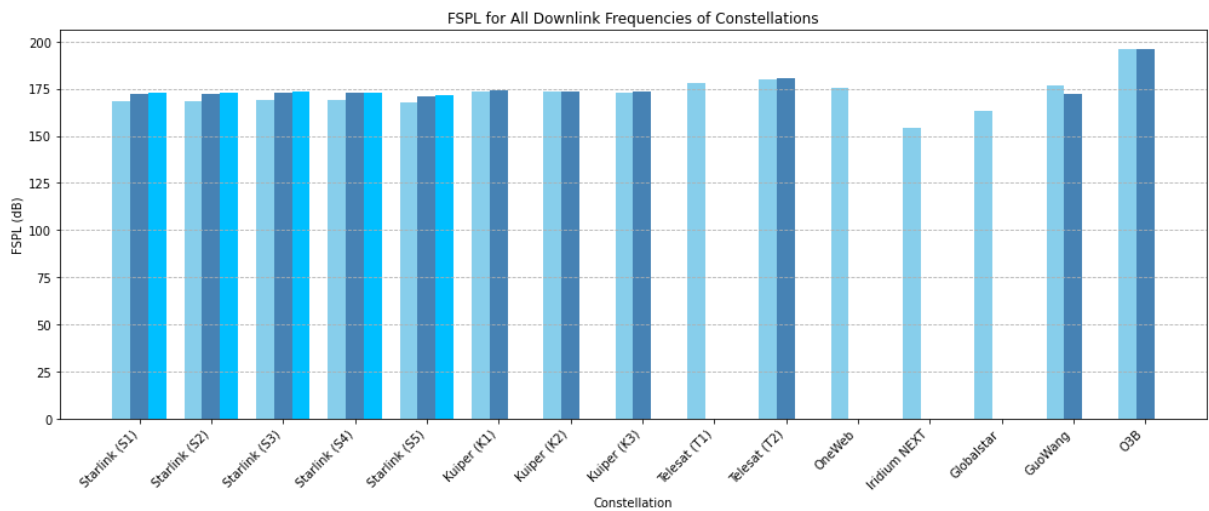
Όπως διαφαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, οι δορυφόροι στις τροχιές των κελυφών (satellite shells) των αστερισμών Starlink (S1, S2, S3, S4, S5) και Kuiper (K1, K2) έχουν τα μικρότερα μέγιστα μήκη διαδρομής εν συγκρίσει με τους υπόλοιπους LEO αστερισμούς, γεγονός το οποίο ήταν αναμενόμενο δεδομένων των χαμηλότερων υψομέτρων τροχιών και των μεγαλύτερων γωνιών ανύψωσης. Σε αυτό το παράδειγμα έχουν συμπεριληφθεί και οι τροχιές του αστερισμού O3B, ο οποίος δεν αποτελεί LEO αστερισμό, ωστόσο προβάλλεται ενδεικτικά για την καλύτερη κατανόηση της διαφοράς των μηκών διαδρομής μεταξύ LEO και MEO δορυφόρων.

## 8.2.2 Αποτελέσματα Υπολογισμών Απωλειών Ελευθέρου Χώρου

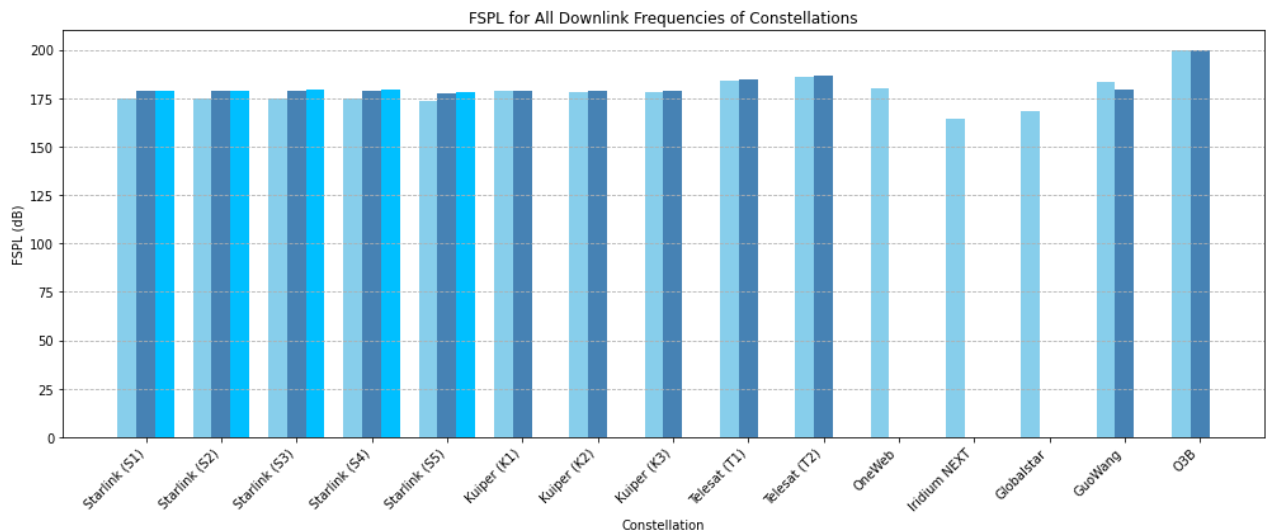
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η αύξηση Απωλειών Ελευθέρου Χώρου για αύξηση της φέρουσας συχνότητας και όπως είναι αναμενόμενο βλέπουμε ότι τα μεγέθη αυτά είναι ανάλογα.



*Σχήμα 20.FSPL για Δορ. Μπάντες Συχνοτήτων*



*Σχήμα 21.Αποτελέσματα FSPL για ονομαστικό υψόμετρο τροχιών*



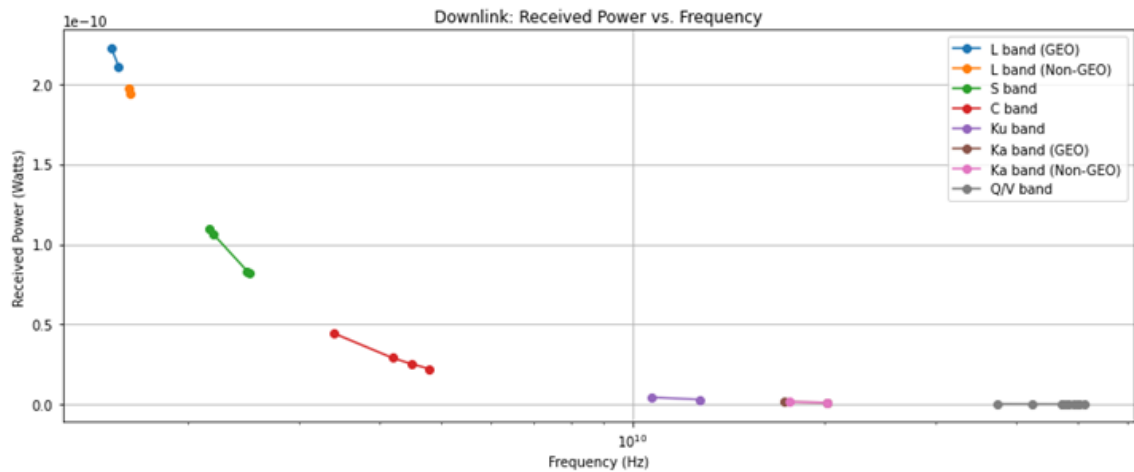
Σχήμα 22. Αποτελέσματα FSPL για μέγιστο μήκος μονοπατιού (*maximum slant path*)

Από τα παραπάνω διαγράμματα βλέπουμε ότι οι δορυφορικές ζεύξεις των αστερισμών των εταιρειών Starlink και Kuiper παρουσιάζουν μικρές διαφορές μεταξύ τους στις απώλειες διάδοσης. Επιπλέον επιβεβαιώνεται ο κανόνας ότι για δεδομένο υψόμετρο, αύξηση της συχνότητας επιφέρει αύξηση των απωλειών ελευθέρου χώρου, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στη περίπτωση των κελυφών της Starlink, όπου για δεδομένο κέλυφος είναι δυνατή η εκπομπή σήματος σε διαφορετικά εύρη συχνοτήτων. Ακόμα αξίζει να σημειωθεί ότι για τον ίδιο λόγο, ενώ θα περίμενε κανείς εμφάνιση μέγιστων απωλειών σε περιπτώσεις μέγιστου μήκους μονοπατιού, αυτό δεν συμβαίνει λόγω χρήσης από τις εταιρείες χαμηλότερων συχνοτήτων διάδοσης, όπως συμβαίνει χαρακτηριστικά στην Iridium η οποία παρά το μεγάλο μήκος διαδρομής σήματος, παρουσιάζει τις μικρότερες απώλειες λόγω χρήσης συχνότητας κατά πολύ χαμηλότερης σε σχέση με των υπολοίπων εταιρειών. Τέλος, όπως ήταν αναμενόμενο ο αστερισμός O3B παρουσιάζει τα υψηλότερα επίπεδα απωλειών.

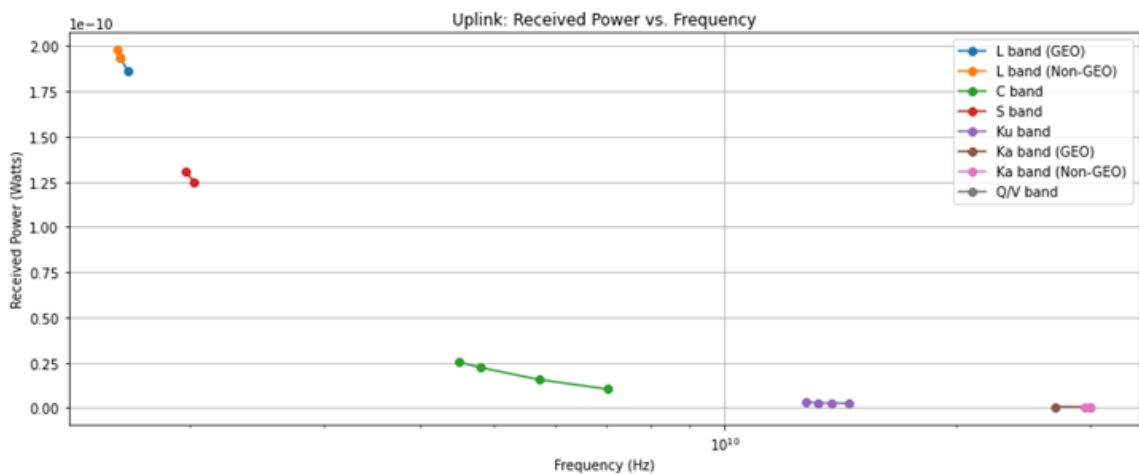
### 8.2.3 Αποτελέσματα Υπολογισμών Ισχύος Λαμβανόμενου Σήματος

Από τα αποτελέσματα που ακολουθούν είναι φανερό ότι η σχέση μεταξύ ισχύος λαμβανόμενου σήματος και συχνότητας μετάδοσης είναι εντόνως φθίνουσα και μη γραμμική:

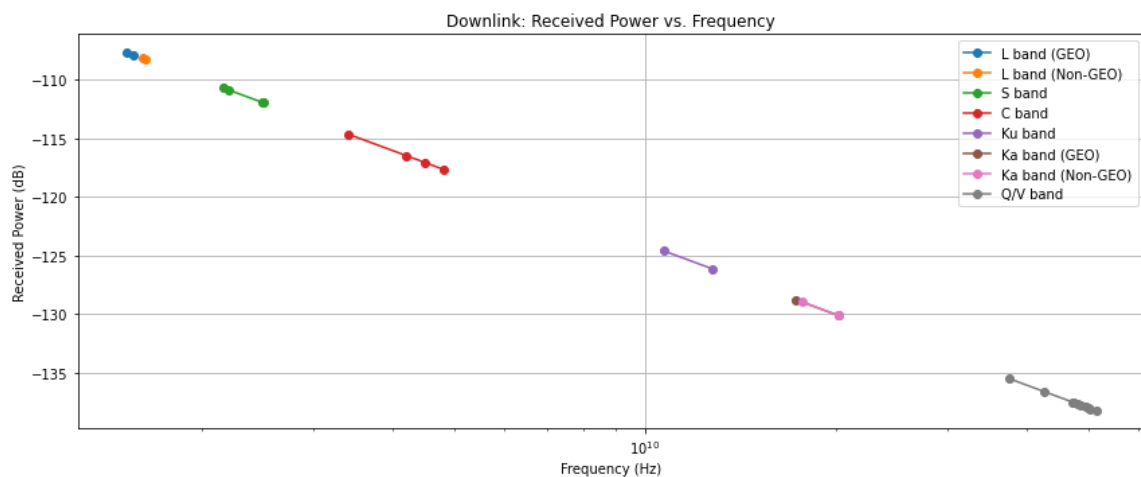




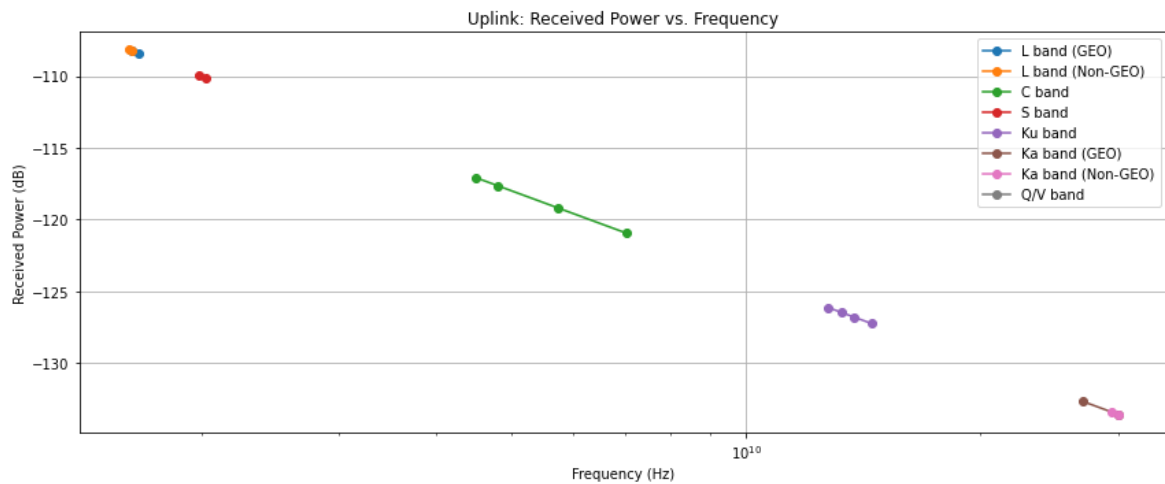
Σχήμα 23. Αποτελέσματα Λαμβανόμενης Ισχύος Κατερχόμενων Ζεύξεων ανά Μπάντα Συχνοτήτων



Σχήμα 24. Αποτελέσματα Λαμβανόμενης Ισχύος Ανερχόμενων Ζεύξεων ανά Μπάντα Συχνοτήτων

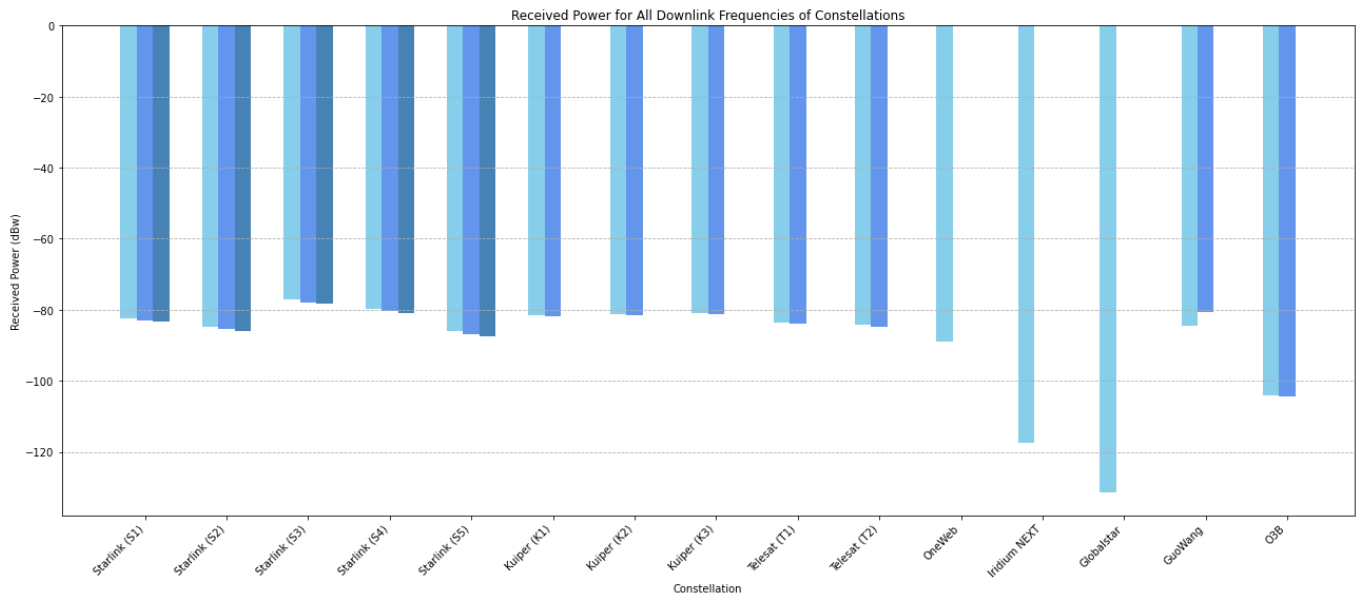


Σχήμα 25. Αποτελέσματα Λαμβανόμενης Ισχύος (dB) Κατερχόμενων Ζεύξεων ανά Μπάντα Συχνοτήτων



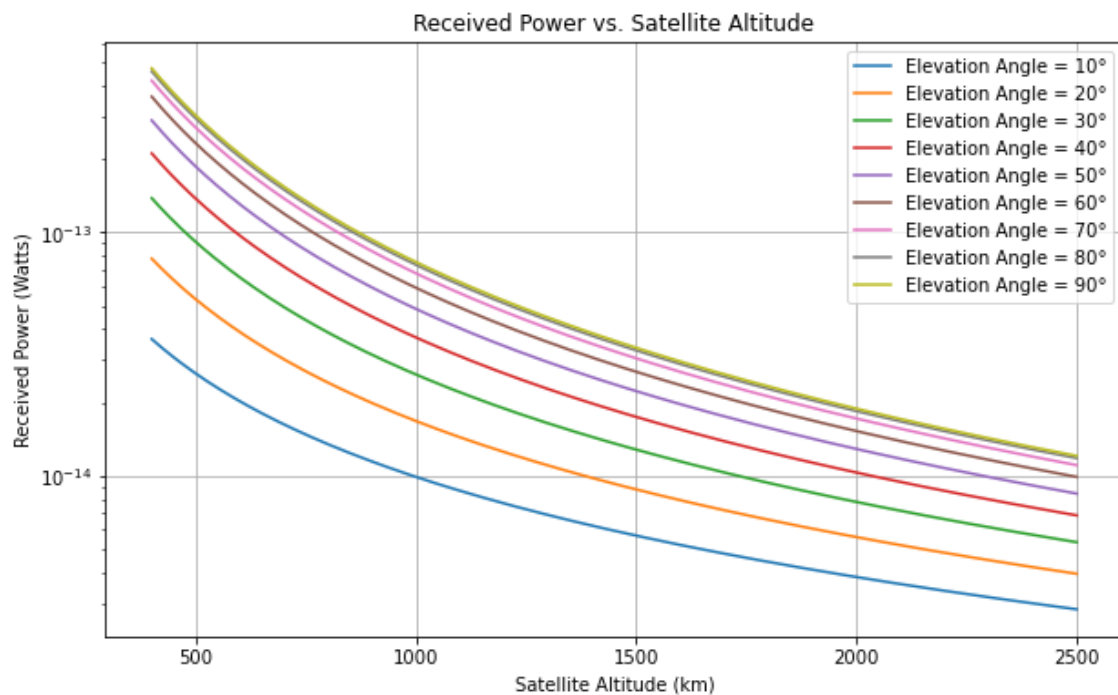
Σχήμα 26. Αποτελέσματα Λαμβανόμενης Ισχύος (dB) Ανερχόμενων Ζεύξεων ανά Μπάντα Συχνοτήτων

Στο διάγραμμα που παρουσιάζεται στη συνέχεια καθίσταται φανερό ότι οι αστερισμοί της Starlink που βρίσκονται σε χαμηλότερα υψόμετρα επιτυγχάνουν τις υψηλότερες τιμές ισχύος σήματος λήψης, όπως επίσης επιβεβαιώνεται ο κανόνας ότι για αύξηση της φέρουσας συχνότητας αυξάνονται οι απώλειες διάδοσης και συνεπώς μειώνεται η λαμβανόμενη ισχύς. επιπλέον βλέπουμε ότι τα χαμηλότερα επίπεδα ισχύος επιτυγχάνονται από τους αστερισμούς της Iridium Next και GlobalStar, παρά τις κατά πολύ χαμηλότερες συχνότητες εκπομπής (1,62 και 2,49 GHz αντίστοιχα) σε σχέση με τις υπόλοιπες εταιρείες, γεγονός το οποίο αφενός οφείλεται στα χαμηλά κέρδη κεραίας πομπού και δέκτη και αφετέρου στα μεγαλύτερα υψόμετρα τροχιών σε σχέση με τους άλλους LEO δορυφόρους. Ωστόσο αξίζει να παρατηρηθεί ότι ενώ και ο O3B αστερισμός ξεπερνάει σε υψόμετρο κατά πολύ όλους τους υπόλοιπους, παρ' όλ' αυτά έχει υψηλότερα επίπεδα από τους δύο προαναφερθέντες λόγω υψηλών κερδών κεραίων πομπού και δέκτη που αντισταθμίζουν τις απώλειες



Σχήμα 27. Αποτελέσματα Λαμβανόμενης Ισχύος για κατερχόμενες ζεύξεις των Αστερισμών

Παρακάτω παρουσιάζεται διάγραμμα στο οποίο απεικονίζεται η μεταβολή της λαμβανόμενης ισχύος ενός σήματος για ενδεικτικές τιμές ισχύος εκπομπής, συχνότητας μετάδοσης και κέρδους κεραίας πομπού και δέκτη, ανάλογα με το υψόμετρο τροχιάς και για διάφορες γωνίες ανύψωσης. Παρατηρώντας το διάγραμμα βλέπουμε ότι όπως ήταν αναμενόμενο, η σχέση μεταξύ αυτών είναι μη γραμμική και για την ισχύ σήματος συναρτήσει του υψομέτρου η συνάρτηση είναι γνησίως φθίνουσα εν αντιθέσει με τη γωνία ανύψωσης όπου είναι γνησίως αύξουσα (θεωρώντας ότι  $0^\circ < \epsilon_0 < 90^\circ$ ).



Σχήμα 28. Λαμβανόμενη Ισχύς συναρτήσει Υψομέτρου και Γωνίας Ανύψωσης

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα επίπεδα λαμβανόμενης ισχύος στον δέκτη ενός επίγειου χρήστη μιας κατερχόμενης δορυφορικής ζεύξης, όπως αυτά παρουσιάζονται στο παραπάνω διάγραμμα, υπολογίστηκαν για ενδεικτικές τιμές των επί μέρους μεταβλητών και χωρίς να λαμβάνονται υπόψιν περαιτέρω απώλειες, παρά μόνο οι απώλειες μετάδοσης ελευθέρου χώρου. Στην πραγματικότητα λοιπόν εύκολα καταλαβαίνει κανείς ότι συνυπολογίζοντας και τις επιπλέον απώλειες οι οποίες υφίστανται σε μία δορυφορική ζεύξη, αναλόγως της χρησιμοποιούμενης συχνότητας μετάδοσης, των συνθηκών της ατμόσφαιρας καθώς και του περιβάλλοντος του χρήστη, τα επίπεδα ισχύος διαμορφώνονται ανάλογα (κατά κανόνα χαμηλότερα συγκριτικά με τα παρουσιασθέντα) και υπολογίζονται με της βοήθεια της κατάλληλης εξίσωσης προϋπολογισμού ζεύξης όπως παρακάτω:

Link Budget Equation:

$$P_{received} = P_{transmitted} + G_{transmitter} + G_{receiver} - L_{FreeSpace} - L_{other} \quad (8.14)$$

Όπου :

$P_{transmitted}$  = Ισχύς Σήματος Εκπομπής (dBW)

$G_{transmitter}$  = Κέρδος Κεραίας Πομπού (dBi)

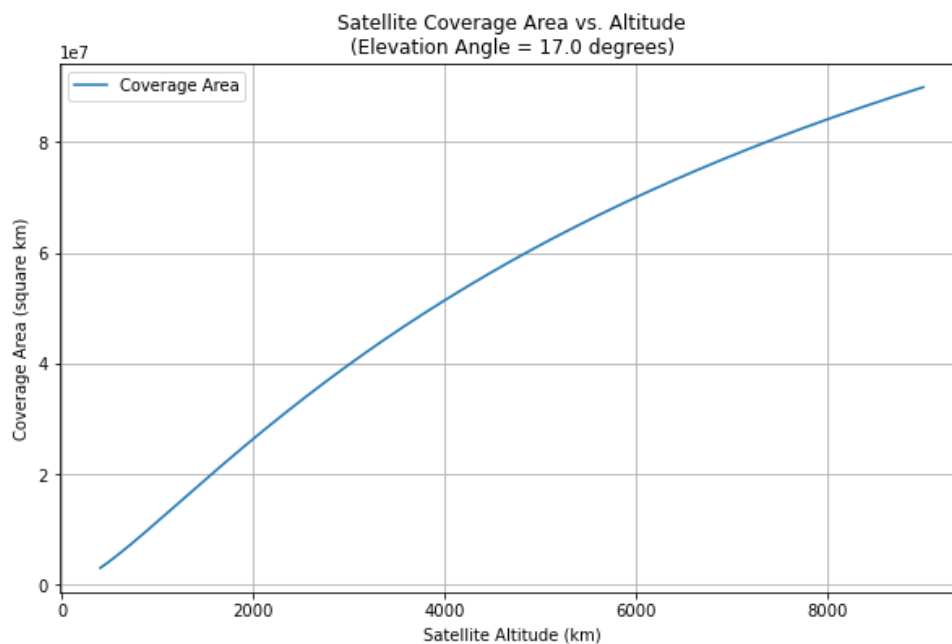
$G_{receiver}$  = Κέρδος Κεραίας Δέκτη (dBi)

$L_{free space}$  = Απώλειες Διάδοσης Ελευθέρου Χώρου (dB)

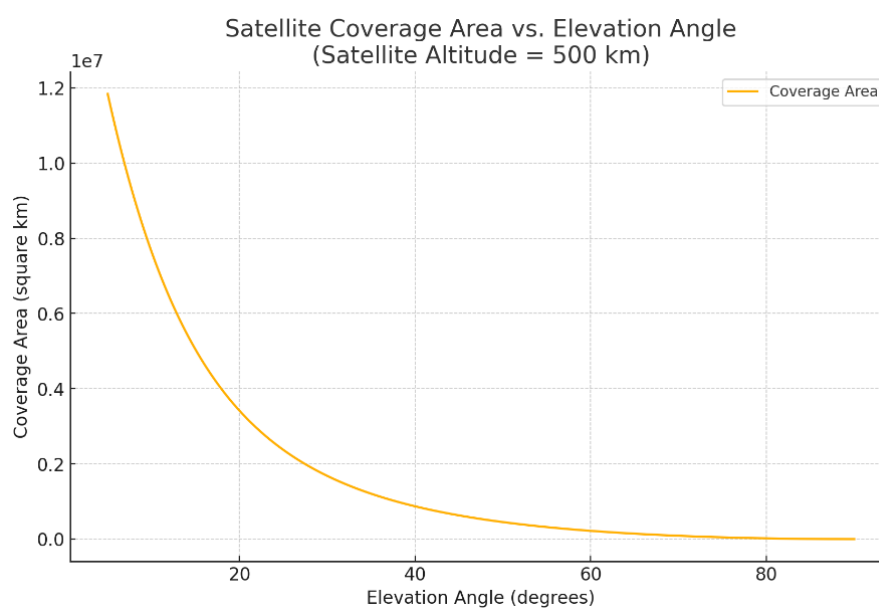
$L_{other}$  = Οι επιπλέον απώλειες (dB) που υπολογίζονται βάσει της μεθοδολογίας η οποία περιγράφηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο της παρούσης εργασίας για συγκεκριμένη κατά περίπτωση πιθανότητα Διακοπής Ζεύξης ( $P_{out}$ ).

#### 8.2.4 Αποτελέσματα Υπολογισμών Περιοχών Κάλυψης

Βάσει των τύπων που παρουσιάστηκαν στην αντίστοιχη ενότητα, παρήχθησαν τα παρακάτω διαγράμματα τα οποία δείχνουν ενδεικτικά τη μεταβολή της περιοχής κάλυψης αναλόγως της γωνίας ανύψωσης και του δορυφορικού υψομέτρου:



Σχήμα 29. Διάγραμμα Περιοχής Κάλυψης συναρτήσει Δορ. Υψομέτρου



Σχήμα 30. Διάγραμμα Περιοχής Κάλυψης συναρτήσει Γωνίας Ανόψωσης

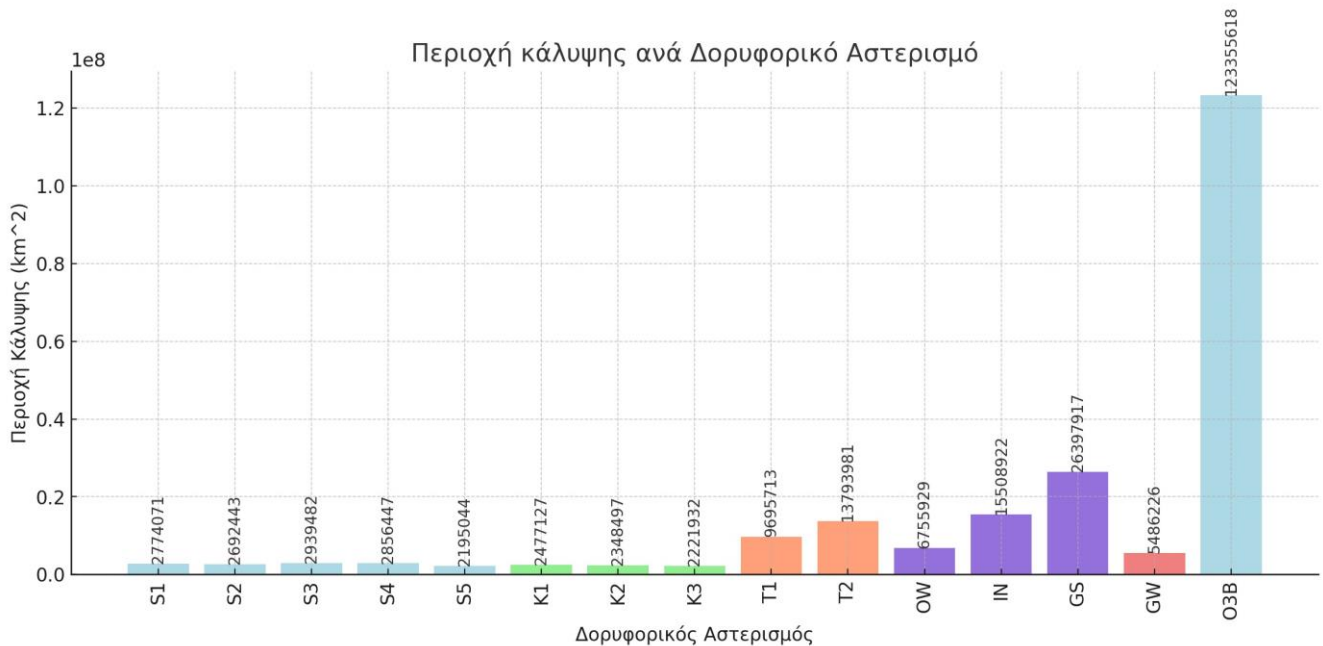
Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνονται τα εξής:

- Η σχέση μεταξύ της περιοχής κάλυψης ενός δορυφόρου και του τροχιακού υψομέτρου είναι γνησίως αύξουσα και μη γραμμική με μειούμενο ρυθμό αύξησης, γεγονός το οποίο οφείλεται

στην καμπυλότητα της Γης η οποία σε σχετικά χαμηλά υψόμετρα (LEO) δεν παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο, ωστόσο επηρεάζει σημαντικά σε υψηλότερα τροχιακά επίπεδα.

- Η σχέση μεταξύ της περιοχής κάλυψης ενός δορυφόρου και της γωνίας ανύψωσης αυτού είναι μη γραμμική και γνησίως φθίνουσα με την περιοχή κάλυψης να τείνει στο 0 για γωνίες κοντά στις 90°.

Τα παραπάνω συμπεράσματα επιβεβαιώνονται και από το ραβδόγραμμα που ακολουθεί στη συνέχεια και παρουσιάζει τις περιοχές κάλυψης των υπό μελέτη αστερισμών:

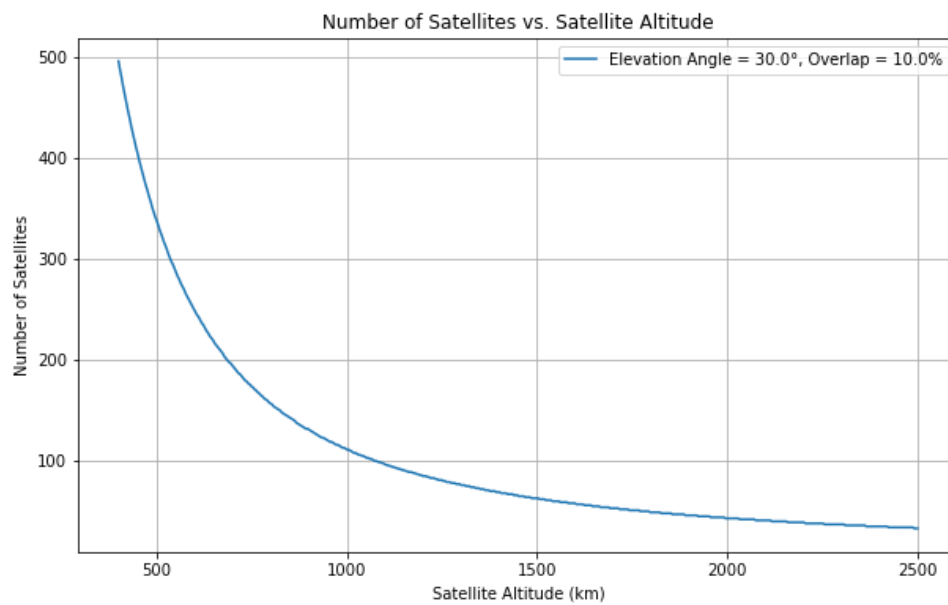


Σχήμα 31. Περιοχή Κάλυψη ανά Αστερισμό

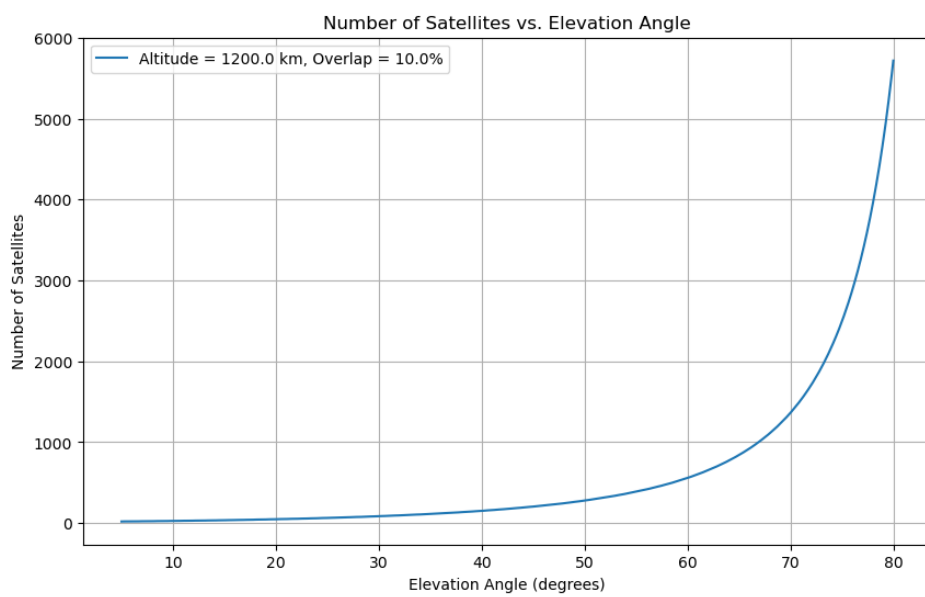
Εύκολα διακρίνεται από το παραπάνω ότι οι αστερισμοί Starlink (S1, S2, S3, S4, S5) και Kuiper (K1, K2, K3) παρουσιάζουν τις μικρότερες περιοχές κάλυψης συγκριτικά με τους υπόλοιπους αστερισμούς λόγω των χαμηλότερων τροχιακών υψομέτρων και των σχετικά μεγάλων γωνιών ανύψωσης. Τέλος, όπως ήταν αναμενόμενο ο αστερισμός O3B παρουσιάζει με μεγάλη διαφορά την μέγιστη περιοχή κάλυψης λόγω μεγίστου υψομέτρου και ελάχιστης γωνίας ανύψωσης, όπως είναι σύνηθες για τους MEO αστερισμούς.

## 8.2.5 Αποτελέσματα Ελάχιστου Αριθμού Δορυφόρων Κάλυψης

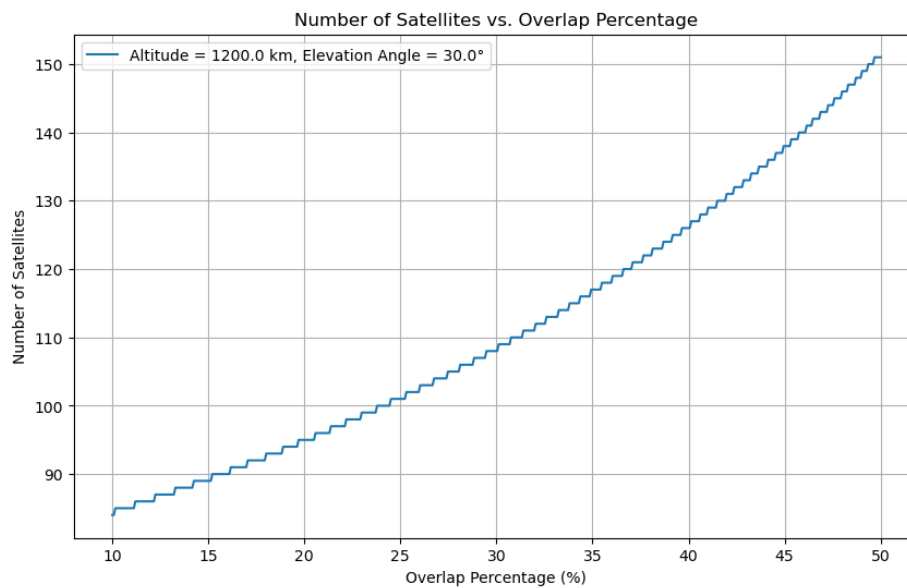
Ακολουθούν ενδεικτικά διαγράμματα μεταβολής του ελάχιστου απαιτούμενου αριθμού δορυφόρων για την κάλυψη της Γης συναρτήσει του υψομέτρου, της γωνίας ανύψωσης και του παράγοντα επικάλυψης.



Σχήμα 32. Αριθμός Δορυφόρων Συναρτήσει Υψομέτρου

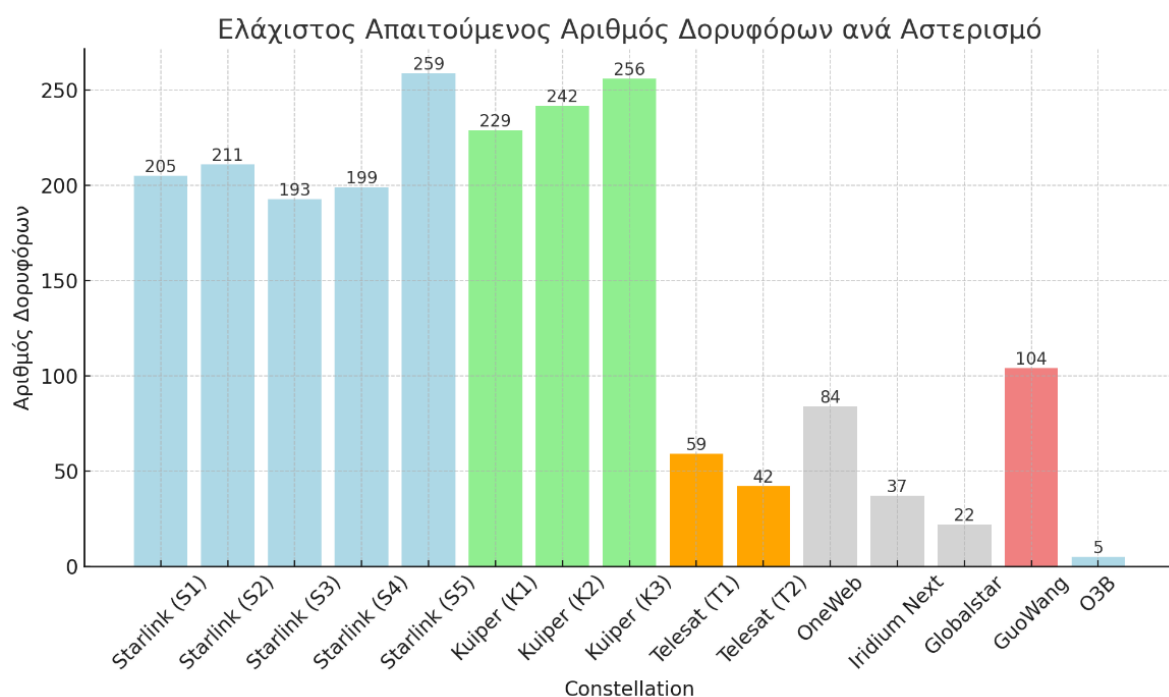


Σχήμα 33. Αριθμός Δορυφόρων Συναρτήσει Γων. Ανύψωσης



Σχήμα 34. Αριθμός Δορυφόρων Συναρτήσει Παράγοντα Επικάλυψης

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα, ο αριθμός των ελάχιστων απαιτούμενων δορυφόρων μειώνεται μη γραμμικά για αύξηση του τροχιακού υψομέτρου λόγω μειούμενου ρυθμού αύξησης της επιφάνειας κάλυψης του δορυφόρου λόγω καμπυλότητας της Γης. Το αντίθετο συμβαίνει για αύξηση της γωνίας ανύψωσης των δορυφόρων καθώς και του ποσοστού επικάλυψης περιοχών γειτονικών δορυφόρων. Ωστόσο βλέπουμε ότι η μεγαλύτερη μεταβολή σημειώνεται για την γωνία ανύψωσης όταν αυτή πλησιάζει τις 90°, οπότε η περιοχή κάλυψης τείνει να μηδενιστεί με αποτέλεσμα ο αριθμός των απαιτούμενων δορυφόρων να αυξάνεται ραγδαία.



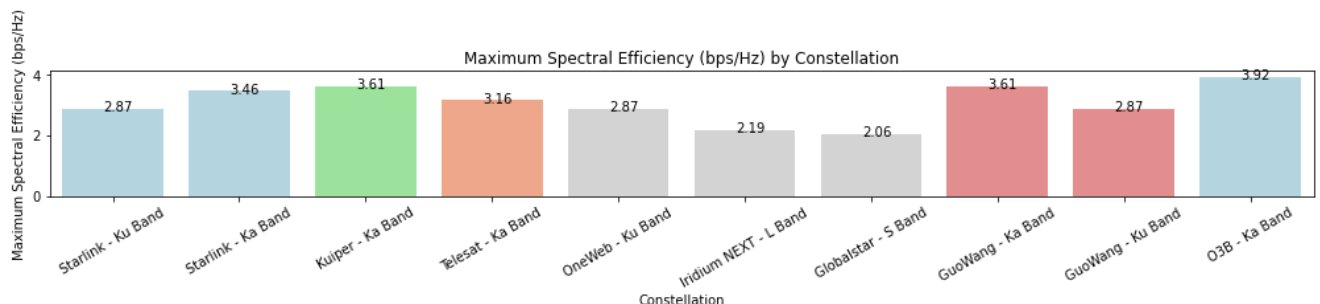
Σχήμα 35. Απεικόνιση Ελάχιστου Αριθμού δορυφόρων ανά Αστερισμό



Στο προηγούμενο διάγραμμα φαίνονται οι αριθμοί των ελάχιστων απαιτούμενων δορυφόρων των εκάστοτε εταιρειών για κάλυψη θεωρητικώς ολόκληρης της επιφάνειας της Γης. Όπως είναι φυσιολογικό οι εταιρείες Starlink και Kuiper παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα, μεγαλύτερα από των υπολοίπων εταιρειών λόγω μικρότερων περιοχών κάλυψης ανά δορυφόρο όπως παρουσιάστηκε νωρίτερα. Επιπλέον βλέπουμε ότι ο O3B χρειάζεται συντριπτικά μικρότερο αριθμό για τον ίδιο λόγο.

Ωστόσο αξίζει να σημειωθεί ότι οι περισσότερες εταιρείες, στο πλαίσιο εφαρμογής της πολιτικής ποικιλότητας δορυφόρων και τροχιών (satellite and orbital diversity), επιδιώκουν την κάλυψη μιας περιοχής της επιφάνειας της Γης από παραπάνω από έναν δορυφόρους, οι οποίοι μπορεί να ανήκουν είτε στο ίδιο, είτε σε διαφορετικά τροχιακά επίπεδα, με σκοπό την επίτευξη αδιάπτωτης και συνεχούς κάλυψης. Εξαιτίας λοιπόν αυτού του γεγονότος και επειδή στην πραγματικότητα ο αριθμός απαιτούμενων δορυφόρων για επίτευξη κάλυψης στην περιοχή ενδιαφέροντος είναι μικρότερος από αυτόν που παρουσιάζεται παραπάνω (λόγω του ότι κάθε εταιρεία αποσκοπεί σε ένα συγκεκριμένο ποσοστό κάλυψης και όχι πάντα ολόκληρης της επιφάνειας της Γης, πχ. περιοχές με μεγάλη πληθυσμιακή πυκνότητα), αν συγκρίνει κανείς αυτά τα δεδομένα με τον αριθμό των δορυφόρων που είναι ήδη σε λειτουργία, καταλαβαίνει ότι ο τελευταίος είναι κατά πολύ μεγαλύτερος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σε κάποιες περιπτώσεις ένας επίγειος χρήστης να είναι εντός της περιοχής κάλυψης παραπάνω από ενός δορυφόρου, με τον αριθμό αυτό να φτάνει τους 4 δορυφόρους ή και ακόμα παραπάνω. Έτσι, οποιαδήποτε στιγμή ο σηματοθορυβικός λόγος πέσει κάτω από έναν κατώφλιο, το εκάστοτε πρωτόκολλο-αλγόριθμος δρομολόγησης επιλέγει διαφορετικό δορυφόρο για πραγματοποίηση ζεύξης με τον επίγειο χρήστη εντός του επιπέδου-ορίζοντα παρατήρησης αυτού και με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η διακοπή ζεύξης και παροχής δεδομένων λόγω δυσμενών συνθηκών στον δίαυλο.

## 8.2.6 Αποτελέσματα Φασματικής Απόδοσης



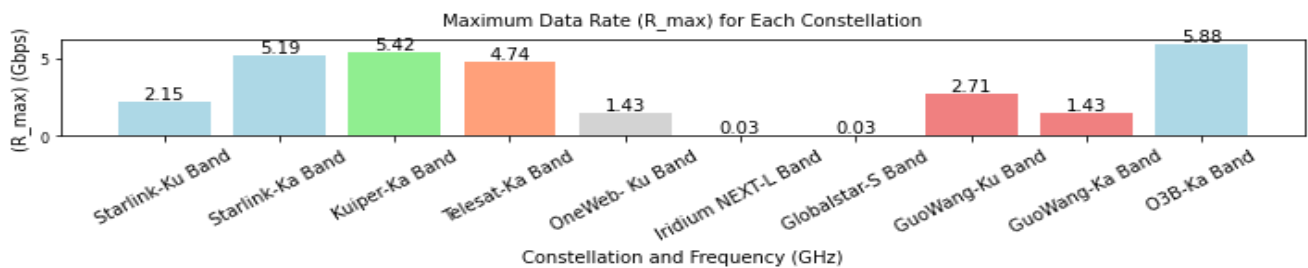
Σχήμα 36. Απεικόνιση Φασματικών Αποδόσεων ανά Αστερισμό

Από το παραπάνω προκύπτει ότι ο αστερισμός O3B έχει τη μεγαλύτερη απόδοση φάσματος σε περιπτώσεις όπου ο σηματοθορυβικός λόγος είναι ίσος με τον σηματοθορυβικό λόγο κατωφλίου για

όλες τις περιπτώσεις που εξετάζουμε. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην υψηλότερη τιμή SNR threshold που έχει εκτιμηθεί για τον συγκεκριμένο αστερισμό, όπως και για τους υπολοίπους.

Σημαντική παρατήρηση σε αυτό το σημείο είναι ότι το υψηλό SNR threshold (εάν θεωρήσουμε ίδια υπηρεσία παροχής και επιθυμητό QoS) αποτελεί επιβαρυντικό παράγοντα για το εκάστοτε σύστημα και υποδηλώνει ότι δεν μπορεί να λειτουργήσει υπό δυσμενείς συνθήκες, όπως άλλα συστήματα με χαμηλότερα επίπεδα σηματοθορυβικού λόγου κατωφλίου.

## 8.2.7 Αποτελέσματα Υπολογισμού Μέγιστων Ρυθμών Μετάδοσης



Σχήμα 37. Απεικόνιση Μέγιστων Ρυθμών Μετάδοσης Αστερισμών

Από τα αποτελέσματα των υπολογισμών που απεικονίζονται στο παραπάνω ραβδόγραμμα είναι φανερό ότι και πάλι ο O3B επιτυγχάνει μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, όπως ήταν αναμενόμενο βάσει των αποτελεσμάτων του προηγούμενου βήματος. Μάλιστα, για τον ίδιο λόγο αλλά και επειδή το χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης ανά ζεύξη είναι αρκετά μικρότερο εν συγκρίσει με τα υπόλοιπα, βλέπουμε ότι οι Iridium Next και Globalstar παρουσιάζουν με διαφορά τις μικρότερες τιμές Rmax.

## 8.2.8 Αποτελέσματα Υπολογισμών Βέλτιστων Σχημάτων Διαμόρφωσης

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα του παρακάτω πίνακα, διακρίνουμε ότι **όταν τα συστήματα λειτουργούν υπό Σηματοθορυβικό Λόγο = SNR threshold του εκάστοτε συστήματος**, τα πιο εύρωστα σχήματα διαμόρφωσης που μπορούν να επιλεγθούν για τους αστερισμούς είναι τα ανωτέρω. Σε αυτό το σημείο ωστόσο τονίζεται πάλι ότι αυτό είναι προϊόν το οποίο προκύπτει από τις αρχικά προσωπικές εκτιμήσεις των τιμών SNR threshold των εκάστοτε αστερισμών.

| Αστερισμός | Μπάντα Συχνοτήτων | Βέλτιστο Σχήμα Διαμόρφωσης | Φασματική Απόδοση (bps/Hz) |
|------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|
| Starlink   | Ku                | 16QAM 1/2                  | 2,4                        |
| Starlink   | Ka                | 16QAM 1/2                  | 2,4                        |
| Kuiper     | Ka                | 16QAM 3/4                  | 3,6                        |

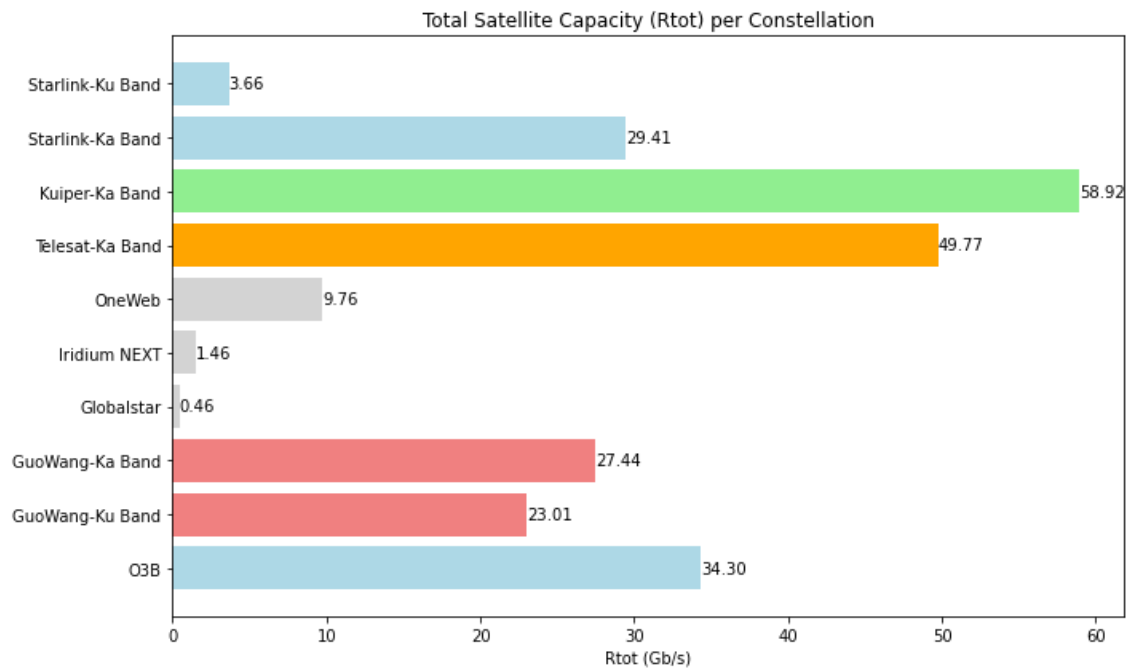
|              |    |           |     |
|--------------|----|-----------|-----|
| Telesat      | Ka | 16QAM 1/2 | 2,4 |
| OneWeb       | Ku | 16QAM 1/2 | 2,4 |
| Iridium NEXT | L  | 8PSK 3/4  | 2,1 |
| Globalstar   | S  | 8PSK 2/3  | 1,8 |
| GuoWang      | Ka | 16QAM 3/4 | 3,6 |
| GuoWang      | Ku | 16QAM 1/2 | 2,4 |
| O3B-Ka B     | Ka | 16QAM 3/4 | 3,6 |

**Πίνακας 16. Αποτελέσματα Σχημάτων Διαμόρφωσης Αστερισμών**

Επιπρόσθετα αναφέρεται ότι πρακτικά, εάν ο σηματοθορυβικός λόγος ενός συστήματος πέσει κάτω από ένα συγκεκριμένο επίπεδο, κάποια εκ των εξεταζόμενων συστημάτων με υψηλότερες τιμές SNR θα οδηγηθούν σε διακοπή ζεύξης, ενώ τα υπόλοιπα θα μπορέσουν να ανταποκριθούν επιλέγοντας το σχήμα διαμόρφωσης που προβάλλεται παραπάνω αλλά με μικρότερη φασματική απόδοση, πχ. για  $SNR = SNR_{\text{threshold O3B}}$ , εταιρείες με χαμηλότερο  $SNR_{\text{threshold}}$ , όπως η Starlink και η Globalstar θα μπορούν να επιλέξουν ένα πιο εύρωστο σχήμα διαμόρφωσης, εν προκειμένω το σχήμα 16QAM 3 / 4. Αντίθετα αν  $SNR = SNR_{\text{threshold GlobalStar}}$ , όλες οι υπόλοιπες εταιρείες θα οδηγηθούν σε διακοπή ζεύξης ενώ η Globalstar θα συνεχίσει να εκπέμπει κάνοντας χρήση του 8PSK 2/3 με φασματική απόδοση 1,8 bps/Hz.

#### 8.2.9 Αποτελέσματα Μέγιστων Συνολικών Ρυθμών Μετάδοσης

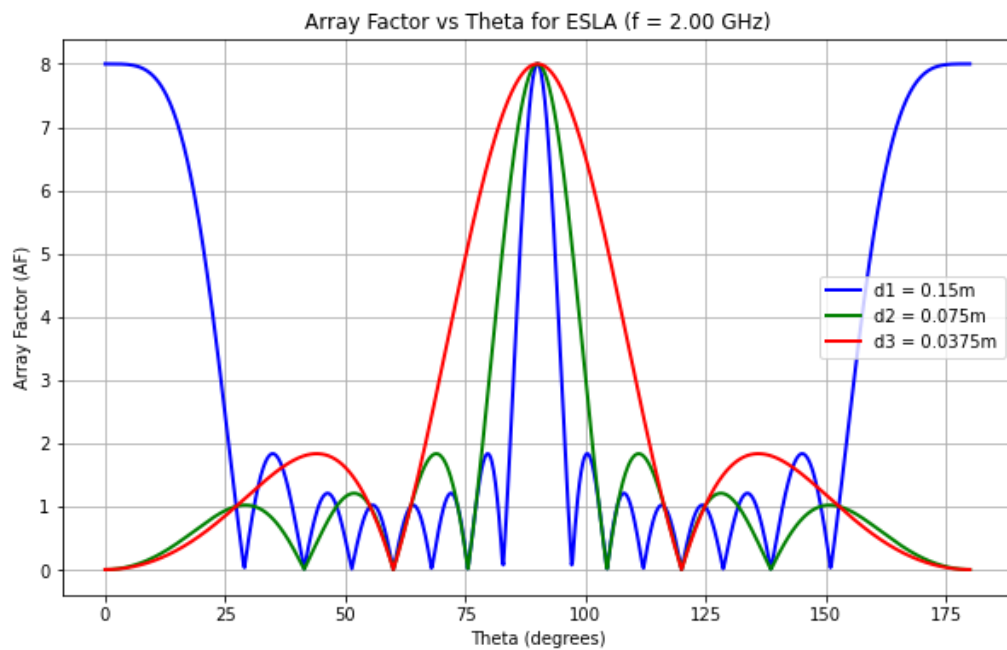
Όπως καθίσταται φανερό από το ραβδόγραμμα που ακολουθεί, οι μεγαλύτεροι ρυθμοί μετάδοσης που υπολογίσθηκαν παρατηρούνται για αστερισμούς που κάνουν χρήση της Ka μπάντας συχνοτήτων, γεγονός το οποίο ήταν αναμενόμενο. Επιπλέον βλέπουμε ότι η Kuiper επιτυγχάνει τη μέγιστη ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων, με την Telesat να βρίσκεται στη 2<sup>η</sup> θέση και τις υπόλοιπες εταιρείες να ακολουθούν.



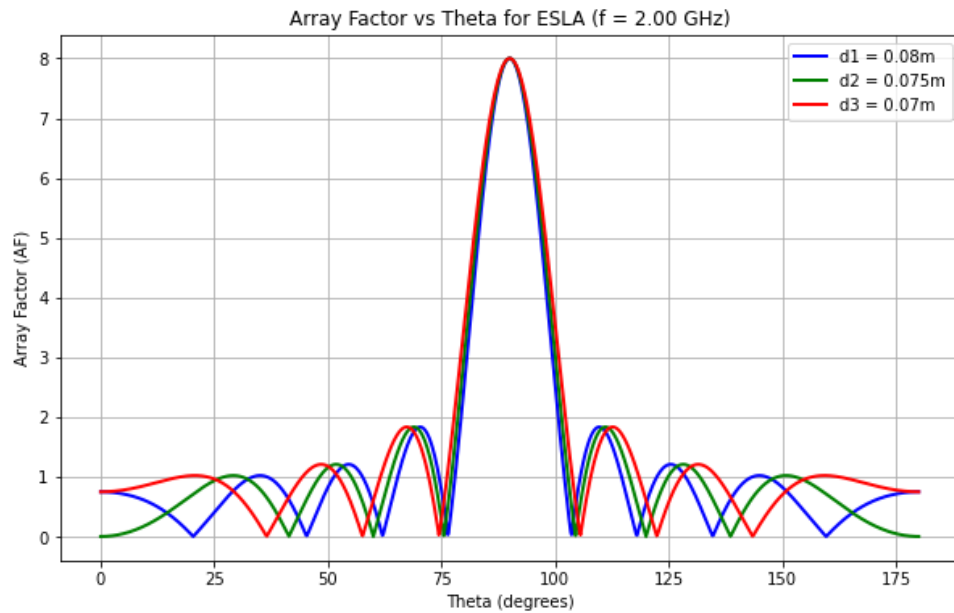
Σχήμα 38. Αποτελέσματα Συνολικού Αριθμού Μετάδοσης Αστερισμών

#### 8.2.10 Αποτελέσματα Διαγραμμάτων ακτινοβολίας Κεραιών Φασικής Διάταξης

Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζεται η μεταβολή του διαγράμματος ακτινοβολίας μιας κεραίας φασικής διάταξης για δεδομένη συχνότητα λειτουργίας και αριθμό στοιχείων.

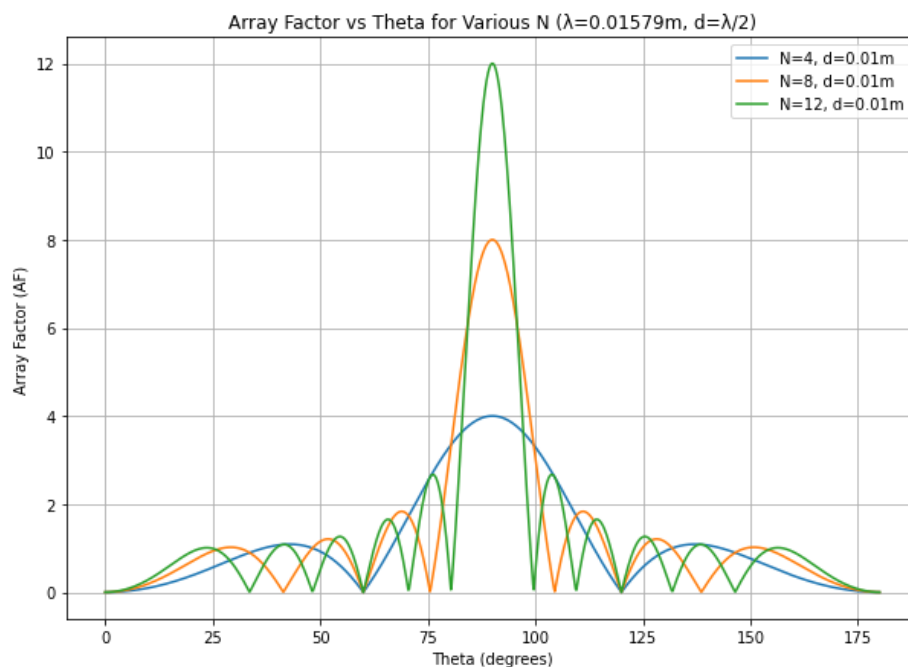


Σχήμα 39. 1ο Διάγραμμα Ακτινοβολίας Κεραίας για διαφορετικά  $d$



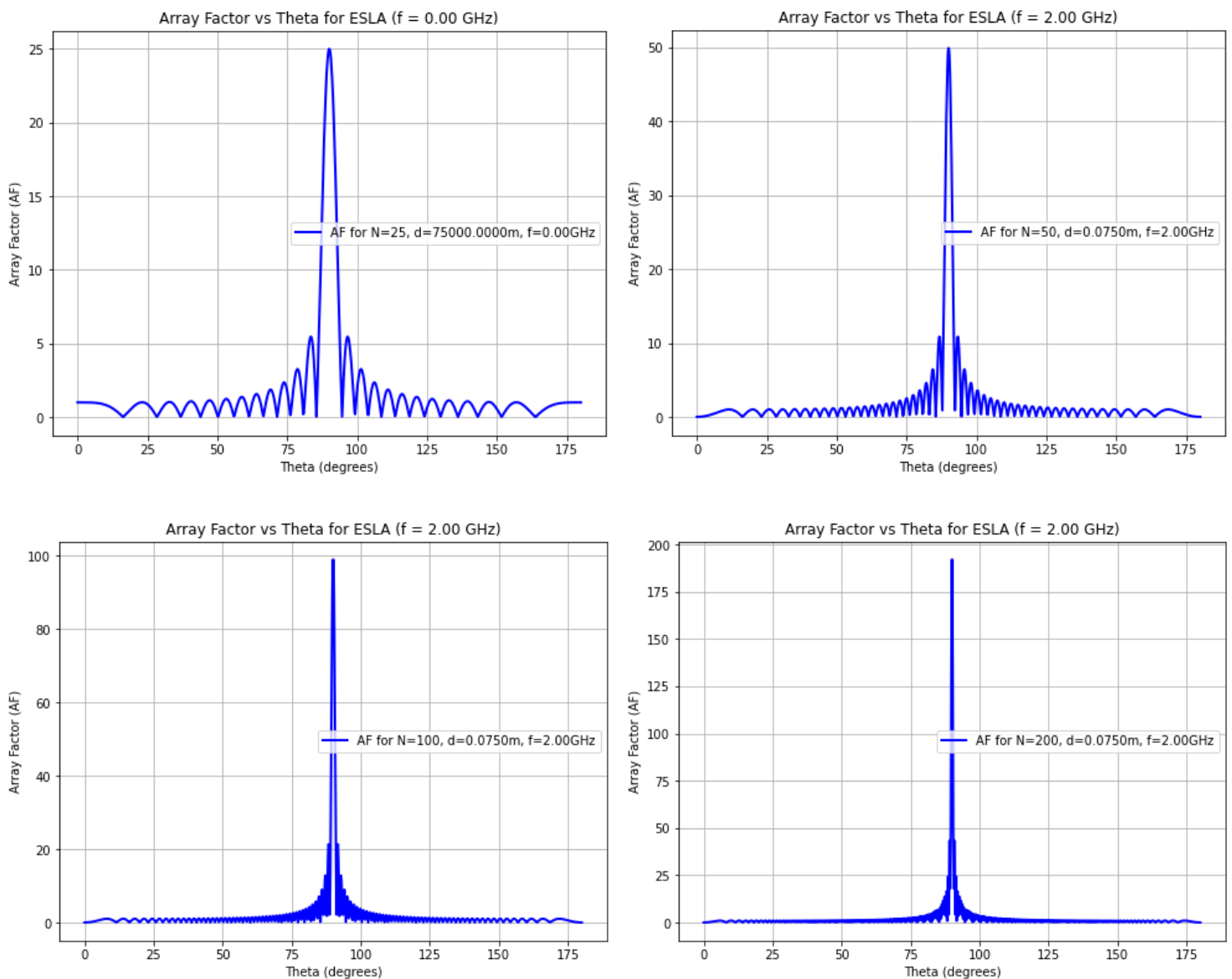
Σχήμα 40. 2ο Διάγραμμα Ακτινοβολίας Κεραίας για διαφορετικά  $d$

Παρατηρούμε ότι το διάγραμμα αλλάζει δραστικά ακόμα και για μικρές διαφορές στην επιλεγμένη απόσταση  $d$  μεταξύ των στοιχείων αυτού, παρουσιάζοντας την επιθυμητή συμπεριφορά όσο η απόσταση  $d$  πλησιάζει το μισό του μήκους κύματος της χρησιμοποιούμενης συχνότητας ( $d = \lambda/2 =$  βέλτιστη απόσταση). Σε διαφορετική περίπτωση βλέπουμε εξάπλωση των πλευρικών λοβών ή και εξ ολοκλήρου μετατόπιση αυτών καθιστώντας τη χρήση της κεραίας απαγορευτική. Η ίδια μεταβολή παρουσιάζεται και για αλλαγή της φέρουσας συχνότητας για δεδομένο αριθμό στοιχείων και απόσταση  $d$  μεταξύ αυτών.

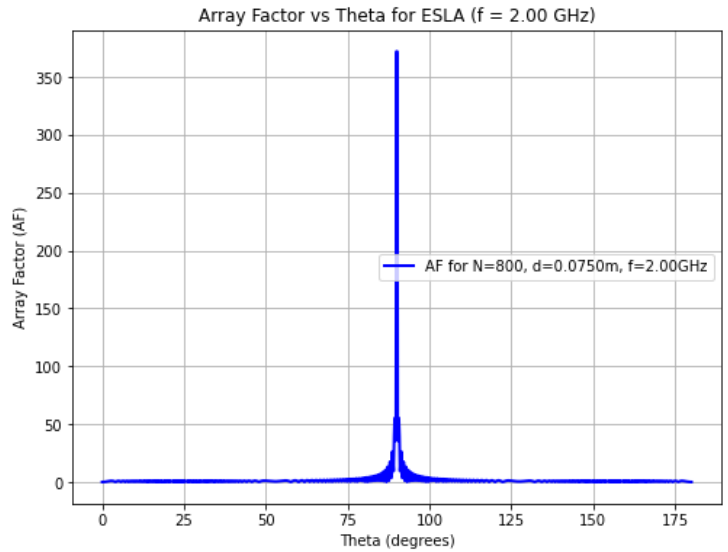
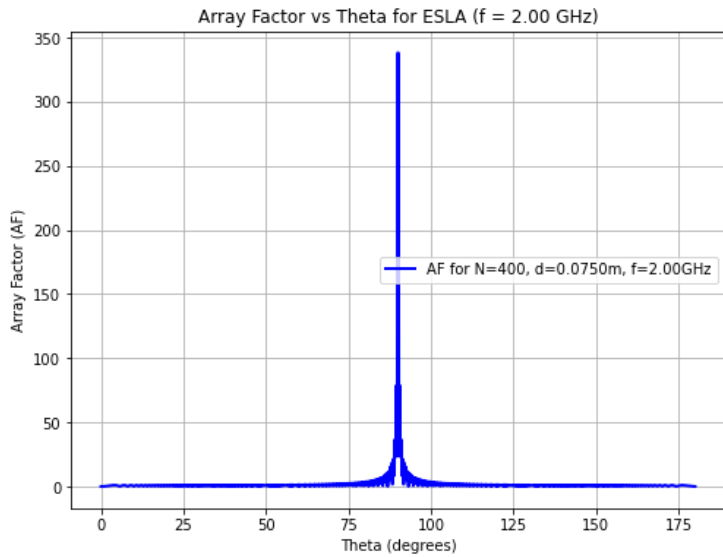


Σχήμα 41. Διάγραμμα Ακτινοβολίας Κεραίας για διαφορετικά  $N$

Στο προηγούμενο διάγραμμα βλέπουμε τη μεταβολή του διαγράμματος ακτινοβολίας μιας κεραίας φασικής διάταξης όταν αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων αυτής, για δεδομένη συχνότητα λειτουργίας και για βέλτιστη απόσταση μεταξύ των στοιχείων ίση με  $\lambda/2$ . Καθίσταται ξεκάθαρο ότι αύξηση του αριθμού των στοιχείων μιας κεραίας οδηγεί σε διαγράμματα με υψηλότερο και στενότερο κεντρικό λοβό και χαμηλότερους πλευρικούς, κάνοντας με αυτόν τον τρόπο μια κεραία πιο κατευθυντική, χαρακτηριστικό το οποίο είναι απαραίτητο στις δορυφορικές επικοινωνίες ,λόγω των τεραστίων αποστάσεων διάδοσης , με σκοπό τη μείωση των απωλειών. Μάλιστα στην πράξη ο αριθμός των στοιχείων μιας κεραίας φασικής διάταξης δορυφορικών επικοινωνιών ποικίλει από μερικές εκατοντάδες έως 2000. χαρακτηριστικά παραδείγματα διαγραμμάτων ακτινοβολίας με περισσότερα στοιχεία έχουν όπως παρακάτω:



Σχήμα 42. Διαγράμματα Ακτινοβολίας Κεραίας για  $N=25,50,100,200$



Σχήμα 43. Διάγραμματα Ακτινοβολίας Κεραίας για  $N=400,800$  σελ 95

Από τα παραπάνω καθίσταται φανερό πόσο κατευθυντική μπορεί να γίνει μια κεραία και να επηρεάσει το SNR στο δέκτη, αυξάνοντας τη λαμβανόμενη ισχύ σήματος λήψης μέσω του EIRP ( $= P_t \cdot G_t$ ) αλλά και του κέρδους κεραίας του δέκτη.

### 8.3 Γενικό Συμπέρασμα

Στην σημερινή εποχή, οι συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών υπηρεσιών επικοινωνίας για συνεχή και αδιάλειπτη κάλυψη, ανεξαρτήτως γεωγραφικής θέσης, η χρήση εφαρμογών και υπηρεσιών με υψηλές απαιτήσεις από τους τελικούς χρήστες, όσον αφορά τον όγκο των προς μετάδοση δεδομένων και τις καθυστερήσεις, καθώς και τα σύγχρονα τεχνολογικά επιτεύγματα, έχουν οδηγήσει στη ραγδαία εξάπλωση των NTNs και κατά συνέπεια στην μαζική ανάπτυξη δορυφορικών αστερισμών για την παροχή υπηρεσιών επικοινωνίας. Σε αυτό το πλαίσιο, η υιοθέτηση δορυφόρων χαμηλής τροχιάς σε μη επίγεια δίκτυα είναι μείζονος σημασίας, καθώς διαθέτουν μεγάλο αριθμό πλεονεκτημάτων έναντι των υπολοίπων κατηγοριών, γεγονός που τους καθιστά την βέλτιστη επιλογή για πληθώρα σύγχρονων εφαρμογών.

Έτσι λοιπόν, στο τελευταίο κεφάλαιο της παρούσης εργασίας δόθηκαν παραδείγματα υπολογισμών διαφόρων παραμέτρων σχεδίασης συστημάτων δορυφορικών επικοινωνιών, εστιάζοντας σε σύγχρονους LEO αστερισμούς. Από τα αποτελέσματα που παρήχθησαν, εκτός των επί μέρους συμπερασμάτων και παρατηρήσεων, συνάγεται το γενικότερο συμπέρασμα ότι η ανάπτυξη μη επίγειων δικτύων απαιτεί την προσεκτική σχεδίαση και υπολογισμό πλήθους παραμέτρων, οι οποίες είναι αλληλένδετες, καθώς και τη μελέτη της συσχέτισης που παρουσιάζουν μεταξύ τους πχ. ο καθορισμός των παραμέτρων τροχιάς ενός δορυφόρου επηρεάζει επίσης το κόστος τοποθέτησης και διατήρησης αυτού σε τροχιά, τις δυνατότητες κάλυψης που αυτός θα προσφέρει, τον προϋπολογισμό ζεύξης και κατά συνέπεια την δυνατότητα ή μη, υποστήριξης συγκεκριμένων υπηρεσιών, καθώς επίσης και την τελική ποιότητα αυτών (QoS). Συνεπώς, οι περαιτέρω έρευνες και μελέτες σε διάφορους επιστημονικούς τομείς που επηρεάζουν τις δορυφορικές επικοινωνίες, είναι ζωτικής σημασίας για την

ανάπτυξη και εξέλιξη αυτών, εντός του σύγχρονου και συνεχώς μεταβαλλόμενου περιβάλλοντος τηλεπικοινωνιών. Αντικείμενα όπως η μοντελοποίηση των καναλιών των κινητών δορυφορικών επικοινωνιών και κατά συνέπεια η μελέτη του προκύπτοντος προϋπολογισμού ζεύξης ή σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης τα οποία εξετάστηκαν μερικώς στην παρούσα εργασία, καθώς επίσης η ανάπτυξη τεχνικών για μείωση παρεμβολών, αλγόριθμοι επιλογής κόμβων δικτύου και πρωτόκολλα δρομολόγησης, διαδικασίες μεταγωγών, σχεδιασμός κεραιών, η επεξεργασία δεδομένων δικτύου και η διαχείριση αυτού με ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης κ.α. αποτελούν σημαντικά αντικείμενα σύγχρονων ερευνών και τη βάση για σταδιακή μετάβαση στο 6G περιβάλλον επικοινωνιών.



## **Βιβλιογραφία**

- [1] 3GPP, "Study on new radio to support non-terrestrial networks," 3GPP Rep. TR 38.811, Sophia Antipolis, France, 2018. [Online]. Available at: [http://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/38\\_series/38.811/38811-f00.zip](http://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/38_series/38.811/38811-f00.zip)
- [2] M. M. Azari, S. Solanki, S. Chatzinotas, O. Kodheli, H. Sallouha, A. Colpaert, J. F. Mendoza Montoya, S. Pollin, A. Haqiqatnejad, A. Mostaani, E. Lagunas, and B. Ottersten, "Evolution of Non-Terrestrial Networks From 5G to 6G: A Survey," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 24, no. 4, pp. 2633-2648, Fourth Quarter 2022. [Online]. Available at: <https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3199901>
- [3] O. Kodheli et al., "Satellite communications in the new space era: A survey and future challenges," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 23, no. 1, pp. 70-109, 1st Quart., 2021.
- [4] M. M. Azari, F. Rosas, and S. Pollin, "Cellular connectivity for UAVs: Network modeling, performance analysis, and design guidelines," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 18, no. 7, pp. 3366-3381, Jul. 2019.
- [5] P.-D. Arapoglou, S. Cioni, E. Re, and A. Ginesi, "Direct access to 5G new radio user equipment from NGSO satellites in millimeter waves," in Proceedings of the 10th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 16th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC), 2020, pp. 1-8.
- [6] "Solutions for NR to support non-terrestrial networks," 3GPP, Sophia Antipolis, France, 3GPP Rep. TR 38.821, 2019. [Online]. Available at: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3525>
- [7] "Satellite communications and space weather," Bureau of Meteorology, Australian Government, 2022. [Online]. Available at: <https://www.sws.bom.gov.au/Educational/1/3/2>
- [8] X. Lin et al., "5G new radio evolution meets satellite communications: Opportunities, challenges, and solutions," arXiv, 2019, arXiv:1903.11219.
- [9] "Base Station (BS) Radio Transmission and Reception," 3GPP Standard TS 38.104, 2019. [Online]. Available at : <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3202>
- [10] J. A. Hernández and P. Reviriego, A Brief Introduction to Satellite Communications for Non-Terrestrial Networks (NTN). Universidad Carlos III de Madrid & Universidad Politécnica de Madrid, 2023.
- [11] M. Shafi et al., "Microwave vs. millimeter-wave propagation channels: Key differences and impact on 5G cellular systems," IEEE Communications Magazine, vol. 56, no. 12, pp. 14-20, Dec. 2018.

- [12] F. Babich, M. Comisso, A. Cuttin, M. Marchese, and F. Patrone, "Nanosatellite-5G integration in the millimeter wave domain: A full top-down approach," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 19, no. 2, pp. 390-404, Feb. 2020.
- [13] M. Giordani and M. Zorzi, "Non-terrestrial networks in the 6G era: Challenges and opportunities," *IEEE Network*, vol. 35, no. 2, pp. 244-251, Mar./Apr. 2021.
- [14] Y. Kawamoto, T. Kamei, M. Takahashi, N. Kato, A. Miura, and M. Toyoshima, "Flexible resource allocation with inter-beam interference in satellite communication systems with a digital channelizer," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 5, pp. 2934-2945, May 2020.
- [15] S. Xia, Q. Jiang, C. Zou, and G. Li, "Beam Coverage Comparison of LEO Satellite Systems Based on User Diversification," *IEEE Access*
- [16] L. J. Ippolito Jr., *Satellite Communications Systems Engineering: Atmospheric Effects, Satellite Link Design and System Performance*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2008.
- [17] S. Cakaj, "The parameters comparison of the 'Starlink' LEO satellites constellation for different orbital shells," *Frontiers in Communications and Networks*, vol. 2, Article 643095, May 2021. [Online]. Available at: <https://doi.org/10.3389/frcmn.2021.643095>
- [18] A. Botta and A. Pescapé, "New generation satellite broadband Internet service: Should ADSL and 3G worry," in *TMA 2013, co-located with IEEE INFOCOM 2013*, Turin, Italy, Apr. 2013.
- [19] S. Cakaj, B. Kamo, A. Lala, and A. Rakipi, "The coverage analysis for low Earth orbiting satellites at low elevation," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 5, no. 6, pp. 6-10, 2014. [Online]. Available at: <http://www.ijacsa.thesai.org>
- [20] E. O. Ogungbemi, U. Ukomi, and R. A. Udoh, "Comparative coverage and horizon plane analysis for LEO, MEO, GEO, and HEO satellites," *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Research*, vol. 1, no. 2, pp. 54-66, Aug. 2022. [Online]. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/366204569>
- [21] A. R. Washburn, "Earth coverage by satellites in circular orbit," *Department of Operations Research, Naval Postgraduate School*, 2004.
- [22] T. Lang, "Low Earth orbit satellite constellations for continuous coverage of the mid-latitudes," in *Astrodynamics Conference*, 2013, p. 3638.
- [23] I. Del Portillo, B. G. Cameron, and E. F. Crawley, "A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband," *Acta Astronautica*, vol. 159, pp. 123-135, 2019.

- [24] C. Dai, G. Zheng, and Q. Chen, "Satellite constellation design with multi-objective genetic algorithm for regional terrestrial satellite network," *China Communications*, vol. 15, no. 8, pp. 1-10, 2018.
- [25] J. van den IJssel, J. Encarnação, E. Doornbos, and P. Visser, "Precise science orbits for the Swarm satellite constellation," *Advances in Space Research*, vol. 56, no. 6, pp. 1042-1055, 2015.
- [26] H. W. Lee, P. C. Jakob, K. Ho, S. Shimizu, and S. Yoshikawa, "Optimization of satellite constellation deployment strategy considering uncertain areas of interest" 2018.
- [27] M. Antoniou, A. G. Stove, A. Sayin, G. Atkinson, M. Cherniakov, H. Ma, and G. Fasano, "Passive SAR satellite constellation for near-persistent earth observation: Prospects and issues," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 33, no. 12, pp. 4-15, 2018.
- [28] Y. Seyedi and S. M. Safavi, "On the Analysis of Random Coverage Time in Mobile LEO Satellite Communications," *IEEE Communications Letters*, vol. 16, no. 5, pp. 740-743, May 2012.
- [29] Daehnick, C., Klinghoffer, I., Maritz, B., & Wiseman, B. (2020). Large LEO satellite constellations: Will it be different this time. McKinsey and Company, 4.
- [30] Zong, P., & Kohani, S. (2019). Optimal satellite LEO constellation design based on global coverage in one revisit time. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2019.
- [31] T. J. Logue and J. Pelton, "Overview of commercial small satellite systems in the 'New Space' age," in *Handbook of Small Satellites: Technology, Design, Manufacture, Applications, Economics and Regulation*, 2019, pp. 1-18.
- [32] R. Wang, M. A. Kishk, and M. S. Alouini, "Ultra-dense LEO satellite-based communication systems: A novel modeling technique," *IEEE Communications Magazine*, vol. 60, no. 4, pp. 25-31, Apr. 2022.
- [33] Π. Γ. Κωττής & Χ. Ν. Καψάλης, *Δορυφορικές Επικοινωνίες, Εκδόσεις TZIOΛΑ*, 2019
- [34] A. G. Kanatas, *Radio Wave Propagation and Channel Modeling for Earth-Space Systems*, CRC Press, 2016.
- [35] Π. Γ. Κωττής, *Εισαγωγή στις τηλεπικοινωνίες, Διαμόρφωση & Μετάδοση Σημάτων, Εκδόσεις TZIOΛΑ*, 2019
- [36] Propagation data required for the design of Earth-space land mobile telecommunication systems," *ITU-R Recommendation P.681-11*, International Telecommunication Union, 2015.
- [37] Space Voyaging, 2023. *Guowang: China's Massive Satellite Constellation is Launching Soon*. Available at: <https://www.spacevoyaging.com/news/2023/04/02/guowang-the-chinas-massive-satellite-constellation-is-launching-soon/> [October 2024]

- [38] Karp, A., 2024. *The Coming Chinese Megaconstellation Revolution*. SpaceNews. Available at: <https://spacenews.com/the-coming-chinese-megaconstellation-revolution/> [October 2024].
- [39] Amazon, 2024. *Project Kuiper*. Available at: <https://www.aboutamazon.com/what-we-do/devices-services/project-kuiper> [October 2024]
- [40] Telesat, 2024. *Inflight Connectivity*. Available at: <https://www.telesat.com/inflight-connectivity/> [October 2024]
- [41] Iridium, 2024. *Iridium*. Available at: <https://www.iridium.com/> [October 2024].
- [42] Globalstar, 2024. *Globalstar*. Available at: <https://www.globalstar.com/en-us> [October 2024].
- [43] European Space Agency (ESA), 2024. *Satellite Frequency Bands*. Available at: [https://www.esa.int/Applications/Connectivity\\_and\\_Secure\\_Communications/Satellite\\_frequency\\_bands](https://www.esa.int/Applications/Connectivity_and_Secure_Communications/Satellite_frequency_bands) [October 2024]
- [44] OneWeb, 2024. *OneWeb*. Available at: <https://oneweb.net/> [October 2024]
- [45] Starlink, 2024. *Starlink*. Available at: <https://www.starlink.com/> [October 2024]
- [46] Pachler, N., del Portillo, I., Crawley, E.F., and Cameron, B.G., 2021. An Updated Comparison of Four Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband. *Proceedings of the International Astronautical Congress (IAC)*, 25-29 October, Dubai, UAE.
- [47] Panagopoulos, A.D. and Kanellopoulos, J.D., 2003. A Simple Model for Orbital Diversity Gain on Earth-Space Propagation Paths. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 51(6), pp.1403-1405. Available at: <https://doi.org/10.1109/TAP.2003.812264>
- [48] Kanellopoulos, S.A., Panagopoulos, A.D., and Kanellopoulos, J.D., 2007. Calculation of the Dynamic Input Parameter for a Stochastic Model Simulating Rain Attenuation: A Novel Mathematical Approach. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 55(11), pp.3257-3264. Available at: <https://doi.org/10.1109/TAP.2007.908817>
- [49] Guidotti, A., Vanelli-Coralli, A., Schena, V., Chuberre, N., El Jaafari, M., Puttonen, J., and Cioni, S., 2022. The Path to 5G-Advanced and 6G Non-Terrestrial Network Systems. *IEEE Communications Magazine*. Available at: <https://arxiv.org/abs/2209.11535>
- [50] Pratt, T. and Allnutt, J.E., 2020. *Satellite Communications*. Wiley-Blackwell
- [51] Gazelle, D., 2018. LEO Constellation for Broadband Applications: System Design Considerations. *Proceedings of the 24th Ka and Broadband Communications Conference*, 17-19 October, Sorrento, Italy

- [52] International Telecommunication Union (ITU), 2019. Recommendation ITU-R P.681-11: Propagation Data Required for the Design Systems in the Land Mobile-Satellite Service. *ITU Radiocommunication Sector*, August 2019. Available at: <https://www.itu.int/publ/R-REC-P.681/en>
- [53] International Telecommunication Union (ITU), 2023. Recommendation ITU-R P.618-14: Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Earth-Space Telecommunication Systems. *ITU Radiocommunication Sector*, August 2023. Available at: <https://www.itu.int/publ/R-REC-P.618/en>
- [54] International Telecommunication Union (ITU), 2001. Satellite System Characteristics to Be Considered in Frequency Sharing Analyses Between Geostationary-Satellite Orbit (GSO) and Non-GSO Satellite Systems in the Fixed-Satellite Service. *ITU Radiocommunication Sector*, February 2001. Available at: <https://www.itu.int/publ/R-REC-S.1328/en>
- [56] Papafragkakis, A.Z., 2021. *Design and Implementation of Receivers and Measurement Equipment for Next-Generation Satellite Networks*. Doctoral Thesis, National Technical University of Athens.
- [57] Arapoglou, P.-D., Liolis, K.P., and Panagopoulos, A.D., 2012. Railway Satellite Channel at Ku Band and Above: Composite Dynamic Modeling for the Design of Fade Mitigation Techniques. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 30(1), pp.1-17. Available at: <https://doi.org/10.1002/sat.991>
- [58] Kourogiorgas, C.I. and Panagopoulos, A.D., 2017. Space-Time Stochastic Rain Fading Channel for Multiple LEO or MEO Satellite Slant Paths. *IEEE Wireless Communications Letters*. Available at: <https://doi.org/10.1109/LWC.2017.2772248>
- [59] Osoro, O.B. and Oughton, E.J., 2021. A Techno-Economic Framework for Satellite Networks Applied to Low Earth Orbit Constellations: Assessing Starlink, OneWeb and Kuiper. *IEEE Access*. Available at: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3119634>
- [60] Höyhty, M., Boumard, S., Yastrebova, A., Järvensivu, P., Kiviranta, M., and Anttonen, A., 2022. Sustainable Satellite Communications in the 6G Era: A European View for Multi-Layer Systems and Space Safety. *IEEE Access*. Available at: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3206862>
- [61] Panagopoulos, A. D., Arapoglou, P.-D. M., & Cottis, P. G. (2004). "Satellite Communications at Ku, Ka, and V Bands: Propagation Impairments and Mitigation Techniques." *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Third Quarter