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

# Μελέτη της Δυνατότητας Λειτουργίας των Στρατοσφαιρικών Τηλεπικοινωνιακών Δικτύων στη ζώνη 3-18 GHz

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Κ. ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ**
**ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ Π. ΞΕΠΑΠΑΔΑΚΗΣ**

**Επιβλέπων:** Φίλιππος Κωνσταντίνου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2007

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

# Μελέτη της Δυνατότητας Λειτουργίας των Στρατοσφαιρικών Τηλεπικοινωνιακών Δικτύων στη ζώνη 3-18 GHz

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Κ. ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ**
**ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ Π. ΞΕΠΑΠΑΔΑΚΗΣ**

**Επιβλέπων:** Φίλιππος Κωνσταντίνου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την …..

| | | |
|---|---|---|
| ..... | ..... | ..... |
| Φίλιππος Κωνσταντίνου | Χρήστος Καψάλης | Νικόλαος Ουζούνογλου |
| Καθηγητής Ε.Μ.Π. | Καθηγητής Ε.Μ.Π. | Καθηγητής Ε.Μ.Π. |

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2007

.....
**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Κ. ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ**

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

.....
**ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ Π. ΞΕΠΑΠΑΔΑΚΗΣ**

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Κωνσταντίνος Κ. Εμμανουήλ, 2007
Copyright © Στυλιανός Π. Ξεπαπαδάκης, 2007
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 προς τον συγγραφέα.

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 Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

*Αφιερώνεται στους γονείς μου*
*Κλεόβουλο και Βασιλική*

*Κωνσταντίνος Εμμανουήλ*

*Αφιερώνεται στους γονείς μου*
*Πέτρο και Αθηνά*

*Στυλιανός Ξεπαπαδάκης*

# Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζονται κυρίως δύο κρίσιμα θέματα που αφορούν στη λειτουργία των στρατοσφαιρικών δικτύων στην ζώνη συχνοτήτων 3-18 GHz. Το πρώτο σχετίζεται με το ήδη περιορισμένο ραδιοφάσμα και την ανάγκη για εύρεση ζωνών συχνοτήτων, τόσο για την άνω όσο και για την κάτω ζεύξη, οι οποίες να μην έχουν ήδη ανατεθεί σε άλλες ευαίσθητες υπηρεσίες. Το δεύτερο αφορά στην εύρεση των κατάλληλων κριτηρίων συνύπαρξης και των αποστάσεων διαχωρισμού των στρατοσφαιρικών δικτύων με το ήδη υπάρχον επίγειο δίκτυο.

Η παρούσα διπλωματική εργασία δομείται σε 4 κεφάλαια. Στη συνέχεια παρουσιάζεται συνοπτικά το περιεχόμενο κάθε κεφαλαίου.

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται αρχικά μία παρουσίαση των στρατοσφαιρικών πλατφορμών. Περιγράφονται οι διάφοροι τύποι στρατοσφαιρικών πλατφορμών που υπάρχουν και οι τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές στις οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Γίνεται επίσης μία παρουσίαση των διάφορων μετρήσεων που έχουν γίνει με χρήση στρατοσφαιρικών πλατφορμών. Αναφέρονται ακόμη τα πλεονεκτήματα των επικοινωνιών μέσω στρατοσφαιρικών πλατφορμών εν συγκρίσει με τα επίγεια και τα δορυφορικά δίκτυα. Τέλος, παρουσιάζονται διάφορες προκλήσεις και ζητήματα που θα πρέπει να αντιμετωπιστούν προκειμένου να χρησιμοποιηθούν οι στρατοσφαιρικές πλατφόρμες για ασύρματες επικοινωνίες.

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μία παρουσίαση του τρόπου ανάθεσης των συχνοτήτων από την Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών. Παρουσιάζονται οι υπηρεσίες στις οποίες έχουν ανατεθεί οι διάφορες ζώνες συχνοτήτων στην περιοχή 3-18 GHz. Αναλύονται κριτήρια επιλογής συχνοτήτων κατάλληλων για τη λειτουργία των στρατοσφαιρικών δικτύων και με βάση αυτά προτείνονται οι πιο κατάλληλες συχνότητες.

Στο Κεφάλαιο 3 αρχικά παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά που προτείνει η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών για τη λειτουργία των στρατοσφαιρικών δικτύων στις ζώνες 48/47 GHz και 31/28 GHz. Στη συνέχεια προτείνονται τεχνικά χαρακτηριστικά για τη λειτουργία των στρατοσφαιρικών δικτύων στις ζώνες συχνοτήτων που προτάθηκαν στο Κεφάλαιο 2. Τέλος παρουσιάζεται ένας ενδεικτικός υπολογισμός του προϋπολογισμού ζεύξης (link budget) του στρατοσφαιρικού συστήματος τόσο για συνθήκες καθαρού ουρανού όσο και για συνθήκες βροχής στη περιοχή της Αθήνας.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφονται οι διαδρομές παρεμβολών μεταξύ του στρατοσφαιρικού δικτύου και του σταθερού επίγειου δικτύου. Στη συνέχεια αναλύεται μία μέθοδος υπολογισμού των αποστάσεων διαχωρισμού της άνω ζεύξης του στρατοσφαιρικού δικτύου και του επίγειου σταθερού δικτύου. Με βάση τη μέθοδο αυτή υπολογίζονται οι αποστάσεις διαχωρισμού.

# Abstract

The present diplomatic thesis focuses on two critical issues related with the operation of stratospheric networks at the band of 3-18 GHz. The first issue deals with the limited spectrum resources and the need for finding frequency bands, which haven't been already assigned to other sensitive services. The second one is related with the development of the appropriate sharing criteria and the separation distances between the stratospheric networks and the fixed wireless systems.

The present diplomatic work is structured in 4 chapters. The content of each chapter is concisely presented below.

At the first chapter there is a general presentation of stratospheric networks. There are mentioned the various types of stratospheric platforms and the telecommunications services that they can offer. There is also a presentation concerning the measurements that have taken place using these platforms. There are also reported the advantages of communications via stratospheric platforms compared with fixed and satellite networks. Finally, are presented various challenges and crucial issues that should be faced so that the use of stratospheric platforms for wireless communications to become a reality.

At the second chapter there is a presentation of the frequency bands and the several services that are assigned to each one of these bands by the International Telecommunications Union. In order to choose the best frequency for the operation of stratospheric networks, various criteria are analyzed. Finally based on the already mentioned criteria the most suitable frequencies are suggested.

At the third chapter, are first of all presented the technical characteristics that the International Telecommunications Union suggests for the operation of stratospheric platforms at the bands 48/47 GHz and 31/28 GHz. Finally, technical characteristics are suggested for the operation of stratospheric platforms at the frequencies chosen above.

At the fourth chapter is, first of all, mentioned the interference that the stratospheric system causes to the fixed wireless systems. It is also analyzed a method in order to estimate the separation distance between the uplink of the stratospheric system and the fixed wireless system. Based on that method the separation distances are estimated.

# Λέξεις Κλειδιά

Στρατοσφαιρική Πλατφόρμα, Στρατοσφαιρικό Δίκτυο, Επίγειο Δίκτυο, Τεχνικά Χαρακτηριστικά, Λειτουργικά Χαρακτηριστικά, Προϋπολογισμός Ζεύξης, Παρεμβολή, Αποστάσεις διαχωρισμού, 3-18 GHz.

# Key words

High Altitude Platform, High Altitude Platform Network, Terrestrial Network, Technical Characteristics, Operational Characteristics, Link Budget, Interference, Separation Distances, 3-18 GHz.

# Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ορισμένους ανθρώπους η συμβολή των οποίων υπήρξε καταλυτική στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αρχικά, θα θέλουμε να ευχαριστήσουμε τον καθηγητή του Ε.Μ.Π. και επιβλέποντα της διπλωματικής μας κ. Φίλιππο Κωνσταντίνου για την ευκαιρία που μας έδωσε να συνεργαστούμε μαζί του και να γνωρίσουμε ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Η συνεργασία μαζί του υπήρξε τόσο ευχάριστη όσο και δημιουργική.

Επίσης, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ιδιαίτερα τον διπλωματούχο Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Μηχανικό Υπολογιστών Ε.Μ.Π. και διδάκτορα Ε.Μ.Π. κ. Βασίλη Μήλα για την καθοριστική καθοδήγηση, τις πολύτιμες συμβουλές και την αμέριστη υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας. Η συμβολή του υπήρξε καθοριστική ώστε να προκύψει η παρούσα διπλωματική εργασία

Τέλος, θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ευχαριστίες μας στις οικογένειες μας για την ηθική και υλική συμπαράσταση τους όλα τα χρόνια των σπουδών μας. Η διπλωματική εργασία είναι αφιερωμένη ολόψυχα σε αυτές.

# Περιεχόμενα

**ΕΙΣΑΓΩΓΗ ..... 21**

Βιβλιογραφία ..... 23

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**
**ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΕΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΕΣ ΓΙΑ ΑΣΥΡΜΑΤΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ..... 25**

1.1 Η πρόκληση των Ασύρματων Επικοινωνιών ..... 25
1.2 Εναέριες πλατφόρμες ..... 28
1.3 Ιστορική αναδρομή ..... 29
1.4 Τύποι Στρατοσφαιρικών Πλατφορμών ..... 31
1.5 Η Στρατόσφαιρα ..... 36
1.6 Επικοινωνιακές Εφαρμογές ..... 38
1.6 Υπάρχουσες Μετρήσεις ..... 43
1.7 Πλεονεκτήματα στις επικοινωνίες μέσω των HAPs ..... 51
1.8 Προκλήσεις και Ζητήματα ..... 55
1.9 Μελλοντική Εξέλιξη ..... 59
Βιβλιογραφία ..... 60

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**
**ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΕ ΝΕΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΓΙΑ ΤΑ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ..... 63**

2.1 Περιοχές Ανάθεσης Συχνοτήτων ITU-R ..... 63
2.2 Ζώνες Συχνοτήτων για παροχή Υπηρεσιών απο Στρατοσφαιρικές Πλατφόρμες 65
2.3 Κατανομή Φάσματος και Υπηρεσιών στη ζώνη 3 - 18 GHz ..... 68
2.4 Επιλογή Βέλτιστων Ζωνών Συχνοτήτων για την λειτουργία των Στρατοσφαιρικών Δικτύων ..... 77
2.4.1 Κριτήρια επιλογής Βέλτιστων Ζωνών Συχνοτήτων ..... 77
2.4.2 Επιλογή Βέλτιστων Ζωνών Συχνοτήτων ..... 86
Βιβλιογραφία ..... 88

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**
**ΜΕΛΕΤΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ..... 91**

3.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά των Στρατοσφαιρικών Δικτύων στη ζώνη 48/47 GHz91
3.1.1 Αρχιτεκτονική Δικτύου και Περιοχές Κάλυψης ..... 91
3.1.2 Χαρακτηριστικά Εκπομπής ..... 93
3.1.3 Διαγράμματα Ακτινοβολίας Κεραιών ..... 94
3.1.4 RF Απόκριση Φίλτρου και Εξωζωνική (Out-of-band) Εκπομπή ..... 96
3.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά των Στρατοσφαιρικών Δικτύων στη ζώνη 31/28 GHz98
3.2.1 Γενικά Χαρακτηριστικά Στρατοσφαιρικού Δικτύου ..... 98
3.2.2 Ύψος Στρατοσφαιρικού Σταθμού ..... 99
3.2.3 Ελάχιστη Λειτουργική Γωνία Ανύψωσης ..... 100
3.2.4 Προδιαγραφές Κεραιών ..... 101
3.2.5 Φαινόμενο Θωράκισης της Οπισθόδοτης Ακτινοβολίας (Backward Radiation) από το Αερόπλοιο ..... 102

3.2.6 Αυτόματη ρύθμιση Ισχύος Εκπομπής ... 103
3.2.7 Διαθεσιμότητα Ζεύξης ... 103
3.2.8 Μέγιστος Αριθμός Ταυτόχρονα Μεταδιδόμενων Φερόντων ... 104
3.2.9 Εξωζωνική Εκπομπή για την Άνω Ζεύξη των HAPS στα 31 GHz ... 104
3.3 Πρόταση Νέων Τεχνικών Χαρακτηριστικών για τα Στρατοσφαιρικών Δίκτυα στη ζώνη 3-18 GHz ... 108
3.3.1 Γενικά Χαρακτηριστικά Στρατοσφαιρικού Δικτύου ... 108
3.3.2 Προδιαγραφές Κεραιών ... 109
3.3.3 Χαρακτηριστικά Εκπομπής ... 110
3.3.4 Διαγράμματα Ακτινοβολίας Κεραιών ... 111
3.3.5 Προϋπολογισμός Ζεύξης Στρατοσφαιρικού Συστήματος στις Χαμηλότερες Ζώνες Συχνοτήτων ... 113
Βιβλιογραφία ... 121

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**
**ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΕΜΒΟΛΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΚΑΙ ΕΠΙΓΕΙΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ... 123**

4.1 Εισαγωγή ... 123
4.2 Σταθερά Επίγεια Δίκτυα ... 125
4.2.1 Κατηγορίες Επίγειων Δικτύων ... 125
4.2.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Τυπικών Επίγειων Δικτύων ... 126
4.3 Παρεμβολές επίγειου σταθμού στρατοσφαιρικού δικτύου προς το σταθμό ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου ... 128
4.3.1 Μέθοδος Εκτίμησης Παρεμβολών ... 128
4.3.2 Μελέτη Παρεμβολών και Αποστάσεων Διαχωρισμού ... 132
4.3.2.1 Μελέτη για Στρατοσφαιρικές Πλατφόρμες που Παρέχουν Κάλυψη στην Αστική Περιοχή ... 133
4.3.2.2 Μελέτη για Στρατοσφαιρικές Πλατφόρμες που Παρέχουν Κάλυψη στην Προαστιακή Περιοχή ... 137
4.3.2.3 Μελέτη για Στρατοσφαιρικές Πλατφόρμες που Παρέχουν Κάλυψη στην Αγροτική Περιοχή ... 142
Βιβλιογραφία ... 146

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**
**ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ... 147**

5.1 Γενικά Συμπεράσματα ... 147
5.2 Προτάσεις Επέκτασης ... 148

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α**
**ΌΡΟΙ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ ... 151**

Βιβλιογραφία ... 154

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β΄**
**ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΛΟΓΩ ΒΡΟΧΗΣ ... 155**

Βιβλιογραφία ... 162

# Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Σενάριο επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας σε κυψελωτό δίκτυο. ..... 26
Σχήμα 1.2 Το αερόπλοιο Zeppelin NT, πέταξε για πρώτη φορά τον Ιούνιο του 2000..... 29
Σχήμα 1.3 Η απεικόνιση του Cargolifter. ..... 30
Σχήμα 1.4 Η απεικόνιση του HAP της Lindstrand Balloons. ..... 31
Σχήμα 1.5 Το Helios της AeroVironment. ..... 33
Σχήμα 1.6 Το Global Observer της AeroVironment. ..... 33
Σχήμα 1.7 Το αεροσκάφος HALO Proteus. ..... 34
Σχήμα 1.8 Το Predator, ένα στρατιωτικό UAV. ..... 35
Σχήμα 1.9 Τα στρώματα της ατμόσφαιρας της Γης. ..... 36
Σχήμα 1.10 Η ταχύτητα του ανέμου σε σχέση με το ύψος. ..... 37
Σχήμα 1.11 Σενάριο επικοινωνίας με HAPs ..... 38
Σχήμα 1.12 Κάλυψη της Ελλάδας από ένα δίκτυο με HAPs, για γωνία ανύψωσης $5^o$. ..... 39
Σχήμα 1.13 Κάλυψη της Ελλάδας από ένα δίκτυο με HAPs, για γωνία ανύψωσης $15^0$. .... 40
Σχήμα 1.14 Το Pathfinder Plus. ..... 43
Σχήμα 1.15 Εικόνα των πρωταρχικών δοκιμών μετάδοσης της μέτρησης ii.a..... 45
Σχήμα 1.16 Εικόνα της δοκιμής Ευρυεκπομπής HDTV της μέτρησης ii.b..... 46
Σχήμα 1.17 Εγκατάσταση του εξοπλισμού της μέτρησης iii. ..... 47
Σχήμα 1.18 Το αεροσκάφος χαμηλής τροχιάς της μέτρησης vi. ..... 50
Σχήμα 1.19 Πλάγια διαδρομή διάδοσης στη βροχή..... 51
Σχήμα 1.20 Διάφορες τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας συναρτήσει των δύο ακραίων εποχιακά ημερών, του ύψους αλλά και της ώρας της ημέρας ..... 58
Σχήμα 2.1 Περιοχές Καταχώρησης Συχνοτήτων Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών..... 64
Σχήμα 2.2 Καταχώρηση συχνοτήτων για Στρατοσφαιρικές πλατφόρμες. ..... 66
Σχήμα 2.3 Διάγραμμα φάσματος 3-7.25 GHz. ..... 71
Σχήμα 2.4 Διάγραμμα Φάσματος 7.25-10.55 GHz. ..... 73
Σχήμα 2.5 Διάγραμμα φάσματος 10.55-18 GHz. ..... 76
Σχήμα 2.6 Η ειδική απόσβεση για διάφορες συχνότητες και εντάσεις βροχόπτωσης..... 81
Σχήμα 2.7 Ετήσια πιθανότητα υπέρβασης της απόσβεσης λόγω βροχής για ζεύξη που λειτουργεί στην Αθήνα για διάφορες συχνότητες (κατακόρυφη πόλωση, γωνία ανύψωσης $20^o$). ..... 82
Σχήμα 2.8 Χαρακτηριστικά απόσβεσης λόγω βροχής –Γεωγραφικό πλάτος: $37.8^o$, Γωνία ανύψωσης: $20^o$, Ύψος βροχόπτωσης: 30 mm/h. ..... 83
Σχήμα 2.9 Ειδική απόσβεση εξαιτίας ατμοσφαιρικών αερίων . ..... 84
Σχήμα 2.10 Επίγειες Ζεύξεις στη ζώνη 3-18 GHz στην Αττική. ..... 85
Σχήμα 3.1 Απεικόνιση του σχηματισμού αστερισμού ενός στρατοσφαιρικού δικτύου. ..... 92
Σχήμα 3.2 Απεικόνιση στρατοσφαιρικού δικτύου παροχής σταθερών υπηρεσιών στη ζώνη 31/28 GHz. ..... 99
Σχήμα 3.3 Παράδειγμα ίχνους πολλαπλών δεσμών (a) ελλειπτικής δέσμης ενιαίο μοντέλο ίχνους (367 δέσμες) (b) κυκλικής δέσμης πολυζωνικό μοντέλο ίχνους (397 δέσμες) ..... 101
Σχήμα 3.4 Διδιάστατο μοντέλο σκέδασης επίπεδου κύματος από άπειρο αγώγιμο κύλινδρο. ..... 102
Σχήμα 3.5 Τυπική διάταξη του πομπού ενός επίγειου σταθμού. ..... 105
Σχήμα 3.6 Φάσμα ισχύος ενός QPSK σήματος πριν το φιλτράρισμα. ..... 105
Σχήμα 3.7 Φάσμα ισχύος του QPSK σήματος μετά το φιλτράρισμα εξασθένισης..... 106

Σχήμα 3.8 Παράδειγμα χαρακτηριστικών αποκοπής ενός ζωνοπερατού φίλτρου τύπου Chebyshev (n=6) ..... 106
Σχήμα 3.9 Φάσμα ισχύος του QPSK σήματος μετά το ζωνοπερατό φιλτράρισμα από το Chebyshev (n=6) φίλτρο στην IF έξοδο. ..... 107
Σχήμα 3.10 Απεικόνιση στρατοσφαιρικού δικτύου παροχής σταθερών υπηρεσιών στη ζώνη 3-18 GHz. ..... 109
Σχήμα 3.11 Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας HAPS σύμφωνα με τη σύσταση ITU-R S 1245-1. ..... 112
Σχήμα 3.12 Διάγραμμα ακτινοβολίας επίγειου σταθμού σύμφωνα με τη σύσταση ITU-R S 1245-1. ..... 113
Σχήμα 3.13 BER για QPSK διαμόρφωση. ..... 114
Σχήμα 4.1 Διαδρομές διάδοσης παρεμβολής μεταξύ του επίγειου και του στρατοσφαιρικού δικτύου. ..... 124
Σχήμα 4.2 Γεωμετρία παρεμβολών από τους επίγειους σταθμούς του HAPN προς το σταθμό ραδιοαναμετάδοσης. ..... 129
Σχήμα 4.3 Μηχανισμός υπολογισμού παρεμβολών από τους επίγειους σταθμούς του HAPN προς το σταθμό ραδιοαναμετάδοσης. ..... 131
Σχήμα 4.4 Διάγραμμα I/N συναρτήσει της γωνίας αζιμούθιου του επίγειου σταθμού για την αστική περιοχή κάλυψης. ..... 134
Σχήμα 4.5 Αποστάσεις διαχωρισμού μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου και του σημείου ναδίρ του HAP συναρτήσει της γωνίας αζιμούθιου δ, στην αστική περιοχή. ..... 135
Σχήμα 4.6 Αποστάσεις διαχωρισμού μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου και του σταθμού του HAPN που βρίσκεται στην άκρη της περιοχής κάλυψης συναρτήσει της γωνίας αζιμούθιου δ, στην αστική περιοχή. ..... 135
Σχήμα 4.7 Αποστάσεις διαχωρισμού μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου και του σημείου ναδίρ του HAP συναρτήσει της γωνίας αζιμούθιου δ, στην αστική περιοχή (πολικό διάγραμμα). ..... 136
Σχήμα 4.8 Διάγραμμα I/N συναρτήσει της γωνίας αζιμούθιου του επίγειου σταθμού για την προαστιακή περιοχή κάλυψης. ..... 138
Σχήμα 4.9 Αποστάσεις διαχωρισμού μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου και του σημείου ναδίρ του HAP συναρτήσει της γωνίας αζιμούθιου δ, στην προαστιακή περιοχή. ..... 139
Σχήμα 4.10 Αποστάσεις διαχωρισμού μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου και του σταθμού του HAPN που βρίσκεται στην άκρη της περιοχής κάλυψης συναρτήσει της γωνίας αζιμούθιου δ, στην προαστιακή περιοχή. ..... 140
Σχήμα 4.11 Αποστάσεις διαχωρισμού μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου και του σημείου ναδίρ του HAP συναρτήσει της γωνίας αζιμούθιου δ, στην προαστιακή περιοχή (πολικό διάγραμμα). ..... 141
Σχήμα 4.12 Διάγραμμα I/N συναρτήσει της γωνίας αζιμούθιου του επίγειου σταθμού για την αγροτική περιοχή κάλυψης. ..... 143
Σχήμα 4.13 Αποστάσεις διαχωρισμού μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου και του σημείου ναδίρ του HAP συναρτήσει της γωνίας αζιμούθιου δ, στην αγροτική περιοχή. ..... 144
Σχήμα 4.14 Αποστάσεις διαχωρισμού μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου και του σταθμού του HAPN που βρίσκεται στην άκρη της περιοχής κάλυψης συναρτήσει της γωνίας αζιμούθιου δ, στην αγροτική περιοχή. ..... 144

Σχήμα 4.15 Αποστάσεις διαχωρισμού μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου και του σημείου ναδίρ του HAP συναρτήσει της γωνίας αζιμούθιου δ, στην αγροτική περιοχή (πολικό διάγραμμα)..... 145
Σχήμα Β.1 Σχηματική παρουσίαση των παραμέτρων για την πρόβλεψη της απόσβεσης λόγω βροχής..... 155
Σχήμα Β.2 Ετήσια πιθανότητα υπέρβασης της απόσβεσης λόγω βροχής για ζεύξη που λειτουργεί στην Αθήνα για διάφορες συχνότητες (κατακόρυφη πόλωση, γωνία ανύψωσης $20^o$)..... 160
Σχήμα Β.3 Χαρακτηριστικά απόσβεσης λόγω βροχής –Γεωγραφικό πλάτος: $37,8^o$, Γωνία ανύψωσης: $20^o$, Ύψος βροχόπτωσης: 30 mm/h..... 161

# Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1 Σύγκριση τριών τύπων Στρατοσφαιρικής Πλατφόρμας..... 34
Πίνακας 1.2 Προδιαγραφές του Pathfinder Plus. ..... 43
Πίνακας 1.3 Προδιαγραφές τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού του Pathfinder Plus..... 44
Πίνακας 1.4 Προϋπολογισμός ζεύξης του συστήματος της μέτρησης ii.a. ..... 45
Πίνακας 1.5 Προϋπολογισμός ζεύξης συστήματος της μέτρησης ii.b. ..... 46
Πίνακας 1.6 Προδιαγραφές του συστήματος της μέτρησης iii..... 47
Πίνακας 1.7 Προϋπολογισμός ζεύξης της μέτρησης iii..... 48
Πίνακας 1.8 Συχνότητες που χρησιμοποιήθηκαν στη της μέτρησης v..... 49
Πίνακας 1.9 Σύγκριση των παρεχόμενων ευρυζωνικών υπηρεσιών από επίγειους σταθμούς, HAPs και δορυφόρους ..... 54
Πίνακας 2.1 Ανάθεση συχνοτήτων για τα δίκτυα με τη χρήση στρατοσφαιρικών πλατφορμών ..... 65
Πίνακας 2.2 Κατανομή συχνοτήτων στη ζώνη 2.9 - 7.25 GHz..... 70
Πίνακας 2.3 Κατανομή συχνοτήτων στη ζώνη 7.25 - 10.55 GHz..... 73
Πίνακας 2.4 Κατανομή συχνοτήτων στη ζώνη 10.55 - 18,1 GHz..... 76
Πίνακας 2.5 Ζώνες Συχνοτήτων για FFS Downlink στην περιοχή 3-18 GHz (Περιοχή 1). 77
Πίνακας 2.6 Ζώνες λειτουργίας υπηρεσιών ραδιοαστρονομίας. ..... 78
Πίνακας 2.7 Ζώνες λειτουργίας παθητικών ή άλλων 'ευαίσθητων' υπηρεσιών. ..... 79
Πίνακας 2.8 Χαρακτηριστικά των βασικών προτύπων. ..... 79
Πίνακας 2.9 Χαρακτηριστικά των βασικών προτύπων. ..... 80
Πίνακας 2.10 Μη επιτρεπτές ζώνες συχνοτήτων για χρήση από στρατοσφαιρικά δίκτυα. 86
Πίνακας 2.11 Προτεινόμενες ζώνες λειτουργίας των HAPN στη ζώνη 3-18 GHz. ..... 87
Πίνακας 3.1 Ακτίνα κάλυψης από στρατοσφαιρική πλατφόρμα..... 93
Πίνακας 3.2 Παράμετροι εκπομπής στρατοσφαιρικής πλατφόρμας. ..... 93
Πίνακας 3.3 Παράμετροι εκπομπής επίγειων σταθμών στρατοσφαιρικού δικτύου. ..... 94
Πίνακας 3.4 Ατμοσφαιρική πυκνότητα και πίεση στη στρατόσφαιρα. ..... 100
Πίνακας 3.5 Προτεινόμενοι παράμετροι εκπομπής στρατοσφαιρικής πλατφόρμας. ..... 110
Πίνακας 3.6 Προτεινόμενοι παράμετροι εκπομπής επίγειων σταθμών στρατοσφαιρικού δικτύου. ..... 111
Πίνακας 3.7 Προϋπολογισμός ζεύξης για την αστική περιοχή κάλυψης (συνθήκες καθαρού ουρανού). ..... 115
Πίνακας 3.8 Προϋπολογισμός ζεύξης για την αστική περιοχή κάλυψης (συνθήκες βροχής). ..... 116
Πίνακας 3.9 Προϋπολογισμός ζεύξης για την προαστιακή περιοχή κάλυψης (συνθήκες καθαρού ουρανού). ..... 117
Πίνακας 3.10 Προϋπολογισμός ζεύξης για την προαστιακή περιοχή κάλυψης (συνθήκες βροχής)..... 118
Πίνακας 3.11 Προϋπολογισμός ζεύξης για την αγροτική περιοχή κάλυψης (συνθήκες καθαρού ουρανού). ..... 119
Πίνακας 3.12 Προϋπολογισμός ζεύξης για την αγροτική περιοχή κάλυψης (συνθήκες βροχής)..... 120
Πίνακας 4.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά επίγειων συστημάτων από την ITU-R. ..... 127
Πίνακας 4.2 Παράμετροι του HAPN στην αστική περιοχή κάλυψης. ..... 133
Πίνακας 4.3 Παράμετροι του HAPN στην προαστιακή περιοχή κάλυψης. ..... 137
Πίνακας 4.4 Παράμετροι του HAPN στην αγροτική περιοχή κάλυψης..... 142
Πίνακας B.1 Ειδική απόσβεση για ορισμένες τιμές συχνοτήτων. ..... 157

Πίνακας Β.2 Οριζόντιος συντελεστής μείωσης για ορισμένες τιμές συχνοτήτων. ..... 157
Πίνακας Β.3 Γωνία ζ για ορισμένες τιμές της συχνότητας..... 158
Πίνακας Β.4 Μήκος $L_R$ για ορισμένες τιμές της συχνότητας..... 158
Πίνακας Β.5 Κατακόρυφος συντελεστής μείωσης για ορισμένες τιμές συχνοτήτων. ..... 159
Πίνακας Β.6 Το ενεργό μήκος διαδρομής, $L_E$, για ορισμένες τιμές της συχνότητας. ..... 159
Πίνακας Β.7 Η απόσβεση, $A_{0.01}$, για ορισμένες τιμές της συχνότητας. ..... 159

# Κατάλογος Όρων και Συντμήσεων

ATPC : Automatic Transmitting Power Control

BER : Bit Error Rate

B-FWA : Broadband Fixed Wireless Access

EESS : Earth Exploration Satellite Service

EHF : Extremely High Frequencies

e.i.r.p. : equivalent isotropic radiated power

FEC : Forward Error Correction

FSS : Fixed Satellite Services

FWA : Fixed Wireless Access

HAP : High Altitude Platform

HAPN : High Altitude Platform Network

HAPS : High Altitude Platform Station

HDTV : High Definition TV

HPA : High Power Amplifier

ISI : Inter-symbol-interference

ITU : International Telecommunications Union

LMDS : Local Multipoint Distribution Services

LPF : Low-Pass Filter

MBH : Multi Beam Horn

MVDS : Multipoint Video Distribution Services

OoB : Out-of-Band

pfd : power flux density

QoS : Quality of Service

SAW : Surface acoustic Wave

UDTV : Ultra High Definition TV

| | | |
|---|---|---|
| UHF | : | Ultra High Frequencies |
| VHF | : | Very High Frequencies |
| WRC | : | World Radiocommunication Conference |

# Εισαγωγή

Η ανάγκη και η σημαντικότητα νέων δομών ασύρματων επικοινωνιών, οι οποίες μπορούν να παρέχουν υπηρεσίες υψηλών ταχυτήτων σε χρήστες που δεν είναι ικανοποιημένοι από τις υπηρεσίες που παρέχονται από τα υπάρχοντα ασύρματα δίκτυα, αυξάνεται ραγδαία. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, γίνονται κάποιες προσπάθειες για τη δημιουργία ασύρματου δικτύου επικοινωνιών με τη χρήση στρατοσφαιρικών πλατφόρμων οι οποίες είναι γνωστές με την ονομασία HAPS[1] (High Altitude Platform Stations). Τα HAPS ορίζονται σαν ένας σταθμός εγκατεστημένος σε ύψος μεταξύ 20-50 km από την επιφάνεια της θάλασσας και σε συγκεκριμένο, σταθερό σημείο σε σχέση με τη Γη. Τα συστήματα ασύρματων επικοινωνιών που χρησιμοποιούν στρατοσφαιρικές πλατφόρμες αποτελούν το αντικείμενο εστίασης της παγκόσμιας προσοχής, μιας και έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα ασύρματων επικοινωνιών, όπως οι δορυφορικές και οι επίγειες επικοινωνίες. Εξ αιτίας της τρέχουσας ανάπτυξης των στρατοσφαιρικών πλατφόρμων σε κάποιες χώρες και της δυναμικής της επίδρασης σε άλλες χώρες, τα γεγονότα, συμπεριλαμβανομένων τεχνικών και ρυθμιστικών θεμάτων, χειρίζονται όπως όλα τα διεθνή κοινά θέματα.

Οι περισσότερες από τις ζώνες συχνοτήτων χρησιμοποιούνται ήδη για την παροχή διάφορων τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών. Έτσι η ανάθεση του φάσματος σε νέες εφαρμογές ή υπηρεσίες, όπως τα HAPS, είναι συνήθως αρκετά δύσκολη και αποτελεί αντικείμενο συζήτησης σε πολλά συνέδρια της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (ITU-International Telecommunications Union). Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών όρισε τις ζώνες συχνοτήτων 47.2-47.5 GHz και 47.9-48.2 GHz για την παροχή σταθερών υπηρεσιών μέσω των στρατοσφαιρικών πλατφόρμων. Το Παγκόσμιο Συνέδριο Ραδιοτηλεπικοινωνιών του 2000 (WRC-2000) υιοθέτησε την επέκταση της Πρότασης 122 (Resolution 122) [2] της ITU, όπου η μελέτη εκτός από τη ζώνη των 47 GHz επεκτάθηκε και στη ζώνη 18-32 GHz. Έτσι, σε ορισμένες περιοχές έχουν ανατεθεί και οι ζώνες 27.5-28.35 GHz και 31.0-31.3 GHz. Η Πρόταση 734 (Resolution 734) [3] που υιοθετήθηκε από το WRC-2000 προτείνει τη μελέτη της δυνατότητας λειτουργίας των στρατοσφαιρικών πλατφόρμων σε ζώνες συχνοτήτων μεγαλύτερες των 3 GHz, καταχωρημένες αποκλειστικά για επίγειες επικοινωνίες. Η μελέτη για τις συχνότητες 18-32 GHz διεξάγεται υπό την Πρόταση 122. Επομένως η έρευνα που προτείνεται από την Πρόταση 734 πρέπει αρχικά να εστιαστεί στη ζώνη συχνοτήτων 3-18 GHz.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της δυνατότητας λειτουργίας των στρατοσφαιρικών δικτύων στη ζώνη 3-18 GHz. Αρχικά εξετάζεται εάν υπάρχει κάποια κατάλληλη συχνότητα στη ζώνη αυτή για την παροχή τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών από στρατοσφαιρικές πλατφόρμες. Για τις συχνότητες που προκύπτουν προτείνονται τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά για τη λειτουργία των στρατοσφαιρικών δικτύων. Τέλος, προτείνονται αποστάσεις διαχωρισμού για τη συνύπαρξη του στρατοσφαιρικού δικτύου με το επίγειο δίκτυο.

[1] Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών χρησιμοποιεί τον όρο High Altitude Platform Station (HAPS) για να περιγράψει το σταθμό που βρίσκεται σε 20 έως 50 km σε καθορισμένο σταθερό σημείο σε σχέση με τη Γη.

Ολόκληρη η εργασία γίνεται σύμφωνα με τις συστάσεις και τις αναθέσεις συχνοτήτων που έχουν γίνει από την ITU, και λαμβάνονται υπόψη τα αποτελέσματα μελετών που έχουν γίνει. Η έρευνα γίνεται στην Περιοχή 1[2] (Region 1) στην οποία ανήκει και η Ελλάδα.

[2] Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφεται ο τρόπος χωρισμού της Γης σε Περιοχές (Regions) σύμφωνα με την ITU.

## Βιβλιογραφία

[1] T.C. Tozer, D.Grace, “High-altitude Platforms for Wireless Communications”, Electronics and Communication Journal, vol.13, issue 3, pp.127-137, June 2001.

[2] ITU-R Resolution 122, “Use of the bands 47.2-47.5 GHz and 47.9-48.2 GHz by high altitude platform stations (HAPS) in fixed service and by other services”, WRC-2003, Geneva 2003.

[3] ITU-R Resolution 734, “Feasibility of use of high altitude platform stations in the fixed and mobile services in the frequency bands above 3 GHz allocated exclusively for terrestrial radiocommunication’’, WRC-2003, Geneva 2003.

# Κεφάλαιο 1

# Στρατοσφαιρικές Πλατφόρμες για Ασύρματες Επικοινωνίες

## 1.1 Η πρόκληση των Ασύρματων Επικοινωνιών

Καθώς η ανάγκη για υπηρεσίες επικοινωνιών αυξάνεται συνεχώς, οι ασύρματες λύσεις γίνονται όλο και πιο σημαντικές. Οι ασύρματες επικοινωνίες μπορούν να παρέχουν υπηρεσίες υψηλού εύρους ζώνης, με ρυθμό μετάδοσης μεγαλύτερου του 1.5 Mbps, χωρίς να εξαρτώνται από σταθερές υποδομές. Επίσης σε πολλά σενάρια επικοινωνιών οι ασύρματες επικοινωνίες ίσως αποτελούν το μοναδικό εφαρμόσιμο μηχανισμό μετάδοσης. Οι ασύρματες επικοινωνίες είναι ακόμα απαραίτητες για την παροχή υπηρεσιών σε κινούμενους χρήστες και τα κυψελωτά δίκτυα, όπως για παράδειγμα τα δίκτυα 3$^{ης}$ γενιάς, λειτουργούν τώρα παγκόσμια. Δίκτυα σταθερής ασύρματης πρόσβασης (FWA-Fixed Wireless Access) εγκαθίστανται συνεχώς για να παρέχουν υπηρεσίες τηλεφωνίας και δεδομένων τόσο σε επιχειρήσεις όσο και σε σπίτια.

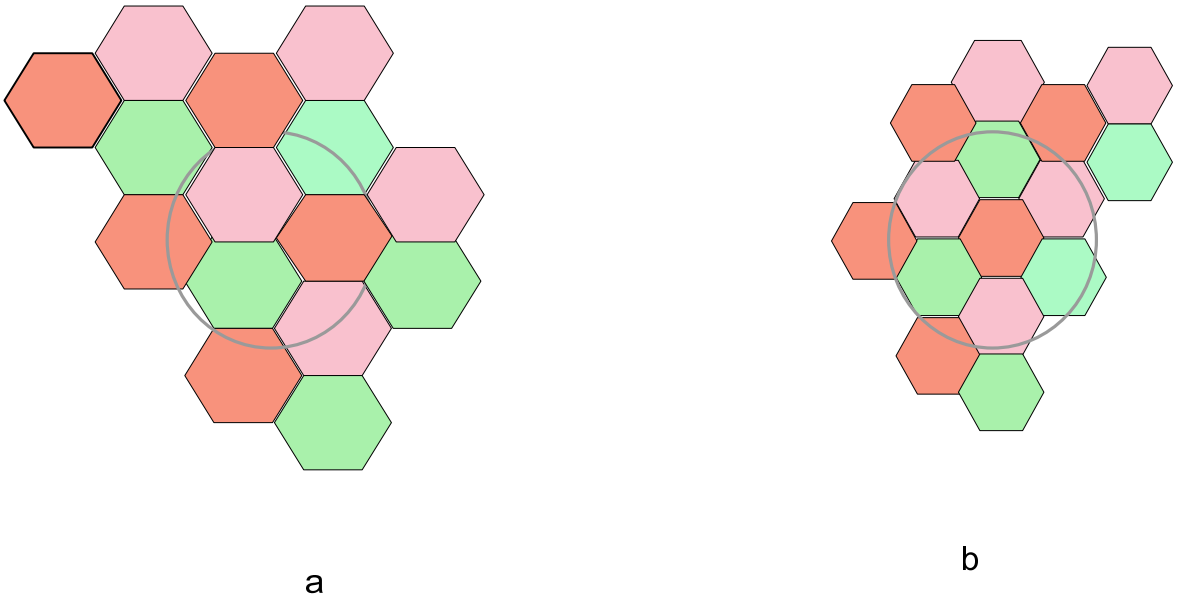
Η ανερχόμενη αγορά της παροχής ευρυζωνικών υπηρεσιών για πολυμέσα, δηλαδή υπηρεσιών που εξασφαλίζουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης για αποστολή και λήψη δεδομένων, αντιπροσωπεύει τη σύγκλιση του γρήγορου internet, της τηλεόρασης, της τηλεφωνίας, του βίντεο κατ΄ απαίτηση (video on demand) και άλλων υπηρεσιών. Τα διάφορα ευρυζωνικά σταθερά σχήματα ασύρματης πρόσβασης, γνωστά και με την ονομασία B-FWA (Broadband- Fixed Wireless Access), κατάφεραν να παρέχουν στον πελάτη μία γκάμα από υπηρεσίες με τυπικούς ρυθμούς μετάδοσης μεγαλύτερους των 2 Mbit/s. Τα B-FWA μπορούν να παρέχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα από αυτή που προσφέρουν υπηρεσίες που βασίζονται στις υπάρχουσες γραμμές καλωδίων, όπως x-DSL, οι οποίες για ευνόητους λόγους είναι αδύνατον να είναι διαθέσιμες σε κάθε πελάτη. Μια εναλλακτική λύση θα ήταν η καλωδιακή μετάδοση, αλλά μια τέτοια εγκατάσταση θα ήταν απαγορευτικά ακριβή και αυτό ίσως αποτελεί ένα εμπόδιο για τους νέους παρόχους υπηρεσιών. Τα B-FWA είναι πιθανόν αρχικά να στοχεύσουν στις επιχειρήσεις, περιλαμβανομένων των μικρομεσαίων επιχειρήσεων (SME- Small-Medium Enterprise) και των χρηστών σε μικρά και οικιακά γραφεία (SOHO- Small Office/ Home Office), αν και η αγορά προβλέπεται να επεκταθεί γρήγορα και στους οικιακούς χρήστες.

Εντούτοις, η παροχή ασύρματων ευρυζωνικών υπηρεσιών αποτελεί μία πρόκληση. Ιδιαίτερα, καθώς το φάσμα συχνοτήτων είναι περιορισμένο η πρόκληση αυτή γίνεται

ακόμη μεγαλύτερη. Για την παροχή μεγάλου εύρους ζώνης σε μεγάλο αριθμό χρηστών πρέπει να υιοθετηθεί κάποια μέθοδος για την επαναχρησιμοποίηση της συχνότητας, συνήθως βασισμένη σε μία σταθερή κυψελωτή δομή. Στο Σχήμα 1.1a φαίνεται ένα κυψελωτό σενάριο όπου κάθε εξάγωνο αντιπροσωπεύει μία κυψέλη που έχει ένα σταθμό βάσης κοντά στο κέντρο της και χρησιμοποιεί μία διαφορετική συχνότητα ή ομάδα συχνοτήτων που αντιπροσωπεύονται με το χρώμα.

Στη μοντελοποίηση με εξάγωνα οι σταθμοί βάσεις τοποθετούνται είτε στο κέντρο της κυψέλης είτε σε τρεις από τις έξη κορυφές του εξαγώνου. Σε πραγματικές συνθήκες σχεδίασης πολλές φορές δεν είναι δυνατή η τοποθέτηση των σταθμών βάσεις στις ακριβείς θέσεις. Η τοποθέτηση τους θεωρείται ακριβής όταν το σημείο εγκατάστασης απέχει μέχρι το ¼ της ακτίνας της κυψέλης από το επιθυμητό σημείο. Όταν η απόκλιση είναι μεγαλύτερη ο λόγος σήματος προς παρεμβολή (δηλαδή ο λόγος C/I) μειώνεται με γρήγορους ρυθμούς. Οι συχνότητες επαναχρησιμοποιούνται μόνο μετά από μία απόσταση η οποία είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων συμπεριλαμβανομένου του τοπικού περιβάλλοντος διάδοσης και του αποδεκτού λόγου σήματος-προς- παρεμβολές-και-θόρυβο (δηλαδή του λόγου C/(N+I)).

Για την παροχή μεγαλύτερης χωρητικότητας το μέγεθος των κυψελών πρέπει να μειωθεί, καθώς έτσι το φάσμα μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί περισσότερες φορές μέσα σε μία δεδομένη γεωγραφική περιοχή όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1b. Αυτή η φιλοσοφία οδηγεί στο σενάριο των μικροκυψελών για περιοχές με υψηλή πυκνότητα χρηστών, με ένα σταθμό βάσης ίσως και σε κάθε γωνία του δρόμου. Βέβαια θεωρώντας το σενάριο αυτό σε μία ακραία μορφή, μπορεί κάποιος να φανταστεί μία κυψέλη ανά χρήστη. Το εμφανές τίμημα σε αυτή την περίπτωση είναι το κόστος και η επίδραση στο περιβάλλον από το μεγάλο αριθμό κεραιών. Σε αυτό μπορούμε να προσθέσουμε την εργασία της παροχής των οπισθοζεύξεων (backhaul links) για την εξυπηρέτηση των κεραιών, καθώς και το κόστος εγκατάστασης.




**Σχήμα 1.1 Σενάριο επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας σε κυψελωτό δίκτυο.**

Ο περιορισμός του φάσματος συχνοτήτων οδηγεί επίσης σε μία μετακίνηση σε υψηλότερες συχνότητες, στις οποίες υπάρχει μικρότερη συμφόρηση και οι οποίες μπορούν να παρέχουν σημαντικό εύρος ζώνης. Οι κύριες περιοχές του φάσματος για την ευρυζωνικότητα είναι στην περιοχή των 28 GHz καθώς και στα 38 GHz. Τα υπάρχοντα ευρυζωνικά σχήματα μπορούν να περιγραφούν ως τοπικές πολυσημειακές υπηρεσίες διανομής (LMDS-Local Multipoint Distribution Services) ή ως πολυσημειακές υπηρεσίες διανομής βίντεο (MVDS- Multipoint Video Distribution Services). Αυτές είναι ευέλικτες σκέψεις για τη διανομή ευρυζωνικών υπηρεσιών, αν και μπορούν να συμπεριληφθούν στη γενική περιγραφή B-FWA ή απλά BWA.

Η χρήση χιλιοστομετρικών μηκών κύματος συνεπάγεται διάδοση οπτικής επαφής (line-of-sight propagation), δηλαδή διάδοση σε μία κατεύθυνση όπου δεν υπάρχουν εμπόδια μεταξύ πομπού και δέκτη. Το γεγονός αυτό αποτελεί μία πρόκληση αν το συγκρίνουμε με διάδοση σε χαμηλότερες συχνότητες. Τα διάφορα τοπικά εμπόδια που παρεμβάλλονται μεταξύ του σταθμού βάσης και του τερματικού προκαλούν προβλήματα και κάθε τερματικό θα πρέπει να 'βλέπει' τον σταθμό βάσης. Αυτό πάλι συνεπάγεται την ανάγκη για ένα μεγάλο αριθμό σταθμών βάσης.

Μία λύση στα παραπάνω προβλήματα θα μπορούσε να είναι ένας πολύ ψηλός σταθμός βάσης έτσι ώστε να υπάρχει οπτική επαφή (line-of-sight) μεταξύ αυτού και των τερματικών. Εντούτοις, αυτό θα ήταν όχι μόνο εξαιρετικά δαπανηρό αλλά και περιβαλλοντικά αδύνατο. Ένας εναλλακτικός μηχανισμός διάδοσης θα ήταν μέσω δορυφόρων οι οποίοι μπορούν να παρέχουν επικοινωνίες οπτικής επαφής σε μεγάλο αριθμό χρηστών. Επιπρόσθετα, οι ευρυζωνικές υπηρεσίες μέσω γεωστατικών δορυφόρων (GEO) προβλέπεται ότι θα αποτελέσουν μία σημαντική αγορά μέσα στα επόμενα χρόνια. Εντούτοις, υπάρχουν περιορισμοί στην απόδοση εξαιτίας από τη μία μεριά της απόστασης των 40000 km, η οποία συνεπάγεται απώλειες διάδοσης ελεύθερου χώρου της τάξης των 200 dB, και από την άλλη εξαιτίας φυσικών περιορισμών που προκύπτουν από τις διαστάσεις μίας κεραίας σε ένα δορυφόρο. Το τελευταίο οδηγεί σε περιορισμό της διαμέτρου της περιοχής κάλυψης στο έδαφος, και αυτές οι μικρότερες διαστάσεις συνεπάγονται επαναχρησιμοποίηση της συχνότητας και κατ' επέκταση και όλης της χωρητικότητας. Επιπλέον, οι υψηλές απώλειες διάδοσης ελεύθερου χώρου απαιτούν αρκετά μεγάλες κεραίες στα τερματικά στο έδαφος για να καταφέρουν μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Ένα περαιτέρω πρόβλημα είναι η μεγάλη καθυστέρηση διάδοσης, 0.25 sec, σε μία δορυφορική σύνδεση. Η καθυστέρηση αυτή δεν είναι πρόβλημα μόνο για υπηρεσίες ομιλίας αλλά ίσως να προκαλέσει κάποιες δυσκολίες και σε κάποια πρωτοκολλά δεδομένων.

Οι δορυφόροι χαμηλής τροχιάς (LEO) ίσως καταργήσουν κάποιους από τους παραπάνω περιορισμούς, αλλά υποφέρουν από πολυπλοκότητες τυχαίας παράδοσης, όχι μόνο μεταξύ κυψελών αλλά και μεταξύ πλατφορμών. Η ανάγκη ενός μεγάλου αριθμού δορυφόρων χαμηλής τροχιάς για την παροχή συνεχούς κάλυψης είναι επίσης μία σημαντική οικονομική επιβάρυνση, και τέτοια σχήματα πρέπει να βελτιωθούν αρκετά ακόμη ώστε να αποδειχθούν εμπορικά επιτυχημένα.

## 1.2 Εναέριες πλατφόρμες

Η ανάγκη για μία λύση στο πρόβλημα της ασύρματης διάδοσης γέννησε τις εναέριες πλατφόρμες που λειτουργούν σε ημιστατικές θέσεις σε ύψη μεγαλύτερα από τα 22 km. Το τηλεπικοινωνιακό φορτίο μπορεί να είναι ένας ολόκληρος σταθμός βάσης ή απλά ένας πομπός, παρόμοια με τους δορυφόρους. Διαδρομές διάδοσης οπτικής επαφής μπορούν να δημιουργηθούν και να χρησιμοποιηθούν από πολλούς χρήστες, με χαμηλές απώλειες διάδοσης ελεύθερου χώρου. Έτσι παρέχονται υπηρεσίες με καλύτερα χαρακτηριστικά από τις αντίστοιχες των επίγειων και δορυφορικών συστημάτων. Μία απλή εναέρια πλατφόρμα μπορεί να αντικαταστήσει ένα μεγάλο αριθμό από επίγειους σταθμούς, μαζί με το κόστος αυτών, την περιβαλλοντική επιρροή τους και τους περιορισμούς της οπισθοζεύξης (backhaul). Τα προβλήματα απόκτησης εκτάσεων γης επίσης εξαλείφονται μαζί με τα κόστη εγκατάστασης, τα οποία μπορεί να αποτελούν ένα σημαντικό έξοδο για πολλές περιοχές του κόσμου.

Οι πλατφόρμες μπορεί να είναι αεροπλάνα ή αερόπλοια (κυρίως μπαλόνια που ονομάζονται και αερόστατα) και μπορεί να είναι επανδρωμένα ή μη επανδρωμένα με αυτόνομη λειτουργία η οποία ελέγχεται από το έδαφος. Από τα πιο ενδιαφέροντα είναι τα σκάφη που σχεδιάστηκαν να λειτουργούν στη στρατόσφαιρα σε ένα ύψος από 17 km έως 22 km και τα οποία αναφέρονται ως πλατφόρμες μεγάλου ύψους, HAPs (High-Altitude-Platforms) ή αλλιώς στρατοσφαιρικές πλατφόρμες. Αρκετά συχνά συναντώνται και οι όροι HALE (High Altitude Long Endurance), SPR (Stratospheric Platform Radio), και HALO (High Altitude Long Operation) για να περιγράψουν τις πλατφόρμες οι οποίες μπορούν να στηθούν και να λειτουργήσουν σε αρκετά μεγάλα ύψη μεταξύ 20 km και 50 km [2] (Σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών ITU) ή μεταξύ 15 και 30 km [3] (σύμφωνα με τα μέχρι τώρα ερευνητικά αποτελέσματα) πάνω από την επιφάνεια της Γης, μέσα στο στρώμα της στρατόσφαιρας για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Τα HAPs σχεδιάζονται για να παρέχουν ευρυζωνικές υπηρεσίες κατευθείαν στο σπίτι. Υπάρχουν αρκετοί λόγοι που κάνουν τα συστήματα αυτά πολύ ελκυστικά. Τα συστήματα αυτά μπορούν να αναπτυχθούν πολύ γρήγορα με ελάχιστες απαιτήσεις για εδαφικές υποδομές. Αυτό τα κάνει ιδανικά για χρήση σε περιπτώσεις έκτακτων αναγκών και άλλες προσωρινές καταστάσεις. Επίσης η καθυστέρηση διάδοσης είναι μικρή όπως και στους δορυφόρους χαμηλής τροχιάς (LEO). Σε αντίθεση, όμως, με τους δορυφόρους χαμηλής τροχιάς, τα HAPs δεν υποφέρουν από προβλήματα μεταπομπής (handoff) και προβλήματα λόγω του φαινόμενου Doppler, τα οποία προκαλούνται από τη γρήγορη κίνηση των δορυφόρων. Με τη χρήση των HAPs το σχέδιο της δημιουργίας κυψελωτού δικτύου απλοποιείται αρκετά και δεν καθορίζεται από τη μορφολογία του εδάφους.

Τα HAPs αναπτύσσονται σε ένα μεγάλο αριθμό παγκόσμιων ερευνητικών προγραμμάτων. Η έντονη αυτή ερευνητική δραστηριότητα αντανακλά την ανάγκη για ασύρματες υπηρεσίες και ταυτόχρονα προάγει την τεχνολογία των στρατοσφαιρικών πλατφορμών. Το Παγκόσμιο Συνέδριο Ραδιοτηλεπικοινωνιών του 2000 (WRC-2000) υιοθέτησε την Πρόταση 221 (Resolution 221) [4] για τη μελέτη της επιτευξιμότητας εγκατάστασης στρατοσφαιρικών πλατφορμών ως σταθμών βάσης για την παροχή υπηρεσιών IMT-2000 (International Mobile Telecommunications-2000) [5]. Το Helinet (2000-2003) [6], το CAPANINA (2003-2007) [7] της Ευρωπαϊκής Ένωσης και το SkyNet στην Ιαπωνία είναι αντιπροσωπευτικά προγράμματα.

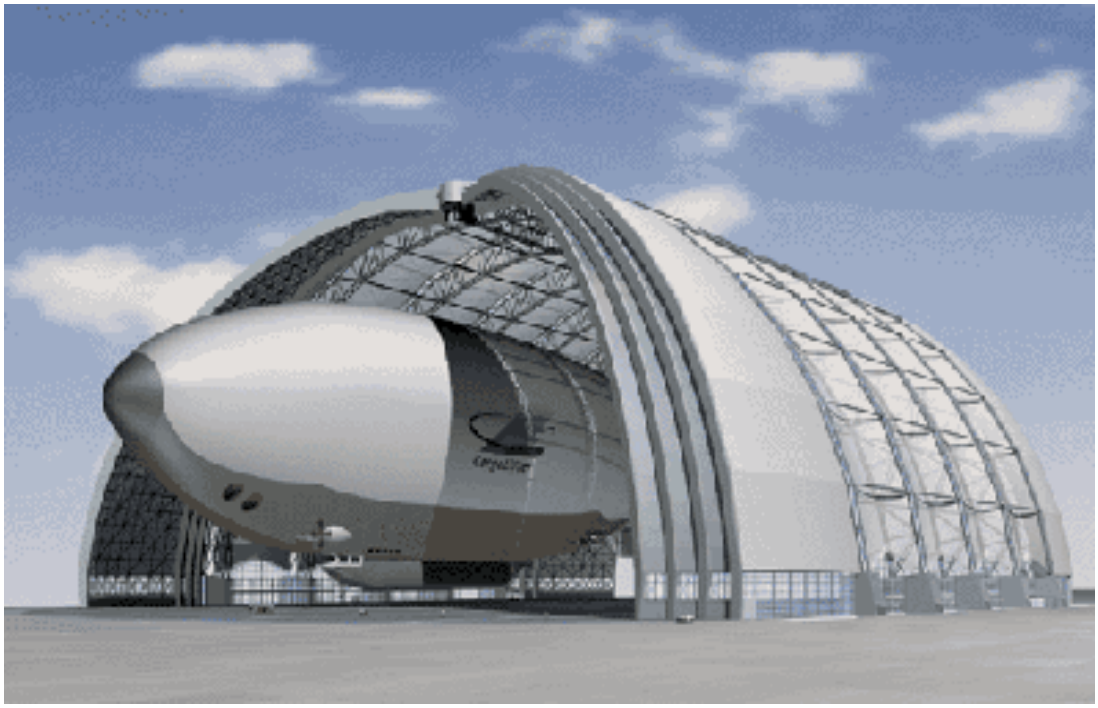
## 1.3 Ιστορική αναδρομή

Οι πρώτες εναέριες πλατφόρμες ήταν μπαλόνια των οποίων η ιστορία ξεκινάει από τα χρόνια των αρχαίων Κινέζων. Στη Δύση, το πρώτο σημαντικό σκάφος ελαφρύτερο του αέρα ήταν το επανδρωμένο μπαλόνι ζεστού αέρα των αδελφών Montgolfier, το οποίο πέταξε στη Γαλλία το 1783. Επακολούθησε η κατασκευή και άλλων μπαλονιών, κυρίως για στρατιωτικούς σκοπούς. Μέχρι τότε η δυνατότητα χρήσης αυτών των μπαλονιών για επικοινωνιακούς σκοπούς ήταν αρκετά περιορισμένη. Στις αρχές του $20^{ου}$ αιώνα κατασκευάστηκαν άκαμπτα, δυναμικά αερόπλοια από την εταιρεία Zeppelin [8] στη Γερμανία για τη μεταφορά επιβατών. Αυτά αποδείχτηκαν ένα αξιοσημείωτο βήμα της μηχανικής καθώς επέτρεπαν στους επιβάτες να ταξιδεύουν από την Ευρώπη στη Βόρεια Αμερική. Δυστυχώς αυτή η εποχή είχε ένα άσχημο τέλος με την καταστροφή Hindenburg στο Lakehurst των ΗΠΑ το1937. Όποιο και να ήταν το κόστος της καταστροφής, η χρήση του εξαιρετικά εύφλεκτου υδρογόνου δεν ήταν πλέον αποδεκτή. Μετά το τέλος του Β' Παγκόσμιου Πολέμου άρχισαν να κατασκευάζονται μεγάλα αερόπλοια για εμπορικά εναέρια ταξίδια.

Οι δραστηριότητες που επακολούθησαν περιορίστηκαν σε μπαλόνια ζεστού αέρα για ψυχαγωγικούς σκοπούς. Κατασκευάστηκαν ακόμη μπαλόνια για μετεωρολογική χρήση καθώς και δεμένα μεταξύ τους αερόστατα, δηλαδή μπαλόνια σε ακολουθία. Τα τελευταία μπορούν να λειτουργήσουν σε ύψη πάνω από 5000 m, η λειτουργία τους όμως σε τόσο μεγάλα ύψη προκαλεί εμφανείς επιπλοκές στην ασφάλεια των αερομεταφορών. Για το λόγο αυτό η χρήση τους είναι αυστηρά περιορισμένη σε τόσο μεγάλα ύψη, και η πλειονότητα τους λειτουργεί σε πολύ χαμηλότερα ύψη.

**Σχήμα 1.2 Το αερόπλοιο Zeppelin NT, πέταξε για πρώτη φορά τον Ιούνιο του 2000.**

Τα τελευταία χρόνια έχει αναγεννηθεί το ενδιαφέρον για τα μπαλόνια και τα αερόπλοια. Σε αυτό συνέβαλε η ανάπτυξη τεχνολογιών για την κατασκευή πλαστικών υλικών που είναι δυνατά, ανθεκτικά και προφυλαγμένα από διαρροές από το ήλιο το οποίο χρησιμοποιείται τώρα σχεδόν παγκοσμίως αντί του πολύ φθηνότερου υδρογόνου. Τον Ιούνιο του 2000 η εταιρεία Zeppelin κατασκεύασε ένα νέο σκάφος χαμηλού ύψους, το Zeppelin NT, με βλέψεις στην τουριστική αγορά. Ένα άλλο σημαντικό προϊόν, αν και χαμηλού ύψους, είναι το Cargolifter [9]. Αυτό το μεγάλο αερόπλοιο έχει μήκος 250 m και πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως 'ιπτάμενος γερανός' για μεταφορά βαριών προϊόντων σε δυσπρόσιτες περιοχές.



**Σχήμα 1.3 Η απεικόνιση του Cargolifter.**

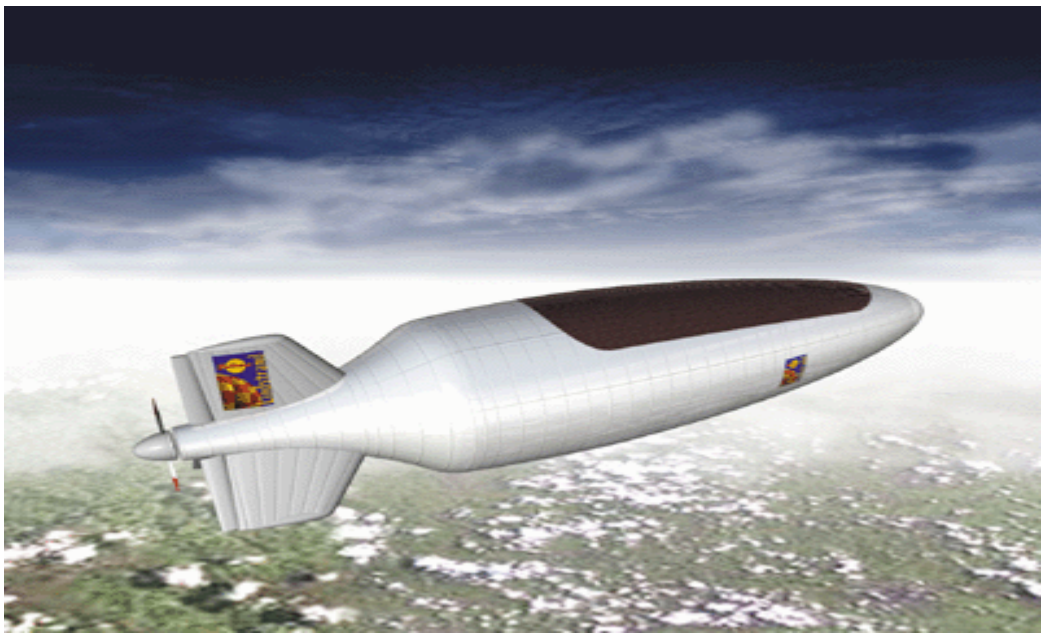
Για τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές η ιστορία των στρατοσφαιρικών πλατφορμών ξεκινάει το 1960 με τις αναμεταδόσεις μέσω του γιγάντιου μπαλονιού Echo (Εργαστήρια Bell) και συνεχίζεται μέχρι σήμερα με τις πειραματικές μεταδόσεις ψηφιακής τηλεόρασης και τηλεφωνίας μέσω του Helios-NASA.

## 1.4 Τύποι Στρατοσφαιρικών Πλατφορμών

Οι στρατοσφαιρικές πλατφόρμες που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

1. *Μη επανδρωμένα αερόπλοια με ειδικά συστήματα προώθησης και ηλιακές κυψέλες.*

Τα αερόπλοια για μεγάλα ύψη χρησιμοποιούν πολύ μεγάλα ημι-εύκαμπτα ή άκαμπτα δοχεία γεμάτα με ήλιο και έχουν μήκος μεγαλύτερο από 100 m. Το Σχήμα 1.4 δείχνει την απεικόνιση ενός HAP της Lindstrand Balloons [10]. Ηλεκτρικές μηχανές και προπέλες χρησιμοποιούνται για τη διατήρηση του σταθμού και το αερόπλοιο πετάει αντίθετα στον άνεμο που επικρατεί. Απαιτείται ενέργεια για το προωθητικό σύστημα και για τη διατήρηση του σταθμού στον αέρα. Ενέργεια επίσης απαιτείται για το τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό και τις διάφορες εφαρμογές. Η ενέργεια αυτή παρέχεται από ελαφρές ηλιακές κυψέλες. Οι κυψέλες αυτές τοποθετούνται σε μία φόρμα μεγάλων ευέλικτων θέσεων, η οποία τυπικά ζυγίζει κάτω από 400 $g/m^2$ και καλύπτει τις πάνω επιφάνειες του αερόπλοιου. Επιπρόσθετα ενέργεια αποθηκεύεται κατά τη διάρκεια της ημέρας σε διάφορους συσσωρευτές ενέργειας, οι οποίοι παρέχουν όλη την απαιτούμενη ενέργεια τη νύχτα.



**Σχήμα 1.4 Η απεικόνιση του HAP της Lindstrand Balloons.**

Η ενεργειακή ισορροπία σε ένα HAP είναι ένας κρίσιμος παράγοντας. Η απόδοση και η διάρκεια ζωής των συσσωρευτών ενέργειας είναι αυτά που θα καθορίσουν τη διάρκεια που θα έχει η αποστολή. Εντούτοις αυτό αντισταθμίζεται από το γεγονός ότι είναι σχετικά εύκολο να επαναφέρουμε ένα HAP πίσω στη Γη για επισκευές και αντικατάστασή των συσσωρευτών ενέργειας, όπως επίσης για συντήρηση και αναβαθμίσεις. Αντίθετα κάτι

τέτοιο είναι αρκετά δύσκολο με τους δορυφόρους. Στόχος είναι τα αερόπλοια αυτά να μπορούν να παραμένουν στη στρατόσφαιρα για χρονική περίοδο μέχρι και 5 χρόνια.

Ένα από τα σημαντικότερα προγράμματα αερόπλοιων HAP είναι το Ιαπωνικό Skynet. Ιδρύθηκε από την Ιαπωνική κυβέρνηση και διοικείται από την Yokosuka Communications Research Laboratory. Το πρόγραμμα αυτό κατάφερε να παράγει ένα ολοκληρωμένο δίκτυο από περίπου 15 αερόπλοια και να εξυπηρετεί το μεγαλύτερο μέρος της Ιαπωνίας, παρέχοντας ευρυζωνικές υπηρεσίες στη ζώνη των 28 GHz.

Μία σειρά από αερόπλοια αναπτύχθηκε από την Advanced Technologies Group, στο Bedford της Αγγλίας, σε συνεργασία με την Αμερικανική SkyStation International, η οποία πρότεινε ένα αερόπλοιο μήκους 150 m που μπορεί να υποστηρίξει επικοινωνιακό φορτίο μεγαλύτερο των 800 Kg. Το πανεπιστήμιο της Στουτγάρδης πρότεινε ένα νέο σχέδιο για HAP που αποτελείται από αρκετά μικρά αερόπλοια ενωμένα σε ένα σχηματισμό 'εναέριου σκουληκιού'. Αυτός ο σχηματισμός παρέχει ευκολότερη ανύψωση του HAP καθώς αποφεύγονται κάποια δομικά και αεροδυναμικά προβλήματα που συνδέονται με τα πολύ μεγάλα αερόπλοια.

*2. Ηλιακά τροφοδοτούμενα μη επανδρωμένα αεροσκάφη.*

Ένας άλλος τύπος HAP είναι τα μη-επανδρωμένα ηλιακά τροφοδοτούμενα αεροπλάνα, τα οποία πετούνε αντίθετα στον άνεμο ή σε μικρά σχεδόν κυκλικά μονοπάτια. Και πάλι η κύρια πρόκληση είναι η επίτευξη ενεργειακής ισορροπίας. Το σκάφος πρέπει να έχει τη δυνατότητα να αποθήκευση σημαντική ποσότητα ενέργειας για τη διατήρηση της θέσης του σταθμού κατά τη διάρκεια της νύχτας. Στόχος είναι να μπορούν να μένουν σε λειτουργία στη στρατόσφαιρα για χρονική περίοδο μέχρι και 6 μήνες.

Τα πιο ανεπτυγμένα τέτοια σκάφη είναι αυτά της AeroVironment [12] στις ΗΠΑ. Η AeroVironment σχεδίασε το Helios το οποίο έχει άνοιγμα πτερυγίων 75 m. Η πρώτη δοκιμαστική πτήση του Helios πραγματοποιήθηκε επιτυχώς το 1999 στην αεροπορική βάση Edwards. Στην πρώτη αυτή πτήση η ηλεκτρική τροφοδότηση του Helios έγινε με μπαταρίες. Από τότε το Helios εξοπλίστηκε με υψηλής απόδοσης φωτοβολταϊκές ηλιακές κυψέλες και πραγματοποίησε την πρώτη δοκιμαστική πτήση σε μεγάλο ύψος (high-altitude) το καλοκαίρι του 2001 στη Χαβάη. Στις 13 Αυγούστου του 2001 το Helios πέταξε σε ύψος 29.5 km (96863 πόδια) καταρρίπτοντας το παγκόσμιο ρεκόρ ύψους πτήσης. Επίσης τα αεροσκάφη τής Pathfinder και Centurion έχουν ήδη διεξάγει δοκιμαστικές πτήσεις σε ύψη πάνω από 25 km. Τα προγράμματα αυτά που αρχικά δημιουργήθηκαν από την NASA έχουν ως στόχο την επίτευξη πτήσεων μεγάλης διάρκειας για εμπορικές επικοινωνίες και άλλες εφαρμογές.

Το Heliplat είναι ένα ηλιακά τροφοδοτούμενο σκάφος που κατασκευάστηκε υπό την επίβλεψη του πολυτεχνείου του Τορίνο στην Ιταλία, ως μέρος του Ευρωπαϊκού προγράμματος HeliNet. Το HeliNet εξετάζει θέματα αεροναυτικής άποψης αλλά και τρεις πιθανές εφαρμογές: ευρυζωνικές τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες, περιβαλλοντολογικός έλεγχος και τοποθέτηση του οχήματος.

**Σχήμα 1.5 Το Helios της AeroVironment.**

Το πιο σύγχρονο αεροσκάφος της κατηγορίας αυτής είναι το Global Observer της εταιρείας AeroVironment. Το Global Observer είναι η πρώτη λειτουργική κατασκευή, ικανή να παρέχει τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες σε μεγάλη έκταση και χωρίς γεωγραφικούς περιορισμούς. Η μοναδική σύνθεση του Global Observer συνδυάζει μεγάλη διάρκεια πτήσης, περίπου μία βδομάδα, και λειτουργία σε στρατοσφαιρικό ύψος, περίπου 20 km (65000 πόδια). Τα πλεονεκτήματα του σε κόστος, γεωγραφική κάλυψη και χωρητικότητα το καθιστούν απαραίτητο συμπλήρωμα στα υπάρχοντα δορυφορικά και επίγεια συστήματα. Το Global Observer μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παροχή ενός μεγάλου αριθμού εμπορικών και πολιτικών εφαρμογών. Δύο από αυτές είναι η παροχή ευρυζωνικού βίντεο υψηλής ευκρίνειας (HDTV) και η παροχή τρίτης γενιάς (3G) δικτύου κινητής τηλεφωνίας.

**Σχήμα 1.6 Το Global Observer της AeroVironment.**

### 3. *Επανδρωμένα αεροσκάφη*

Το HAP που είναι τώρα πιο κοντά στην αγορά για επικοινωνίες είναι ένα επανδρωμένο αεροπλάνο που μπορεί να πετάει για 8 ώρες. Το πρόγραμμα HALO των Angel Technologies [13] κατέχει το ειδικά σχεδιασμένο αεροσκάφος Proteus το οποίο λειτουργεί σε ύψη από 16-18 km για να παρέχει ευρυζωνικές υπηρεσίες σε μία περιοχή διαμέτρου μεγαλύτερης των 40 km. Το σκάφος πετυχαίνει μία σχεδόν στατική θέση πετώντας σε ένα σχεδόν κυκλικό μονοπάτι με μία τυπική διάμετρο μικρότερη των 13 km. Το επικοινωνιακό φορτίο τοποθετείται σε ένα μέρος κάτω από το σκελετό του αεροσκάφους, το οποίο στεγάζει πάνω από 125 μικροκυματικές κεραίες. Το αεροσκάφος είναι καλά δοκιμασμένο και γι' αυτό μπορεί να θεωρηθεί σαν μία λύση χαμηλού ρίσκου, αν και η απόλυτη εμπορική επιτυχία εξαρτάται από το πόσο οικονομική είναι η όλη λειτουργία.

**Σχήμα 1.7 Το αεροσκάφος HALO Proteus.**

Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα χαρακτηριστικά των παραπάνω τύπων στρατοσφαιρικών πλατφορμών.

| **Μέγεθος** | **Μη Επανδρωμένα Αερόπλοια** | **Ηλιακά Τροφοδοτούμενα μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη** | **Επανδρωμένα Αεροσκάφη** |
|---|---|---|---|
| Διάσταση | Μήκος 150-200m | Άνοιγμα 75m | Μήκος έως 30m |
| Πηγή ισχύος | Ηλιακές Κυψέλες Ενταμιευτές ενέργειας | Ηλιακές Κυψέλες Ενταμιευτές ενέργειας | Φυσικό καύσιμο |
| Φιλικά προς το περιβάλλον | Ναι | Ναι | Όχι |
| Διάρκεια Πτήσης | Έως 5 χρόνια | Έως 6 μήνες | 4-8 ώρες |
| Ωφέλιμο φορτίο | 1000-2000 Kg | 50-300 Kg | Έως 2000 Kg |
| Ισχύς εκπομπής | Έως 10KW | Έως 3KW | Έως 40KW |
| Παραδείγματα | Ιαπωνία, Κορέα, Κίνα, ATG, Lockheed Martin SkyStation | Helios, Pathfinder plus (AeroVironment), Heliplat | HALO (Angel Techn.) M-55(Geoscan) |

**Πίνακας 1.1 Σύγκριση τριών τύπων Στρατοσφαιρικής Πλατφόρμας**

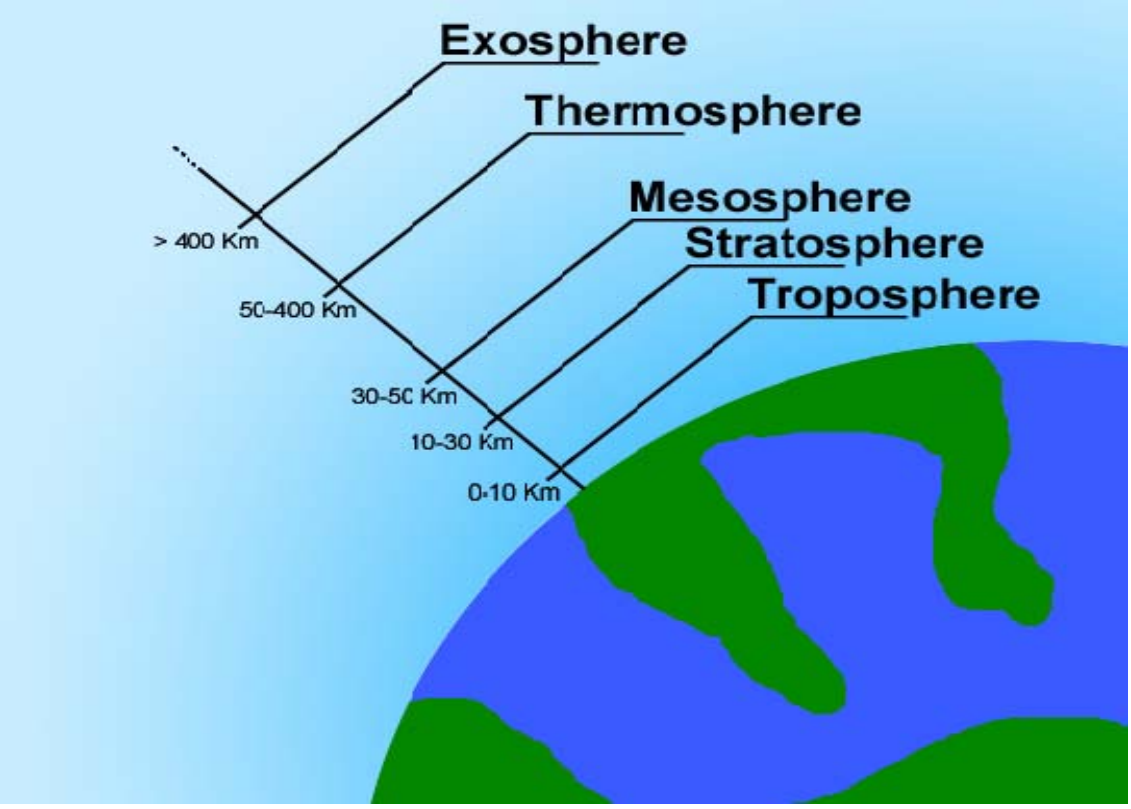
Μία άλλη κατηγορία εναέριων πλατφορμών είναι τα μη-επανδρωμένα εναέρια οχήματα γνωστά και ως UAV (Unmanned Aerial Vehicle). Ο όρος αυτός τυπικά αναφέρεται σε μικρά μη-επανδρωμένα σκάφη τα οποία έχουν μικρή διάρκεια πτήσης και γενικά λειτουργούν σε μεσαία ύψη. Η κύρια χρήση των UAVs είναι για στρατιωτική επίβλεψη. Η χρήση των UAVs για επικοινωνιακούς σκοπούς φαίνεται να είναι περιορισμένη εξαιτίας της μικρής διάρκειας πτήσης τους. Μεγαλύτερα στρατιωτικά UAVs, συμπεριλαμβανομένων και των Global Hawk και Predator, τα οποία μπορούν να υποστηρίξουν μεγαλύτερα φορτία και να πετάξουν μεγάλες αποστάσεις, θεωρούνται πολυδάπανα για κανονικές επικοινωνιακές παροχές.

**Σχήμα 1.8 Το Predator, ένα στρατιωτικό UAV.**

Τέλος η απλούστερη και πιο διαθέσιμη εναέρια πλατφόρμα είναι το προσδεμένο αερόστατο. Αυτό είναι ένα αερόπλοιο δεμένο σε ένα καλώδιο του οποίου το μήκος μπορεί να φτάσει πάνω από 5 km. Το δέσιμο του αεροπλάνου λύνει εν μέρει το πρόβλημα της διατήρησης της θέσης του σταθμού, αν και η κίνηση της πλατφόρμας είναι ακόμα ένα θέμα. Ενέργεια και επικοινωνιακή οπισθοζεύξη παρέχεται επίσης μέσω του καλωδίου. Η ορατή πρόκληση είναι το εμπόδιο που παρουσιάζεται στην εναέρια κίνηση, και παρόλο που κάποια αερόστατα παρατάσσονται σε αποκλεισμένες από αεροσκάφη ζώνες, η γενική εφαρμογή τους ίσως είναι περισσότερο ταιριαστή σε λιγότερο αναπτυγμένες περιοχές. Ένα σημαντικό πρόγραμμα είναι αυτό της Platforms Wireless International το οποίο αναπτύσσει ένα προσδεμένο αερόστατο για χρήση στη Βραζιλία σε ένα ύψος 4-6 km. Το σύστημα ARC (Airborne Relay Communications) κατάφερε να μοιράσει ένα πλήθος από επικοινωνιακές υπηρεσίες σε πάνω από 125000 συνδρομητές.

## 1.5 Η Στρατόσφαιρα

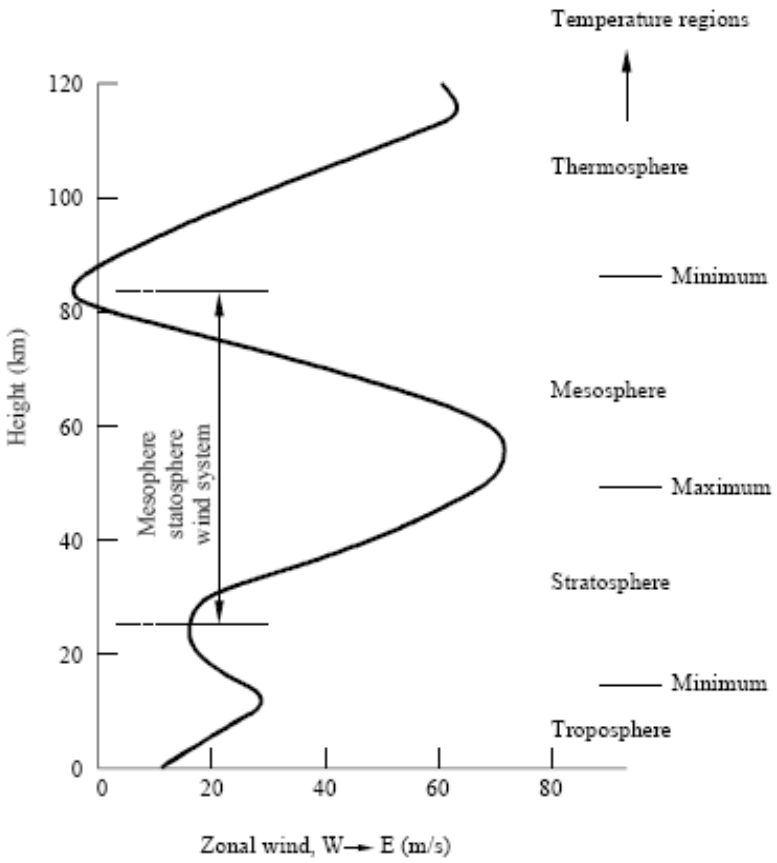
Η στρατόσφαιρα είναι το στρώμα της ατμόσφαιρας της Γης που βρίσκεται πάνω από την τροπόσφαιρα και πριν τη μεσόσφαιρα. Η στρατόσφαιρα ξεκινάει από ύψη 8 km πάνω από τους πόλους της Γης και από τα 17 km πάνω από τον Ισημερινό και εκτείνεται έως και τα 50 km πάνω από την επιφάνεια της Γης. Η στρατόσφαιρα έχει κάποια χαρακτηριστικά τα οποία την καθιστούν ιδιαίτερα καλή επιλογή για χρήση από τις στρατοσφαιρικές πλατφόρμες. Σε αντίθεση με την τροπόσφαιρα, η στρατόσφαιρα στρωματοποιείτε θερμοκρασιακά, έχοντας τα πιο ζεστά στρώματα σε υψηλότερα ύψη και πιο κρύα στρώματα στα χαμηλότερα ύψη. Η θερμοκρασία στη στρατόσφαιρα κυμαίνεται από -55 °C στα κατώτερα στρώματα, έως -3 °C στο ανώτερο όριο της που βρίσκεται η στρατόπαυση (50 km). Η θερμοκρασία στη στρατόσφαιρα αυξάνεται καθώς απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια της Γης εξαιτίας της απορρόφησης από το όζον της υπεριώδους ακτινοβολίας του Ηλίου. Η αύξηση αυτή της θερμοκρασίας οφείλεται στο ότι το μεγαλύτερο ποσοστό του όζοντος που προστατεύει τη Γη από τις υπεριώδεις ακτινοβολίες είναι συγκεντρωμένο στην στρατόσφαιρα. Η απορρόφηση των υπεριωδών ακτινοβολιών από το στρώμα του όζοντος δικαιολογεί την αύξηση της θερμοκρασίας με το ύψος.




**Σχήμα 1.9 Τα στρώματα της ατμόσφαιρας της Γης.**

Οι άνεμοι που επικρατούν στη στρατόσφαιρα είναι μεταβαλλόμενοι, εξαρτώνται από το γεωγραφικό πλάτος και αλλάζουν κατεύθυνση δύο φορές το χρόνο. Ενδεικτικά, η ταχύτητα των στρατοσφαιρικών ανέμων πάνω από τον Ισημερινό είναι της τάξης των 18 km /h ενώ στους πόλους η αντίστοιχη ταχύτητα είναι 200 km /h [14]. Περισσότερα στοιχεία σχετικά με τη συμπεριφορά των ανέμων παρουσιάζονται στην αναφορά [15]. Το Σχήμα 1.10

δείχνει την ταχύτητα του ανέμου σε σχέση με το ύψος για διάφορα ύψη. Αν και όπως αναφέρθηκε προηγούμενος το είδος του ανέμου μπορεί να ποικίλει ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και την εποχή, ένα σχήμα παρόμοιο με το Σχήμα 1.10 προκύπτει συνήθως.



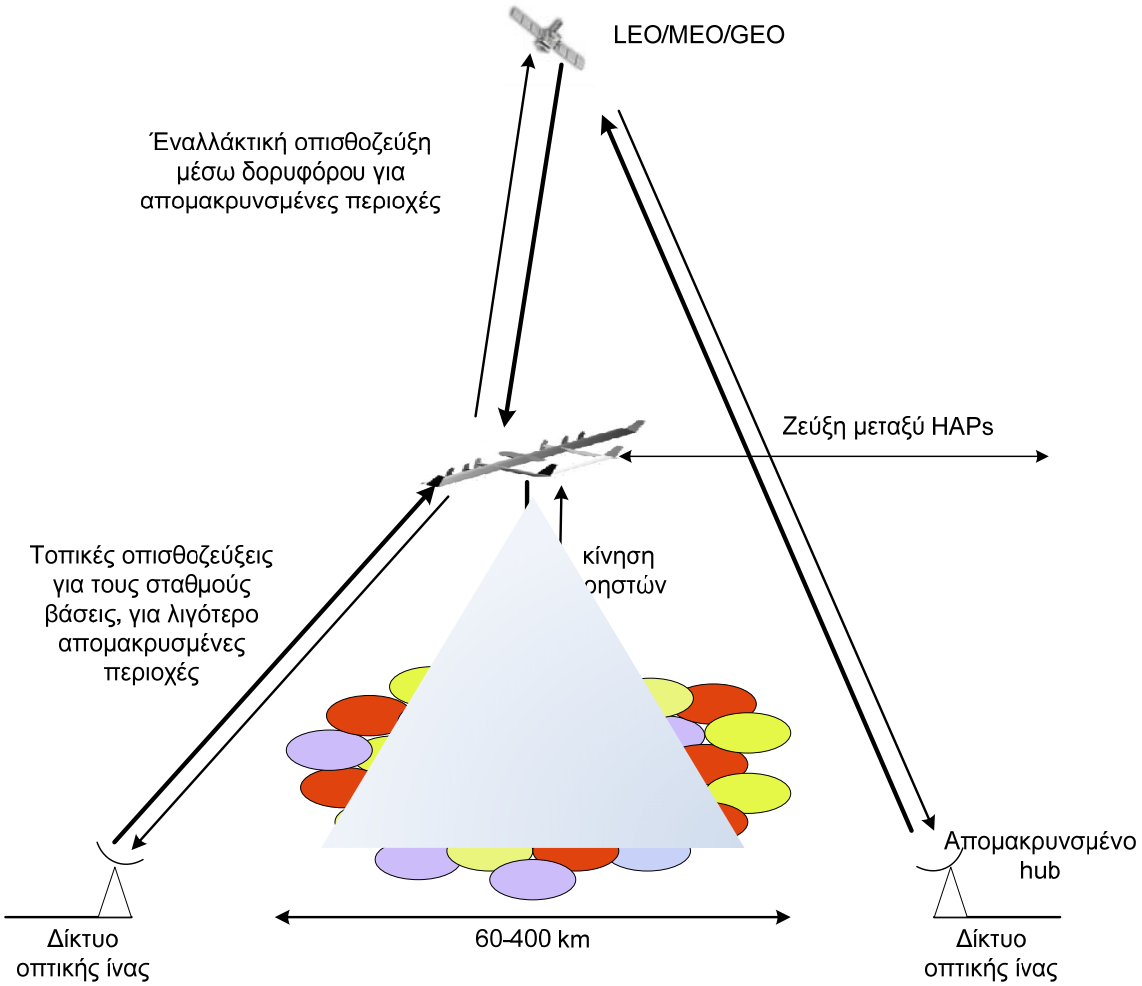

**Σχήμα 1.10 Η ταχύτητα του ανέμου σε σχέση με το ύψος.**

Η μεγάλη πρόκληση που έχουν να αντιμετωπίσουν τα HAPs, είτε είναι αερόπλοια είτε είναι αεροπλάνα, είναι να καταφέρουν να διατηρήσουν τη θέση τους, αντιμετωπίζοντας τους ανέμους. Για το λόγο αυτό έχει επιλεχθεί ένα ύψος λειτουργίας μεταξύ των 13 και 30 km. Το διάστημα αυτό στα περισσότερα μέρη του κόσμου αντιπροσωπεύει ένα στρώμα από σχετικά ήπιους ανέμους και αναταραχές. Η εναέρια κυκλοφορία των αεροπλάνων γίνεται σε ύψη μικρότερα των 16,7 km (55000 πόδια), οπότε δεν υπάρχει πρόβλημα με την εναέρια κυκλοφορία παρά μόνο κατά τη διαδικασία τοποθέτησης των πλατφορμών στα προτεινόμενα ύψη λειτουργίας.

Ένας επιπλέον παράγοντες που αποτρέπει τους ερευνητές στη χρησιμοποίηση των υψομέτρων μεταξύ 30 και 50 km είναι η πυκνότητα του αέρα. Επειδή η πυκνότητα της ατμόσφαιρας μειώνεται σημαντικά με το ύψος, η πλατφόρμα που θα σχεδιασθεί για μεγάλα ύψη, θα πρέπει να έχει μεγαλύτερη ποσότητα αερίου. Η ατμοσφαιρική πυκνότητα στα 50 km είναι 90 φορές μικρότερη από ότι στα 20 km, επομένως μια πλατφόρμα τύπου αερόστατου στα 50 km θα χρειάζεται 90 φορές περισσότερο αέριο για να διατηρηθεί σε αυτό το ύψος από ότι θα χρειαζόταν αν βρισκόταν στα 20 km. Αυτός είναι ένας από τους λόγους που οι στρατοσφαιρικές πλατφόρμες σχεδιάζονται για να λειτουργούν στα 21-25 km.

## 1.6 Επικοινωνιακές Εφαρμογές

Στο Σχήμα 1.11 μπορεί κανείς να δει ένα γενικό σενάριο επικοινωνίας με HAPs. Οι υπηρεσίες προσφέρονται από ένα μόνο HAP, με άνω και κάτω ζεύξεις με τα τερματικά των χρηστών, μαζί με οπισθοζεύξεις όπως απαιτείται για το ινοοπτικό δίκτυο κορμού (fibre backbone network). Ζεύξεις μεταξύ HAPs μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τη σύνδεση ενός δικτύου από HAPs, ενώ ζεύξεις μπορούν επίσης να εγκατασταθούν, αν χρειαστεί, μέσω δορυφόρων απευθείας από το HAP.




**Σχήμα 1.11 Σενάριο επικοινωνίας με HAPs**

Η περιοχή κάλυψης ενός HAP καθορίζεται κυρίως από τη διάδοση οπτικής επαφής (τουλάχιστον για την ζώνη των υψηλών συχνοτήτων) και από την ελάχιστη γωνία ανύψωσης του τερματικού που βρίσκεται στη Γη. Στην πράξη το χαμηλότερο όριο ανύψωσης για BWA υπηρεσίες θα πρέπει να είναι $5^o$, ενώ οι $15^o$ χρησιμοποιούνται περισσότερο όταν θέλουμε να αποφύγουμε την υπερβολική ανωμαλία του εδάφους. Σε υψόμετρο 21 km πάνω από λείο έδαφος, οι $5^o$ (για αγροτικές περιοχές-rural) συνεπάγονται μία περιοχή κάλυψης ακτίνας 203 km [25]. Εντούτοις, για την εξυπηρέτηση κάποιων εφαρμογών, όπως π.χ. σε αστικές (urban) ή προαστιακές (suburban) περιοχές, τόσο ευρεία

κάλυψη δεν είναι απαραίτητη ή δεν χρειάζεται. Έτσι για γωνία ανύψωσης $15^o$ προκύπτει μία περιοχή κάλυψης ακτίνας 76,5 km [25].

Στα Σχήματα 1.12 και 1.13 που ακολουθούν παρουσιάζεται ένα σενάριο κάλυψης του ελλαδικού χώρου με HAPs. Στο Σχήμα 1.12 χρησιμοποιούμε γωνία ανύψωσης $5^o$ οπότε έχουμε μία περιοχή κάλυψης ακτίνας 203 km και στο Σχήμα 1.13 χρησιμοποιούμε γωνία ανύψωσης $15^o$ οπότε έχουμε μία περιοχή κάλυψης ακτίνας 76,5 km.

**Σχήμα 1.12 Κάλυψη της Ελλάδας από ένα δίκτυο με HAPs, για γωνία ανύψωσης $5^o$.**

**Σχήμα 1.13 Κάλυψη της Ελλάδας από ένα δίκτυο με HAPs, για γωνία ανύψωσης $15^0$.**

Υπάρχει η δυνατότητα υποδιαίρεσης μίας περιοχής σε ένα μεγάλο αριθμό μικρότερων ζωνών κάλυψης, ή κυψελών, ώστε να παρέχουν μεγαλύτερη συνολική χωρητικότητα, η οποία βελτιστοποιείται μέσω της τεχνικής επαναχρησιμοποίησης των συχνοτήτων. Το μέγεθος, ο αριθμός και το σχήμα αυτών των κυψελών εξαρτάται από τον σχεδιασμό της κεραίας πάνω στο HAP, με το πλεονέκτημα ότι η διαμόρφωση των κυψελών μπορεί να προσδιοριστεί κεντρικά από το HAP, με αποτέλεσμα να γίνεται έτσι ευκολότερα η προσαρμογή ώστε να ταιριάζει στις εκάστοτε ανάγκες της κυκλοφορίας. Ωστόσο, η αρχιτεκτονική του HAP μπορεί εύκολα να υποστεί αλλαγές όσο αναφορά την κατανομή των πόρων της, με αποτέλεσμα να μπορεί να παρέχει μεγαλύτερο εύρος ζώνης και να μεγιστοποιήσει την χωρητικότητα.

Σε σύγκριση με τις υπηρεσίες που παρέχουν οι γεωστατικοί δορυφόροι, στην περίπτωση των στρατοσφαιρικών πλατφορμών οι κυψέλες μπορεί να είναι αισθητά μικρότερες, αφού το ελάχιστο μέγεθος δέσμης κηλίδας (spot beam) από ένα δορυφόρο περιορίζεται από τις διαστάσεις της κεραίας που φέρει. Μεγαλύτερες χωρητικότητες είναι επίσης εφικτές μέσω των HAPs, εξαιτίας του πολύ πιο εύκολου υπολογισμού του επιθυμητού προϋπολογισμού ζεύξης (link budget) εν συγκρίσει με τους δορυφόρους, αφού το HAP έχει ένα σχετικά στενότερο εύρος. Αυτό αντιπροσωπεύει ένα πλεονέκτημα ισχύος της τάξης των 34 dB συγκρινόμενο με ένα LEO δορυφόρο, ή των 66 dB σε σχέση με ένα γεωστατικό δορυφόρο. Τέλος, σε σύγκριση με επίγεια σχήματα, ένα απλό HAP μπορεί να προσφέρει χωρητικότητα συγκρίσιμη με αυτή που παρέχεται από ένα μεγάλο αριθμό ξεχωριστών σταθμών βάσης, αν αναλογιστεί κανείς και τον αριθμό των εμποδίων που αποφεύγονται εξαιτίας της γεωμετρίας μιας ζεύξης με HAP.

## *1. Εφαρμογές BWA*

Η σημαντικότερη εφαρμογή των HAPs είναι γνωστή ως B-FWA ή BWA. Η εφαρμογή αυτή παρέχει πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων για τον χρήστη. Η κατανομή της συχνότητας για ένα HAP που λειτουργεί στα 47/48 GHz προσφέρει εύρος ζώνης $2 \times 300$ MHz, το οποίο κατανέμεται ισάξια τόσο στον χρήστη όσο και στην οπισθοζεύξη, και αυτό κατανέμεται ξανά 50:50 στις ζεύξης αποστολής και λήψης δεδομένων (Μια εξαίρεση παρουσιάζεται εκεί όπου οι ζεύξεις χρησιμοποιούνται κυρίως για υπηρεσίες του διαδικτύου, όπου η κατανομή δεν είναι συμμετρική). Σύμφωνα με έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί στο σενάριο του HeliNet, προτείνεται ένα σχήμα με συνολική περιοχή κάλυψης ανά HAP διαμέτρου 60 km και με 121 κυψέλες, κάθε μία από τις οποίες έχει 5 km ονομαστική διάμετρο στην Γη. Η ισχύς του HAP για τη ζεύξη λήψης δεδομένων είναι 1 watt ανά κυψέλη. Η ισχύς αυτή μπορεί να υποστηρίξει ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων πάνω από 60 Mbit/s, οι οποίες είναι εντός του εύρους ζώνης που απαιτείται ανά κυψέλη των 25 MHz, όταν χρησιμοποιείται 16-QAM ή υψηλότερης τάξης σχήμα διαμόρφωσης. Το συνολικό ωφέλιμο φορτίο μέσα από αυτή την συντηρητική παρουσίαση είναι παραπάνω από 7 Gbit/s, παρόλο που το σχήμα του HALO ισχυρίζεται 100 Gbit/s.

Είναι αποδεδειγμένο ότι οι απαιτήσεις στην οπισθοζεύξη είναι τόσο αυστηρές όσο και στη ζεύξη του χρήστη, αφού ότι αποστέλλεται πρέπει να είναι δυνατόν και να ληφθεί. Καμία απλή ασύρματη ζεύξη δεν μπορεί να παρέχει πλήρη χωρητικότητα στην οπισθοζεύξη, με αποτέλεσμα αυτό να είναι ανάγκη να πραγματοποιηθεί μέσω κυψελωτού σχήματος. Έτσι, θα υπάρχει η ανάγκη ενός αριθμού διασκορπισμένων επίγειων σταθμών για την επιστροφή των δεδομένων, παρόλο που αυτοί μπορεί να είναι πολύ λιγότεροι από τον αριθμό των κυψελών που εξυπηρετούνται, αφού οι οπισθοζεύξεις θα χειρίζονται μεγαλύτερη χωρητικότητα, με υψηλότερης τάξης σχήματα διαμόρφωσης. Ευτυχώς η τοποθεσία αυτών των επίγειων σταθμών δεν είναι σημαντικό να βρίσκεται μέσα στην περιοχή κάλυψης, με αποτέλεσμα να είναι πιθανή η τοποθέτηση τους σε οροφές κτιρίων.

## *2. Εφαρμογές 3G/2G*

Τα HAPs μπορούν να προσφέρουν δυνατότητα ανάπτυξης υπηρεσιών επόμενης γενιάς (3G) στην κινητή τηλεφωνία, ή ακόμα και στις τρέχουσες (2G) υπηρεσίες καθώς η χρήση των ζωνών IMT-2000 (3G) από τα HAPs εγκρίνεται από την ITU. Ένας απλός σταθμός βάσης σε ένα HAP με μία κεραία με ευρύ εύρος δέσμης μπορεί να εξυπηρετήσει μία ευρεία περιοχή. Η κάλυψη μπορεί να αποδειχτεί πλεονεκτικότερη πάνω από μία αραιοκατοικημένη περιοχή. Εναλλακτικά, ένας αριθμός από μικρότερες κυψέλες μπορεί να αναπτυχθεί με τις κατάλληλες κατευθυντικές κεραίες. Τα πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν άμεση έναρξη των εφαρμογών που θα καλύπτουν μια μεγάλη περιοχή, αναλογικά τακτοποιημένη διαδρομή διάδοσης και μηδενική εγκατάσταση επίγειων σταθμών.

### 3. *Δίκτυο των HAP*

Ένας αριθμός από HAPs μπορεί να αναπτυχθεί σε ένα δίκτυο για την κάλυψη μιας ολόκληρης περιοχής. Για παράδειγμα, όπως είδαμε και προηγουμένως, στα Σχήματα 1.12 και 1.13 φαίνονται διάφορα HAPs τα οποία εξυπηρετούν την περιοχή της Ελλάδας. Ζεύξεις μεταξύ των HAP μπορούν να πραγματοποιηθούν στις υψηλές EHF[1] (Extremely High Frequencies) συχνότητες ή χρησιμοποιώντας οπτικές ζεύξεις. Αυτή η τεχνολογία είναι ήδη εφαρμοσμένη στους δορυφόρους και έτσι δεν θα παρουσιάσει σημαντικά προβλήματα.

### 4. *Εφαρμογές που συμβάλλουν στην ανάπτυξη του κόσμου*

Τα HAPs προσφέρουν ένα ευρύ φάσμα δυνατοτήτων σε υπηρεσίες που συμβάλλουν στην ανάπτυξη του κόσμου. Αυτές περιλαμβάνουν τηλεφωνία σε αγροτικές περιοχές, αναμετάδοση και γενικά υπηρεσίες που αφορούν στη μεταφορά δεδομένων. Τέτοιες υπηρεσίες είναι πολύ σημαντικές σε περιοχές όπου η υποδομή του εδάφους είναι δύσκολη.

### 5. *Εφαρμογές σε επείγουσες καταστάσεις ή καταστροφές*

Τα HAPs μπορούν άμεσα να αναπτυχθούν ώστε να ενισχύσουν τις υπάρχουσες υπηρεσίες σε καταστάσεις καταστροφών. (π.χ. σεισμοί, πλημμύρες), ή στην αποκατάσταση κάποιας βλάβης στο κεντρικό δίκτυο.

### 6. *Στρατιωτικές επικοινωνίες*

Η αιτία που κάνει ελκυστική τη χρήση των HAPs για στρατιωτικούς σκοπούς συνάγεται στην ικανότητα τους να αναπτύσσονται άμεσα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κόμβοι ανάμεσα σε ήδη υπάρχοντα ασύρματα δίκτυα, ή ως 'αντικαταστάτες' των δορυφόρων – σε αυτή τη περίπτωση μεταφέροντας το φορτίο του δορυφόρου και λειτουργώντας με συμβατικά τερματικά

Στα διάφορα στρατιωτικά σενάρια, τα αεροσκάφη είναι περιορισμένα να χρησιμοποιούνται σε πολύ χαμηλά ύψη για επιχειρήσεις ανεύρεσης ναρκών και έτσι η χρήση τους για επικοινωνίες παραμένει πλήρως εκμεταλλεύσιμη. Επίσης μπορεί κανείς να σκεφτεί ότι τα αεροσκάφη HAPs θα είναι ευάλωτα σε εχθρικές επιθέσεις, έχουν όμως ένα πλεονέκτημα παρά το μεγάλο τους μέγεθος· το εξωτερικό τους περίβλημα είναι διαφανές στα μικροκύματα και έτσι αποτελούν ένα πολύ δύσκολα ανιχνεύσιμο από τα ραντάρ αντικείμενο.

[1] Πρόκειται για τη ζώνη συχνοτήτων 30-300 GHz.

## 1.6 Υπάρχουσες Μετρήσεις

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω τα HAPs αναπτύσσονται σε ένα μεγάλο αριθμό παγκόσμιων ερευνητικών προγραμμάτων. Στη συνέχεια αναφέρονται οι πιο σημαντικές υπάρχουσες τηλεπικοινωνιακές μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί με τη χρήση πλατφορμών.

*i. Παροχή υπηρεσιών IMT-2000 χρησιμοποιώντας στρατοσφαιρικό, ηλιακά τροφοδοτούμενο αεροπλάνο [16].*

Τον Ιούνιο και Ιούλιο του 2002 πραγματοποιήθηκαν για πρώτη φορά πειράματα εκπομπής ψηφιακής τηλεόρασης και συστημάτων κινητών επικοινωνιών τρίτης γενιάς, χρησιμοποιώντας ένα μη επανδρωμένο ηλιακά τροφοδοτούμενο αεροπλάνο. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο νησί Kauai στη Hawaii στις 28 Ιουνίου και στις 20 Ιουλίου. Η στρατοσφαιρική πλατφόρμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Pathfinder Plus της AeroVironment, το οποίο είναι η αναβαθμισμένη έκδοση του Pathfinder. Το Pathfinder Plus πέταξε σε ύψος 20 km διαγράφοντας κυκλική πορεία ακτίνας περίπου 3 km. Στον Πίνακα 1.2 παρουσιάζονται οι προδιαγραφές του Pathfinder Plus.

**Σχήμα 1.14 Το Pathfinder Plus.**

| | |
|---|---|
| Άνοιγμα πτερύγιων | 36.9 m |
| Μήκος αεροσκάφους | 3.4 m |
| Βάρος χωρίς το τηλεπικοινωνιακό φορτίο | 330 kg |
| Αριθμό μοτέρ συνεχούς τάσης/ Ισχύς | 8/ 1.5 KWatt το καθένα |
| Διαθέσιμη ηλιακή ισχύς | 12 KWatt μέγιστο |
| Ταχύτητα σε ύψος 18km | Περίπου 100 Km/ ώρα |
| Τηλεπικοινωνιακό φορτίο σε ύψος 20 km | 50 kg μέγιστο |
| Τροφοδοσία εξοπλισμού | 500 Watt μέγιστο |
| Ρεκόρ ύψους πτήσης | 24 km (1998) |

**Πίνακας 1.2 Προδιαγραφές του Pathfinder Plus.**

Στο πρώτο πείραμα δεν κατέστη δυνατή η εγκατάσταση σύνδεσης καθώς υπήρχαν απρόσμενες παρεμβολές στην ανάστροφη ζεύξη. Στο δεύτερο πείραμα χρησιμοποιήθηκε μία στοιχειοκεραία 9 στοιχείων με χαμηλής στάθμης πλευρικούς λοβούς για να αποφευχθούν οι παρεμβολές. Έτσι επιτευχθεί ρυθμός μετάδοσης 12.2 kbps για φωνητική επικοινωνία και ρυθμός μετάδοσης 64 kbps για βιντεοεπικοινωνία. Στον Πίνακα 1.3 αναφέρονται οι προδιαγραφές του εξοπλισμού του σκάφους.

| | |
|---|---|
| Συνολικό βάρος | 18 kg το καθένα |
| Μήκος εξωτερικού περικαλύμματος | 1.5 m |
| Διάμετρος κυλίνδρου | 35 cm |
| Κατανάλωση ισχύος | 120 W το καθένα |
| TX/ RX κεραίες | Κυκλικά πολωμένη στοιχειοκεραία 2 στοιχείων<br>-κέρδος κορυφής: περίπου 10 dBi<br>-εύρος δέσμης: 30 μοίρες (κατεύθυνση στοιχειοκεραίας)<br>Κυκλικά πολωμένη στοιχειοκεραία 9 στοιχείων (3X3) (χρησιμοποιήθηκε μόνο ως RX κεραία στο 2$^{o}$ πείραμα )<br>-κέρδος κορυφής: περίπου 13 dBi<br>-εύρος δέσμης: 20 μοίρες |

**Πίνακας 1.3 Προδιαγραφές τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού του Pathfinder Plus.**

Ο εξοπλισμός εδάφους ήταν ένα κυψελωτό τηλέφωνο με ρυθμό μετάδοσης 12.2 kbps για φωνητική επικοινωνία και 64 kbps για βιντεοεπικοινωνία. Επίσης χρησιμοποιήθηκε μία κάρτα υπολογιστή τύπου UE με ρυθμό μετάδοσης 384 kbps στην εμπροσθόφορη (forward) ζεύξη και 64 kbps στην ανάστροφη (reverse). Η ισχύς εξόδου του πομπού στο σκάφος προσαρμόστηκε περίπου στα 33 dBm και η ισχύς εξόδου του κυψελωτού 3G τηλεφώνου στα 24 dBm. Για την εγκατάσταση της ζεύξης απαιτείται στην RX είσοδο λόγος σήματος-προς- παρεμβολές-και-θόρυβο (C/(N+I)) περίπου 4.2 dB. Μετά την εγκατάσταση της η ζεύξη μπορεί να λειτουργήσει με πτώση του λόγου C/(N+I) περίπου στα -15 dB.

*ii. Συστήματα ευρυεκπομπής με χρήση στρατοσφαιρικών πλατφορμών και τα προκαταρτικά τους πειράματα [17].*

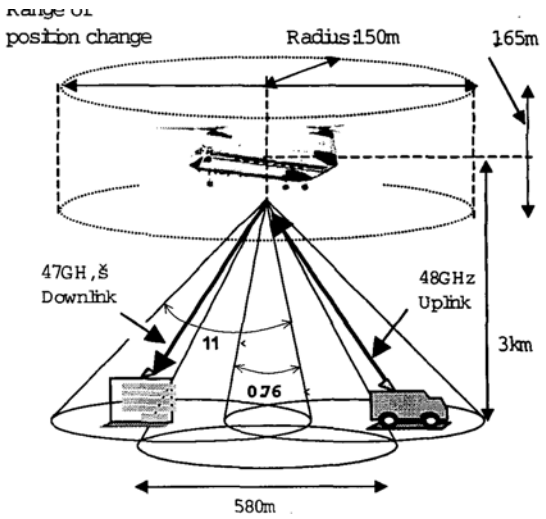
Στη συγκεκριμένη δοκιμή η μελέτη επικεντρώθηκε στα ακόλουθα συστήματα ευρυεκπομπής πολυμέσων :

i. 47/48 GHz ευρυζωνικά συστήματα εκπομπής για τη μετάδοση προγραμμάτων, ή μελλοντική Υπερυψηλής Ευκρίνειας Τηλεόραση UDTV (Ultra High Definition TV) με ρυθμό μετάδοσης 50 Mbps.
ii. Εξαιρετικά Υψηλής Συχνότητας UHF (Ultra High Frequencies)[2] ψηφιακά συστήματα ευρυεκπομπής Υψηλής Ευκρίνειας Τηλεόραση HDTV (High Definition TV) περίπου των 20 Mbps

[2] Πρόκειται για τη ζώνη συχνοτήτων 300-3000 MHz.

**a. 47/48 ευρυζωνικά συστήματα εκπομπής**:

Σε αυτό το προκαταρτικό πείραμα ένα ελικόπτερο χρησιμοποιήθηκε για να αντικαταστήσει το αερόπλοιο. Το ελικόπτερο έφτασε σε ύψος μέχρι και 3 km. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.15 το ελικόπτερο ελέγχεται για να κρατηθεί σε μία θέση που βρίσκεται μέσα σε ένα κύλινδρο ακτίνας 150 m και ύψους 165 m.




**Σχήμα 1.15 Εικόνα των πρωταρχικών δοκιμών μετάδοσης της μέτρησης ii.a.**

Ο αναμεταδότης που βρίσκεται πάνω στο ελικόπτερο συντίθεται από τρεις ξεχωριστούς αναμεταδότες καθένας από τους οποίους χρησιμοποιεί χοανοκεραίες πολλαπλής δέσμης MBH (Multi Beam Horn), τύπου αυλακωτής χοάνης. Το σήμα των 48 GHz από το έδαφος ενισχύεται από ενισχυτή LNA και υποβιβάζεται σε IF των 2.5 GHz. Αλλάζοντας τη δέσμη χοάνης μέσω διάταξης μεταγωγής, το σήμα αναβιβάζεται και μεταδίδεται από τη χοανοκεραία. Τμήμα του προϋπολογισμού ζεύξης (link budget) παρουσιάζεται στον παρακάτω Πίνακα 1.4:

| | | |
|---|---|---|
| Συχνότητα άνω ζεύξης | 48.05 | GHz |
| Συχνότητα κάτω ζεύξης | 47.35 | GHz |
| Απόσταση διάδοσης | 3.2 | km |
| Ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας | 25.8 | Mbps |
| Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων | 56 | Mbps |
| **Άνω ζεύξη** | | |
| TX ισχύς εξόδου | -10 | dBW |
| Κέρδος επίγειας κεραίας | 21 | dBi |
| Απώλειες διάδοσης | -136 | dB |
| Κέρδος κεραίας RX | 18.5 | dBi |
| Επιδορυφόρια RX ισχύς | -108 | dBW |
| **Κάτω ζεύξη** | | |
| TX RF ισχύς εξόδου | -8 | dBW |
| Κέρδος επιδορυφόριας κεραίας | 18.5 | dBi |
| Απώλειες διάδοσης | -136 | dB |
| Κέρδος κεραίας RX | 21 | dBi |
| Επιδορυφόρια RX ισχύς | -106 | dBW |

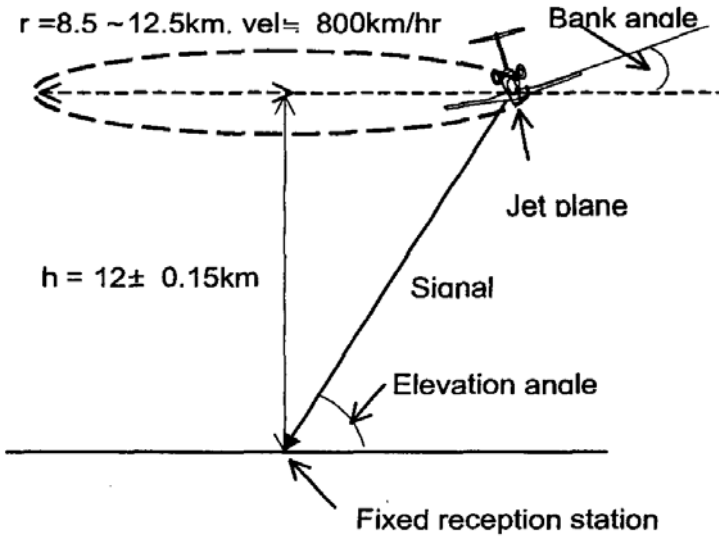
**Πίνακας 1.4 Προϋπολογισμός ζεύξης του συστήματος της μέτρησης ii.a.**

Για την μείωση των απωλειών λόγω βροχής πάρθηκαν τα εξής μέτρα :

- Έλεγχος της RF ισχύς εξόδου ανάλογα με τις αποσβέσεις λόγω βροχής.
- Αλλαγή τύπου διαμόρφωσης ανάλογα με το σηματοθορυβικό λόγο εξαιτίας των αποσβέσεων λόγω βροχής.
- Μέθοδος διόρθωσης σφαλμάτων με διεμπλοκή μακράς διάρκειας.

**b. UHF ψηφιακά HDTV συστήματα ευρυεκπομπής:**

Στην προκαταρτική αυτή δοκιμή UHF ψηφιακής εκπομπής ο αναμεταδότης ήταν πάνω σε ένα αεροπλάνο jet, το οποίο έκανε κύκλους σε ύψος 12 km πάνω από την επίγεια βάση που γίνονταν οι μετρήσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.16.




**Σχήμα 1.16 Εικόνα της δοκιμής Ευρυεκπομπής HDTV της μέτρησης ii.b.**

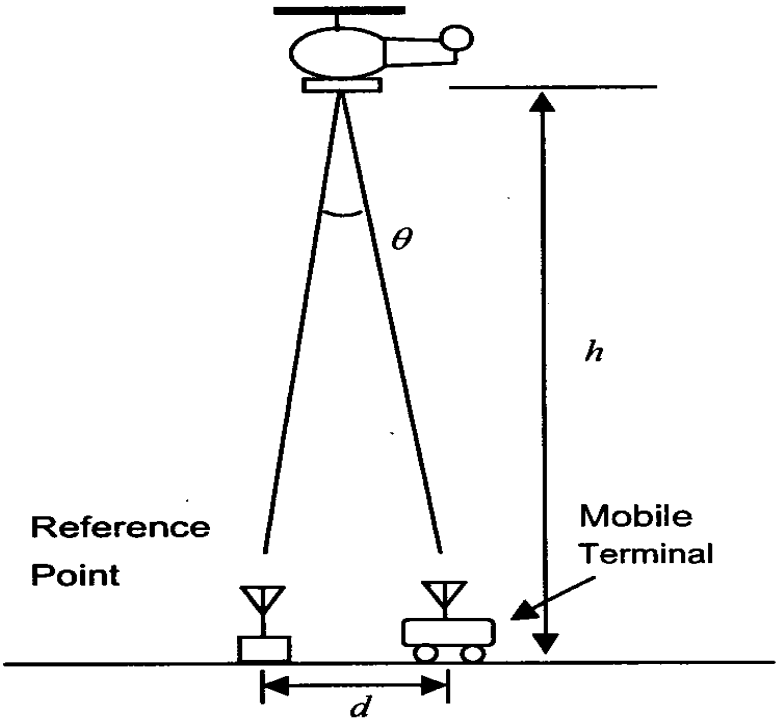
Στον Πίνακα 1.5 παρουσιάζεται τμήμα του link budget :

| | |
|---|---|
| Συχνότητα | 479 MHz |
| Μετάδοση | OFDM – 64QAM |
| Ρυθμός κώδικα | 7/8 |
| Μορφή Video | 1080I |
| Απαιτούμενος ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας | 22 Mbps |
| **Επιδορυφόριος αναμεταδότης** | |
| Ισχύς εξόδου | 7.0 dBW |
| Κέρδος κεραίας | 2 dBi |
| Απώλειες διάδοσης | -110.9 dB |
| **Επίγειος σταθμός** | |
| Κέρδος κεραίας | 2,0 dBi |
| Ισχύς εισόδου | -105.9 dBW |

**Πίνακας 1.5 Προϋπολογισμός ζεύξης συστήματος της μέτρησης ii.b.**

*iii. Πείραμα για τον εντοπισμό της θέσης ενός κινητού τερματικού χρησιμοποιώντας στοιχειοκεραίες τοποθετημένες σε μεγάλο ύψος [18].*

Το συγκεκριμένο πείραμα πραγματοποιήθηκε στο Nagai-Uminote Park το οποίο βρίσκεται κοντά στην πόλη Yokosuka. Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκε ένα ελικόπτερο 'BK117' της Kawasaki Heavy Industries το οποίο μπορεί να φτάσει σε υψόμετρο μέχρι 3000 m. Επειδή το ελικόπτερο είναι γενικά δύσκολο να κρατηθεί σε σταθερή θέση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.17, μετρήθηκε η σχετική προσπίπτουσα γωνία ανάμεσα στα σήματα ενός σημείου αναφοράς με γνωστή θέση και του κινητού τερματικού. Στην συνέχεια υπολογίζεται η σχετική απόσταση μεταξύ των τερματικών. Το ύψος του ελικοπτέρου είναι επίσης απαραίτητο για να υπολογιστεί η απόσταση.




**Σχήμα 1.17 Εγκατάσταση του εξοπλισμού της μέτρησης iii.**

Στους Πίνακες 1.6 και 1.7 φαίνονται οι προδιαγραφές του συστήματος καθώς και ο προϋπολογισμός ζεύξης.

| | |
|---|---|
| RF συχνότητα | 2.3 GHz |
| Διάρθρωση στοιχειοκεραίας | L-διδιάστατη γραμμική στοιχειοκεραία οχτώ στοιχείων |
| Array elements | Γραμμικά πολωμένη κεραία μικροταινίας |
| Απόσταση στοιχείων | μισό μήκος κύματος του φέροντος κύματος |
| RF ισχύς εξόδου | Max 1 W |
| Πόλωση | κυκλικά πολωμένο κύμα |
| IF συχνότητα | 450 kHz |
| Ρυθμός δειγματοληψίας | 3.6 MHz |
| A/D ανάλυση | 12 bit |
| Μέθοδος διαμόρφωσης | καμία ή 4/π QPSK |

**Πίνακας 1.6 Προδιαγραφές του συστήματος της μέτρησης iii.**

| | |
|---|---|
| Κεντρική συχνότητα | 2.3 GHz |
| Κέρδος κεραίας μετάδοσης | 6.5 dBi |
| Κέρδος κεραίας λήψης | 5.0 dBi |
| Λοιπές απώλειες | 2.5 dB |
| Ευαισθησία δέκτη | - 75 ~ - 50 dBm |
| Απόσταση | 3000 m \| 900 m |
| Απώλεια διάδοσης | 109 dB \| 98 dB |
| Ισχύς εξόδου | 30 dBm \| 20 dBm |

**Πίνακας 1.7 Προϋπολογισμός ζεύξης της μέτρησης iii.**

*iv. Ενοποίηση χρηστών στο Ευρύτερο Ευρυζωνικό Δίκτυο [19].*

Το πρόγραμμα CAPANINA [7] διεξήγαγε ένα αριθμό δοκιμών για να εξετάσει τη δυνατότητα παροχής ευρυζωνικών υπηρεσιών μέσω στρατοσφαιρικών πλατφορμών. Δύο διαφορετικές αέριες πλατφόρμες χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση των δοκιμών: Μία προσδεμένη πλατφόρμα και ένα στρατοσφαιρικό μπαλόνι.

Η πρώτη δοκιμή ξεκίνησε τον Αύγουστο του 2004 και ολοκληρώθηκε τον Οκτώβριο του ίδιου έτους. Η δοκιμή έγινε στο Pershore της Αγγλίας. Χρησιμοποιήθηκε ένα σφαιρικό, προσδεμένο αερόστατο ικανό να λειτουργεί σε ένα ύψος 300 m. Οι δοκιμές διεξήχθησαν υπό χαμηλή ταχύτητα αέρα μιας και το αερόστατο δεν ήταν και τόσο αεροδυναμικό. Στο αερόστατο τοποθετήθηκαν κεραίες τεχνολογίας PAT και οι συχνότητες λειτουργίας ήταν 28/29 GHz και 28/31 GHz. Το καλώδιο σύνδεσης του αερόστατου περιείχε μία οπτική ίνα που συνέδεε το αερόστατο με ένα μόντεμ στο έδαφος και το καλώδιο τροφοδοσίας του αερόστατου.

Από τη διεξαγωγή του πειράματος έγινε φανερό ότι με τη χρήση του αερόστατου παρέχονται οι εξής δυνατότητες:

- Ευρυζωνική Σταθερή Ασύρματη Πρόσβαση BFWA χρησιμοποιώντας τη ζώνη συχνοτήτων 28 GHz.
- Διατερματική δικτυακή συνδεσιμότητα (end-to-end network connectivity)
- Παροχή υπηρεσιών γρήγορου Internet και βίντεο κατ' απαίτηση (video on demand)
- Οπτικές επικοινωνίες εδάφους-HAP

Η δεύτερη δοκιμή πραγματοποιήθηκε το καλοκαίρι του 2005 στο Kiruna στη Σουηδία. Χρησιμοποιήθηκε ένα στρατοσφαιρικό μπαλόνι για μίας μικρής διάρκειας πτήση μερικών ωρών. Για την διεξαγωγή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε η ζώνη συχνοτήτων 28/29 GHz, λαμβάνοντας υπόψη τις καταχωρήσεις συχνοτήτων που επιτρέπονται από τις Σουηδικές αρχές.

Η κεραία που χρησιμοποιήθηκε ήταν μία κεραία διηλεκτρικού ραδιοφακού (dielectric lens antenna) με ενσωματωμένο τροφοδότη, σχεδιασμένη για να παράγει ένα σταθερό κέρδος σε όλη την περιοχή κάλυψης. Η ζεύξη χιλιοστομετρικής ζώνης (millimeter-wave link) χρησιμοποίησε το πρότυπο 802.11b, χρησιμοποιώντας ένα εμπορικό ασύρματο μόντεμ με

ενδιάμεση συχνότητα εισόδου και εξόδου 2.45 GHz για την τροφοδοσία του χιλιοστομετρικού πομποδέκτη. Στο έδαφος χρησιμοποιήθηκε ένα μεγάλης διαμέτρου πιάτο το οποίο τοποθετήθηκε ώστε να δείχνει το HAP. Το μόντεμ μπορούσε να αλλάξει αυτόματα ρυθμό μετάδοσης μεταξύ 1 και 11 Mb/s ανάλογα με την ισχύ του σήματος εισόδου. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για να εξεταστεί η δυνατότητα δημιουργίας οπισθοζεύξεως υψηλού ρυθμού διάδοσης και να μετρηθούν οι ατμοσφαιρικοί παράμετροι στη ζεύξη.

*ν. Δοκιμαστικά πειράματα και αποτελέσματα στη χιλιστομετρική ζώνη συχνοτήτων [20].*

Το πανεπιστήμιο του York στα πλαίσια του προγράμματος CAPANINA [7] διεξήγαγε πειράματα τα οποία τελικά κατάφεραν τα εξής:

- Ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση μέσω HAP.
- Παροχή μιας σειράς αντιπροσωπευτικών υπηρεσιών όπως:
    1. Καταφόρτωση ήχου
    2. Καταφόρτωση βίντεο
    3. Συνεχής ροή βίντεο
    4. Φυλλομέτρημα ιστού
    5. Ηλεκτρονικό ταχυδρομείο
    6. Αναφόρτωση αρχείων
    7. Κάμερα μέσω διαδικτύου
- Προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση.
- Εντοπισμό της θέσης του HAP από τον επίγειο σταθμό με τη χρήση δεδομένων GPS.
- Σχεδιασμό του ωφέλιμου φορτίου ώστε να ανταποκριθεί σε καταστάσεις χαμηλής πίεσης περιβάλλοντος.
- Παρείχε επίσης μία σειρά χρήσιμων πληροφοριών για μελλοντικά πειράματα.

Η επίγεια κεραία χιλιοστομετρικών ραδιοσυχνοτήτων στηρίχθηκε στο τηλεσκόπιο Meade και το HAP έφτασε σε ύψος 24260 m. Οι συχνότητες που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

| | |
|---|---|
| Άνω ζεύξη | 29.2005 - 29.3125 GHz (29.2565 GHz κεντρική) |
| Κάτω ζεύξη | 28.1925 - 28.3045 GHz (28.2485 GHz κεντρική) |
| Διαχωρισμός | 1.008 GHz |
| Εύρος ζώνης συχνοτήτων | 112 MHz |
| IF συχνότητα | 2.437GHz (Κανάλι 6) |
| LO συχνότητα | 13.40975 GHz |
| Συχνότητα αναφοράς ταλαντωτή | LO/136 =98.601103 MHz |

**Πίνακας 1.8 Συχνότητες που χρησιμοποιήθηκαν στη της μέτρησης ν.**

Σημειώνουμε τέλος ότι δεν υπήρχαν υπερβολικές απώλειες λόγω βροχής και το συνολικό κέρδος της κεραίας ήταν 43 dBi .

*vi. Το Ιαπωνικό Εθνικό Πρόγραμμα [21], [22], [23].*

Το κυβερνητικό αυτό πρόγραμμα ξεκίνησε το 1998. Η Ιαπωνική Αντιπροσωπεία Αεροδιαστημικής Εξερεύνησης (JAXA) συντονίζει τις αεροναυτικές προσπάθειες και οι τηλεπικοινωνιακές δραστηριότητες συντονίζονται από το εθνικό Ινστιτούτο Πληροφοριακής και Επικοινωνιακής Τεχνολογίας (NICT).

Το Νοέμβριο του 2004 πραγματοποίησαν με επιτυχία πειράματα χρησιμοποιώντας ένα μη επανδρωμένο αερόπλοιο. Το πείραμα έγινε στη ζώνη δοκιμών Taiki στο Hokkaido στην Ιαπωνία. Το σκάφος έχει μήκος 67 m, πετάει σε ύψος 4 Km, και φέρει ωφέλιμο φορτίο 400 kg.

**Σχήμα 1.18 Το αεροσκάφος χαμηλής τροχιάς της μέτρησης vi.**

Οι δοκιμές που έγιναν περιλάμβαναν:

- Αποτίμηση του καναλιού από το αερόπλοιο στο έδαφος στα 2 GHz.
- Αποτίμηση της γεωγραφικής κάλυψης, χρησιμοποιώντας συμβατικούς ψηφιακούς HDTV δέκτες.
- Ραδιεντοπισμός από την πλατφόρμα στο έδαφος.
- Ελεύθερου χώρου οπτικές επικοινωνίες εδάφους-πλατφόρμας

*vii. Space Data Corporation [24].*

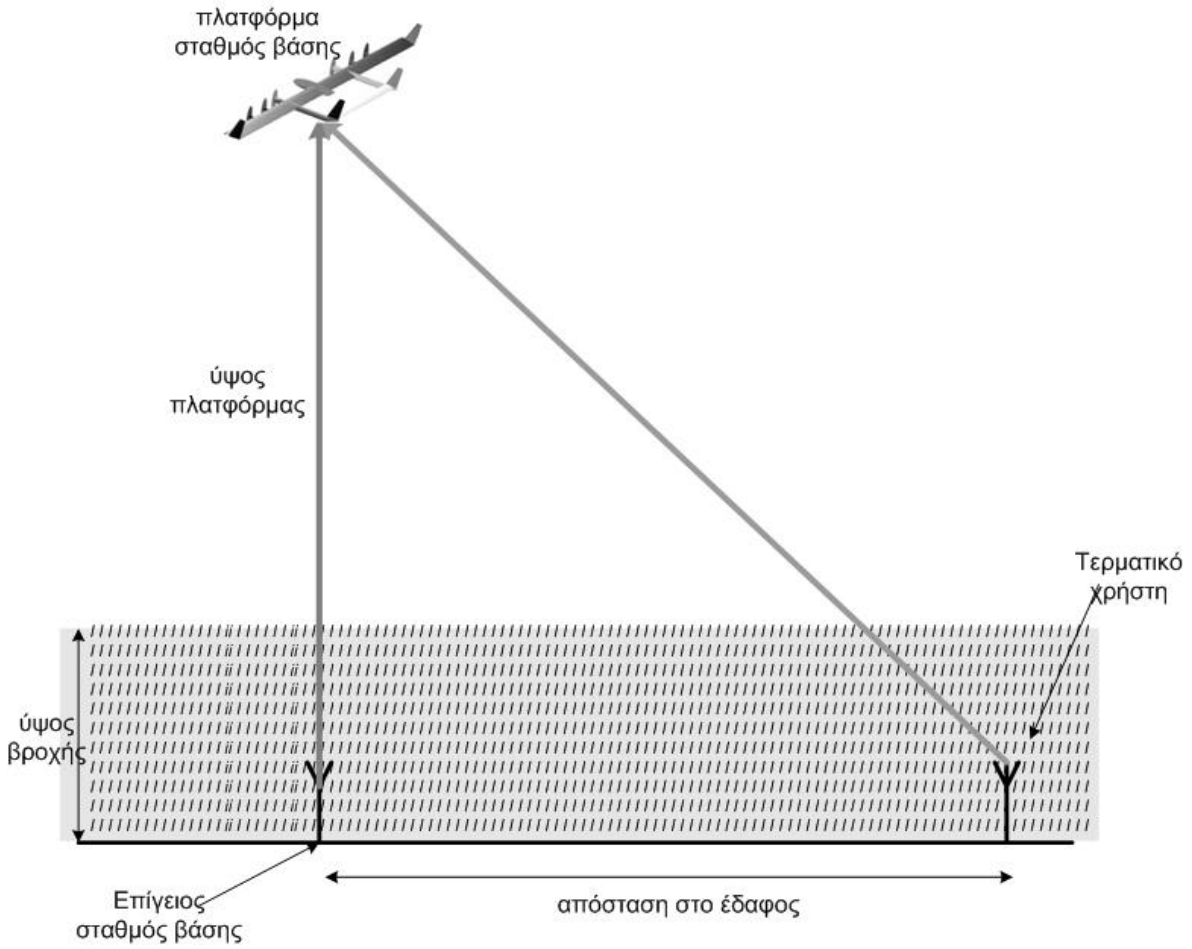
Η Space Data Corporation είναι μία Αμερικανική εταιρεία που παρέχει ασύρματες τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές. Χρησιμοποιεί ιπτάμενα μπαλόνια τα οποία ανεβάζει κάθε 8 με 12 ώρες σε σημεία κοντά στην περιοχή κάλυψης. Τα μπαλόνια λειτουργούν σε ύψος 24.4-30.5 km (80000-10000 ft) και καλύπτουν μία περιοχή διαμέτρου περίπου 580 km.Η κάλυψη για την ώρα περιορίζεται στο Τέξας, στην Οκλαχόμα και στη Λουϊζιάνα, με περιορισμένη κάλυψη στις γειτονικές πολιτείες. Η συχνότητα λειτουργίας είναι τα 900 MHZ, όπου η Space Data έχει μια καταχώρηση εύρους 1.7 MHz.

## 1.7 Πλεονεκτήματα στις επικοινωνίες μέσω των HAPs

Οι επικοινωνίες μέσω των HAPs έχουν έναν αριθμό από πιθανά πλεονεκτήματα, τα οποία παρατίθενται παρακάτω:

1. *Μεγάλη περιοχή κάλυψης (σε σύγκριση με τα επίγεια συστήματα)*

Η γεωμετρία της ανάπτυξης ενός HAP σημαίνει ότι μία ζεύξη μεγάλου εύρους υφίσταται μικρότερη αναλογικά απόσβεση λόγω βροχής σε σύγκριση με μία επίγεια ζεύξη ίδιας απόστασης. Αυτό οφείλεται στη μικρότερη πλάγια διαδρομή (slant path) μέσω της ατμόσφαιρας που προκύπτει με τη χρήση ενός HAP. Στο Σχήμα 1.19 φαίνεται η μικρότερη πλάγια διαδρομή διάδοσης που προκύπτει από τη χρήση του HAP. Στις χαμηλές χιλιοστομετρικές ζώνες, αυτό μπορεί να παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα στο προϋπολογισμό ζεύξης ανάμεσα σε μεγάλες κυψέλες.




**Σχήμα 1.19 Πλάγια διαδρομή διάδοσης στη βροχή.**

*2. Υψηλή ορατότητα και μικρή καθυστέρηση διάδοσης.*

Τα HAPs μπορεί να θεωρηθούν ένας εξαιρετικά μεγάλου ύψους πύργος, με ύψος 20 km, που μπορεί να καλύψει μία περιοχή ακτίνας 50 – 220 km με μεγάλη πιθανότητα οπτικής επαφής. Επειδή η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για την διάδοση μπορεί να μειωθεί, εξαιτίας των χαμηλών απωλειών μετάδοσης μεταξύ των HAPs και των επίγειων τερματικών, τόσο η κεραία όσο και ο υπόλοιπος εξοπλισμός μετάδοσης μπορούν να κατασκευαστούν μικρότερα από τα αντίστοιχα των δορυφορικών συστημάτων. Επίσης έχουμε ελάχιστη καθυστέρηση φωνής όταν χρησιμοποιείται σε εφαρμογές τηλεφωνίας.

*3. Ελαστικότητα στο να ανταποκρίνεται στις εκάστοτε απαιτήσεις της κυκλοφορίας.*

Τα HAPs είναι ιδανικά στο να φροντίσουν και να προσαρμόσουν την κατανομή των πόρων, π.χ. ελαστική επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων και μεγέθους κυψελών, ανεπηρέαστα από την φυσική τοποθεσία των σταθμών βάσεων. Αυτή η σχεδόν σε πραγματικό χρόνο προσαρμογή μπορεί να παρέχει αρκετά αυξημένη συνολική χωρητικότητα συγκρινόμενη με τα ήδη υπάρχοντα επίγεια ή δορυφορικά συστήματα .

*4. Χαμηλό κόστος.*

Παρόλο που μέχρι σήμερα δεν υπάρχει άμεση εμπειρία όσο αναφορά το λειτουργικό κόστος, ένα μικρό σύμπλεγμα από HAPs μπορεί να αποδειχθεί σημαντικά φθηνότερο από την κατασκευή και εκτόξευση ένα γεωστατική δορυφόρου ή από μία ομάδα από LEO δορυφόρους. Ένα δίκτυο από HAPs είναι επίσης φθηνότερο να αναπτυχθεί από ένα επίγειο δίκτυο με ένα μεγάλο αριθμό από σταθμούς βάσεις.

*5. Δυνατότητα επέκτασης του δικτύου.*

Οι υπηρεσίες μπορούν αρχικά να παραχθούν από μία απλή πλατφόρμα και το δίκτυο σταδιακά να επεκταθεί ανάλογα με τις ανάγκες για κάλυψη και χωρητικότητα. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με το δίκτυο των LEO δορυφόρων όπου απαιτεί ένα μεγάλο αριθμό δορυφόρων για να επιτύχει συνεχή κάλυψη. Ένα επίγειο δίκτυο είναι επίσης πιθανό να χρειάζεται ένα μεγάλο αριθμό από σταθμούς βάσεις πριν θεωρηθεί ως πλήρως λειτουργικό.

*6. Άμεση ανάπτυξη.*

Θεωρώντας ότι υπάρχει η διαθεσιμότητα των κατάλληλων πλατφορμών, θα είναι πιθανό να σχεδιαστεί, να αναπτυχθεί και να τεθεί σε χρήση σχετικά γρήγορα μία υπηρεσία βασισμένη σε HAPs. Από την άλλη πλευρά οι δορυφόροι συνήθως απαιτούν μερικά χρόνια από την αρχική τους απόκτηση μέχρι την εκτόξευση και την λειτουργία τους, με αποτέλεσμα οι δυνατότητες τους να είναι συχνά απαρχαιωμένες την στιγμή της εκτόξευσης. Παρομοίως, η ανάπτυξη επίγειων δικτύων περιλαμβάνει σπατάλη χρόνου σε διαδικασίες σχεδιασμού και φυσικής εργασίας. Αντίθετα τα HAPs επιτρέπουν άμεση προσφορά υπηρεσιών, με αποτέλεσμα οι προμηθευτές τους να παρέχουν άκρως ανταγωνιστικές υπηρεσίες .

Επίσης, υπάρχει ένας ακόμα λόγος που τα HAPs πρέπει να είναι ικανά να εκτοξευθούν και τεθούν σε χρήση μέσα σε λίγες μέρες ή ακόμα και ώρες. Αυτό θα διευκολύνει την χρήση τους σε έκτακτες καταστάσεις. Τέτοια παραδείγματα είναι: φυσικές καταστροφές, στρατιωτικές αποστολές, αποκατάσταση του επίγειου δικτύου όταν αυτό παρουσιάζει προβλήματα, υπερφόρτωση εξαιτίας μεγάλης συμφόρησης χρηστών, π.χ. σε ένα σημαντικό γεγονός.

*7. Αναβάθμιση της πλατφόρμας και ωφέλιμου φορτίου.*

Τα HAPs μπορούν να είναι στον σταθμό τους για μεγάλα χρονικά διαστήματα, όπου πολλοί ισχυρίζονται ότι μπορούν να φτάσουν τα 5 ή και περισσότερα χρόνια. Μπορούν βέβαια να κατέβουν στο έδαφος για συντήρηση ή αναβάθμιση των παρεχόμενων υπηρεσιών τους, πράγμα που αποτελεί ένα πολύ θετικό στοιχείο λαμβάνοντας υπόψη την συνεχή τεχνολογική ανάπτυξη.

*8. Φιλικά προς το περιβάλλον.*

Εξαιτίας της χαμηλής ενέργειας μετάδοσης τόσο του HAP όσο και των επίγειων τερματικών, το ασύρματο σύστημα που χρησιμοποιούν τα HAPs, είναι φιλικό προς το περιβάλλον από ηλεκτρομαγνητικής άποψης, καθώς τα πλεονάζοντα ραδιοκύματα ακτινοβολούνται ελάχιστα στο περιβάλλον. Για παράδειγμα, παρόλο που η ισχύς μετάδοσης για έναν Πολύ Υψηλής Συχνότητας[3] VHF (Very High Frequencies) αναμεταδότη που εκπέμπει από ένα ψηλό πύργο σε μια πυκνοκατοικημένη περιοχή μπορεί να είναι 50 kW, το ραδιοκύμα μπορεί να μην φτάσει ούτε τα 100 km εξαιτίας των κτιρίων και των βουνών. Αν το σήμα μεταδοθεί από την στρατόσφαιρα, η ισχύς μετάδοσης μπορεί να είναι μόνο μερικές δεκάδες Watt, αρκετή όμως να καλύψει την ίδια περιοχή.

Τα HAPs βασίζονται στην ηλιακή ενέργεια για την λειτουργία τους και δεν απαιτούν οχήματα για την εκτόξευση τους, αποφεύγοντας έτσι κάθε είδους καύσιμα που σχετίζονται

[3] Πρόκειται για τη ζώνη συχνοτήτων 30-300 MHz.

με αυτά. Χρησιμοποιούν φιλικά προς το περιβάλλον επαναχρησιμοποιούμενα σκάφη, αποφεύγοντας έτσι την ανάγκη για μετακίνηση μεγάλου αριθμού επίγειων ιστών αλλά και όποιων υποδομών συνδέονται με αυτά.

Στον Πίνακα 1.9 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλες οι διαφορές μεταξύ επίγειων σταθμών, HAPs καθώς και δορυφόρων που χρησιμοποιούνται σε ευρυζωνικές υπηρεσίες.

| | **Επίγεια (π.χ. B-FWA)** | **HAP** | **LEO δορυφόροι** | **GEO δορυφόροι** |
|---|---|---|---|---|
| Κάλυψη σταθμού ( τυπική διάμετρος) | < 1 Km. | Μέχρι 200 Km. | > 500 Km. | παγκόσμια |
| Μέγεθος κυψέλης (διάμετρος) | 0.1 - 1 Km. | 1 - 10 Km. | c. 50 Km. | ελάχιστη 400 Km. |
| Συνολική περιοχή υπηρεσιων | Υπηρεσίες σημείου | Εθνικές/περιφερειακές | παγκόσμιες | σχεδόν παγκόσμιες |
| Μέγιστη ταχύτητα μετάδοσης ανά χρήστη | 155 Mbit/s | 25 – 155 Mbit/s | < 2 Mbit/s πάνω 64 Mbit/s κάτω | 155 Mbit/s |
| Ανάπτυξη συστήματος | αρκετοί σταθμοί βασης πριν την χρήση | ευέλικτη | πολλοί δορυφόροι πριν την χρήση | ευέλικτη, αλλά με μεγάλο χρόνο καθοδήγησης |
| Εκτιμώμενο κόστος υποδομής | ποικίλλει | περίπου $ 50 εκατομμύρια | $ 9 δισεκατομμύρια | > $ 200 δισεκατομμύρια |
| Ημερομηνία λειτουργίας | 2000 | 2003 – 2008? | 2005 | 1998 |

**Πίνακας 1.9 Σύγκριση των παρεχόμενων ευρυζωνικών υπηρεσιών από επίγειους σταθμούς, HAPs και δορυφόρους**

## 1.8 Προκλήσεις και Ζητήματα

Η καινοτομία των επικοινωνιών μέσω HAPs δημιουργεί κάποιες νέες σκέψεις στον τομέα της παροχής υπηρεσιών (π.χ. B-FWA) και θέτει κάποια καίρια ζητήματα που θα συμβάλλουν στην ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιών. Ακόμα και οι ίδιες οι πλατφόρμες αποτελούν πρόκληση αλλά ταυτόχρονα υπάρχουν και κάποια κρίσιμα ζητήματα όπως:

*Απαιτήσεις στο επίπεδο του συστήματος:*

Το δίκτυο των HAPs για την παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών θα χρειαστεί ένα επαναπροσδιορισμό του βασικού σχεδιασμού των κυψελωτών υπηρεσιών. Η ανάπτυξη του δικτύου επικεντρώνεται κυρίως στον σχεδιασμό συχνοτήτων των διαφορετικών αρχιτεκτονικών δεσμών κηλίδας (spot beams), οι οποίες υπόκεινται σε μία μεγάλη ποικιλία γωνιών και αλλαγών στο μέγεθος της ζεύξης, καθώς επίσης και στην επαναχρησιμοποίηση των συχνοτήτων τόσο για την ζεύξη του χρήστη όσο και για την οπισθοζεύξη. Η αρχιτεκτονική του δικτύου θα χρειαστεί να εκμεταλλευτεί δυνατότητες επικοινωνίας μεταξύ διαφορετικών HAPs ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή κάλυψη και συνδεσιμότητα.

*Διάδοση και διαφορισμός (diversity):*

Στις παρεχόμενες από τα HAPs υπηρεσίες έχουν διανεμηθεί από την ITU συχνότητες στην χιλιοστομετρική ζώνη συχνοτήτων, στα 47/48 GHz (καθώς επίσης και στα 28 GHz στην Περιοχή 3 της ITU[4] – κυρίως στην Ασία). Οι μηχανισμοί διάδοσης από τα HAPs δεν είναι απόλυτα προσδιορισμένοι σε αυτές τις υψηλές συχνότητες: η απόσβεση λόγω βροχής είναι σημαντική σε αυτές τις συχνότητες, με αποτέλεσμα μία από τις βασικές απαιτήσεις να είναι στατιστικά μοντέλα που αφορούν στη διασπορά αλλά και στις αποσβέσεις λόγω βροχής. Αυτό θα επιτρέψει να ληφθούν υπόψη τα κατάλληλα περιθώρια και να δοθεί έμφαση σε όποια προβλήματα προκύψουν σχετικά με τα σχέδια επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας κατά την ανάπτυξή του επιπέδου του συστήματος. Ένα εξίσου σημαντικό αντικείμενο έρευνας είναι να καθοριστούν οι πιο κατάλληλες τεχνικές διαφορισμού (π.χ. χώρος, χρόνος και συχνότητα) για κάθε τύπο κίνησης.

*Διαμόρφωση και κωδικοποίηση:*

Για την βελτιστοποίηση της χωρητικότητας του δικτύου, κατάλληλα σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης θα χρειαστούν για την εξυπηρέτηση των ευρυζωνικών τηλεπικοινωνιών, με συγκεκριμένες απαιτήσεις σε ποιότητα υπηρεσιών (QoS - Quality of Service) και ρυθμού σφάλματος bit (BER - Bit Error Rate), εφαρμοσμένες κάθε φορά σε διαφορετικές συνθήκες διάδοσης. Προσαρμοστικές τεχνικές θα παρέχουν βέλτιστη απόδοση, χρησιμοποιώντας σχήματα χαμηλού ρυθμού μετάδοσης τα οποία θα

[4] Για την καταχώρηση των συχνοτήτων η ITU χωρίζει των κόσμο σε 3 περιοχές. Ο τρόπος χωρισμού περιγράφεται αναλυτικά στο 2ο κεφάλαιο.

περιλαμβάνουν μία δυναμική κωδικοποίηση εμπροσθόδοτης διόρθωσης σφάλματος (FEC – Forward Error Correction) όταν η απόσβεση είναι μεγάλη, αλλά και υψηλού ρυθμού μετάδοσης πολυεπίπεδα σχήματα διαμόρφωσης όταν οι συνθήκες είναι καλές.

*Κατανομή πηγών (Resource Allocation) και πρωτόκολλα δικτύου:*

Τα σχήματα ανάθεσης του διαύλου αλλά και της κατανομής των πηγών θα πρέπει να αναπτυχθούν αποκλειστικά για το σενάριο του HAP, το οποίο διαφέρει σημαντικά από κάθε σενάριο που αφορά τα επίγεια συστήματα ή τους δορυφόρους. Τα σχήματα θα πρέπει να είναι προσαρμοσμένα στην κυκλοφορία δεδομένων κατά την μετάδοση πολυμέσων, αλλά επίσης να λαμβάνουν υπόψη την τοπολογία του συστήματος καθώς και τα σχήματα επιλογής της διαμόρφωσης/κωδικοποίησης. Αρχικά θα πρέπει να επιλεχθούν τα πιο κατάλληλα πρωτόκολλα δικτύου και πρωτόκολλα MAC (Media Access Control). Για υπηρεσίες BWA είναι πιθανό να χρησιμοποιηθεί μία τροποποιημένη έκδοση για τα ευρυζωνικά standards IEEE 802.16/ETSI BRAN. Η συμπλήρωση του δικτύου με τις επίγειες και/ή τις δορυφορικές αρχιτεκτονικές χρίζει επίσης προσεκτικού σχεδιασμού.

*Κεραίες:*

Η τεχνολογία της κεραίας θα είναι πολύ μεγάλης σημασίας στις BWA εφαρμογές που προσφέρονται από τα HAPs. Θα χρειαστεί ένας μεγάλος αριθμός δεσμών κηλίδας (spot beams), τα οποία θα παραχθούν είτε από ένα σύνολο από χοανοκεραίες ή από κάποια διάταξη κεραιών σε φάση. Η απόδοση του πλευρικού λοβού είναι ένα σημαντικό θέμα, το οποίο επηρεάζει ολοκληρωτικά την χωρητικότητα του συστήματος αλλά και τις παρεμβολές μεταξύ κυψελών. Για την συχνότητα των 48 GHz αυτή η τεχνολογία είναι απαραίτητη τόσο για την κεραία πάνω στο HAP όσο και για τα επίγεια τερματικά.

*Ακινητοποίηση της πλατφόρμας στο σταθμό και σταθερότητα:*

Η ικανότητα ενός HAP να διατηρεί την θέση του μη επηρεαζόμενο από τους διάφορους ανέμους, είναι μια μεγάλη πρόκληση και θα επηρεάσει σημαντικά την βιωσιμότητα των υπηρεσιών επικοινωνίας. Η θέση του HAP είναι πιθανό να αναπαρίσταται ως μία στατιστική πιθανότητα σε σχέση με την παραμονή του σε ένα συγκεκριμένο χώρο, π.χ. σε μία κυλινδρική τοποθεσία. Παρόμοια παραδείγματα από τα προγράμματα της HeliNet εμφανίζουν διαθεσιμότητα της πλατφόρμας μέσα σε συγκεκριμένα χωρικά όρια, της τάξεως του 99% και 99.9%, που όμως τέτοιες παράμετροι δεν είναι σίγουρα συμβατοί με την πρόνοια των υπηρεσιών επικοινωνίας για την παραδοσιακή διαθεσιμότητα της τάξης του 99,99%. Κάποιες νέες σκέψεις θα πρέπει να γίνουν, κυρίως στην χρήση των πολλαπλών HAPs και στις τεχνικές διαφορισμού.

Η σταθερότητα είναι ένα ακόμα σημαντικό θέμα. Αναπόφευκτα θα υπάρξει κάποιο γύρισμα, κάποια κλίση ή εκτροπή της πλατφόρμας από τη θέση της, εξαιτίας ποικίλλων διαταραχών στη στρατόσφαιρα. Προφανώς μεγαλύτερα σκάφη είναι πιθανόν να εμφανίζουν μεγαλύτερη σταθερότητα. Η αλλαγή θέσης της κεραίας πάνω στο HAP θα γίνεται είτε από μία μηχανικά στερεωμένη υποπλατφόρμα, η οποία μπορεί να είναι ογκώδης, ή μέσω ηλεκτρονικής διευθυνσιοδότησης από μία στοιχειοκεραία. Αυτή η τελευταία τεχνική προσφέρει μεγάλες δυνατότητες, αλλά είναι παράλληλα τεχνολογικά

απαιτητική, ειδικά για την χιλιοστομετρική ζώνη συχνοτήτων η οποία χρησιμοποιείται για ευρυζωνικές υπηρεσίες.

*Μεταπομπή (Handoff):*

Τα περισσότερα σχήματα HAP προορίζονται να χρησιμοποιούν πολλαπλές δέσμες κηλίδας στην περιοχή κάλυψης τους, παράγοντας χωρητικότητα μέσω της επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας. Παρόλο που η αρχιτεκτονική ενός δικτύου BWA είναι πιθανό να έχει κεντρικά ορισμένους χρήστες, είναι πιθανό να συμβαίνουν μεταπομπές αφού η ακτίνα της κεραίας κινείται σύμφωνα με την κίνηση της πλατφόρμας, εξαρτώμενη από τις τεχνικές σταθερότητας του HAP. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τα συμβατικά κινητά κυψελωτά σχήματα , όπου η μεταπομπή εξαρτάται κατά κανόνα από την κίνηση του χρήστη. Το μέγεθος των κυψελών στο έδαφος αλλά και η φυσική σταθερότητα της κατεύθυνσης σκόπευσης της κεραίας του HAP, θα επηρεάσουν την συχνότητα του φαινόμενου. Είναι πιθανό να χρησιμοποιηθούν σταθερές κεραίες στο HAP και να διευκολύνουμε την κίνηση μέσω διαδικασιών μεταπομπής (οι οποίες θα είναι γρήγορες). Ωστόσο, καθυστέρηση και υπερβολικοί περιορισμοί για μελλοντικές υπηρεσίες πολυμέσων (κυρίως βίντεο), μπορεί να θέσουν πιο αυστηρούς περιορισμούς στη μέθοδο μεταπομπής, απ' ότι με τις συμβατικές 2G ή 3G υπηρεσίες, πράγμα που αποτελεί αντικείμενο άμεσης έρευνας.

*Σταθερές ή κατευθυνόμενες επίγειες κεραίες;:*

Τα HAPs θα ποικίλλουν όσον αφορά στη θέση τους, τόσο την πλάγια όσο και την κατακόρυφη. Αυτές οι μετακινήσεις θα επιφέρουν αλλαγές στην γωνία οπτικής επαφής με τα επίγεια τερματικά, με αποτέλεσμα να μπορεί πλέον να αποφασιστεί αν θα χρησιμοποιηθούν σταθερές ή κατευθυνόμενες κεραίες στις επίγειες βάσεις. Αν η γωνιακή μεταβολή είναι μεγαλύτερη από το πλάτος ακτίνας της κεραίας, η οποία θα δίνεται συναρτήσει του κέρδους που απαιτείται για να επιτευχθεί η ζεύξη, τότε κρίνεται απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί κατευθυνόμενη επίγεια τερματική κεραία. Η μεγαλύτερη μεταβολή στη γωνία είναι αμέσως κάτω από το HAP, ωστόσο σε αυτή τη στενή εμβέλεια κεραίες με ευρύτερα πλάτη ακτίνας είναι περισσότερο εφικτά λόγω καλύτερου προϋπολογισμού ζεύξης. Αλλαγές στο κατακόρυφο ύψος ίσως είναι πιο σημαντικές για τις κεραίες όσον αφορά στην περιφερειακή κάλυψη, αν αυτές έχουν αντίστοιχα μεγαλύτερο κέρδος και επομένως περιορισμένο πλάτος ακτίνας. Σαφώς, οι απαιτήσεις για κατευθυνόμενες κεραίες θα αυξήσουν το κόστος των τερματικών, αλλά ίσως κρίνονται απαραίτητες για την επίτευξη υψηλότερης χωρητικότητας.

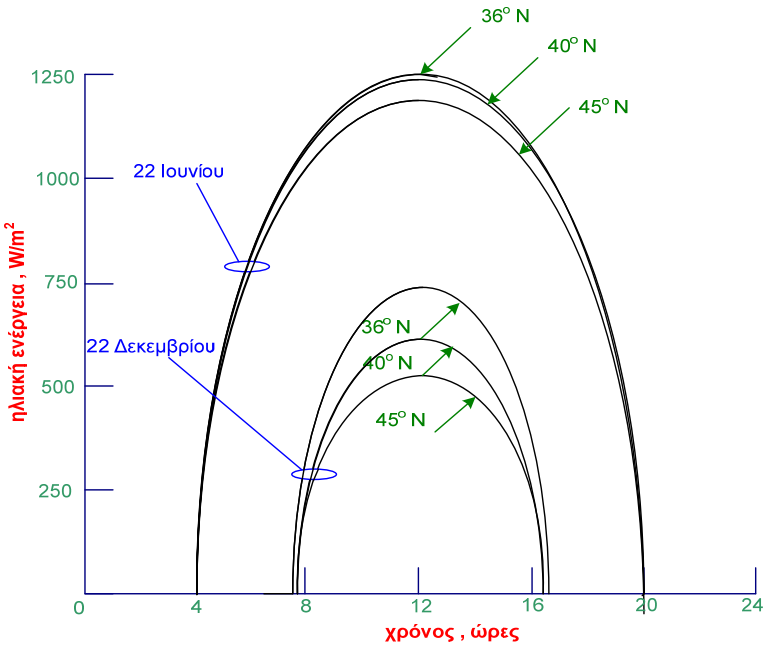
*Ισχύς ωφέλιμου φορτίου:*

Μία σημαντική διαφορά ανάμεσα στους διαφορετικούς τύπους των HAPs είναι η διαθέσιμη ενέργεια στο ωφέλιμο φορτίο. Τυπικά ένα αερόστατο έχει το πολύ 20 kW διαθέσιμα για το ωφέλιμο φορτίο λόγω της μεγάλης επιφανειακής περιοχής πάνω στην οποία μπορεί να αναπτύξει τις ηλιακές κυψέλες. Αεροπλάνα που τροφοδοτούνται από συμβατικές πηγές καυσίμων (π.χ. το σχέδιο HALO από την Angel Technologies) θα έχουν διαθέσιμες υψηλές τιμές ενέργειας. Σε αντίθεση με αυτά, ηλιακά τροφοδοτούμενα αεροπλάνα (π.χ. Heliplat) θα έχουν πιθανόν λιγότερη διαθέσιμη ενέργεια ωφέλιμου φορτίου. Αυτός είναι ένας περιορισμός που έχει προκύψει και για τους δορυφόρους και

έχει σαν συνέπεια τον περιορισμό της RF ενέργειας που χρησιμοποιείται για την ζεύξη δεδομένων, καθώς και τον περιορισμό της συνολικής χωρητικότητας. Πράγματι, τα ηλιακά αεροπλάνα έχουν πολλά κοινά με τους δορυφόρους που χρησιμοποιούνται για επικοινωνίες, όπως την διαθέσιμη ενέργεια από τις ηλιακές πλάκες, το μέγεθος του ωφέλιμου φορτίου αλλά και τον διαθέσιμο χώρο στις πλατφόρμες. Η ενέργεια θα πρέπει να χρησιμοποιείται πιο αποτελεσματικά, κυρίως μέσω προσεκτικού σχεδιασμού της δέσμης κηλίδας και της ίδιας της στοιχειοκεραίας καθώς και μέσω αποτελεσματικών σχημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης.

Σε σύγκριση με ένα δορυφόρο, ένα HAP θα απαιτήσει μεγαλύτερο ποσοστό από την ενέργεια του για να φορτίσει τις μπαταρίες (κυψέλες καυσίμων), γιατί θα πρέπει να αντιμετωπίσει μεγάλα διαστήματα χωρίς φως κατά την διάρκεια κάθε νύχτας, με χειρότερη την περίπτωση της μικρότερης ημέρας (22 Δεκεμβρίου στο νότιο ημισφαίριο). Σε μεγαλύτερα ύψη τόσο οι διαφορετικές γωνίες του ήλιου σχετικά με τις ηλιακές πλάκες ανάμεσα στο καλοκαίρι και τον χειμώνα, όσο και οι μικρές σε διάρκεια ημέρες του χειμώνα δημιουργούν επιπρόσθετα προβλήματα. Το σχήμα 1.20 δείχνει τις διάφορες τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας συναρτήσει των δύο ακραίων εποχιακά ημερών, του ύψους αλλά και της ώρας της ημέρας.

Η ομάδα της Advanced Technologies προτείνει την χρήση αερόστατων στα οποία η τεχνολογία ηλιακής τροφοδότησης θα ενισχύεται από μηχανές diesel, οι οποίες θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν κρίνεται δύσκολη η σταθεροποίηση της πλατφόρμας. Ο προϋπολογισμός, όμως, της ενέργειας είναι πιο κρίσιμος παράγοντας στην τεχνολογία των ηλιακά τροφοδοτούμενων αεροπλάνων, όπου η διαθέσιμη περιοχή για τις ηλιακές κυψέλες και ο επιτρεπόμενος όγκος για τις κυψέλες καυσίμων περιορίζουν την ενέργεια του ωφέλιμου φορτίου, πράγμα που μπορεί να συμβάλλει αποφασιστικά στην βιωσιμότητα της πλατφόρμας.




**Σχήμα 1.20 Διάφορες τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας συναρτήσει των δύο ακραίων εποχιακά ημερών, του ύψους αλλά και της ώρας της ημέρας**

## 1.9 Μελλοντική Εξέλιξη

Αν και μερικοί από τους στόχους των HAPs απέχουν μερικά χρόνια από την πραγματοποίηση τους, υπάρχει μία μικρή αμφιβολία για το αν οι εναέριες πλατφόρμες θα παίξουν τελικά ένα καθοριστικό ρόλο στις ασύρματες επικοινωνίες. Ο συνδυασμός της προώθησης αυτής της τεχνολογίας από τους παρόχους των πλατφορμών αλλά και της τεράστιας ανάγκης για ανάπτυξη νέων εφαρμογών στον τομέα των επικοινωνιών, γεννά πλέον το ερώτημα όχι για το 'αν ' αλλά για το πότε θα εφαρμοστεί αυτή η τεχνολογία.

Ήδη βρίσκονται σε εξέλιξη προγράμματα για εμπορικές εναέριες πλατφόρμες, όπως το πρόγραμμα της HALO, αλλά και το αερόστατο της PWI στην Βραζιλία. Ηλιακά τροφοδοτούμενα αεροπλάνα αναπτύσσονται ταχύτατα, μιάς και αποτελούν τεχνολογία για αερόστατα. Η μεγάλη πρόκληση είναι αν τα HAPs θα καταφέρουν να παρέχουν τον επιθυμητό βαθμό υπηρεσιών, λαμβάνοντας υπόψη τους απρόσμενους ανέμους στα ύψη λειτουργίας τους. Τίθεται ακόμα το ζήτημα της αξιοπιστίας τους όσον αφορά την διάρκεια παραμονής του εναέριου σταθμού στο επιθυμητό υψόμετρο λειτουργίας, με τους κατασκευαστές να μιλούν για διάρκεια ζωής πέντε ή και περισσοτέρων χρόνων, διάστημα πολύ μεγαλύτερο από κάθε ήδη υπάρχουσα εναέρια πλατφόρμα.

Αυτοί όμως οι παράγοντες εξισορροπούνται αν σκεφτεί κανείς τα οικονομικά οφέλη που προκύπτουν από τις παρεχόμενες υπηρεσίες και από τα συνολικά έξοδα λειτουργίας τους. Υψηλές διαθεσιμότητες ζεύξης (link availability) μπορεί να μην είναι απαραίτητες σε πολλά σενάρια ενός απλού HAP, είτε εξαιτίας των ποικίλλων τεχνικών ή γιατί υπηρεσίες με διαθεσιμότητα 99.99% δεν απαιτούνται. Αν σκεφτεί κανείς και την δυνατότητα επαναφοράς του HAP στην γη για συντήρηση, το ζήτημα για μεγάλη διάρκεια ζωής μπορεί να γίνει λιγότερο σημαντικό.

Ένα από τα τεχνικά εμπόδια για τους κατασκευαστές των HAPs, είτε αυτά είναι ηλιακά τροφοδοτούμενα αεροπλάνα ή αερόστατα, έχει να κάνει με τον τρόπο αποθήκευσης της ενέργειας (τις κυψέλες καυσίμων), θέμα που απαιτεί αρκετή δουλειά σε αυτό τον τομέα. Παρόλα αυτά πολύτιμες γνώσεις μπορεί να αποκτηθούν από τα πρωτότυπα HAPs σε κλίμακα, αν και πολλά από τα ζητήματα αεροδυναμικής, κατασκευής και ενέργειας δεν προκύπτουν γραμμικά, με αποτέλεσμα τα πραγματικά πρωτότυπα HAPs να πρέπει πρώτα να κατασκευαστούν και να δοκιμαστούν προτού πείσουν τους χρήστες και τους επενδυτές για την βιωσιμότητα τους στις επικοινωνίες.

Σύμφωνα με τις αποδεδειγμένες δυνατότητες για βελτίωση των υπηρεσιών επικοινωνίας, όπως αναφέρθηκαν παραπάνω, προβλέπεται ότι θα δούμε σημαντική ανάπτυξη των HAPs στην παροχή υπηρεσιών επικοινωνίας τα προσεχή χρόνια.

# Βιβλιογραφία

[4] T.C. Tozer, D.Grace, "High-altitude Platforms for Wireless Communications", Electronics and Communication Journal, vol.13, issue 3, pp.127-137, June 2001.

[5] ITU Radio Regulations 1.66A.

[6] R. Miura, M Suzuki, "Preliminary Flight Test Program on Telecom and Broadcasting Using High Altitude Platform Stations ", Wireless Personal Communications, An International Journal, Kluwer Academic Publishers, vol.24, no.2, Jan.2003, pp.341-361

[7] ITU-R Resolution 221 "Use of high altitude platform stations providing IMT-2000 in the bands 1885-1980MHz, 2010-2025MHz and 2110-2170MHz in the Region 1 and 3 and 1885-1980MHz and 2110-2160MHZ in Region 2", WRC-2003, Geneva 2003.

[8] Δικτυακός τόπος της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών, http://www.itu.int/imt

[9] Δικτυακός τόπος του ερευνητικού προγράμματος Helinet, http://www.helinet.piloto.it

[10] Δικτυακός τόπος του Ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος CAPANINA, http://www.capanina.org

[11] Δικτυακός τόπος της εταιρείας κατασκευής εναέριων πλατφορμών Zeppelin, http://www.Zeppelin-nt.com

[12] Δικτυακός τόπος της εταιρείας κατασκευής αερόπλοιων Cargolifter, http://www.Cargolifter.com

[13] Δικτυακός τόπος της εταιρείας κατασκευής εναέριων πλατφορμών Lindstand Baloons Ltd, http://www.lindstrand.co.uk

[14] Δικτυακός τόπος της εταιρείας κατασκευής εναέριων πλατφορμών SkyStation, http://www.Skystation.com

[15] Δικτυακός τόπος της εταιρείας κατασκευής εναέριων πλατφόρμων AeroVironment, http://www.aerovironment.com

[16] Δικτυακός τόπος της εταιρείας Angel Technologies, http://www.angeltechnologies.com

[17] D.Grace, N.E. Daly, T.C. Tozer, A.G. Burr and D.A.J. Pearce, "Providing multimedia communications services from high altitude platforms", *International Journal of Satellite Communications,* Wiley InterScience, vol.19, no.6, November/December2001 pp.559-580.

[18] D. Ortland, W. Skinner, et al, "Measurements of stratospheric wind by the high resolution Doppler imager", Journal of Geophysics Research, vol.101, pp. 10, 351-10,363,1996.

[19] M. Oodo, H. Tsuji, R. Miura, M. Maruyama, M. Suzuki, "Experiment of IMT-2000 Using Stratospheric-Flying Solar-Powered Airplane", Global Telecommunications Conference, vol. 2, pp. 1152-1156, Dec. 2003.

[20] Y. Moishita, R. Miura, M. Oodo, A. Tsuzuku, M. Suzuki, "Broadcasting systems using stratospheric platforms and their preliminary experiments", Wireless Personal Multimedia Communications, vol. 2, pp. 454-458, Oct. 2002.

[21] H. Tsuji, R. Miura, Y. Harima, Y. Nakagawa, T. Fukagawa, H. Akazawa, "An experiment on mobile terminal positioning system with array antennas placed at a high altitude", Wireless Personal Multimedia Communications, vol. 1, pp. 301-304, Oct. 2002.

[22] D. Grace, M. H. Capstick, M. Mohorcic, J. Horwath, M. B. Pallavicini, M. Fitch, "Integrating users into the wider broadband network via high altitude platforms", Wireless Communications, IEEE**,** vol. 12, issue 5, pp. 98-105, Oct. 2005.

[23] A. White, "mm-wave Trial 2 Experiments and Results", CAPANINA.

[24] T. Shimizu, *Japanese SPF Airship Project Progress*, 5th Stratospheric Platforms Systems Workshop, Tokyo, Japan, February 2005, In Japanese/English

[25] R. Miura and M. Suzuki, *R&D Achievements and Future Perspective on Telecommunications and Broadcasting System Using Stratospheric Platform*, 5th Stratospheric Platforms Systems Workshop, Tokyo, Japan, February 2005, In Japanese/English

[26] K. Ohasi, *Promising Features of the Integrated SPF Tracking and Control System*, 5th Stratospheric Platforms Systems Workshop, Tokyo, Japan, February 2005, In Japanese/ English

[27] Δικτυακός τόπος της αμερικανικής εταιρείας παροχής τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών Space Data Corporation, www.spacedata.net

[28] ITU-R RECOMMENDATION F.1500, Preferred characteristics of systems in the fixed service using high altitude platforms operating in the bands 47.2-47.5 GHz and 47.9-48.2 GHz

[29] ITU-R Recommendation F. 1569, "Technical and operational characteristics for the fixed service using high altitude platform stations in the bands 27.5-28.35 GHz and 31.0-31.3 GHz".

# Κεφάλαιο 2

# Μελέτη Διαθέσιμου Φάσματος σε Νέες Συχνότητες για τα Στρατοσφαιρικά Δίκτυα

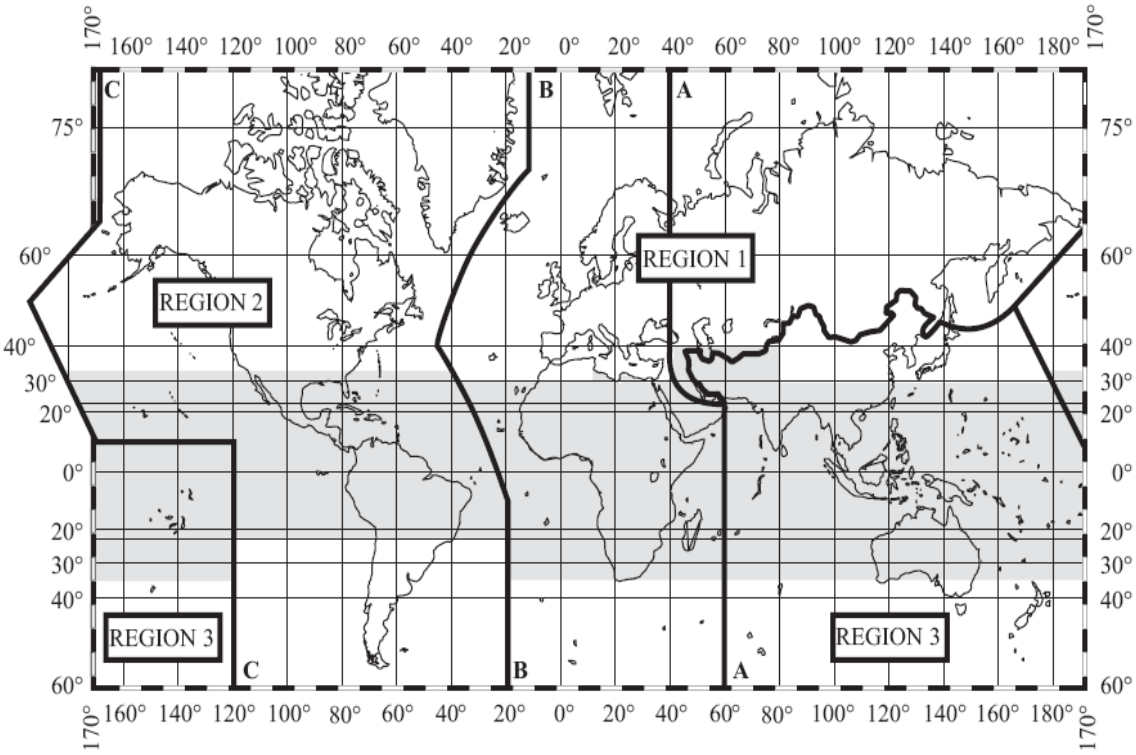
## 2.1 Περιοχές Ανάθεσης Συχνοτήτων ITU-R

Το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων είναι φυσικός πόρος που πρέπει να κατανέμεται σωστά σε όλους τους τύπους ασύρματων υπηρεσιών. Η κατανομή των ζωνών συχνοτήτων έχει σκοπό την ορθή χρήση του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων. Για να λειτουργήσει η τεχνολογία των στρατοσφαιρικών πλατφόρμων εμπορικά θα απαιτηθούν κατάλληλες αναθέσεις φάσματος. Η ανάθεση συχνότητας αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την εγκατάσταση μίας υπηρεσίας βασισμένης σε στρατοσφαιρικές πλατφόρμες. Εντούτοις, οι περισσότερες ζώνες συχνοτήτων χρησιμοποιούνται ήδη από τις διάφορες τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες. Έτσι η ανάθεση του φάσματος σε νέες εφαρμογές ή υπηρεσίες, όπως τα HAPS (High Altitude Platform Stations), είναι συνήθως αρκετά δύσκολη και αποτελεί αντικείμενο συζήτησης σε πολλά συνέδρια της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (ITU-International Telecommunications Union).

Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (Τομέας Ραδιοεπικοινωνιών) ITU-R, εκχωρεί συχνότητες σε κάθε τηλεπικοινωνιακή υπηρεσία, τόσο σε παγκόσμια όσο και σε τοπική βάση. Επιπλέον, σε κάθε κράτος λειτουργεί συγκεκριμένη υπηρεσία που εκχωρεί συχνότητες για εθνική χρήση, μεριμνώντας ώστε οι ραδιοεκπομπές να μην παρενοχλούν άλλες υπάρχουσες εθνικές ή διεθνής ραδιοεπικοινωνίες. Στην Ελλάδα τα υπουργεία Εθνικής Άμυνας και Μεταφορών και Επικοινωνιών έχουν συνυπογράψει τον Εθνικό Κανονισμό Κατανομής Ζωνών Συχνοτήτων (ΕΚΚΖΣ) [2] που περιέχει τις διατάξεις κατανομής συχνοτήτων στην Ελληνική Επικράτεια, για τη χρήση του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων από 9 kHz μέχρι 1000 GHz. Για την ανάθεση των συχνοτήτων η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών έχει διαιρέσει τη Γη σε τρεις Περιοχές (Regions), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.

Οι περιοχές διαχωρίζονται ως εξής:

- Περιοχή 1 (Region 1): Περιλαμβάνει την Ευρώπη, Αφρική, Μέση Ανατολή και χώρες της πρώην Σοβιετικής Ένωσης. Οριοθετείται ανατολικά από τη γραμμή Α και δυτικά από τη γραμμή Β, εξαιρώντας το κομμάτι της Ισλαμικής Δημοκρατίας του Ιράν που εκτείνεται εντός αυτών των ορίων. Επίσης περιλαμβάνει την Αρμενία, το Αζερμπαϊτζάν, τη Ρωσική Ομοσπονδία, τη Γεωργία ,το Καζακστάν, τη Μογγολία, το Ουζμπεκιστάν, το Κυργκιστάν, το Τατζικιστάν, το Τουρκμενιστάν, την Τουρκία και την Ουκρανία καθώς και την περιοχή βόρεια της Ρωσικής Ομοσπονδίας που εκτείνεται μεταξύ των γραμμών Α και C. Στην περιοχή 1 ανήκει και η Ελλάδα.




**Σχήμα 2.1 Περιοχές Καταχώρησης Συχνοτήτων Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών**

- Περιοχή 2 (Region 2): Περιλαμβάνει την Αμερική. Η περιοχή οριοθετείται ανατολικά από τη γραμμή Β και δυτικά από τη γραμμή C.

- Περιοχή 3 (Region 3): Περιλαμβάνει το υπόλοιπο της Ασίας που δεν περιλαμβάνεται στην Περιοχή 1 και την Ωκεανία. Η περιοχή οριοθετείται ανατολικά από τη γραμμή C και δυτικά από τη γραμμή Α.

Κάθε ζώνη συχνοτήτων είναι δυνατό είτε να εκχωρείται αποκλειστικά σε μία υπηρεσία ή να τη μοιράζονται από κοινού περισσότερες. Οι εκχωρήσεις διακρίνονται σε εκχωρήσεις πρωτεύουσας και δευτερεύουσας προτεραιότητας. Στην περίπτωση της από κοινού χρήσης μίας ζώνης συχνοτήτων από μία πρωτεύουσα και μία δευτερεύουσα υπηρεσία, η δευτερεύουσα υπηρεσία υποχρεούται να μην προκαλεί παρεμβολές στην πρωτεύουσα. Ωστόσο όταν και οι δύο υπηρεσίες που χρησιμοποιούν από κοινού το φάσμα είναι πρωτεύουσας ή δευτερεύουσας προτεραιότητας, τότε πρέπει να ληφθεί μέριμνα από τους χρήστες ώστε να μη λειτουργεί το ένα σύστημα εις βάρος του άλλου.

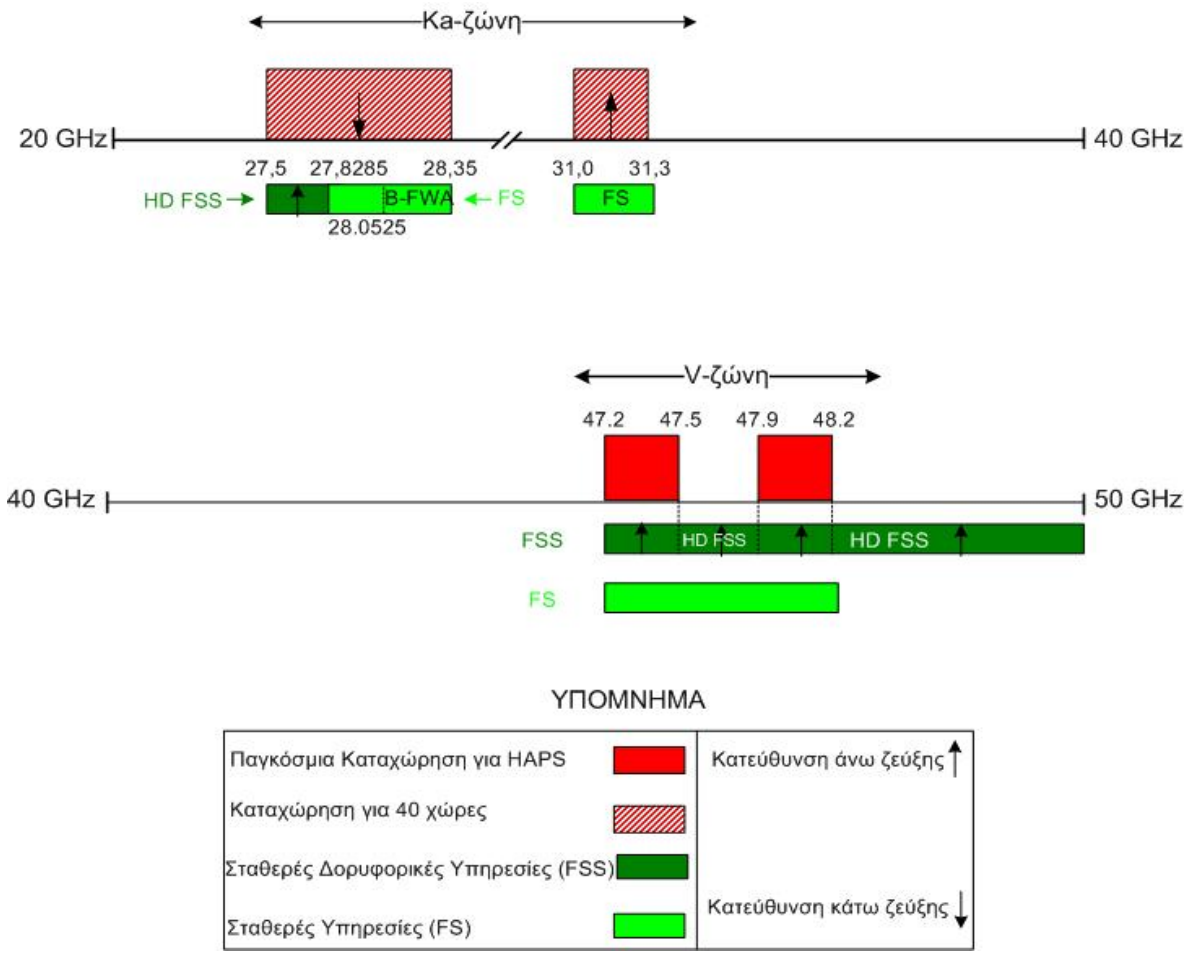
## 2.2 Ζώνες Συχνοτήτων για παροχή Υπηρεσιών απο Στρατοσφαιρικές Πλατφόρμες

Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών και οι ανά τον κόσμο εθνικές τηλεπικοινωνιακές αρχές μετά από εξέταση της τεχνολογίας των συστημάτων με τη χρήση στρατοσφαιρικών πλατφόρμων την κατέταξαν στις Υψηλής Πυκνότητας Σταθερές Υπηρεσίες (High Density Fixed Service). Το Παγκόσμιο Συνέδριο Ραδιοτηλεπικοινωνιών του 1997 (WRC-97-World Radiocommunication Conference) όρισε τις ζώνες συχνοτήτων 47.2-47.5 GHz και 47.9-48.2 GHz για την παροχή σταθερών υπηρεσιών μέσω των στρατοσφαιρικών πλατφόρμων. Το Παγκόσμιο Συνέδριο Ραδιοτηλεπικοινωνιών του 2000 (WRC-2000) επέκτεινε τη μελέτη εκτός από τη ζώνη των 48/47 GHz και στην περιοχή 18-32 GHz. Μετά το πέρας του Παγκόσμιου Συνεδρίου Ραδιοτηλεπικοινωνιών του 2003 (WRC-2003), οι συχνότητες που οριστικοποιήθηκαν για τα συστήματα HAPS είναι στις ζώνες συχνοτήτων των 2.1 GHz των 31/28 GHz και των 48/47 GHz.

Η ζώνη συχνοτήτων 48/47 GHz (V-ζώνη συχνοτήτων) έχει καταχωρηθεί για παγκόσμια χρήση από τις στρατοσφαιρικές πλατφόρμες. Αντίθετα η ζώνη 31/28 GHz (Ka-ζώνη συχνοτήτων) έχει καταχωρηθεί για χρήση σε 40 περίπου χώρες, στις οποίες δε συμπεριλαμβάνονται η Ευρώπη και η Αγγλία. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι ζώνες συχνοτήτων στις οποίες μπορούν να παρέχουν σταθερές και κινητές υπηρεσίες τα στρατοσφαιρικά συστήματα ανά Περιοχή. Επίσης στο Σχήμα 2.2 φαίνεται η καταχώρηση συχνοτήτων για συστήματα στρατοσφαιρικών πλατφόρμων. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η Ελλάδα και οι υπόλοιπες χώρες τις Ευρώπης ανήκουν στην Περιοχή 1.

| Ζώνη Συχνοτήτων | Περιοχές | Κατεύθυνση Ζεύξης | Υπηρεσίες | Υπηρεσίες που μοιράζονται το φάσμα |
|---|---|---|---|---|
| 47.9-48.2 GHz<br>47.2-47.5 GHz | Παγκόσμια | Άνω και κάτω ζεύξεις | Σταθερές | Σταθερές, Κινητές<br>Σταθερές Δορυφορικές |
| 31.0-31.3 GHz<br><br>27.5-28.35 GHz | 40 χώρες Παγκοσμίως (Ασία, Αφρική, Περιοχή 2)<br>40 χώρες Παγκοσμίως (Ασία, Αφρική, Περιοχή 2) | Άνω ζεύξη<br>Κάτω ζεύξη | Σταθερές<br>Σταθερές | Σταθερές, Κινητές<br>Διαστήματος<br>Σταθερές, Κινητές<br>Σταθερές Δορυφορικές |
| 1885-1980 MHz<br>2010-2025 MHz<br>2110-2160 MHz<br>1885-1980 MHz<br>2110-2160 MHz | Περιοχή 1 και 3<br><br>Περιοχή 2 | Άνω και κάτω ζεύξεις<br><br>Άνω και κάτω ζεύξεις | IMT-2000<br><br>IMT-2000 | Σταθερές, Κινητές IMT-2000, PCS<br><br>Σταθερές, Κινητές IMT-2000, PCS |

**Πίνακας 2.10 Ανάθεση συχνοτήτων για τα δίκτυα με τη χρήση στρατοσφαιρικών πλατφορμών**




**Σχήμα 2.2 Καταχώρηση συχνοτήτων για Στρατοσφαιρικές πλατφόρμες.**

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 2.2 και τον Πίνακα 2.1 τα στρατοσφαιρικά συστήματα μπορούν να παρέχουν υπηρεσίες στις Ka, V ζώνες συχνοτήτων. Στην V ζώνη συχνοτήτων έχει ανατεθεί φάσμα 300 MHz σε κάθε κατεύθυνση, ανάθεση η οποία είναι βασισμένη στις αρχές μη-επιβλαβούς παρεμβολής[1] για σταθερές ευρυζωνικές υπηρεσίες (δεδομένα/ φωνή/ βίντεο) καθώς και για υπηρεσίες τηλεμετρίας και ελέγχου πλατφόρμας. Η παγκόσμια καταχώρηση είναι, όπως προείπαμε, στις συχνότητες 47.2-47.5 GHz και 47.9-48.2 GHz. Στις συχνότητες αυτές πρωτεύουσα καταχώρηση έχουν οι επίγειες σταθερές υπηρεσίες και οι σταθερές δορυφορικές υπηρεσίες. Η καταχώρηση βασίζεται στην Πρόταση 122 (Resolution 122) [5] της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η καταχώρηση στις ραδιοσυχνότητες γύρω από τα 30 GHz που περιλαμβάνει το εύρος των 27.5-28.35 GHz για τη λειτουργία της ζεύξης στρατόσφαιρα-προς-Γη, και 31.0-31.3 GHz για τη λειτουργία της ζεύξη Γη-προς-στρατόσφαιρα. Όπως προείπαμε, η καταχώριση αυτή έχει γίνει για 40 χώρες παγκοσμίως στις οποίες δε συμπεριλαμβάνεται η Ελλάδα, αλλά υπάρχει ζήτηση χρήσης αυτής της καταχώρησης και από άλλες χώρες. Η καταχώρηση αυτή βασίζεται στην Πρόταση 145 (Resolution 145) [7] της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών. Προς το παρόν η χρήση των συχνοτήτων 27.5-28.35 GHz για τη λειτουργία της ζεύξης στρατόσφαιρα-προς-Γη έχει τον περιορισμό του εύρους ζώνης λειτουργίας των 300 MHz.

[1] δεν πρέπει να προκαλούνται παρεμβολές πάνω από τα επιτρεπτά όρια στις πρωτεύουσες υπηρεσίες.

Τα συστήματα με χρήση στρατοσφαιρικών πλατφόρμων μπορούν να παρέχουν πέρα από τις υπηρεσίες σε σταθερούς χρήστες, και κινητές υπηρεσίες. Στη ζώνη συχνοτήτων γύρω από τα 2.1 GHz έχει καταχωρηθεί συνολικό εύρος 50/60 MHz σαν εναλλακτική λύση των σταθμών βάσης κινητής τηλεφωνίας. Η ανάθεση είναι παγκόσμια με μικρές διαφορές στις συχνότητες λειτουργίας ανά περιοχή. Οι συχνότητες είναι 1885-1980 MHz, 2010-2025 MHz και 2110-2170 MHz για τις Περιοχές 1 και 3 και στα 1885-1980 MHz και 2110-2160 MHz για την Περιοχή 2. Η καταχώρηση δεν είναι αποκλειστική, ούτε έχει προτεραιότητα έναντι σε άλλες υπηρεσίες που χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες. Η καταχώρηση αυτή βασίζεται στην Πρόταση 221 (Resolution 221) [8] της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών.

Ενώ το φάσμα στη V-ζώνη συχνοτήτων είναι άμεσα διαθέσιμο, η Ka-ζώνη είναι πολύ πιο ελκυστική. Ο λόγος είναι ο διαθέσιμος εξοπλισμός και τα πολύ καλύτερα χαρακτηριστικά διάδοσης στις χαμηλότερες συχνότητες. Επιπλέον, στις υψηλότερες συχνότητες της ζώνης V οι παρεμβολές από τα ήδη υπάρχοντα τηλεπικοινωνιακά συστήματα αποτελούν σημαντική αιτία υποβάθμισης της λειτουργίας του στρατοσφαιρικού συστήματος. Επίσης οι μεγαλύτερες συχνότητες υποφέρουν πολύ περισσότερο από παρεμβολές λόγω βροχής. Γίνεται λοιπόν φανερή ανάγκη για μεταφορά της συχνότητας λειτουργίας των στρατοσφαιρικών πλατφόρμων σε χαμηλότερες περιοχές. Η Πρόταση 734 (Resolution 734) [9] που υιοθετήθηκε από το WRC-2003 προτείνει τη μελέτη της δυνατότητας λειτουργίας των στρατοσφαιρικών πλατφόρμων σε ζώνες συχνοτήτων μεγαλύτερες των 3 GHz, καταχωρημένες αποκλειστικά για επίγειες επικοινωνίες. Τα κύρια σημεία που τονίζονται στην Πρόταση αυτή της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών είναι τα εξής:

1. συστήματα βασισμένα σε στρατοσφαιρικές πλατφόρμες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ποικίλες εφαρμογές, όπως η παροχή υψηλής χωρητικότητας υπηρεσιών σε αστικές και αγροτικές περιοχές.
2. η γεωμετρική απόσταση συντονισμού από το HAP είναι αυτή που περιγράφεται από την αναφορά [10].
3. η μελέτη της δυνατότητας υλοποίησης συστημάτων με χρήση HAPs για την παροχή σταθερών και κινητών υπηρεσιών σε ζώνες συχνοτήτων μεγαλύτερες από 3 GHz κρίνεται αναγκαία.

Η μελέτη για τις συχνότητες 18-32 GHz, όπως προαναφέρθηκε, διεξάγεται υπό την Πρόταση 122 [5]. Επομένως η έρευνα που προτείνεται από την Πρόταση 734 πρέπει αρχικά να εστιαστεί στη ζώνη συχνοτήτων 3-18 GHz. Λαμβάνοντας υπόψη λοιπόν την Πρόταση 734 θα μελετήσουμε τη δυνατότητα λειτουργίας των στρατοσφαιρικών πλατφόρμων στη ζώνη συχνοτήτων 3-18 GHz. Αν και η Πρόταση 734 προτείνει μελέτη για σταθερούς και κινητούς χρήστες αρχικά θα περιοριστούμε σε σταθερούς χρήστες.

## 2.3 Κατανομή Φάσματος και Υπηρεσιών στη ζώνη 3 - 18 GHz

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι ζώνες συχνοτήτων που είναι αποκλειστικά καταχωρημένες για σταθερές και κινητές υπηρεσίες καθώς και για υπηρεσίες ραδιεντοπισμού στο εύρος 3 - 18 GHz σύμφωνα με το Radio Regulation Article S5 [1]. Για την καλύτερη εποπτεία των καταχωρήσεων έχουν γίνει και αντίστοιχα διαγράμματα φάσματος, όπου φαίνονται οι καταχωρήσεις σε κάθε συχνότητα.

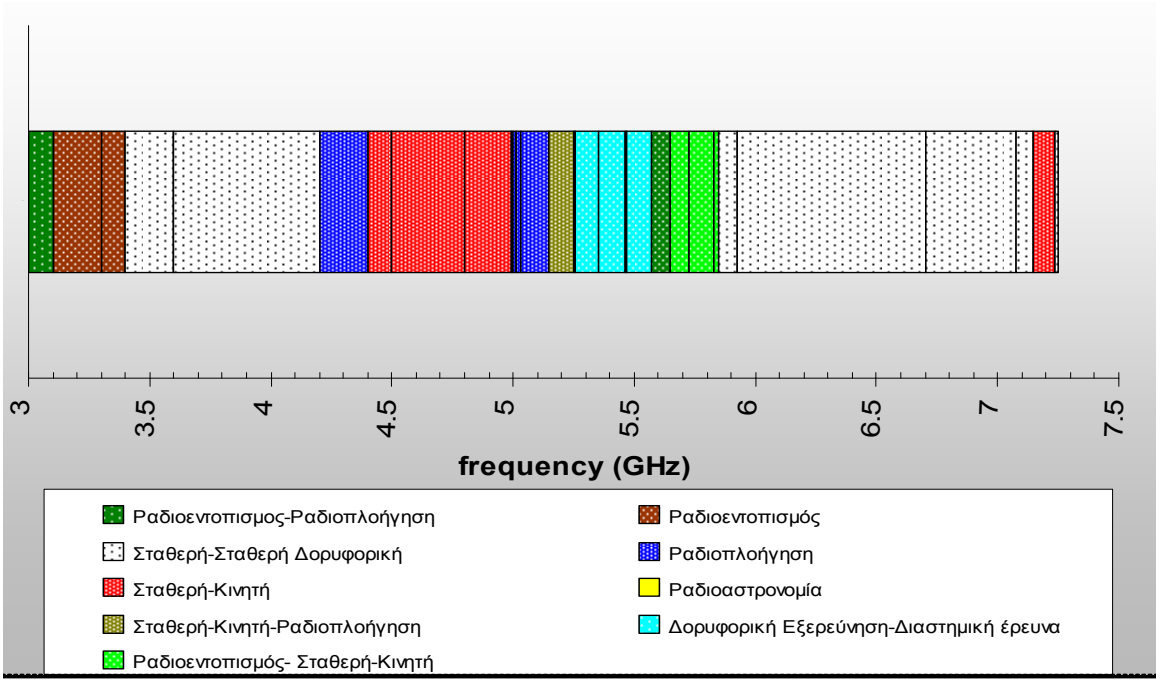
Οι παρακάτω ζώνες συχνοτήτων είναι πιθανόν υποψήφιες για χρήση από συστήματα HAPS, αφού αυτού του είδους οι υπηρεσίες θεωρούνται επίγειες ραδιοεπικοινωνίες. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι σε μερικές ζώνες έχουν ανατεθεί και άλλες υπηρεσίες σε δευτερεύουσα βάση, οι οποίες ενδέχεται να προκαλούν παρεμβολές σε ευαίσθητες υπηρεσίες. Επομένως, η χρήση αυτών των συχνοτήτων από τα HAPS χρειάζεται προσεκτική σκέψη και ενδεχομένως μπορεί να εξαρτάται τόσο από την περιοχή που βρισκόμαστε όσο και από το τρόπο διαχείρισης της υπηρεσίας. Για περισσότερη ευκολία στην παρουσίαση παρουσιάζουμε την κατανομή των συχνοτήτων σε υπηρεσίες σε τρεις διαφορετικούς πίνακες :

| **Όρια ζώνης (MHz)** | **Κατανομή στις Υπηρεσίες** |
|---|---|
| 2 900 - 3 100 | ΡΑΔΙΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ 5.424A<br>ΡΑΔΙΟΠΛΟΗΓΗΣΗ 4.426<br>5.425, 4,427 |
| 3 100 - 3 300 | ΡΑΔΙΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ<br>Δορυφορική εξερεύνηση της Γης (ενεργητικη)<br>Διαστημική έρευνα (ενεργητική)<br>5.149 |
| 3 300 - 3 400 | ΡΑΔΙΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ<br>5.149 |
| 3 400 - 3 600 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΣΤΑΘΕΡΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Διάστημα προς Γη)<br>Ραδιοεντοπισμός |
| 3 600 - 4 200 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΣΤΑΘΕΡΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Διάστημα προς Γη)<br>E45 |
| 4 200 - 4 400 | ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΗ ΡΑΔΙΟΠΛΟΗΓΗΣΗ 5.438<br>5.440 |
| 4 400 - 4 500 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΚΙΝΗΤΗ |
| 4 500 - 4 800 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΚΙΝΗΤΗ<br>5.441 |

| | |
|---|---|
| 4 800 - 4 990 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΚΙΝΗΤΗ 5.442<br>Ραδιαστρονομία<br>5.149, 5,339 |
| 4 990 - 5 000 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΚΙΝΗΤΗ εκτός Αεροναυτικής Κινητής<br>ΡΑΔΙΟΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑ<br>5.149 |
| 5 000 - 5 010 | ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΗ ΡΑΔΙΟΠΛΟΗΓΗΣΗ<br>ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΡΑΔΙΟΠΛΟΗΓΗΣΗ (Γη προς Διάστημα)<br>5.367 |
| 5 010 - 5 030 | ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΗ ΡΑΔΙΟΠΛΟΗΓΗΣΗ<br>ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΡΑΔΙΟΠΛΟΗΓΗΣΗ (Διάστημα προς Διάστημα), (Διάστημα προς Γη)<br>5.328B, 5.443B, 5.367 |
| 5 030 - 5 150 | ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΗ ΡΑΔΙΟΠΛΟΗΓΗΣΗ<br>5.367, 5.444, 5.444A |
| 5 150 - 5 250 | ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΗ ΡΑΔΙΟΠΛΟΗΓΗΣΗ<br>ΣΤΑΘΕΡΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Γη προς Διάστημα) 5.447A<br>ΚΙΝΗΤΗ εκτός Αεροναυτικής Κινητής 5.446A, 5.446B, 5.447B, 5.447C, E46 |
| 5 250 - 5 255 | ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΕΞΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΓΗΣ (ενεργητική)<br>ΡΑΔΙΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ<br>ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ 5.447D<br>ΚΙΝΗΤΗ εκτός Αεροναυτικής Κινητής 5.446A, 5.447F, 5.448A<br>E46 |
| 5 255 - 5 350 | ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΕΞΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΓΗΣ (ενεργητική)<br>ΡΑΔΙΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ<br>ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ (ενεργητική)<br>ΚΙΝΗΤΗ εκτός Αεροναυτικής Κινητής 5.446A, 5.447F, 5.448A<br>E46 |
| 5 350 - 5 460 | ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΕΞΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΓΗΣ (ενεργητική) 5.448B<br>ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ (ενεργητική) 5.448C<br>ΡΑΔΙΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ 5.448D<br>ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΗ ΡΑΔΙΟΠΛΟΗΓΗΣΗ 5.449 |
| 5 460 - 5 470 | ΡΑΔΙΟΠΛΟΗΓΗΣΗ 5.449<br>ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΕΞΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΓΗΣ (ενεργητική)<br>ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ (ενεργητική)<br>ΡΑΔΙΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ 5.448D<br>5.448B |
| 5 470 - 5 570 | ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΗ ΡΑΔΙΟΠΛΟΗΓΗΣΗ<br>ΚΙΝΗΤΗ εκτός Αεροναυτικής Κινητής 5.446A, 5.450A<br>ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΕΞΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΓΗΣ (ενεργητική)<br>ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ (ενεργητική)<br>ΡΑΔΙΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ 5.450B<br>5.448B, 5.452<br>E46 |
| 5 570 - 5 650 | ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΗ ΡΑΔΙΟΠΛΟΗΓΗΣΗ<br>ΚΙΝΗΤΗ εκτός Αεροναυτικής Κινητής 5.446A, 5.450A<br>ΡΑΔΙΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ 5.450B |

| | |
|---|---|
| | 5.452, E46 |
| 5 650 - 5 725 | ΡΑΔΙΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ<br>ΚΙΝΗΤΗ εκτός Αεροναυτικής Κινητής 5.446A, 5.450A<br>Ερασιτεχνική<br>Διαστημική έρευνα (απόμακρο διάστημα)<br>5.282, E46 |
| 5 725 - 5 830 | ΣΤΑΘΕΡΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Γη προς Διάστημα)<br>ΡΑΔΙΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ<br>Ερασιτεχνική<br>5.150, E47, E48 |
| 5 830 - 5 850 | ΣΤΑΘΕΡΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Γη προς Διάστημα)<br>ΡΑΔΙΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ<br>Ερασιτεχνική<br>Ερασιτεχνική δορυφορική (Διάστημα προς Γη)<br>5.150, E47 |
| 5 850 - 5 925 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΣΤΑΘΕΡΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Γη προς Διάστημα)<br>5.150, E47 |
| 5 925 - 6 700 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΣΤΑΘΕΡΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Γη προς Διάστημα) 5.457A<br>5.149, 5.440, 5,458, E50 |
| 6 700 - 7 075 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΣΤΑΘΕΡΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Γη προς Διάστημα), (Διάστημα προς Γη) 5.441<br>5.458, 5.458A, 5.458B, 5.458C<br>E50 |
| 7 075 - 7 145 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>5.458, E50 |
| 7 145 - 7 235 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΚΙΝΗΤΗ<br>ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ (Γη προς Διάστημα) 5.460<br>5.459, E50 |
| 7 235 - 7 250 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>5.458, E50 |

**Πίνακας 2.11 Κατανομή συχνοτήτων στη ζώνη 2.9 - 7.25 GHz**



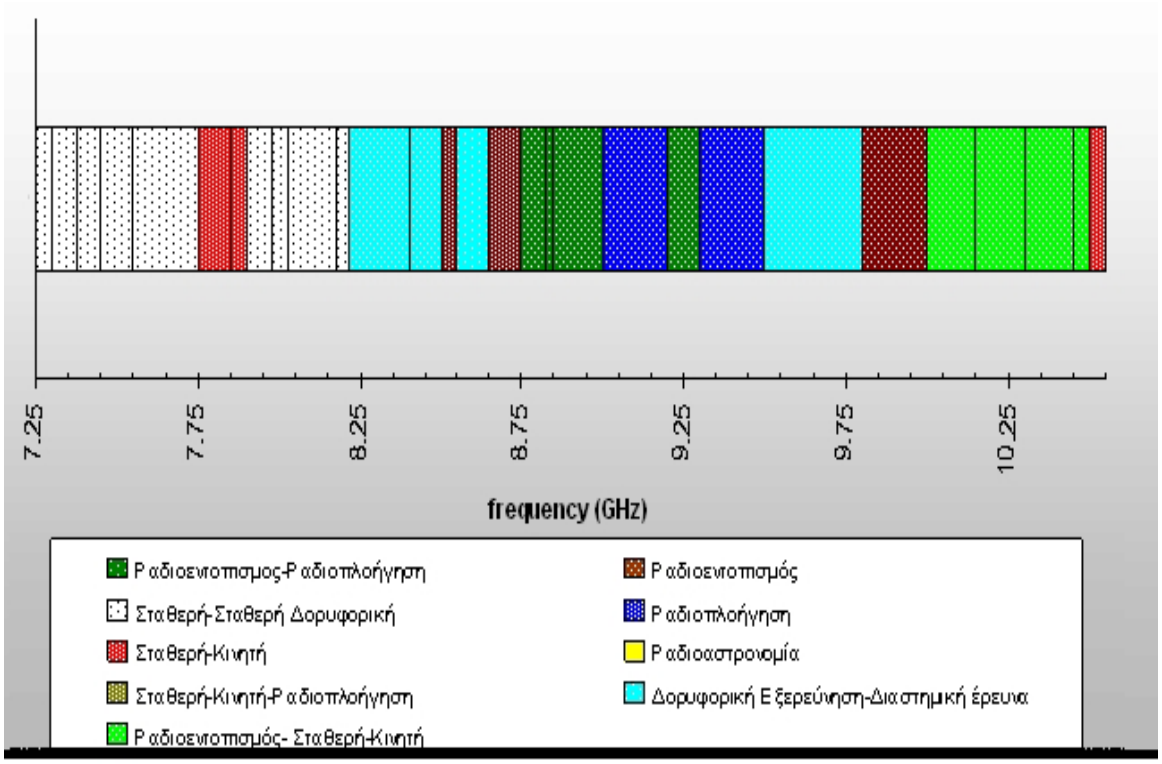

**Σχήμα 2.3 Διάγραμμα φάσματος 3-7.25 GHz.**

| **Όρια ζώνης (MHz)** | **Κατανομή στις Υπηρεσίες** |
|---|---|
| 7 250 - 7 300 | ΣΤΑΘΕΡΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Διάστημα προς Γη)<br>ΚΙΝΗΤΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Διάστημα προς Γη)<br>5.461 |
| 7 300 - 7 375 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΣΤΑΘΕΡΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Διάστημα προς Γη)<br>ΚΙΝΗΤΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Διάστημα προς Γη)<br>5.461 |
| 7 375 - 7 450 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΣΤΑΘΕΡΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Διάστημα προς Γη)<br>ΚΙΝΗΤΗ εκτός Αεροναυτικής Κινητής<br>E50 |
| 7 450 - 7 550 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΣΤΑΘΕΡΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Διάστημα προς Γη)<br>ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Διάστημα προς Γη)<br>5.461A |
| 7 550 - 7 750 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΣΤΑΘΕΡΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Διάστημα προς Γη) |
| 7 750 - 7 850 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Διάστημα προς Γη) 5.461B<br>ΚΙΝΗΤΗ εκτός Αεροναυτικής Κινητής |
| 7 850 - 7 900 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΚΙΝΗΤΗ εκτός Αεροναυτικής Κινητής |
| 7 900 - 7 975 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΣΤΑΘΕΡΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Γη προς Διάστημα)<br>ΚΙΝΗΤΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Γη προς Διάστημα) |

| | |
|---|---|
| | 5.461 |
| 7 975 - 8 025 | ΣΤΑΘΕΡΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Γη προς Διάστημα)<br>ΚΙΝΗΤΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Γη προς Διάστημα)<br>5.461 |
| 8 025 - 8 175 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΣΤΑΘΕΡΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Γη προς Διάστημα)<br>Δορυφορική Εξερεύνηση της Γης (Διάστημα προς Γη)<br>5.462A |
| 8 175 - 8 215 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΣΤΑΘΕΡΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Γη προς Διάστημα)<br>ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Γη προς Διάστημα)<br>ΚΙΝΗΤΗ<br>5.462A |
| 8 215 - 8 400 | ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΕΞΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΓΗΣ (Διάστημα προς Γη)<br>ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΣΤΑΘΕΡΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Γη προς Διάστημα)<br>Δορυφορική Εξερεύνηση της Γης (Διάστημα προς Γη)<br>5.462A |
| 8 400 - 8 500 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ (Διάστημα προς Γη) 5.465 |
| 8 500 - 8 550 | ΡΑΔΙΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ |
| 8 550 - 8 650 | ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΕΞΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΓΗΣ (ενεργητική)<br>ΡΑΔΙΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ<br>ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ (ενεργητική) |
| 8 650 - 8 750 | ΡΑΔΙΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ |
| 8 750 - 8 825 | ΡΑΔΙΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ<br>ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΗ ΡΑΔΙΟΠΛΟΗΓΗΣΗ 5.470 |
| 8 825 - 8 850 | ΡΑΔΙΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ<br>ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΗ ΡΑΔΙΟΠΛΟΗΓΗΣΗ 5.470<br>ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΗ ΡΑΔΙΟΠΛΟΗΓΗΣΗ |
| 8 850 - 9 000 | ΡΑΔΙΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ<br>ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΗ ΡΑΔΙΟΠΛΟΗΓΗΣΗ 5.472 |
| 9 000 - 9 200 | ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΗ ΡΑΔΙΟΠΛΟΗΓΗΣΗ 5.337<br>ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΗ ΡΑΔΙΟΠΛΟΗΓΗΣΗ<br>Ραδιοεντοπισμός |
| 9 200 - 9 300 | ΡΑΔΙΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ<br>ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΗ ΡΑΔΙΟΠΛΟΗΓΗΣΗ 5.472<br>5.474, E49 |
| 9 300 - 9 500 | ΡΑΔΙΟΠΛΟΗΓΗΣΗ 5.476<br>Ραδιοεντοπισμός<br>5.427, 5.474, 5.475, E49 |
| 9 500 - 9 800 | ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΕΞΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΓΗΣ (ενεργητική)<br>ΡΑΔΙΟΠΛΟΗΓΗΣΗ<br>ΡΑΔΙΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ<br>ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ (ενεργητική)<br>E49, 5.476A |
| 9 800 - 10 000 | ΡΑΔΙΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ<br>Διαστημική Έρευνα<br>5.479, E49 |

| | |
|---|---|
| 10 000 - 10 150 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΚΙΝΗΤΗ<br>ΡΑΔΙΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ<br>Ερασιτεχνική<br>5.479 |
| 10 150 - 10 300 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΚΙΝΗΤΗ<br>ΡΑΔΙΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ<br>Ερασιτεχνική<br>Ε50 |
| 10 300 - 10 450 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΚΙΝΗΤΗ<br>ΡΑΔΙΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ<br>Ερασιτεχνική<br>Ε50 |
| 10 450 - 10 500 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΚΙΝΗΤΗ<br>ΡΑΔΙΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ<br>Ερασιτεχνική<br>Ερασιτεχνική Δορυφορική<br>Ε50 |
| 10 500 - 10 550 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΚΙΝΗΤΗ<br>Ραδιοεντοπισμός<br>Ε49, Ε50 |

**Πίνακας 2.12 Κατανομή συχνοτήτων στη ζώνη 7.25 - 10.55 GHz.**



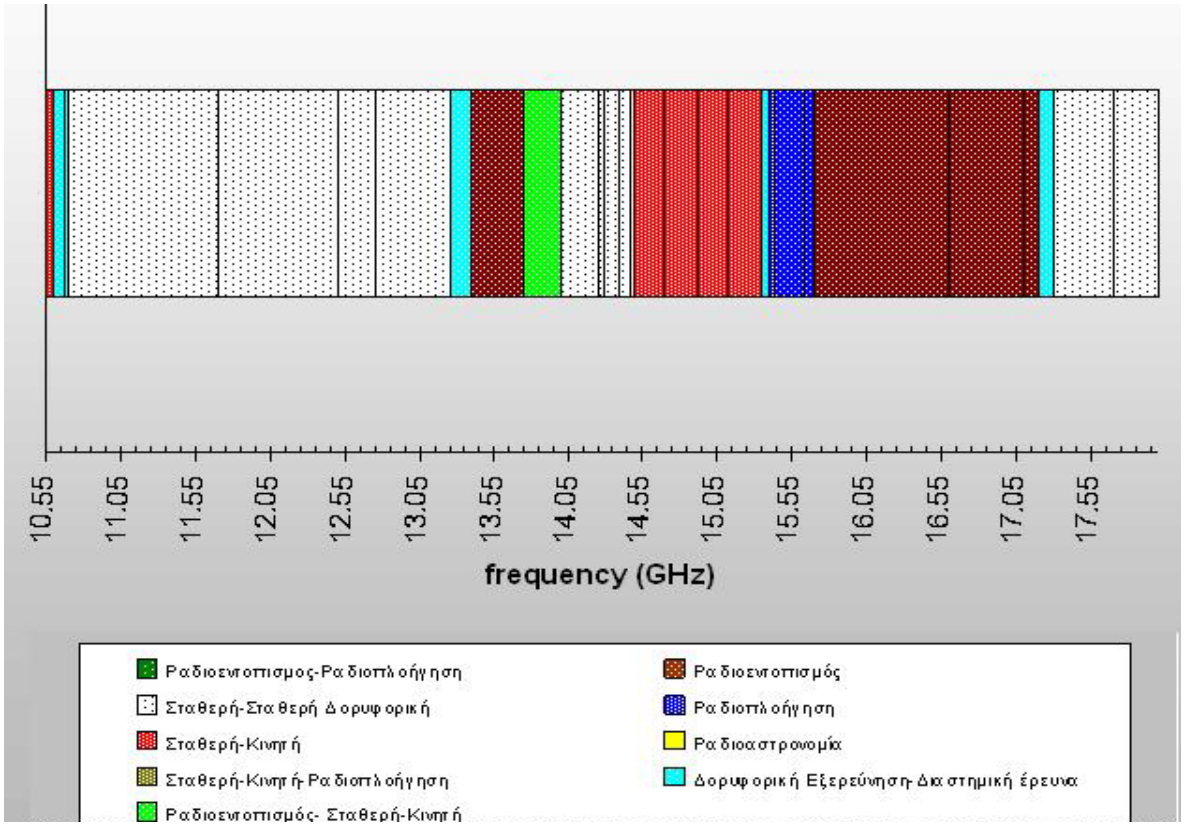

**Σχήμα 2.4 Διάγραμμα Φάσματος 7.25-10.55 GHz.**

| **Όρια ζώνης (MHz)** | **Κατανομή στις Υπηρεσίες** |
|---|---|
| 10 550 - 10 600 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΚΙΝΗΤΗ εκτός Αεροναυτικής Κινητής<br>Ραδιοεντοπισμός<br>E49, E50 |
| 10 600 - 10 680 | ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΕΞΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΓΗΣ (παθητική)<br>ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΚΙΝΗΤΗ εκτός Αεροναυτικής Κινητής<br>ΡΑΔΙΟΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑ<br>ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ (ΠΑΘΗΤΙΚΗ)<br>Ραδιοεντοπισμός<br>5.149, 5.482, E50 |
| 10 680 - 10 700 | ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΕΞΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΓΗΣ (παθητική)<br>ΡΑΔΙΟΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑ<br>ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ (ΠΑΘΗΤΙΚΗ)<br>5.340 |
| 10 700 - 11 700 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΣΤΑΘΕΡΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Γη προς Διάστημα)<br>ΣΤΑΘΕΡΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ |
| 11 700 - 12 500 | ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΕΥΡΥΕΚΠΟΜΠΗ<br>ΕΥΡΥΕΚΠΟΜΠΗ<br>ΚΙΝΗΤΗ εκτός Αεροναυτικής Κινητής<br>5.487, 5.487A, 5.492 |
| 12 500 - 12 750 | ΣΤΑΘΕΡΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Διάστημα προς Γη) 5.484A (Γη προς Διάστημα)<br>Σταθερή<br>Κινητή εκτός Αεροναυτικής Κινητής<br>E51 |
| 12 750 - 13 250 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΣΤΑΘΕΡΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Γη προς Διάστημα) 5.441<br>ΚΙΝΗΤΗ<br>Διαστημική Έρευνα (Απομακρυσμένο Διάστημα) (Διάστημα προς Γη) |
| 13 250 - 13 400 | ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΗ ΡΑΔΙΟΠΛΟΗΓΗΣΗ 5.497<br>ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ (ενεργητική)<br>ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΕΞΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΓΗΣ (ενεργητική)<br>5.498A |
| 13 400 - 13 750 | ΡΑΔΙΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ<br>E49 |
| 13 750 - 14 000 | ΡΑΔΙΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ<br>ΣΤΑΘΕΡΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Γη προς Διάστημα) 5.484A<br>Δορυφορική Εξερεύνηση της Γης<br>Δορυφορική Υπηρεσία πρότυπης συχνότητας και σημάτων χρόνου (Γη προς Διάστημα)<br>Διαστημική Έρευνα<br>5.502, 5.503, E49 |

| | |
|---|---|
| 14 000 - 14 250 | ΣΤΑΘΕΡΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Γη προς Διάστημα) 5.457A, 5.484A, 5.506B<br>ΡΑΔΙΟΠΛΟΗΓΗΣΗ 5.504<br>Κινητή Δορυφορική (Γη προς Διάστημα) 5.506A, E52<br>Διαστημική Έρευνα<br>5.504A |
| 14 250 - 14 300 | ΣΤΑΘΕΡΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Γη προς Διάστημα) 5.457A, 5.484A, 5.506B<br>ΡΑΔΙΟΠΛΟΗΓΗΣΗ 5.504<br>Κινητή Δορυφορική (Γη προς Διάστημα) 5.506A<br>Διαστημική Έρευνα<br>5.504A |
| 14 300 - 14 400 | Κινητή εκτός Αεροναυτικής Κινητής<br>ΣΤΑΘΕΡΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Γη προς Διάστημα) 5.457A, 5.484A, 5.506B<br>Κινητή Δορυφορική (Γη προς Διάστημα) 5.506A<br>Δορυφορική Ραδοπλοήγηση<br>5.504A |
| 14 400 - 14 470 | Κινητή εκτός Αεροναυτικής Κινητής<br>ΣΤΑΘΕΡΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Γη προς Διάστημα) 5.457A, 5.484A, 5.506B<br>Κινητή Δορυφορική (Γη προς Διάστημα) 5.506A<br>Διαστημική Έρευνα<br>5.504A |
| 14 470 - 14 500 | Κινητή εκτός Αεροναυτικής Κινητής<br>ΣΤΑΘΕΡΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Γη προς Διάστημα) 5.457A, 5.484A, 5.506B<br>Κινητή Δορυφορική (Γη προς Διάστημα) 5.506A<br>Ραδιοαστρονομία<br>5.149, 5.504A |
| 14 500 - 14 697 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΚΙΝΗΤΗ<br>Ραδιοαστρονομία |
| 14 697 - 14 921 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΚΙΝΗΤΗ<br>Ραδιοαστρονομία |
| 14 921 - 15 117 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΚΙΝΗΤΗ<br>Ραδιοαστρονομία |
| 15 117 - 15 350 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΚΙΝΗΤΗ<br>Ραδιοαστρονομία<br>5.339 |
| 15 350 - 15 400 | ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΕΞΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΓΗΣ (παθητική)<br>ΡΑΔΙΟΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑ<br>ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ (παθητική)<br>5.340 |
| 15 400 - 15 430 | ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΗ ΡΑΔΙΟΠΛΟΗΓΗΣΗ |
| 15 430 - 15 630 | ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΗ ΡΑΔΙΟΠΛΟΗΓΗΣΗ 5.511C |
| 15 630 - 15 700 | ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΗ ΡΑΔΙΟΠΛΟΗΓΗΣΗ |

| | |
|---|---|
| 15 700 - 16 600 | ΡΑΔΙΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ |
| 16 600 - 17 100 | ΡΑΔΙΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ<br>Διαστημική Έρευνα (Γη προς Διάστημα) |
| 17 100 - 17 200 | ΡΑΔΙΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ<br>Ε46 |
| 17 200 - 17 300 | ΡΑΔΙΟΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ<br>ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΕΞΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΓΗΣ (ενεργητική)<br>ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ (ενεργητική)<br>Ε46 |
| 17 300 - 17 700 | ΣΤΑΘΕΡΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Γη προς Διάστημα) 5.516<br>(Διάστημα προς Γη) 5.516Α, 5.516Β<br>Ραδιοεντοπισμός |
| 17 700 - 18 100 | ΣΤΑΘΕΡΗ<br>ΣΤΑΘΕΡΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Διάστημα προς Γη) 5.484Α<br>ΣΤΑΘΕΡΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ (Γη προς Διάστημα) 5.516<br>ΚΙΝΗΤΗ |

**Πίνακας 2.13 Κατανομή συχνοτήτων στη ζώνη 10.55 - 18,1 GHz**




**Σχήμα 2.5 Διάγραμμα φάσματος 10.55-18 GHz.**

Μία αναλυτική επεξήγηση των όρων που χρησιμοποιούνται στους παραπάνω πίνακες γίνεται στο Παράρτημα Α΄. Οι παραπομπές που αναγράφονται στους παραπάνω πίνακες βοηθούν στον αναλυτικότερο προσδιορισμό των υπηρεσιών που κατανέμονται στις εκάστοτε συχνότητες και επεξηγούνται αναλυτικά στα [1] και [2].

## 2.4 Επιλογή Βέλτιστων Ζωνών Συχνοτήτων για την λειτουργία των Στρατοσφαιρικών Δικτύων

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι, όπως προαναφέρθηκε, η μελέτη της δυνατότητας χρήσης μίας χαμηλότερης συχνότητας (στη ζώνη 3-18 GHz) για τη λειτουργία των στρατοσφαιρικών πλατφορμών. Από τους Πίνακες 2.2, 2.3, 2.4 παρατηρούμε ότι στην ζώνη 3-18 GHz έχει καταχωρηθεί ένα πλήθος υπηρεσιών. Συνεπώς, θα πρέπει να βρεθεί μία συχνότητα στην οποία θα μπορούν να λειτουργούν και τα στρατοσφαιρικά δίκτυα, χωρίς όμως να επηρεάζουν τις υπηρεσίες που λειτουργούν στη ζώνη αυτή. Για το λόγο αυτό, στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποια κριτήρια σύμφωνα με τα οποία θα γίνει η επιλογή των βέλτιστων ζωνών συχνοτήτων για τη λειτουργία των στρατοσφαιρικών πλατφορμών. Στα επόμενα κεφάλαια θα μελετηθεί η δυνατότητα χρήσης των συγκεκριμένων ζωνών συχνοτήτων από στρατοσφαιρικά δίκτυα.

### 2.4.1 Κριτήρια επιλογής Βέλτιστων Ζωνών Συχνοτήτων

Παρακάτω, παρουσιάζονται και αναλύονται τα αρχικά κριτήρια σύμφωνα με τα οποία θα επιλεγούν οι βέλτιστες ζώνες συχνοτήτων για τη λειτουργία των στρατοσφαιρικών πλατφορμών. Με βάση τα κριτήρια αυτά θα απορριφθούν κάποιες ζώνες συχνοτήτων και κάποιες άλλες θα αποκτήσουν σημαντικό πλεονέκτημα για χρήση από στρατοσφαιρικά δίκτυα.

– *αποφυγή γειτονικής κατερχόμενης ζεύξης Σταθερών Δορυφορικών Υπηρεσιών (FSS Downlink.*

Κατά την επιλογή των ζωνών συχνοτήτων θα πρέπει να αποφευχθούν περιοχές που είναι γειτονικές σε ζώνες συχνοτήτων που έχουν ανατεθεί στην κατερχόμενη ζεύξη (downlink) Σταθερών Δορυφορικών Υπηρεσιών (FSS - Fixed Satellite Services). Στον Πίνακα 2.5 παρουσιάζονται οι ζώνες συχνοτήτων στην περιοχή 3-18 GHz που έχουν ανατεθεί από την Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών για την κατερχόμενη ζεύξη Σταθερών Δορυφορικών Υπηρεσιών. Οι ζώνες συχνοτήτων του Πίνακα 2.5 δεν πρέπει να επιλεγούν ως συχνότητες λειτουργίας των στρατοσφαιρικών πλατφορμών.

| | |
|---|---|
| 3.4-4.2 GHz | 4.5-4.8 GHz |
| 6.70-7.075 GHz | 7.25-7.75 GHz |
| 10.7-11.7 GHz | 11.7-12.5 GHz |
| 12.5-12.75 GHz | 17.3-18.0 GHz |

**Πίνακας 2.14 Ζώνες Συχνοτήτων για FFS Downlink στην περιοχή 3-18 GHz (Περιοχή 1).**

– *αποφυγή γειτονικών παθητικών ή άλλων 'ευαίσθητων' υπηρεσιών.*

Οι ζώνες συχνοτήτων που θα επιλεχθούν δε θα πρέπει να συνορεύουν με περιοχές συχνοτήτων που έχουν ανατεθεί σε παθητικές υπηρεσίες ή άλλες 'ευαίσθητες' υπηρεσίες. Τέτοιες υπηρεσίες είναι οι Υπηρεσίες Δορυφορικής Εξερεύνησης της Γης (EESS - Earth Exploration Satellite Service), υπηρεσίες Διαστημικής Έρευνας (Space Research) και υπηρεσίες Ραδιοαστρονομίας (Radioastronomy).

Σύμφωνα με τη Σύσταση SA.1024-1 (ITU-R Rec. SA.1024-1) [11] της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών οι ζεύξεις διαστήματος προς Γη της Δορυφορικής Εξερεύνησης της Γης χρησιμοποιούν τη ζώνη συχνοτήτων 8.025-8.4 GHz. Ακόμη σύμφωνα με τους πίνακες καταχώρησης συχνοτήτων [1], [2] οι ζώνες 10.6-10.7 GHz και 15.35-15.4 GHz έχουν ανατεθεί σε παθητικές υπηρεσίες Δορυφορικής Εξερεύνησης της Γης. Επομένως θα πρέπει να αποφευχθούν οι περιοχές 8.025-8.4 GHz, 10.68-10.7 GHz και 15.35-15.4 GHz.

Οι ζώνες συχνοτήτων 8.4-8.5 GHz και 10.4-10.47 GHz χρησιμοποιούνται από τις ζεύξεις διαστήματος προς Γη της Διαστημικής Έρευνας. Επίσης οι ζώνες 10.6-10.7 GHz και 15.35-15.4 GHz έχουν ανατεθεί σε παθητικές υπηρεσίες Διαστημικής Έρευνας. Στην υπηρεσία Διαστημικής Έρευνας έχει ανατεθεί και η ζώνη 13.75-14.0 GHz. Συνολικά λοιπόν στην υπηρεσία Διαστημικής Έρευνας έχουν ανατεθεί οι ζώνες 8.4-8.5 GHz, 10.4-10.47 GHz, 10.6-10.7 GHz, 13.75-14.0 GHz και 15.35-15.4 GHz, οι οποίες θα πρέπει και να αποφευχθούν.

Σύμφωνα με τη σημείωση 5.149 των [1] και [2], κατά τη διαδικασία εκχωρήσεως υπηρεσιών στις ζώνες συχνοτήτων του Πίνακα 2.6 πρέπει να ληφθούν όλα τα πρακτικά εφικτά μέτρα για την προστασία της υπηρεσίας ραδιοαστρονομίας από επιζήμια παρεμβολή. Εκπομπές από σταθμούς διαστημικών συσκευών ή αεροσκαφών είναι δυνατόν να συνιστούν ιδιαίτερα σημαντικές πηγές παρεμβολής για την υπηρεσία ραδιοαστρονομίας.

| | | |
|---|---|---|
| 3 260-3 267 MHz | 3 332-3 339MHz | 3 345.8-3 352.5 MHz |
| 4 825-4 835 MHz | 4 950-4 990 MHz | 4 990-5 000 MHz |
| 6 650-6 675.2 MHz | 10.6-10.68 GHz | 14.47-14.5 GHz |

**Πίνακας 2.15 Ζώνες λειτουργίας υπηρεσιών ραδιοαστρονομίας.**

Επιπλέον, σύμφωνα με τη σημείωση 5.150 των [1], [2] η ζώνη 5725−5875 MHz (κεντρική συχνότητα 5800 MHz), προορίζεται επιπλέον για βιομηχανικές, επιστημονικές και ιατρικές (ISM) εφαρμογές. Οι υπηρεσίες ραδιοεπικοινωνιών που λειτουργούν μέσα στις ζώνες αυτές πρέπει να αποδέχονται επιζήμια παρεμβολή που μπορεί να προκαλείται από τις εφαρμογές αυτές.

Τέλος, σύμφωνα με τη σημείωση 5.150 των [1], [2] στη ζώνη 7075 −7250 MHz γίνονται μετρήσεις με τη βοήθεια παθητικών μικροκυματικών αισθητήρων. Για το λόγο αυτό, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι ανάγκες της υπηρεσίας δορυφορικής εξερεύνησης της Γης (παθητικής) και της υπηρεσίας διαστημικής έρευνας (παθητικής) κατά τη σχεδίαση της μελλοντικής χρησιμοποίησης της ζώνης 7075−7250 MHz.

Συνοψίζοντας λοιπόν, σύμφωνα με το προαναφερθέν κριτήριο θα πρέπει να αποκλειστούν οι συχνότητες του Πίνακα 2.7.

| | | |
|---|---|---|
| 3 260-3 267 MHz | 3 332-3 339MHz | 3 345.8-3 352.5 MHz |
| 4 825-4 835 MHz | 4 950-4 990 MHz | 4 990-5 000 MHz |
| 5 725−5 875 MHz | 6 650-6 675.2 MHz | 7075−7250 MHz |
| 8 025-8 500 MHz | 10.4-10.47 GHz | 10.6-10.7 GHz |
| 13.75-14.0 GHz | 14.47-14.5 GHz | 15.35-15.4 GHz |

**Πίνακας 2.16 Ζώνες λειτουργίας παθητικών ή άλλων 'ευαίσθητων' υπηρεσιών.**

– *αναζήτηση διαθέσιμων προτύπων (standards) στην επιλεγείσα συχνότητα.*

Ένα ακόμη κριτήριο που θα παίξει ρόλο στην επιλογή της συχνότητας λειτουργίας των HAPs είναι και τα χαρακτηριστικά των ήδη υπαρχόντων τηλεπικοινωνιακών προτύπων (standards). Εάν η συχνότητα λειτουργίας κάποιου προτύπου, η ακτίνα κάλυψης του καθώς και το απαιτούμενο εύρος ζώνης του συμβαδίζουν με τα τεχνικά χαρακτηριστικά αλλά και με την αρχιτεκτονική των HAPs, προκύπτει ακόμη ένας παράγοντας στην επιλογή της συχνότητας λειτουργίας των στρατοσφαιρικών πλατφόρμων. Είναι σημαντικό η επιλεγείσα συχνότητα να μην περιορίζει την χρήση κάποιων προτύπων, τα οποία είναι απαραίτητα για τη ανάπτυξη πολλών εφαρμογών. Παρακάτω παρατίθενται οι Πίνακες 2.8, 2.9 όπου συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά των βασικών προτύπων:

| | **Hiper-ACCESS** | **HiperMAN** | **IEEE 802.11α** | **IEEE 802.11b** | **IEEE 802.11g** | **IEEE 802.16** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Συχνότητα λειτουργίας** | 11- 42 GHz | 2 - 11 GHz | 5 GHz | 2,4 GHz | 2,4 GHz | 10 - 66 GHz |
| **Εύρος ζώνης καναλιού** | 28 MHz | πολλαπλά των 3,5 MHz | | | | 20 MHz, 25 MHz, 28 MHz |
| **Ακτίνα κάλυψης** | | | | | | συνήθως 2-5 Km, μέχρι 50 Km |

**Πίνακας 2.17 Χαρακτηριστικά των βασικών προτύπων.**

| | IEEE 802.16a | IEEE 802.16e | IEEE 802.20 | DVB-S | DVB-S2 | DVB RCS |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Συχνότητα λειτουργίας** | 2 - 11 GHz (ζώνες με ή χωρίς άδεια) | 2 - 6 GHz (ζώνες με άδεια) | 0,5 - 3,5 GHz (ζώνες με άδεια) | Ku - ζώνη | Ku - ζώνη<br>Ka - ζώνη | Ku - ζώνη<br>Ka - ζώνη<br>C - ζώνη |
| **Εύρος ζώνης καναλιού** | 1,5 με 20 MHz | 1,5 με 20 MHz | 1,25 με 40 MHz | 24 - 27 MHz, 36 MHz | 36 MHz, 72 MHz | 8 MHz, 36 MHz |
| **Ακτίνα κάλυψης** | συνήθως 7-10 Km, μέχρι 50 Km | συνήθως 2-5 Km | 0,5 - 15 Km | ορίζεται από το αποτύπωμα της δορυφορικής κάλυψης | ορίζεται από το αποτύπωμα της δορυφορικής κάλυψης | ορίζεται από το αποτύπωμα της δορυφορικής κάλυψης |

**Πίνακας 2.18 Χαρακτηριστικά των βασικών προτύπων.**

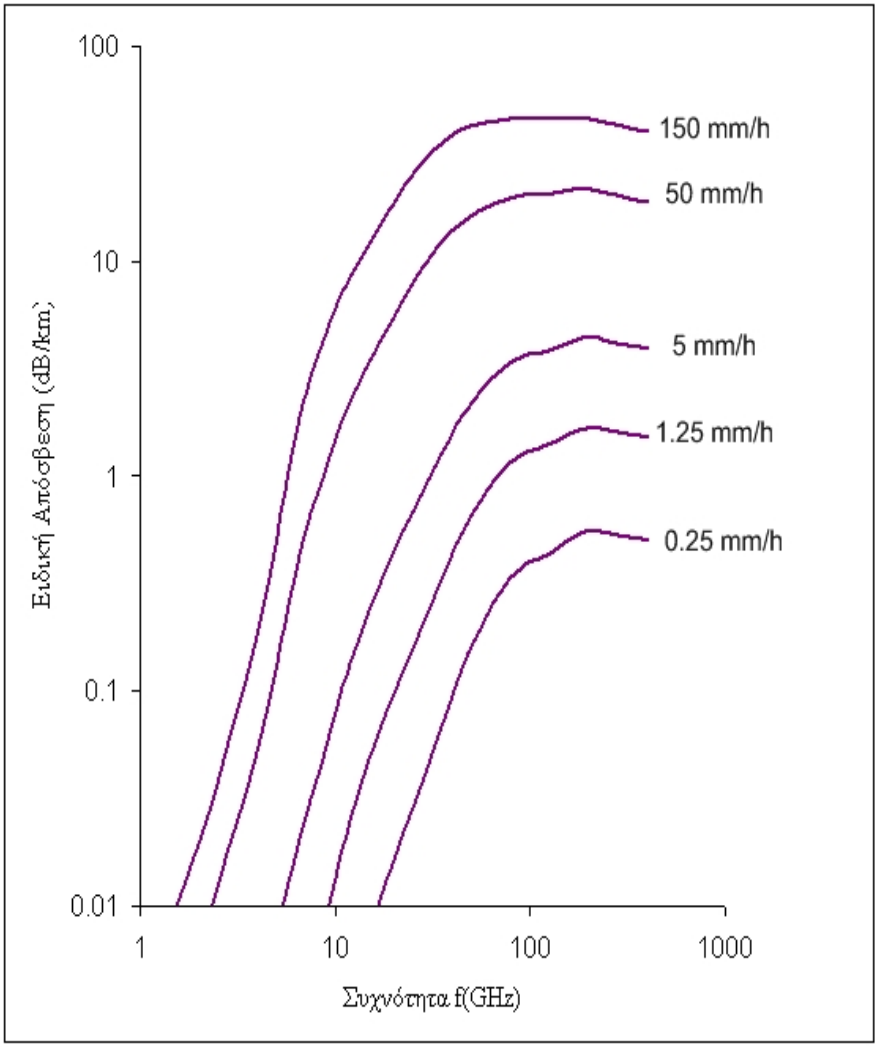
– *Μικρότερη απόσβεση διάδοσης λόγω βροχής.*

Ένας ακόμη παράγοντας που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την επιλογή των βέλτιστων ζωνών συχνοτήτων για τη λειτουργία των στρατοσφαιρικών πλατφορμών είναι η απόσβεση λόγω βροχής που εισάγεται στο μεταδιδόμενο σήμα. Η σοβαρότερη ατμοσφαιρική επίπτωση κατά τη διάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος στην ατμόσφαιρα παρατηρείται όταν υπάρχει βροχή κατά μήκος της ζεύξης. Οι σταγόνες βροχής σκεδάζουν και απορροφούν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία προκαλώντας απόσβεση. Η εξασθένιση λόγω βροχής εξαρτάται από τη συχνότητα λειτουργίας το ύψος βροχόπτωσης, τη γωνία ανύψωσης, την πόλωση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος και το μήκος της διαδρομής του ραδιοκύματος υπό βροχή.

Στο Σχήμα 2.6 φαίνεται η μεταβολή της ειδικής απόσβεσης (dB/Km) λόγω βροχής συναρτήσει της συχνότητας για διάφορες τιμές του ύψους βροχόπτωσης (mm/h). Το Σχήμα 2.6 προέκυψε βάσει της Σύστασης P.838-1 (ITU-R Rec. P.838-1) [12] της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών. Σύμφωνα με τη Σύσταση P.838-1 η ειδική απόσβεση $\gamma_R$ (dB/Km) για ύψος βροχόπτωσης R (mm/h) δίνεται από τη σχέση:

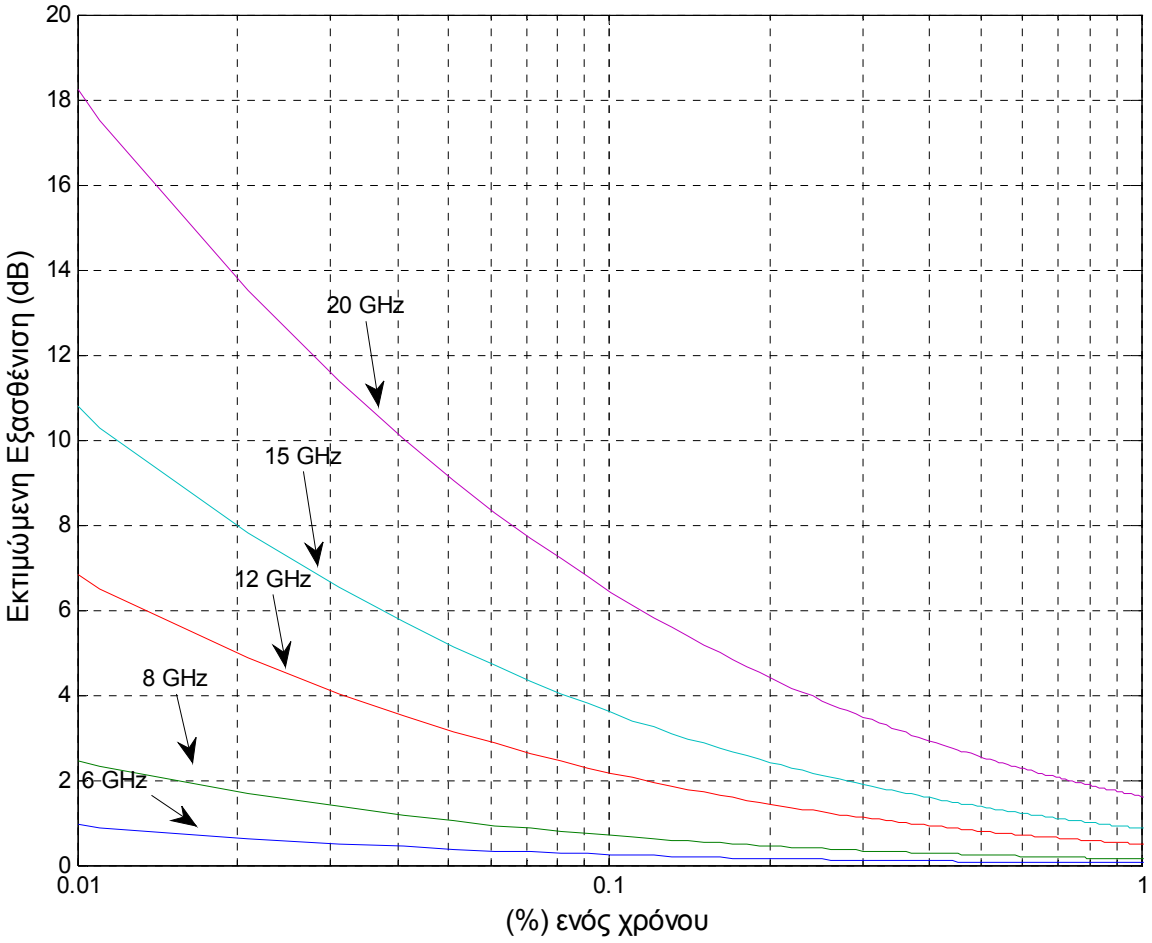
$$\gamma_R = kR^a \qquad \text{(dB)} \qquad (2.4.1)$$

Οι σταθερές k, α εξαρτώνται από τη συχνότητα του ραδιοκύματος και ο τρόπος υπολογισμού τους περιγράφεται στη Σύσταση P.838-1. Χρησιμοποιώντας τη παραπάνω σχέση και τις τιμές των k, α προκύπτει το Σχήμα 2.6. Από το Σχήμα 2.6 διαπιστώνεται ότι, για κάθε ύψος βροχόπτωσης, η ειδική απόσβεση αυξάνει με την αύξηση της συχνότητας. Μάλιστα, η τιμή της ειδικής απόσβεσης είναι αρκετά σημαντική για συχνότητες μεγαλύτερες των 10 GHz.



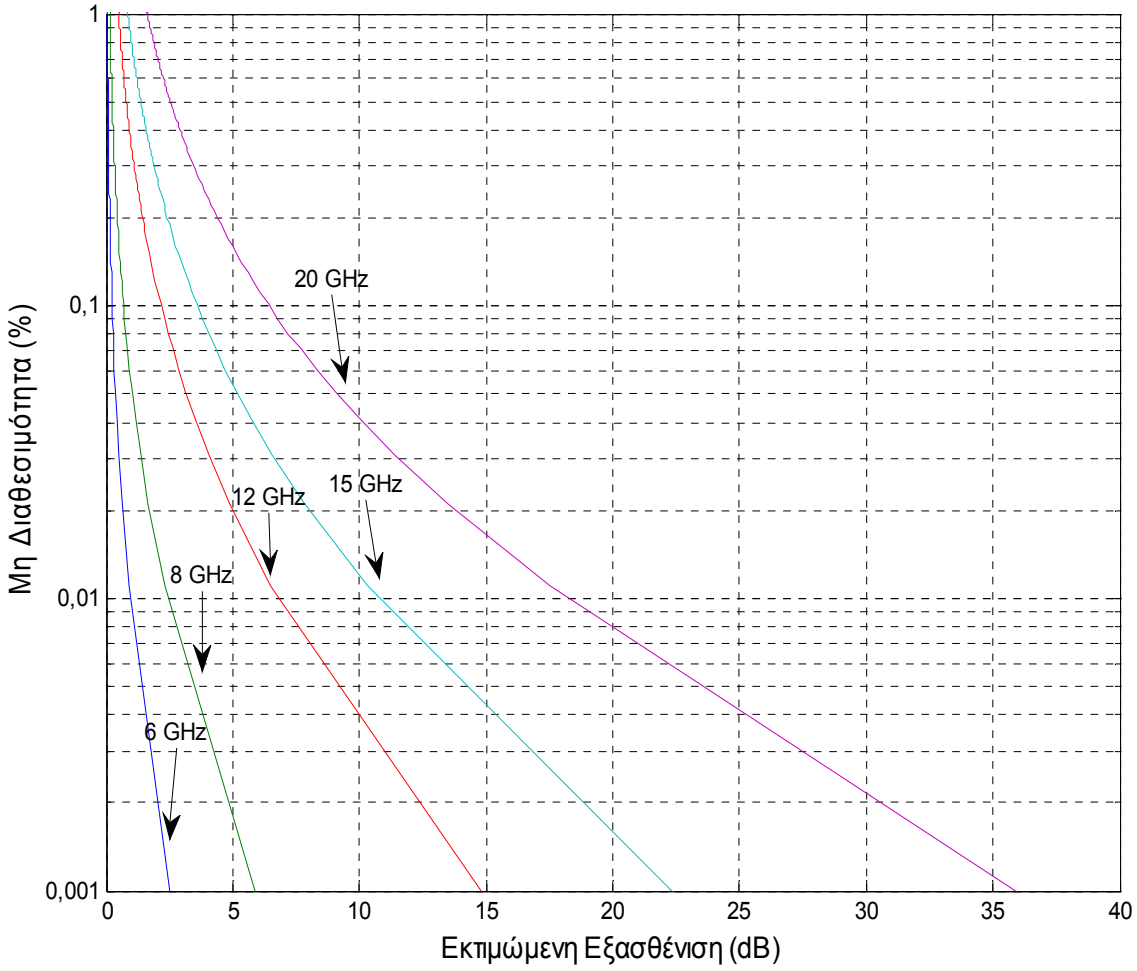

**Σχήμα 2.6 Η ειδική απόσβεση για διάφορες συχνότητες και εντάσεις βροχόπτωσης.**

Στο Σχήμα 2.7 έχει εφαρμοσθεί το μοντέλο της Σύστασης P.618-7 (ITU-R Rec. P.618-7) [13] της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών για την πρόβλεψη της ετήσιας πιθανότητας υπέρβασης στην κάτω ζεύξη ενός συστήματος που λειτουργεί στην Αθήνα. Ο σταθμός βάσης της στρατοσφαιρικής πλατφόρμας θεωρήθηκε ότι λειτουργεί με γωνία ανύψωσης $20^o$ και η πόλωση του ραδιοκύματος είναι κατακόρυφη. Ο τρόπος που προέκυψε το Σχήμα 2.4 περιγράφεται αναλυτικά στο Παράρτημα Β΄. Είναι προφανές ότι ένα σύστημα που λειτουργεί σε χαμηλές συχνότητες υποφέρει λιγότερο από διαλείψεις λόγω βροχής. Οι απόσβεση λόγω βροχής είναι αμελητέα για συχνότητες κάτω από τα 6 GHz.




**Σχήμα 2.7 Ετήσια πιθανότητα υπέρβασης της απόσβεσης λόγω βροχής για ζεύξη που λειτουργεί στην Αθήνα για διάφορες συχνότητες (κατακόρυφη πόλωση, γωνία ανύψωσης 20$^{o}$).**

Κάνοντας εναλλαγή αξόνων στο Σχήμα 2.7 προκύπτει το Σχήμα 2.8, το οποίο δείχνει τη σχέση μεταξύ της εξασθένισης λόγω βροχής σε διάφορες συχνότητες και της μη διαθεσιμότητας. Είναι φανερό ότι ένα στρατοσφαιρικό σύστημα που λειτουργεί σε χαμηλή ζώνη συχνοτήτων έχει σημαντικά συγκριτικά πλεονεκτήματα έναντι εκείνου του συστήματος που λειτουργεί σε υψηλότερες συχνότητες. Εάν η απαιτούμενη διαθεσιμότητα ζεύξης είναι μικρότερη του 99.5 %, ένα στρατοσφαιρικό σύστημα θα μπορεί να παρέχει το απαραίτητο περιθώριο ζεύξης ακόμα και στις υψηλότερες συχνότητες. Εντούτοις, πολύ υψηλοί στόχοι διαθεσιμότητας (π.χ. 99.99%) είναι επιτεύξιμοι μόνο στις χαμηλότερες συχνότητες.

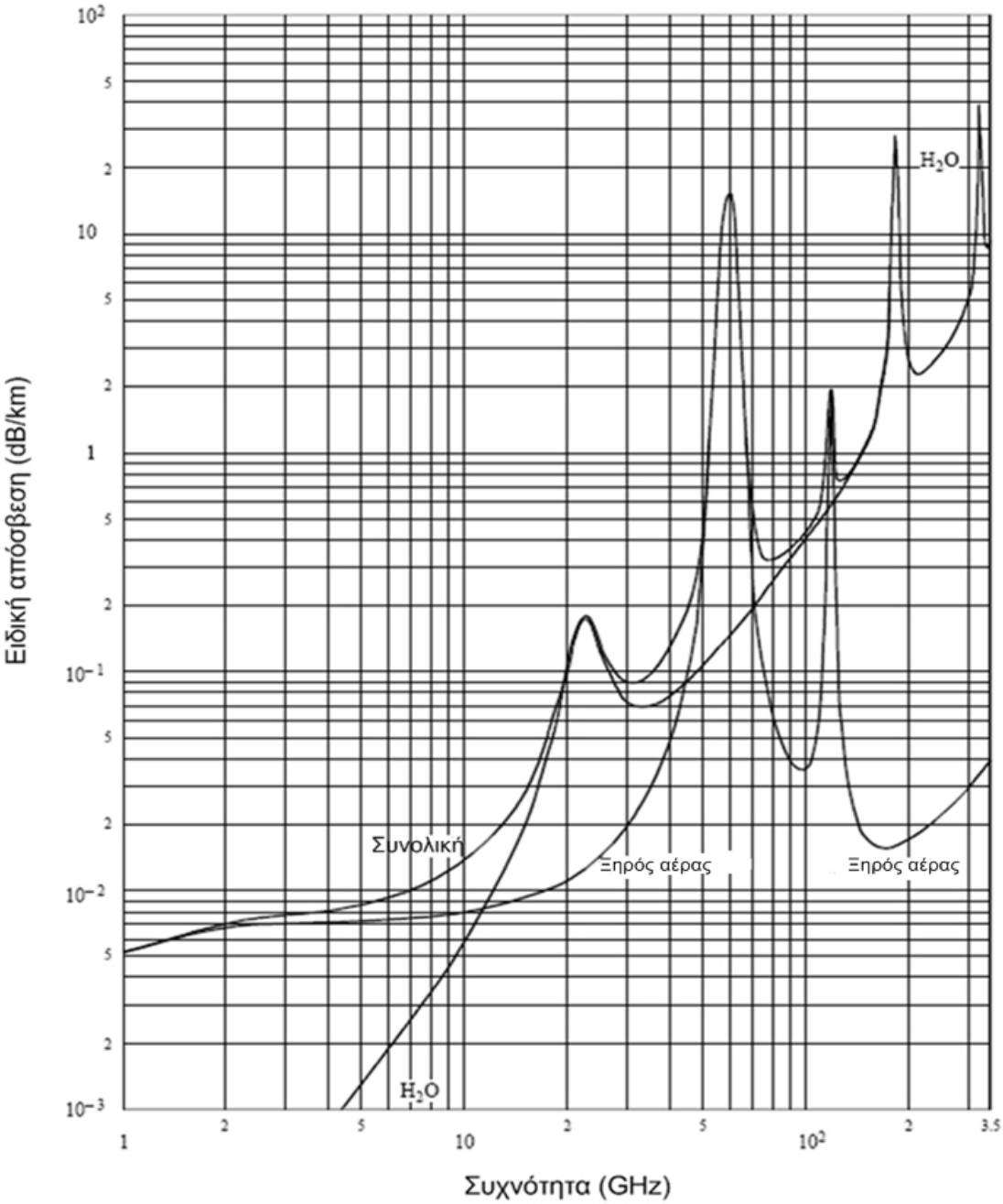



**Σχήμα 2.8 Χαρακτηριστικά απόσβεσης λόγω βροχής –Γεωγραφικό πλάτος: 37.8°, Γωνία ανύψωσης: 20°, Ύψος βροχόπτωσης: 30 mm/h.**

Συμπεραίνουμε από τα παραπάνω ότι η αύξηση της συχνότητας έχει δυσμενείς επιπτώσεις στις επικοινωνίες μέσω στρατοσφαιρικών πλατφορμών. Αυτό αποτελεί και το βασικό μειονέκτημα λειτουργίας στις ζώνες συχνοτήτων 31/28 GHz και 48/47 GHz. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να επιλεγούν όσο το δυνατό χαμηλότερες ζώνες συχνοτήτων για τη λειτουργία των στρατοσφαιρικών πλατφορμών.

– *Μικρότερη απόσβεση διάδοσης λόγω αερίων της ατμόσφαιρας.*

Εκτός από την απόσβεση διάδοσης λόγω βροχής η απορρόφηση από το οξυγόνο και τους υδρατμούς της ατμόσφαιρας συμβάλλει περαιτέρω στη συνολική απόσβεση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζεται η ειδική απόσβεση λόγω των αερίων της ατμόσφαιρας για συχνότητες από 1-350 GHz, στο επίπεδο της θάλασσας για ξηρό αέρα και υδρατμούς με πυκνότητα 7.5 gr/m$^3$, σε θερμοκρασία 15$^o$C και πίεση 1 ατμόσφαιρα (1013 mb).




**Σχήμα 2.9 Ειδική απόσβεση εξαιτίας ατμοσφαιρικών αερίων.**

**Πίεση (1013 mb)**

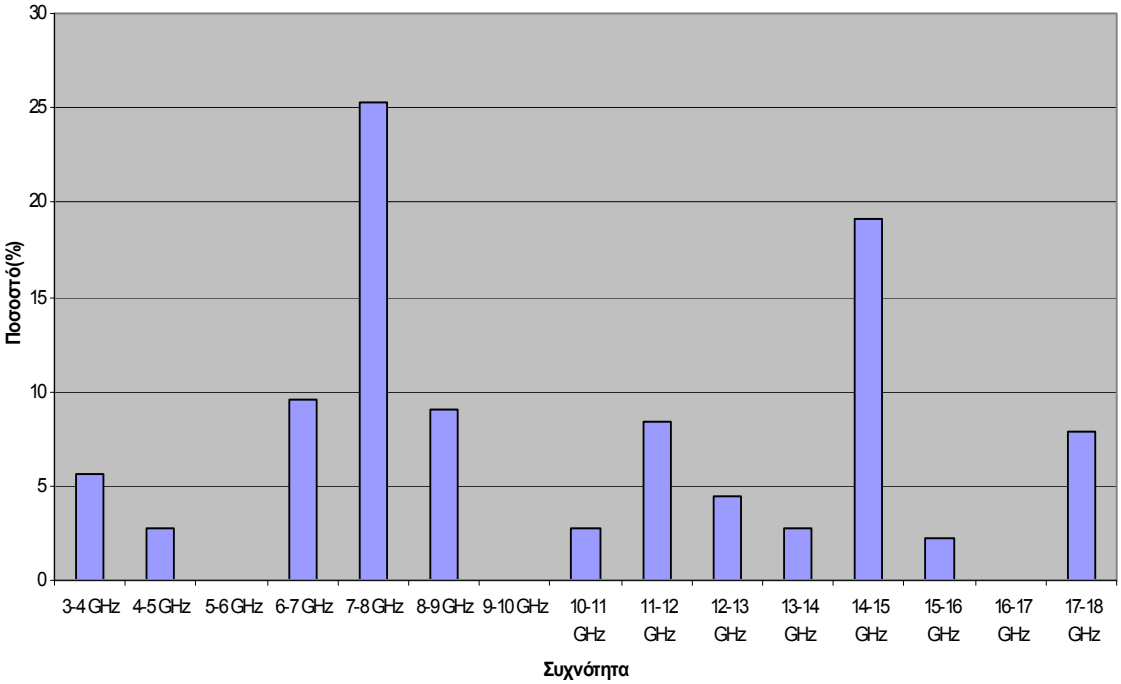
**Θερμοκρασία 15$^o$C**

**Πυκνότητα υδρατμών 7.5 gr/m$^3$**

Στο Σχήμα 2.9 φαίνεται ότι στα 3 GHz η συνολική ειδική απόσβεση λόγω αερίων της ατμόσφαιρας είναι 0.008 dB/km. Καθώς αυξάνει η συχνότητα η ειδική απόσβεση αυξάνει 'αργά' μέχρι τα 10 GHz. Στα 10 GHz η ειδική απόσβεση γίνεται 0.015 dB/km και έπειτα αυξάνει πιο 'γρήγορα' από πριν φτάνοντας τα 0.1 dB/km στα 20 GHz. Γίνεται λοιπόν φανερό πως για να αποφευχθούν οι αποσβέσεις λόγω των αερίων της ατμόσφαιρας θα πρέπει να επιλεγούν όσο το δυνατό χαμηλότερες συχνότητες για τη λειτουργία των στρατοσφαιρικών πλατφορμών και αν είναι δυνατό να βρίσκονται κάτω από τα 10 GHz, καθώς κάτω από τα 10 GHz οι απώλειες μπορούν να θεωρηθούν μηδενικές.

– *Αποφυγή ζωνών συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό.*

Κατά την επιλογή των ζωνών λειτουργίας των στρατοσφαιρικών πλατφορμών καλό θα ήταν να αποφευχθούν περιοχές στις οποίες έχουν ήδη ανατεθεί πολλές υπηρεσίες. Αντίθετα, ζώνες συχνοτήτων οι οποίες δεν πολυχρησιμοποιούνται θα ήταν καταλληλότερες για τη λειτουργία των στρατοσφαιρικών πλατφορμών. Στο Σχήμα 2.10 παρουσιάζεται το ποσοστό χρησιμοποίησης της ζώνης 3-18 GHz από επίγειες ζεύξεις στην περιοχή της Αττικής.




**Σχήμα 2.10 Επίγειες Ζεύξεις στη ζώνη 3-18 GHz στην Αττική.**

Από το Σχήμα 2.10 είναι φανερό ότι οι ζώνες 7-8 GHz και 14-15 GHz χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό. Αντίθετα, οι ζώνες 5-6 GHz, 9-10 GHz και 16-17 GHz δε χρησιμοποιούνται καθόλου. Οπότε, κατά την επιλογή των νέων βέλτιστων ζωνών λειτουργίας για τις στρατοσφαιρικές πλατφόρμες καλό θα ήταν, αν είναι δυνατό, να αποφευχθούν οι ζώνες 7-8 GHz και 14-15 GHz. Οι συχνότητες 5-6 GHz, 9-10 GHz και 16-17 GHz θα ήταν ιδανικές για τη λειτουργία των στρατοσφαιρικών πλατφορμών.

– *Αποφυγή ζωνών που έχουν ανατεθεί σε υπηρεσίες ραδιοεντοπισμού και ραδιοπλοήγησης.*

Οι υπηρεσίες ραδιοεντοπισμού (Radiolocation) και ραδιοπλοήγησης (Radionavigation) είναι πολύ "ευαίσθητες" υπηρεσίες. Το γεγονός αυτό μαρτυρά και η ανάθεση ορισμένων ζωνών συχνοτήτων αποκλειστικά στις υπηρεσίες αυτές. Για το λόγο αυτό είναι δύσκολη η συνύπαρξη των υπηρεσιών αυτών με τα στρατοσφαιρικά δίκτυα καθώς είναι δύσκολη η εύρεση κατάλληλων κριτηρίων συνύπαρξης των δύο υπηρεσιών. Επομένως θα πρέπει να αποφευχθούν συχνότητες που έχουν ανατεθεί σε αυτές τις τόσο "ευαίσθητες" υπηρεσίες.

– *Διαθέσιμο εύρος.*

Σαν ένα τελικό κριτήριο θα μπορούσαμε να συμπεριλάβουμε και το διαθέσιμο εύρος ζώνης το οποίο θα έχουμε προς εκμετάλλευση. Από το διαθέσιμο εύρος ζώνης θα εξαρτηθεί ο αριθμός των χρηστών που μπορούν να εξυπηρετηθούν και οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων. Γίνεται, λοιπόν, φανερή η ανάγκη για όσο το δυνατό μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Εντούτοις, εξαιτίας της λειτουργίας του στρατοσφαιρικού δικτύου σε χαμηλότερες συχνότητες η εύρεση μεγάλου εύρους ζώνης είναι εξαιρετικά δύσκολή. Έτσι, ένα εύρος ζώνης 100 MHz θα θεωρούνταν αρκετά ικανοποιητικό, αν και θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθεί και μικρότερο εύρος. Γίνεται σαφές, λοιπόν, ότι όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος ζώνης τόσο ιδανικότερη προς επιλογή γίνεται μία ζώνη συχνοτήτων.

## 2.4.2 Επιλογή Βέλτιστων Ζωνών Συχνοτήτων

Λαμβάνοντας υπόψη τα κριτήρια της προηγούμενης ενότητας καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα :

- Θα πρέπει να αποφευχθούν οι ζώνες συχνοτήτων του Πίνακα 2.10, καθώς και οι γειτονικές τους.

| | | |
|---|---|---|
| 3 260-3 267 MHz | 3 332-3 339 MHz | 3 345,8-3 352,5 MHz |
| 3 400-3 800 MHz | 4 500-4 800 MHz | 4 825-4 835 MHz |
| 4 950-4 990 MHz | 4 990-5 000 MHz | 5 725−5 875 MHz |
| 6 650-6 675,2 MHz | 7 000-7 750 MHz | 8 025-8 500 MHz |
| 10.4-10.47 GHz | 10.6-11.7 GHz | 12.5-12.75 GHz |
| 13.75-14.0 GHz | 14.47-14.5 GHz | 15.35-15.4 GHz |
| 17.3-18.0 GHz | | |

**Πίνακας 2.19 Μη επιτρεπτές ζώνες συχνοτήτων για χρήση από στρατοσφαιρικά δίκτυα.**

- Θα πρέπει να αποφευχθούν οι ζώνες συχνοτήτων που έχουν ανατεθεί στις ευαίσθητες υπηρεσίες της ραδιοπλοήγησης και του ραδιοεντοπισμού.

- Θα πρέπει να επιλεγούν όσο το δυνατόν μικρότερες συχνότητες για μικρότερες αποσβέσεις λόγω βροχής, οι οποίες είναι μηδενικές για συχνότητες κάτω από 6 GHz.

- Θα πρέπει να επιλεγούν συχνότητες μικρότερες των 10 GHz για λιγότερες αποσβέσεις λόγω των αερίων της ατμόσφαιρας.

- Καλό θα ήταν να αποφευχθούν ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό από άλλες υπηρεσίες.

- Θα πρέπει να επιλεγεί το μεγαλύτερο δυνατό εύρος ζώνης.

- Καλό θα ήταν στις επιλεγείσες συχνότητες να λειτουργεί κάποιο από τα ήδη υπάρχοντα πρότυπα

Με βάση την παραπάνω ανάλυση και τις αναθέσεις συχνοτήτων, που παρουσιάζονται στους Πίνακες 2.2, 2.3 και 2.4, καταλήγουμε στο ότι οι βέλτιστες ζώνες για τη λειτουργία των στρατοσφαιρικών δικτύων στη ζώνη 3-18 GHz είναι οι 4.4-4.5 GHz και 7.85-7.9 GHz. Οι συχνότητες αυτές έχουν ανατεθεί σε σταθερές και κινητές υπηρεσίες. Οι υπηρεσίες αυτές μπορούν να συνυπάρξουν με τις υπηρεσίες των στρατοσφαιρικών δικτύων. Το βασικό μειονέκτημα της επιλογής αυτής είναι το εύρος ζώνης των δύο ζωνών συχνοτήτων. Συγκεκριμένα στη ζώνη 4.4-4.5 GHz το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι 100 MHz, ενώ στη ζώνη 7.85-7.9 GHz είναι 50 MHz. Αν και ένα εύρος 100 MHz ή 50 MHz δεν είναι ιδιαίτερα δελεαστικό, η λειτουργία σε χαμηλότερες συχνότητες αποτελεί σημαντικό κίνητρο για την επιλογή των συχνοτήτων αυτών. Επίσης η ζώνη 7.85-7.9 GHz χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό στην περιοχή της Αττικής. Εντούτοις, τα σημαντικά πλεονεκτήματα της ζώνης αυτής μας οδηγούν να την επιλέξουμε.

Στις δορυφορικές επικοινωνίες επιλέγεται η μεγαλύτερη από τις δύο συχνότητες ως συχνότητα άνω ζεύξης. Ακόμη, στις δύο ζώνες συχνοτήτων που έχουν ήδη ανατεθεί για χρήση από τα στρατοσφαιρικά δίκτυα[2] χρησιμοποιείται μεγαλύτερη συχνότητα για την άνω ζεύξη. Έτσι, επιλέγεται η ζώνη συχνοτήτων 4.4-4.5 GHz (κεντρική συχνότητα 4.45 GHz) να χρησιμοποιηθεί για την κάτω ζεύξη, δηλαδή για την αποστολή δεδομένων από το αερόπλοιο στους επίγειους σταθμούς του HAPN και η ζώνη 7.85-7.9 GHz (κεντρική συχνότητα 7.875 GHz) για την άνω ζεύξη, δηλαδή για την αποστολή δεδομένων από τους επίγειους σταθμούς του HAPN στο αερόπλοιο. Οι παραπάνω προτάσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.11.

| | Άνω Ζεύξη | Κάτω Ζεύξη |
|---|---|---|
| Ζώνη συχνοτήτων | 4.4-4.5GHz | 7.85-7.9 GHz |
| Κεντρική συχνότητα | 4.45 GHz | 7.875 GHz |

**Πίνακας 2.20 Προτεινόμενες ζώνες λειτουργίας των HAPN στη ζώνη 3-18 GHz.**

Τέλος, αναφέρουμε συνοπτικά τα διαθέσιμα επικοινωνιακά πρότυπα της κάθε ζώνης που επιλέχτηκε. Στη ζώνη συχνοτήτων κάτω ζεύξης, 4.4-4.5 GHz, τα διαθέσιμα πρότυπα είναι τα DVB RCS, HiperMAN, IEEE 802.16a (WiMax), IEEE 802.16e. Αντίστοιχα, στη ζώνη συχνοτήτων άνω ζεύξης, 7.85-7.9 GHz, τα διαθέσιμα πρότυπα είναι τα DVB RCS, HiperMAN, IEEE 802.16a (WiMax).

[2] Πρόκειται για τις ζώνες 48/47 GHz και 31/28 GHz που έχουν αναφερθεί και στην αρχή του κεφαλαίου.

# Βιβλιογραφία

[1] "Frequency Allocations", Radio Regulation of ITU Article 5, Edition of 2004.

[2] Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, Αρ. φύλλου 399, Απρίλιος 2006.

[3] "Preliminary study on feasibility of High Altitude Platform Station (HAPS) in the fixed and mobile services in the frequency bands above 3 GHz allocated exclusively for terrestrial radiocommunication".

[4] R. Miura, M Suzuki, "Preliminary Flight Test Program on Telecom and Broadcasting Using High Altitude Platform Stations", Wireless Personal Communications, An International Journal, Kluwer Academic Publishers, vol.24, no.2, Jan.2003, pp.341-361.

[5] ITU-R Resolution 122, "Use of the bands 47.2-47.5 GHz and 47.9-48.2 GHz by high altitude platform stations (HAPS) in fixed service and by other services", WRC-2003, Geneva 2003.

[6] M. Lalovic, M. Fitch, M. Mohorcic, D. Grace, M. Oodo, P. Mitchell, G. White, "Delivering Broadband for All including Commercial and Technical Risk Assessment", CAPANINA Deliverable D12, CAP-D12-WP12-BT-PUB-01, FP6-IST-2003-506745, May 2005.

[7] ITU-R Resolution 145, "Potential use of the bands 27.5-28.35 GHz and 31.0-31.3 GHz by high altitude platform stations (HAPS) in the fixed service'', WRC-2003, Geneva 2003.

[8] ITU-R Resolution 221, "Use of high altitude platform stations providing IMT-2000 in the bands 1885-1980 MHz, 2010-2025 MHz and 2110-2170 MHz in the Region 1 and 3 and 1885-1980 MHz and 2110-2160 MHZ in Region 2", WRC-2003, Geneva 2003.

[9] ITU-R Resolution 734, "Feasibility of use of high altitude platform stations in the fixed and mobile services in the frequency bands above 3 GHz allocated exclusively for terrestrial radiocommunication'', WRC-2003, Geneva 2003.

[10] ITU-R Recommendation F.1501, "Coordination distance for systems in the fixed service (FS) involving high-altitude platform stations (HAPSs) sharing the frequency bands 47.2-47.5 GHz and 47.9-48.2 GHz with other systems in the fixed service".

[11] ITU-R Recommendation SA.1024-1, "Necessary bandwidths and preferred Frequency bands for data transmission from earth exploration satellites (not including meteorological satellites)".

[12] ITU-R Recommendation P.838-1, "Specific attenuation model for rain for use in prediction methods".

[13] ITU-R Recommendation P.618-7, “Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems”.

[14] ITU-R Recommendation P.676-5, “Attenuation by atmospheric gases”.

[15] M. Mohorcic, T. Javornik , A. Lavric, I. Jelovcan, E. Falletti, M. Mondin, A. Boch, L. Feletti, L. Lo Presti, D. Merino, D. Borio, J. A Delgado Penin, F. Arino, E. Bertran, “Selection of broadband communication standard for high-speed mobile scenario”, CAPANINA Deliverable D09, CAP-D09-WP21-JSI-PUB-01, FP6-IST-2003-506745, Feb. 2005

# Κεφάλαιο 3

# Μελέτη Τεχνικών Χαρακτηριστικών του Στρατοσφαιρικού Δικτύου

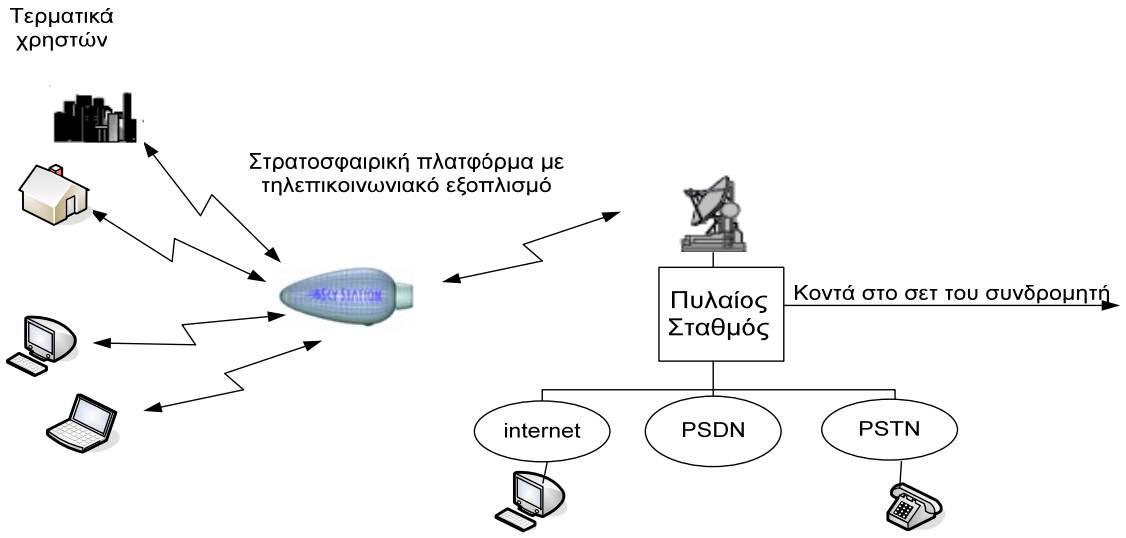
## 3.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά των Στρατοσφαιρικών Δικτύων στη ζώνη 48/47 GHz

Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών με τη Σύσταση F.1500 (ITU-R F.1500) [1] προτείνει τα τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά των στρατοσφαιρικών συστημάτων που λειτουργούν στις ζώνες συχνοτήτων 47.2-47.5 GHz και 47.9-48.2 GHz. Στην §3.1.1 περιγράφεται η αρχιτεκτονική του στρατοσφαιρικού δικτύου και οι τρεις βασικές περιοχές κάλυψης. Η §3.1.2 πραγματεύεται τις παραμέτρους εκπομπής της στρατοσφαιρικής πλατφόρμας και των επίγειων σταθμών του στρατοσφαιρικού δικτύου, ενώ η παράγραφος §3.1.3 περιγράφει τα διαγράμματα ακτινοβολίας των κεραιών που θα χρησιμοποιηθούν για την στρατοσφαιρική πλατφόρμα και για τους επίγειους χρήστες στη ζώνη 48/47 GHz. Τέλος στην παράγραφο §3.1.4 αναλύεται το φαινόμενο της εξωζωνικής εκπομπής και τρόποι για την αντιμετώπιση του.

### 3.1.1 Αρχιτεκτονική Δικτύου και Περιοχές Κάλυψης

Το στρατοσφαιρικό δίκτυο έχει μία διάταξη αστερισμού, με τη στρατοσφαιρική πλατφόρμα να λειτουργεί ως ο κύριος εξυπηρετητής. Η επικοινωνία είναι μεταξύ της πλατφόρμας και των τερματικών των χρηστών στο έδαφος, σε μία κυψελωτή διάταξη, επιτρέποντας την επαναχρησιμοποίηση της συχνότητας. Ο τηλεπικοινωνιακός εξοπλισμός στο HAP παράγει πολλαπλές δέσμες προς το έδαφος και παρέχει επαρκή κάλυψη σε μία κυκλική περιοχή με διάμετρο κάλυψης έως και 468 km, εξαρτώμενη από τη γωνία ανύψωσης των τερματικών του στρατοσφαιρικού δικτύου (HAPN- High Altitude Platform Network). Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές ακτίνας κάλυψης από στρατοσφαιρική πλατφόρμα σε ύψος 21 km και 25 km, ανάλογα με τη γωνία ανύψωσης της κεραίας του επίγειου σταθμού του στρατοσφαιρικού δικτύου.

Τα τερματικά των χρηστών είναι φορητές συσκευές οι οποίες επικοινωνούν απευθείας με την πλατφόρμα. Ένα τερματικό αποτελείται από μία μονάδα κεραίας και μία ψηφιακή μονάδα. Η επικοινωνία χρήστη με χρήστη επιτυγχάνεται με απευθείας μεταγωγή από την πλατφόρμα, μέσω ενός μεγάλου μεταγωγικού διακόπτη. Το επίγειο σύστημα αποτελείται από το κέντρο ελέγχου του HAPS και από τους πυλαίους σταθμούς (gateway stations), μέσω τον οποίον επιτυγχάνεται η σύνδεση με τα υπάρχοντα δημόσια δίκτυα τηλεφωνίας και δεδομένων, όπως PSTN, PDTN, Internet. Οι περισσότεροι πυλαίοι σταθμοί είναι μη επανδρωμένες, αυτόνομες μονάδες και η λειτουργία τους χειρίζεται από το κέντρο ελέγχου του HAPS. Στα συστήματα πρώτης γενιάς δε θα υπάρχει απευθείας ζεύξη μεταξύ δύο στρατοσφαιρικών δικτύων. Οι επικοινωνίες μεταξύ HAPNs θα πραγματοποιούνται μέσω των πυλαίων σταθμών. Η χωρητικότητα των πυλαίων σταθμών είναι 4-12 Gbit/s, ικανή να χειριστεί το 60% της κίνησης όλων των χρηστών. Γι' αυτό το λόγο η συνολική χωρητικότητα του τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού είναι 11-33 Gbit/s. Κάθε πυλαίος σταθμός χρησιμοποιεί υψηλού κέρδους καθοδηγήσιμες κεραίες (steerable antennas), με στενές δέσμες ακτινοβολίας. Το σύστημα έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε οι πυλαίοι σταθμοί να μπορούν να τοποθετηθούν οπουδήποτε μέσα στην περιοχή κάλυψης, με στόχο να ελαχιστοποιηθούν οι απαιτήσεις επίγειας υποδομής.




**Σχήμα 3.11 Απεικόνιση του σχηματισμού αστερισμού ενός στρατοσφαιρικού δικτύου.**

Η συνολική περιοχή κάλυψης μίας στρατοσφαιρικής πλατφόρμας διαιρείται σε τρεις ζώνες:

- *Ζώνη αστικής κάλυψης UAC (Urban Area Coverage)*: Οι γωνίες ανύψωσης των επίγειων σταθμών ως προς την πλατφόρμα κυμαίνονται μεταξύ 30 και 90 μοιρών. Η περιοχή κάλυψης στη ζώνη αυτή εκτείνεται από το σημείο ναδίρ κάτω από την πλατφόρμα έως τα 36 km ή 43 km, για υψόμετρο λειτουργίας 21 km και 25 km αντιστοίχως.. Οι χρήστες της αστικής ζώνης κάλυψης μπορούν να χρησιμοποιήσουν φορητές τερματικές συσκευές με εύρος δέσμης περίπου 11 μοίρες, ή κεραίες κέρδους 26 dBi και διαστάσεων 10 cm επί 10 cm. Τα τερματικά αυτά απαιτούν κατά προσέγγιση 0.15 Watt εκπεμπόμενης RF ισχύος. Οι κεραίες στον εναέριο σταθμό πρέπει να έχουν κέρδος 30 dBi (1 watt RF ισχύος ανά κανάλι).

- *Ζώνη προαστιακής κάλυψης SAC (Suburban Area Coverage)*: Οι γωνίες ανύψωσης των επίγειων σταθμών κυμαίνονται μεταξύ 15 και 30 μοιρών. Η περιοχή κάλυψης στην περίπτωση αυτή εκτείνεται από τα όρια της ζώνης UAC έως τα 76.5 km ή 90.5 km, για

υψόμετρο λειτουργίας 21 km και 25 km αντιστοίχως. Στα τερματικά των χρηστών είναι απαραίτητη η χρήση κατευθυντικών κεραιών υψηλότερου κέρδους (41dBi) με ισχύ εκπομπής 0.2 watt. Οι ίδιες κεραίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στη ζώνη UAC για σταθερή εγκατάσταση σε οροφές κτιρίων. Η εναέρια πλατφόρμα έχει όπως και πριν κεραίες κέρδους 30 dBi.

| Περιοχή κάλυψης | Γωνία ανύψωσης (σε μοίρες) | Ακτίνα Ραδιοκάλυψης (km) | |
|---|---|---|---|
| | | Πλατφόρμα στα 21 | Πλατφόρμα στα 25 |
| UAC | 90-30 | 0-36 | 0-43 |
| SAC | 30-15 | 36-76.5 | 43-90.5 |
| RAC | 15-5 | 76.5-203 | 90.5-234 |

**Πίνακας 3.21 Ακτίνα κάλυψης από στρατοσφαιρική πλατφόρμα.**

- *Ζώνη αγροτικής κάλυψης RAC (Rural Area Coverage)*: Οι γωνίες ανύψωσης κυμαίνονται από 5 έως 15 μοίρες και η περιοχή κάλυψης υπολογίζεται ότι φτάνει από τα όρια της ζώνης SAC έως τα 203 km ή 234 km ανάλογα με το αν η πλατφόρμα βρίσκεται στα 21 km ή στα 25 km από την επιφάνεια της θάλασσας. Η αγροτική ζώνη αναμένεται να αφιερωθεί στην υψηλής ταχύτητας, σημείου προς σημείο πρόσβαση και στην ευρεία κάλυψη περιοχών κάνοντας χρήση χαμηλότερων συχνοτήτων, από 800 MHz έως 5 GHz, καθώς η εξασθένηση που προκαλείται από τη βροχή και άλλα ατμοσφαιρικά φαινόμενα στα 47/48 GHz είναι πολύ μεγάλη.

### 3.1.2 Χαρακτηριστικά Εκπομπής

Οι παράμετροι εκπομπής του σταθμού της στρατοσφαιρικής πλατφόρμας για τη ζώνη 48/47 GHz παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2. Η επικοινωνία με τους τερματικούς χρήστες γίνεται με διαμόρφωση TDM 4-PSK, με εύρος ζώνης 11 MHz για την κάτω ζεύξη και 2.2 MHz για την άνω ζεύξη. Η επικοινωνία με τους πυλαίους σταθμούς γίνεται με υψηλού επιπέδου διαμόρφωση, QAM, με ένα εύρος ζώνης 88 MHz (11 MHz για κάθε φέρων). Αυτά με την υπόθεση ότι γίνεται χρήση $2\times100$ MHz φάσματος. Αν το φάσμα συχνοτήτων είναι στα $2\times300$ MHz, τότε θα ήταν δυνατό οι χρήστες να επικοινωνούν με την πλατφόρμα με εύρος 33 MHz για την κάτω ζεύξη.

| Ζεύξη | Στρατοσφαιρική πλατφόρμα | |
|---|---|---|
| | Ισχύς εκπομπής (dBW) | Κέρδος κεραίας (dBi)[1] |
| Αστική | 1.3 | 30 |
| Προαστιακή | 1.3 | 30 |
| Αγροτική | 3.5 | 41 |
| Πυλαίος σταθμός-Αστική | 0 | 35 |
| Πυλαίος σταθμός-Προαστιακή | 9.7 | 38 |

**Πίνακας 3.22 Παράμετροι εκπομπής στρατοσφαιρικής πλατφόρμας.**

[1] Αναφέρεται στο μέγιστο κέρδος της κεραίας.

Οι αντίστοιχες παράμετροι για τους σταθμούς εδάφους παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3. Για την άνω ζεύξη οι τερματικοί χρήστες κάνουν χρήση πολλαπλής φέρουσας TDMA (multicarrier TDMA) με QPSK διαμόρφωση, ενώ οι πυλαίοι σταθμοί θα χρησιμοποιούν παρόμοιες τεχνικές με αυτές της στρατοσφαιρικής πλατφόρμας.

| Ζεύξη | Επίγειος σταθμός | |
|---|---|---|
| | Ισχύς εκπομπής (dBW) | Κέρδος κεραίας (dBi) |
| Αστική | -8.2 | 23 |
| Προαστιακή | -7 | 38 |
| Αγροτική | -1.5 | 38 |
| Πυλαίος σταθμός-Αστική | 1.7 | 46 |
| Πυλαίος σταθμός-Προαστιακή | 13.4 | 46 |

**Πίνακας 3.23 Παράμετροι εκπομπής επίγειων σταθμών στρατοσφαιρικού δικτύου.**

### 3.1.3 Διαγράμματα Ακτινοβολίας Κεραιών

Τα διαγράμματα ακτινοβολίας των επίγειων σταθμών (τερματικοί χρήστες, πυλαίοι σταθμοί) περιγράφονται στη Σύσταση F. 699-5 (ITU-R Rec. F. 699-5) [2] της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών, και βασίζονται στο παρακάτω μαθηματικό μοντέλο:

– Για D/λ>100, όπου D η διάμετρος της κεραίας και λ το μήκος κύματος:

$$G(\varphi) = G_{\max} - 2.5\times10^{-3}\left(\frac{D}{\lambda}\varphi\right)^2 \quad \text{για} \quad 0^\circ < \varphi < \varphi_m \qquad (3.1.1)$$

$$G(\varphi) = G_1 \quad \text{για} \quad \varphi_m \le \varphi < \varphi_r \qquad (3.1.2)$$

$$G(\varphi) = 32 - 25\log\varphi \quad \text{για} \quad \varphi_r \le \varphi < 48^\circ \qquad (3.1.3)$$

$$G(\varphi) = -10 \quad \text{για} \quad 48^\circ \le \varphi \le 180^\circ \qquad (3.1.4)$$

όπου:

$G_{max}$: το μέγιστο κέρδος (dBi),

$$20\log\frac{D}{\lambda} \approx G_{\max} - 7.7 \qquad (3.1.5)$$

G(φ): κέρδος αναφορικά με μία ισοτροπική κεραία (dBi),

φ: η γωνία απόκλισης σε μοίρες,

D: η διάμετρος της κεραίας,

λ: το μήκος κύματος (εκφρασμένο στις ίδιες μονάδες με τη διάμετρο),

$G_1$: κέρδος του πρώτου πλευρικού λοβού.

$$G_1 = 2 + 15\log(D/\lambda) \qquad \text{dB} \qquad (3.1.6)$$

$$\varphi_m = \frac{20\lambda}{D}\sqrt{G_{\max} - G_1} \qquad \text{μοίρες} \qquad (3.1.7)$$

$$\varphi_r = 15.85\left(\frac{D}{\lambda}\right)^{-0.6} \qquad \text{μοίρες} \qquad (3.1.8)$$

– Για $D/\lambda \leq 100$:

$$G(\varphi) = G_{\max} - 2.5\times10^{-3}\left(\frac{D}{\lambda}\varphi\right)^2 \qquad \text{για} \quad 0^\circ < \varphi < \varphi_m \qquad (3.1.9)$$

$$G(\varphi) = G_1 \qquad \text{για} \quad \varphi_m \leq \varphi < 100\frac{\lambda}{D} \qquad (3.1.10)$$

$$G(\varphi) = 52 - 10\log\frac{D}{\lambda} - 25\log\varphi \qquad \text{για} \quad 100\frac{\lambda}{D} \leq \varphi < 48^\circ \qquad (3.1.11)$$

$$G(\varphi) = 10 - 10\log\frac{D}{\lambda} \qquad \text{για} \quad 48^\circ \leq \varphi < 180^\circ \qquad (3.1.12)$$

Τα διαγράμματα ακτινοβολίας των κεραιών των στρατοσφαιρικών πλατφορμών, συμμορφώνονται με τη Σύσταση S.672-4 (ITU-R Rec. S.672-4) [3]. Σύμφωνα με τη Σύσταση S.672-4 τα διαγράμματα ακτινοβολίας των κεραιών προκύπτουν από το παρακάτω μαθηματικό μοντέλο:

$$G(\varphi) = G_m - 3(\varphi/\varphi_b)^\alpha \qquad \text{για} \quad \varphi_b \leq \varphi \leq \alpha\varphi_b \qquad (3.1.13)$$

$$G(\varphi) = G_m + L_N + 20\log(z) \qquad \text{για} \quad \alpha\varphi_b < \varphi \leq 0.5b\varphi_b \qquad (3.1.14)$$

$$G(\varphi) = G_m + L_N \quad \text{για} \quad 0.5b\varphi_b < \varphi \le b\varphi_b \tag{3.1.15}$$

$$G(\varphi) = X\text{-}25\log(\phi) \quad \text{για} \quad b\varphi_b < \varphi \le Y \tag{3.1.16}$$

$$G(\varphi) = L_F \quad \text{για} \quad Y < \varphi \le 90^\circ \tag{3.1.17}$$

$$G(\varphi) = L_B \quad \text{για} \quad 90^\circ < \varphi \le 180^\circ \tag{3.1.18}$$

όπου:

$$X = G_m + L_N + 25\log(b\phi_b) \tag{3.1.19}$$

$$Y = b\varphi_b \times 10^{0,04(G_m + L_N - L_F)} \tag{3.1.20}$$

$$\varphi_b = \sqrt{\frac{27000}{10^{0.1G_m}}} / 2 \tag{3.1.21}$$

$$L_B = 15 + L_N + 0.25G_m + 5\log(z) \tag{3.1.22}$$

G(φ): το κέρδος της κεραίας σε γωνία φ ως προς την κατεύθυνση του κύριου λοβού (dBi)

$G_m$: το μέγιστο κέρδος (dBi)

$L_N$: στάθμη κοντινού πλευρικού λοβού (near-in-side-lobe level) (dB) αναφορικά με το κέρδους κορυφής που απαιτείται από τον σχεδιασμό του συστήματος.

$L_F$: 0 dBi στάθμη μακρινού πλευρικού λοβού (far side-lobe level)

$L_N$=-20dB, $L_F$=-10dBi, για την καλύτερη απόδοση των κεραιών της πλατφόρμας

z: ο λόγος μεγίστου προς ελαχίστου άξονας για την ακτινοβολούμενη δέσμη.

### 3.1.4 RF Απόκριση Φίλτρου και Εξωζωνική (Out-of-band) Εκπομπή

Για τις ζεύξεις των χρηστών χρησιμοποιείται συμφασική QPSK διαμόρφωση. Η φασματική πυκνότητα ισχύος μειώνεται με τετραγωνικό ρυθμό συναρτήσει της συχνότητας εκπομπής ως προς τη συχνότητα φέροντος.

$$S_{QPSK} = C \cdot A^2 \cdot T_b \left| \frac{\sin(2\pi(f - f_c) \cdot T_b)}{2\pi(f - f_c) \cdot T_b} \right|^2 \tag{3.1.23}$$

όπου:

$C \cdot A^2$: συνολική κανονικοποιημένη ισχύς σήματος άπειρου εύρους, πάνω σε 1Ω αντίσταση

$f_b$ : ρυθμός ψηφίου (bit rate)

$T_b = 1/ f_b$: διάρκεια ψηφίου (bit duration)

$f_c$: συχνότητα φέροντος.

Για την μείωση της διασυμβολικής παρεμβολής (ISI- Inter-symbol-interference) και την περαιτέρω μείωση εξωζωνικής εκπομπής (OoB- Out-of-Band) είναι αναγκαίο επιπρόσθετο φιλτράρισμα. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με ένα φίλτρο ανυψωμένο συνημίτονου (raised cosine filter). Ένα φίλτρο ανυψωμένο συνημίτονου μπορεί να εκπληρωθεί είτε μόνο με φίλτρα επιφανειακών ακουστικών κυμάτων (SAW- Surface acoustic Wave), ή με ένα συνδυασμό ψηφιακών (βασικής ζώνης) και αναλογικών φιλτραρισμάτων, χρησιμοποιώντας φίλτρα SAW.

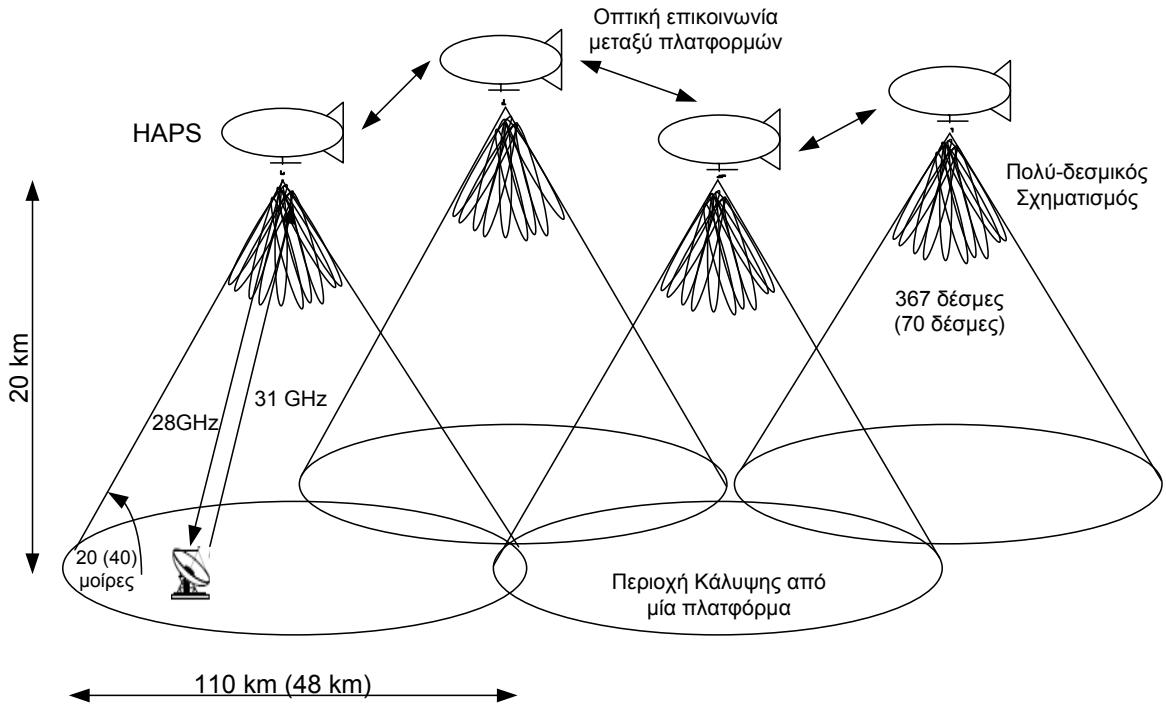
## 3.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά των Στρατοσφαιρικών Δικτύων στη ζώνη 31/28 GHz

Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών, με τη Σύσταση F.1569 (ITU-R F.1569) [4], προτείνει τα τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά των σταθερών υπηρεσιών των στρατοσφαιρικών δικτύων για συχνότητες λειτουργίας 27.5-28.35 GHz και 31.0-31.3 GHz. Στην §3.2.1 αναφέρονται τα γενικά χαρακτηριστικά του στρατοσφαιρικού δικτύου. Τα ύψη τοποθέτησης των πλατφορμών προσδιορίζονται στην §3.2.2. Η §3.2.3 αναφέρεται στην επιλογή των γωνιών ανύψωσης των επίγειων σταθμών του στρατοσφαιρικού δικτύου. Στην §3.2.4 παρουσιάζονται οι προδιαγραφές των κεραιών και στην §3.2.5 αναλύεται το φαινόμενο θωράκισης της οπισθόδοτης ακτινοβολίας από το αερόπλοιο. Στην §3.2.6 περιγράφεται το σύστημα αυτόματης ρύθμισης της ισχύος εκπομπής, ενώ η §3.2.7 αναφέρεται στη διαθεσιμότητα ζεύξης και η §3.2.8 στον μέγιστο αριθμό των ταυτόχρονα μεταδιδόμενων φερόντων. Τέλος, στην §3.2.9 παρουσιάζεται το φαινόμενο της εξωζωνικής εκπομπής για την άνω ζεύξη των HAPS στα 31 GHz.

### 3.2.1 Γενικά Χαρακτηριστικά Στρατοσφαιρικού Δικτύου

Σε ένα τυπικό στρατοσφαιρικό δίκτυο ο τηλεπικοινωνιακός εξοπλισμός εγκαθίσταται σε μία πλατφόρμα, η οποία τοποθετείται σε ένα σταθερό σημείο, σε ύψος 20 έως 25 km. Η απαραίτητη ηλεκτρική ισχύς για τη διατήρηση της θέσης της στρατοσφαιρικής πλατφόρμας, αλλά και για τη λειτουργία του τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού, παρέχεται από ηλιακές κυψέλες που βρίσκονται στο πάνω μέρος της εξωτερικής επιφάνειας του αερόπλοιου. Ταυτόχρονα ηλεκτρική ισχύς αποθηκεύεται σε συσσωρευτές ενέργειας για τη λειτουργία του σταθμού τη νύχτα.

Στο κάτω μέρος του αερόπλοιου τοποθετείται μία κεραία πολλαπλής δέσμης, η οποία παρέχει ζεύξεις πρόσβασης στους σταθμούς εδάφους. Κάθε δέσμη που δημιουργείται από την κεραία αντιστοιχεί σε μία κυψέλη στο έδαφος, με παράγοντα επαναχρησιμοποίησης συχνότητας τουλάχιστον τέσσερα. Για την κάλυψη μίας ευρείας περιοχής απαιτούνται αρκετά αερόπλοια. Οι στρατοσφαιρικοί σταθμοί συνδέονται μεταξύ τους με ασύρματες ζεύξεις, όπως ζεύξεις οπτικού κύματος (optical wave links), για να δημιουργήσουν ένα αποκλειστικά ασύρματο δίκτυο. Στο Σχήμα 3.2 φαίνονται δύο παραδείγματα στρατοσφαιρικού δικτύου στη ζώνη 31/28 GHz για ελάχιστη γωνία ανύψωσης 20 και 40 μοίρες.




**Σχήμα 3.12 Απεικόνιση στρατοσφαιρικού δικτύου παροχής σταθερών υπηρεσιών στη ζώνη 31/28 GHz.**

## 3.2.2 Ύψος Στρατοσφαιρικού Σταθμού

Η κάλυψη οπτικής επαφής από ένα στρατοσφαιρικό σταθμό αυξάνεται καθώς αυξάνεται και το ύψος τοποθέτησης του. Εντούτοις, η ατμοσφαιρική πυκνότητα μειώνεται σημαντικά σε μεγαλύτερα ύψη. Στον Πίνακα 3.4 φαίνεται η ατμοσφαιρική πυκνότητα και πίεση σε διάφορα ύψη. Η ατμοσφαιρική πυκνότητα σε ύψος 50 km είναι περίπου 90 φορές μικρότερη απ' ότι σε ύψος 20 km. Αυτό σημαίνει ότι ένα αερόπλοιο σε ύψος 50 km χρειάζεται αέριο Ήλιο 90 φορές περισσότερο από ότι σε ύψος 20 km, το δε μήκος του πρέπει να είναι 4.5 φορές μεγαλύτερο. Θεωρώντας ότι στα 20 km χρειάζεται ένα αερόπλοιο μήκους 200 m για τη μεταφορά του τηλεπικοινωνιακού φορτίου, στα 50 km, για τη μεταφορά του ίδιου φορτίου, απαιτείται ένα αερόπλοιο μήκους 900 m. Είναι όμως αδύνατο με την υπάρχουσα τεχνολογία να φτιαχτεί ένα τόσο μεγάλο αερόπλοιο.

| Ύψος (km) | Ατμοσφαιρική Πυκνότητα ($kg/m^3$) | Πίεση (hpa) |
|---|---|---|
| 0 | 1.22 | 1013 |
| 15 | 0.195 | 121 |
| 20 | 0.0889 | 55.3 |
| 25 | 0.0401 | 25.5 |
| 30 | 0.0184 | 12.0 |
| 50 | 0.00103 | 0.798 |

**Πίνακας 3.24 Ατμοσφαιρική πυκνότητα και πίεση στη στρατόσφαιρα.**

Η σχέση της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος από την επιφάνεια της Γης έχει δειχτεί στο Σχήμα 1.10. Από το σχήμα αυτό φαίνεται ότι η ταχύτητα του ανέμου παρουσιάζει ένα τοπικό ελάχιστο ανάμεσα στα ύψη 20-25 km. Πάνω από τα 25 km η ταχύτητα αυξάνει συνεχώς καθώς αυξάνει το ύψος, και στα 50 km γίνεται τέσσερις φορές μεγαλύτερη από ότι στα 20 km. Η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου σε μεγαλύτερα ύψη κάνει πιο δύσκολη τη διατήρηση της θέσης του στρατοσφαιρικού σταθμού, καθώς απαιτείται μεγαλύτερη προωθητική ισχύς και κατά συνέπεια μεγαλύτεροι συσσωρευτές ενέργειας για τη νυχτερινή λειτουργία.

Με βάση την παραπάνω ανάλυση, προκύπτει ότι το ύψος του στρατοσφαιρικού σταθμού θα πρέπει να είναι μικρότερο από 25 km. Έτσι αποφεύγονται οι ισχυρότεροι άνεμοι και η μικρότερη ατμοσφαιρική πυκνότητα που επικρατούν στα μεγαλύτερα ύψη της ατμόσφαιρας.

### 3.2.3 Ελάχιστη Λειτουργική Γωνία Ανύψωσης

Η ελάχιστη λειτουργική γωνία ανύψωσης καθορίζει την περιοχή παροχής υπηρεσιών ενός απλού HAP. Όσο μικρότερη είναι η ελάχιστη γωνία ανύψωσης, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η περιοχή παροχής υπηρεσιών. Το τίμημα, όμως, της επιλογής μικρής γωνίας ανύψωσης είναι η αύξηση της διαδρομής διάδοσης μέσα στη βροχή. Αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερες απώλειες λόγω βροχής και για την αντιμετώπιση τους απαιτείται μεγαλύτερη ισοδύναμη ισότροπα ακτινοβολούμενη ισχύς (e.i.r.p. - equivalent isotropic radiated power).

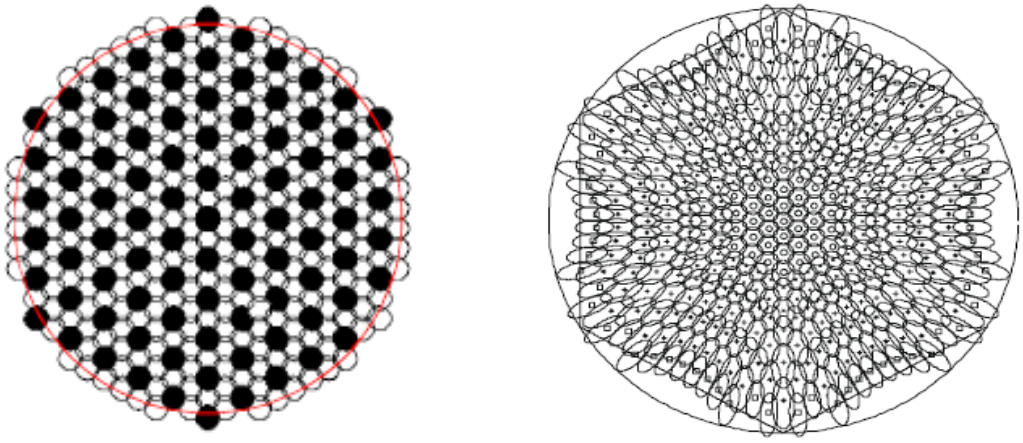
Η τυπική τιμή της ελάχιστης λειτουργικής γωνίας ανύψωσης για ένα σύστημα HAPs που λειτουργεί στα 28/31 GHz μπορεί να είναι πάνω από 20 μοίρες. Η λειτουργία με μικρότερη γωνία ανύψωσης χρειάζεται υψηλότερη e.i.r.p. στην άνω και κάτω ζεύξη εξαιτίας της μακρύτερης διαδρομής διάδοσης και επομένως της μεγαλύτερης απόσβεσης λόγω βροχής. Θα μπορούσε επίσης να προκαλέσει δυσκολίες συνύπαρξης των HAPs με άλλα συστήματα όπως τα δορυφορικά, τις σταθερές υπηρεσίες, καθώς και τις υπηρεσίες διαστημικού ενδιαφέροντος. Επιπρόσθετα, με χαμηλότερες γωνίες ανύψωσης στις αστικές και ορεινές περιοχές θα υποβιβαζόταν η διαθεσιμότητα της περιοχής εξαιτίας της επισκίασης από τα κτίρια και τα βουνά.

Μία μεγαλύτερη ελάχιστη γωνία ανύψωσης, για παράδειγμα 40 μοιρών, είναι επίσης πιθανή για να μειώσει την παρεμβολή από και προς άλλες υπηρεσίες αλλά και να αυξήσει την διαθεσιμότητα της περιοχής κυρίως στις αστικές και προαστιακές περιοχές. Όσο μεγαλύτερη είναι η ελάχιστη γωνία ανύψωσης, τόσο μεγαλύτερος αριθμός HAPs θα χρειαστεί για να καλύψει μια συγκεκριμένη περιοχή στο έδαφος, ενώ ο συνολικός αριθμός των δεσμών κηλίδας για όλα τα HAPs παραμένει αμετάβλητος.

### 3.2.4 Προδιαγραφές Κεραιών

Μία κεραία πολλαπλής δέσμης είναι προτιμότερη για μία στρατοσφαιρική πλατφόρμα, γιατί μπορεί να καλύψει πολλούς επίγειους συνδρομητικούς σταθμούς από ένα μόνο HAPS με υψηλή απόδοση επαναχρησιμοποίησης συχνότητας. Στο Σχήμα 3.3 a φαίνεται ένα χαρακτηριστικό ίχνος (footprint) μιας κεραίας πολλαπλής δέσμης όταν η ελάχιστη γωνία ανύψωσης είναι 20 μοίρες. Ο αριθμός των δεσμών κηλίδας είναι 367. Το μέγεθος των ιχνών μιας απλής δέσμης είναι για όλα ίσο (μέχρι 6 km σε διάμετρο) σε αυτή την περίπτωση. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί εκχωρώντας το διαφορετικό κέρδος κεραίας σε κάθε δέσμη κηλίδας σύμφωνα με την γωνία ανύψωσης της και χρησιμοποιώντας ελλειπτική σχηματομορφή δέσμης. Αυτός ο σχεδιασμός πολλαπλής δέσμης αναμένεται να δώσει μικρότερη παρεμβολή σε/από άλλες υπηρεσίες σε μικρές γωνίες ανύψωσης γιατί οι δέσμες κοντά στην άκρη της περιοχής κάλυψης σε μικρές γωνίες ανύψωσης δίνουν υψηλότερο κέρδος, στενότερο πλάτος δέσμης και μικρότερη στάθμη πλευρικού λοβού από τις δέσμες που βρίσκονται κοντά στο κέντρο της περιοχής κάλυψης.

Ένας εναλλακτικός σχεδιασμός του κυψελωτού δικτύου φαίνεται στο Σχήμα 3.3 b. Το ίχνος της κεραίας σχηματίζεται από 397 κυκλικές δέσμες με πέντε διαφορετικά κέρδη κεραιών. Η ισχύς εκπομπής για κάθε δέσμη καθορίζεται έτσι ώστε η πυκνότητα ροής ισχύος (pfd- power flux density) στο έδαφος να είναι ίση σε όλες τις δέσμες.



(a) (b)

**Σχήμα 3.13 Παράδειγμα ίχνους πολλαπλών δεσμών (a) ελλειπτικής δέσμης ενιαίο μοντέλο ίχνους (367 δέσμες) (b) κυκλικής δέσμης πολυζωνικό μοντέλο ίχνους (397 δέσμες)**

Ο παράγοντας επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας είναι τέσσερα για μελέτες συνύπαρξης, επειδή μπορεί να δώσει τη χειρότερη αθροιστική παρεμβολή από την κάτω ζεύξη των HAPS σε άλλες πρωτεύουσες υπηρεσίες. Με παράγοντα επαναχρησιμοποίησης μικρότερο του τέσσερα, ίσως είναι δύσκολο να κρατηθεί επαρκής δια-δεσμική απομόνωση σε επιτρεπτά επίπεδα

### 3.2.5 Φαινόμενο Θωράκισης της Οπισθόδοτης Ακτινοβολίας (Backward Radiation) από το Αερόπλοιο

Το περίβλημα του αερόπλοιου πρέπει να είναι επιστρωμένο από μεταλλικό υμένα (συνήθως αλουμίνιο). Αυτή η επίστρωση θα μπλοκάρει την οπισθόδοτη ακτινοβολία από την κεραία που είναι εγκατεστημένη στη βάση του αερόπλοιου, γιατί το μέγεθος του σώματος του αερόπλοιου θα είναι αρκετά μεγάλο συγκρινόμενο με το μήκος κύματος του σήματος.

Για τον υπολογισμό της απόσβεσης του φαινόμενου θωράκισης, θεωρείται ένα απλό διδιάστατο πρόβλημα σκέδασης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4. Η σχετική ηλεκτρομαγνητική ισχύς στην επιφάνεια του κυλίνδρου στην κατεύθυνση του φ (μοίρες) εκφράζεται από την παρακάτω σχεση (3.2.1) ως συνάρτηση της συχνότητας του φέροντος σήματος και της ακτίνας του κυλίνδρου.

$$P = 20\log_{10}\left|\frac{1}{\pi k\alpha}\sum_{n=0}^{\infty}\varepsilon_n \frac{(-j)^{n-1}}{H_n^{(1)'}(k\alpha)}\cos n\phi\right| \qquad \text{(dB)} \qquad (3.2.1)$$

όπου :

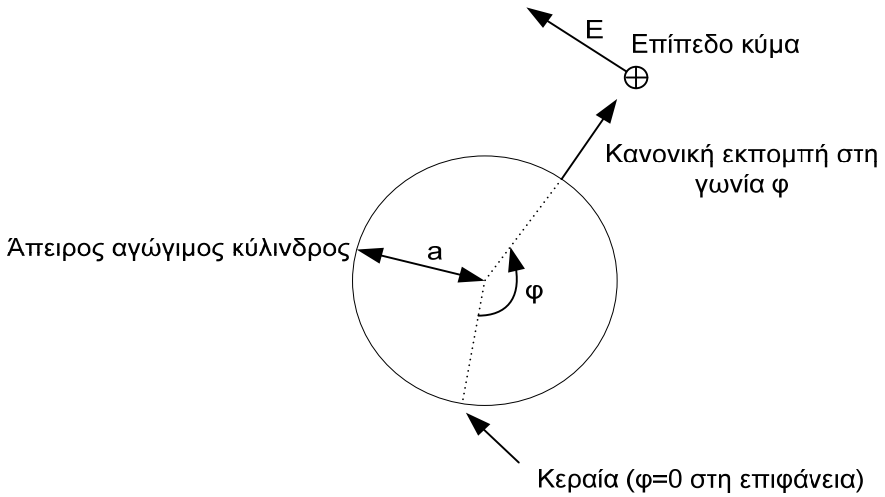
α : η ακτίνα του κυλίνδρου

k=2π/λ

λ : το μήκος κύματος του φέροντος σήματος

$\varepsilon_n$ (n = 0) , 1(n ≠ 0) και

$H_n^{(1)'}$ : είναι το παράγωγο της ν-στης σειράς της συνάρτησης Hankel πρώτου τύπου.




**Σχήμα 3.14 Διδιάστατο μοντέλο σκέδασης επίπεδου κύματος από άπειρο αγώγιμο κύλινδρο.**

Για μήκος αερόπλοιου μεγαλύτερο από 7.5 m και συχνότητα μεγαλύτερη από 20 GHz, η μάσκα εξασθένισης εξαιτίας του φαινόμενου θωράκισης από την μεταλλική επίστρωση του σώματος του αερόπλοιου υπολογίζεται από τις ακόλουθες ισότητες :

$$\begin{array}{lll} 0 & (dB) & 0° \leq \theta < 90° \\ 0.5(\theta - 90) & (dB) & 90° \leq \theta < 120° \\ 15 & (dB) & 120° \leq \theta \leq 180° \end{array} \qquad (3.2.2)$$

όπου :

θ: είναι η γωνία διαχωρισμού της κατεύθυνσης ενδιαφέροντος από την ναδίρ κατεύθυνση του HAPS.

## 3.2.6 Αυτόματη ρύθμιση Ισχύος Εκπομπής

Εάν η εκπεμπόμενη ισχύς είναι σταθερή απαιτείται ένα μεγάλο περιθώριο βροχόπτωσης. Αυτό μπορεί να προκαλέσει παρεμβολές σε άλλες υπηρεσίες κάτω από συνθήκες καθαρού ουρανού. Για το λόγο αυτό πρέπει να χρησιμοποιηθεί αυτόματη ρύθμιση της ισχύος εκπομπής (ATPC - Automatic Transmitting Power Control) για να μειωθεί η πιθανότητα παρεμβολής. Το ATPC υλοποιείται με ένα υψηλής ισχύος ενισχυτή (HPA - High Power Amplifier) μεταβλητού κέρδους. Το πιο απλό ATPC υλοποιείται με ένα μεταγωγικό εξασθενητή απλού βήματος.

Οι πομποί στο στρατοσφαιρικό σταθμό αλλά και οι πομποί στο έδαφος εκπέμπουν το σήμα με την ελάχιστη ισχύ κάτω από συνθήκες καθαρού ουρανού. Όταν το σήμα εξασθενεί από τις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις, οι πομποί μπορούν αυτόματα να αυξάνουν την ισχύ του εκπεμπόμενου σήματος ώστε να αντισταθμίσουν την εξασθένιση. Με τον τρόπο αυτό ελαχιστοποιούνται και οι παρεμβολές από το στρατοσφαιρικό δίκτυο σε άλλες υπηρεσίες.

## 3.2.7 Διαθεσιμότητα Ζεύξης

Η διαθεσιμότητα ζεύξης που απαιτείται για σταθερές υπηρεσίες μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το είδος της χρήσης. Εάν για παράδειγμα η ζεύξη χρησιμοποιείται για μία αποκλειστική γραμμή, χρειάζεται υψηλή διαθεσιμότητα σε αντίθεση με τη χρήση από δίκτυα μεταγωγής πακέτων. Επομένως, θεωρώντας τις ασύρματες υπηρεσίες δικτύων μεταγωγής πακέτων που παρέχονται από τα HAPs, μία διαθεσιμότητα ζεύξης 99.4% μπορεί να είναι επαρκής σε περιοχές με ένταση βροχόπτωσης $R_{0.01}$ = 50 mm/h. Σε πολλές χώρες με μικρότερη βροχόπτωση λαμβάνεται διαθεσιμότητα ζεύξης 99.7-99.9 %. Επειδή

οι συχνότητες της άνω και κάτω ζεύξης είναι κοντινές, η διαθεσιμότητα ζεύξης πλήρους διαδρομής μπορεί να μην παρουσιάζει μεγάλες διαφορές στη άνω και στην κάτω ζεύξη. Μερικοί συνδρομητές που χρειάζονται μεγαλύτερη διαθεσιμότητα στην άνω ζεύξη των HAPS μπορούν να εξοπλιστούν με ένα πρόσθετο μηχανισμό αυτόματου ελέγχου της μεταδιδόμενης ισχύος (ATPC - Automatic Transmitting Power Control) στον επίγειο σταθμό. Η αύξηση της μεταδιδόμενης ισχύος μέχρι τα 12.2 dB (μεταδιδόμενη ισχύς = 1.5 W) σε κατάσταση βροχής δίνει διαθεσιμότητα ζεύξης 99.8% σε μία περιοχή όπου η ένταση της βροχής είναι $R_{0.01}$ = 50 mm/h.

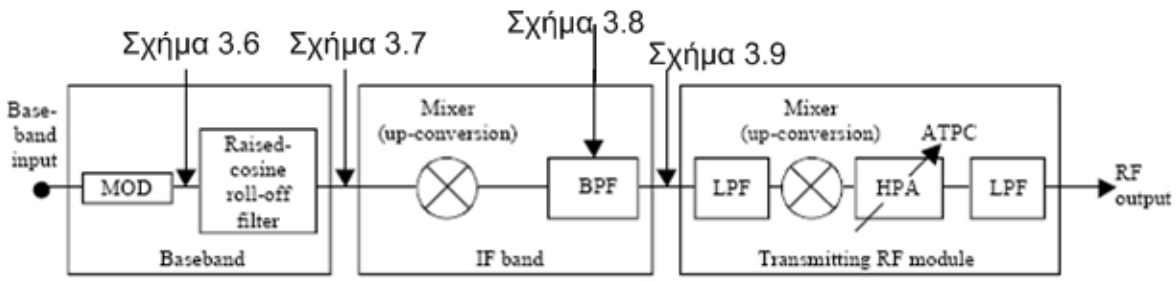
Η διαθεσιμότητα στην κάτω ζεύξη των HAPS μπορεί και αυτή να αυξηθεί με επιπρόσθετο μηχανισμό ATPC για μία ανεξάρτητη δέσμη κηλίδας. Σε μια περιοχή όπου η ένταση της βροχής είναι $R_{0.01}$ = 50 mm/h η αύξηση της μεταδιδόμενης ισχύος μέχρι τα 10.2 dB δίνει διαθεσιμότητα ζεύξης 99.8%, ενώ η αύξηση της μεταδιδόμενης ισχύος μέχρι τα 17.5 dB δίνει διαθεσιμότητα ζεύξης 99.9%.

### 3.2.8 Μέγιστος Αριθμός Ταυτόχρονα Μεταδιδόμενων Φερόντων

Το εύρος ζώνης που επιτρέπεται να χρησιμοποιηθεί από τα HAPS για την άνω ζεύξη στα 31 GHz είναι 300 MHz. Υποθέτοντας ότι το ένα φέρον έχει εύρος ζώνης 20 MHz, ο μέγιστος αριθμός των ταυτόχρονα μεταδιδόμενων φερόντων στην άνω ζεύξη είναι 15. Αν ο παράγοντας επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας είναι τέσσερα, ο μέγιστος αριθμός των ταυτόχρονα μεταδιδόμενων φερόντων από το επίγειο σταθμό του HAPS είναι 15 για τέσσερις δέσμες κηλίδας. Ο αριθμός, λοιπόν, των ταυτόχρονα μεταδιδόμενων σημάτων έχει ένα άνω όριο το οποίο καθορίζεται από το ολικό επιτρεπόμενο εύρος ζώνης αλλά και από το εύρος ζώνης του κάθε σήματος.

### 3.2.9 Εξωζωνική Εκπομπή για την Άνω Ζεύξη των HAPS στα 31 GHz

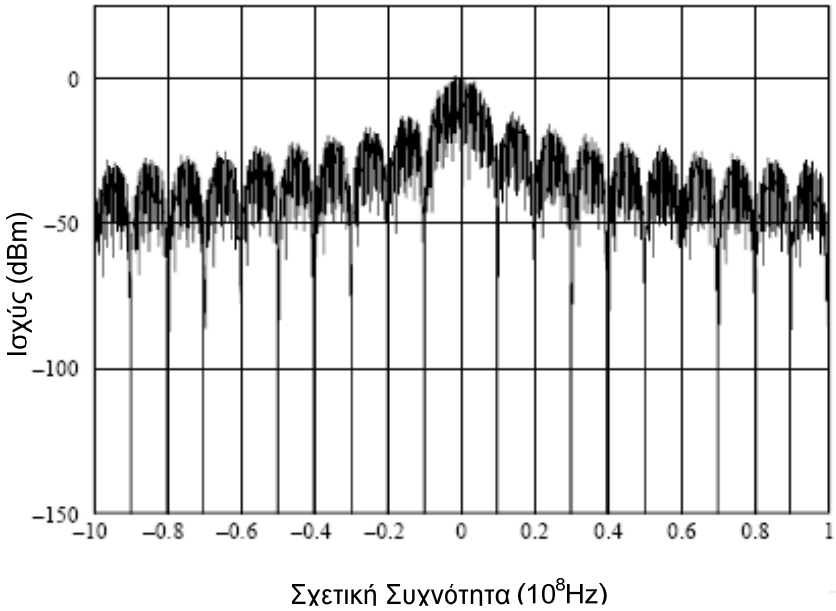
Ένας επίγειος σταθμός που χρησιμοποιεί τη ζώνη 31.0-31.3 GHz στην άνω ζεύξη, πρέπει να αποφεύγει την εξωζωνική εκπομπή στη ζώνη 31.3-31.8 GHz, η οποία έχει καταχωρηθεί σε επιστημονικές υπηρεσίες, ώστε να μην προκαλούνται παρεμβολές στις υπηρεσίες αυτές. Η εξωζωνική εκπομπή από ένα αναμεταδότη ενός επίγειου σταθμού εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά αποκοπής του IF ζωνοπερατού φίλτρου και από την ισχύ εξωτερικού θορύβου του συστήματος μετάδοσης. Στο Σχήμα 3.5 φαίνεται η τυπική διάταξη του πομπού ενός επίγειου σταθμού του στρατοσφαιρικού συστήματος.




**Σχήμα 3.15 Τυπική διάταξη του πομπού ενός επίγειου σταθμού.**

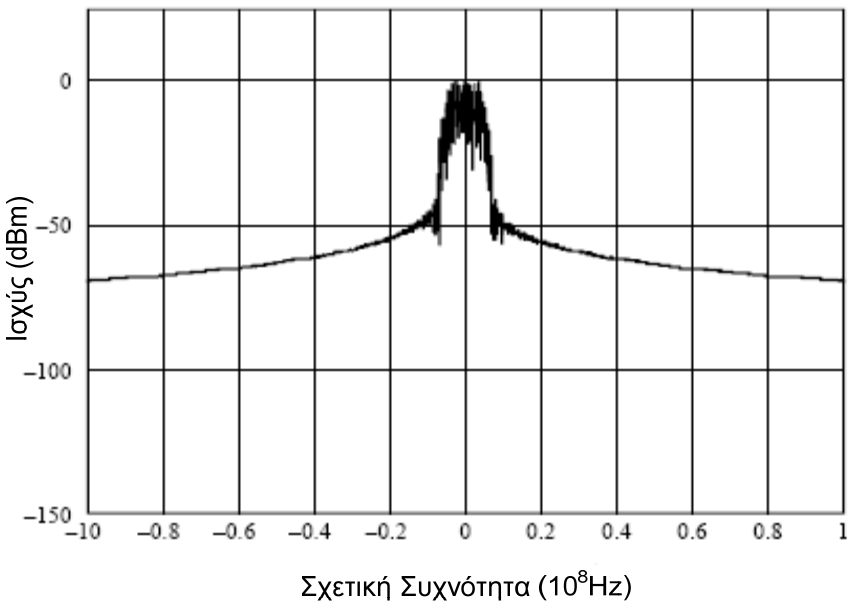
*i. Χαρακτηριστικά αποκοπής του IF ζωνοπερατού φίλτρου*

Η ισχύς εξωζωνικής εκπομπής στην είσοδο της IF μονάδας, με τη χρήση κατάλληλου ζωνοπερατού φίλτρου, γίνεται ίση με την ισχύ θερμικού θορύβου. Στα Σχήματα 3.6-8 φαίνεται ένα παράδειγμα IF φιλτραρίσματος ενός QPSK σήματος.



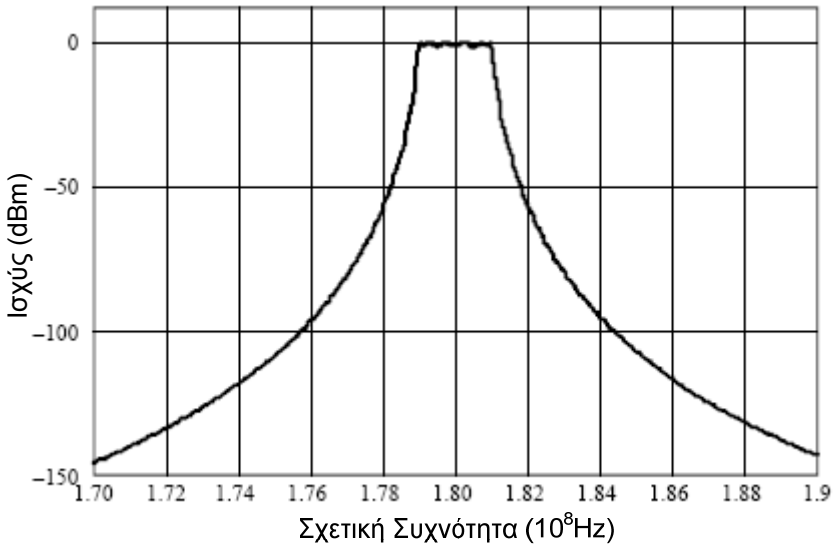

**Σχήμα 3.16 Φάσμα ισχύος ενός QPSK σήματος πριν το φιλτράρισμα.**

Το Σχήμα 3.6 δείχνει το φάσμα ισχύος του αρχικού QPSK σήματος με ρυθμό μετάδοσης 20 Mbit/s. Στο Σχήμα 3.7 φαίνεται το αρχικό QPSK σήμα μετά το φιλτράρισμα εξασθένισης ανυψωμένου σήματος (raised cosine roll-off filtering, με roll-off factor 0.5).

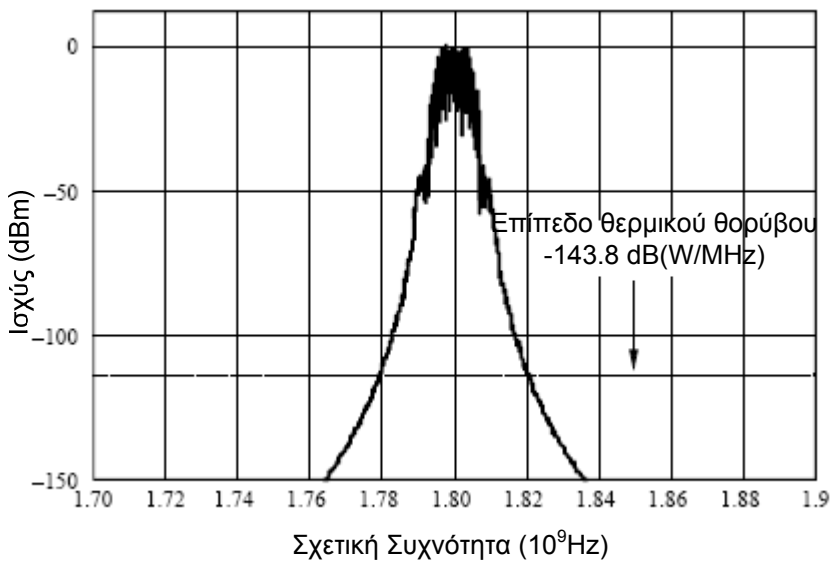



**Σχήμα 3.17 Φάσμα ισχύος του QPSK σήματος μετά το φιλτράρισμα εξασθένισης ανυψωμένου συνημίτονου.**

Ένα παράδειγμα των χαρακτηριστικών αποκοπής ενός ζωνοπερατού φίλτρου φαίνεται στο Σχήμα 3.8. Αυτό το ζωνοπερατό φίλτρο σχεδιάστηκε με βάση ένα πολυώνυμο Chebyshev βαθμού 6. Το εύρος ζώνης είναι 20.2 MHz, με κεντρική συχνότητα IF 1.8 MHz. Το φάσμα του QPSK σήματος μετά το φιλτράρισμα στο ζωνοπερατό φίλτρο φαίνεται στο Σχήμα 3.9. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.9 η εξωζωνική εκπομπή εξασθενεί κάτω από τα 143.83 dB(W/MHz), που είναι η ισχύς θερμικού θορύβου σε θερμοκρασία 300 K.




**Σχήμα 3.18 Παράδειγμα χαρακτηριστικών αποκοπής ενός ζωνοπερατού φίλτρου τύπου Chebyshev (n=6)**




**Σχήμα 3.19 Φάσμα ισχύος του QPSK σήματος μετά το ζωνοπερατό φιλτράρισμα από το Chebyshev (n=6) φίλτρο στην IF έξοδο.**

*ii. Ισχύς εξωτερικού θορύβου του συστήματος μετάδοσης.*

Η ισχύς της εξωζωνικής εκπομπής του συστήματος μετάδοσης εξαρτάται κυρίως από το κέρδος του ενισχυτή υψηλής ισχύος, καθώς μέσω αυτού παρέχεται ότι το επίπεδο του εξωζωνικού θορύβου είναι ίσο με το θερμικό θόρυβο. Η ισχύς της εξωζωνικής εκπομπής της RF μονάδας μετάδοσης υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$P_{ob-out} = P_{ob-in} + G_{HPA} + NF_{HPA} - L_{LPF} \qquad \text{(dB(W/MHz))} \qquad (3.2.3)$$

όπου :

$P_{ob-out}$ : εξωζωνική εκπομπή ισχύος του συστήματος εκπομπής (dB(W/MHz)),

$P_{ob-in}$ : εξωζωνική ισχύς εισόδου του RF module (dB(W/MHz)),

$G_{HPA}$ : κέρδος του HPA( High Power Amplifier - Ενισχυτής υψηλής ισχύος) (dB),

$NF_{HPA}$ : παράγοντας θορύβου του HPA (dB),

$L_{LPF}$ : απόσβεση στο LPF (Low-Pass-Filter - Βαθυπερατό φίλτρο) που είναι τοποθετημένο στην έξοδο του HPA (dB).

Η εξωζωνική εκπομπή στην ζώνη 31.3-31.8 GHz από τον αναμεταδότη της άνω ζεύξης μπορεί να είναι χαμηλότερη από -105 dB(W/MHz) κάτω από συνθήκες καθαρού ουρανού και χαμηλότερη από -100 dB(W/MHz) κάτω από συνθήκες βροχής. Αυτές οι τιμές εξαρτώνται από την επιλογή των IF και RF συσκευών και από το σχεδιασμό του διαγράμματος επιπέδου στον αναμεταδότη της άνω ζεύξης.

# 3.3 Πρόταση Νέων Τεχνικών Χαρακτηριστικών για τα Στρατοσφαιρικών Δίκτυα στη ζώνη 3-18 GHz

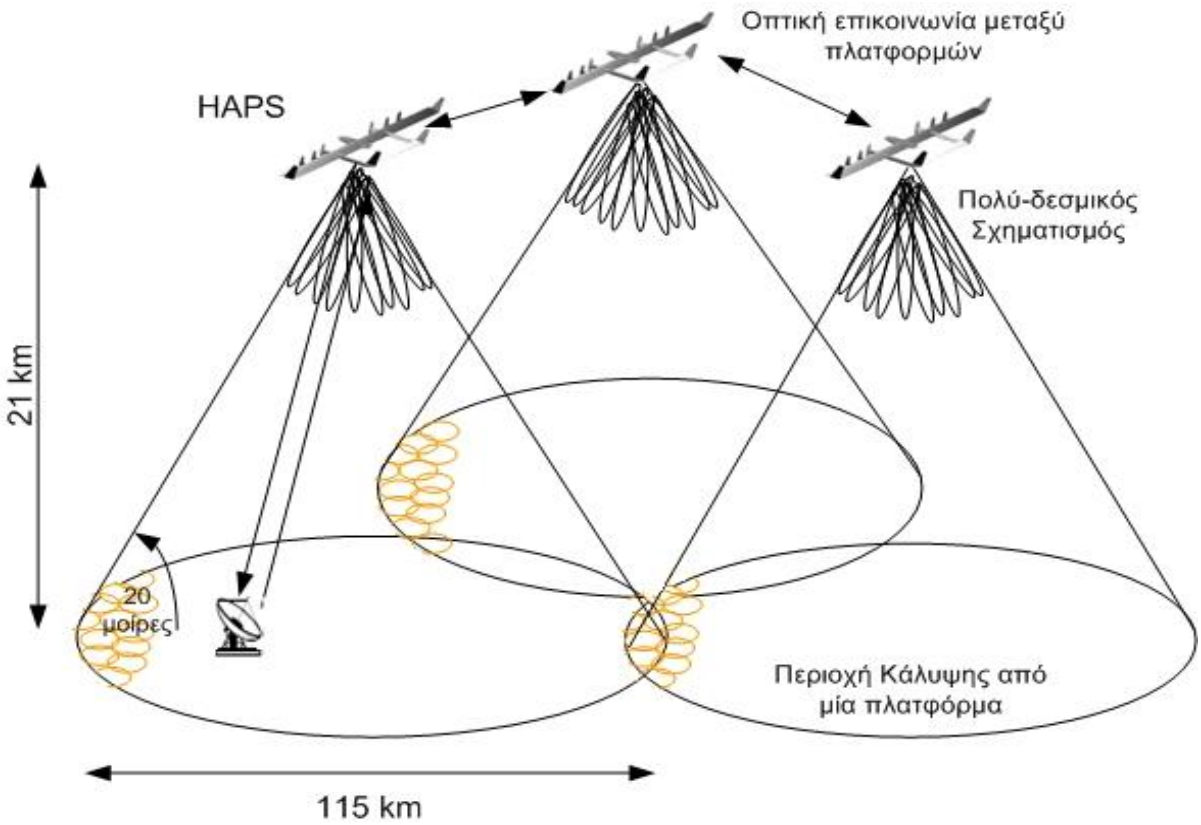
Στις δύο προηγούμενες ενότητες, αναλύθηκαν τα τεχνικά χαρακτηριστικά λειτουργίας των στρατοσφαιρικών δικτύων στις ζώνες συχνοτήτων 48/47 GHz και 31/28 GHz, όπως αυτά ορίζονται από τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών. Στο Κεφάλαιο 2 επιλέχτηκαν οι ζώνες 7850 - 7900 MHz για την άνω ζεύξη και 4400 - 4500 MHz για την κάτω ζεύξη των στρατοσφαιρικών δικτύων που λειτουργούν στη χαμηλότερη περιοχή συχνοτήτων. Στη συνέχεια, θα προταθούν τυπικά τεχνικά χαρακτηριστικά λειτουργίας των στρατοσφαιρικών δικτύων στις νέες συχνότητες.

Στην §3.3.1 περιγράφονται τα γενικά χαρακτηριστικά του στρατοσφαιρικού δικτύου. Η §3.3.2 αναφέρεται στις προδιαγραφές των κεραιών της στρατοσφαιρικής πλατφόρμας. Τα χαρακτηριστικά εκπομπής των στρατοσφαιρικών δικτύων στις νέες ζώνες συχνοτήτων προτείνονται στην §3.3.3, ενώ στην §3.3.4 παρουσιάζονται τα διαγράμματα ακτινοβολίας των κεραιών. Με βάση τα παραπάνω χαρακτηριστικά, γίνεται ένας ενδεικτικός υπολογισμός ζεύξης (link budget) του στρατοσφαιρικού συστήματος στην § 3.3.5.

## 3.3.1 Γενικά Χαρακτηριστικά Στρατοσφαιρικού Δικτύου

Στο Σχήμα 3.10 απεικονίζεται ένα στρατοσφαιρικό δίκτυο παροχής σταθερών υπηρεσιών στη ζώνη 3-18 GHz. Η παροχή της απαραίτητης ηλεκτρικής ισχύος για τη διατήρηση της θέσης της πλατφόρμας και για τη λειτουργία του τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού γίνεται με τον τρόπο που περιγράφεται στην §3.2.1. Στην §3.2.2 έγινε ανάλυση των συνθηκών που επικρατούν στη στρατόσφαιρα. Λαμβάνοντας υπόψη τα συμπεράσματα της παραγράφου αυτής, επιλέγουμε το ύψος τοποθέτησης της στρατοσφαιρικής πλατφόρμας να είναι 21 km.

Στην §3.1.1 έγινε διάκριση της συνολικής περιοχής κάλυψης από μία πλατφόρμα σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με τη γωνία ανύψωσης του επίγειου σταθμού. Με βάση τη διάκριση αυτή γίνεται η επιλογή της γωνίας ανύψωσης του επίγειου σταθμού, ανάλογα με την κατηγορία στην οποία ανήκει η περιοχή κάλυψης. Αν και, όπως προαναφέρθηκε στην §3.2.3, μικρές γωνίες ανύψωσης συνεπάγονται μεγαλύτερη διαδρομή διάδοσης στη βροχή, οι απώλειες λόγω βροχής δε θα είναι αρκετά μεγάλες καθώς η συχνότητα λειτουργίας είναι μικρή. Έτσι, μπορούν να επιλεχθούν μικρές γωνίες ανύψωσης ($5^o$-$15^o$ για τη ζώνη RAC) χωρίς να απαιτείται μεγάλη αύξηση της ισοδύναμης ισότροπα ακτινοβολούμενης ισχύος (e.i.r.p.) για την αντιμετώπιση της εξασθένισης λόγω βροχής.




**Σχήμα 3.20 Απεικόνιση στρατοσφαιρικού δικτύου παροχής σταθερών υπηρεσιών στη ζώνη 3-18 GHz.**

Η κεραία στην πλατφόρμα είναι μία κεραία πολλαπλής δέσμης και τοποθετείται στο κάτω μέρος του αερόπλοιου. Η κεραία αυτή παρέχει ζεύξεις πρόσβασης στους σταθμούς εδάφους. Για την κάλυψη μίας ευρείας περιοχής απαιτούνται αρκετά αερόπλοια. Η σύνδεση των στρατοσφαιρικών σταθμών γίνεται με ασύρματες ζεύξεις, όπως ζεύξεις οπτικού κύματος, για να δημιουργηθεί ένα αποκλειστικά ασύρματο δίκτυο.

## 3.3.2 Προδιαγραφές Κεραιών

Το σύστημα της κεραίας είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που καθορίζουν την απόδοση σε ένα στρατοσφαιρικό δίκτυο. Στα επίγεια συστήματα, η ακτινοβολία σε περιοχές έξω από την περιοχή παροχής υπηρεσιών, είναι εξαρτώμενη από τα χαρακτηριστικά της κεραίας του επίγειου σταθμού και από την εξασθένιση λόγω διάδοσης στο συγκεκριμένο περιβάλλον. Στα στρατοσφαιρικά συστήματα, η εξάρτηση είναι κυρίως από τα χαρακτηριστικά της κεραίας της στρατοσφαιρικής πλατφόρμας, και ιδιαίτερα από την απόδοση των πλάγιων λοβών ακτινοβολίας. Όσο πιο μεγάλη είναι η περιοχή κάλυψης, τόσο πιο αναγκαία είναι η καλή απόδοση της κεραίας.

Παρακάτω αναφέρονται οι βασικές προδιαγραφές για τις κεραίες των στρατοσφαιρικών συστημάτων:

1. μικρό βάρος, μέγεθος και μικρή κατανάλωση ισχύος.
2. καλή απόδοση στο περιβάλλον της στρατόσφαιρας.
3. κατευθυντικότητα με υψηλή απολαβή έτσι ώστε να εξισορροπούνται οι εξασθενίσεις.
4. χρήση πολλαπλών δεσμών κηλίδας.
5. μηχανισμό ελέγχου της δέσμης για την αναίρεση της επίδρασης των μεταβολών ύψους κα θέσης της πλατφόρμας στο ίχνος της κεραίας στην επιφάνεια της Γης.

### 3.3.3 Χαρακτηριστικά Εκπομπής

Ο αριθμός των ταυτόχρονα μεταδιδόμενων σημάτων έχει ένα άνω όριο. Το όριο αυτό καθορίζεται από το ολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης και από το εύρος ζώνης του κάθε σήματος. Στην άνω ζεύξη το διαθέσιμο εύρος είναι 50 MHz. Έτσι, επιλέγοντας το εύρος ζώνης του φέροντος 5 MHz, προκύπτει ότι ο αριθμός των ταυτόχρονα μεταδιδόμενων σημάτων είναι 10. Αντίστοιχα, στην κάτω ζεύξη το διαθέσιμο εύρος είναι 100 MHz και επιλέγοντας εύρος ζώνης φέροντος 5 MHz, προκύπτουν 20 φέροντα των 5 MHz. Σε ένα πρακτικό σύστημα αιτήσεις πρόσβασης από πολλούς χρήστες θα ελέγχονται από σχήματα ελέγχου πρόσβασης που υλοποιούνται στον πομπό της πλατφόρμας.

Οι προτεινόμενοι παράμετροι εκπομπής του σταθμού της στρατοσφαιρικής πλατφόρμας παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.5.

| Ζεύξη | Στρατοσφαιρική πλατφόρμα | |
|---|---|---|
| | Ισχύς εκπομπής (dBW) | Κέρδος κεραίας (dBi) |
| Αστική | -45.5 | 19 |
| Προαστιακή | -45 | 25.5 |
| Αγροτική | -47 | 38.5 |

**Πίνακας 3.25 Προτεινόμενοι παράμετροι εκπομπής στρατοσφαιρικής πλατφόρμας.**

Οι αντίστοιχες παράμετροι για τους επίγειους σταθμούς του στρατοσφαιρικού δικτύου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.6. Στην αγροτική ζώνη εάν η ισχύς εκπομπής κάτω από συνθήκες καθαρού ουρανού είναι ίση με την ισχύ εκπομπής κάτω από συνθήκες βροχής, μπορεί να προκληθούν παρεμβολές σε άλλες υπηρεσίες λόγω του μεγάλου περιθωρίου ζεύξης. Για την αποφυγή των παρεμβολών αυτών μπορεί να χρησιμοποιηθεί μηχανισμός αυτόματης ρύθμισης της ισχύος εκπομπής (ATPC) για να μειωθεί η πιθανότητα παρεμβολής. Η εκπεμπόμενη ισχύς σε συνθήκες καθαρού ουρανού είναι αυτή που αναφέρεται σε παρένθεση στον Πίνακα 3.6

| Ζεύξη | Επίγειος σταθμός | |
|---|---|---|
| | Ισχύς εκπομπής (dBW) | Κέρδος κεραίας (dBi) |
| Αστική | -43.5 | 47.5 |
| Προαστιακή | -43.5 | 47 |
| Αγροτική | -44 (-47.5) | 47.5 |

**Πίνακας 3.26 Προτεινόμενοι παράμετροι εκπομπής επίγειων σταθμών στρατοσφαιρικού δικτύου.**

### 3.3.4 Διαγράμματα Ακτινοβολίας Κεραιών

Τα διαγράμματα ακτινοβολίας των κεραιών στη στρατοσφαιρική πλατφόρμα δίνονται από τη Σύσταση F. 1245-1 (ITU-R Rec. F. 1245-1) [5] της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών, και βασίζονται στο παρακάτω μαθηματικό μοντέλο:

– Για D/λ>100[2], όπου D η διάμετρος της κεραίας και λ το μήκος κύματος:

$$G(\varphi) = G_{\max} - 2.5\times10^{-3}\left(\frac{D}{\lambda}\varphi\right)^2 \quad \text{για} \quad 0^\circ < \varphi < \varphi_m \qquad (3.3.1)$$

$$G(\varphi) = G_1 \quad \text{για} \quad \varphi_m \le \varphi < \max(\varphi_m, \varphi_r) \qquad (3.3.2)$$

$$G(\varphi) = 29 - 25\log\varphi \quad \text{για} \quad \max(\varphi_m, \varphi_r) \le \varphi < 48^\circ \qquad (3.3.3)$$

$$G(\varphi) = -13 \quad \text{για} \quad 48^\circ \le \varphi \le 180^\circ \qquad (3.3.4)$$

όπου:

$G_{\max}$: το μέγιστο κέρδος (dBi),

$$20\log\frac{D}{\lambda} \approx G_{\max} - 7.7 \quad \text{dBi} \qquad (3.3.5)$$

G(φ): κέρδος αναφορικά με μία ισοτροπική κεραία (dBi),

φ: η γωνία απόκλισης σε μοίρες,

D: η διάμετρος της κεραίας,

λ: το μήκος κύματος (εκφρασμένο στις ίδιες μονάδες με τη διάμετρο),

[2] Για της τιμές των κερδών που προτείνονται ισχύει πάντα D/λ<100. Εντούτοις, για λόγους πληρότητας παρουσιάζονται και οι δύο περιπτώσεις.

$G_1$: κέρδος του πρώτου πλευρικού λοβού.

$$G_1 = 2 + 15\log(D/\lambda) \qquad \text{dB} \qquad (3.3.6)$$

$$\varphi_m = \frac{20\lambda}{D}\sqrt{G_{\max} - G_1} \qquad \text{μοίρες} \qquad (3.3.7)$$

$$\varphi_r = 12.02\left(\frac{D}{\lambda}\right)^{-0.6} \qquad \text{μοίρες} \qquad (3.3.8)$$

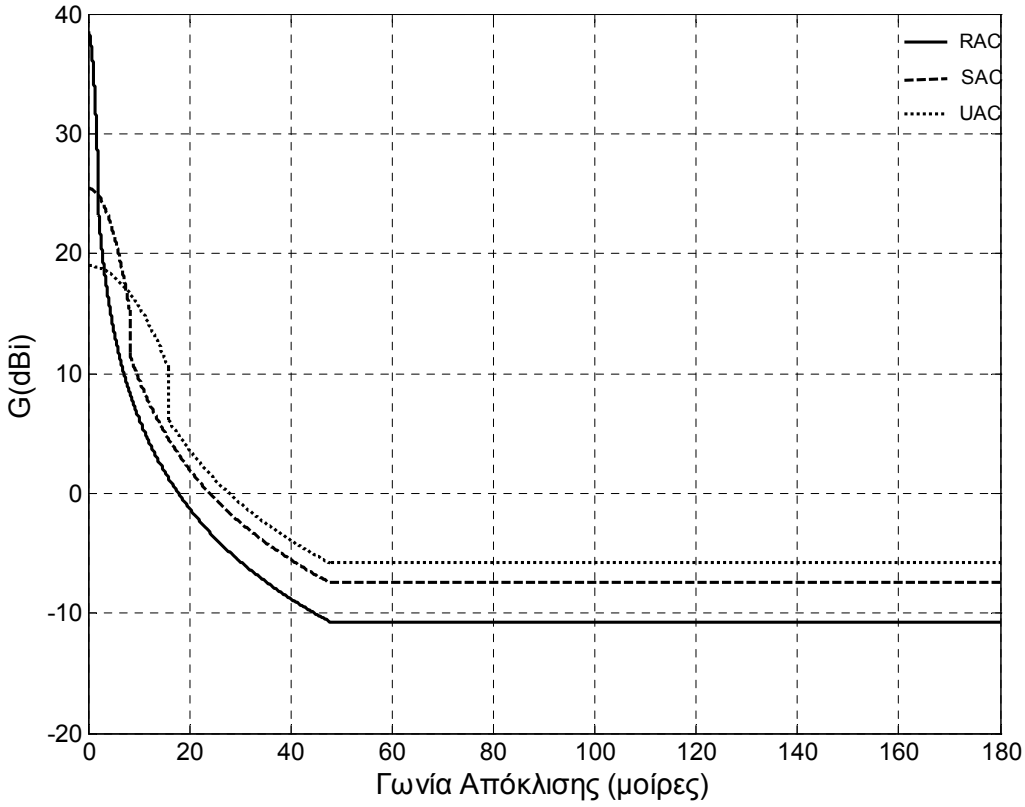
– Για $D/\lambda \leq 100$:

$$G(\varphi) = G_{\max} - 2.5\times10^{-3}\left(\frac{D}{\lambda}\varphi\right)^2 \qquad \text{για} \qquad 0^\circ < \varphi < \varphi_m \qquad (3.3.9)$$

$$G(\varphi) = 39 - 5\log(D/\lambda) - 25\log\varphi \qquad \text{για} \qquad \varphi_m \leq \varphi < 48^\circ \qquad (3.3.10)$$

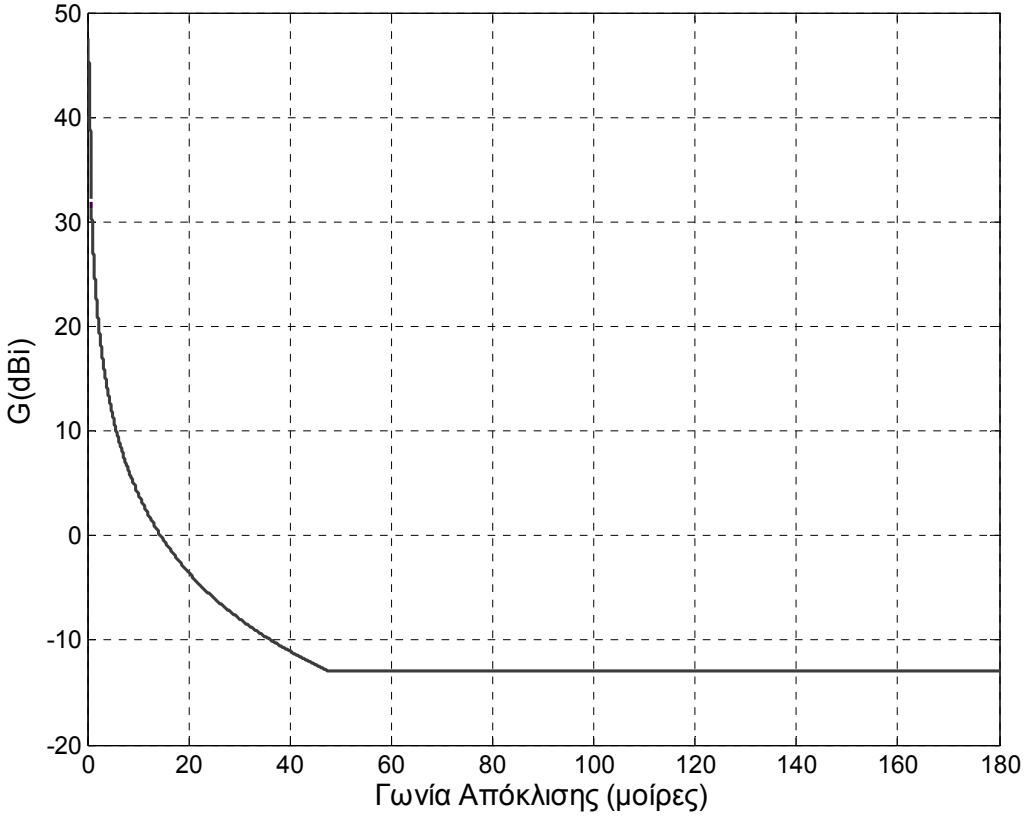
$$G(\varphi) = -3 - 5\log(D/\lambda) \qquad \text{για} \qquad 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ \qquad (3.3.11)$$

Ενδεικτικά, στο Σχήμα 3.11 απεικονίζεται το διάγραμμα ακτινοβολίας μίας κεραίας της στρατοσφαιρικής πλατφόρμας στην αστική (UAC), προαστιακή (SAC) και αγροτική (RAC) περιοχή κάλυψης.




**Σχήμα 3.21 Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας HAPS σύμφωνα με τη σύσταση ITU-R S 1245-1.**

Το παραπάνω μαθηματικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τα διαγράμματα ακτινοβολίας των κεραιών των σταθμών εδάφους του στρατοσφαιρικού δικτύου. Στο Σχήμα 3.12 απεικονίζεται το διάγραμμα ακτινοβολίας για την αστική (UAC) και αγροτική (RAC) περιοχή κάλυψης.

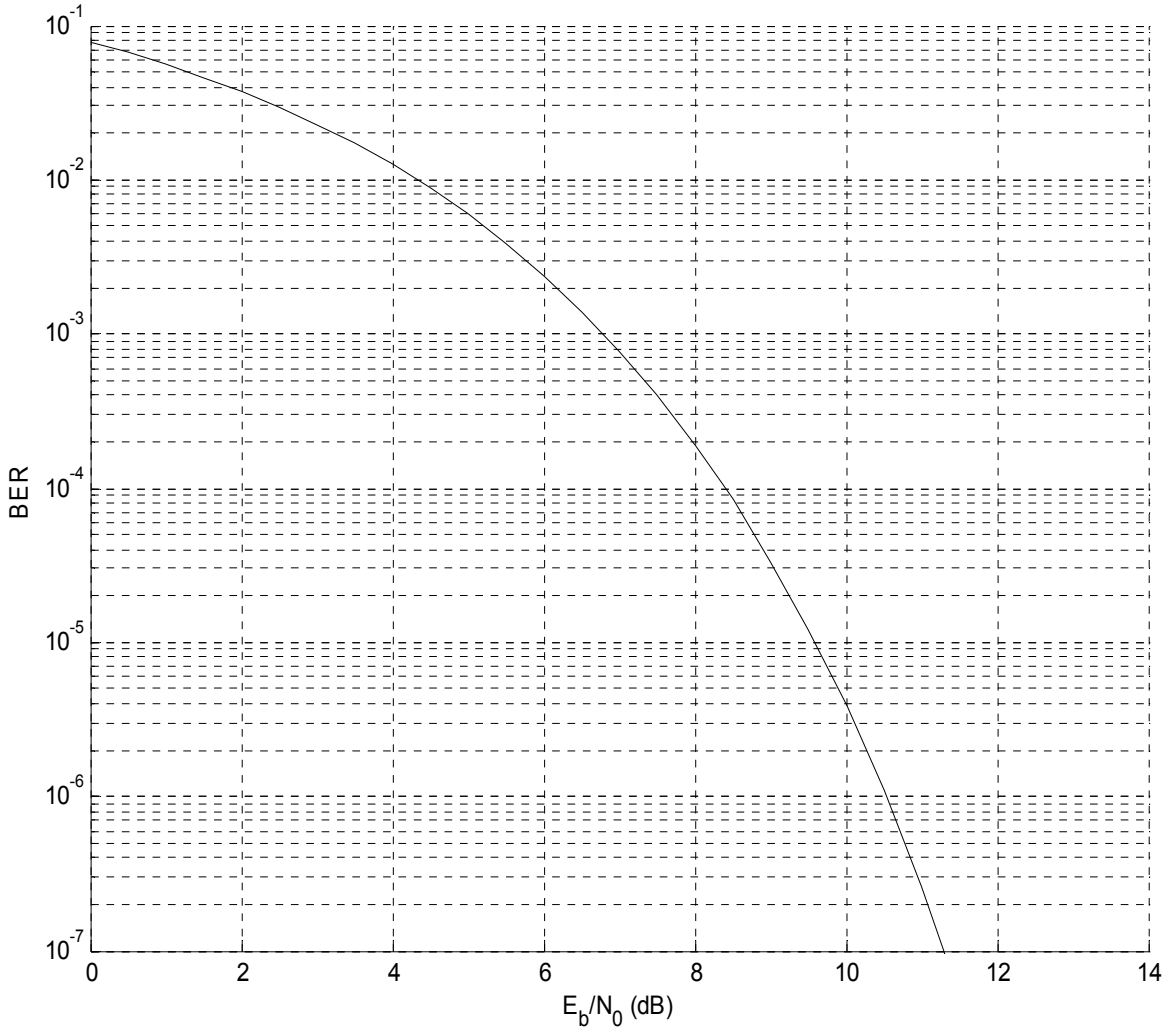



**Σχήμα 3.22 Διάγραμμα ακτινοβολίας επίγειου σταθμού σύμφωνα με τη σύσταση ITU-R S 1245-1.**

## 3.3.5 Προϋπολογισμός Ζεύξης Στρατοσφαιρικού Συστήματος στις Χαμηλότερες Ζώνες Συχνοτήτων

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας ενδεικτικός υπολογισμός του προϋπολογισμού ζεύξης (link budget) του στρατοσφαιρικού συστήματος. Ο προϋπολογισμού ζεύξης γίνεται για συνθήκες καθαρού ουρανού και για συνθήκες βροχής που επικρατούν στη περιοχή της Αθήνας. Η διαθεσιμότητα ζεύξης επιλέγεται πολύ υψηλή 99.99 %. Επιλέγονται τρεις διαφορετικές γωνίες ανύψωσης, $5^o$, $15^o$, $30^o$, αντιπροσωπευτικές των τριών περιοχών κάλυψης, αστική (UAC), προαστιακή (SAC), αγροτική (RAC).

Το απαιτούμενο $E_b/N_0$ βασίζεται σε QPSK διαμόρφωση, με ρυθμό συνελεκτικού κώδικα (convolution code) 2/3 και μήκος περιορισμού (constraint length) k=7, για λόγο σφάλματος bit (BER) μικρότερο του $1x10^{-6}$. Για τον υπολογισμό του απαιτούμενου $E_b/N_0$ χρησιμοποιούμε το Σχήμα 3.13. Από το Σχήμα 3.13 προκύπτει ότι το απαιτούμενο $E_b/N_0$ για BER μικρότερο του $1x10^{-6}$ είναι 10.5 dB.




**Σχήμα 3.23 BER για QPSK διαμόρφωση.**

Στη συνέχεια ακολουθούν οι πίνακες υπολογισμού του προϋπολογισμού ζεύξης.

1. Για την αστική περιοχή κάλυψης (γωνία ανύψωσης $30^o$):
   Α) Συνθήκες καθαρού ουρανού

| | Μονάδες | Uplink | Downlink |
|---|---|---|---|
| Γωνία Ανύψωσης | μοίρες | 30 | |
| Ύψος Πλατφόρμας | km | 21 | |
| Συχνότητα | GHz | 7.875 | 4.45 |
| Εύρος Ζώνης | MHz | 5 | 5 |
| Κεραία Εκπομπής | | | |
| Ισχύς Εξόδου | dBW | -43.5 | -45.5 |
| Απώλεια Σηματοτροφοδότη | dB | 0.5 | 0.5 |
| Κέρδος | dBi | 47.5 | 19 |
| e.i.r.p. | dBW | 3.5 | -27 |
| e.i.r.p. (per MHz) | dB(W/MHz) | -3.5 | -34.0 |
| Μήκος Διαδρομής | km | 42 | 42 |
| Απώλειες Ελεύθερου Χώρου | dB | 142.8 | 137.9 |
| Απώλειες Βροχής | dB | 0 | 0 |
| Απώλειες Αερίων της Ατμόσφαιρας | dB | 0.09 | 0.08 |
| Pfd στο Έδαφος | dB($W/m^2$ per MHz) | - | -137.5 |
| Κεραία Λήψης | | | |
| Κέρδος | dBi | 19 | 47.5 |
| Απώλεια Σηματοτροφοδότη | dB | 0.5 | 0.5 |
| Λαμβανόμενη Ισχύς | dBW | -120.9 | -117.8 |
| Θερμοκρασία Θορύβου σε K | K | 700 | 500 |
| Θερμοκρασία Θορύβου σε dB(W/Hz) | dB(W/Hz) | -200.2 | -201.6 |
| G/T | dB($K^{-1}$) | -9.5 | 20.5 |
| Διαθέσιμο $C/N_0$ | dB(Hz) | 76.2 | 80.6 |
| Ρυθμός Μετάδοσης σε Mbit/s | Mbit/s | 3.3 | 3.3 |
| Ρυθμός Μετάδοσης σε dB(Hz) | dB(Hz) | 65.2 | 65.2 |
| Απαιτούμενο $E_b/N_0$ (QPSK BER=$10^{-6}$) | dB | 10.5 | 10.5 |
| Κέρδος Κωδικοποίησης (Co-Vi, K=7,r=2/3) | dB | 5 | 5 |
| Απαραίτητο $E_b/N_0$ | dB | 5.5 | 5.5 |
| Απαραίτητο $C/N_0$ | dB(Hz) | 70.7 | 70.7 |
| Περιθώριο Ζεύξης | dB | 5.5 | 7.9 |

**Πίνακας 3.27 Προϋπολογισμός ζεύξης για την αστική περιοχή κάλυψης (συνθήκες καθαρού ουρανού).**

Β) Συνθήκες Βροχής

| | Μονάδες | Uplink | Downlink |
|---|---|---|---|
| Γωνία Ανύψωσης | μοίρες | 30 | |
| Ύψος Πλατφόρμας | km | 21 | |
| Συχνότητα | GHz | 7.875 | 4.45 |
| Εύρος Ζώνης | MHz | 5 | 5 |
| Κεραία Εκπομπής | | | |
| Ισχύς Εξόδου | dBW | -43.5 | -45.5 |
| Απώλεια Σηματοτροφοδότη | dB | 0.5 | 0.5 |
| Κέρδος | dBi | 47.5 | 19 |
| e.i.r.p. | dBW | 3.5 | -27 |
| e.i.r.p. (per MHz) | dB(W/MHz) | -3.5 | -34.0 |
| Μήκος Διαδρομής | km | 42 | 42 |
| Απώλειες Ελεύθερου Χώρου | dB | 142.8 | 137.9 |
| Απώλειες Βροχής | dB | 1.55 | 0.13 |
| Απώλειες Αερίων της Ατμόσφαιρας | dB | 0.09 | 0.08 |
| Pfd στο Έδαφος | dB(W/m$^2$ per MHz) | - | -137.7 |
| Κεραία Λήψης | | | |
| Κέρδος | dBi | 19 | 47.5 |
| Απώλεια Σηματοτροφοδότη | dB | 0.5 | 0.5 |
| Λαμβανόμενη Ισχύς | dBW | -122.5 | -118.1 |
| Θερμοκρασία Θορύβου σε K | K | 700 | 500 |
| Θερμοκρασία Θορύβου σε dB(W/Hz) | dB(W/Hz) | -200.2 | -201.6 |
| G/T | dB(K$^{-1}$) | -9.5 | 20.5 |
| Διαθέσιμο $C/N_0$ | dB(Hz) | 74.7 | 80.5 |
| Ρυθμός Μετάδοσης σε Mbit/s | Mbit/s | 3.3 | 3.3 |
| Ρυθμός Μετάδοσης σε dB(Hz) | dB(Hz) | 65.2 | 65.2 |
| Απαιτούμενο $E_b/N_0$ (QPSK BER=$10^{-6}$) | dB | 10.5 | 10.5 |
| Κέρδος Κωδικοποίησης (Co-Vi, K=7,r=2/3) | dB | 5 | 5 |
| Απαραίτητο $E_b/N_0$ | dB | 5.5 | 5.5 |
| Απαραίτητο $C/N_0$ | dB(Hz) | 70.7 | 70.7 |
| Περιθώριο Ζεύξης | dB | 3.9 | 9.8 |

**Πίνακας 3.28 Προϋπολογισμός ζεύξης για την αστική περιοχή κάλυψης (συνθήκες βροχής)**.

2. Για την προαστιακή περιοχή κάλυψης (γωνία ανύψωσης $15^o$):
A)Συνθήκες καθαρού ουρανού

| | Μονάδες | Uplink | Downlink |
|---|---|---|---|
| Γωνία Ανύψωσης | μοίρες | 15 | |
| Ύψος Πλατφόρμας | km | 21 | |
| Συχνότητα | GHz | 7.875 | 4.45 |
| Εύρος Ζώνης | MHz | 5 | 5 |
| Κεραία Εκπομπής | | | |
| Ισχύς Εξόδου | dBW | -43.5 | -45 |
| Απώλεια Σηματοτροφοδότη | dB | 0.5 | 0.5 |
| Κέρδος | dBi | 47 | 25.5 |
| e.i.r.p. | dBW | 3.0 | -20 |
| e.i.r.p. (per MHz) | dB(W/MHz) | -4.0 | -27.0 |
| Μήκος Διαδρομής | km | 81.1 | 81.1 |
| Απώλειες Ελεύθερου Χώρου | dB | 148.6 | 143.6 |
| Απώλειες Βροχής | dB | 0 | 0 |
| Απώλειες Αερίων της Ατμόσφαιρας | dB | 0.18 | 0.15 |
| Pfd στο Έδαφος | dB($W/m^2$ per MHz) | - | -136.3 |
| Κεραία Λήψης | | | |
| Κέρδος | dBi | 25.5 | 47 |
| Απώλεια Σηματοτροφοδότη | dB | 0.5 | 0.5 |
| Λαμβανόμενη Ισχύς | dBW | -120.7 | -117.3 |
| Θερμοκρασία Θορύβου σε K | K | 700 | 500 |
| Θερμοκρασία Θορύβου σε dB(W/Hz) | dB(W/Hz) | -200.2 | -201.6 |
| G/T | dB($K^{-1}$) | -3.0 | 20.0 |
| Διαθέσιμο $C/N_0$ | dB(Hz) | 76.4 | 81.4 |
| Ρυθμός Μετάδοσης σε Mbit/s | Mbit/s | 3.3 | 3.3 |
| Ρυθμός Μετάδοσης σε dB(Hz) | dB(Hz) | 65.2 | 65.2 |
| Απαιτούμενο $E_b/N_0$ (QPSK BER=$10^{-6}$) | dB | 10.5 | 10.5 |
| Κέρδος Κωδικοποίησης (Co-Vi, K=7,r=2/3) | dB | 5 | 5 |
| Απαραίτητο $E_b/N_0$ | dB | 5.5 | 5.5 |
| Απαραίτητο $C/N_0$ | dB(Hz) | 70.7 | 70.7 |
| Περιθώριο Ζεύξης | dB | 5.7 | 10.6 |

**Πίνακας 3.29 Προϋπολογισμός ζεύξης για την προαστιακή περιοχή κάλυψης (συνθήκες καθαρού ουρανού).**

Β) Συνθήκες Βροχής

| | Μονάδες | Uplink | Downlink |
|---|---|---|---|
| Γωνία Ανύψωσης | μοίρες | 15 | |
| Ύψος Πλατφόρμας | km | 21 | |
| Συχνότητα | GHz | 7.875 | 4.45 |
| Εύρος Ζώνης | MHz | 5 | 5 |
| Κεραία Εκπομπής | | | |
| Ισχύς Εξόδου | dBW | -43.5 | -45 |
| Απώλεια Σηματοτροφοδότη | dB | 0.5 | 0.5 |
| Κέρδος | dBi | 47 | 25.5 |
| e.i.r.p. | dBW | 3.0 | -20 |
| e.i.r.p. (per MHz) | dB(W/MHz) | -4.0 | -27.0 |
| Μήκος Διαδρομής | km | 81.1 | 81.1 |
| Απώλειες Ελεύθερου Χώρου | dB | 148.6 | 143.6 |
| Απώλειες Βροχής | dB | 2.55 | 0.25 |
| Απώλειες Αερίων της Ατμόσφαιρας | dB | 0.18 | 0.15 |
| Pfd στο Έδαφος | dB(W/m$^2$ per MHz) | - | -136.6 |
| Κεραία Λήψης | | | |
| Κέρδος | dBi | 25.5 | 47 |
| Απώλεια Σηματοτροφοδότη | dB | 0.5 | 0.5 |
| Λαμβανόμενη Ισχύς | dBW | -123.3 | -117.5 |
| Θερμοκρασία Θορύβου σε K | K | 700 | 500 |
| Θερμοκρασία Θορύβου σε dB(W/Hz) | dB(W/Hz) | -200.2 | -201.6 |
| G/T | dB(K$^{-1}$) | -3.0 | 20.0 |
| Διαθέσιμο $C/N_0$ | dB(Hz) | 73.9 | 81.1 |
| Ρυθμός Μετάδοσης σε Mbit/s | Mbit/s | 3.3 | 3.3 |
| Ρυθμός Μετάδοσης σε dB(Hz) | dB(Hz) | 65.2 | 65.2 |
| Απαιτούμενο $E_b/N_0$ (QPSK BER=$10^{-6}$) | dB | 10.5 | 10.5 |
| Κέρδος Κωδικοποίησης (Co-Vi, K=7,r=2/3) | dB | 5 | 5 |
| Απαραίτητο $E_b/N_0$ | dB | 5.5 | 5.5 |
| Απαραίτητο $C/N_0$ | dB(Hz) | 70.7 | 70.7 |
| Περιθώριο Ζεύξης | dB | 3.1 | 10.4 |

**Πίνακας 3.30 Προϋπολογισμός ζεύξης για την προαστιακή περιοχή κάλυψης (συνθήκες βροχής)**.

3. Για την αγροτική περιοχή κάλυψης (γωνία ανύψωσης $5^o$):
A)Συνθήκες καθαρού ουρανού

| | Μονάδες | Uplink | Downlink |
|---|---|---|---|
| Γωνία Ανύψωσης | μοίρες | 5 | |
| Ύψος Πλατφόρμας | km | 21 | |
| Συχνότητα | GHz | 7.875 | 4.45 |
| Εύρος Ζώνης | MHz | 5 | 5 |
| Κεραία Εκπομπής | | | |
| Ισχύς Εξόδου | dBW | -47.5 | -47 |
| Απώλεια Σηματοτροφοδότη | dB | 0.5 | 0.5 |
| Κέρδος | dBi | 47.5 | 38.5 |
| e.i.r.p. | dBW | -0.5 | -9.0 |
| e.i.r.p. (per MHz) | dB(W/MHz) | -7.5 | -16.0 |
| Μήκος Διαδρομής | km | 240.9 | 240.9 |
| Απώλειες Ελεύθερου Χώρου | dB | 158.0 | 153.1 |
| Απώλειες Βροχής | dB | 0 | 0 |
| Απώλειες Αερίων της Ατμόσφαιρας | dB | 0.54 | 0.45 |
| Pfd στο Έδαφος | dB(W/$m^2$ per MHz) | - | -135.1 |
| Κεραία Λήψης | | | |
| Κέρδος | dBi | 38.5 | 47.5 |
| Απώλεια Σηματοτροφοδότη | dB | 0.5 | 0.5 |
| Λαμβανόμενη Ισχύς | dBW | -121.1 | -115.5 |
| Θερμοκρασία Θορύβου σε K | K | 700 | 500 |
| Θερμοκρασία Θορύβου σε dB(W/Hz) | dB(W/Hz) | -200.2 | -201.6 |
| G/T | dB($K^{-1}$) | 10.0 | 20.5 |
| Διαθέσιμο $C/N_0$ | dB(Hz) | 76.1 | 83.1 |
| Ρυθμός Μετάδοσης σε Mbit/s | Mbit/s | 3.3 | 3.3 |
| Ρυθμός Μετάδοσης σε dB(Hz) | dB(Hz) | 65.2 | 65.2 |
| Απαιτούμενο $E_b/N_0$ (QPSK BER=$10^{-6}$) | dB | 10.5 | 10.5 |
| Κέρδος Κωδικοποίησης (Co-Vi, K=7,r=2/3) | dB | 5 | 5 |
| Απαραίτητο $E_b/N_0$ | dB | 5.5 | 5.5 |
| Απαραίτητο $C/N_0$ | dB(Hz) | 70.7 | 70.7 |
| Περιθώριο Ζεύξης | dB | 5.4 | 12.4 |

**Πίνακας 3.31 Προϋπολογισμός ζεύξης για την αγροτική περιοχή κάλυψης (συνθήκες καθαρού ουρανού).**

Β) Συνθήκες Βροχής

| | Μονάδες | Uplink | Downlink |
|---|---|---|---|
| Γωνία Ανύψωσης | μοίρες | 5 | |
| Ύψος Πλατφόρμας | km | 21 | |
| Συχνότητα | GHz | 7.875 | 4.45 |
| Εύρος Ζώνης | MHz | 5 | 5 |
| Κεραία Εκπομπής | | | |
| Ισχύς Εξόδου | dBW | -44 | -47 |
| Απώλεια Σηματοτροφοδότη | dB | 0.5 | 0.5 |
| Κέρδος | dBi | 47.5 | 38.5 |
| e.i.r.p. | dBW | 3 | -9 |
| e.i.r.p. (per MHz) | dB(W/MHz) | -4.0 | -16.0 |
| Μήκος Διαδρομής | km | 240.9 | 240.9 |
| Απώλειες Ελεύθερου Χώρου | dB | 158.0 | 153.1 |
| Απώλειες Βροχής | dB | 5.46 | 0.72 |
| Απώλειες Αερίων της Ατμόσφαιρας | dB | 0.54 | 0.45 |
| Pfd στο Έδαφος | dB(W/m$^2$ per MHz) | - | -135.8 |
| Κεραία Λήψης | | | |
| Κέρδος | dBi | 38.5 | 47.5 |
| Απώλεια Σηματοτροφοδότη | dB | 0.5 | 0.5 |
| Λαμβανόμενη Ισχύς | dBW | -123.0 | -116.2 |
| Θερμοκρασία Θορύβου σε K | K | 700 | 500 |
| Θερμοκρασία Θορύβου σε dB(W/Hz) | dB(W/Hz) | -200.2 | -201.6 |
| G/T | dB(K$^{-1}$) | 10.0 | 20.5 |
| Διαθέσιμο $C/N_0$ | dB(Hz) | 74.1 | 82.4 |
| Ρυθμός Μετάδοσης σε Mbit/s | Mbit/s | 3.3 | 3.3 |
| Ρυθμός Μετάδοσης σε dB(Hz) | dB(Hz) | 65.2 | 65.2 |
| Απαιτούμενο $E_b/N_0$ (QPSK BER=$10^{-6}$) | dB | 10.5 | 10.5 |
| Κέρδος Κωδικοποίησης (Co-Vi, K=7,r=2/3) | dB | 5 | 5 |
| Απαραίτητο $E_b/N_0$ | dB | 5.5 | 5.5 |
| Απαραίτητο $C/N_0$ | dB(Hz) | 70.7 | 70.7 |
| Περιθώριο Ζεύξης | dB | 3.4 | 11.6 |

**Πίνακας 3.32 Προϋπολογισμός ζεύξης για την αγροτική περιοχή κάλυψης (συνθήκες βροχής).**

# Βιβλιογραφία

[1] ITU-R Recommendation F. 1500, "Preferred characteristics of systems in the fixed service using high altitude platforms operating in the bands 47.2-47.5 GHz and 47.9-48.2 GHz".

[2] ITU-R Recommendation F. 699-5, "Reference radiation patterns for line-of-sight radio-relay system antennas for use in coordination studies and interference assessment in the frequency range from 1 GHz to about 70 GHz".

[3] ITU-R Recommendation S. 672-4, "Satellite antenna radiation pattern for use as a design objective in the fixed-satellite service employing geostationary satellites".

[4] ITU-R Recommendation F. 1569, "Technical and operational characteristics for the fixed service using high altitude platform stations in the bands 27.5-28.35 GHz and 31.0-31.3 GHz".

[5] ITU-R Recommendation F. 1245-1, "Mathematical model of average and related radiation patterns for line-of-sight point-to-point radio-relay system antennas for use in certain coordination studies and interference assessment in the frequency range from 1 GHz to about 70 GHz".

[6] J. Zyren, A. Petric, "Tutorial on Basic Link Budget Analysis", June 1998, Intersil Corporation.

[7] R. Breeds, "Link Budget Analysis".

[8] A.R. Smalley, "Workshop on satellite link design", April 3 1989, Telesat.

[9] T. Tozer, "Introduction to link Budgets", November 2002, www.satcom.co.uk.

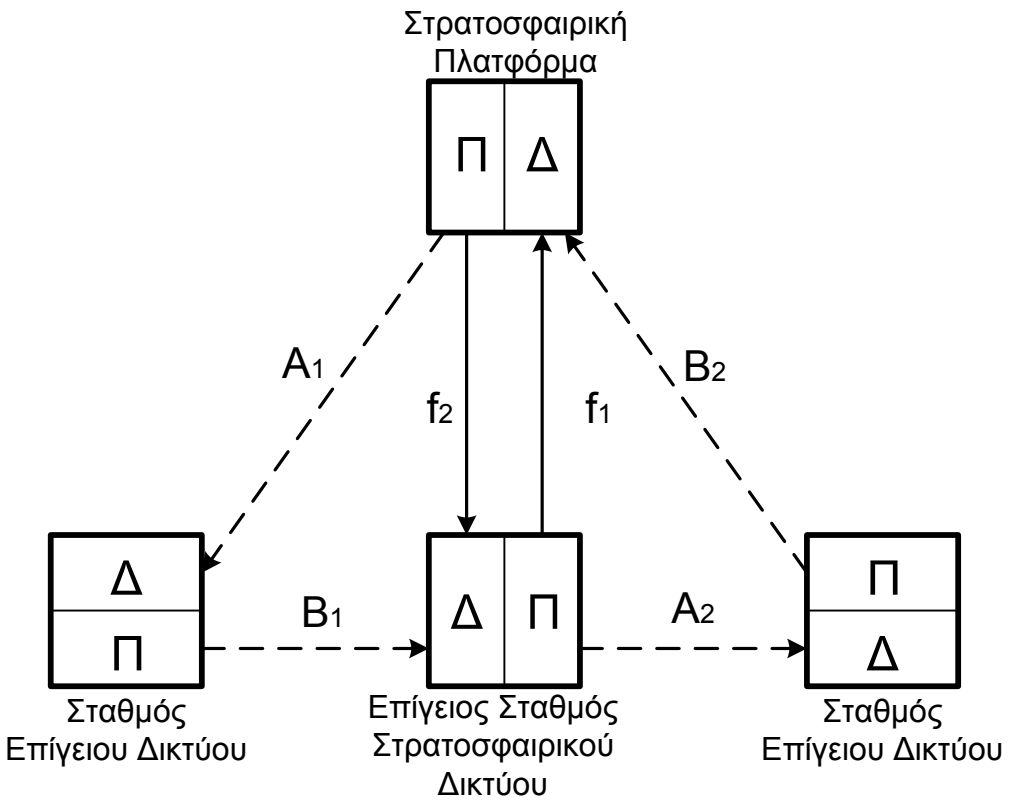
# Κεφάλαιο 4

# Μελέτη Παρεμβολών μεταξύ Στρατοσφαιρικού και Επίγειου Δικτύου

## 4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό μελετώνται οι παρεμβολές μεταξύ της άνω ζεύξης του στρατοσφαιρικού δικτύου και του σταθερού επίγειου δικτύου, και προτείνονται αποστάσεις διαχωρισμού. Οι ζώνες συχνοτήτων που προτάθηκαν στο Κεφάλαιο 2 έχουν ήδη ανατεθεί στην σταθερή και κινητή υπηρεσία. Στην παρούσα εργασία θα εξεταστούν οι παρεμβολές προς τη σταθερή υπηρεσία. Η κοινή λειτουργία του στρατοσφαιρικού και του σταθερού επίγειου δικτύου μπορεί να οδηγήσει στην πρόκληση παρεμβολών και στη διακοπή της ομαλής και σταθερής λειτουργίας του επίγειου αλλά και του στρατοσφαιρικού δικτύου. Στο Σχήμα 4.1 απεικονίζονται οι διαφορετικοί τρόποι με τους οποίους ένας στρατοσφαιρικός σταθμός μπορεί να παρεμβάλει και να παρεμβάλλεται σε/ από ένα επίγειο.

Οι διαδρομές διάδοσης παρεμβολής που δημιουργούνται από τη λειτουργία του στρατοσφαιρικού δικτύου είναι δύο: Οι διαδρομές $A_1$ και $A_2$. Η διαδρομή $A_1$ αναφέρεται στις παρεμβολές που δημιουργούνται από τις εναέριες πλατφόρμες του στρατοσφαιρικού δικτύου στους σταθμούς του επίγειου δικτύου. Η παρεμβολή γίνεται στη συχνότητα κάτω ζεύξης $f_2$. Η συχνότητα αυτή έχει επιλεγεί στο Κεφάλαιο 2 και είναι 4.45 GHz (ζώνη συχνοτήτων 4.4 GHz - 4.5 GHz). Η διαδρομή $A_2$ αναφέρεται στις παρεμβολές που δημιουργούνται από τους επίγειους σταθμούς του στρατοσφαιρικού δικτύου στους σταθμούς του επίγειου δικτύου. Η παρεμβολή γίνεται στη συχνότητα άνω ζεύξης $f_1$. Η επιλογή και αυτής της συχνότητας έχει γίνει στο Κεφάλαιο 2 και είναι 7.875 GHz (ζώνη συχνοτήτων 7.85 GHz – 7.90 GHz).




**Σχήμα 4.24 Διαδρομές διάδοσης παρεμβολής μεταξύ του επίγειου και του στρατοσφαιρικού δικτύου.**

Οι διαδρομές διάδοσης παρεμβολής που δημιουργούνται από τη λειτουργία του επίγειου δικτύου είναι επίσης δύο: Οι διαδρομές $B_1$ και $B_2$. Η διαδρομή $B_1$ αναφέρεται στις παρεμβολές που δημιουργούνται από τους σταθμούς του επίγειου δικτύου στους επίγειους σταθμούς του στρατοσφαιρικού δικτύου. Η διαδρομή $B_2$ αναφέρεται στις παρεμβολές που δημιουργούνται από τους σταθμούς του επίγειου δικτύου στις εναέριες πλατφόρμες του στρατοσφαιρικού δικτύου. Και στις δύο περιπτώσεις η παρεμβολή γίνεται στη συχνότητα λειτουργίας του επίγειου δικτύου.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου μελετάται εκτενώς η διαδρομή διάδοσης παρεμβολής $A_2$. Παρουσιάζεται μία μέθοδος υπολογισμού τον παρεμβολών των επίγειων σταθμών του στρατοσφαιρικού δικτύου προς το σταθμό ραδιοαναμετάδοσης (radio-relay station) του επίγειου δικτύου. Με εφαρμογή της μεθόδου αυτής μελετώνται οι παρεμβολές στη συχνότητα άνω ζεύξης $f_2$ και υπολογίζονται οι αποστάσεις διαχωρισμού μεταξύ του σημείου ναδίρ της στρατοσφαιρικής πλατφόρμας και του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου.

## 4.2 Σταθερά Επίγεια Δίκτυα

Εξαιτίας του μεγάλου ανταγωνισμού που υπάρχει στην αγορά των τηλεπικοινωνιών έχει παρουσιαστεί μία μεγάλη ανάπτυξη των ασύρματων επίγειων δικτύων. Τα δίκτυα αυτά χρησιμοποιούνται είτε για την παροχή σταθερής ασύρματης πρόσβασης για τη διασύνδεση συνδρομητών, είτε επικουρικά, ως υποστήριξη, στα ήδη υπάρχοντα ασύρματα δίκτυα. Οι σταθερές επίγειες ζεύξεις παρέχουν διασύνδεση μεταξύ δύο ή περισσότερων σημείων για την παροχή τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών. Χρήστες αυτών των δικτύων είναι τηλεπικοινωνιακές εταιρίες, μεγάλες ομάδες χρηστών και ιδιωτικοί χρήστες.

### 4.2.1 Κατηγορίες Επίγειων Δικτύων

Τα σταθερά επίγεια δίκτυα διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

1. *Δίκτυα κορμού μακρινής διαδρομής.*

   Τα δίκτυα της κατηγορίας αυτής είναι και τα πιο συνηθισμένα. Χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για τη μετάδοση τηλεπικοινωνιακής κίνησης σε μακρινές αποστάσεις μεταξύ των τοπικών κέντρων στο εθνικό σταθερό τηλεφωνικό δίκτυο PSTN. Πολλές φορές αποτελούν μέρος διεθνών τηλεπικοινωνιακών συνδέσεων. Δημιουργούνται από μεγάλες αλυσίδες ζεύξεων μεγάλης χωρητικότητας, με ένα μέσο μήκος ανά κανάλι 40-50 km. Εξαιτίας των μεγάλων αποστάσεων και της μεγάλης χωρητικότητας του καναλιού, τα δίκτυα αυτά λειτουργούν στις ζώνες συχνοτήτων των 4 και 6 GHz. Επίσης, μερικά δίκτυα λειτουργούν και στα 7/8 GHz ή στα 11 GHz. Πλέον, τα δίκτυα αυτά χρησιμοποιούνται μόνο σαν υποστήριξη σε άλλους τύπους δικτύων, όπως τα δίκτυα οπτικών ινών, για να παρέχουν εφεδρικότητα στο εθνικό δίκτυο ή σε περιπτώσεις που δεν είναι εφικτή η σύνδεση μέσω οπτικών ινών για τη διασύνδεση κάποιας περιοχής. Αυτό συνεπάγεται την πιθανή ύπαρξη τέτοιων δικτύων για αρκετά ακόμη χρόνια. Εντούτοις, η ανάπτυξη τους αναμένεται να είναι αργή.

2. *Δίκτυα υποστήριξης υποδομών.*

   Τα δίκτυα της κατηγορίας αυτής χρησιμοποιούνται για διασύνδεση μεταξύ δύο ή περισσότερων κέντρων μεταγωγής και πολλών κόμβων σε διάφορα επίπεδα τηλεπικοινωνιακών δικτύων, όπως είναι τα δημόσια κινητά δίκτυα (Public Mobile Telephony Networks) ή τα δίκτυα σταθερής ασύρματης πρόσβασης. Ο λόγος που τα κάνει να ξεχωρίζουν από τα δίκτυα κορμού είναι η παρουσία πολλαπλών επιπέδων και διαφορετικών διατάξεων διασύνδεσης. Οι διατάξεις διακρίνονται σε αλυσίδες που συνδέουν απομακρυσμένα τμήματα του δικτύου, δακτυλίους δρομολόγησης και συνδυασμός δακτυλίου/ αστέρα δικτύων για τη διασύνδεση πολλών σταθμών βάσεων με τα τοπικά κέντρα μεταγωγής ή πολυπλεξίας. Πρακτικά, όλες οι διαθέσιμές

συχνότητες για ασύρματα δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιηθούν από δίκτυα υποστήριξης υποδομών.

3. *Δίκτυα σταθερής ασύρματης πρόσβασης.*

Τα δίκτυα της κατηγορίας αυτής έχουν σχεδιαστεί για την παροχή απευθείας σύνδεσης μεταξύ του τερματικού εξοπλισμού ενός χρήστη και του δικτύου του τηλεπικοινωνιακού παρόχου. Χρησιμοποιούν την τεχνολογία σημείου προς σημείο και σημείο προς πολλαπλά σημεία για να εξυπηρετήσουν ένα μεγάλο αριθμό χρηστών μέσα στην περιοχή κάλυψης ενός σταθμού βάσης. Η βασική δομή είναι αυτή ενός κυψελωτού συστήματος ενσωματωμένο σε ένα σενάριο ακίνητων τερματικών σταθμών. Τα δίκτυα αυτά στοχεύουν στη παροχή εναλλακτικών λύσεων στην περίπτωση που η χρήση χάλκινων καλωδίων είναι αδύνατη. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για την παροχή υπηρεσιών στενού εύρους ζώνης όσο και για την παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών.

### 4.2.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Τυπικών Επίγειων Δικτύων

Ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες για τη διεξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων κατά τη μελέτη παρεμβολών μεταξύ του στρατοσφαιρικού και του επίγειου δικτύου είναι τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δύο συστημάτων. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του στρατοσφαιρικού δικτύου για τις νέες ζώνες συχνοτήτων έχουν προταθεί στο Κεφάλαιο 3. Τα προτεινόμενα αυτά χαρακτηριστικά θα χρησιμοποιηθούν για τη διεξαγωγή της μελέτης. Υπάρχει ένας σημαντικός αριθμός συστημάτων αναμεταδόσεων που λειτουργούν ή πρόκειται να λειτουργήσουν. Για τη μελέτη αυτή, επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε ως σύστημα αναφοράς τα τεχνικά χαρακτηριστικά που προτείνει η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU-R) για επίγεια συστήματα που λειτουργούν στη ζώνη 7.1- 8.5 GHz. Τα χαρακτηριστικά αυτά προτείνονται στη Σύσταση F.758-2 (ITU-R Rec. F. 758.2) [3]. Επιλέγονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά αυτής της ζώνης καθώς σε αυτή βρίσκεται και η προτεινόμενη συχνότητα άνω ζεύξης του στρατοσφαιρικού δικτύου.

Οι βασικές παράμετροι των τεχνικών χαρακτηριστικών που απαιτούνται για τη διεξαγωγή της μελέτης είναι: η συχνότητα φέροντος, τα φασματικά χαρακτηριστικά, η ισοδύναμη ισοτροπικά ακτινοβολούμενη ισχύς (e.i.r.p.), το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας, η στάθμη θερμικού θορύβου του δέκτη, οι απώλειες τροφοδοσίας (feeder loss), το IF εύρος ζώνης συχνοτήτων και άλλα. Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των επίγειων συστημάτων που χρησιμοποιούνται στη μελέτη.

| | |
|---|---|
| Ζώνες Συχνοτήτων (GHz) | 7.1-8.5 |
| Διαμόρφωση | 64-QAM |
| Διαχωρισμός καναλιών (MHz) | 30 |
| Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας | Σύσταση F.1245 (ITU-R Rec. F.1245) [2] |
| Κέρδος κεραίας (μέγιστο) (dBi) | 49 |
| Απώλειες τροφοδοσίας (dB) | 0 |
| Τύπος κεραίας | Πιάτο |
| e.i.r.p (dBW) | 52 |
| Παράγοντας θορύβου (dB) | 3 |

**Πίνακας 4.33 Τεχνικά χαρακτηριστικά επίγειων συστημάτων από την ITU-R.**

# 4.3 Παρεμβολές επίγειου σταθμού στρατοσφαιρικού δικτύου προς το σταθμό ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται μία μεθοδολογία για την εκτίμηση παρεμβολών που προκαλούνται από τους επίγειους σταθμούς του στρατοσφαιρικού δικτύου προς τους συμβατικούς σταθερούς σταθμούς ραδιοαναμετάδοσης (radio-relay station) του επίγειου δικτύου, για συχνότητες μεγαλύτερες των 3 GHz. Η παρεμβολή γίνεται στη συχνότητα άνω ζεύξης του στρατοσφαιρικού δικτύου. Η συχνότητα αυτή έχει προταθεί στο Κεφάλαιο 2 και είναι 7.875 GHz. Αναλύεται ένα θεωρητικό μοντέλο εκτίμησης της αθροιστικής παρεμβολής που προκαλείται από τους επίγειους σταθμούς του στρατοσφαιρικού δικτύου προς το σταθμό ραδιοαναμετάδοσης, με βάση το οποίο μελετώνται νέες αποστάσεις διαχωρισμού (separation distances) μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης και του σημείου ναδίρ της στρατοσφαιρικής πλατφόρμας. Η μελέτη γίνεται για πλατφόρμες που παρέχουν κάλυψη στην αστική, προαστιακή και αγροτική ζώνη κάλυψης.

## 4.3.1 Μέθοδος Εκτίμησης Παρεμβολών

Στο Σχήμα 4.2 απεικονίζεται η γεωμετρία παρεμβολών από τους επίγειους σταθμούς του στρατοσφαιρικού δικτύου προς τους σταθμούς ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου.

Η ισχύς παρεμβολής από ένα επίγειο σταθμό του στρατοσφαιρικού δικτύου προς το σταθμό ραδιοαναμετάδοσης δίνεται από την εξίσωση :

$$I_G = P_{HG} - L_{fh} + G(\theta_{H-R}) - L_b(p) + G(\theta_{R-H}) - L_{fr} \qquad (4.3.1)$$

όπου :

$P_{HG}$ : πυκνότητα ισχύος εκπομπής του επίγειου σταθμού του HAPN (dB(W/MHz)),

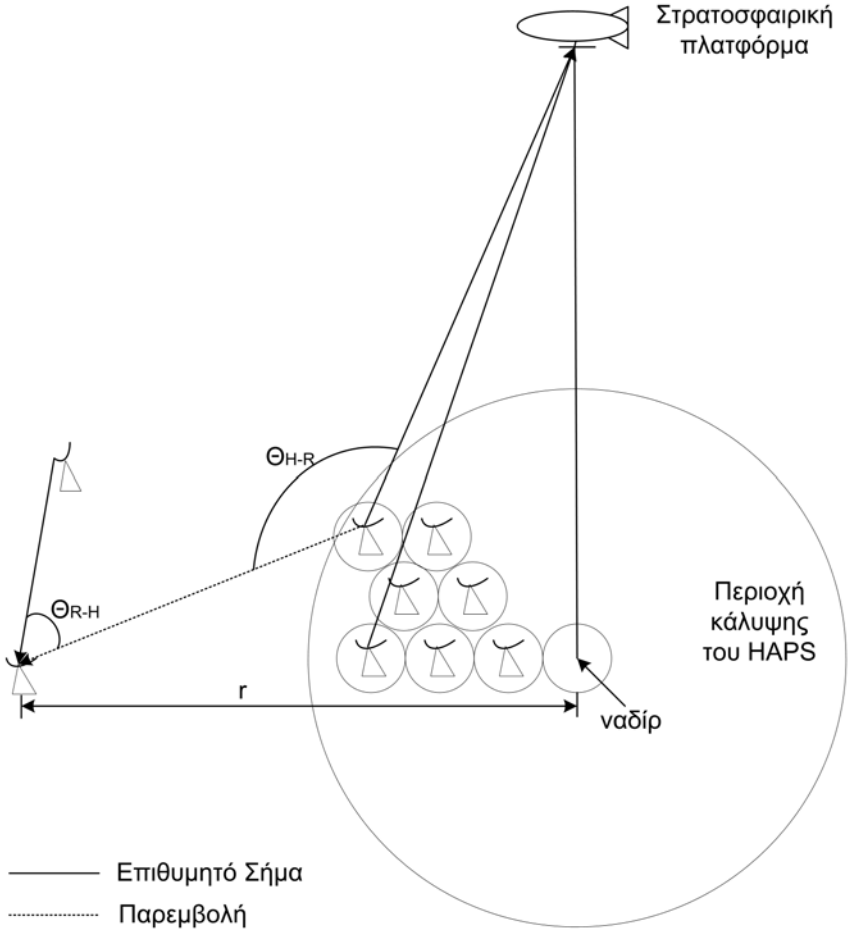
$L_{fh}$ : απώλειες τροφοδοσίας (feeder loss) του επίγειου σταθμού του HAPN (dB),

$G(\theta_{H-R})$: κέρδος της κεραίας εκπομπής του επίγειου σταθμού του HAPN σε γωνία $\theta_{H-R}$, μεταξύ της κατεύθυνσης της κύριας δέσμης του επίγειου σταθμού του HAPN και της κατεύθυνσης του παρεμβαλλόμενου σταθμού ραδιοαναμετάδοσης (dBi),

$L_b(p)$: οι βασικές απώλειες διάδοσης που δεν πρέπει να ξεπεραστούν για ποσοστό του χρόνου p(%), σύμφωνα με τη Σύσταση P.452 (ITU-R Rec. P.452) [4],

$G(\theta_{R-H})$: κέρδος της κεραίας λήψης του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου σε γωνία $\theta_{R-H}$, μεταξύ της κατεύθυνσης της κύριας δέσμης του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης και της κατεύθυνσης του παρεμβάλλοντας επίγειου σταθμού του HAPN (dBi),

$L_{fr}$: απώλεια τροφοδοσίας του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης (dB).




**Σχήμα 4.25 Γεωμετρία παρεμβολών από τους επίγειους σταθμούς του HAPN προς το σταθμό ραδιοαναμετάδοσης.**

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι βασικές απώλειες διάδοσης που δεν πρέπει να ξεπεραστούν για ποσοστό του χρόνου p(%) υπολογίζονται σύμφωνα με τη Σύσταση P.452. Με βάση τη Σύσταση αυτή οι απώλειες $L_b(p)$ δίνονται από την εξίσωση (4.3.2):

$$L_b(p) = 92.5 + 20\log f + 20\log d_b + E_s(p) + A_g \qquad \text{(dB)} \qquad (4.3.2)$$

όπου:

$d_b$: το μήκος της διαδρομής διάδοσης (km),

f: η συχνότητα (MHz),

$E_s(p)$: παράγοντας διόρθωσης για φαινόμενα εστίασης και πολυδίοδης (multipath) διάδοσης (dB),

$A_g$: Απορρόφηση αερίων της ατμόσφαιρας (dB).

Ο παράγοντας $E_s(p)$ δίνεται από τη σχέση:

$$E_s(p) = 2.6(1 - e^{d_b/10})\log(p/50) \qquad \text{(dB)} \qquad (4.3.3)$$

Στο μοντέλο διάδοσης που χρησιμοποιείται το ποσοστό του χρόνου p είναι 50%. Επομένως, το $E_s(p)$ θα είναι μηδέν. Ακόμη, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι για συχνότητες μικρότερες των 10 GHz η απορρόφηση της ατμόσφαιρας στη διαδρομή διάδοσης οπτικής επαφής μπορεί να αγνοηθεί. Τελικά θα έχουμε ότι οι απώλειες $L_b(p)$ θα είναι:

$$L_b(p) = 92.5 + 20\log f + 20\log d_b \qquad \text{(dB)} \qquad (4.3.4)$$

Με βάση τα παραπάνω καταλήγουμε στο ότι η ισχύς αθροιστικής παρεμβολής που προκαλείται από πολλούς επίγειους σταθμούς του στρατοσφαιρικού δικτύου σε ένα σταθμό ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (4.3.5), λαμβάνοντας υπόψη το μηχανισμό που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.3.

$$\begin{aligned} I_{G-T} &= P_{HG} - L_{fh} - 92.5 - 20\log f \\ &+ 10\log\{\sum_i \sum_j (\sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2})^{-2} 10^{\frac{G(\theta_{R-H})}{10}} 10^{\frac{G(\theta_{H-R})}{10}}\} - L_{fr} \end{aligned} \qquad (4.3.5)$$

όπου:

$f$: συχνότητα (GHz),

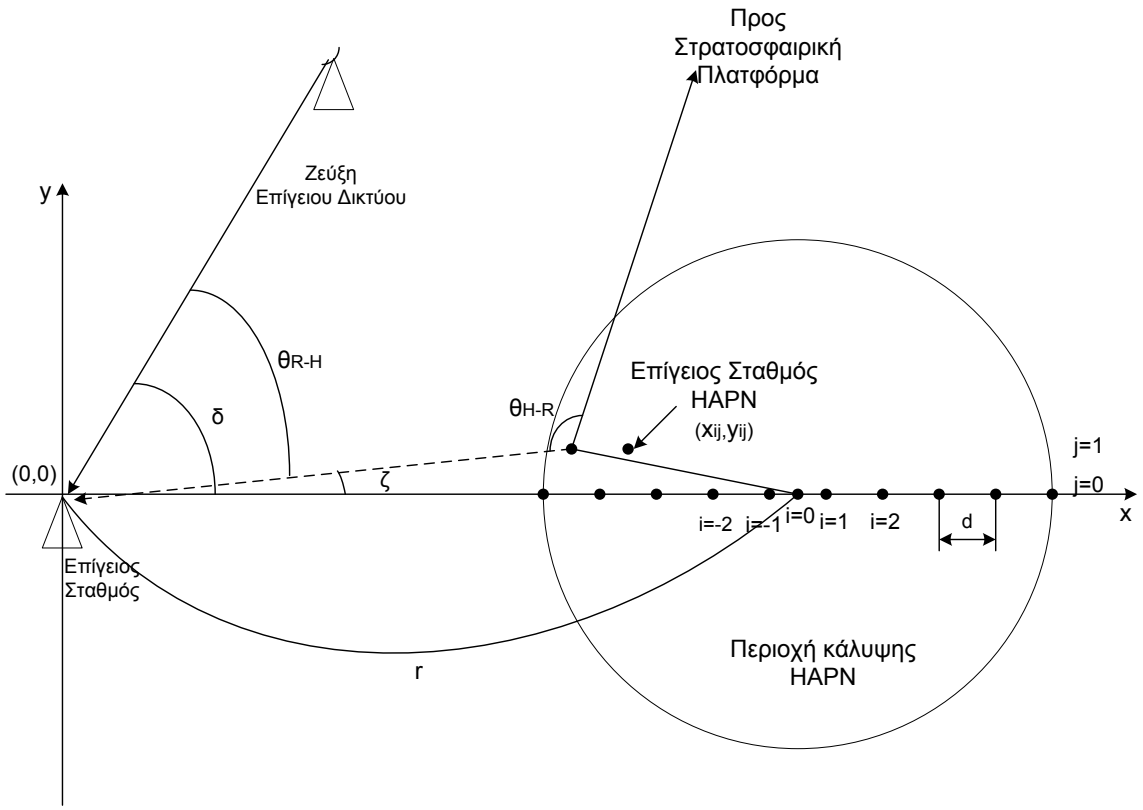
$x_{ij} = \begin{cases} r + id & (j = even) \\ r + \frac{(2i-1)}{2}d & (i = odd) \end{cases}$ : η θέση x του επίγειου σταθμού του HAPN,

$y_{ij} = jd\sin 60^\circ$ : η θέση y του επίγειου σταθμού του HAPN,

$r$: η απόσταση ανάμεσα στο σταθμό αναμετάδοσης και στο σημείο ναδίρ του αερόπλοιου του HAPN,

$d$: η απόσταση μεταξύ των επίγειων σταθμών του HAPN,

$i, j$ : η θέση κάθε κυψέλης στον x και στον y άξονα αντίστοιχα.




**Σχήμα 4.26 Μηχανισμός υπολογισμού παρεμβολών από τους επίγειους σταθμούς του HAPN προς το σταθμό ραδιοαναμετάδοσης.**

Γνωρίζοντας το επίπεδο παρεμβολής στο σταθμό ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου, ο λόγος I/N μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$I / N = I_{G-T} - \{10\log(kTB) + NF\} \qquad \text{(dB)} \qquad (4.3.6)$$

όπου:

$k$: η σταθερά του Boltzmann (1, 38 × $10^{-23}$ (J/K)),

$T$: θερμοκρασία (K),

$B$: εύρος ζώνης (Hz),

$NF$: παράγοντας θορύβου του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης (dB).

### 4.3.2 Μελέτη Παρεμβολών και Αποστάσεων Διαχωρισμού

Με βάση τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη παράγραφο γίνεται μελέτη παρεμβολών και αποστάσεων διαχωρισμού. Γίνεται ξεχωριστή μελέτη για κάθε περιοχή κάλυψης, αστική-προαστιακή-αγροτική, με τελικό στόχο την εύρεση των αποστάσεων διαχωρισμού ανάμεσα στους επίγειους σταθμού του HAPN και τους σταθμούς ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου.

Για τη μελέτη χρησιμοποιούνται τα τεχνικά χαρακτηριστικά που προτείνει η ITU-R για επίγεια συστήματα και τα οποία έχουν περιγραφεί στον Πίνακα 4.1. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του στρατοσφαιρικού συστήματος είναι αυτά που έχουν προταθεί στο Κεφάλαιο 3 για τις νέες ζώνες συχνοτήτων. Για καλύτερη εποπτεία παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά για κάθε περιοχή κάλυψης.

Για τον υπολογισμό της ισχύος θορύβου N θεωρούμε τη θερμοκρασία T=293 K και το εύρος ζώνης B=1 MHz. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο παράγοντας θορύβου είναι NF= 3 dB (από τον Πίνακα 4.1), προκύπτει ότι η ισχύς του θορύβου είναι N=140.93 dB(W/MHz). Δεχόμαστε ως κριτήριο για το λόγο παρεμβολής προς θόρυβο (I/N), το I/N=10%. Με βάση το κριτήριο αυτό προκύπτει ότι η ανεκτή ισχύς παρεμβολής, $I_{G-T}$, πρέπει να είναι μικρότερη από -150.93 dB(W/MHz). Για τον υπολογισμό του λόγου I/N μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση (4.3.6).

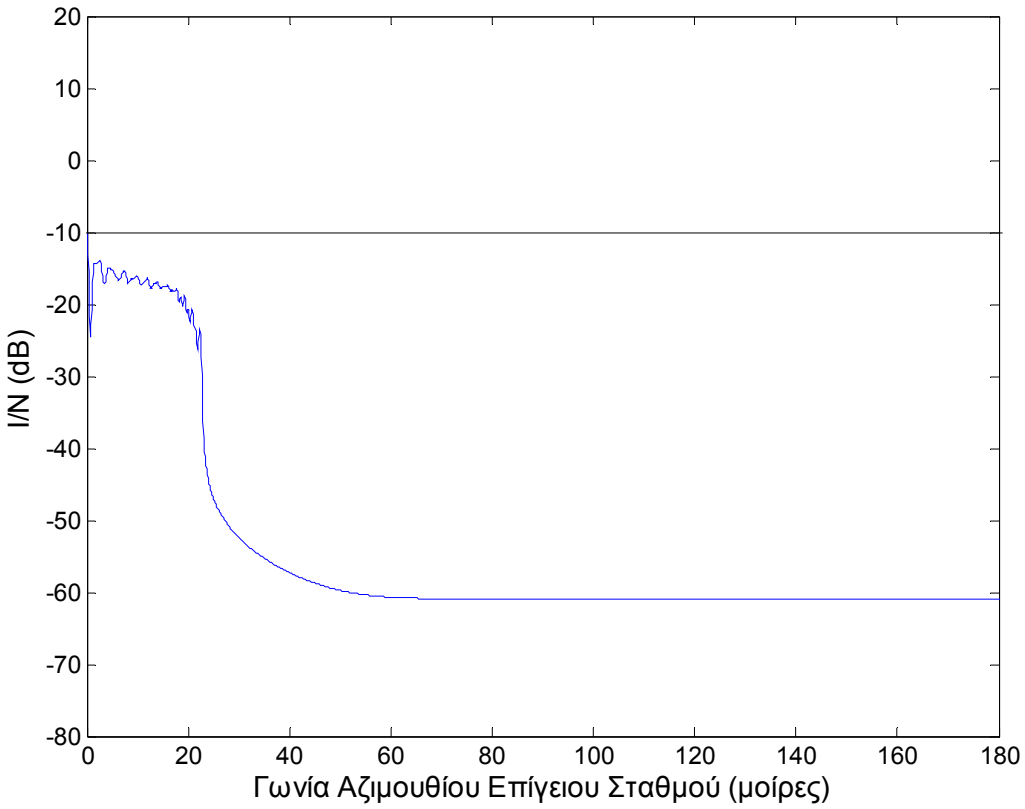
#### 4.3.2.1 Μελέτη για Στρατοσφαιρικές Πλατφόρμες που Παρέχουν Κάλυψη στην Αστική Περιοχή

Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται οι παράμετροι του στρατοσφαιρικού δικτύου που λαμβάνονται υπόψη για τη διεξαγωγή της μελέτης.

| **Παράμετροι** | | **Τιμές** |
|---|---|---|
| HAPS στην αστική περιοχή κάλυψης (UAC) | Γωνία ανύψωσης | $30^o$ |
| | Συχνότητα | 7.875 GHz |
| | Διάμετρος της περιοχής κάλυψης | 72 km |
| | Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας του επίγειου σταθμού του HAPN | Σύσταση ITU-R F.1245 [1] |
| | Μέγιστο κέρδος κεραίας του επίγειου σταθμού | 47.5 dBi |
| | Ύψος του αερόπλοιου | 21 km |
| | Αριθμός επίγειων σταθμών | 367 (ομοιόμορφα κατανεμημένοι) |
| | Απόσταση μεταξύ των επίγειων σταθμών | 3.6 km |
| | Απώλειες τροφοδοσίας | 0.5 dB |
| | Απόσταση ραδιοαναμεταδότη από το σημείο ναδίρ του HAP | 100 km |
| | Ισχύς εκπομπής | -43.5 dBW |

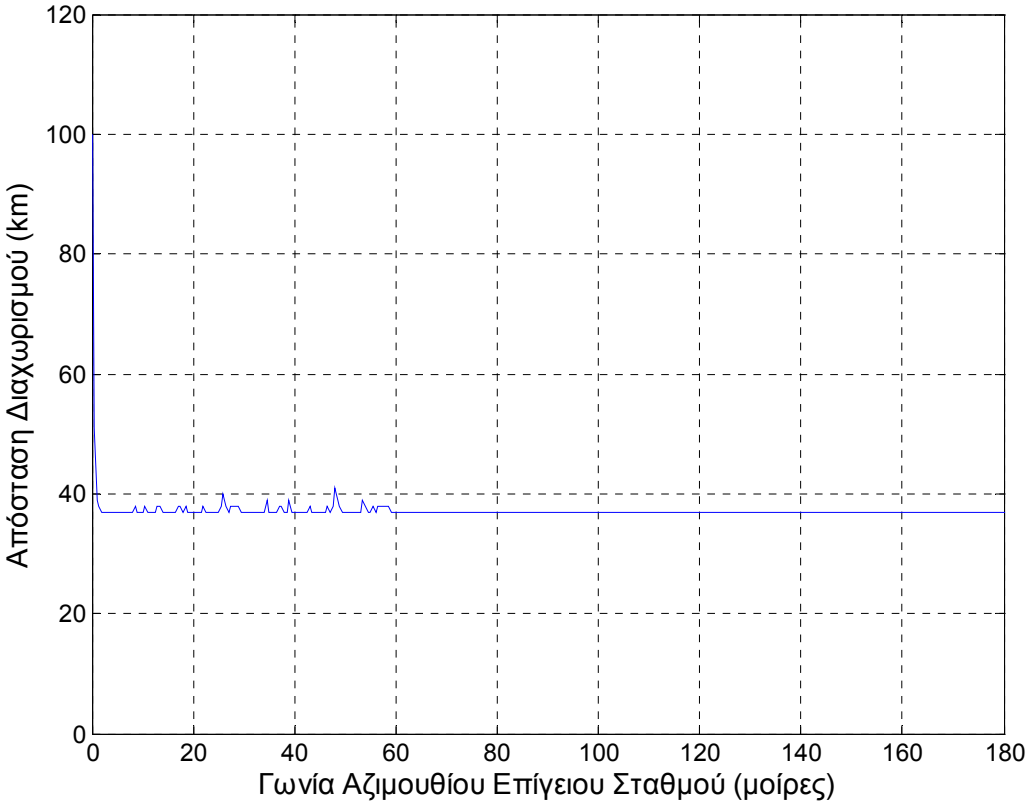
**Πίνακας 4.34 Παράμετροι του HAPN στην αστική περιοχή κάλυψης.**

Στο Σχήμα 4.4 φαίνονται οι τιμές του λόγου I/N για κάθε γωνία αζιμούθιου δ, όταν η απόσταση μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου και του σημείου ναδίρ της στρατοσφαιρικής πλατφόρμας είναι 100 km (r=100 km). Παρατηρούμε ότι για ισχύ εκπομπής -43.5 dBW ο λόγος I/N δεν ξεπερνάει τα -10 dB για καμία γωνία αζιμούθιου.

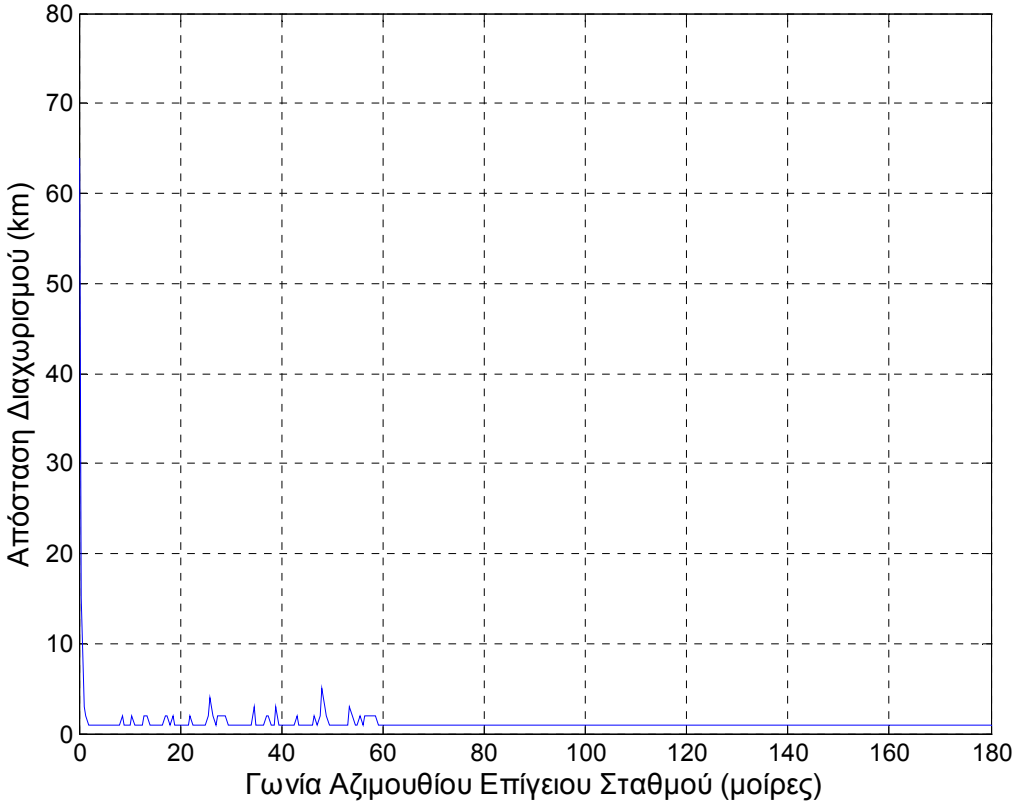



**Σχήμα 4.27 Διάγραμμα I/N συναρτήσει της γωνίας αζιμούθιου του επίγειου σταθμού για την αστική περιοχή κάλυψης.**

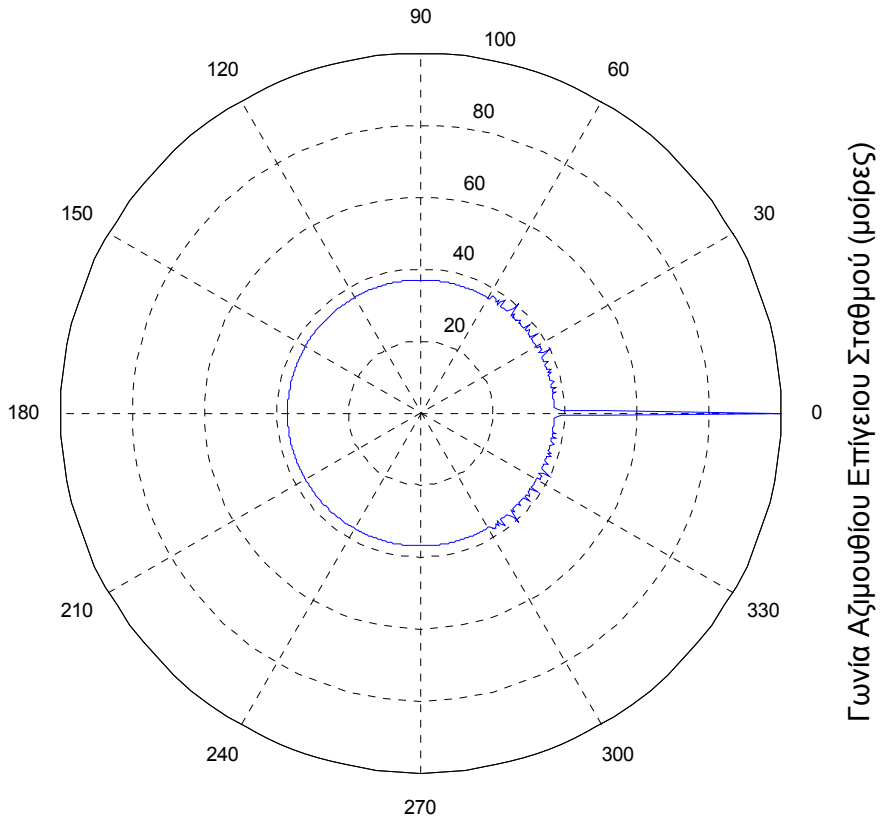
Στα Σχήματα 4.5 και 4.7 απεικονίζονται οι αναγκαίες αποστάσεις διαχωρισμού μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου και του σημείου ναδίρ της στρατοσφαιρικής πλατφόρμας. Στο Σχήμα 4.6 απεικονίζονται οι αναγκαίες αποστάσεις διαχωρισμού μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου και του σταθμού του στρατοσφαιρικού δικτύου που βρίσκεται στο άκρο της περιοχής κάλυψης της στρατοσφαιρικής πλατφόρμας. Παρατηρούμε ότι η μέγιστη απόσταση διαχωρισμού απαιτείται για γωνία αζιμούθιου $\delta=0^{o}$. Οι αποστάσεις διαχωρισμού μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης και του σημείου ναδίρ κυμαίνονται από 37 km έως 100 km. Οι αντίστοιχες αποστάσεις μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης και του σταθμού του στρατοσφαιρικού δικτύου που βρίσκεται στο άκρο της περιοχής κάλυψης κυμαίνονται από 1 km έως 64 km.




**Σχήμα 4.28 Αποστάσεις διαχωρισμού μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου και του σημείου ναδίρ του HAP συναρτήσει της γωνίας αζιμούθιου δ, στην αστική περιοχή.**




**Σχήμα 4.29 Αποστάσεις διαχωρισμού μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου και του σταθμού του HAPN που βρίσκεται στην άκρη της περιοχής κάλυψης συναρτήσει της γωνίας αζιμούθιου δ, στην αστική περιοχή.**




**Σχήμα 4.30 Αποστάσεις διαχωρισμού μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου και του σημείου ναδίρ του HAP συναρτήσει της γωνίας αζιμούθιου δ, στην αστική περιοχή (πολικό διάγραμμα).**

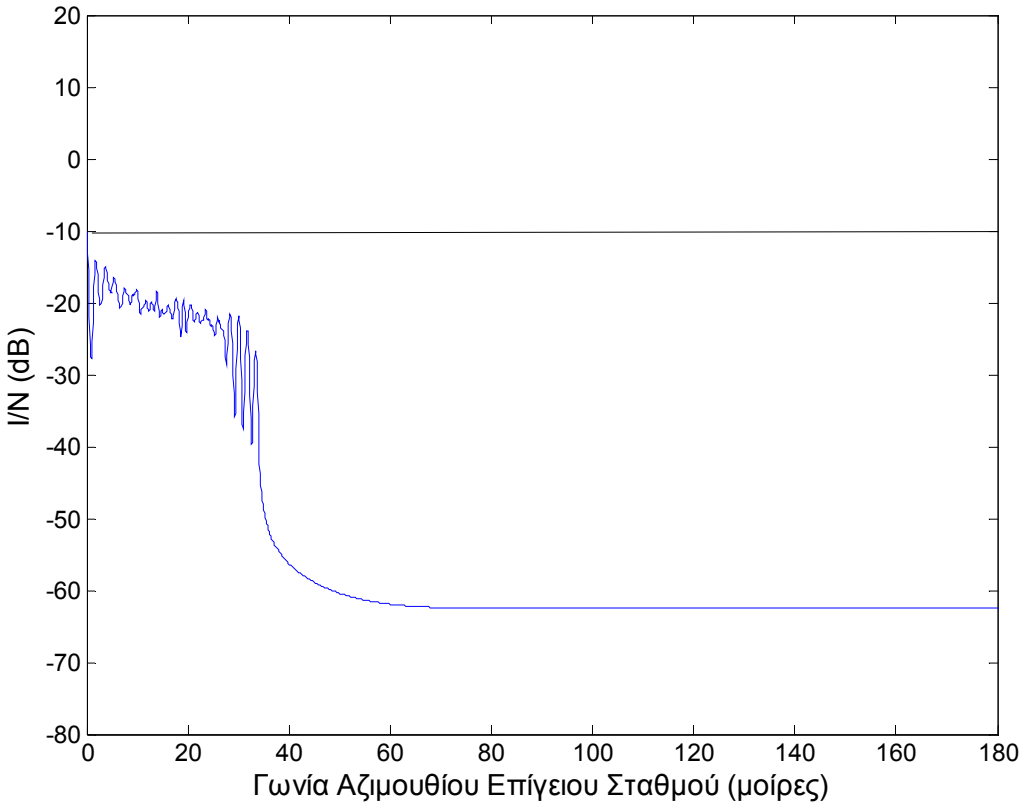
#### 4.3.2.2 Μελέτη για Στρατοσφαιρικές Πλατφόρμες που Παρέχουν Κάλυψη στην Προαστιακή Περιοχή

Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται οι παράμετροι του στρατοσφαιρικού δικτύου που λαμβάνονται υπόψη για τη διεξαγωγή της μελέτης.

| **Παράμετροι** | | **Τιμές** |
|---|---|---|
| Επίγειος σταθμός HAPs στην προαστιακή περιοχή κάλυψης (SAC) | Γωνία ανύψωσης | $15^o$ |
| | Συχνότητα | 7.875 GHz |
| | Διάμετρος της περιοχής κάλυψης | 153 km |
| | Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας του επίγειου σταθμού του HAPN | Σύσταση ITU-R F.1245 |
| | Μέγιστο κέρδος κεραίας του επίγειου σταθμού | 47 dBi |
| | Ύψος του αερόπλοιου | 21 km |
| | Αριθμός επίγειων σταθμών | 367 (ομοιόμορφα κατανεμημένοι) |
| | Απόσταση μεταξύ των επίγειων σταθμών | 7.65 km |
| | Απώλειες τροφοδοσίας | 0.5 dB |
| | Απόσταση ραδιοαναμεταδότη από το σημείο ναδίρ του HAP | 145 km |
| | Ισχύς εκπομπής | -43.5 dBW |

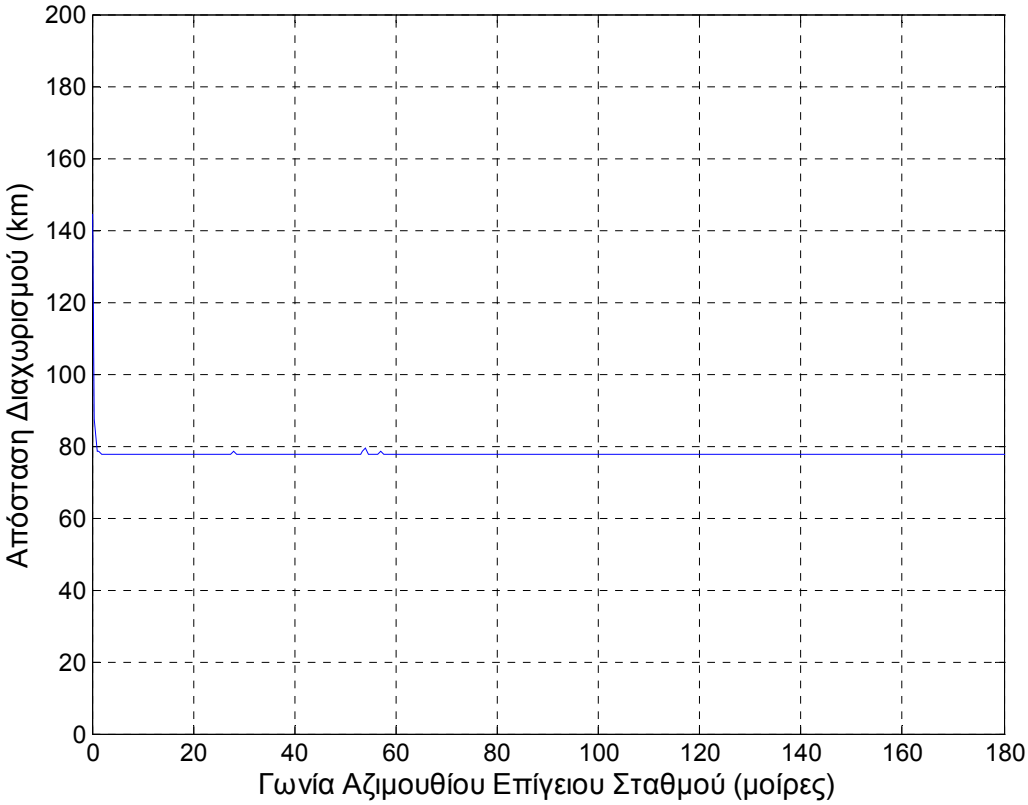
**Πίνακας 4.35 Παράμετροι του HAPN στην προαστιακή περιοχή κάλυψης.**

Στο Σχήμα 4.8 φαίνονται οι τιμές του λόγου I/N για κάθε γωνία αζιμούθιου δ, όταν η απόσταση μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου και του σημείου ναδίρ της στρατοσφαιρικής πλατφόρμας είναι 145 km (r=145 km). Παρατηρούμε ότι για ισχύ εκπομπής -43.5 dBW ο λόγος I/N δεν ξεπερνάει τα -10 dB για καμία γωνία αζιμούθιου.

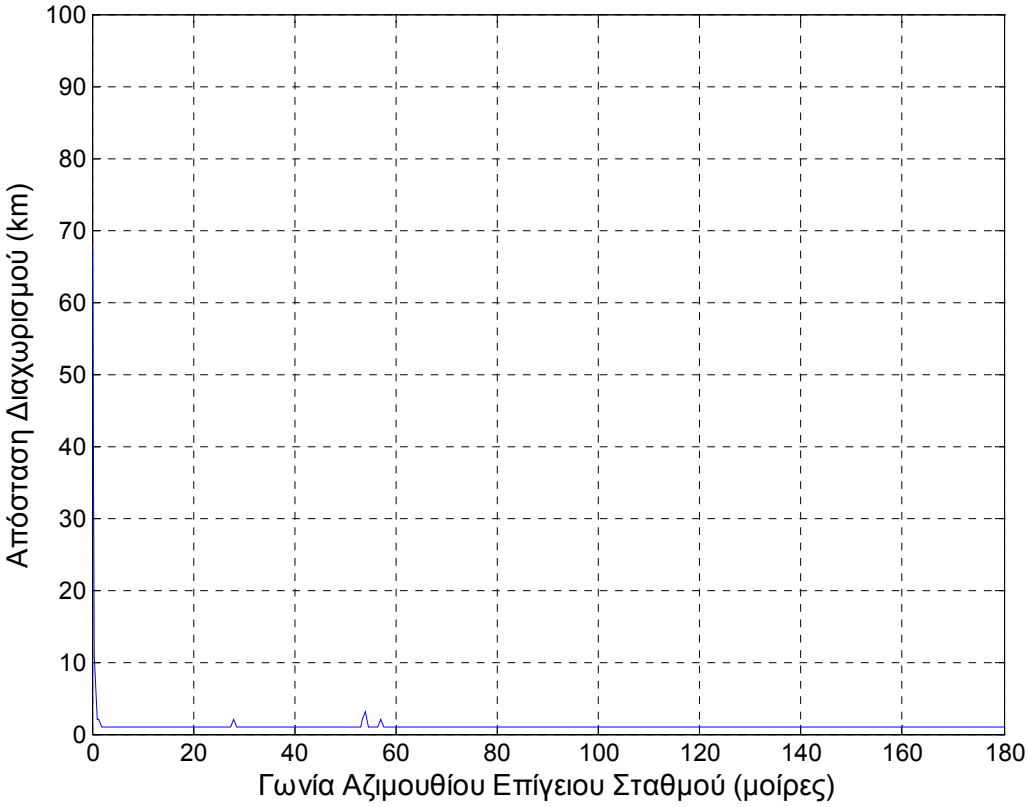



**Σχήμα 4.31 Διάγραμμα I/N συναρτήσει της γωνίας αζιμούθιου του επίγειου σταθμού για την προαστιακή περιοχή κάλυψης.**

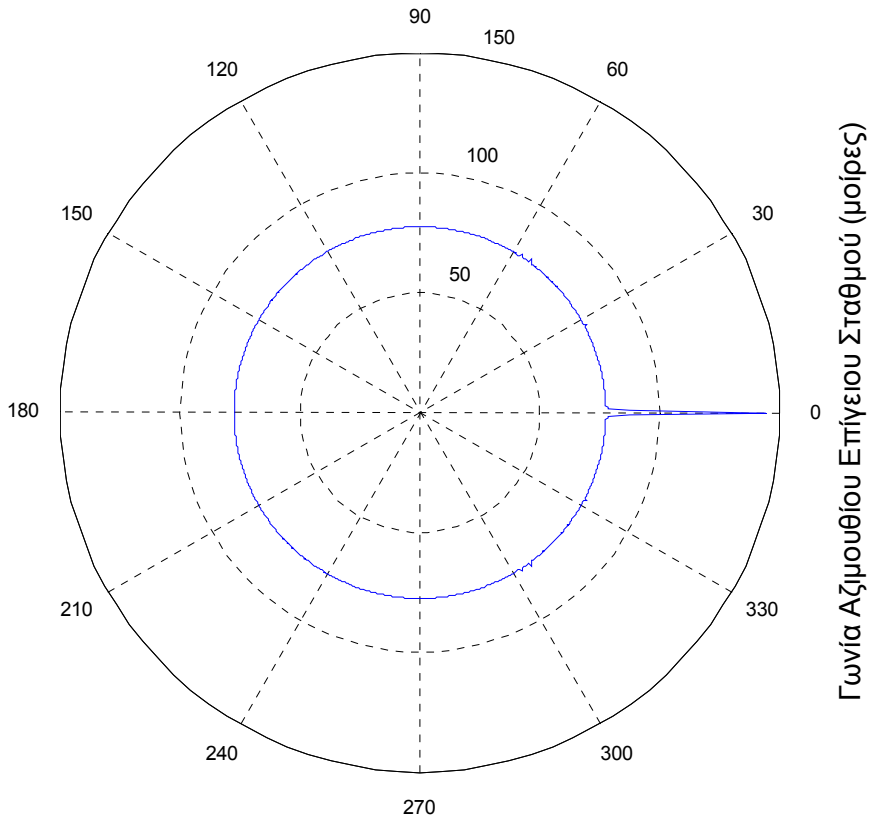
Στα Σχήματα 4.9 και 4.11 απεικονίζονται οι αναγκαίες αποστάσεις διαχωρισμού μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου και του σημείου ναδίρ της στρατοσφαιρικής πλατφόρμας. Στο Σχήμα 4.10 απεικονίζονται οι αναγκαίες αποστάσεις διαχωρισμού μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου και του σταθμού του στρατοσφαιρικού δικτύου που βρίσκεται στο άκρο της περιοχής κάλυψης της στρατοσφαιρικής πλατφόρμας. Παρατηρούμε ότι η μέγιστη απόσταση διαχωρισμού απαιτείται για γωνία αζιμούθιου $\delta=0^{o}$. Οι αποστάσεις διαχωρισμού μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης και του σημείου ναδίρ κυμαίνονται από 77.5 km έως 144.5 km. Οι αντίστοιχες αποστάσεις μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης και του σταθμού του στρατοσφαιρικού δικτύου που βρίσκεται στο άκρο της περιοχής κάλυψης κυμαίνονται από 1 km έως 68 km.




**Σχήμα 4.32 Αποστάσεις διαχωρισμού μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου και του σημείου ναδίρ του HAP συναρτήσει της γωνίας αζιμούθιου δ, στην προαστιακή περιοχή.**




**Σχήμα 4.33 Αποστάσεις διαχωρισμού μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου και του σταθμού του HAPN που βρίσκεται στην άκρη της περιοχής κάλυψης συναρτήσει της γωνίας αζιμούθιου δ, στην προαστιακή περιοχή.**




**Σχήμα 4.34 Αποστάσεις διαχωρισμού μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου και του σημείου ναδίρ του HAP συναρτήσει της γωνίας αζιμούθιου δ, στην προαστιακή περιοχή (πολικό διάγραμμα).**

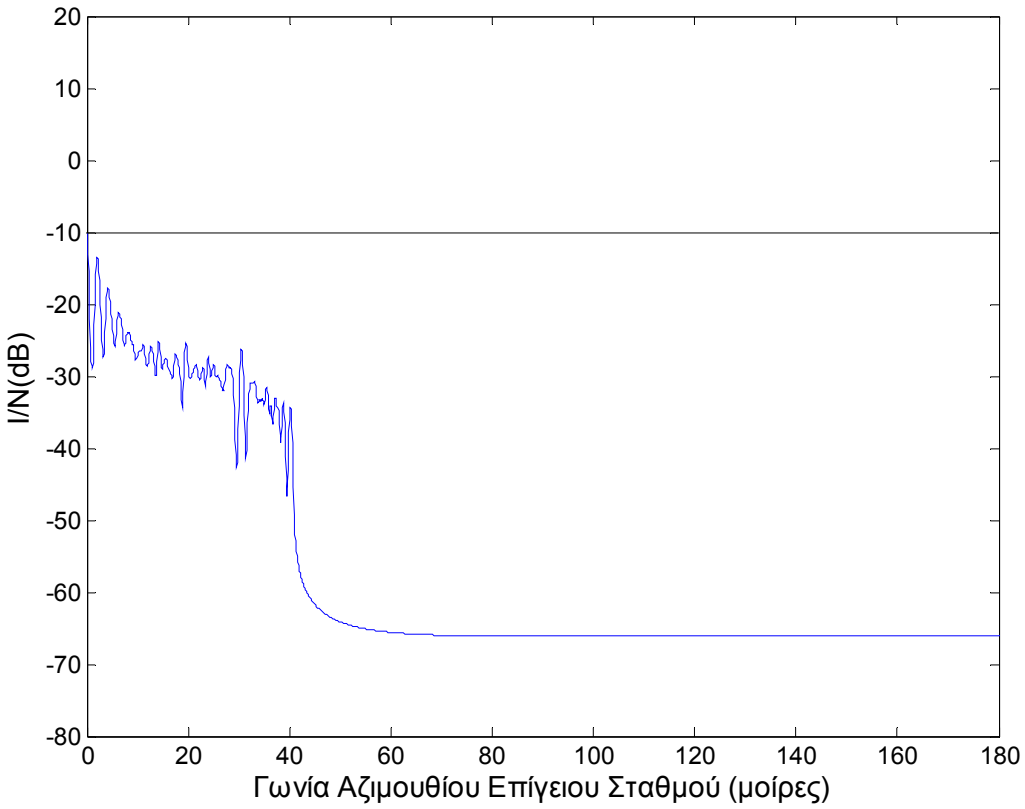
### 4.3.2.3 Μελέτη για Στρατοσφαιρικές Πλατφόρμες που Παρέχουν Κάλυψη στην Αγροτική Περιοχή

Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται οι παράμετροι του στρατοσφαιρικού δικτύου που λαμβάνονται υπόψη για τη διεξαγωγή της μελέτης.

| **Παράμετροι** | | **Τιμές** |
|---|---|---|
| Επίγειος σταθμός HAPs στην αγροτική περιοχή κάλυψης (RAC) | Γωνία ανύψωσης | $5^o$ |
| | Συχνότητα | 7.875 GHz |
| | Διάμετρος της περιοχής κάλυψης | 406 km |
| | Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας του επίγειου σταθμού του HAPs | Σύσταση ITU-R F.1245 |
| | Μέγιστο κέρδος κεραίας του επίγειου σταθμού | 47.5 dBi |
| | Ύψος του αερόπλοιου | 21 km |
| | Αριθμός επίγειων σταθμών | 367 (ομοιόμορφα κατανεμημένοι) |
| | Απόσταση μεταξύ των επίγειων σταθμών | 20.3 km |
| | Απώλειες τροφοδοσίας | 0.5 dB |
| | Απόσταση ραδιοαναμεταδότη από το σημείο ναδίρ του HAPs | 320 km |
| | Ισχύς εκπομπής | -44 dBW |

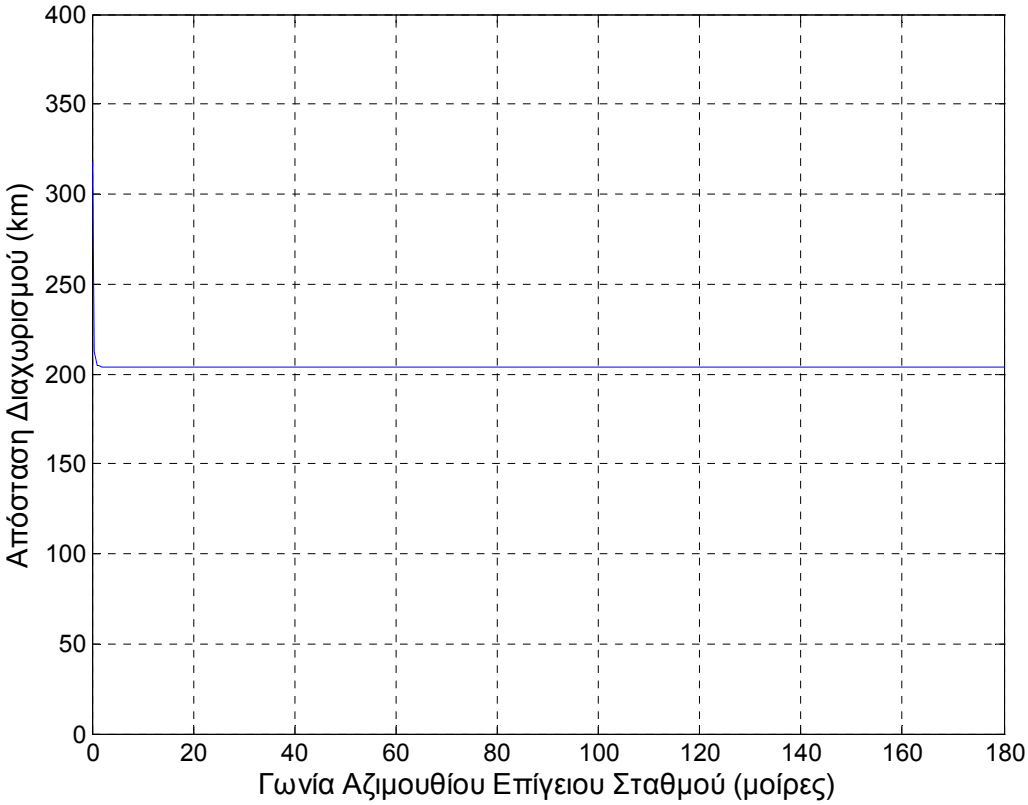
**Πίνακας 4.36 Παράμετροι του HAPN στην αγροτική περιοχή κάλυψης**

Στο Σχήμα 4.12 φαίνονται οι τιμές του λόγου I/N για κάθε γωνία αζιμούθιου δ, όταν η απόσταση μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου και του σημείου ναδίρ της στρατοσφαιρικής πλατφόρμας είναι 320 km (r=320 km). Παρατηρούμε ότι για ισχύ εκπομπής -44 dBW ο λόγος I/N δεν ξεπερνάει τα -10 dB για καμία γωνία αζιμούθιου.

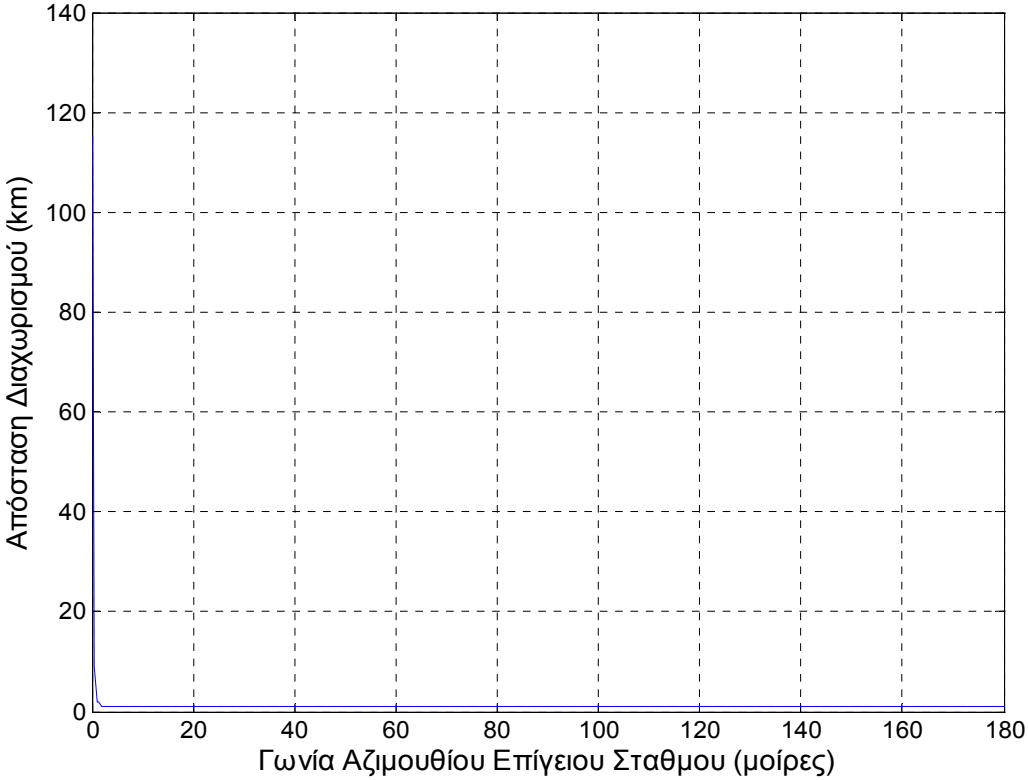



**Σχήμα 4.35 Διάγραμμα I/N συναρτήσει της γωνίας αζιμούθιου του επίγειου σταθμού για την αγροτική περιοχή κάλυψης.**

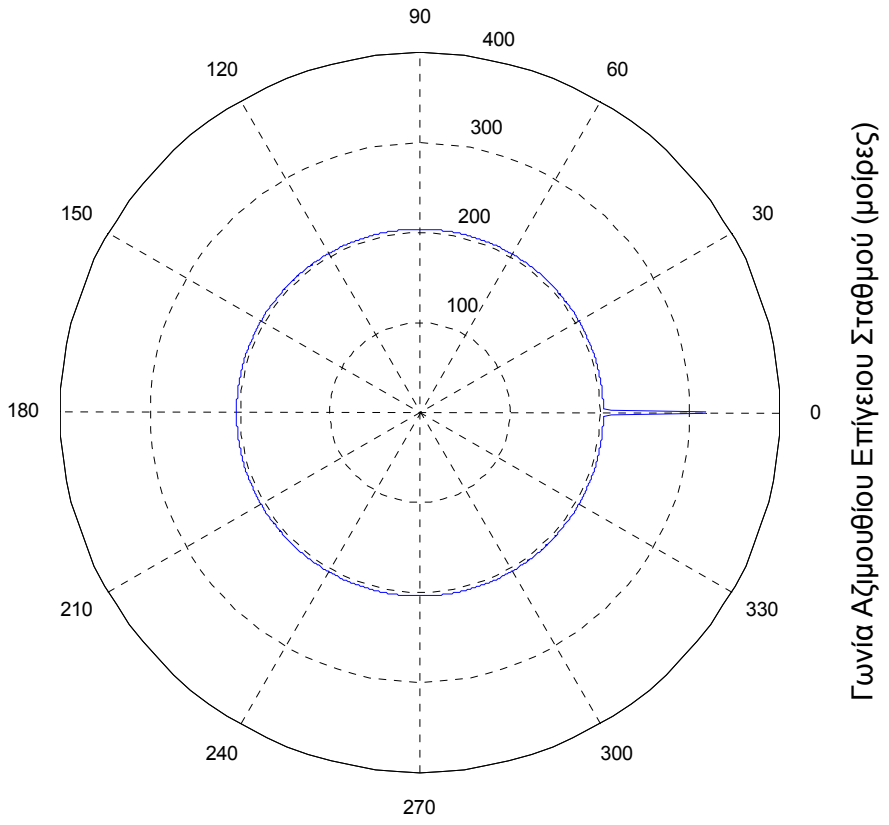
Στα Σχήματα 4.13 και 4.15 απεικονίζονται οι αναγκαίες αποστάσεις διαχωρισμού μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου και του σημείου ναδίρ της στρατοσφαιρικής πλατφόρμας. Στο Σχήμα 4.14 απεικονίζονται οι αναγκαίες αποστάσεις διαχωρισμού μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου και του σταθμού του στρατοσφαιρικού δικτύου που βρίσκεται στο άκρο της περιοχής κάλυψης της στρατοσφαιρικής πλατφόρμας. Παρατηρούμε ότι η μέγιστη απόσταση διαχωρισμού απαιτείται για γωνία αζιμούθιου $\delta=0^o$. Οι αποστάσεις διαχωρισμού μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης και του σημείου ναδίρ κυμαίνονται από 204 km έως 318 km. Οι αντίστοιχες αποστάσεις μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης και του σταθμού του στρατοσφαιρικού δικτύου που βρίσκεται στο άκρο της περιοχής κάλυψης κυμαίνονται από 1 km έως 115 km.




**Σχήμα 4.36 Αποστάσεις διαχωρισμού μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου και του σημείου ναδίρ του HAP συναρτήσει της γωνίας αζιμούθιου δ, στην αγροτική περιοχή.**




**Σχήμα 4.37 Αποστάσεις διαχωρισμού μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου και του σταθμού του HAPN που βρίσκεται στην άκρη της περιοχής κάλυψης συναρτήσει της γωνίας αζιμούθιου δ, στην αγροτική περιοχή.**




**Σχήμα 4.38 Αποστάσεις διαχωρισμού μεταξύ του σταθμού ραδιοαναμετάδοσης του επίγειου δικτύου και του σημείου ναδίρ του HAP συναρτήσει της γωνίας αζιμούθιου δ, στην αγροτική περιοχή (πολικό διάγραμμα).**

# Βιβλιογραφία

[1] ITU-R Recommendation F. 1764, “Methodology to evaluate interference from fixed service systems using high altitude platform stations to fixed wireless systems in the bands above 3 GHz”

[2] ITU-R Recommendation F. 1245-1, “Mathematical model of average and related radiation patterns for line-of-sight point-to-point radio-relay system antennas for use in certain coordination studies and interference assessment in the frequency range from 1 GHz to about 70 GHz”.

[3] ITU-R Recommendation F.758-2, “Considerations in the development of criteria for sharing between the terrestrial fixed service and other services”.

[4] ITU-R Recommendation P.452-10, “Prediction procedure for the evaluation of microwave interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.7 GHz”.

[5] “Δίκτυα Σταθερών Επικοινωνιών Ευρείας Ζώνης με τη χρήση Στρατοσφαιρικών Πλατφορμών”, Διδακτορική Διατριβή, Βασίλης Φ. Μήλας, Αθήνα Μάιος 2006, Εργαστήριο κινητών Ραδιοεπικοινωνιών Ε.Μ.Π.

[6] “Frequency Allocations”, Radio Regulation of ITU Article 5, Edition of 2004.

[7] ITU-R Recommendation P.618-7, “Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems”.

# Κεφάλαιο 5

# Γενικά Συμπεράσματα και Προτάσεις Επέκτασης

## 5.1 Γενικά Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η δυνατότητα λειτουργίας των στρατοσφαιρικών δικτύων στις χαμηλότερες ζώνες συχνοτήτων. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκε η δυνατότητα λειτουργίας στη ζώνη 3-18 GHz. Αρχικά, αναλύθηκαν οι υπηρεσίες που έχουν καταχωρηθεί στις παραπάνω συχνότητες και προτάθηκαν κριτήρια επιλογής βέλτιστων ζωνών συχνοτήτων. Με βάση τα κριτήρια αυτά προτάθηκαν ως καταλληλότερες συχνότητες οι ζώνες 4.4-4.5 GHz και 7.85-7.9 GHz. Η ζώνη 4.4-4.5 GHz προτάθηκε για την κάτω ζεύξη και η ζώνη 7.85-7.9 GHz για την άνω ζεύξη. Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι είναι δυνατή η λειτουργία στις χαμηλότερες ζώνες συχνοτήτων αν και το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι αρκετά μικρό. Έπειτα, προτάθηκαν τεχνικά χαρακτηριστικά για τη λειτουργία των στρατοσφαιρικών δικτύων στις νέες ζώνες συχνοτήτων. Τέλος, μελετήθηκαν οι παρεμβολές της άνω ζεύξης του στρατοσφαιρικού δικτύου προς το σταθερό επίγειο δίκτυο.

Κάνοντας χρήση των νέων συχνοτήτων που προτείνονται καθίσταται δυνατή η λειτουργία των στρατοσφαιρικών δικτύων στις χαμηλότερες συχνότητες. Αυτό συνεπάγεται διάδοση σε καλύτερο περιβάλλον διάδοσης, με λιγότερες ατμοσφαιρικές απώλειες και απώλειες λόγω βροχής. Έτσι, μειώνεται η απαιτούμενη ακτινοβολούμενη ισχύς του στρατοσφαιρικού και του επίγειου σταθμού, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο χρόνος ζωής της στρατοσφαιρικής πλατφόρμας καθώς η κατανάλωση ενέργειας είναι μικρότερη. Για τη λειτουργία του στρατοσφαιρικού δικτύου στις νέες συχνότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα προτεινόμενα τεχνικά χαρακτηριστικά. Με αυτά τα χαρακτηριστικά οι αποστάσεις διαχωρισμού για να μην προκαλούνται παρεμβολές των επίγειων σταθμών του στρατοσφαιρικού δικτύου προς τους σταθμούς του επίγειου δικτύου θα πρέπει να είναι αυτές που αναφέρονται στο Κεφάλαιο 4.

## 5.2 Προτάσεις Επέκτασης

Η παρούσα διπλωματική εργασία μπορεί να επεκταθεί ώστε να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής έρευνας.

Πιο συγκεκριμένα, στο Κεφάλαιο 4 μελετήθηκαν οι παρεμβολές σε μία από τις τέσσερις διαδρομές διάδοσης παρεμβολής. Θα μπορούσε, λοιπόν, το κεφάλαιο αυτό να επεκταθεί ώστε να μελετώνται οι παρεμβολές και στις υπόλοιπες τρεις διαδρομές. Δηλαδή θα μπορούσαν να μελετηθούν οι παρακάτω τρεις περιπτώσεις παρεμβολών:

- παρεμβολές που δημιουργούνται από τις εναέριες πλατφόρμες του στρατοσφαιρικού δικτύου στους σταθμούς του επίγειου δικτύου.

- παρεμβολές που δημιουργούνται από τους σταθμούς του επίγειου δικτύου στους επίγειους σταθμούς του στρατοσφαιρικού δικτύου.

- παρεμβολές που δημιουργούνται από τους σταθμούς του επίγειου δικτύου στις εναέριες πλατφόρμες του στρατοσφαιρικού δικτύου.

Οι ζώνες συχνοτήτων που προτάθηκαν έχουν καταχωρηθεί και σε κινητά επίγεια δίκτυα. Θα μπορούσε λοιπόν να επεκταθεί η εργασία ώστε να περιλαμβάνει και μελέτη παρεμβολών μεταξύ του στρατοσφαιρικού δικτύου και του κινητού επίγειου δικτύου.

# Παράρτημα Α΄

# Όροι και Ορισμοί

Παρακάτω επεξηγούνται οι όροι που χρησιμοποιούνται στους Πίνακες 2.2-2.4, όπως αυτοί αναφέρονται στο [1].

**σταθερή υπηρεσία**: Υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας μεταξύ καθορισμένων σταθερών σημείων.

**σταθερή δορυφορική υπηρεσία**: Υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας μεταξύ επίγειων σταθμών σε δεδομένες θέσεις, όταν χρησιμοποιούνται ένας ή περισσότεροι δορυφόροι. Η δεδομένη θέση μπορεί να είναι ένα προσδιορισμένο σταθερό σημείο ή οποιοδήποτε σταθερό σημείο σε προσδιορισμένες περιοχές. Σε ορισμένες περιπτώσεις η υπηρεσία αυτή περιλαμβάνει ζεύξεις μεταξύ δορυφόρων, οι οποίοι μπορεί να λειτουργούν στη διαδορυφορική υπηρεσία. Η σταθερή δορυφορική υπηρεσία μπορεί επίσης να περιλαμβάνει ζεύξεις τροφοδότη για άλλες υπηρεσίες διαστημικής ραδιοεπικοινωνίας.

**υπηρεσία διαστημικής εκμετάλλευσης**: Υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας που προορίζεται αποκλειστικά για την εκμετάλλευση διαστημοπλοίων, ειδικότερα την παρακολούθηση της τροχιάς στο διάστημα, τη διαστημική τηλεμετρία και το διαστημικό τηλεχειρισμό. Οι λειτουργίες αυτές θα εξασφαλίζονται κανονικά στα πλαίσια της υπηρεσίας στην οποία λειτουργεί ο διαστημικός σταθμός.

**κινητή υπηρεσία**: Υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας μεταξύ κινητών σταθμών και σταθμών ξηράς, ή μεταξύ κινητών σταθμών.

**κινητή δορυφορική υπηρεσία**: Υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας:
− μεταξύ κινητών επίγειων σταθμών και ενός ή περισσότερων διαστημικών σταθμών, ή μεταξύ διαστημικών σταθμών που χρησιμοποιούνται από την υπηρεσία αυτή, ή
− μεταξύ κινητών επίγειων σταθμών μέσω ενός ή περισσότερων διαστημικών σταθμών.
Η υπηρεσία αυτή μπορεί επίσης να περιλαμβάνει ζεύξεις τροφοδότη που είναι αναγκαίες για τη λειτουργία της.

**ναυτιλιακή κινητή δορυφορική υπηρεσία**: Κινητή δορυφορική υπηρεσία στην οποία οι επίγειοι κινητοί σταθμοί είναι εγκατεστημένοι σε πλοία. Οι σταθμοί σκαφών διάσωσης και οι σταθμοί θεσιδεικτικών ραδιοφάρων έκτακτης ανάγκης μπορούν επίσης να μετέχουν στην υπηρεσία αυτή.

**αεροναυτική κινητή υπηρεσία**: Κινητή υπηρεσία μεταξύ αεροναυτικών σταθμών και σταθμών αεροσκάφους, ή μεταξύ σταθμών αεροσκάφους, στην οποία μπορούν να μετέχουν και σταθμοί σκαφών διάσωσης. Σταθμοί θεσιδεικτικών ραδιοφάρων έκτακτης

ανάγκης μπορούν επίσης να συμμετέχουν στην υπηρεσία αυτή σε καθορισμένες συχνότητες κινδύνου και έκτακτης ανάγκης.

**αεροναυτική κινητή δορυφορική υπηρεσία**: Κινητή δορυφορική υπηρεσία στην οποία οι επίγειοι κινητοί σταθμοί είναι εγκατεστημένοι σε αεροσκάφη. Σταθμοί σκαφών διάσωσης και σταθμοί θεσιδεικτικών ραδιοφάρων έκτακτης ανάγκης μπορούν επίσης να μετέχουν στην υπηρεσία αυτή.

**αεροναυτική κινητή δορυφορική υπηρεσία (R)**: Αεροναυτική κινητή δορυφορική υπηρεσία που περιορίζεται σε επικοινωνίες που αφορούν την ασφάλεια και κανονικότητα των πτήσεων, κατά πρωτεύοντα λόγο κατά μήκος των εθνικών ή διεθνών πολιτικών αεροδιαδρόμων.

**αεροναυτική κινητή δορυφορική υπηρεσία (OR):** Κινητή αεροναυτική δορυφορική υπηρεσία που προορίζεται για επικοινωνίες, περιλαμβανομένων αυτών που αφορούν το συντονισμό των πτήσεων, κατά πρωτεύοντα λόγο εκτός των εθνικών ή διεθνών πολιτικών αεροδιαδρόμων.

**υπηρεσία ευρυεκπομπής**: Υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας στην οποία οι εκπομπές προορίζονται για απευθείας λήψη από το γενικό κοινό. Η υπηρεσία αυτή μπορεί να περιλαμβάνει εκπομπές ήχου, εκπομπές τηλεόρασης ή άλλους τύπους εκπομπής.

**υπηρεσία δορυφορικής ευρυεκπομπής**: Υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας στην οποία σήματα εκπεμπόμενα ή αναμεταβιβαζόμενα από διαστημικούς σταθμούς προορίζονται για απευθείας λήψη από το ευρύ κοινό. Στην υπηρεσία δορυφορικής ευρυεκπομπής, ο όρος «απευθείας λήψη» πρέπει να περιλαμβάνει και την ατομική λήψη και τη συλλογική λήψη .
**υπηρεσία ραδιοεπισήμανσης**: Υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας για σκοπούς ραδιοεπισήμανσης.

**υπηρεσία δορυφορικής ραδιοεπισήμανσης**: Υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας για σκοπούς ραδιοεπισήμανσης που περιλαμβάνει τη χρήση ενός ή περισσότερων διαστημικών σταθμών.

**υπηρεσία ραδιοπλοήγησης**: Υπηρεσία ραδιοεπισήμανσης για σκοπούς ραδιοπλοήγησης.

**υπηρεσία δορυφορικής ραδιοπλοήγησης**: Υπηρεσία δορυφορικής ραδιοεπισήμανσης για σκοπούς ραδιοπλοήγησης. Η υπηρεσία αυτή μπορεί επίσης να περιλαμβάνει τις ζεύξεις τροφοδότη που είναι αναγκαίες για την εκμετάλλευσή της.

**υπηρεσία ναυτιλιακής ραδιοπλοήγησης**: Υπηρεσία ραδιοπλοήγησης που προορίζεται για τις ανάγκες και την ασφαλή εκμετάλλευση των πλοίων.

**υπηρεσία ναυτιλιακής δορυφορικής ραδιοπλοήγησης**: Υπηρεσία δορυφορικής ραδιοπλοήγησης στην οποία οι επίγειοι σταθμοί είναι εγκατεστημένοι σε πλοία.

**υπηρεσία αεροναυτικής ραδιοπλοήγησης**: Υπηρεσία ραδιοπλοήγησης που προορίζεται για τις ανάγκες και την ασφαλή εκμετάλλευση των αεροσκαφών.

**υπηρεσία αεροναυτικής δορυφορικής ραδιοπλοήγησης**: Υπηρεσία δορυφορικής ραδιοπλοήγησης στην οποία οι επίγειοι σταθμοί είναι εγκατεστημένοι σε αεροσκάφη.

**υπηρεσία ραδιοεντοπισμού**: Υπηρεσία ραδιοεπισήμανσης για σκοπούς ραδιοεντοπισμού.

**υπηρεσία δορυφορικού ραδιοεντοπισμού**: Υπηρεσία δορυφορικής ραδιοεπισήμανσης χρησιμοποιούμενη για σκοπούς ραδιοεντοπισμού.

**υπηρεσία μετεωρολογικών βοηθημάτων**: Υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας χρησιμοποιούμενη για μετεωρολογικές παρατηρήσεις, περιλαμβανομένων των υδρολογικών, και εξερεύνηση.

**υπηρεσία δορυφορικής εξερεύνησης της Γης**: Υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας μεταξύ επίγειων σταθμών και ενός ή περισσότερων διαστημικών σταθμών, που μπορεί να περιλαμβάνει ζεύξεις μεταξύ διαστημικών σταθμών, στην οποία:

- πληροφορίες που αφορούν τα χαρακτηριστικά της Γης και των φυσικών φαινόμενων της, περιλαμβανομένων των δεδομένων που σχετίζονται με την κατάσταση του περιβάλλοντος, λαμβάνονται από ενεργούς ανιχνευτήρες ή παθητικούς ανιχνευτήρες σε δορυφόρους της Γης.
- ανάλογες πληροφορίες συλλέγονται από αερομεταφερόμενες ή εγκατεστημένες στη Γη εξέδρες,
- τέτοιες πληροφορίες μπορούν να διανέμονται σε επίγειους σταθμούς στο ίδιο σύστημα,
- μπορεί να περιλαμβάνεται εξακρίβωση εξέδρας.

**υπηρεσία δορυφορικής μετεωρολογίας**: Υπηρεσία δορυφορικής εξερεύνησης της Γης για σκοπούς μετεωρολογίας.

**υπηρεσία πρότυπης συχνότητας και σημάτων χρόνου**: Υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας για επιστημονικούς, τεχνικούς και άλλους σκοπούς, που παρέχει την εκπομπή συγκεκριμένων συχνοτήτων, σημάτων χρόνου ή και των δύο, δηλωμένης υψηλής ακρίβειας, που προορίζεται για γενική λήψη.

**δορυφορική υπηρεσία πρότυπης συχνότητας και σημάτων χρόνου**: Υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας που χρησιμοποιεί διαστημικούς σταθμούς σε δορυφόρους της Γης για τους ίδιους σκοπούς όπως η υπηρεσία πρότυπης συχνότητας και ωριαίων σημάτων.

**υπηρεσία διαστημικής έρευνας**: Υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας στην οποία χρησιμοποιούνται διαστημόπλοια ή άλλα αντικείμενα του διαστήματος για σκοπούς επιστημονικής ή τεχνολογικής έρευνας.

**ερασιτεχνική υπηρεσία**: Υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας που έχει ως σκοπό την αυτοδιδασκαλία, την αλληλοεπικοινωνία και τις τεχνικές διερευνήσεις που διεξάγονται από ερασιτέχνες, δηλαδή από πρόσωπα κατάλληλα εξουσιοδοτημένα που ενδιαφέρονται για τη ραδιοηλεκτρική τεχνική αποκλειστικά για προσωπικό σκοπό και χωρίς οικονομικό ενδιαφέρον.

**ερασιτεχνική δορυφορική υπηρεσία**: Υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας που χρησιμοποιεί διαστημικούς σταθμούς σε δορυφόρους της Γης για τους ίδιους σκοπούς όπως η ερασιτεχνική υπηρεσία .

**υπηρεσία ραδιοαστρονομίας**: Υπηρεσία που περιλαμβάνει τη χρήση της ραδιοαστρονομίας.

# Βιβλιογραφία

[1] “Terms and Definitions”, Radio Regulation of ITU Article 1, Edition of 2004.

# Παράρτημα Β΄

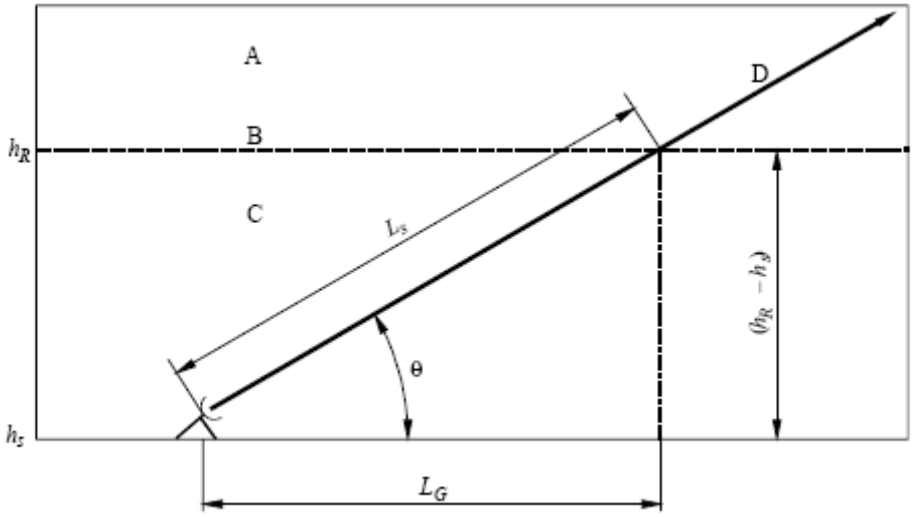
# Υπολογισμός της Κατανομής Απόσβεσης Λόγω Βροχής

Παρακάτω περιγράφεται η εφαρμογή του μοντέλου της Σύστασης P.618-7 (ITU-R Rec. P.618-7) [1] της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών για την πρόβλεψη της ετήσιας πιθανότητας υπέρβασης της απόσβεσης λόγω βροχής στην κάτω ζεύξη ενός συστήματος που λειτουργεί στην περιοχή της Αθήνας. Για την περαιτέρω ανάλυση είναι απαραίτητες οι ακόλουθες παράμετροι:

$R_{0.01}$: Κατώφλι της σημειακής έντασης βροχόπτωσης που αναφέρεται στη συγκεκριμένη τοποθεσία για πιθανότητα υπέρβασης 0.01% ενός μέσου έτους (mm/h).

$h_s$: Μέσο ύψος του επίγειου σταθμού πάνω από το υψόμετρο της θάλασσας (km)
θ: Γωνία ανύψωσης (σε μοίρες)
φ: Γεωγραφικό πλάτος του επίγειου σταθμού (σε μοίρες)
f: Συχνότητα σε (GHz).

Στο Σχήμα Β.1 φαίνεται η γεωμετρία των παραπάνω παραμέτρων.




**Σχήμα Β.39 Σχηματική παρουσίαση των παραμέτρων για την πρόβλεψη της απόσβεσης λόγω βροχής.**

**A: Καθίζημα Πάγου**
**B: Ύψος βροχής**
**C: Υγρό καθίζημα**
**D: διαδρομή Γη-διάστημα**

Θεωρείται ότι το μέσο ύψος του επίγειου σταθμού πάνω από το υψόμετρο της θάλασσας είναι $h_s$=0.2 km. Επίσης θεωρείται γωνία ανύψωσης θ=20$^o$ και κατακόρυφη πόλωση κύματος. Για την πρόβλεψη της απόσβεσης ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα τα οποία περιγράφονται στην προαναφερθείσα Σύσταση P.618-7:

*Βήμα 1*

Προσδιορίζεται το ύψος βροχής $h_R$ για την περιοχή της Αθήνας. Για τον υπολογισμό του χρησιμοποιείται ο εμπειρικός τύπος (B.1) που δίνεται στη Σύσταση S.736-3 (ITU-R Rec. S.736-3) [2] .προκύπτει $h_R$=3.925 km.

$$h_R = \begin{cases} 3 + 0.028\varphi & \gamma\iota\alpha\ 0 \le \varphi \le 36^\circ \\ 4 - 0.075(\varphi - 36) & \gamma\iota\alpha\ \varphi \ge 36^\circ \end{cases} \qquad \text{(B.1)}$$

Έτσι για φ=37.8$^0$ προκύπτει $h_R$=3.865 km.

*Βήμα 2*

Υπολογίζεται το μήκος πλάγια διαδρομής (slant-path length), $L_s$, που διέρχεται από το μέσο βροχής. Για γωνία ανύψωσης θ=20$^o$>5$^o$ το $L_s$ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$L_s = \frac{(h_R - h_s)}{\sin\theta} = \frac{3.865 - 0.2}{\sin 20} = 10.716 km \qquad \text{(B.2)}$$

*Βήμα 3*

Υπολογίζεται η οριζόντια προβολή, $L_G$, του μήκους πλάγιας διαδρομής, $L_s$, από τη σχέση:

$$L_G = L_s \cos\theta = 10.716 \cos 20 = 10.070 km \qquad \text{(B.3)}$$

*Βήμα 4*

Υπολογίζεται η ένταση βροχόπτωσης $R_{0.01}$, που αντιστοιχεί σε εκείνη την τιμή που υπερβαίνεται σε ποσοστό 0.01% του ολικού χρόνου (με χρόνο ολοκλήρωσης του 1 min). Λαμβάνοντας υπόψη διάφορα στατιστικά δεδομένα που υπάρχουν για την περιοχή της Αθήνας, επιλέγεται $R_{0.01}$=30 mm/h.

*Βήμα 5*

Για την παραπάνω ένταση βροχόπτωσης, $R_{0.01}$=40 mm/h, υπολογίζεται η ειδική απόσβεση, $\gamma_R$, με βάση τη Σύσταση P.838-1 (ITU-R Rec. P.838-1) [3]. Σύμφωνα με τη Σύσταση P.838-1 η ειδική απόσβεση δίνεται από τη σχέση:

$$\gamma_R = k(R_{0.01})^{\alpha} \qquad \text{(dB/km)} \qquad \text{(B.4)}$$

Οι συντελεστές k, a εξαρτώνται από τη συχνότητα και δίνονται στη Σύσταση P.838-1.

Στον παρακάτω Πίνακα Β.1 έχει υπολογιστεί η ειδική απόσβεση για κατακόρυφη πόλωση και για ορισμένες τιμές συχνοτήτων στην περιοχή της Αθήνας.

| **Συχνότητα** | **Ειδική απόσβεση** |
|---|---|
| 6 GHz | 0.115 dB/km |
| 8 GHz | 0.340 dB/km |
| 12 GHz | 0.995 dB/km |
| 15 GHz | 1.553 dB/km |
| 20 GHz | 2.586 dB/km |

**Πίνακας Β.37 Ειδική απόσβεση για ορισμένες τιμές συχνοτήτων.**

*Βήμα 6*

Υπολογίζεται ο οριζόντιος συντελεστής μείωσης, $r_{0.01}$, που αναφέρεται στην πιθανότητα υπέρβασης 0.01% του μέσου χρόνου, από τον τύπο:

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.78\sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f}} - 0.38(1 - e^{-2L_G})} \qquad \text{(B.5)}$$

Στον πίνακα Β.2 φαίνονται τα αποτελέσματα για ορισμένες τιμές συχνοτήτων.

| **Συχνότητα** | **οριζόντιο συντελεστή μείωσης $r_{0.01}$** |
|---|---|
| 6 GHz | 0.970 |
| 8 GHz | 0.809 |
| 12 GHz | 0.682 |
| 15 GHz | 0.642 |
| 20 GHz | 0.603 |

**Πίνακας Β.38 Οριζόντιος συντελεστής μείωσης για ορισμένες τιμές συχνοτήτων.**

*Βήμα 7*

Υπολογίζεται ο κατακόρυφος συντελεστής μείωσης,$v_{0.01}$, που αναφέρεται στην πιθανότητα υπέρβασης 0.01% του μέσου χρόνου, με την παρακάτω διαδικασία:

Αρχικά υπολογίζεται η γωνία ζ που δίνεται από την εξής σχέση:

$$\zeta = \tan^{-1}\left(\frac{h_R - h_s}{L_G r_{0.01}}\right) \qquad \text{(B.6)}$$

Στον Πίνακα Β.3 έχει υπολογιστεί η γωνία ζ για ορισμένες τιμές συχνοτήτων:

| **Συχνότητα** | **Γωνία ζ** |
|---|---|
| 6 GHz | 20,567$^o$ |
| 8 GHz | 24,225$^o$ |
| 12 GHz | 28,090$^o$ |
| 15 GHz | 29,552$^o$ |
| 20 GHz | 31,112$^o$ |

**Πίνακας Β.39 Γωνία ζ για ορισμένες τιμές της συχνότητας.**

Στη συνέχεια υπολογίζεται το μήκος $L_R$. Για γωνίες ζ μεγαλύτερες της γωνίας ανύψωσης θ=20$^o$ το $L_R$ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$L_R = \left( \frac{L_G r_{0.01}}{\cos\theta} \right) \tag{B.7}$$

Στον Πίνακα Β.4 έχει υπολογιστεί το μήκος $L_R$ για ορισμένες τιμές συχνοτήτων:

| **Συχνότητα** | **Μήκος $L_R$** |
|---|---|
| 6 GHz | 10.399 km |
| 8 GHz | 8.668 km |
| 12 GHz | 7.305 km |
| 15 GHz | 6.883 km |
| 20 GHz | 6.466 km |

**Πίνακας Β.40 Μήκος $L_R$ για ορισμένες τιμές της συχνότητας.**

Ακολουθεί ο υπολογισμός της γωνίας χ. Για γεωγραφικό πλάτος 37,8$^o$, δηλαδή το γεωγραφικό πλάτος της Αθήνας, το χ=0$^o$.

Τέλος υπολογίζεται ο κατακόρυφος συντελεστής μείωσης, $v_{0.01}$, από τη σχέση:

$$v_{0.01} = \frac{1}{1+\sqrt{\sin\theta}\left( 31(1-e^{-(\theta/(1+\chi))})\frac{\sqrt{L_R\gamma_R}}{f^2} - 0.45 \right)} \tag{B.8}$$

Για χ=0$^o$ η σχέση Β.7 γίνεται:

$$v_{0.01} = \frac{1}{1+\sqrt{\sin\theta}\left( 31(1-e^{-\theta})\frac{\sqrt{L_R\gamma_R}}{f^2} - 0.45 \right)} \tag{B.9}$$

Στον Πίνακα Β.5 έχει υπολογιστεί ο κατακόρυφος συντελεστής μείωσης, $v_{0.01}$, για ορισμένες τιμές συχνοτήτων:

| **Συχνότητα** | **κατακόρυφος συντελεστής μείωσης $v_{0.01}$** |
|---|---|
| 6 GHz | 0.716 |
| 8 GHz | 0.755 |
| 12 GHz | 0.877 |
| 15 GHz | 0.955 |
| 20 GHz | 1.050 |

**Πίνακας Β.41 Κατακόρυφος συντελεστής μείωσης για ορισμένες τιμές συχνοτήτων.**

*Βήμα 8*

Το ενεργό μήκος της διαδρομής, $L_E$ δίνεται από τη σχέση:

$$L_E = L_R v_{0.01} \qquad \text{(km)} \qquad \text{(B.10)}$$

Στον Πίνακα Β.6 έχει υπολογιστεί το ενεργό μήκος της διαδρομής, $L_E$, για ορισμένες τιμές συχνοτήτων:

| **Συχνότητα** | $L_E$ |
|---|---|
| 6 GHz | 7.446 km |
| 8 GHz | 6.545 km |
| 12 GHz | 6.407 km |
| 15 GHz | 6.576 km |
| 20 GHz | 6.786 km |

**Πίνακας Β.42 Το ενεργό μήκος διαδρομής, $L_E$, για ορισμένες τιμές της συχνότητας.**

*Βήμα 9*

Μία εκτίμηση της απόσβεσης που εισάγεται λόγω βροχής και αναφέρεται σε υπέρβαση 0.01% του χρόνου γίνεται μέσω της σχέσης:

$$A_{0.01} = \gamma_R L_E \qquad \text{(dB)} \qquad \text{(B.11)}$$

Στον Πίνακα Β.7 έχει υπολογιστεί η απόσβεση, $A_{0.01}$, για ορισμένες τιμές συχνοτήτων:

| **Συχνότητα** | **$A_{0.01}$** |
|---|---|
| 6 GHz | 1.229 dB |
| 8 GHz | 3.246 dB |
| 12 GHz | 9.001 dB |
| 15 GHz | 14.131 dB |
| 20 GHz | 23.839 dB |

**Πίνακας Β.43 Η απόσβεση, $A_{0.01}$, για ορισμένες τιμές της συχνότητας.**

*Βήμα 10*

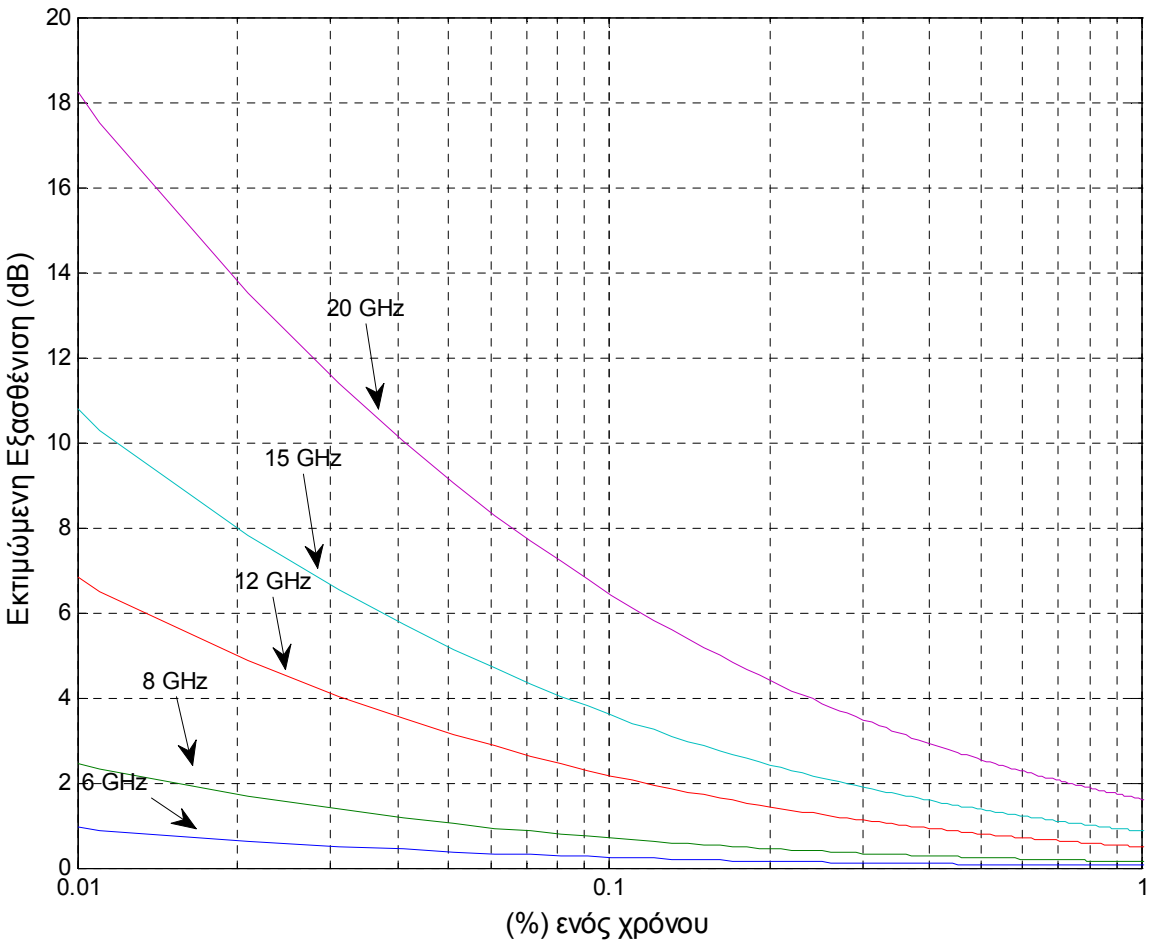
Η εκτιμώμενη απόσβεση που υπερβαίνεται για άλλες εκατοστιαίες μεταβολές του χρόνου p%, στην περιοχή 0,001% έως 1%, γίνεται μέσω της παρακάτω σχέσεως:

$$A_p = A_{0.01}\left(\frac{p}{0.01}\right)^{-(0.655+0.033\ln(p)-0.045\ln(A_{0.01})-\beta(1-p)\sin\theta)} \quad \text{(dB)} \qquad \text{(B.12)}$$

Για γεωγραφικό πλάτος φ=37,8$^o$ μεγαλύτερο των 36$^o$ το β=0. Οπότε η παραπάνω σχέση γράφεται:

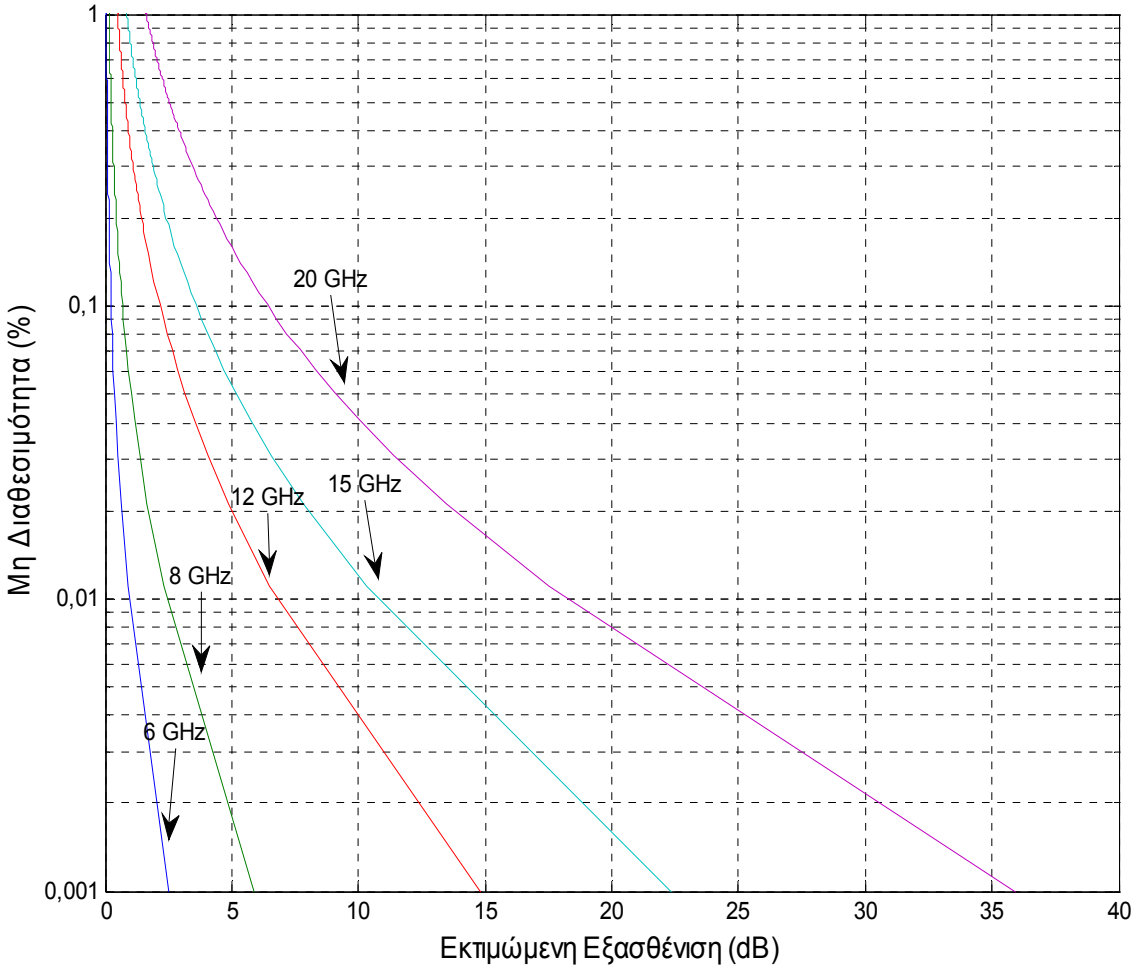
$$A_p = A_{0.01}\left(\frac{p}{0.01}\right)^{-(0.655+0.033\ln(p)-0.045\ln(A_{0.01}))} \quad \text{(dB)} \qquad \text{(B.13)}$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση Β.11 και τις τιμές της απόσβεσης $A_{0.01}$ από τον Πίνακα Β.7 κατασκευάζουμε το Σχήμα Β.2 που δείχνει την ετήσια πιθανότητα υπέρβασης της απόσβεσης λόγω βροχής για ζεύξη που λειτουργεί στην Αθήνα για διάφορες συχνότητες.




**Σχήμα Β.40 Ετήσια πιθανότητα υπέρβασης της απόσβεσης λόγω βροχής για ζεύξη που λειτουργεί στην Αθήνα για διάφορες συχνότητες (κατακόρυφη πόλωση, γωνία ανύψωσης 20$^o$).**

Κάνοντας εναλλαγή αξόνων στο Σχήμα Β.3 προκύπτει το Σχήμα Β.4 το οποίο δείχνει τη σχέση μεταξύ απόσβεσης λόγω βροχής και μη διαθεσιμότητας.




**Σχήμα Β.41 Χαρακτηριστικά απόσβεσης λόγω βροχής –Γεωγραφικό πλάτος: 37.8$^{o}$, Γωνία ανύψωσης: 20$^{o}$, Ύψος βροχόπτωσης: 30 mm/h.**

# Βιβλιογραφία

[1] ITU-R Recommendation P.618-7, “Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems”.

[2] ITU-R Recommendation S.736-3, “Estimation of polarization discrimination in calculations of interference between geostationary-satellite networks in the fixed-satellite service”.

[3] ITU-R Recommendation P.838-1, “Specific attenuation model for rain for use in prediction methods”.