



**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ**

**ΣΕΡΡΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ &**

**ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ**

**ΜΕΛΕΤΗ & ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ  
ΖΕΥΞΕΩΝ ΜΕ ΓΕΩΣΤΑΤΙΚΟ ΔΟΡΥΦΟΡΟ**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:**

**ΛΑΧΑΝΑ ΚΑΤΕΡΙΝΑ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:**

**Δρ. ΤΣΙΤΣΟΣ ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ  
(ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ)**

**ΣΕΡΡΕΣ, ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2005**

Αφιερώνεται στην οικογένεια μου...

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία ασχολείται με την μελέτη και τον σχεδιασμό δορυφορικών ζεύξεων με γεωστατικό δορυφόρο. Η ύλη διαρθρώνεται σε 10 κεφάλαια ως εξής:

Στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται η εισαγωγή στις βασικές αρχές των δορυφορικών επικοινωνιών. Γίνεται αναφορά στις τροχιές των δορυφόρων. Επίσης γίνεται εκτενή ανάλυση ενός συστήματος δορυφορικών επικοινωνιών σε διαστημικό επίγειο τμήμα.

Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο περιγράφεται αρχικά το μαθηματικό μέρος του υπολογισμού της απόστασης μεταξύ του σταθμού εδάφους και του γεωστατικού δορυφόρου. Στη συνέχεια αναλύονται έννοιες όπως η γωνία ανύψωσης και το αζιμούθιο. Και τέλος καθορίζεται η πόλωση.

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο υπολογίζεται το κέρδος της παραβολικής κεραιάς όπως και το εύρος δέσμης της ακτινοβολίας. Τέλος υπολογίζεται και η θερμοκρασία θορύβου.

Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται μια εκτενή ανάλυση των παραμέτρων που επηρεάζουν τον θορύβου και όλων των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων που επηρεάζονται από αυτόν.

Στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται περιγραφή της επίδρασης της Ατμόσφαιρας και της Ιονόσφαιρας στις δορυφορικές ζεύξεις. Αυτό επιτυγχάνεται εξετάζοντας επαριώς όλα τα φαινόμενα που εμφανίζονται και εξαρτώνται από αυτές τις επιδράσεις.

Στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται η σχεδίαση δορυφορικών ζεύξεων. Συγκριμένα αναλύονται τα γενικά χαρακτηριστικά της ζεύξης, τα χαρακτηριστικά του δορυφορικού αναμεταδότη, τα χαρακτηριστικά της παρεμβολής, και τα χαρακτηριστικά επίδοσης του συστήματος. Τέλος γίνεται διεξοδική περιγραφή των υπολογισμών τους.

Στο 7<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται μια εκτενή ανάλυση της ζεύξης Παρίσι – Ατλάντα. Παρουσιάζονται οι υπολογισμοί για την ανοδική ζεύξη Παρίσι – Δορυφόρο καθώς και οι υπολογισμοί για την καθοδική ζεύξη Δορυφόρο – Ατλάντα. Με βάση τις παραμέτρους που υπολογίσθηκαν, είναι πλέον δυνατός ο προσδιορισμός των κερδών και των διαστάσεων των κεραιών εκπομπής και λήψης στους επίγειους σταθμούς, της θερμοκρασίας θορύβου του συστήματος λήψης στην Ατλάντα, καθώς και της ισχύος εκπομπής στο σταθμό εκπομπής στο Παρίσι.

Στο 8<sup>ο</sup> Κεφάλαιο εφαρμόζεται ακριβώς η ίδια διαδικασία για την ζεύξη Θερμοπύλες – Λ. Άντζελες.

Στο 9<sup>ο</sup> Κεφάλαιο εφαρμόζεται ακριβώς η ίδια διαδικασία για την ζεύξη Θερμοπύλες – Ν. Υόρκη.

Στο 10<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναπτύσσονται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις που προκύπτουν από την ανάλυση των δορυφορικών ζεύξεων που περιγράφονται στα Κεφάλαια 7<sup>ο</sup>, 8<sup>ο</sup> και 9<sup>ο</sup>.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην πραγμάτωση της Πτυχιακής Εργασίας και ειδικότερα:

- Τον επιβλέπων Καθηγητή Εφαρμογών κ. Στυλιανό Τσίτσο για την πολύπλευρη βοήθειά του, τη συνεχή εποπτεία του και την καθοδηγητική του ορθότητα σε όσα προβλήματα προέκυψαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.
- Θα ήταν παράλειψη να μην ευχαριστήσω όλους εκείνους τους ανθρώπους για την ουσιαστική βοήθεια που μου προσέφεραν. Την οικογένειά μου, που σε όλες τις στιγμές ήταν δίπλα μου. Τέλος, τους φίλους μου, που με εμπύχωναν σε όλη τη διάρκεια της πραγμάτωσης της πτυχιακής εργασίας.

Σέρρες,            Απρίλιος 2005

Λαχανά Κατερίνα

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Satellite Communications Fundamentals  
Jules E. Kadish – Thomas W. R. East
2. Στ. Τσίτσος: Ασύρματες Τηλεπικοινωνίες (Σέρρες, 2002)
3. Δορυφορικές Επικοινωνίες  
Χ. Καμάλης - Π. Κώττης  
Εκδόσεις Τζιόλα 2003
4. Δορυφορικές Επικοινωνίες  
Συστήματα Τεχνικές και Τεχνολογία  
G. Maral – M. Bousquet 3<sup>η</sup> Έκδοση  
Εκδόσεις Τζιόλα 2000

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1]. RECOMMENDATION ITU –R P618-8  
Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design  
of Earth – Space Telecommunication Systems

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

### **ΠΡΟΛΟΓΟΣ**

#### **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ**

##### **ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ..... 1-1**

1.1 Εισαγωγή..... 1-1

1.2 Ελλειπτικές και Γεωσύγχρονες τροχιές ..... 1-2

1.3 Πλεονεκτήματα Δορυφορικών Επικοινωνιών ..... 1-4

1.4 Η οργάνωση ενός συστήματος Δορυφορικών Επικοινωνιών..... 1-5

1.4.1 Το διαστημικό τμήμα..... 1-6

1.4.2 Το επίγειο τμήμα ..... 1-8

1.4.2.1 Διαμόρφωση ενός επίγειου σταθμού..... 1-9

#### **2. ΑΠΟΣΤΑΣΗ, ΓΩΝΙΕΣ ΚΑΙ ΠΟΛΩΣΗ..... 2-1**

2.1 Εισαγωγή..... 2-1

2.2 Δορυφορική απόσταση και γωνίες..... 2-1

2.3 Απόσταση επίγειου σταθμού-δορυφόρου ..... 2-3

2.4 Αζιμούθια γωνία και γωνία ανύψωσης από τον επίγειο σταθμό προς το δορυφόρο ..... 2-5

2.5 Μεταβολή της γωνίας ανύψωσης και της απόστασης από το δορυφόρο σε σχέση με το γεωγραφικό πλάτος..... 2-6

2.6 Καθορισμός της γωνίας πόλωσης του δορυφόρου..... 2-7

2.7 Η πολιτική τοποθέτηση..... 2-9

#### **3. ΚΕΡΔΟΣ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ, ΕΥΡΟΣ ΔΕΣΜΗΣ**

##### **ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΘΟΡΥΒΟΥ..... 3-1**

3.1 Κέρδος παραβολικής κεραίας και εύρος δέσμης ακτινοβολίας ..... 3-1

#### **4. Ο ΘΟΡΥΒΟΣ ΣΤΙΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΖΕΥΞΕΙΣ ..... 4-1**

4.1 Εισαγωγή..... 4-1

4.2 Θόρυβος εισερχόμενος σε μια κεραία.....	4-2
4.3 Εξασθενητές (Attenuators) .....	4-3
4.4 Ενισχυτές.....	4-3
4.4.1 Ο θόρυβος ενδοδιαμόρφωσης.....	4-5
4.5 Δείκτης θορύβου (noise figure) .....	4-6
Παρεμβολή .....	4-7

<b>5. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΙΟΝΟΣΦΑΙΡΑΣ ΣΤΙΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΖΕΥΞΕΙΣ .....</b>	<b>5-1</b>
5.1 Εισαγωγή.....	5-1
5.2 Ατμοσφαιρικά αέρια .....	5-1
5.2.1 Απώλεια διασποράς της δέσμης ακτινοβολίας (beam spread loss) (Σύσταση ITU P.618-6, Παράγραφος 2.3.2) .....	5-2
5.2.2 Ατμοσφαιρική εξασθένηση.....	5-2
5.3 Ο καιρός .....	5-4
5.3.1 Η βροχή.....	5-5
5.3.2 Εξασθένηση λόγω βροχής που ξεπερνιέται για 0,01% ενός μέσου έτους.....	5-13
5.3.3 Εξασθένηση που ξεπερνιέται για άλλα ποσοστά του χρόνου .....	5-16
5.3.4 Ο χειρότερος μήνας .....	5-17
5.3.5 Νέφη.....	5-18
5.3.6 Κρύσταλλοι πάγου και χιόνι .....	5-18
5.3.6 Μεταβολή της πόλωσης (Depolarisation) .....	5-18
5.3.8 Διαφορική λήψη χώρου (Site diversity) .....	5-20
5.3.9 Αυξομείωση ισχύος του σήματος (Scintillation) .....	5-20
5.4 Θερμοκρασία θορύβου .....	5-21
5.5 Η ιονόσφαιρα .....	5-21
5.5.1 Περιστροφή Faraday .....	5-22

5.5.2 Ιονοσφαιρική αυξομείωση της ισχύος του σήματος (Ionospheric scintillation) .....	5-22
--	------

## **6. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΖΕΥΞΕΩΝ..... 6-1**

6.1 Παράγοντες που επηρεάζουν τις δορυφορικές ζεύξεις.....	6-1
6.2 Αξιοπιστία και διαθεσιμότητα δορυφορικών ζεύξεων .....	6-3
6.3 Παράμετροι που απαιτούνται για το σχεδιασμό μιας δορυφορικής ζεύξης.....	6-5
6.3.1 Γενικά χαρακτηριστικά της ζεύξης.....	6- 5
6.3.2 Χαρακτηριστικά δορυφορικού αναμεταδότη.....	6-5
6.3.3 Χαρακτηριστικά παρεμβολής.....	6-5
6.3.4 Χαρακτηριστικά επίδοσης του συστήματος.....	6-6
6.4 Κλιματικές παράμετροι επίγειων σταθμών εκπομπής και λήψης .....	6-6
6.5 Ανάλυση της δορυφορικής ζεύξης.....	6-7
6.5.1 Υπολογισμός γεωμετρικών παραμέτρων .....	6-7
6.5.2 Προδιαγραφές διαθεσιμότητας του συστήματος.....	6-8
6.5.3 Υπολογισμός αποσβέσεων λόγω βροχής.....	6-9
6.5.3.1 Υπολογισμός της απόσβεσης λόγω βροχής για την ανοδική ή την καθοδική ζεύξη .....	6-9
6.6 Ανάλυση της ζεύξης με βροχή μόνο στην ανοδική ζεύξη.....	6-11
6.6.1 Λόγος σήματος προς θόρυβο για την ανοδική ζεύξη .....	6-11
6.6.2 Λόγος σήματος προς παρεμβολή για την ανοδική ζεύξη .....	6-12
6.6.3 Λόγος σήματος προς θόρυβο μαζί με παρεμβολή για την ανοδική ζεύξη.....	6-12
6.6.4 Λόγος σήματος προς θόρυβο για την καθοδική ζεύξη .....	6-12
6.6.5 Λόγος σήματος προς παρεμβολή για την καθοδική ζεύξη.....	6-13
6.6.6 Λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή για την καθοδική ζεύξη .....	6-14
6.6.7 Λόγος κέρδους κεραιάς προς θερμοκρασία θορύβου δέκτη.....	6-14



6.6.8 Ενεργός ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύς από την κεραιά του επίγειου σταθμού εκπομπής.....	6-14
6.7 Ανάλυση της ζεύξης με βροχή μόνο στην καθοδική ζεύξη .....	6-14
6.7.1 Αύξηση της θερμοκρασίας θορύβου της κεραιάς του δέκτη στον επίγειο σταθμό λήψης.....	6-14
6.7.2 Λόγος σήματος προς θόρυβο μαζί με παρεμβολή για την ανοδική ζεύξη.....	6-15
6.7.3 Λόγος σήματος προς θόρυβο για την καθοδική ζεύξη .....	6-15
6.7.4 Λόγος σήματος προς παρεμβολή για την καθοδική ζεύξη.....	6-15
6.7.5 Λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή για την καθοδική ζεύξη.....	6-16
6.7.6 Λόγος κέρδους κεραιάς προς θερμοκρασία θορύβου δέκτη.....	6-16
6.8 Υπολογισμός κέρδους και διαμέτρου της κεραιάς του επίγειου σταθμού λήψης.....	6-16
6.9 Υπολογισμός κέρδους, διαμέτρου κεραιάς και ισχύος εκπομπής του επίγειου σταθμού εκπομπής.....	6-17

## **7. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗΣ ΖΕΥΞΗΣ**

<b>«ΠΑΡΙΣΙ – ΑΤΛΑΝΤΑ» .....</b>	<b>7-1</b>
7.1 Χαρακτηριστικά της ζεύξης .....	7-1
7.2 Προδιαγραφές διαθεσιμότητας του συστήματος.....	7-4
7.3 Ανάλυση της ζεύξης, με βροχή μόνο στην ανοδική ζεύξη «Παρίσι – Δορυφόρος» .....	7-4
7.4 Ανάλυση της ζεύξης, με βροχή μόνο στην καθοδική ζεύξη «Δορυφόρος - Ατλάντα».....	7-7

## **8. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗΣ ΖΕΥΞΗΣ ΘΕΡΜΟΠΥΛΕΣ – Ν.**

<b>ΥΟΡΚΗ .....</b>	<b>8-1</b>
8.1 Σχεδίαση της ζεύξης.....	8-1
8.2 Προδιαγραφές διαθεσιμότητας του συστήματος.....	8-4

8.3 Ανάλυση της ανοδικής ζεύξης, με βροχή μόνο στην ανοδική ζεύξη «Θερμοπύλες – Δορυφόρο» .....	8-4
8.4 Ανάλυση της καθοδικής, με βροχή μόνο στην καθοδική ζεύξη ζεύξης «Δορυφόρο – Ν. Υόρκη» .....	8-5

<b>9. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗΣ ΖΕΥΞΗΣ «ΘΕΡΜΟΠΥΛΕΣ – Λ. ΑΝΤΖΕΛΕΣ» .....</b>	<b>9-1</b>
9.1 Χαρακτηριστικά της ζεύξης .....	9-1
9.2 Προδιαγραφές διαθεσιμότητας του συστήματος.....	9-4
9.3 Ανάλυση της ζεύξης, με βροχή μόνο στην ανοδική ζεύξη «Θερμοπύλες – Δορυφόρος».....	9-4
9.4 Ανάλυση της ζεύξης, με βροχή μόνο στην καθοδική ζεύξη «Δορυφόρος – Λ. Άντζελες».....	9-6

## **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ**

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

## 1.1 Εισαγωγή

Οι Δορυφορικές Επικοινωνίες είναι μέρος της διαστημικής εποχής, η οποία ξεκίνησε με την εκτόξευση του Σοβιετικού *Sputnik* το 1957. Οι Ηνωμένες Πολιτείες ακολούθησαν ένα χρόνο αργότερα με τον *Explorer 1*. Όμως εκείνη την εποχή οι δορυφορικές επικοινωνίες είχαν σοβαρούς περιορισμούς, εξαιτίας της αναξιπιστίας των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων που δημιουργήθηκαν για το διάστημα, και λόγω των διαστημικών οχημάτων, τα οποία δεν μπορούσαν να κουβαλήσουν βαρύ ωφέλιμο φορτίο. Στη συνέχεια όμως, η περαιτέρω ανάπτυξη των Δορυφορικών Επικοινωνιών και της Διαστημικής, είχε ως αποτέλεσμα την κατασκευή πολύ βελτιωμένων οχημάτων εκτόξευσης, με τα οποία είναι εφικτό να τοποθετηθούν αντικείμενα που ζυγίζουν πολλούς τόνους σε υψηλές τροχιές.

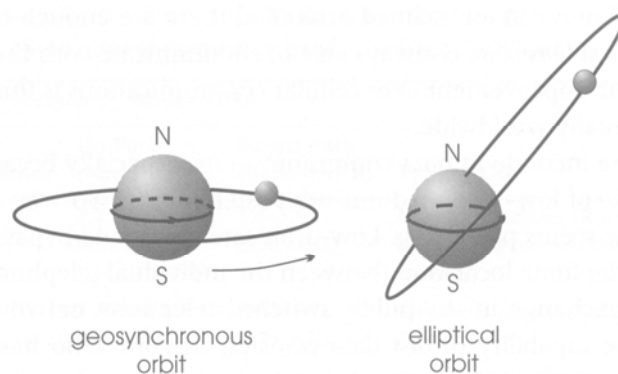
Για το σχεδιασμό μιας δορυφορικής ζεύξης, απαιτείται η γνώση πολλών επιμέρους τεχνολογιών, μερικές από τις οποίες είναι οι εξής:

- ❖ Βαρύτητα και τροχιακή μηχανική.
- ❖ Γεωμετρία γεωστατικού δορυφόρου.
- ❖ Ηλεκτρομαγνητισμός.
- ❖ Κεραίες.
- ❖ Ηλεκτρονικός θόρυβος.
- ❖ Επίδραση της ατμόσφαιρας και της ιονόσφαιρας πάνω στα επιθυμητά σήματα και στο θόρυβο.
- ❖ Συστήματα σταθμών εδάφους.
- ❖ Αναλογικές και ψηφιακές τεχνικές επικοινωνίας.
- ❖ Συμπύκνωση video.
- ❖ Δορυφορική τεχνολογία ωφέλιμου φορτίου.
- ❖ Δορυφορικά συστήματα δικτύων.

## 1.2 Ελλειπτικές και Γεωσύγχρονες τροχιές

Ένας δορυφόρος εκτοξεύεται χρησιμοποιώντας έναν πύραυλο πολλαπλών βαθμίδων. Όταν φτάνει σε ένα συγκεκριμένο ύψος πάνω από τη Γη οι πύραυλοι που μεταφέρουν τον δορυφόρο αποκολλώνται, έτσι ώστε αυτός να αποκτήσει μια συγκεκριμένη ταχύτητα που να του επιτρέπει να μένει σε τροχιά γύρω από τη Γη. Η τροχιά είναι ελλειπτική και έχει την κατάλληλη κλίση προς τον Ισημερινό της Γης. Η έλλειψη μπορεί να είναι σχεδόν κύκλος και αν το ύψος πάνω από τη Γη είναι χαμηλό (της τάξης των 800 km), ο δορυφόρος περιγράφεται ως Χαμηλής Γήινης Τροχιάς (Low Earth Orbiting - LEO). Αν είναι πιο ψηλά (περίπου 10.000 km), περιγράφεται ως Μέση Γήινη Τροχιά (Medium Earth Orbiting - MEO). Ένας δορυφόρος του συστήματος *Molniya* παραμένει πάνω από το Βόρειο Ημισφαίριο της Γης για περίπου 10 ώρες την ημέρα και περίπου 2 ώρες πάνω από το Νότιο Ημισφαίριο. Τέτοιου είδους τροχιά είναι χρήσιμη για μετάδοση τηλεοπτικού σήματος σε περιοχές μεγάλου γεωγραφικού πλάτους.

Αν η τροχιά βρίσκεται σ' ένα συγκεκριμένο ύψος και στο επίπεδο του Ισημερινού της Γης, αυτό αποκαλείται *γεωσύγχρονο ύψος* με την τροχιακή γωνιακή ταχύτητα στην ίδια κατεύθυνση και ίση με τη γωνιακή ταχύτητα της Γης. Σ' αυτή την περίπτωση ο δορυφόρος ονομάζεται γεωστατικός και η τροχιά γεωστατική ή γεωσύγχρονη τροχιά. Η γεωσύγχρονη και η ελλειπτική τροχιά εμφανίζονται στο σχήμα 1.1.



**Σχήμα 1.1:** Γεωσύγχρονη και ελλειπτική τροχιά

Η ιδέα του γεωστατικού δορυφόρου προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Arthur C. Clarke, γνωστό συγγραφέα βιβλίων επιστημονικής φαντασίας. Δέκα χρόνια πριν από την έλευση του *Sputnik*, ο Clarke συνέλαβε την ιδέα τριών δορυφόρων σε τροχιά Ισημερινού (στο ίδιο επίπεδο με τον Ισημερινό της Γης), περιστρεφόμενοι γύρω από την Γη με τον ίδιο συγχρονισμό μ' αυτή. Ο καθένας από τους τρεις δορυφόρους διαχωρίζεται από τον επόμενο κατά  $120^{\circ}$  και ο καθένας 'βλέπει' το ένα τρίτο της επιφάνειας της Γης. Ένας δορυφόρος σε τέτοια τροχιά θα εμφανιζόταν ότι είναι στατικός στον ουρανό - εφ' όσον βέβαια ήταν ορατός - και δεν θα υπήρχε η ανάγκη παρακολούθησής του.

Βεβαίως, λόγω της πολύ μακρινής απόστασης από τη Γη και των πολύ μεγάλων οχημάτων εκτόξευσης που θα απαιτούνταν, το κόστος της γεωστατικής τροχιάς θα ήταν εξαιρετικά υψηλό. Επιπλέον, θα απαιτούνταν εξελιγμένοι και ακριβοί πομποί υψηλής ισχύος. Επίσης, επειδή η γεωστατική τροχιά πρέπει να είναι στο Ισημερινό επίπεδο της Γης, η γωνία ανύψωσης ενός επίγειου σταθμού που στοχεύει σ' έναν δορυφόρο από μια περιοχή κοντά στους Πόλους, θα ήταν πολύ μικρή ή αρνητική. Άρα η κάλυψη αυτών των περιοχών θα ήταν δύσκολη ή αδύνατη. Ένα άλλο μειονέκτημα, είναι η μεγάλη καθυστέρηση διάδοσης των σημάτων επικοινωνίας που εκπέμπονται προς το γεωστατικό δορυφόρο και πίσω στην Γη. Σήμερα, είναι δυνατή η τηλεφωνία πέρα από τους ωκεανούς μέσω γεωστατικού δορυφόρου και η καθυστέρηση του σήματος είναι αισθητή, γεγονός που προκαλεί μία περίοδο παύσης της ομιλίας. Οι καθυστερήσεις αυτού του είδους δεν είναι αντιληπτές όταν χρησιμοποιούνται υποθαλάσσια υποβρύχια καλώδια στην τηλεφωνία.

Η ανάπτυξη των δορυφορικών κεραιών λήψης τηλεοπτικού σήματος (TVRO) θα ήταν αδιανόητη, αν αυτές χρειαζόταν να παρακολουθούν μη γεωστατικούς δορυφόρους σε κοντινή τροχιά γύρω από τη Γη. Σήμερα, οι τηλεθεατές έχουν ευρεία δυνατότητα επιλογής προγραμμάτων σε πολλές γλώσσες. Μετά το 1997, αναπτύχθηκαν οι δορυφόροι χαμηλής τροχιάς, οι

οποίοι χρησιμοποιούνται για υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας. Η καθυστέρηση μετάδοσης είναι αμελητέα συγκρινόμενη με αυτή των γεωστατικών δορυφόρων και συνεπώς η φωνητική επικοινωνία είναι εφικτή.

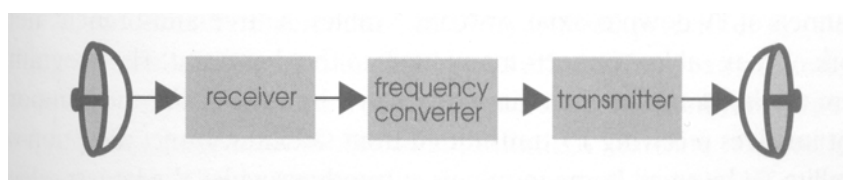
### 1.3 Πλεονεκτήματα Δορυφορικών Επικοινωνιών

Όταν η απόσταση που χωρίζει δύο σταθμούς είναι μεγάλη, απαιτούνται πολλές μικροκυματικές ζεύξεις (ή μακριά καλώδια και τμήματα επαναληπτών με ενισχυτές). Στην περίπτωση αυτή, οι δορυφορικές επικοινωνίες μπορεί να αποτελέσουν μια οικονομικότερη λύση, λόγω του ότι οι επίγειοι σταθμοί που επικοινωνούν με δορυφόρους μπορούν να τοποθετηθούν σχεδόν παντού. Η εκπομπή τηλεοπτικού σήματος πέρα από τους ωκεανούς είναι συχνή από δορυφόρο, επειδή αυτός αποτελεί πρακτικά τον μοναδικό τρόπο μετάδοσης τηλεοπτικών σημάτων σε τέτοιες αποστάσεις. Νέες υπηρεσίες, που δημιουργήθηκαν εν μέρει από το CNN (το Αμερικάνικο καλωδιακό ειδησεογραφικό δίκτυο), χρησιμοποιούν μικρούς κινητούς επίγειους σταθμούς για άμεση ζωντανή μετάδοση γεγονότων. Πολλά πλοία μεταφέρουν σταθμούς δορυφορικών επικοινωνιών με κεραιές, που εντοπίζουν τον προσανατολισμό του δορυφόρου καθώς το πλοίο κινείται στην θάλασσα και προσφέρουν τηλεφωνικές υπηρεσίες, συμπεριλαμβανομένου και του FAX στους ανθρώπους πάνω στο πλοίο.

Το σημείο υπεροχής των δορυφόρων, όμως, είναι οι επικοινωνίες **σημείου προς πολλαπλά σημεία (point to multipoint)**. Η επίγεια ραδιοφωνία και η εκπομπή τηλεοπτικού σήματος είναι παραδείγματα επικοινωνιών **point to multipoint**. Το πρόβλημα με την επίγεια εκπομπή, είναι ότι το διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων για ραδιοφωνία και εκπομπή τηλεοπτικού σήματος είναι ήδη εξαντλημένο. Η **Καλωδιακή Τηλεόραση (CATV)** επιτρέπει την εκπομπή περισσότερων καναλιών από τις επίγειες εκπομπές. Τα κανάλια αυτά μπορούν να αποστέλλονται σε έναν δορυφόρο, ο

οποίος στη συνέχεια τα εκπέμπει, προς τον απλό ιδιώτη ο οποίος διαθέτει σύστημα δορυφορικής λήψης.

Ένας δορυφόρος μπορεί να έχει πολλούς επαναλήπτες, γνωστούς και σαν **transponders** του τύπου που εμφανίζεται στο σχήμα 1.2. Ένας transponder μπορεί να μεταφέρει από ένα αναλογικό τηλεοπτικό πρόγραμμα, έως οχτώ ψηφιακά τηλεοπτικά προγράμματα ή χιλιάδες κανάλια audio ή δεδομένων (data). Με την τρέχουσα τεχνολογία είναι δυνατή η εγκατάσταση 30 και πλέον transponders στον ίδιο δορυφόρο, οι οποίοι χρησιμοποιούν ισχύ από την ίδια πηγή.

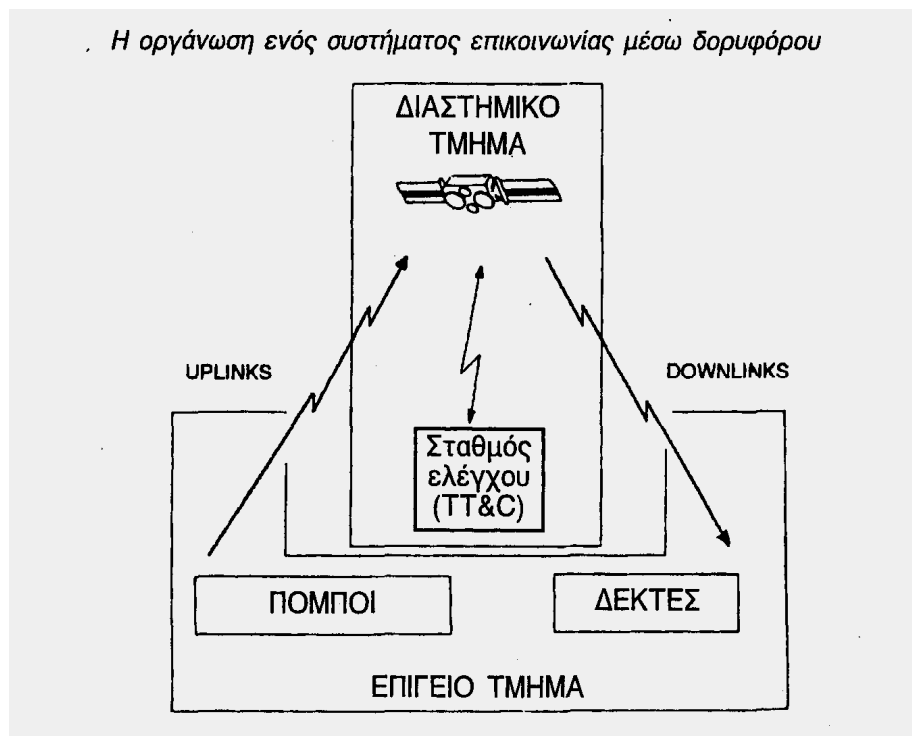


**Σχήμα 1.2:** Ένας σταθμός μικροκυματικού επαναλήπτη.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες, το δορυφορικό σύστημα DirecTV μπορεί να εκπέμψει περισσότερα από 150 τηλεοπτικά κανάλια. Στην Ευρώπη έχουν επίσης αναπτυχθεί ψηφιακά συστήματα αυτού του τύπου. Τέτοια συστήματα μπορούν να συναγωνιστούν την Καλωδιακή Τηλεόραση (CATV), προσφέροντας περισσότερα διαθέσιμα κανάλια και όπου τα CATV δεν είναι διαθέσιμα (π.χ. αγροτικές περιοχές), προσφέρουν πολλά περισσότερα τηλεοπτικά κανάλια από αυτά που είναι διαθέσιμα από τους επίγειους σταθμούς.

#### **1.4 Η οργάνωση ενός συστήματος Δορυφορικών Επικοινωνιών**

Το σχήμα 1.3 δείχνει τα διάφορα τμήματα ενός συστήματος δορυφορικής επικοινωνίας. Αυτό περιλαμβάνει το διαστημικό και το επίγειο τμήμα.



**Σχήμα. 1.3:** Τα τμήματα που αποτελούν ένα σύστημα δορυφορικής επικοινωνίας.

#### 1.4.1 Το διαστημικό τμήμα

Το διαστημικό τμήμα περιλαμβάνει το δορυφόρο και όλες τις επίγειες εγκαταστάσεις για τον έλεγχο και την παρακολούθηση του δορυφόρου. Εδώ περιλαμβάνονται οι σταθμοί παρακολούθησης, τηλεμετρίας και ελέγχου (tracking, telemetry & command stations, TT&C), όπως και το κέντρο ελέγχου του δορυφόρου, όπου εκτελούνται όλοι οι χειρισμοί συντήρησης και ελέγχου των ζωτικών λειτουργιών του δορυφόρου.

Ο επίγειος σταθμός εκπέμπει ένα σήμα ελέγχου, το οποίο λαμβάνεται από το δορυφόρο. Η ζεύξη αυτή ονομάζεται ανοδική ζεύξη (uplink). Κατόπιν, ο δορυφόρος με τη σειρά του εκπέμπει προς τον επίγειο σταθμό λήψης. Η ζεύξη αυτή ονομάζεται καθοδική ζεύξη (downlink).

Η ποιότητα μιας δορυφορικής ζεύξης καθορίζεται από το λόγο σήματος προς θόρυβο που εμφανίζει, δηλαδή από το λόγο σήματος προς θόρυβο της ανοδικής ζεύξης, της καθοδικής ζεύξης και του ηλεκτρονικού συστήματος του



δορυφόρου. Η ποιότητα αυτή καθορίζει και την ποιότητα του σήματος που λαμβάνει ο τελικός χρήστης, ανάλογα με τον τύπο διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται.

Ο δορυφόρος αποτελεί ένα ουσιώδες σημείο διέλευσης για μια ομάδα από ταυτόχρονες ραδιοζεύξεις. Από την άποψη αυτή, μπορεί να θεωρηθεί σαν το κομβικό σημείο ενός δικτύου. Η πρόσβαση στο δορυφόρο και σε ένα δορυφορικό κανάλι από μερικά φέροντα σήματα, υπονοεί τη χρήση ειδικών τεχνικών, που ονομάζονται *τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης* (multiple access techniques). Ο τρόπος λειτουργίας αυτών των τεχνικών διαφέρει μεταξύ των δορυφόρων που χρησιμοποιούν μία κύρια δέσμη εκπομπής-λήψης (monobeam satellites) και αυτών που χρησιμοποιούν πολλαπλές δέσμες εκπομπής-λήψης (multibeam satellites).

Ο δορυφόρος έχει διπλό ρόλο:

❖ Να ενισχύει τα λαμβανόμενα σήματα για την επανεικπομπή τους στην καθοδική ζεύξη. Η ισχύς του φέροντος κύματος στην είσοδο του δέκτη του δορυφόρου είναι της τάξης από 100 pW μέχρι 1 nW. Η ισχύς φέροντος στην έξοδο του ενισχυτή εκπομπής είναι της τάξης από 10 μέχρι 100W. Έτσι, η απολαβή ισχύος είναι της τάξης από 100 μέχρι 130dB.

❖ Να αλλάζει τη συχνότητα του φέροντος, ώστε να αποφεύγεται η επανεισαγωγή ενός μέρους της εκπεμπόμενης ισχύος στο δέκτη. Η ικανότητα απόρριψης των φίλτρων εισόδου στη συχνότητα της καθοδικής ζεύξης, συνδυάζεται με τις μικρές απολαβές των κεραιών μεταξύ εξόδου του πομπού και εισόδου του δέκτη, για να εξασφαλιστεί απομόνωση της τάξης των 150 dB.

Για να φέρει εις πέρας την αποστολή του, ο δορυφόρος μπορεί να λειτουργεί και σαν ένας απλός αναμεταδότης. Η αλλαγή στη συχνότητα επιτυγχάνεται μέσω ενός μετατροπέα συχνότητας. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ο δορυφόρος ονομάζεται «*διαφανής*» (transparent satellite). Μια άλλη γενιά δορυφόρων (που ξεκίνησε με τον ACTS και τον ITALSAT) και οι οποίοι ονομάζονται *αναγεννητικοί* (regenerative), είναι εξοπλισμένοι με

αποδιαμορφωτές. Σ' αυτούς, τα σήματα βασικής ζώνης (baseband signals) είναι διαθέσιμα πάνω στο δορυφόρο. Η μεταβολή στη συχνότητα επιτυγχάνεται διαμορφώνοντας ένα νέο φέρον κύμα για την καθοδική ζεύξη. Η διπλή λειτουργία της διαμόρφωσης/αποδιαμόρφωσης μπορεί να συνοδεύεται από επεξεργασία του σήματος βασικής ζώνης με διάφορα επίπεδα πολυπλοκότητας.

Για να εξασφαλιστεί εξυπηρέτηση με καθορισμένη διαθεσιμότητα, ένα δορυφορικό σύστημα επικοινωνίας πρέπει να χρησιμοποιεί αρκετούς δορυφόρους, ώστε να εξασφαλίζεται υπερεπάρκεια. Ένας δορυφόρος μπορεί να σταματήσει να είναι διαθέσιμος, είτε λόγω βλάβης είτε επειδή έφτασε στο τέλος της ωφέλιμης διάρκειας ζωής του. Από την άποψη αυτή, είναι ανάγκη να διακρίνουμε μεταξύ της αξιοπιστίας και της διάρκειας ζωής ενός δορυφόρου. Η *αξιοπιστία* (reliability) είναι μια εκτίμηση της πιθανότητας βλάβης και εξαρτάται από την αξιοπιστία του εξοπλισμού και τις προβλέψεις για την εξασφάλιση υπερεπάρκειας. Η *διάρκεια ζωής* (lifetime) εξαρτάται από την ικανότητα να διατηρηθεί ο δορυφόρος στην ονομαστική του θέση, και ακόμα εξαρτάται από την ποσότητα του καυσίμου που είναι διαθέσιμη για το σύστημα πρόωσης και τον έλεγχο θέσης και τροχιάς. Σε ένα δορυφορικό σύστημα, γίνεται συνήθως πρόβλεψη για έναν δορυφόρο σε λειτουργία, έναν εφεδρικό δορυφόρο σε τροχιά και έναν ακόμη δορυφόρο σε αναμονή στη γη. Η αξιοπιστία του συστήματος θα περιλαμβάνει όχι μόνο την αξιοπιστία καθενός από τους δορυφόρους αλλά και την αξιοπιστία της εκτόξευσης.

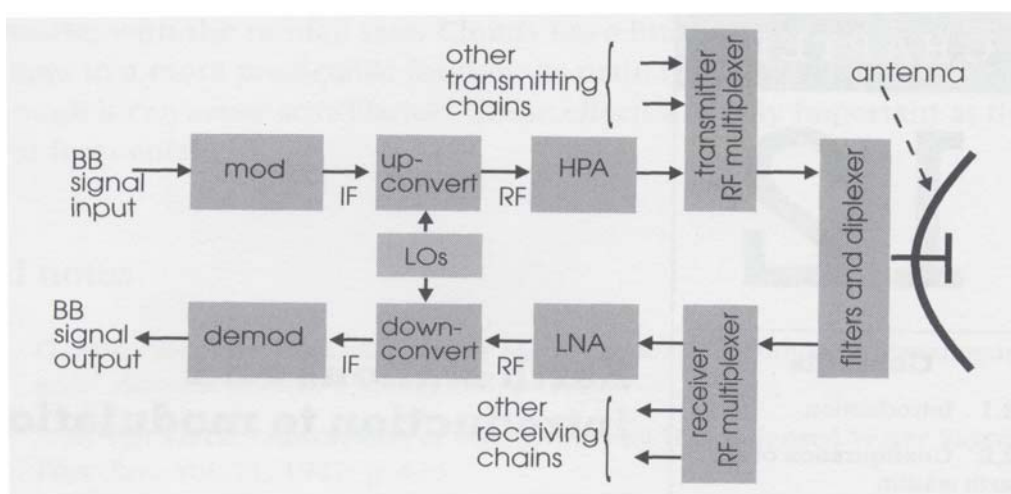
#### **1.4.2 Το επίγειο τμήμα**

Το επίγειο τμήμα ενός δορυφορικού συστήματος επικοινωνιών αποτελείται από όλους τους επίγειους σταθμούς. Αυτοί συχνά συνδέονται με τον εξοπλισμό του τελικού χρήστη μέσω ενός επίγειου δικτύου, ή στην περίπτωση μικρών σταθμών (Very Small Aperture Terminal, VSAT, Τερματικός Σταθμός Πολύ Μικρής Επιφάνειας), η σύνδεση γίνεται απευθείας

στον εξοπλισμό του τελικού χρήστη. Οι σταθμοί διακρίνονται ανάλογα με το μέγεθός τους, το οποίο ποικίλει σε αναλογία με τον όγκο πληροφοριών που πρόκειται να μεταφέρει η ζεύξη μέσω δορυφόρου και σε αναλογία με τον τύπο της πληροφορίας (τηλεφωνικές συνδέσεις, τηλεόραση ή δεδομένα). Οι μεγαλύτεροι έχουν κεραιές διαμέτρου 30 m (Πρότυπο A του δικτύου INTELSAT). Οι μικρότεροι έχουν κεραιές διαμέτρου 0,6 m (σταθμοί λήψης για δορυφόρους εκπομπής προς το ευρύ κοινό) ή ακόμα μικρότερες κεραιές (κινητοί σταθμοί, φορητοί σταθμοί ή σταθμοί χειρός). Μερικοί σταθμοί μπορούν να κάνουν ταυτόχρονη λήψη και εκπομπή. Άλλοι είναι αποκλειστικά για λήψη (receive only, RCVO).

#### 1.4.2.1 Διαμόρφωση ενός επίγειου σταθμού

Στο σχήμα 1.4 φαίνεται μια απλοποιημένη μορφή ενός αμφίδρομου επίγειου σταθμού, όπως χρησιμοποιείται από την Intelsat και από πολλούς άλλους Δορυφορικούς Οργανισμούς.



Σχήμα 1.4: Γενικό διάγραμμα ενός επίγειου δορυφορικού σταθμού.

Τα ακρώνυμα που χρησιμοποιούνται στο παραπάνω σχήμα είναι τα εξής:

- **BB** = Βασική Ζώνη (Baseband)
- **IF**=Ενδιάμεση Συχνότητα (Intermediate Frequency), συνήθως 70MHz

**LO** = Τοπικός Ταλαντωτής (Local Oscillator)

**RF** = Ραδιοσυχνότητα (Radio Frequency). Οι περισσότερες χρησιμοποιούμενες ραδιοσυχνότητες είναι η ζώνη **C** (περίπου 4 - 6 GHz) και η ζώνη **Ku** (περίπου 11 - 15 GHz)

**HPA** = Ενισχυτής Υψηλής Ισχύος (High Power Amplifier)

**LNA** = Ενισχυτής Χαμηλού Θορύβου (Low Noise Amplifier)

Σε δορυφορικά συστήματα επίγειων σταθμών, η “φέρουσα” συχνότητα στην οποία εφαρμόζεται αρχικά η διαμόρφωση, συνήθως επικεντρώνεται στην **IF**, μια ενδιάμεση συχνότητα μεταξύ της διαμόρφωσης στη βασική ζώνη και της τελικής φέρουσας συχνότητας. Η έξοδος του διαμορφωτή αποστέλλεται στον άνω-μετατροπέα (**up-converter**), ο οποίος περιλαμβάνει έναν μίκτη (**mixer**) συχνότητας. Οι τοπικοί ταλαντωτές (**local oscillators**) τροφοδοτούν με συχνότητες αναφοράς τον μίκτη του άνω-μετατροπέα και τον μίκτη του κάτω-μετατροπέα (**down-converter**). Το σήμα στην έξοδο του κάτω-μετατροπέα και στην είσοδο του άνω-μετατροπέα είναι στην ενδιάμεση συχνότητα **IF**.

Το σήμα στην έξοδο του άνω-μετατροπέα είναι στην τελική συχνότητα φέροντος (στα 6 GHz, 14 GHz ή οποιαδήποτε άλλη χρειάζεται). Το εύρος ζώνης του προσαρμόζεται στην απαιτούμενη διαμόρφωση και η ισχύς εξόδου του είναι επαρκής, για να οδηγήσει τον ενισχυτή υψηλής ισχύος (**HPA**). Ως **HPAs** χρησιμοποιούνται ενισχυτές στερεάς κατάστασης, λυχνίες οδεύοντος κύματος υψηλής ισχύος (**TWT's**) και λυχνίες klystrons υψηλής ισχύος. Η ισχύς στην έξοδό τους μπορεί να είναι μεταξύ 1 και 10.000 watts, εξαρτώμενη από την εφαρμογή.

Ένα από τα προβλήματα του **HPA** είναι η μη-γραμμικότητα. Αν υπάρχουν αρκετά φέροντα σήματα συγχρόνως, αυτή η μη γραμμικότητα θα προκαλέσει ενδοδιαμόρφωση μεταξύ τους. Η μη-γραμμικότητα εκδηλώνεται σαν ένα σήμα θορύβου, το οποίο ανταγωνίζεται με τα επιθυμητά σήματα. Ένας τρόπος για να μειωθεί η ενδοδιαμόρφωση είναι να λειτουργεί ο **HPA** σε μια

περισσότερο γραμμική περιοχή της ισχύος εξόδου σε σχέση με την ισχύ εισόδου, αλλά με το μειονέκτημα της χαμηλότερης ισχύος στην έξοδο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ανάγκη για μεγαλύτερη διάμετρο κεραίας. Ένας άλλος τρόπος για να μειωθεί η ενδοδιαμόρφωση, είναι να εισαχθεί η μη-γραμμικότητα στην είσοδο του HPA, σε έναν ενισχυτή χαμηλής στάθμης ισχύος πριν από τον HPA. Αν η μορφή της μη-γραμμικότητας της χαμηλής στάθμης προσεγγίζει εκείνης του HPA, τότε το σήμα στην έξοδο του HPA είναι περισσότερο γραμμικό και επιτυγχάνεται ουσιαστική βελτίωση. Η ενδοδιαμόρφωση μπορεί να απαλειφθεί αν, για παράδειγμα, χρησιμοποιείται ένας τύπος διαμόρφωσης, όπου μόνο ένα φέρον σήμα είναι παρόν σε μια δεδομένη χρονική στιγμή.

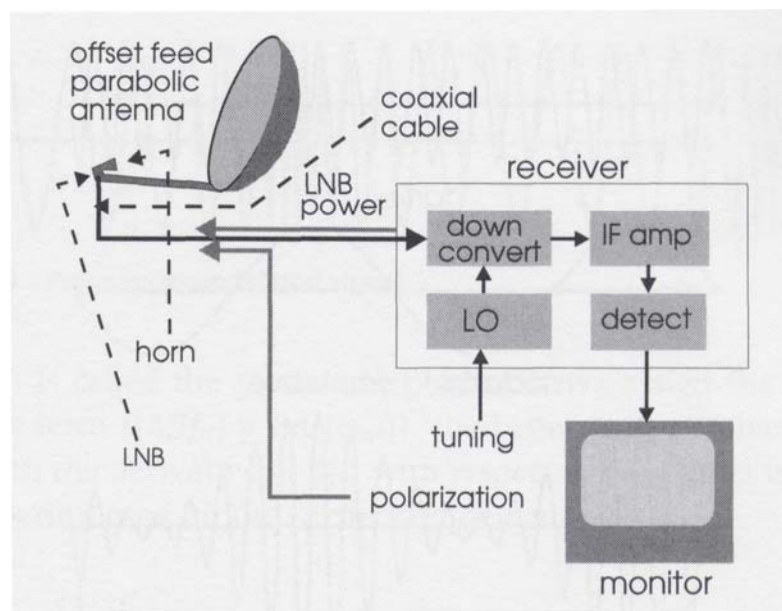
Η ισχύς εξόδου από τον HPA αποστέλλεται στην κεραία για εκπομπή. Η κεραία λαμβάνει επίσης, σήματα από τον δορυφόρο. Τα κανάλια εκπομπής και λήψης θα πρέπει να διαχωριστούν, ώστε να αποτρέψουν την εκπεμπόμενη ισχύ να εισέλθει στο δέκτη. Γι' αυτό το σκοπό χρησιμοποιείται μία διάταξη κυματοδηγού που καλείται διπλέκτης (**diplexer**), μαζί με φίλτρα κυματοδηγών. Μερικές φορές, τα σήματα εξόδου από μερικούς HPAs συνδυάζονται σε έναν πολυπλέκτη (**multiplexer**) πριν την σύνδεση με τον διπλέκτη.

Το σήμα λήψης μπορεί να διαχωριστεί σε διάφορα επιμέρους σήματα με τη βοήθεια ενός απο-πολυπλέκτη. Στη συνέχεια παρεμβάλλεται ένας ενισχυτής χαμηλού θορύβου (LNA). Η θερμοκρασία θορύβου στην είσοδο του LNA είναι περίπου 50 βαθμοί Kelvin και τοποθετείται όσο το δυνατόν πιο κοντά στον διπλέκτη, ώστε να μειωθούν οι απώλειες. Το τυπικό κέρδος του LNA είναι περίπου 60 dB και προσθέτει μια πολύ μικρή ποσότητα στη θερμοκρασία θορύβου του συστήματος. Ένα ομοαξονικό καλώδιο μεταφέρει το λαμβανόμενο διαμορφωμένο φέρον σήμα στον κάτω-μετατροπέα, όπου ο μίκτης, το μετατρέπει σε ένα σήμα IF επικεντρωμένο στα 70 MHz.

Ο κάτω μετατροπέας συχνά συνδυάζεται με τον LNA για να σχηματίσουν τον block μετατροπέα χαμηλού θορύβου (**low noise block**

**converter, LNB**). Οι LNB χρησιμοποιούνται σε ένα τυπικό δέκτη τηλεοπτικής λήψης (TVRO), όπου συνδυάζονται με την τροφοδοσία του παραβολικού κατόπτρου. Εφόσον η πόλωση μπορεί να είναι κατακόρυφη (vertical), οριζόντια, (horizontal) ή κυκλική (circular), θα πρέπει μέσα στον LNB να είναι ενσωματωμένος κάποιος σύστημα, για να ενεργοποιεί τη μεταγωγή μεταξύ των πολώσεων. Ένα τέτοιο σύστημα μεταγωγής μπορεί να ενεργοποιηθεί από το πλάτος της τάσης τροφοδοσίας, που αποστέλλεται σ' αυτό μέσω του ομοαξονικού καλωδίου από το δορυφορικό δέκτη.

Το διάγραμμα του σχήματος 1.5 περιγράφει έναν τυπικό δέκτη τηλεοπτικής λήψης. Η κεραία περιλαμβάνει μία τροφοδοσία χαάνης, με ένα LNB που περιέχει μια σταθερή συχνότητα τοπικού ταλαντωτή και έναν πρώτο ενισχυτή IF. Ο έλεγχος της πόλωσης περιλαμβάνει ένα σύστημα για τη μεταγωγή της πόλωσης. Επίσης υπάρχει μία πηγή τάσης στον δέκτη για τον LNB. Η λειτουργία του κάτω – μετατροπέα εκτελείται από έναν συντονιζόμενο τοπικό ταλαντωτή, έναν μίκτη και έναν δεύτερο IF ενισχυτή.



**Σχήμα 1.5** Τυπικός δέκτης τηλεοπτικής λήψης.

## 2 ΑΠΟΣΤΑΣΗ, ΓΩΝΙΕΣ ΚΑΙ ΠΟΛΩΣΗ

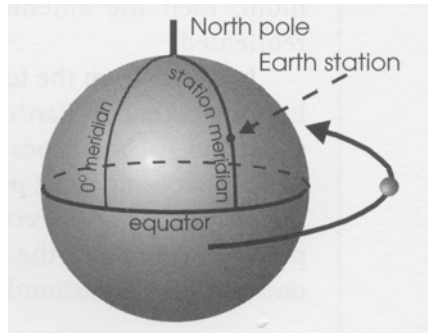
### 2.1 Εισαγωγή

Ένα πλεονέκτημα των γεωστατικών δορυφόρων είναι ότι ο γωνιακός προσανατολισμός των κεραιών του επίγειου σταθμού που εστιάζουν προς αυτούς είναι σταθερός. Αυτό βέβαια δεν είναι απόλυτα αληθές. Η γωνία προσανατολισμού τυπικά κυμαίνεται στις  $\pm 0,1^0$  για δορυφόρους τοποθετημένους στην ίδια θέση και  $\pm 0,5^0$  για δορυφόρους και στις δυο κατευθύνσεις Βορρά–Νότου και Ανατολής–Δύσης. Οι κεραιές ενός επίγειου σταθμού έχουν γενικά στενή δέσμη ακτινοβολίας που έχει τη μορφή ενός στυλό. Αν η δέσμη ακτινοβολίας είναι αρκετά στενή ώστε η επιτρεπτή ολίσθηση του δορυφόρου τον μεταφέρει εκτός του μεγίστου της ακτινοβολίας, τότε η κεραιά θα πρέπει να προσανατολιστεί ξανά.

Είναι σαφές από τα προαναφερθέντα ότι ανεξάρτητα αν η κεραιά του επίγειου σταθμού έχει στενή ή ευρεία δέσμη ακτινοβολίας, η κατεύθυνση στην οποία η δέσμη πρέπει να εστιάζει είναι ύψιστης σημασίας. Αυτή η κατεύθυνση εκφράζεται συνήθως με τους όρους *αζιμούθια γωνία* και *γωνία ανύψωσης*. Η αζιμούθια γωνία μετράται δεξιόστροφα από τον βορρά και η γωνία ανύψωσης μετράται πάνω από τον ορίζοντα. Αυτές οι γωνίες, όπως επίσης και η απόσταση από τον επίγειο σταθμό μέχρι το δορυφόρο, θα εξεταστούν παρακάτω.

### 2.2 Δορυφορική απόσταση και γωνίες

Ένας δορυφόρος σε τροχιά γύρω από τον Ισημερινό απεικονίζεται στο σχήμα 2.1. Φυσικά, επειδή ο δορυφόρος είναι γεωστατικός, θα είναι πιο μακριά απ' τη γη απ' ότι εμφανίζεται στο σχήμα. Ο μεσημβρινός των  $0^0$  διαμέσου του Γκρίνουιτς, είναι αυτός από τον οποίο μετρούνται οι γωνίες του γεωγραφικού μήκους. Η θέση ενός επίγειου σταθμού του οποίου η κεραιά εστιάζει στο δορυφόρο εμφανίζεται στο Σχήμα 2.1.

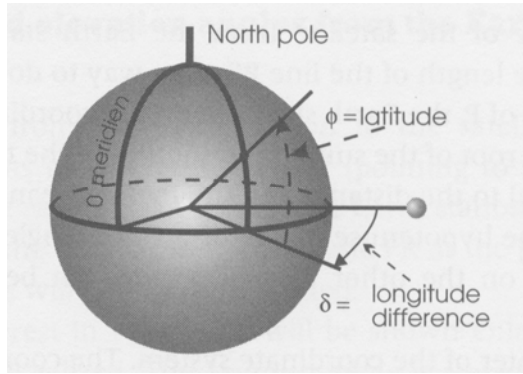


**Σχήμα 2.1:** Γεωμετρία Γης προς δορυφόρο.

Αυτός ο σταθμός θα μπορούσε να είναι, για παράδειγμα, μια απλή κεραία λήψης τηλεοπτικού σήματος. Ο μεσημβρινός του γεωγραφικού μήκους του σταθμού θα εκφράζεται σε μοίρες ανατολικά του Γκρίνουιτς. Ο στόχος στους υπολογισμούς που ακολουθούν είναι ο καθορισμός της απόστασης μεταξύ του σταθμού εδάφους και του δορυφόρου, και των γωνιών ανύψωσης και αζιμουθίου της γραμμής οπτικής επαφής μεταξύ του επίγειου σταθμού και του δορυφόρου. Η απόσταση απαιτείται για υπολογισμούς της έντασης του σήματος. Οι γωνίες χρειάζονται για να επιτρέψουν στον επίγειο σταθμό να ευθυγραμμιστεί, ώστε η δέσμη ακτινοβολίας από την κεραία του να εστιάζει στο δορυφόρο με όσο το δυνατόν περισσότερη ακρίβεια.

Στο σχήμα 2.2 φαίνεται η γωνία  $\varphi$  του γεωγραφικού πλάτους του επίγειου σταθμού, καθώς και η *διαφορά της γωνίας*  $\delta$  μεταξύ του γεωγραφικού μήκους του δορυφόρου και του γεωγραφικού μήκους του επίγειου σταθμού. Επομένως, η γωνία  $\delta$  είναι ίση με το ανατολικό γεωγραφικό μήκος του δορυφόρου *μείον* το ανατολικό γεωγραφικό μήκος του επίγειου σταθμού. Στο σχήμα υπάρχει μια γραμμή από το κέντρο της γης μέχρι τον δορυφόρο της οποίας το μήκος είναι  $42.164 \cdot 10^3$  m.

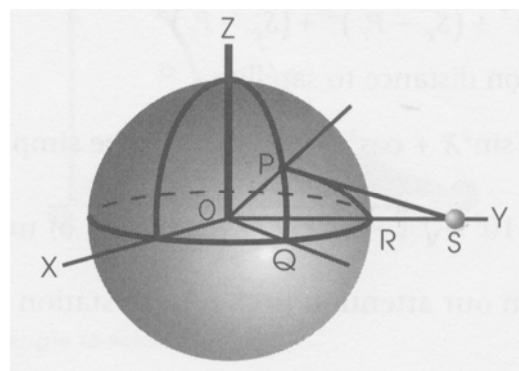




**Σχήμα 2.2:** Διαφορά γεωγραφικού πλάτους και γεωγραφικού μήκους του επίγειου σταθμού.

### 2.3 Απόσταση επίγειου σταθμού-δορυφόρου

Το σχήμα 2.3 παρουσιάζει ό,τι και τα σχήματα 2.1 και 2.2 και επιπλέον ένα σετ ορθογωνίων καρτεσιανών συντεταγμένων  $xyz$  που έχει υπερτεθεί, με τον άξονα των  $y$  να περνάει μέσα από την θέση του δορυφόρου (ο άξονας των  $z$  είναι ίδιος με τον άξονα της γης). Σημειώνεται επίσης η γεωδαιτική καμπύλη  $PR$  κατά μήκος της επιφάνειας της γης που ενώνει τα σημεία  $P$  και  $R$ . (Σε μια σφαιρική επιφάνεια, μια γεωδαιτική είναι η συντομότερη γραμμή που ενώνει δυο σημεία της επιφάνειας). Αυτή η καμπύλη, όπως και το τρίγωνο  $OPS$  είναι όλα στο ίδιο επίπεδο, με την κορυφή  $P$  να γέρνει προς τον αναγνώστη.



**Σχήμα 2.3:** Υπέρθεση καρτεσιανών συντεταγμένων.

Η *απόσταση* του δορυφόρου από το σταθμό εδάφους βρίσκεται από τον καθορισμό του μήκους της γραμμής  $PS$ . Ένας τρόπος για να γίνει αυτό είναι

να καθοριστούν οι συντεταγμένες του P (του επίγειου σταθμού) και οι συντεταγμένες του S (του δορυφόρου). Η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των διαφορών των τριών συντεταγμένων είναι ίση με την απόσταση PS. Το Πυθαγόρειο Θεώρημα υποδεικνύει ότι το τετράγωνο της υποτεινουσας (ενός ορθογωνίου τριγώνου) είναι ίσο με άθροισμα των τετραγώνων των άλλων δύο πλευρών. Αυτό μπορεί να επεκταθεί στις τρεις διαστάσεις.

Το O είναι το κέντρο του συστήματος των συντεταγμένων. Οι συντεταγμένες της θέσης του δορυφόρου S και της θέσης του επίγειου σταθμού P είναι οι ακόλουθες:

$$S_x = 0$$

$$S_y = R_s = \text{γεωστατική ακτίνα από το κέντρο της Γης} = 42.164 \cdot 10^3 \text{ m}$$

$$S_z = 0$$

$$R_E = \text{ακτίνα του Ισημερινού της Γης} = 6.378 \cdot 10^3 \text{ m}$$

$\varphi$  = γεωγραφικό πλάτος του επίγειου σταθμού

$\delta$  = ανατολικό γεωγραφικό μήκος του δορυφόρου μείον το ανατολικό γεωγραφικό μήκος του επίγειου σταθμού

$$P_x = R_E (\cos \varphi) \cdot (\sin \delta)$$

$$P_y = R_E (\cos \varphi) \cdot (\cos \delta)$$

$$P_z = R_E (\sin \varphi)$$

Χρησιμοποιώντας το Πυθαγόρειο Θεώρημα για τρεις διαστάσεις, έχουμε:

$$PS = \sqrt{(S_x - P_x)^2 + (S_y - P_y)^2 + (S_z - P_z)^2}$$

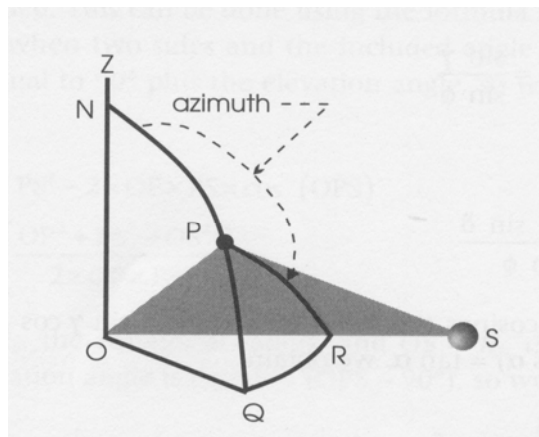
= απόσταση επίγειου σταθμού-δορυφόρου

Λαμβάνοντας υπόψη ότι  $(\sin^2 X + \cos^2 X) = 1$ , η παραπάνω σχέση μπορεί να απλοποιηθεί στην ακόλουθη:

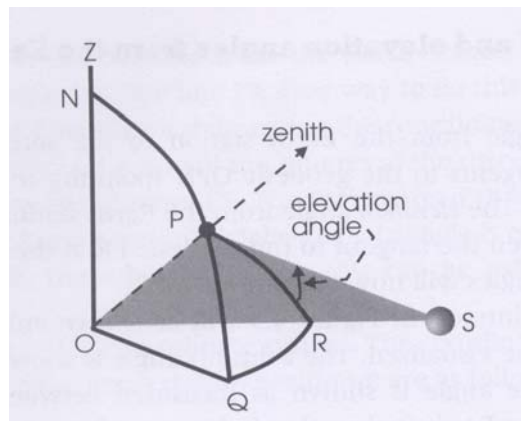
$$PS = 42,643 \cdot 10^3 \sqrt{1 - 0,29577 \cdot (\cos \varphi \cdot \cos \delta)} \text{ m} \quad (2.1)$$

2.4 Αζιμούθια γωνία και γωνία ανύψωσης από τον επίγειο σταθμό προς το δορυφόρο

Η *αζιμούθια* γωνία από τον επίγειο σταθμό προς το δορυφόρο, είναι εκείνη μεταξύ των εφαπτόμενων γραμμών στη γεωδαιτική QPN (που δείχνει το βορρά) και στη γεωδαιτική PR (σχήμα 2.4). Η *γωνία ανύψωσης* από τον επίγειο σταθμό προς το δορυφόρο είναι εκείνη μεταξύ της εφαπτομένης στη γεωδαιτική PR στο σημείο P και της γραμμής PS (σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.4: Αζιμούθια γωνία προς το δορυφόρο.



Σχήμα 2.5: Γωνία ανύψωσης προς το δορυφόρο.

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από το σχήμα 2.4, η γωνία QPR είναι ίση με  $180^0$  μείον την αζιμούθια γωνία. Άρα η αζιμούθια γωνία είναι:

$$NPS = (180^0 - QPR) \quad (2.2)$$

Όπου η γωνία PQR δίνεται από τη σχέση (σχήμα 2.2):

$$QPR = \tan^{-1} \left( \frac{\tan \delta}{\sin \phi} \right) \quad (2.3)$$

Στο νότιο ημισφαίριο, ισχύει  $NPS = -QPR$ . Η γωνία ανύψωσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{Γωνία ανύψωσης} = \left[ \cos^{-1} \left( \frac{R_E^2 + PS^2 - R_S^2}{2 \cdot R_E \cdot PS} \right) - 90^0 \right] \quad (2.4)$$

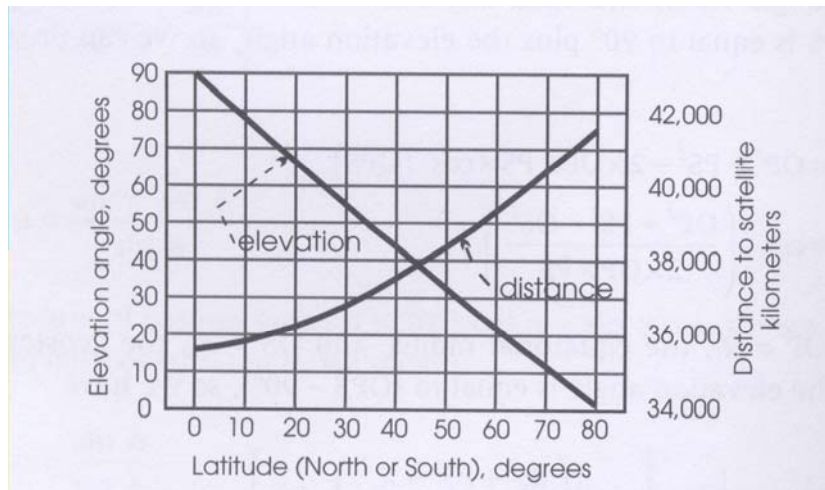
Στην παραπάνω εξίσωση η γωνία ανύψωσης και εκφράζεται σε μοίρες και  $R_E$  είναι η ακτίνα της γης ( $6.378 \cdot 10^3$  m),  $PS$  είναι η απόσταση από τον επίγειο σταθμό μέχρι το δορυφόρο [εξ. (2.1)] και  $R_S$  είναι η απόσταση από το κέντρο της γης μέχρι το δορυφόρο  $= 42.164 \cdot 10^3$  m.

## 2.5 Μεταβολή της γωνίας ανύψωσης και της απόστασης από το δορυφόρο σε σχέση με το γεωγραφικό πλάτος

Όπως προκύπτει από τις εξισώσεις που αναπτύχθηκαν προηγουμένως, η γωνία ανύψωσης και η απόσταση από το δορυφόρο, μεταβάλλονται με τις γεωγραφικές συντεταγμένες του επίγειου σταθμού, όπως επίσης και με το γεωγραφικό μήκος του δορυφόρου. Είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε πώς η γωνία ανύψωσης και η απόσταση μεταβάλλονται με το γεωγραφικό πλάτος του επίγειου σταθμού, όταν ο επίγειος σταθμός και ο δορυφόρος είναι στο ίδιο γεωγραφικό μήκος.

Στο σχήμα 2.6 παρουσιάζεται η μεταβολή της γωνίας ανύψωσης και της απόστασης από το δορυφόρο, σε σχέση με το γεωγραφικό πλάτος. Παρατηρούμε ότι για γεωγραφικό πλάτος πάνω από  $80^0$ , η γωνία ανύψωσης γίνεται πολύ μικρή για να είναι χρήσιμη, καθώς διάφορα εμπόδια πολύ εύκολα θα έκρυβαν την οπτική επαφή με το δορυφόρο. Συγκεκριμένα, ακριβώς πάνω από  $81^0$ , η καμπυλότητα της γης από μόνη της θα έκρυβε τη γραμμή οπτικής επαφής.

Η απόσταση από το δορυφόρο γίνεται ελάχιστη (35.786 Km), όταν ο επίγειος σταθμός βρίσκεται στον Ισημερινό, με την κεραία στο ζενίθ ( $90^{\circ}$  ανύψωση). Η αύξηση της απόστασης καθώς το γεωγραφικό πλάτος αυξάνεται είναι σταδιακή και ανέρχεται στα 41.534 Km στις  $80^{\circ}$  του γεωγραφικού πλάτους.



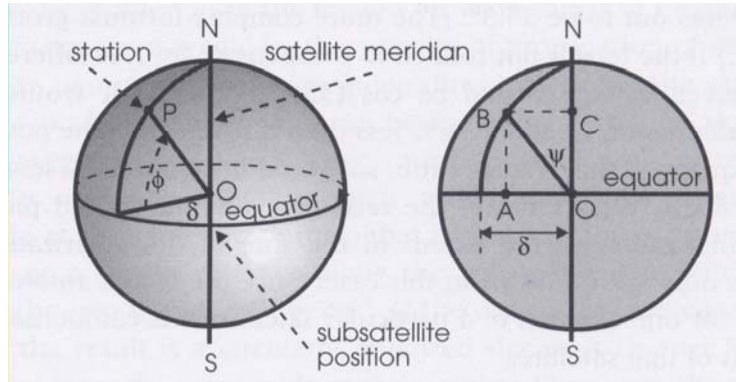
**Σχήμα 2.6:** Γωνία ανύψωσης και απόσταση από το δορυφόρο για επίγειο σταθμό και δορυφόρο στο ίδιο γεωγραφικό μήκος.

## 2.6 Καθορισμός της γωνίας πόλωσης του δορυφόρου

Αν ο επίγειος σταθμός δεν βρίσκεται στο ίδιο γεωγραφικό μήκος με το δορυφόρο, το επίπεδο που περιέχει το τόξο που δημιουργείται από την περιστροφή της γωνίας ανύψωσης της κεραίας, παίρνει μία κλίση ως προς το ισημερινό επίπεδο. Επομένως, η λαμβανόμενη πόλωση δεν θα είναι η ίδια με αυτή που εκπέμπεται από το δορυφόρο και είναι απαραίτητη κάποια διόρθωση.

Το αριστερό διάγραμμα του σχήματος 2.7 δείχνει έναν επίγειο σταθμό, το μεσημβρινό του σταθμού, το γεωγραφικό πλάτος  $\varphi$  και τη γωνία  $\delta$ , δηλαδή τη διαφορά μεταξύ του ανατολικού γεωγραφικού μήκους του επίγειου σταθμού και του ανατολικού γεωγραφικού μήκους του δορυφόρου. Η γραμμή N-S δείχνει το μεσημβρινό του δορυφόρου. Το δεξί διάγραμμα δείχνει την προβολή του αριστερού διαγράμματος σ' έναν δισδιάστατο δίσκο ο οποίος

γέρνει ελαφρώς προς τα επάνω, ώστε ο Ισημερινός να εμφανίζεται σαν μια ευθεία γραμμή.



**Σχήμα 2.7:** Γεωμετρία για τον προσεγγιστικό καθορισμό της πολικότητας του δορυφόρου.

Η γραμμή OB και η κάθετη γραμμή στο χαρτί στο σημείο O το οποίο εστιάζει στο δορυφόρο, σχηματίζει ένα επίπεδο. Αυτό το επίπεδο περιέχει το τόξο που παράγεται καθώς η γωνία ανύψωσης της κεραιάς αλλάζει. Αν η πόλωση του δορυφόρου είναι κατακόρυφη (vertical-V), τότε η πόλωσή του στον επίγειο σταθμό είναι η γωνία ψ μεταξύ του τόξου της ανύψωσης και της γραμμής που εμφανίζεται ως το γεωγραφικό μήκος του δορυφόρου. Αν η πόλωση του δορυφόρου είναι οριζόντια (horizontal-H), τότε η γωνία  $(90^0 + \psi)$ , είναι η γωνία πόλωσης στον επίγειο σταθμό.

Αν R είναι η ακτίνα της γης και φ είναι το γεωγραφικό πλάτος του σταθμού, τότε στο αριστερό διάγραμμα του σχήματος 2.7, η προβολή του OP στο επίπεδο του Ισημερινού είναι  $(R \cos \phi)$ . Η προβολή του  $(R \cos \phi)$  στον επίπεδο δίσκο του δεξιού διαγράμματος στο σχήμα 2.7, είναι  $(R \cos \phi \sin \delta)$ , το οποίο είναι ίσο με AO ή με BC. Το OC είναι ίσο με  $(R \sin \phi)$ . Συνεπώς η γωνία ψ δίνεται από τη σχέση:

$$\psi = \tan^{-1} \frac{BC}{OC} = \tan^{-1} \left( \frac{R \cdot \cos \phi \cdot \sin \delta}{R \cdot \sin \phi} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{\sin \delta}{\tan \phi} \right) \quad (2.4)$$

όπου:

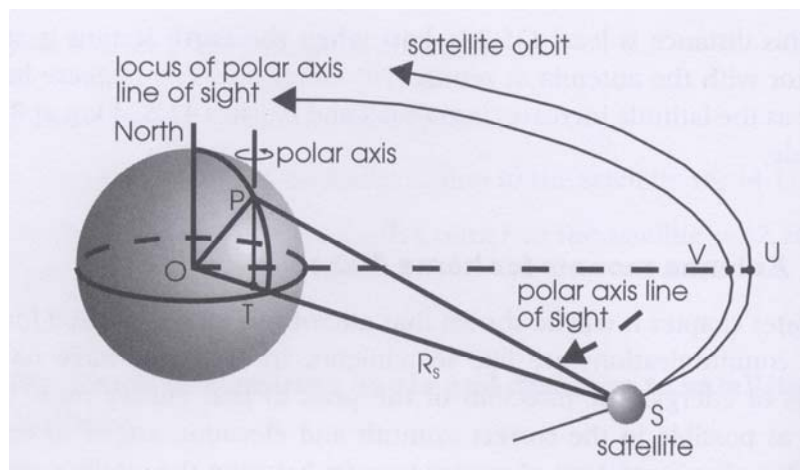
$\psi$  είναι η γωνία πόλωσης σε μοίρες και μετράται δεξιόστροφα από την κατακόρυφη (για V πόλωση) ή δεξιόστροφα από την οριζόντια (για H πόλωση) κοιτάζοντας το πίσω μέρος της επίγειας δορυφορικής κεραίας.

$\delta$  είναι η απόλυτη τιμή του ανατολικού γεωγραφικού μήκους του δορυφόρου μείον το ανατολικό γεωγραφικό μήκος του επίγειου σταθμού σε μοίρες.

$\varphi$  είναι το βόρειο γεωγραφικό πλάτος του επίγειου σταθμού σε μοίρες.

## 2.7 Η πολική τοποθέτηση

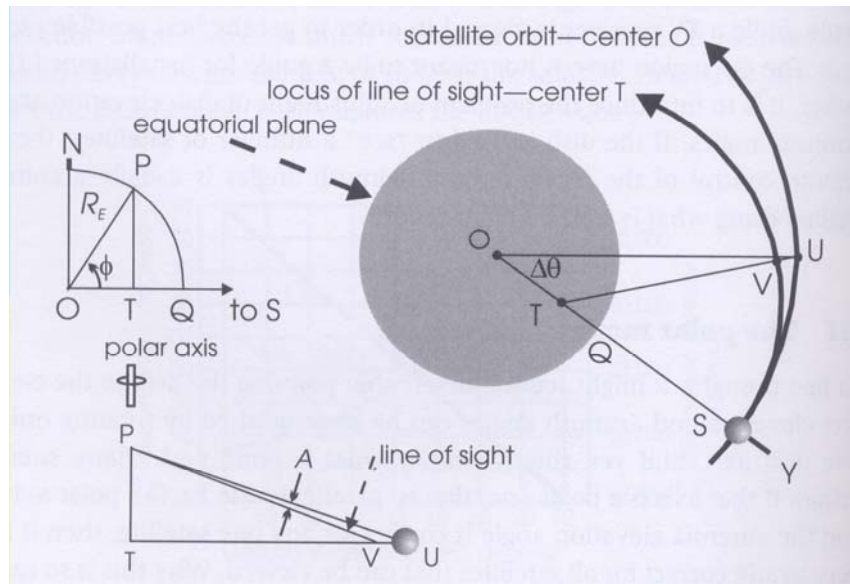
Η στόχευση μιας επίγειας δορυφορικής κεραίας προς το δορυφόρο με τις σωστές γωνίες ανύψωσης και αζιμουθίου, μπορεί να επιτευχθεί απλά, περιστρέφοντας τον έναν από τους άξονές της. Αν αυτός ο άξονας είναι ο πολικός, δηλαδή είναι παράλληλος με τον πολικό άξονα της Γης και η γωνία ανύψωσης της κεραίας είναι η σωστή για καθέναν από τους δορυφόρους, τότε η κεραία μπορεί να «δει» όλους τους δορυφόρους. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8: Η γεωμετρία της πολικής τοποθέτησης.

Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι επειδή η ακτίνα της γεωστατικής τροχιάς είναι πολύ μεγαλύτερη από την ακτίνα της Γης (42.164 km έναντι 6.378 km), η γεωστατική τροχιά και ο γεωμετρικός τόπος της γραμμής οπτικής επαφής (*line of sight*) της επίγειας κεραίας προς το δορυφόρο, καθώς η δορυφορική κεραία περιστρέφεται γύρω από τον πολικό άξονα, βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ

τους. Στο σχήμα 2.9 φαίνεται μία κάτοψη της Γης από το Βόρειο Πόλο. Φαίνεται επίσης ένα μέρος της κυκλικής τροχιάς του δορυφόρου, καθώς και ο γεωμετρικός τόπος της γραμμής οπτικής επαφής στο επίπεδο του Ισημερινού από τη δορυφορική κεραία.



**Σχήμα 2.9:** Προσδιορισμός της γωνίας σφάλματος κατά την πολική τοποθέτηση.

Καθώς η δορυφορική κεραία περιστρέφεται γύρω από τον πολικό της άξονα, το διάνυσμα **PV** (το οποίο είναι η γραμμή οπτικής επαφής του πολικού άξονα στο σχήμα 2.8) περιστρέφεται επίσης, έτσι ώστε το σημείο όπου τέμνει το επίπεδο του Ισημερινού διαγράφει έναν κύκλο. Ο κύκλος αυτός ονομάζεται *γεωμετρικός τόπος της γραμμής οπτικής επαφής* και έχει κέντρο το σημείο **T**. Όταν η δορυφορική κεραία περιστρέφεται ώστε να στοχεύσει έναν γεωστατικό δορυφόρο **U**, το διάνυσμα της γραμμής οπτικής επαφής **PV** θα περάσει κάτω από το σημείο **U**, συνεπώς απαιτείται ο υπολογισμός της γωνίας **VPU** ή **A**. Η γωνία αυτή δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$A = 2 \cdot \tan^{-1} \left[ \frac{r}{(p-a)} \right] \quad (2.5)$$



$$\text{όπου } p = \frac{a+b+c}{2}, r = \sqrt{\frac{(p-a)(p-b)(p-c)}{p}} \text{ και}$$

$$a = (TU - TV), b = \sqrt{PT^2 + TV^2}, c = PU = \sqrt{PT^2 + TU^2}$$

# 3 ΚΕΡΔΟΣ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ, ΕΥΡΟΣ ΔΕΣΜΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΘΟΡΥΒΟΥ

## 3.1 Κέρδος παραβολικής κεραίας και εύρος δέσμης ακτινοβολίας

Μια ισοτροπική κεραία εκπομπής είναι εκείνη που εκπέμπει ισχύ ισοδύναμα, προς όλες τις κατευθύνσεις. Αν  $P$  είναι η ισχύς που εισέρχεται στην κεραία από έναν πομπό, τότε παραλείποντας τις απώλειες, η πυκνότητα ισχύος  $P_D$  σε απόσταση  $R$  προς κάθε κατεύθυνση, θα είναι ίση με την ισχύ  $P$  διαιρούμενη με το εμβαδόν της σφαίρας σε απόσταση  $R$ , δηλαδή  $P_D = P / (4\pi R^2)$ . Στις δορυφορικές επικοινωνίες χρησιμοποιείται κυρίως η παραβολική κεραία, το κέρδος  $G$  της οποίας, προσδιορίζεται ως ο **λόγος της πυκνότητας ισχύος στην εμπρόσθια κατεύθυνση, προς  $P_D$** . Το κέρδος αυτό δίνεται από την εξίσωση:

$$G = \left( \frac{4\pi\eta A}{\lambda^2} \right) = \eta \left( \frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (3.1)$$

όπου:  $A = \eta$  εγκάρσια τομή ανοίγματος της κεραίας  $= \left( \frac{\pi D^2}{4} \right)$ ,

$D = \eta$  διάμετρος του ανοίγματος της κεραίας,

$\eta = \eta$  απόδοση της κεραίας, με μέγιστη τιμή τη μονάδα,

$\lambda = \eta$  το μήκος κύματος.

Η παραπάνω σχέση μπορεί να εκφρασθεί και σε dB ως  $(G)_{dB} = 10 \log (109,814 \eta D^2 F^2)$ , όπου  $F$  η συχνότητα σε GHz.

Η ενεργός επιφάνεια  $A_E$  του ανοίγματος της παραβολικής κεραίας είναι η πραγματική επιφάνεια πολλαπλασιασμένη με την απόδοση  $\eta$ :

$$A_E = \eta A = \left( \frac{G \lambda^2}{4\pi} \right) \quad (3.2)$$

Στην περίπτωση της λήψης, η ισχύς που δεσμεύεται από την κεραία είναι η εισερχόμενη πυκνότητα ισχύος πολλαπλασιασμένη με την  $A_E$ .

## ΚΕΡΔΟΣ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ ΚΑΙ ΕΥΡΟΣ ΔΕΣΜΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Η απόδοση μιας παραβολικής κεραίας, είναι το γινόμενο διαφόρων επιμέρους συντελεστών απόδοσης και για μία καλοσχεδιασμένη παραβολική κεραία είναι περίπου 0.75 (75% απόδοση), ενώ η χαμηλότερη τιμή της είναι περίπου 45%. Για μια συνηθισμένη οικιακή δορυφορική κεραία, 50% είναι μια λογική τιμή. Οι επιμέρους συνεισφορές στη συνολική απόδοση εμφανίζονται στον πίνακα 3.1.

**Πίνακας 3.1:** Επιμέρους συντελεστές απόδοσης μιας κεραίας.

**$\eta_A$ :** Απόδοση ανοίγματος (aperture efficiency), ως αποτέλεσμα ανομοιομορφου φωτισμού.

**$\eta_B$ :** Απόδοση μπλοκαρίσματος (blockage efficiency), ως αποτέλεσμα μπλοκαρίσματος του διαγράμματος ακτινοβολίας από τα συστήματα τροφοδοσίας και τα υποστηρίγματα.

**$\eta_S$ :** Απόδοση υπερχείλισης (spillover efficiency). Η απώλεια ενέργειας οφείλεται στο ότι το κάτοπτρο δεν συλλαμβάνει όλη την ενέργεια που κατευθύνεται προς αυτό από τα συστήματα τροφοδοσίας.

**$\eta_P$ :** Απόδοση λόγω μεταβολής της πόλωσης (cross - polarization efficiency). Η απώλεια ενέργειας οφείλεται στην ακτινοβολούμενη ενέργεια η οποία πολώνεται κάθετη προς την επιθυμητή κατεύθυνση.

**$\eta_C$ :** Επιφανειακή απόδοση (surface efficiency). Η απώλεια ενέργειας οφείλεται σε ανωμαλίες της επιφάνειας της κεραίας.

**$\eta_L$ :** Ωμική απόδοση και απόδοση λόγω κακής προσαρμογής (ohmic and mismatch efficiency).

Η συνολική απόδοση της κεραίας είναι:  $\eta = \eta_A \cdot \eta_B \cdot \eta_S \cdot \eta_P \cdot \eta_C \cdot \eta_L$ . Ο σημαντικότερος από τους παραπάνω συντελεστές απόδοσης είναι ο  $\eta_A$ , ο

οποίος γίνεται 100%, εάν υπάρχει ένα ακτινοβολούμενο επίπεδο κύμα ομοιόμορφης έντασης πάνω στο άνοιγμα της κεραίας. Θα ήταν επιθυμητό να μεγιστοποιηθεί η τιμή του  $\eta_A$ , όμως αν η πυκνότητας ισχύος του ανοίγματος της κεραίας είναι ομοιόμορφη, οι πρώτοι πλευρικοί λοβοί θα ήταν περίπου μόνο 17,6 dB κάτω από τον κύριο λοβό της δέσμης ακτινοβολίας. Οι πλευρικοί λοβοί χειροτερεύουν την απόδοση της κεραίας και υπάρχουν διεθνείς κανονισμοί, οι οποίοι περιορίζουν το ποσοστό της εκπεμπόμενης ισχύος των πλευρικών λοβών, επειδή προκαλεί παρεμβολή σε γειτονικούς δορυφόρους. Ο συνήθης τρόπος για να μειωθούν οι πλευρικοί λοβοί είναι να τροποποιηθεί η κατανομή της ισχύος πάνω στο άνοιγμα της κεραίας. Αυτό επιτυγχάνεται με σταδιακή μείωση (tapering) της κατανομής ισχύος, μια διεργασία κατά την οποία η ακμή (edge) του ανοίγματος της κεραίας, φωτίζεται από την πηγή τροφοδοσίας με μικρότερη ένταση απ' ότι η κεντρική περιοχή του ανοίγματος. Η διεργασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ισχύος φωτισμού στην ακμή του ανοίγματος κατά 10 ως 20 dB σε σύγκριση με την ισχύ φωτισμού στην κεντρική περιοχή του ανοίγματος. Μια τυπική τιμή του  $\eta_A$  είναι 0,85 ή απώλεια 0,7 dB. Όσο μεγαλύτερη είναι η σταδιακή μείωση του φωτισμού, τόσο μικρότεροι γίνονται οι πλευρικοί λοβοί, αλλά δυστυχώς, το εύρος δέσμης ακτινοβολίας γίνεται μεγαλύτερο και το κέρδος της κεραίας μειώνεται.

Το εύρος δέσμης μισής ισχύος (half – power beam width, HPBW) σε μοίρες δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\text{HPBW} = 70 \frac{\lambda}{D} \quad (3.3)$$

Οι ανωμαλίες στην επιφάνεια ενός παραβολικού ανακλαστήρα έχουν ως αποτέλεσμα τη σκέδαση της ενέργειας και συνεπώς την ελάττωση της απόδοσης της κεραίας. Για τον καθορισμό του  $\eta_C$ , χρησιμοποιείται η ακόλουθη εξίσωση:

$$\eta_c = e^{-\left(\frac{4\pi\delta}{\lambda}\right)^2}$$

(3.4)

όπου  $\delta$  είναι η RMS επιφανειακή ανωμαλία.

# 4. Ο ΘΟΡΥΒΟΣ ΣΤΙΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΖΕΥΞΕΙΣ

## 4.1 Εισαγωγή

Κατά τη διαδρομή του σήματος σε μια δορυφορική ζεύξη, είναι δυνατόν να προστεθούν διάφορα ανεπιθύμητα σήματα. Τα σήματα αυτά είναι ασυσχέτιστα μεταξύ τους και με το επιθυμητό σήμα και είναι γνωστά ως *θόρυβος*. Η ποιότητα του σήματος (ή η ακρίβεια στην περίπτωση μετάδοσης δεδομένων) εξαρτάται από τον λόγο σήματος προς θόρυβο (S/N) στην έξοδο του δέκτη. Ο λόγος αυτός εξαρτάται από τον λόγο φέροντος σήματος προς θόρυβο (C/N) στην είσοδο του δέκτη. Όσο υψηλότερος είναι ο λόγος φέροντος προς θόρυβο, τόσο υψηλότερος είναι και ο λόγος σήματος προς θόρυβο και τόσο καλύτερο το σήμα εξόδου. Εφ' όσον τα ανεπιθύμητα σήματα είναι ασυσχέτιστα και απασχολούν όλο το εύρος ζώνης του δέκτη, μπορούν να συνδυαστούν σε έναν θόρυβο, προσθέτοντας την ισχύ του καθενός στην είσοδο του δέκτη. Η ισχύς του φέροντος διαιρείται με τη συνολική ισχύ θορύβου, ώστε να υπολογιστεί ο λόγος φέροντος προς θόρυβο.

Η ισχύς θορύβου και η μέση τετραγωνική τάση θορύβου, δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$P_N = k T_N B_N \quad (4.1)$$

$$E_N = \sqrt{4kT_N B_N R} \quad (4.2)$$

όπου:

$P_N$ : διαθέσιμη ισχύς θορύβου (Watts)

$E_N^2$ : μέση τετραγωνική τάση θορύβου

$k$ :  $1,381 \cdot 10^{-23}$  Joules/°K (σταθερά του Boltzmann)

$T_N$ : θερμοκρασία θορύβου (°K)

$B_N$ : εύρος ζώνης θορύβου (Hz)

$R$ : αντίσταση που παράγει θόρυβο (Ohms)

Η διαθέσιμη ισχύς θορύβου ανά μονάδα εύρους ζώνης είναι  $P_{N1}=kT_N$ . Αυτή η εξίσωση επιτρέπει στην ισχύ θορύβου να εκφραστεί με τον όρο **θερμοκρασία θορύβου**.

#### 4.2 Θόρυβος εισερχόμενος σε μια κεραία

Το λαμβανόμενο σήμα που φτάνει σε μια κεραία από έναν δορυφόρο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ένταση των ανεπιθύμητων σημάτων, τα οποία παρεμβάλλουν στο επιθυμητό σήμα και μπορεί να προέρχονται από διάφορες πηγές.

Μια από τις πηγές του θορύβου είναι ο κοσμικός θόρυβος (*cosmic noise*) ο οποίος προέρχεται από το διάστημα και πιστεύεται ότι προήλθε από τη «μεγάλη έκρηξη» του σύμπαντος όταν αυτό άρχισε να διαστέλλεται. Ο θόρυβος αυτός εισέρχεται στην κεραία λήψης και συμβάλει στο συνολικό θόρυβο, μειώνοντας το λόγο του επιθυμητού σήματος προς θόρυβο.

Επιπλέον του κοσμικού θορύβου, η ατμόσφαιρα της Γης εισάγει θόρυβο στην κεραία. Ο κοσμικός θόρυβος κυριαρχεί στις χαμηλές συχνότητες, αλλά καθώς αυξάνεται η συχνότητα, επικρατεί ο θόρυβος που προέρχεται από τα ατμοσφαιρικά αέρια (κυρίως τους υδρατμούς και το οξυγόνο). Η εξασθένιση ενός επιθυμητού σήματος που περνά μέσα από την ατμόσφαιρα και του θορύβου που προέρχεται από την ατμόσφαιρα, σχετίζονται στενά μεταξύ τους. Η εξασθένιση λόγω της βροχής γίνεται σημαντική για συχνότητες άνω των 10 GHz.

Είναι επίσης δυνατό να υπάρξει συνεισφορά στην ισχύ θορύβου από την ίδια τη Γη και τον Ήλιο.

Η συνολική ισχύς του θορύβου από διάφορες πηγές είναι ίση με το άθροισμα των επιμέρους θερμοκρασιών θορύβου απ' αυτές τις πηγές (δηλαδή της θερμοκρασία κοσμικού θορύβου, της θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού θορύβου, της θερμοκρασίας θορύβου που εκπέμπεται από το έδαφος και της θερμοκρασίας θορύβου που προέρχεται από τον ήλιο) πολλαπλασιασμένο με

μια σταθερά. Το άθροισμα αυτό αναφέρεται ως η *θερμοκρασία θορύβου της κεραίας*.

### 4.3 Εξασθενητές (Attenuators)

Σε μια δορυφορική ζεύξη, η κεραία λήψης του επίγειου σταθμού λήψης συνδέεται μέσω κυματοδηγού στο σύστημα του δέκτη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εξασθένιση του λαμβανόμενου φέροντος σήματος και την εισαγωγή επιπλέον θορύβου σ' αυτό, όπως συμβαίνει και με τη διέλευση του σήματος μέσα από βροχή. Η ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου που εισάγει μία συσκευή με απώλειες (όπως ο κυματοδηγός) δίνεται από τη σχέση:

$$T_{N(wg)} = \frac{T_0(L-1)}{L} \quad (4.3)$$

όπου  $L$  είναι οι απώλειες του κυματοδηγού και  $T_0$  η θερμοκρασία του περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκεται ο κυματοδηγός.

### 4.4 Ενισχυτές

Η ισχύς θορύβου που μετρείται στην είσοδο ενός ενισχυτή, μπορεί να εκφραστεί ως  $kT_{\text{ampl}}$ , όπου  $T_{\text{ampl}}$  είναι η θερμοκρασία θορύβου του ενισχυτή. Ένας ενισχυτής ο οποίος έχει μια χαμηλή τιμή της  $T_{\text{ampl}}$  είναι σχεδιασμένος για να χρησιμοποιηθεί σαν το πρώτο στάδιο σ' έναν δέκτη και ονομάζεται *ενισχυτής χαμηλού θορύβου (LNA)*.

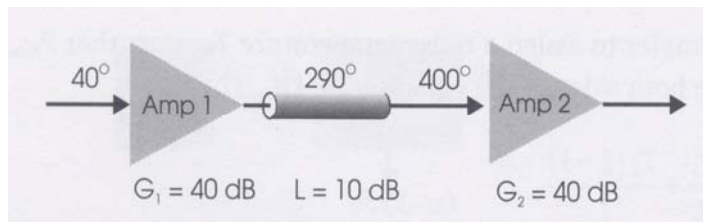
Ένας LNA τοποθετείται όσο πιο κοντά γίνεται στην τροφοδοσία της κεραίας λήψης, για να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες. Ο LNA συνήθως συνδυάζεται με έναν μετατροπέα συχνότητας και ο συνδυασμός αυτός, όπως αναφέρθηκε και στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, ονομάζεται LNB (Low Noise Block Converter). Η έξοδος ενός LNB είναι σε χαμηλότερη συχνότητα απ' αυτήν του φέροντος, η οποία είναι η ενδιάμεση συχνότητα (IF). Τα τρανζίστορ FET GaAs που χρησιμοποιούνται στους LNB, έχουν τυπικές θερμοκρασίες θορύβου για την ζώνη-C, 30<sup>ο</sup>-60<sup>ο</sup> K και για τη ζώνη K<sub>U</sub>, 40<sup>ο</sup>-130<sup>ο</sup> K.



Η σπουδαιότητα των πρώτων σταδίων ενίσχυσης ενός δέκτη μπορεί να δειχθεί με βάση τη διάταξη του σχήματος 4.1. Το συνολικό κέρδος  $G$  υπολογίζεται ως  $G=G_1G_2/L$  (όπου  $L$  είναι η απώλεια του καλωδίου). Αντίστοιχα, η συνολική θερμοκρασία θορύβου δίνεται από τη σχέση:

$$T_{out} = T_1 \frac{G_1 G_2}{L} + T_2 G_2 + T_o \frac{L-1}{L} G_2.$$

Ο πρώτος όρος είναι η θερμοκρασία θορύβου του ενισχυτή 1 ( $40^0$  K) πολλαπλασιασμένη με το συνολικό κέρδος  $G$ . Ο δεύτερος όρος είναι η θερμοκρασία θορύβου του ενισχυτή 2 ( $400^0$  K) πολλαπλασιασμένη με το κέρδος του δεύτερου ενισχυτή  $G_2$ . Ο τρίτος όρος είναι η συνεισφορά θερμοκρασίας θορύβου του καλωδίου πολλαπλασιασμένη με το κέρδος του δεύτερου ενισχυτή.



**Σχήμα 4.1:** Διάταξη για τον καθορισμό ισοδύναμης θερμοκρασίας εισόδου.

Η ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου  $T_{EQ}$  στην είσοδο του δέκτη, υπολογίζεται διαιρώντας την  $T_{out}$  με το συνολικό κέρδος  $G$  (ίσο με  $G_1G_2/L$ ):

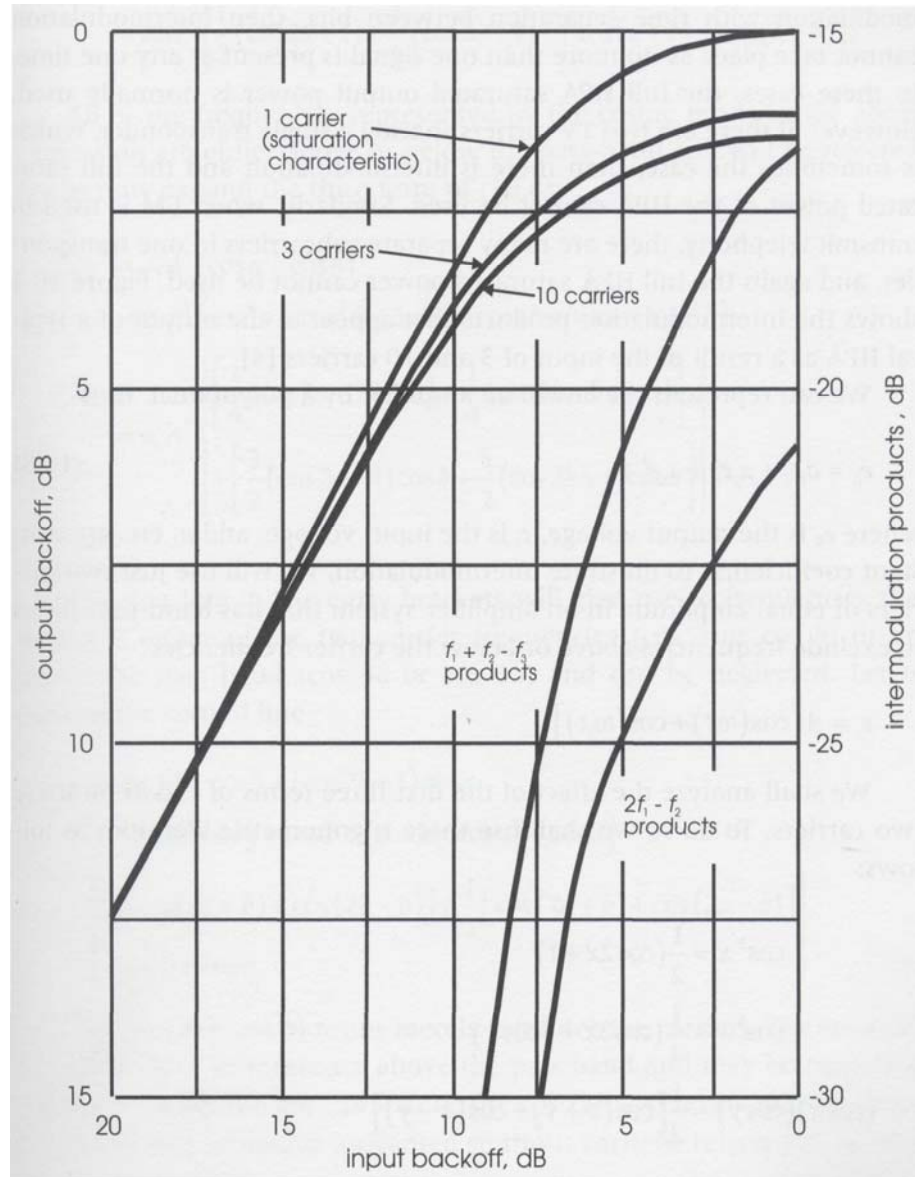
$$T_{EQ} = T_1 + T_2 \cdot \frac{L}{G_1} + T_o \cdot \frac{L-1}{G_1} \quad (4.4)$$

δηλαδή  $T_{EQ}=40+0,4+0,3=40,7$  °K. Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι αν ο LNB έχει ένα σημαντικό κέρδος σε σύγκριση με τις απώλειες που τον ακολουθούν, ο θερμικός θόρυβος στα επόμενα στάδια έχει πολύ μικρή επίδραση στο δέκτη. Αν όμως η απώλεια του καλωδίου πλησιάζει το κέρδος του LNB (γεγονός που συμβαίνει σπάνια) τότε οι συνεισφορές της θερμοκρασίας θορύβου των επομένων σταδίων μπορεί να μην είναι αμελητέες.

#### 4.4.1 Ο θόρυβος ενδοδιαμόρφωσης

Σ' έναν γραμμικό ενισχυτή, η τάση εξόδου είναι ευθέως ανάλογη της τάσης εισόδου. Αν δυο ημιτονοειδή σήματα διαφορετικών συχνοτήτων προστεθούν και περάσουν μέσα από τον ενισχυτή, η κυματομορφή εξόδου θα είναι το ενισχυμένο άθροισμα των δυο εισερχόμενων σημάτων. Ωστόσο, οι ενισχυτές δεν είναι τελείως γραμμικοί. Στην περίπτωση των ενισχυτών λυχνίας οδούντος κύματος (TWT), οι οποίοι χρησιμοποιούνται στους επίγειους σταθμούς εκπομπής ή στους δορυφορικούς επαναλήπτες, καθώς η ισχύς εισόδου αυξάνεται, η ισχύς εξόδου σταδιακά τείνει προς ένα μέγιστο.

Το σχήμα 4.2 δείχνει το διάγραμμα της ισχύος εξόδου σε σχέση με την ισχύ εισόδου σε έναν ενισχυτή TWT. Το μέγιστο του διαγράμματος είναι γνωστό ως **κορεσμός** και ο ενισχυτής εισέρχεται πλέον στη μη-γραμμική περιοχή λειτουργίας του. Στην έξοδο ενός μη-γραμμικού ενισχυτή, εκτός από το άθροισμα των επιμέρους σημάτων διαφορετικών συχνοτήτων, θα εμφανίζονται και άλλοι όροι, με αποτέλεσμα το φαινόμενο της **ενδοδιαμόρφωσης**. Στο σχήμα 4.2 εμφανίζονται τα προϊόντα της ενδοδιαμόρφωσης για 3 φέροντα σήματα στην είσοδο. Μειώνοντας την ισχύ εισόδου του TWT, η ενίσχυση γίνεται περισσότερο γραμμική (με αποτέλεσμα τη μείωση της ενδοδιαμόρφωσης), με το μειονέκτημα όμως της χαμηλότερης ισχύος εξόδου.



**Σχήμα 4.2:** Τυπικό διάγραμμα ισχύος εξόδου και προϊόντων ενδοδιαμόρφωσης σε έναν ενισχυτή TWT.

#### 4.5 Δείκτης θορύβου (noise figure)

Ο όρος «δείκτης θορύβου»  $F$ , συνδέει τη θερμοκρασία θορύβου του δέκτη (συνήθως LNB)  $T_{LNB}$  με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T_O$ , με την ακόλουθη σχέση:

$$F = 10 \log \frac{T_{LNB} + T_O}{T_O} \quad (4.5)$$

Λύνοντας ως προς  $T_{LNB}$ , λαμβάνουμε:

$$T_{LNB} = T_o (10^{F/10} - 1) \quad (4.6)$$

#### 4.6 Παρεμβολή

Στα πρώτα χρόνια της ανάπτυξης των δορυφορικών επικοινωνιών, υπήρχαν ελάχιστοι δορυφόροι σε τροχιά και η εκπομπή επίγειων σταθμών προς λάθος δορυφόρο ή η λήψη από μια κεραία λήψης επίγειου σταθμού από λάθος δορυφόρο, ήταν σπάνια. Σήμερα όμως, με δορυφόρους τοποθετημένους μεταξύ τους με γωνιακή απόσταση μόνο  $2^\circ$ , τέτοιου είδους παρεμβολές είναι μία επιπλέον πηγή θορύβου και μπορεί να είναι σημαντική στη χειροτέρευση της απόδοσης ενός δορυφορικού συστήματος επικοινωνιών.

Οι πιο σημαντικοί παράγοντες που μπορούν να προκαλέσουν παρεμβολή τόσο στην ανοδική όσο και στην καθοδική ζεύξη, είναι οι ακόλουθοι:

- Το εύρος δέσμης ακτινοβολίας του κύριου λοβού της κεραιάς του επίγειου σταθμού.
- Τα χαρακτηριστικά των πλευρικών λοβών της κεραιάς του επίγειου σταθμού.
- Τα χαρακτηριστικά των πλευρικών λοβών της κεραιάς του δορυφόρου.
- Η διατήρηση της τροχιάς του δορυφόρου.
- Η ακρίβεια σκόπευσης της κεραιάς του δορυφόρου και του επίγειου σταθμού.
- Η διάκριση διασταυρούμενης πόλωσης του δορυφόρου και του επίγειου σταθμού.
- Η σχετική ισοδύναμη ιστροπική ακτινοβολούμενη ισχύς (EIRP) των δορυφόρων.
- Η παρεμβολή από γειτονικά κανάλια.

## **5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΙΟΝΟΣΦΑΙΡΑΣ** **ΣΤΙΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΖΕΥΞΕΙΣ**

### **5.1 Εισαγωγή**

Τα μικροκυματικά σήματα, κατά το μεγαλύτερο μέρος της διαδρομής τους από τη Γη ως το δορυφόρο και αντίστροφα, ταξιδεύουν σε ένα σχεδόν απόλυτο κενό και εξασθενούν αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης. Κατά την ανοδική ζεύξη (uplink), διαπερνούν την ατμόσφαιρα και στη συνέχεια την ιονόσφαιρα, οι οποίες επιδρούν στο σήμα. Το ίδιο συμβαίνει και κατά την καθοδική ζεύξη (downlink). Η ατμόσφαιρα περιέχει αέρα, νερό, υδρατμούς, σύννεφα, βροχή και χιόνι, που το καθένα απ' αυτά μπορεί να προκαλέσει εξασθένηση του σήματος. Εκτός της μείωσης της ισχύος του σήματος, αυξάνεται και ο θόρυβος, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο λόγος σήματος προς θόρυβο. Τα παραπάνω φαινόμενα εξαρτώνται σημαντικά από τη συχνότητα και οι απώλειες αυξάνουν με την αύξηση της συχνότητας. Η δυνατή βροχή και το χιόνι μπορούν να επιδράσουν και στην πόλωση του σήματος. Η ιονόσφαιρα μπορεί επιδράσει στην πόλωση του σήματος, ιδιαίτερα στις χαμηλότερες συχνότητες. Οι υδρατμοί, αν είναι μη ομοιόμορφα κατανεμημένοι, μπορούν να εκτρέψουν, ως ένα βαθμό, το σήμα.

### **5.2 Ατμοσφαιρικά αέρια**

Η πυκνότητα των ατμοσφαιρικών αερίων μειώνεται περίπου εκθετικά με το ύψος. Ο δείκτης διάθλασης (ή διαθλαστικότητα) μειώνεται επίσης εκθετικά με το ύψος, όπως και η κλίση της διαθλαστικότητας. Η κλίση της διαθλαστικότητας δρα ως πρίσμα, καμπυλώνοντας τις οριζόντιες ακτίνες προς τα κάτω. Αυτό μπορεί να επηρεάσει τη στόχευση μιας κεραιάς υψηλού κέρδους ενός επίγειου σταθμού.

### **5.2.1 Απώλεια διασποράς της δέσμης ακτινοβολίας (beam spread loss)** **(Σύσταση ITU P.618-6, Παράγραφος 2.3.2)**

Επειδή η κλίση της διαθλαστικότητας μειώνεται με το ύψος, επιδρά ως ένα αποκλίνον κάτοπτρο. Τα σήματα που περνούν μέσα από την ατμόσφαιρα υφίστανται διασπορά και μειώνεται η ένταση του μακρινού πεδίου. Αυτή η *απώλεια διασποράς της δέσμης ακτινοβολίας* είναι περίπου 1,1 dB (μέση ετήσια τιμή). Μπορεί να αγνοηθεί σε γωνίες ανύψωσης άνω των  $3^{\circ}$  για γεωγραφικά πλάτη μικρότερα των  $53^{\circ}$  και άνω των  $6^{\circ}$ , σε υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη. Όμως, κατά τον χειρότερο μήνα, σε γεωγραφικά πλάτη πάνω από  $53^{\circ}$ , προβλέπεται απώλεια αρκετών dB για γωνίες ανύψωσης κάτω των  $6^{\circ}$ . Η απώλεια διασποράς της δέσμης ακτινοβολίας είναι η ίδια σε όλες τις συχνότητες από 1 ως 100 GHz.

### **5.2.2 Ατμοσφαιρική εξασθένηση**

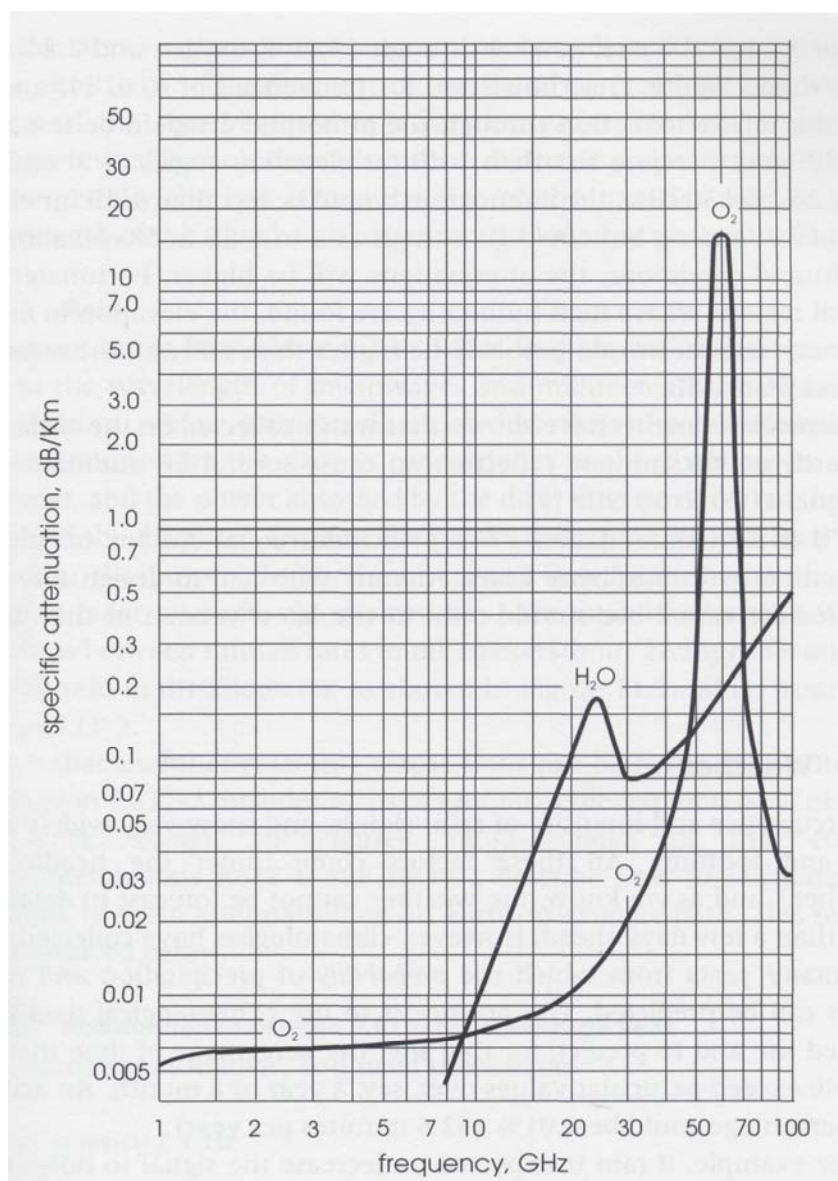
Εκτός από τους υδρατμούς, η ατμόσφαιρα αποτελείται κυρίως από 78% άζωτο, 21% οξυγόνο και 1% αργό. Από αυτά τα στοιχεία, μόνο το οξυγόνο έχει σημαντική επίδραση στη διάδοση των μικροκυματικών σημάτων και μόνο σε συχνότητες πάνω περίπου 10 GHz (σχήμα 5.1). Υπάρχει ένα ισχυρό μέγιστο απορρόφησης γύρω στα 60 GHz και το γεγονός αυτό χρησιμοποιείται σε ζεύξεις μεταξύ δορυφόρων, εφόσον τα σήματα σ' αυτές τις συχνότητες είναι στην ουσία αόρατα στο έδαφος.

Η πυκνότητα του αέρα μειώνεται περίπου εκθετικά με το ύψος και είναι ισοδύναμη, όσον αφορά υπολογισμούς εξασθένησης, με την πυκνότητα του οξυγόνου που είναι η ίδια από το επίπεδο του εδάφους μέχρι 6 Km ύψος και μηδενική πάνω απ' αυτό.

Οι υδρατμοί εξασθενούν τα μικροκύματα, με μέγιστο περίπου στα 22,3 GHz. Γι' αυτό το λόγο, οι συχνότητες μεταξύ 20 και 25 GHz συνήθως αποφεύγονται στις επικοινωνίες. Η εξασθένηση είναι σχεδόν ανάλογη με το περιεχόμενο των υδρατμών, το οποίο ποικίλει ευρέως και εξαρτάται από την παρουσία σωματιδίων νερού, τη

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΙΟΝΟΣΦΑΙΡΑΣ  
ΣΤΙΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΖΕΥΞΕΙΣ

θερμοκρασία του αέρα και την πίεση και από άλλους μετεωρολογικούς παράγοντες. Παρ' όλ' αυτά, η εξασθένηση λόγω υδρατμών στη διαδρομή επίγειου σταθμού – προς – δορυφόρο δεν είναι πολύ μεγάλη στις ζώνες συχνοτήτων του δορυφόρου, οπότε είναι συνηθισμένο να υποθέσουμε ότι το περιεχόμενο των υδρατμών του αέρα έχει ένα “τυπικό προφίλ”, στο οποίο η πυκνότητα είναι  $7,5 \text{ gr/m}^3$  σε επίπεδο εδάφους και μειώνεται κατά έναν συντελεστή 2 ή 3 για κάθε άνοδο 2 Km σε ύψος. Το ισοδύναμο ύψος είναι 2.2 Km.



**Σχήμα 5.1:** Ειδική εξασθένηση από ατμοσφαιρικά αέρια.  
(Πίεση=1013 mb, Θερμοκρασία=15<sup>0</sup> C, Υδρατμοί=7,5 gr/m<sup>3</sup>)

Μερικά πειράματα έδειξαν ότι το νερό που μαζεύεται στην επιφάνεια του ανακλαστήρα της κεραίας του επίγειου σταθμού μπορεί να προκαλέσει αρκετά dB εξασθένιση σε σήματα συχνότητας 20-30 GHz.

Εξισώσεις για τον υπολογισμό της εξασθένισης από ατμοσφαιρικά αέρια, περιλαμβάνονται στη σύσταση ITU – R P.676 – 4.

### **5.3 Ο καιρός**

Η εμφάνιση και η ένταση της βροχής, των νεφών και του χιονιού ποικίλουν αρκετά με το χρόνο και την τοποθεσία. Παρ' ότι τα καιρικά αυτά φαινόμενα δεν μπορούν να προβλεφθούν με λεπτομέρεια για περισσότερο από μερικές ημέρες, οι κλιματολόγοι έχουν συλλέξει δεδομένα με την πάροδο των ετών, από τα οποία μπορούν να προβλεφθούν η πιθανότητα βροχοπτώσης και άλλοι παράγοντες. Η χρήση κλιματολογικών δεδομένων για μια περιοχή, μπορεί να επιτρέψει την πρόβλεψη (γι' αυτήν την περιοχή), του ποσοστού του χρόνου για τον οποίο η απώλεια θα ξεπεράσει συγκεκριμένες τιμές, κατά τη διάρκεια ενός έτους ή ενός μήνα. Ένα αποδεικτό ποσοστό θα μπορούσε να είναι το 0.01% του έτους, δηλαδή 52,6 λεπτά ανά έτος. Για παράδειγμα, αν η βροχή αναμένεται να μειώσει το λόγο σήματος προς θόρυβο κατά 10 dB για 0,01% του χρόνου, θα πρέπει να προβλεφθεί ένα περιθώριο διάλειψης (*fade margin*) 10 dB. Αυτό σημαίνει ότι, στην απουσία βροχής, ο λόγος σήματος προς θόρυβο θα πρέπει να είναι κατά 10 dB υψηλότερος από το επιτρεπτό όριο, ώστε ο λόγος σήματος προς θόρυβο να πέσει κάτω του επιτρεπτού ορίου μόνο για 0,01% του χρόνου.

Τα σύννεφα, η βροχή, το χιόνι και το χαλάζι, αποτελούνται από έναν μεγάλο αριθμό σωματιδίων πάγου και νερού. Κάθε σωματίδιο μπορεί να δράσει σαν μια μικροσκοπική κεραία λήψης, στην οποία επάγεται ένα ηλεκτρικό ρεύμα από τα μικροκύματα που το διαπερνούν. Μέρος της ενέργειας που λαμβάνεται, μπορεί να μετατραπεί σε θερμότητα. Μία σταγόνα μπορεί επίσης να λειτουργήσει σαν κεραία λήψης και να επανειπέμψει το σήμα προς όλες τις κατευθύνσεις. Η επίδραση αυτών

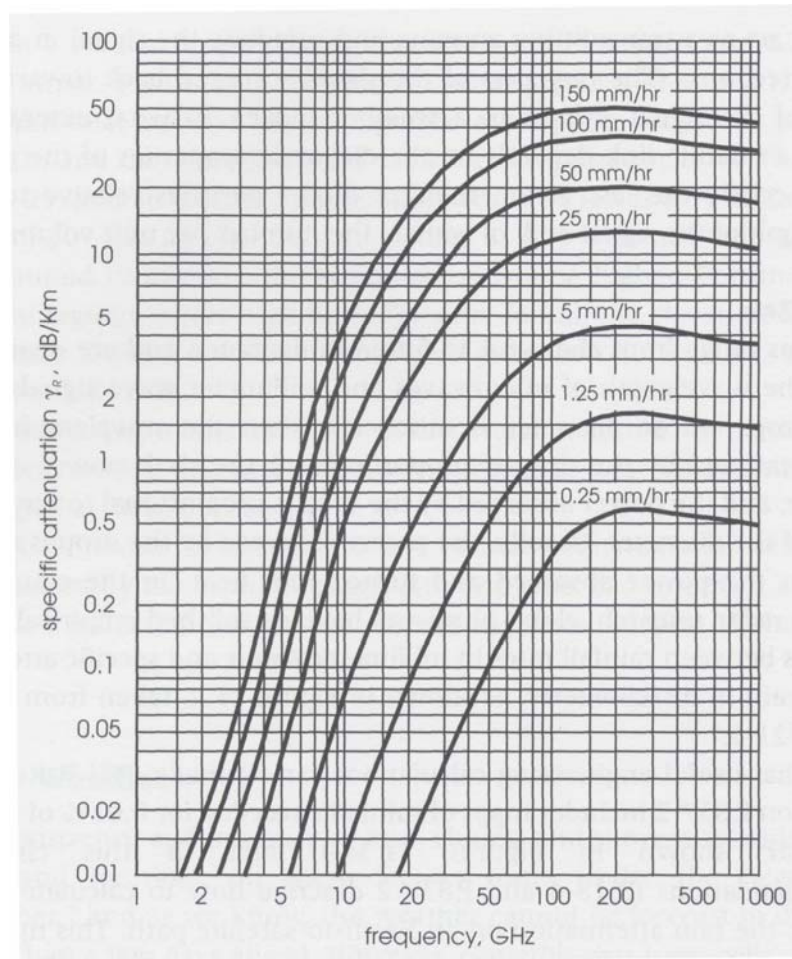


των φαινομένων σε μια δορυφορική ζεύξη εξαρτάται από τις διηλεκτρικές ιδιότητες των σωματιδίων, το μέγεθός τους σχετικά με το μήκος κύματος του σήματος και τον αριθμό τους ανά μονάδα όγκου.

### **5.3.1 Η βροχή**

Οι σταγόνες βροχής κυμαίνονται από περίπου 0,1 έως 5 mm σε διάμετρο, η οποία είναι συγκρίσιμη προς το μήκος κύματος των μικροκυμάτων και των χιλιοστομετρικών κυμάτων. Για σταγόνες νερού των οποίων η διάμετρος είναι πολύ μικρότερη απ' ότι το μήκος κύματος, η ισχύς που υφίσταται σκέδαση από τη σταγόνα είναι ανάλογη της έκτης δύναμης της διαμέτρου και η ισχύς που απορροφάται από τη σταγόνα είναι ανάλογη της τρίτης δύναμης της διαμέτρου. Συνήθως, η ισχύς που υφίσταται σκέδαση από τη σταγόνα είναι πολύ μικρότερη από την ισχύ που απορροφάται και μετατρέπεται σε θερμότητα. Εμπειρικές σχέσεις μεταξύ ρυθμού βροχόπτωσης (σε mm/ώρα) και ειδικής εξασθένησης λόγω βροχής (σε dB/Km), παρέχονται από τη Διεθνή Συμβουλευτική Επιτροπή Ραδιοεπικοινωνιών (CCIR) όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2 (Αναφορά 721-2).

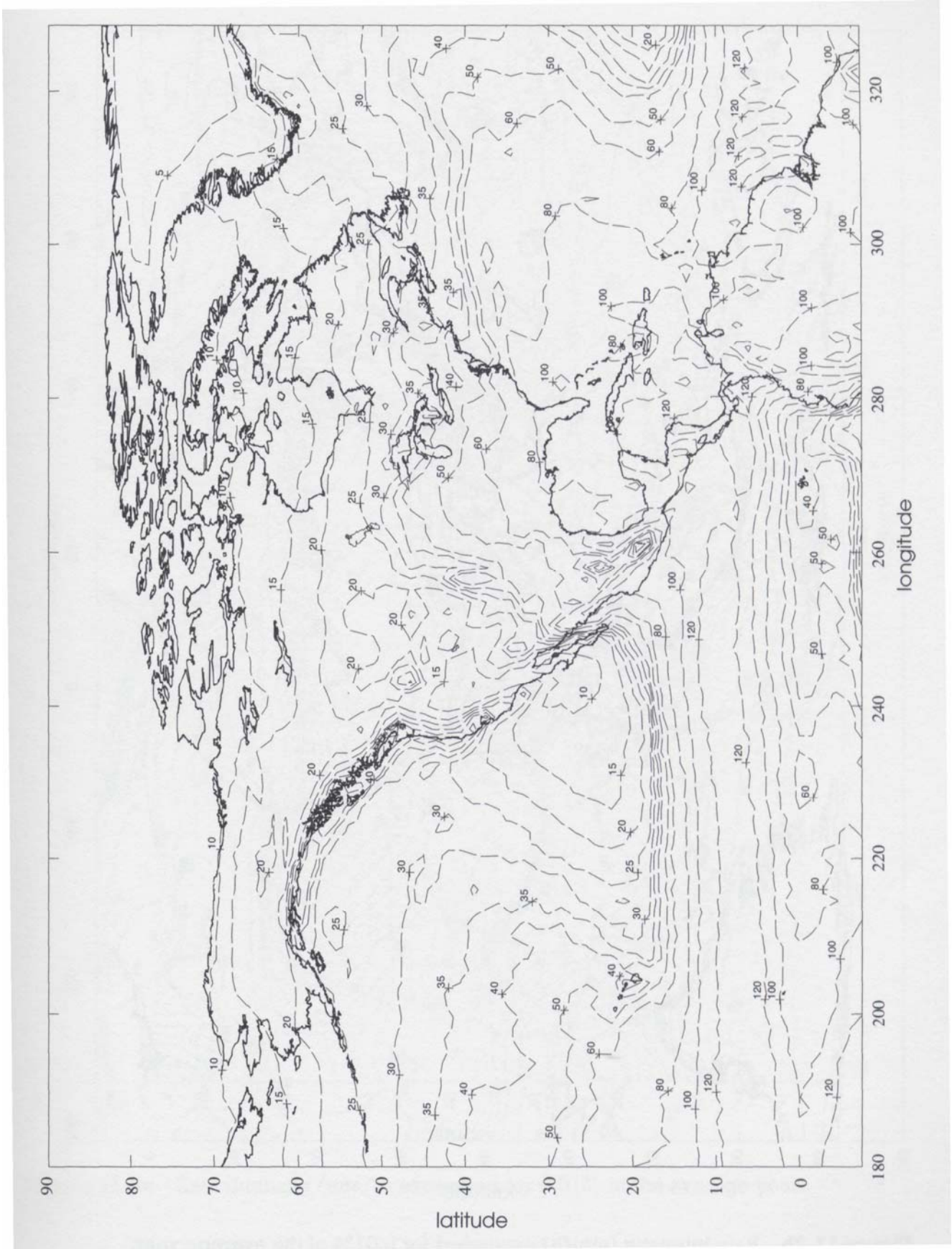
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΙΟΝΟΣΦΑΙΡΑΣ  
ΣΤΙΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΖΕΥΞΕΙΣ



**Σχήμα 5.1:** Ειδική εξασθένιση λόγω βροχής συναρτήσει της συχνότητας, για διάφορους ρυθμούς βροχόπτωσης.

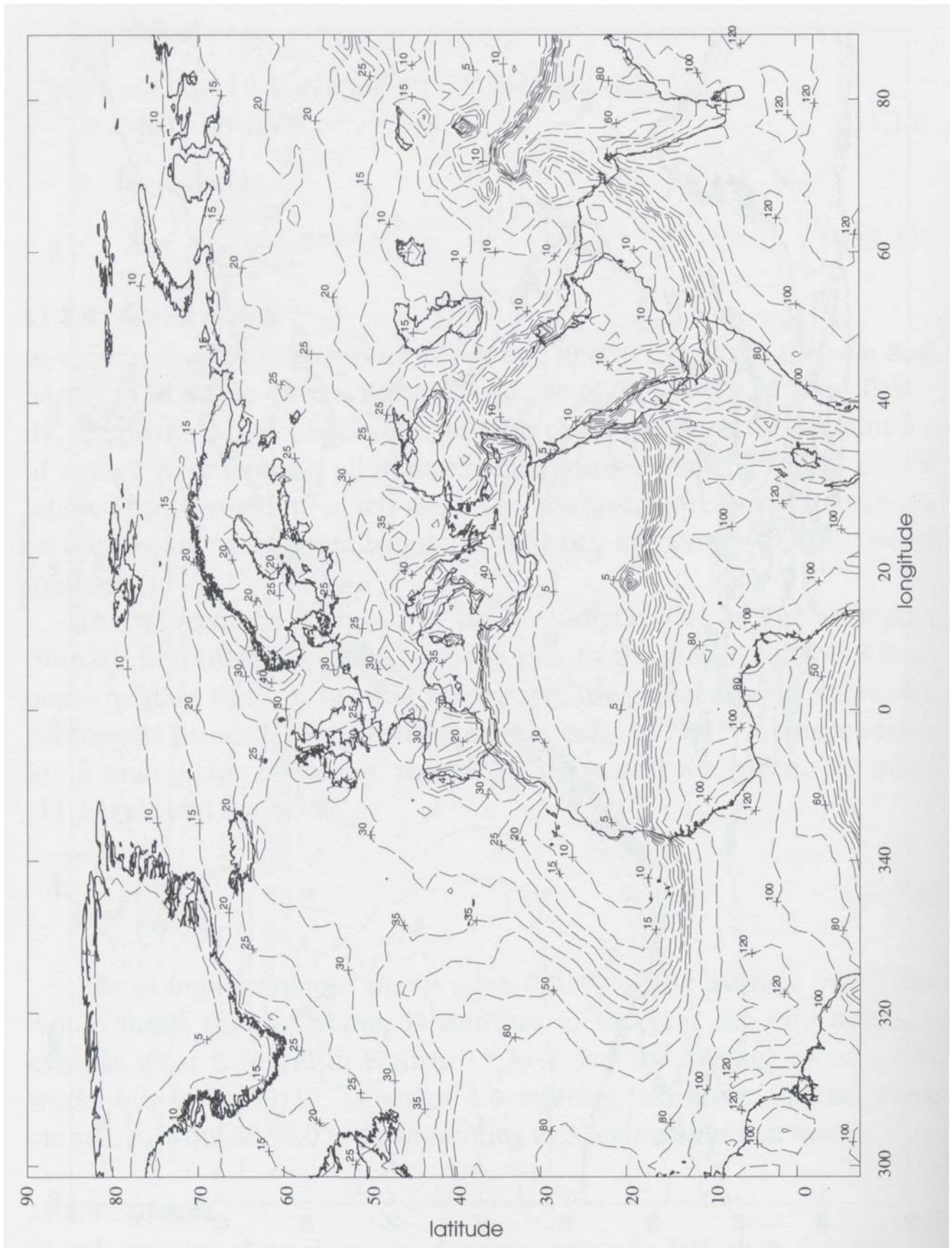
Η Σύσταση ITU-R P. 837-2 της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (ITU) περιλαμβάνει χάρτες για όλες τις περιοχές της Γης, με ρυθμούς βροχόπτωσης που ξεπερνιούνται για 0,01% ενός τυπικού έτους (σχήματα 5.3.α – 5.3.στ).

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΙΟΝΟΣΦΑΙΡΑΣ  
ΣΤΙΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΖΕΥΞΕΙΣ



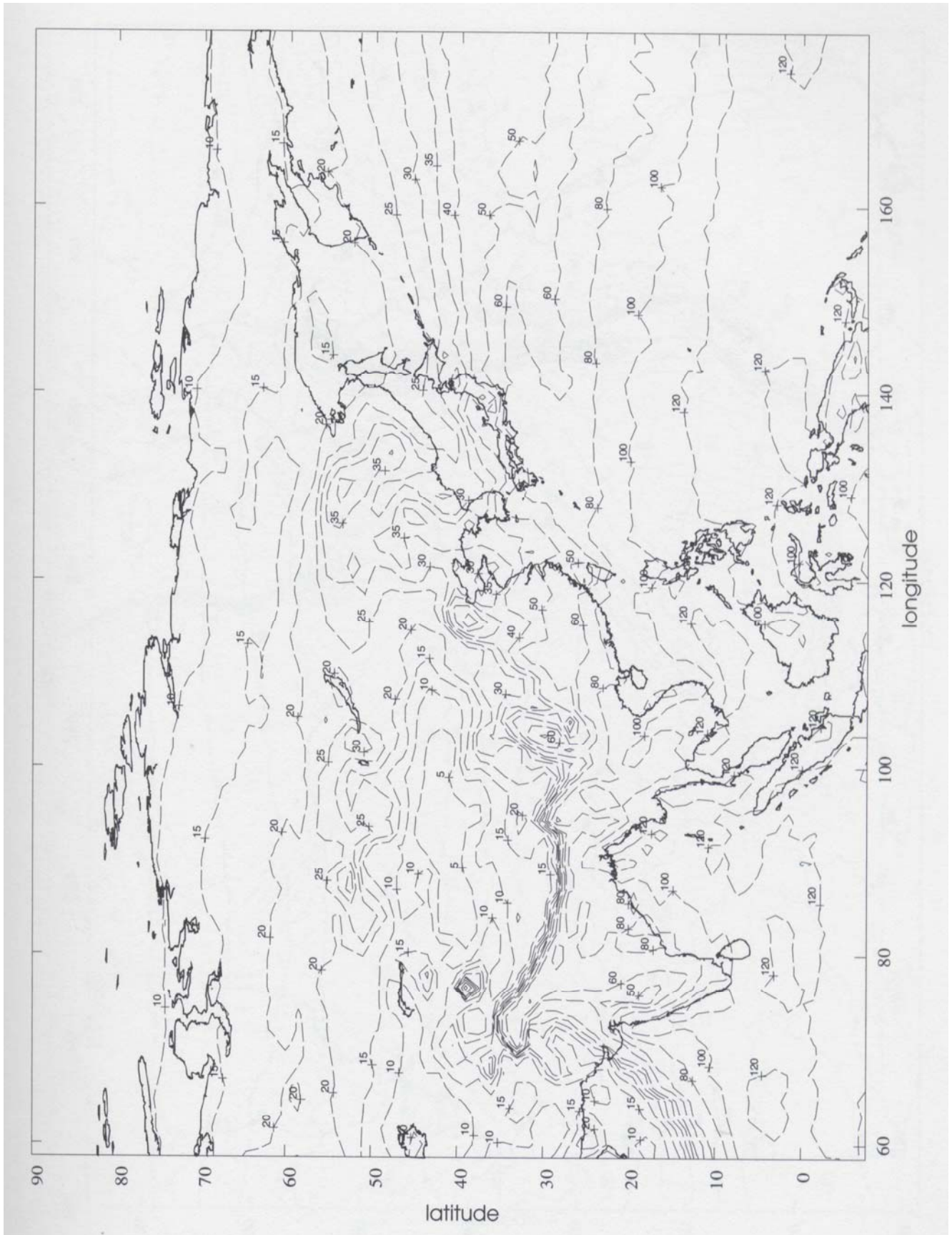
Σχήμα 5.3.α: Ένταση βροχής (mm/h) που ξεπερνιέται για 0,01% του μέσου έτους.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΙΟΝΟΣΦΑΙΡΑΣ  
ΣΤΙΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΖΕΥΞΕΙΣ



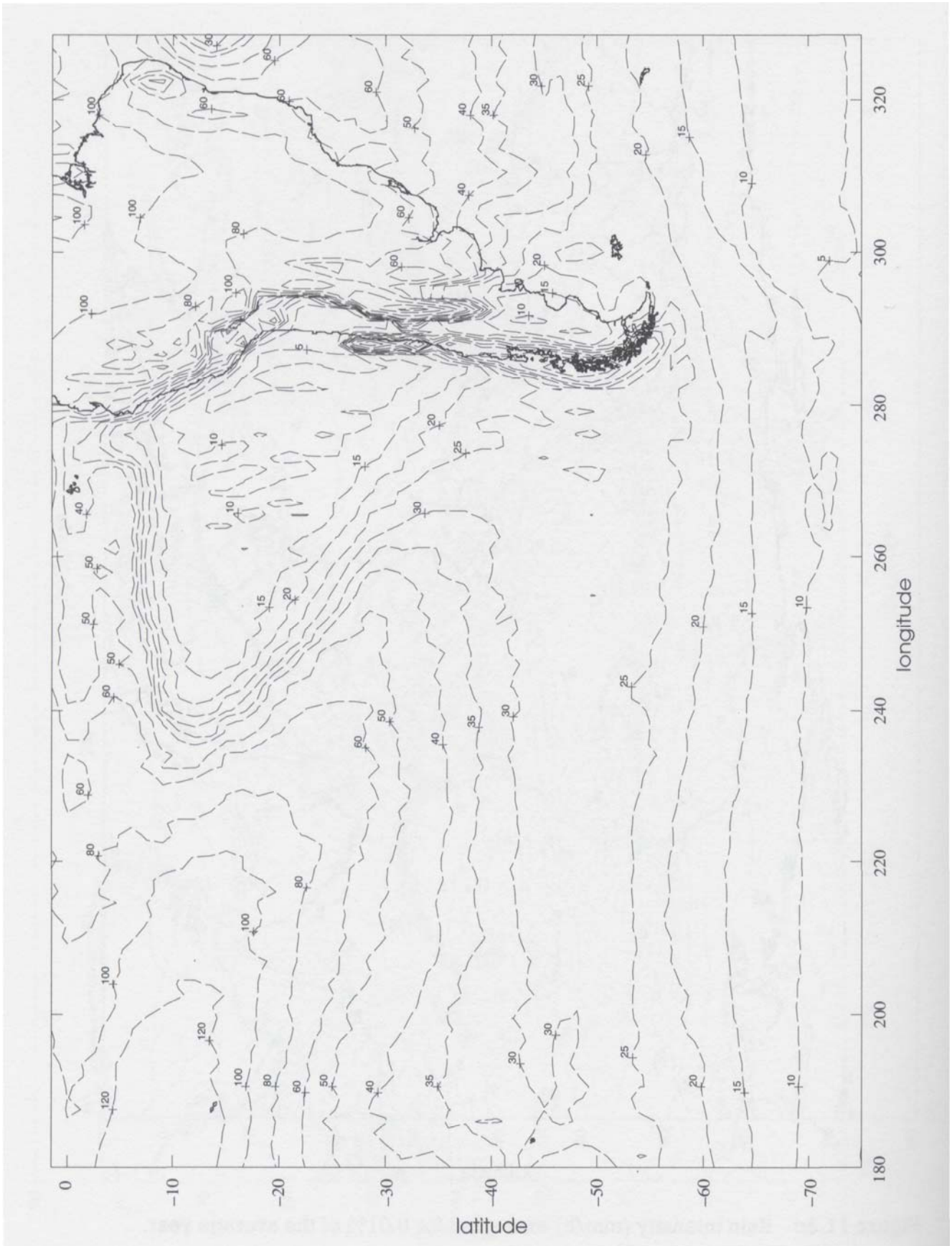
Σχήμα 5.3.β: Ένταση βροχής (mm/h) που ξεπερνάται για 0,01% του μέσου έτους.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΙΟΝΟΣΦΑΙΡΑΣ  
ΣΤΙΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΖΕΥΞΕΙΣ



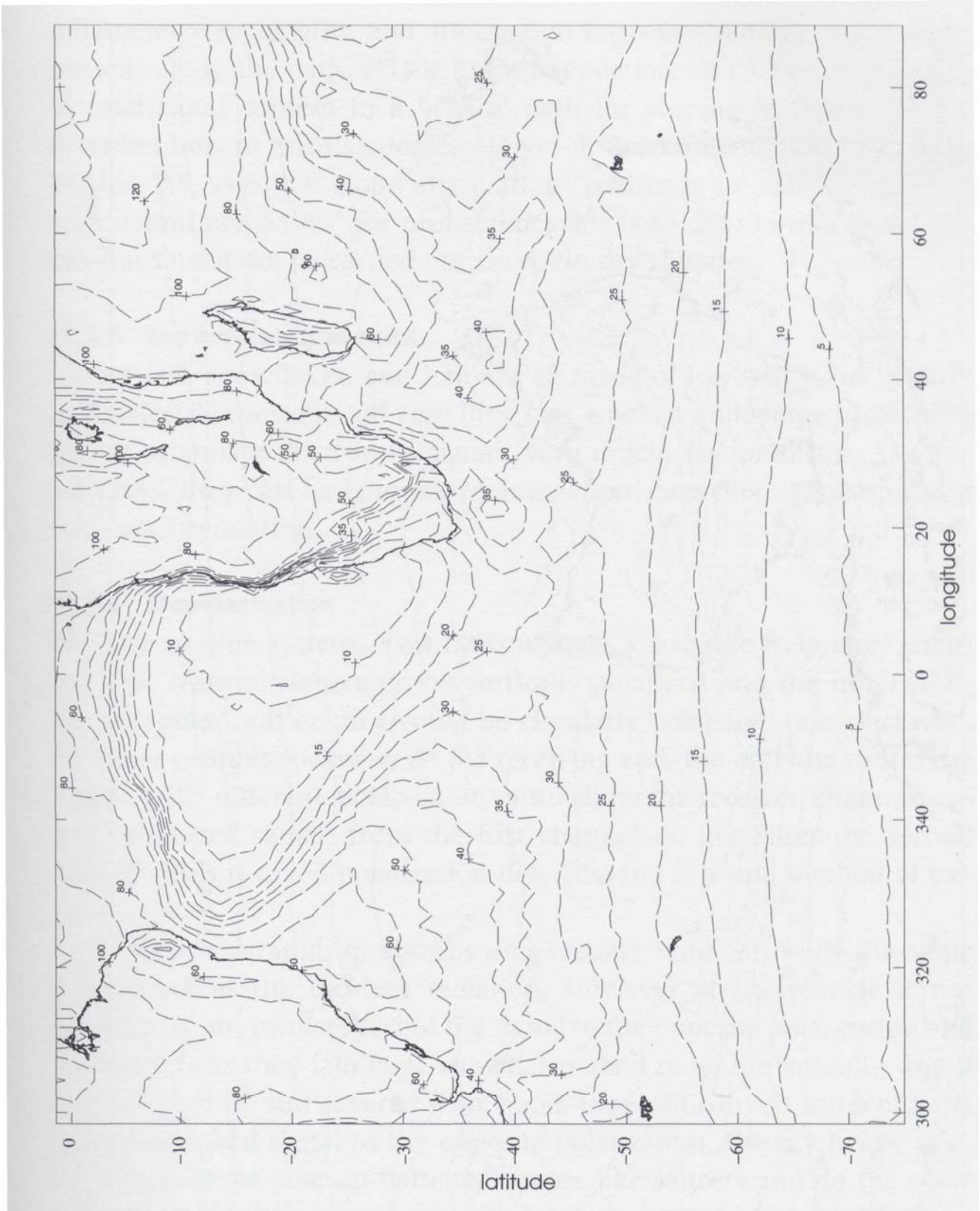
Σχήμα 5.3.γ: Ένταση βροχής (mm/h) που ξεπερνιέται για 0,01 % του μέσου έτους.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΙΟΝΟΣΦΑΙΡΑΣ  
ΣΤΙΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΖΕΥΞΕΙΣ



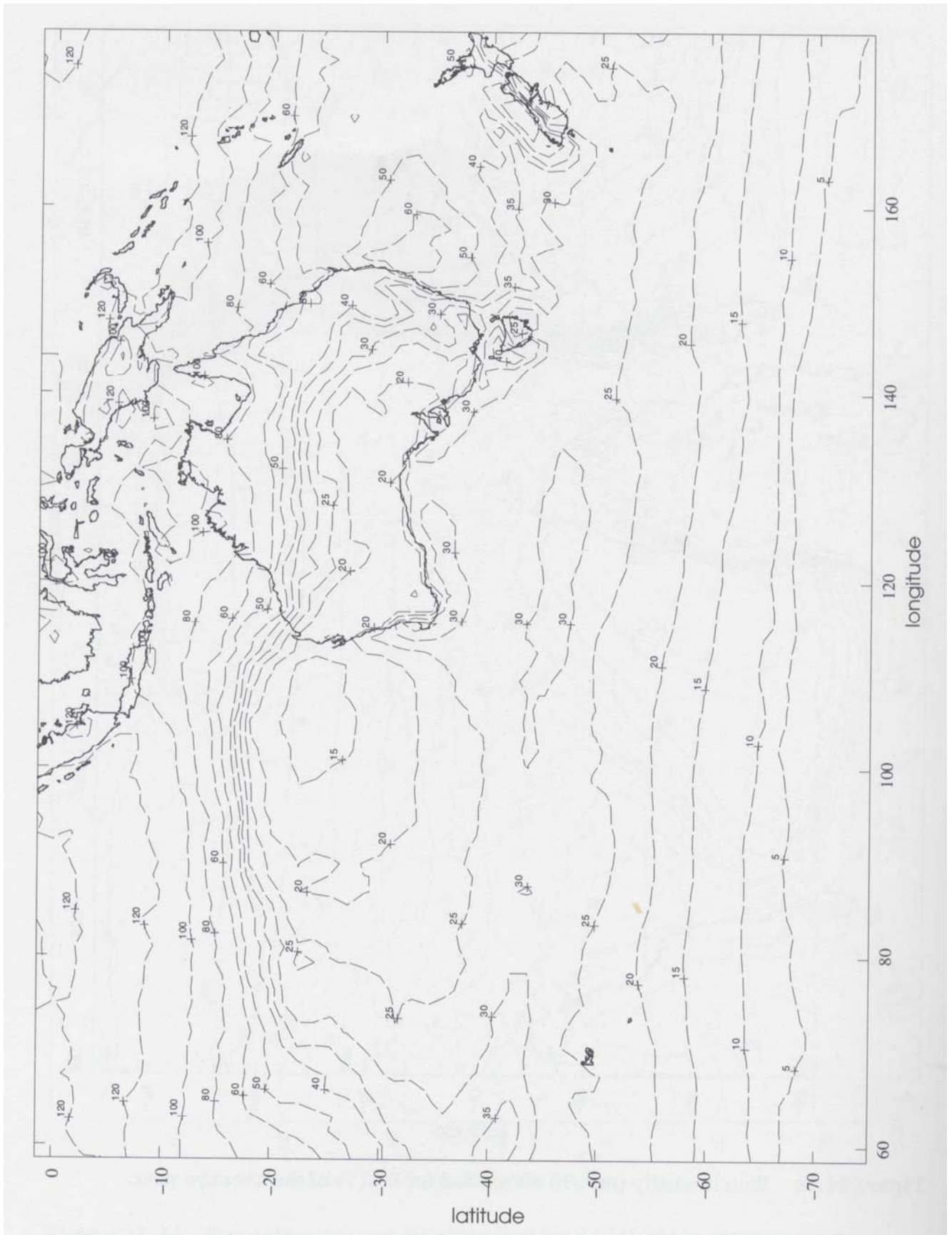
Σχήμα 5.3.δ: Ένταση βροχής (mm/h) που ξεπερνιέται για 0,01% του μέσου έτους.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΙΟΝΟΣΦΑΙΡΑΣ  
ΣΤΙΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΖΕΥΞΕΙΣ



Σχήμα 5.3.ε: Ένταση βροχής (mm/h) που ξεπερνιέται για 0.01% του μέσου έτους.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΙΟΝΟΣΦΑΙΡΑΣ  
ΣΤΙΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΖΕΥΞΕΙΣ



Σχήμα 5.3.στ: Ένταση βροχής (mm/h) που ξεπερνιέται για 0,01% του μέσου έτους.



### 5.3.2 Εξασθένιση λόγω βροχής που ξεπερνιέται για 0,01% ενός μέσου έτους

Οι Συστάσεις P.618-6 και P.839-2 της ITU-R περιγράφουν τον υπολογισμό της εξασθένισης του σήματος λόγω βροχής στη διαδρομή Γης - δορυφόρου. Τα δεδομένα που απαιτούνται είναι τα εξής:

- Συχνότητα,  $f$  (GHz)
- Γεωγραφικό πλάτος του επίγειου σταθμού  $\varphi$  (μοίρες, θετικό για βόρειο γεωγραφικό πλάτος, αρνητικό για νότιο).
- Ύψος του σταθμού υπεράνω του επιπέδου της θάλασσας  $H_0$  (Km)
- Γωνία ανύψωσης από τον επίγειο σταθμό προς το δορυφόρο  $\varphi$  (μοίρες)
- Ισοδύναμη ακτίνα της Γης ( $R_{Γ,ισοδ}=8500$  Km)

Τα βήματα που ακολουθούνται στον υπολογισμό είναι τα εξής:

#### 1) Υπολογισμός ύψους της βροχής $h_R$ (Km)

Στο Βόρειο Ημισφαίριο:

$$\text{Αν γεωγραφικό πλάτος } \Lambda < 23^0, H = 5,0 \quad (5.1\alpha)$$

$$\text{Αν γεωγραφικό πλάτος } \Lambda \geq 23^0, H = 5,0 - 0,075 (\Lambda - 23) \quad (5.1\beta)$$

Στο Νότιο Ημισφαίριο:

$$\text{Αν } |\Lambda| < 21^0, H = 5,0 \quad (5.1\gamma)$$

$$\text{Αν } 21^0 < |\Lambda| < 71^0, H = 5,0 - 0,1 (|\Lambda| - 21) \quad (5.1\delta)$$

$$\text{Αν } 71^0 < |\Lambda|, H = 0 \quad (5.1\epsilon)$$

#### 2) Υπολογισμός μήκους κεκλιμένης διαδρομής της βροχής $L_s$ (Km)

$$\text{Αν } \varphi > 5^0, L_a = \frac{(H - H_0)}{\sin \phi} \quad (5.2\alpha)$$

Για πολύ χαμηλές γωνίες ανύψωσης, χρησιμοποιείται μια περισσότερο προσεγγιστική εξίσωση που λαμβάνει υπόψη την καμπυλότητα της Γης και τη διάθλαση:

$$\text{Αν } \varphi \leq 5^{\circ}, \quad L_a = \frac{2(H - H_0)}{\left[ \sin^2 \phi + \frac{2H - H_0}{R_{\Gamma, \text{ισοδ}}} \right]^{1/2}} + \sin \phi \quad (5.2\beta)$$

- 3) Υπολογισμός της οριζόντιας προβολής του μήκους  $L_D$  (Km) της κειλιμένης διαδρομής της βροχής

$$L_D = L_a \cos \theta \quad (5.3)$$

- 4) Προσδιορισμός της θέσης του επίγειου σταθμού σε έναν από τους χάρτες στα σχήματα 5.3.α–5.3.στ και ανάγνωση του ρυθμού βροχόπτωσης  $R_{0,01}$ , παρεμβάλλοντας μεταξύ των καμπυλών, αν είναι απαραίτητο.

- 5) Για το υπολογισμό της ειδικής εξασθένησης  $A_0$  χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της Σύστασης P.838-1 για συχνότητα  $f$ , οι συντελεστές  $k_H$ ,  $k_V$ ,  $a_H$  και  $a_V$  λαμβάνονται από τον πίνακα 5.1. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι συντελεστές  $a$  και  $b$  από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$a = [k_H + k_V + (k_H - k_V) \cos^2 \varphi \cos 2\tau] / 2 \quad (5.4)$$

$$b = [k_H a_H + k_V a_V + (k_H a_H - k_V a_V) \cos^2 \varphi \cos 2\tau] / 2a \quad (5.5)$$

λαμβάνοντας  $\tau=0^{\circ}$  για οριζόντια πόλωση,  $45^{\circ}$  για κυκλική πόλωση και  $90^{\circ}$  για κατακόρυφη πόλωση.

- 6) Υπολογισμός της ειδικής εξασθένησης  $A_0$

$$A_0 = a (R_{0,01})^b \quad (\text{dB/Km}) \quad (5.6)$$

**Πίνακας 5.1:** Συντελεστές που απαιτούνται στον υπολογισμό της ειδικής εξασθένησης.

Συχνότητα (GHz)	$k_H$	$k_V$	$a_H$	$a_V$
1	0.0000387	0.0000352	0.912	0.880
2	0.000154	0.000138	0.963	0.923
4	0.000650	0.000591	1.121	1.075
6	0.00175	0.00155	1.308	1.265
7	0.00301	0.00265	1.332	1.312
8	0.00454	0.00395	1.327	1.310
10	0.0101	0.00887	1.276	1.264
12	0.0188	0.0168	1.217	1.200
15	0.0367	0.0335	1.154	1.128
20	0.0751	0.0691	1.099	1.065
25	0.124	0.113	1.061	1.030
30	0.187	0.167	1.021	1.000
Από Σύσταση ITU-R P.838-1				

7) Υπολογισμός του οριζόντιου συντελεστή μείωσης  $r_{0,01}$

$$r_{0,01} = \frac{1}{1 + 0,78 \sqrt{\frac{L_D A_0}{f}} - 0,38(1 - e^{-2L_D})} \quad (5.7)$$

8) Υπολογισμός του κατακόρυφου συντελεστή προσαρμογής  $v_{0,01}$

Αρχικά γίνεται ο υπολογισμός του  $\xi$  :

$$\xi = \tan^{-1} \left( \frac{H - H_0}{L_D r_{0,01}} \right)$$

Στη συνέχεια γίνεται ο υπολογισμός του  $L_R$ :

$$\text{Αν } \xi > \varphi, \text{ τότε } L_R = \frac{L_D r_{0,01}}{\cos \phi}$$

$$\text{Αν } \xi \leq \varphi, \text{ τότε } L_R = \frac{H - H_0}{\sin \phi}$$

9) Υπολογισμός του συντελεστή  $\chi$

$$\text{Αν } |\Lambda| \geq 36^\circ, \text{ τότε } \chi = 0$$

$$\text{Αν } |\Lambda| < 36^\circ, \text{ τότε } \chi = 36 - |\Lambda|$$

10) Μετατροπή του  $\varphi$  και του  $\chi$  σε ακτίνια και υπολογισμός του  $v_{0,01}$

$$v_{0,01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \phi} \left\{ 31 \left[ 1 - e^{-\frac{\phi}{1+x}} \right] \frac{\sqrt{L_R A_0}}{f^2} - 0,45 \right\}} \quad (5.8)$$

11) Υπολογισμός ισοδύναμου μήκους διαδρομής

$$L_E = L_R v_{0,01} \text{ (Km)} \quad (5.9)$$

12) Προβλεπόμενη εξασθένηση που ξεπερνιέται για 0,01% ενός μέσου έτους

$$A_{0,01} = L_E A_0 \text{ (dB)} \quad (5.10)$$

### 5.3.3 Εξασθένηση που ξεπερνιέται για άλλα ποσοστά του χρόνου

Για συστήματα TVRO, μπορεί να ληφθεί υπόψη ένα ποσοστό μεγαλύτερο του 0,01% ανά έτος (π.χ. 0,5%), ενώ για άλλες εφαρμογές μπορεί να απαιτείται ένα ακόμη μικρότερο ποσοστό. Η εξασθένηση  $A_p$  που υπολογίζεται για πιθανότητα  $p\%$ , (υψηλότερη ή χαμηλότερη από 0,01%), μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας της μέθοδο της Σύστασης ITU-R P.618-6:

1. Υπολογισμός του β

Αν  $p \geq 1\%$  ή  $|\Lambda| \geq 36^\circ$ , τότε  $\beta=0$

Αν  $p \leq 1\%$  ή  $|\Lambda| < 36^\circ$  και  $\varphi > 25^\circ$ , τότε  $\beta = -0,005 (|\Lambda| - 36)$

Διαφορετικά:  $\beta = -0,005 (|\Lambda| - 36) + 1,8 - 4,25 \sin\varphi$  (5.11)

2. Υπολογισμός του χ

$\chi = 0,655 + 0,076 \log(p) - 0,104 \log(A_{0,01}) - \beta(1-p)\sin\varphi$  (5.12)

3. Υπολογισμός του  $A_p$

$A_p = A_{0,01} (p/0,01)^{-x}$  (dB) (5.13)

### 5.3.4 Ο χειρότερος μήνας

Σε κάποιες γεωγραφικές περιοχές, η βροχή εμφανίζεται κυρίως σε έναν ή δύο μήνες του έτους και ελάχιστα στους υπόλοιπους. Παρ' όλο που ένα ποσοστό μη λειτουργίας (outage) μιας δορυφορικής ζεύξης της τάξης του 0,01% (δηλαδή διαθεσιμότητα 99,99%) φαίνεται αποδεκτό, αν τα 53 λεπτά μη λειτουργίας εμφανιστούν σε ένα μόνο μήνα αντί να μοιραστούν σε ένα ολόκληρο έτος, θα υπήρχε μία σοβαρή διακοπή στη ζεύξη. Γι' αυτό το λόγο, οι υπολογισμοί μη λειτουργίας βασίζονται ορισμένες φορές, σε στατιστικά στοιχεία βροχόπτωσης για τον "χειρότερο μήνα".

Το ποσοστό μη λειτουργίας  $P_w$  που ξεπερνιέται για τον χειρότερο μήνα μπορεί να υπολογισθεί από το ποσοστό μη λειτουργίας  $p$  για το έτος, με βάση τη Σύσταση ITU-R P.841-1. Η παρακάτω εξίσωση ισχύει για  $p < 3\%$ :

$$P_w = \left(\frac{p}{0,3}\right)^{0,87} \quad (5.14)$$

### **5.3.5 Νέφη**

Τα σύννεφα αποτελούνται από μικρά σταγονίδια νερού, τυπικά μικρότερα από 0,1 mm σε διάμετρο, τα οποία πέφτουν πολύ αργά στον αέρα ή ανυψώνονται αν ο αέρας ανυψώνεται προς τα πάνω. Συνεπώς, τα σταγονίδια είναι μικρότερα σε διάμετρο από ένα μήκος κύματος, ακόμα και σε χιλιοστομετρικά μήκη κύματος και η εξασθένιση είναι ανάλογη με το περιεχόμενο του υγροποιημένου νερού κατά μήκος της διαδρομής. Η Σύσταση ITU-R P.840-3 περιλαμβάνει χάρτες του συνολικού περιεχομένου των νεφών σε μια κατακόρυφη διαδρομή, για διάφορες πιθανότητες και περιγράφει πως υπολογίζονται οι απώλειες. Παρ' όλ' αυτά, η Σύσταση P.618-6 (Παράγραφος 2.5) αναφέρει ότι η εξασθένιση λόγω νεφών "περιλαμβάνεται ήδη στην πρόβλεψη της εξασθένισης λόγω βροχής" για πιθανότητες μικρότερες από 1 % και έτσι οι υπολογισμοί για τα σύννεφα δεν είναι απαραίτητοι, εκτός από τα ξηρά κλίματα.

### **5.3.6 Κρύσταλλοι πάγου και χιόνι**

Οι κρύσταλλοι πάγου, οι χιονονιφάδες και το χαλάζι αποτελούνται από πάγο, ο οποίος έχει μια σχετικά χαμηλή διηλεκτρική σταθερά και πολύ λίγες απώλειες, ώστε ακόμα και οι σχετικά μεγάλες χιονονιφάδες να μην εξασθενούν πολύ τα μικροκυματικά σήματα. Για την πρόβλεψη των απωλειών σε μια δορυφορική διαδρομή, μπορούν να αγνοηθούν. Το λιωμένο χιόνι όμως, ενσωματώνεται στην εξασθένιση λόγω βροχής.

### **5.3.7 Μεταβολή της πόλωσης (Depolarisation)**

Σε μερικά δορυφορικά συστήματα, δυο μεταδόσεις μοιράζονται ένα κανάλι συχνότητας: η μια μετάδοση μπορεί να είναι κατακόρυφα πολωμένη και η άλλη οριζόντια πολωμένη, ή θα μπορούσαν να είναι κυκλικά πολωμένες, η μια δεξιόστροφα και η άλλη αριστερόστροφα. Κατά τη λήψη, η κεραία λήψης κατευθύνει τα σήματα με διαφορετικές πολώσεις σε διαφορετικά κανάλια του

δεικτών, ώστε τα ανεπιθύμητα σήματα από το πρώτο κανάλι να μην εισέρχονται στο δεύτερο κανάλι. Αυτή η τεχνική ονομάζεται διαφορική λήψη πολικότητας και είναι μια μέθοδος επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας.

Μια σφαιρική σταγόνα βροχής μπορεί να απορροφήσει και να σκεδάσει την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που προσπίπτει σ' αυτήν, με την ίδια πόλωση όπως και η προσπίπτουσα ακτινοβολία. Παρ' όλ' αυτά, αν το σωματίδιο δεν είναι σφαιρικό, μπορεί να μετατρέψει μέρος του σήματος στην αντίθετη πόλωση και να το επανειπέμψει. Όπως πέφτουν, οι μεγάλες χιονονιφάδες τείνουν να απλώνονται οριζόντια και αν λιώσουν και καλυφθούν με νερό, μπορούν να αλλάξουν ένα μέρος του κυκλικά πολωμένου σήματος, στην αντίθετη πόλωση. Σε πολύ δυνατή βροχοπτώση, οι μεγαλύτερες σταγόνες λαμβάνουν μια επίπεδη μορφή και προκαλούν το ίδιο αποτέλεσμα. Δεν μετατρέπουν την κατακόρυφη πόλωση σε οριζόντια (ή την οριζόντια σε κατακόρυφη) εκτός και αν τα σωματίδια περιστραφούν ή αποκτήσουν μια κλίση από ρεύματα αέρα: μια κλίση  $9^{\circ}$  θα μετατρέψει το 10% της σκεδαζόμενης ισχύος στην άλλη πόλωση.

Ο βαθμός στον οποίο δύο σήματα με διαφορετικές πολώσεις παραμένουν διαχωρισμένα, καλείται *διάκριση διασταυρούμενης πόλωσης* (Cross-Polarization Discrimination-XPD). Η XPD είναι ο λόγος της ισχύος του σήματος που εισέρχεται στο σωστό κανάλι, προς την ισχύ που εισέρχεται στο λανθασμένο κανάλι και μετράται σε dB. Χωρίς καθόλου βροχοπτώση ή με παρουσία μόνο σφαιρικών σωματιδίων στη διαδρομή διάδοσης (και υποθέτοντας τέλει εξοπλισμό), η XPD θα έπρεπε να είναι άπειρη. Όσο χαμηλότερη είναι η τιμή της, τόσο περισσότερο σήμα αποστέλλεται στο λανθασμένο κανάλι. Η Σύσταση ITU-R, P.618-6 (Παράγραφος 4) περιλαμβάνει εξισώσεις για την πρόβλεψη των πιθανοτήτων της XPD ως συνάρτηση της εξασθένησης λόγω βροχής, της συχνότητας, της πόλωσης και της γωνίας ανύψωσης για συχνότητες από 8 ως 35 GHz.

### **5.3.8 Διαφορική λήψη χώρου (Site diversity)**

Αν ένας επίγειος σταθμός χρησιμοποιείται για σημαντικούς εμπορικούς ή στρατιωτικούς σκοπούς όπου μια διακοπή λειτουργίας είναι πολύ σοβαρή η πιθανότητα διακοπής μπορεί να μειωθεί τοποθετώντας έναν δεύτερο επίγειο σταθμό μερικά χιλιόμετρα μακριά και χρησιμοποιώντας όποιον από τους δυο έχει καλύτερο σήμα τη συγκεκριμένη στιγμή. Αυτό συμβαίνει, επειδή η έντονη βροχόπτωση είναι συνήθως ένα τοπικό φαινόμενο και πιθανόν να μην έχει επίδραση και στους δυο σταθμούς την ίδια χρονική στιγμή.

Η σύνδεση μεταξύ των δύο επίγειων σταθμών πρέπει να γίνεται με καλώδιο και όχι με ασύρματη μικροκυματική ζεύξη (εκτός αν πρόκειται για συχνότητες κάτω των 10 GHz), διαφορετικά η βροχή που υποβαθμίζει τον έναν σταθμό είναι πολύ πιθανόν να υποβαθμίσει και το επιθυμητό σήμα που φτάνει στον άλλο σταθμό.

### **5.3.9 Αυξομείωση ισχύος του σήματος (Scintillation)**

Ο δείκτης διάθλασης του αέρα ποικίλει ελαφρώς με τη συγκέντρωση των υδρατμών. Επειδή η υγρασία μπορεί να διαφοροποιείται από τοποθεσία σε τοποθεσία, “όγκοι” υγρού αέρα μπορούν να συγκεντρώσουν ή να αποκλίνουν το μικροκυματικό σήμα. Οι όγκοι αυτοί κινούνται με την ταχύτητα του ανέμου στα χαμηλότερα χιλιόμετρα του ύψους της ατμόσφαιρας και μπορούν να προκαλέσουν αύξηση ή μείωση του σήματος μέσα σε χρονική διάρκεια μερικών δευτερολέπτων. Το φαινόμενο αυτό αποκαλείται *αυξομείωση της ισχύος του σήματος* (scintillation). Μπορεί να συμβεί και σε συνθήκες «καθαρού αέρα» αλλά είναι περισσότερο αισθητό με σύννεφα και βροχή και ιδιαίτερα στις υψηλότερες συχνότητες.

Οι μεταβολές του δείκτη διάθλασης μπορούν να διαχωρίσουν το σήμα σε δυο ή και περισσότερες διαδρομές. Αυτά τα σήματα μπορούν να φτάσουν στο δέκτη εκτός φάσης το ένα με το άλλο, με αποτέλεσμα να υποστούν ακύρωση φάσης, η οποία μπορεί να προκαλέσει βαθιές διαλείψεις. Αυτό είναι γνωστό ως φαινόμενο των *πολλαπλών οδεύσεων* (multipath).



#### 5.4 Θερμοκρασία θορύβου

Εκτός από τις απώλειες στην ισχύ του σήματος, η εξασθένηση λόγω βροχής προκαλεί και αύξηση του θορύβου στην καθοδική ζεύξη. Κάθε στοιχείο που εισάγει εξασθένηση στη διαδρομή του σήματος προσθέτει τη δική του συνεισφορά σε θόρυβο. Αν η εξασθένηση λόγω βροχής είναι για παράδειγμα  $A=2,0$  dB, τότε ο συντελεστής απώλειας είναι  $L=10^{A/10}=1,58$ . Αν η θερμοκρασία βροχής είναι  $T_R=290^0$  K και η θερμοκρασία θορύβου της κεραίας απουσία βροχής είναι  $T_A=20^0$ K, τότε η θερμοκρασία θορύβου της κεραίας με βροχή είναι:

$$T_{AR} = \frac{T_A + T_R(L-1)}{L} = \frac{20 + 290 \cdot 0,58}{1,58} = 119^0 \text{ K}$$

Σ' αυτή την περίπτωση, η βροχή έχει αυξήσει τη θερμοκρασία του επίγειου σταθμού κατά  $99^0$  K και έχει μειώσει το σήμα κατά 2 dB. Κατά την ανοδική ζεύξη, η εξασθένηση λόγω βροχής δεν αυξάνει την θερμοκρασία θορύβου του δορυφορικού δέκτη – μειώνει μόνο την ένταση του λαμβανόμενου σήματος.

#### 5.5 Η ιονόσφαιρα

Η ιονόσφαιρα αποτελείται από ένα στρώμα ύψους μεταξύ 80 και 150 Km, όπου η πυκνότητα της ατμόσφαιρας είναι πολύ χαμηλή. Η ακτινοβολία από τον ήλιο ιονίζει μερικά μόρια και χρειάζεται πολύς χρόνος γι' αυτά να εξουδετερωθούν από άλλα ιόντα. Η συγκέντρωση ιόντων μεταβάλλεται με το ύψος και επίσης με την ώρα της ημέρας, την εποχή του έτους και σε πιο τμήμα του 11χρονου κύκλου της ηλιακής κηλίδας είναι ο ήλιος. Για συχνότητες μέχρι 50 MHz, η ιονόσφαιρα ανακλά τα ραδιοκύματα, γεγονός που επιτρέπει τα “μακρά” και “μεσαία” κύματα (30 KHz-3 MHz) να εκπνευθούν πέρα από τη γραμμή οπτικής επαφής. Η συμπεριφορά της ιονόσφαιρας μπορεί να προβλεφθεί αρκετά καλά, έτσι ώστε η μετάδοση στα “βραχεία” κύματα (3-30 MHz) μπορεί να γίνει σε μεγάλες αποστάσεις.

### **5.5.1 Περιστροφή Faraday**

Σε συχνότητες που χρησιμοποιούνται για δορυφορική μετάδοση (π.χ. πάνω από 1 GHz) τα σήματα υπόκεινται σε αμελητέα διάθλαση (μικρότερη από  $0,01^{\circ}$  σε  $30^{\circ}$  ανύψωση). Παρ' όλ' αυτά, η ιονόσφαιρα έχει κάποια επίδραση. Το μαγνητικό πεδίο της γης διαπερνά την ιονόσφαιρα και τα ιόντα που υπόκεινται στο εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο ενός σήματος, έχουν την τάση να περιστρέφονται γύρω από το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την επιβράδυνση του σήματος. Το Global Positioning System (GPS), το οποίο χρησιμοποιεί τη ζώνη συχνοτήτων 1-2 GHz και που εξαρτάται από τη μέτρηση του χρόνου κατά τον οποίο ταξιδεύει το σήμα, πρέπει να λάβει υπόψη αυτό το φαινόμενο.

### **5.5.2 Ιονοσφαιρική αυξομείωση της ισχύος του σήματος (Ionospheric scintillation)**

Οι ανωμαλίες στην ατμόσφαιρα μπορούν να προκαλέσουν αυξομείωση της ισχύος του σήματος παρόμοια μ' αυτή που προκαλείται από υδρατμούς αλλά κυρίως για συχνότητες 4 GHz και κάτω. Οι διαλείψεις που μπορούν να συμβούν ποικίλουν ευρέως με το χρόνο και τον τόπο. Στη ζώνη-L (1-2 GHz), κατά το μέγιστο της ηλιακής κηλίδας, κοντά στον Ισημερινό μετά το σκοτάδι και μέχρι τα μεσάνυχτα, το βάθος της διάλειψης μπορεί να είναι μεγαλύτερο από 15 dB και στην Αρκτική μπορεί να είναι μεγαλύτερο από 5 dB. Ωστόσο, το βάθος της διάλειψης μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας, έτσι ώστε στα 4 GHz είναι αισθητά μικρότερο.

# 6 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΖΕΥΞΕΩΝ

## 6.1 Παράγοντες που επηρεάζουν τις δορυφορικές ζεύξεις

Οι νέες υπηρεσίες επικοινωνιών απαιτούν τη μετάδοση μεγάλου όγκου πληροφοριών που αυξάνει διαρκώς. Το γεγονός ότι οι χαμηλές μικροκυματικές φέρουσες συχνότητες είναι κατειλημμένες από τα επίγεια μικροκυματικά συστήματα επικοινωνιών σε συνδυασμό με την απαίτηση για μεγαλύτερο εύρος ζώνης συχνοτήτων οδηγεί στη χρησιμοποίηση συχνοτήτων υψηλότερων των 10GHz. Η λειτουργία των δορυφορικών συστημάτων επικοινωνιών στις ζώνες Ku (14/12GHz) και Ka (30/20GHz) δημιουργεί μικρότερες παρεμβολές σε επίγεια μικροκυματικά συστήματα και ευνοεί τη χρήση κεραιών μεγαλύτερης κατευθυντικότητας. Επιπλέον, παρέχεται η δυνατότητα για ανάπτυξη ανταγωνιστικών υπηρεσιών δρομολόγησης τηλεπικοινωνιακής κίνησης με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, επιτρέπεται η διασύνδεση με ενσύρματα δίκτυα οπτικών ινών πολύ υψηλών ταχυτήτων μετάδοσης δεδομένων και, συνεπώς, καθίσταται δυνατή η επιτυχής ολοκλήρωση των υπηρεσιών υψηλών απαιτήσεων ακόμα και σε διηπειρωτικές ζεύξεις.

Ένας σημαντικός παράγοντας που σχετίζεται με την απαίτηση για ικανοποίηση αυξημένης τηλεπικοινωνιακής ζήτησης είναι το πλήθος των διαθέσιμων θέσεων στη γεωστατική τροχιά. Ολοένα και περισσότεροι κρατικοί και ιδιωτικοί φορείς επιδιώκουν την εκτόξευση και λειτουργία τηλεπικοινωνιακών δορυφόρων στη γεωστατική τροχιά, γεγονός που οδηγεί στην τοποθέτηση των γεωστατικών δορυφόρων σε μικρότερες μεταξύ τους γωνιακές αποστάσεις. Ως αποτέλεσμα αυτού ανακύπτουν προβλήματα παρεμβολών σε συστήματα που χρησιμοποιούν γειτονικούς δορυφόρους και έχουν κοινή περιοχή στο φάσμα συχνοτήτων. Η μελέτη των προβλημάτων αυτής της κατηγορίας έχει ως στόχο, την πλέον αποδοτική διαχείριση του διαθέσιμου γεωστατικού χώρου με ταυτόχρονη εξασφάλιση επικοινωνιών υψηλής ποιότητας.

Το μειονέκτημα της χρησιμοποίησης συχνοτήτων υψηλότερων των 10 GHz, είναι οι δυσμενείς επιπτώσεις στη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που οφείλονται στη δομή της ατμόσφαιρας και τα μετεωρολογικά φαινόμενα. Στον πίνακα 6.1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι δυσμενείς επιδράσεις στη διάδοση υψίσυχνων μικροκυματικών κυμάτων καθώς και τα επίπεδα των επιδράσεων αυτών και η εξάρτησή τους από τη συχνότητα.

**Πίνακας 6.1:** Εξάρτηση από τη συχνότητα των δυσμενών επιδράσεων στη διάδοση μικροκυμάτων.

ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ	ΕΞΑΡΤΗΣΗ
Απόσβεση λόγω ατμοσφαιρικών αερίων	Αυξάνει με τη συχνότητα. Γραμμή απορρόφησης λόγω υδρατμών στη συχνότητα 22,3 GHz
Αυξομείωση ισχύος του σήματος	Ενεργός τιμή (dB) ανάλογη της $f^{7/12}$
Απόσβεση λόγω βροχής	Αυξάνει σε dB ανάλογα προς την $f^2$
Μεταβολή πόλωσης λόγω βροχής	Αυξάνει με τη συχνότητα

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι ο πλέον δυσμενής μηχανισμός διάλειψης για λειτουργία σε συχνότητες άνω των 10 GHz είναι οι βροχοπτώσεις. Η βροχή προκαλεί απορρόφηση αλλά και σκέδαση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με αντίστοιχες επιπτώσεις απόσβεση και μεταβολή πόλωσης. Το φαινόμενο αυτό επιδρά αρνητικά στην ποιότητα επικοινωνίας που επιτυγχάνει το δορυφορικό σύστημα, ιδιαίτερα σε γεωγραφικές περιοχές με δυσμενείς από πλευράς βροχοπτώσεων κλιματολογικές συνθήκες. Η μελέτη των επιπτώσεων της βροχής αντιμετωπίζεται με στοχαστικό τρόπο, αφού πρόκειται για τυχαία διαδικασία, τόσο ως προς το χώρο, όσο και ως προς το χρόνο.

## 6.2 Αξιοπιστία και διαθεσιμότητα δορυφορικών ζεύξεων

Η ποιότητα των ψηφιακών συστημάτων δορυφορικών επικοινωνιών αξιολογείται από τη διαθεσιμότητα και την αξιοπιστία που επιτυγχάνουν. Η διαθεσιμότητα εκφράζεται από το χρονικό ποσοστό στη διάρκεια ενός έτους κατά το οποίο ο δέκτης διατηρεί το συγχρονισμό του. Για να διατηρείται ο συγχρονισμός, ο ρυθμός λανθασμένων bits (Bit Error Rate, BER) δεν πρέπει να υπερβαίνει μια στάθμη κατωφλίου  $BER_{TH}$  που συνήθως λαμβάνεται ίση προς  $10^{-3}$ . Η διαθεσιμότητα ενός συστήματος εκφράζεται ισοδύναμα από το χρόνο διακοπής της λειτουργίας του,  $T_{out}$  ή από την πιθανότητα διακοπής  $P_{out}$ . Με βάση τα προηγούμενα, ισχύουν οι σχέσεις

$$P_{out} = \text{Πιθανότητα (BER} > \text{BER}_{TH}) \quad (6.1)$$

$$T_{out} = 525600 P_{out} \text{ (min/year)} \quad (6.2)$$

Η αξιοπιστία σχετίζεται με το ρυθμό των λανθασμένων bits που προκύπτει στην έξοδο του αποκωδικοποιητή του δέκτη. Κατά τη λειτουργία υπό συνθήκες «καθαρού ουρανού», οπότε δεν υπάρχουν ατμοσφαιρικές μεταβολές κατά μήκος του δορυφορικού διαύλου, ο ρυθμός λαθών της ζεύξης διατηρείται σταθερός. Όμως το μέγεθος αυτό σημειώνει διακυμάνσεις που πολλές φορές είναι σημαντικές, εξαιτίας της μεταβλητής απόσβεσης που υφίσταται το μεταδιδόμενο σήμα λόγω αλλαγής των ατμοσφαιρικών συνθηκών και κυρίως λόγω βροχοπτώσεων. Η αξιοπιστία ενός συστήματος περιγράφεται ποσοτικά από το ποσοστό του χρόνου κατά το οποίο επιτυγχάνεται ρυθμός λαθών μεγαλύτερος μιας δεδομένης στάθμης. Ισοδύναμα, η αξιοπιστία περιγράφεται από την πιθανότητα υπέρβασης μιας στάθμης ρυθμού λαθών  $M$ , δηλαδή την πιθανότητα:

$$P_M = \text{Πιθανότητα (BER} > \text{M)} \quad (6.3)$$

Τόσο η διαθεσιμότητα όσο και η αξιοπιστία των δορυφορικών συστημάτων επικοινωνιών προδιαγράφονται από το Διεθνή Οργανισμό ITU-R. Σύμφωνα με την ITU-R, η επίδοση μιας δορυφορικής ζεύξης πρέπει να ανταποκρίνεται στους στόχους που προδιαγράφονται από την απαίτηση για

αξιόπιστες διεθνείς επικοινωνίες και συμβατότητα με τις διεθνείς διασυνδέσεις ISDN. Ο σχεδιασμός ενός δορυφορικού συστήματος επικοινωνίας, αποσκοπεί στην ικανοποίηση των σχετικών προδιαγραφών ποιότητας των παρεχομένων υπηρεσιών με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του κόστους. Η βροχή, επειδή προκαλεί πρόσθετη απόσβεση στο μεταδιδόμενο σήμα, χειροτερεύει το λόγο σήματος προς θόρυβο και συνεπώς αποτελεί σημαντικό περιοριστικό παράγοντα για τη διαθεσιμότητα και τη αξιοπιστία δορυφορικών ζεύξεων που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10 GHz. Η θεώρηση της απόσβεσης που εισάγεται λόγω βροχής ως τυχαίας μεταβλητής παρέχει τη δυνατότητα πρόβλεψης των τιμών της και εκτίμησης της ποιότητας της ζεύξης. Ως περιθώριο διάλειψης σε σχέση με τη λειτουργία υπό συνθήκες «καθαρού ουρανού» ορίζεται η στάθμη απόσβεσης, η υπέρβαση της οποίας οδηγεί σε απώλεια συγχρονισμού το σύστημα και το θέτει εκτός λειτουργίας

Στις περιπτώσεις όπου εμφανίζεται υψηλή απόσβεση λόγω βροχής, ακολουθούνται τεχνικές για να διατηρηθεί η διαθεσιμότητα εντός των προδιαγραφών και να καταστεί δυνατή η λειτουργία υπό χαμηλά περιθώρια διάλειψης. Οι τεχνικές αυτές είναι

- Έλεγχος της ισχύος της ανοδικής ζεύξης
- Κωδικοποίηση για διόρθωση λαθών
- Διαφορική λήψη χώρου

Ο έλεγχος της ισχύος της ανοδικής ζεύξης αυξάνει τη διαθεσιμότητα του συστήματος αλλά και το επίπεδο των παρεμβολών σε γειτονικά συστήματα που λειτουργούν σε παραπλήσιες φέρουσες, ειδικά σε περιπτώσεις επίγειων σταθμών εγκατεστημένων κοντά σε αστικές περιοχές. Η κωδικοποίηση για διόρθωση λαθών επιτυγχάνει το ίδιο αποτέλεσμα αλλά με σημαντική μείωση του ρυθμού μετάδοσης πληροφορίας. Η διαφορική λήψη χώρου είναι η πλέον αποτελεσματική μέθοδος αντιμετώπισης των δυσμενών επιπτώσεων που προκαλεί η βροχή σε συστήματα που λειτουργούν σε συχνότητες υψηλότερες των 10 GHz.

### 6.3 Παράμετροι που απαιτούνται για το σχεδιασμό μιας δορυφορικής ζεύξης

#### 6.3.1 Γενικά χαρακτηριστικά της ζεύξης

- Τοποθεσία επίγειου σταθμού εκπομπής (γεωγρ. πλάτος, γεωγρ. μήκος)
- Τοποθεσία επίγειου σταθμού λήψης (γεωγρ. πλάτος, γεωγρ. μήκος)
- Θέση δορυφορικού αναμεταδότη (γεωγρ. μήκος)
- Συχνότητα λειτουργίας ανοδικής ζεύξης (uplink),  $f_u$  (GHz)
- Συχνότητα λειτουργίας καθοδικής ζεύξης (downlink),  $f_d$  (GHz)
- Τύπος διαμόρφωσης
- Εύρος ζώνης θορύβου,  $B$  (MHz)
- Υψόμετρα επίγειων σταθμών,  $H_0$  (m)

#### 6.3.2 Χαρακτηριστικά δορυφορικού αναμεταδότη

- Πυκνότητα ροής ισχύος εισόδου που οδηγεί τον ενισχυτή TWT στον κορεσμό,  $\Omega_{sat}$  (dBW/m<sup>2</sup>)
- Λόγος κέρδους κεραιάς δορυφόρου προς θερμοκρασία θορύβου,  $G/T$  (dB/°K)
- Ισχύς κορεσμού εξόδου EIRP του ενισχυτή TWT,  $EIRP_{s,sat}$  (dBW)
- Περιθώριο ισχύος εξόδου του ενισχυτή TWT υπό συνθήκες «καθαρού ουρανού»,  $BO_o$  (dB)
- Απώλειες κέρδους λόγω σφάλματος σιόπευσης και ατμοσφαιρικών απωλειών στο ανοδικό τμήμα της ζεύξης,  $L_u$  (dB)
- Απώλειες κέρδους λόγω σφάλματος σιόπευσης και ατμοσφαιρικών απωλειών στο καθοδικό τμήμα της ζεύξης,  $L_d$  (dB)

#### 6.3.3 Χαρακτηριστικά παρεμβολής

- Θέση παρεμβάλλοντος δορυφόρου (γεωγρ. μήκος)

- Λόγος σήματος προς παρεμβολή από γειτονικό δορυφόρο υπό συνθήκες «καθαρού ουρανού» για την ανοδική ζεύξη,  $(C/I)_{u,s}$  (dB)
- Λόγος σήματος προς παρεμβολή από γειτονικό δορυφόρο υπό συνθήκες «καθαρού ουρανού» για την καθοδική ζεύξη,  $(C/I)_{d,s}$  (dB)
- Λόγος σήματος προς παρεμβολή από γειτονικό κανάλι υπό συνθήκες «καθαρού ουρανού» για την ανοδική ζεύξη,  $(C/I)_{u,c}$  (dB)
- Λόγος σήματος προς παρεμβολή από γειτονικό κανάλι υπό συνθήκες «καθαρού ουρανού» για την καθοδική ζεύξη,  $(C/I)_{d,c}$  (dB)
- Περιθώριο διασυμβολικής παρεμβολής,  $M_{ISI}$  (dB)

#### 6.3.4 Χαρακτηριστικά επίδοσης του συστήματος

- Μέγιστος ανεκτός ρυθμός σφαλμάτων κατά την αναγνώριση των bits στο δέκτη,  $BER_{TH}=10^{-4}$
- Συνολική πιθανότητα να τεθεί εκτός λειτουργίας το σύστημα για ένα έτος,  $P_{out}(\%)$
- Προτεινόμενη αναλογία χρόνων διακοπής λειτουργίας της ανοδικής και της καθοδικής ζεύξης

#### 6.4 Κλιματικές παράμετροι επίγειων σταθμών εκπομπής και λήψης

Εδώ απαιτούνται οι κλιματικές ζώνες των επίγειων σταθμών εκπομπής και λήψης και οι αντίστοιχοι ρυθμοί βροχόπτωσης που ξεπερνιούνται για 0,01% του μέσου έτους, στις δύο περιοχές. Οι τελευταίοι λαμβάνονται από τους χάρτες του σχήματος 5.3. Επίσης απαιτούνται οι παράμετροι βροχόπτωσης **a** και **b**, οι οποίες υπολογίζονται από τις σχέσεις (5.4) και (5.5) και τη βοήθεια του πίνακα 5.1, ανάλογα με τις συχνότητες λειτουργίας της ανοδικής και της καθοδικής ζεύξης. Επίσης απαιτείται η χαρακτηριστική καμπύλη κέρδους του ενισχυτή TWT.



## 6.5 Ανάλυση της δορυφορικής ζεύξης

Κατά το σχεδιασμό μιας δορυφορικής ζεύξης πρέπει να προσδιορισθούν τα χαρακτηριστικά των επίγειων σταθμών εκπομπής και λήψης, αφού οι δορυφορικοί αναμεταδότες αγοράζονται ή μισθώνονται από τους τηλεπικοινωνιακούς φορείς με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που είναι πρακτικά αδύνατον να μεταβληθούν. Επίσης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα χαρακτηριστικά του δορυφορικού αναμεταδότη, οι γεωγραφικές και κλιματικές παράμετροι των επίγειων σταθμών και τα κριτήρια διαθεσιμότητας και αξιοπιστίας του όλου συστήματος. Ο σχεδιασμός αποσκοπεί στο να προσδιορίσει τις διαστάσεις και τα κέρδη των κεραιών εκπομπής και λήψης, τη θερμοκρασία θορύβου του συστήματος λήψης και την απαιτούμενη ισχύ εκπομπής.

### 6.5.1 Υπολογισμός γεωμετρικών παραμέτρων

Αρχικά, προσδιορίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ζεύξης, τα οποία φαίνονται στο σχήμα 6.1 και είναι οι γωνίες ανύψωσης, οι αποστάσεις επίγειων σταθμών – δορυφόρων και η γωνιακή απόσταση των δυο δορυφόρων στο ισημερινό επίπεδο.

Η γωνία ανύψωσης  $\varphi$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{\cos \varphi' - \frac{R_{\Gamma}}{R_{\Gamma} + h}}{\sin \varphi'} \right) \quad (6.4)$$

όπου  $\varphi'$  η γωνιακή απόσταση του επίγειου σταθμού σε σχέση με το δορυφόρο με σημείο αναφοράς το κέντρο της γης. Η γωνία  $\varphi'$  καθορίζεται από τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά του επίγειου σταθμού και του δορυφόρου και είναι ίση με:

$$\varphi' = \cos^{-1}(\cos \theta_e \cdot \cos \varphi_{es}) \quad (6.5)$$

όπου:  $\varphi_{es} = |\varphi_e - \varphi_s|$

$\theta_e$  = γεωγραφικό πλάτος επίγειου σταθμού

$\varphi_e$  = γεωγραφικό μήκος επίγειου σταθμού

$\varphi_s$  = γεωγραφικό μήκος ίχνους δορυφόρου

$R_T$  = 6378 Km (ακτίνα της γης)

$h$  = 35784 Km (ύψος γεωστατικής τροχιάς)

Η απόσταση μεταξύ επίγειου σταθμού και δορυφόρου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$d = \sqrt{(R_T \sin \varphi)^2 + 2R_T h + h^2} - R_T \sin \varphi \quad (6.6)$$

Στη συνέχεια, γίνεται ο υπολογισμός των γωνιών ανύψωσης και των αποστάσεων μεταξύ επίγειων σταθμών και δορυφόρων για τους δυο επίγειους σταθμούς εκπομπής και λήψης ξεχωριστά.

Η γωνιακή απόσταση  $\beta$  των δυο δορυφόρων  $\Delta 1$  (κύριος δορυφόρος) και  $\Delta 2$  (παρεμβάλλον δορυφόρος) υπολογίζεται ως εξής:

$$\beta = |\varphi_{s1} - \varphi_{s2}| \quad (6.7)$$

### 6.5.2 Προδιαγραφές διαθεσιμότητας του συστήματος

Αν θεωρηθεί ότι το κατώφλι της πιθανότητας εσφαλμένης αναγνώρισης bits στο δέκτη είναι ίσο με  $10^{-4}$ , αυτό σημαίνει ότι αν η πιθανότητα σφάλματος γίνει μεγαλύτερη από αυτή την τιμή, θα έχουμε απώλεια συγχρονισμού στο δέκτη και διακοπή της ζεύξης. Επίσης, αν θεωρηθεί ότι η πιθανότητα διακοπής της λειτουργίας του συστήματος κατά τη διάρκεια ενός έτους (ετήσια μη-διαθεσιμότητα) είναι  $P_{out}=0,06\%$ , τότε η πιθανότητα διακοπής σφάλματος αναγνώρισης bits επιτρέπεται να υπερβαίνει το κατώφλι  $10^{-4}$  για όχι περισσότερο από το  $0,06\%$  του ετήσιου χρόνου λειτουργίας της ζεύξης. Επειδή θεωρείται σχεδόν απίθανο να υπάρχει ταυτόχρονη διακοπή και της ανοδικής και της καθοδικής ζεύξης, η  $P_{out}$  μπορεί να γραφεί ως το άθροισμα  $P_{out} = P_{out,u} + P_{out,d}$  όπου  $P_{out,u}$  και  $P_{out,d}$  είναι οι πιθανότητες να τεθούν εκτός λειτουργίας η ανοδική ή η καθοδική ζεύξη, αντίστοιχα. Αν θεωρηθεί ότι η προτεινόμενη κατανομή των χρόνων διακοπής λειτουργίας της ζεύξης είναι 1:2 προκύπτει ότι  $P_{out,u}=0,02\%$  και  $P_{out,d}=0,04\%$ .

Η ενδεχόμενη διακοπή της ζεύξης οφείλεται κυρίως στις βροχοπτώσεις αλλά και στην παρεμβολή από γειτονικό δορυφόρο. Επειδή θεωρείται ελάχιστα πιθανό το ενδεχόμενο ταυτόχρονης βροχόπτωσης στις περιοχές των επίγειων σταθμών εκπομπής και λήψης, η ανάλυση της ζεύξης διαχωρίζεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος θεωρείται ότι βρέχει μόνο στην περιοχή του επίγειου σταθμού εκπομπής, ενώ στο δεύτερο μέρος θεωρείται ότι βρέχει μόνο στην περιοχή του επίγειου σταθμού λήψης.

### 6.5.3 Υπολογισμός αποσβέσεων λόγω βροχής

Για τον υπολογισμό των αποσβέσεων που εισάγονται στη ζεύξη εξαιτίας της βροχής χρησιμοποιείται το εμπειρικό μοντέλο της ITU-R που περιγράφεται στην παράγραφο 5.3.2. Οι κατανομές της απόσβεσης προσδιορίζονται ξεχωριστά για την ανοδική και την καθοδική ζεύξη.

#### 6.5.3.1 Υπολογισμός της απόσβεσης λόγω βροχής για την ανοδική ή την καθοδική ζεύξη

Με βάση τα στατιστικά χαρακτηριστικά της έντασης βροχόπτωσης για τους επίγειους σταθμούς εκπομπής και λήψης (παράγραφος 6.4), γίνεται ο υπολογισμός της απόσβεσης λόγω βροχής για την ανοδική και καθοδική ζεύξη. Συγκεκριμένα, υπολογίζονται οι αποσβέσεις  $L_{r,u}$  και  $L_{r,d}$  που αντιστοιχούν στις πιθανότητες  $P_{out,u}$  και  $P_{out,d}$  να τεθεί εκτός λειτουργίας το σύστημα.

Η διαδικασία υπολογισμού έχει ως εξής:

#### 1) Υπολογισμός του μέσου ύψους της ισόθερμης των $0^{\circ}\text{C}$ (km)

Στο Βόρειο Ημισφαίριο:

$$\text{Αν γεωγραφικό πλάτος } \Lambda < 23^{\circ}, H = 5,0 \quad (6.8\alpha)$$

$$\text{Αν γεωγραφικό πλάτος } \Lambda \geq 23^{\circ}, H = 5,0 - 0,075 (\Lambda - 23) \quad (6.8\beta)$$

Στο Νότιο Ημισφαίριο:

$$\text{Αν } |\Lambda| < 21^{\circ}, H = 5,0 \quad (6.8\gamma)$$

$$\text{Αν } 21^{\circ} < |\Lambda| < 71^{\circ}, H = 5,0 - 0,1 (|\Lambda| - 21) \quad (6.8\delta)$$

$$\text{Αν } 71^{\circ} < |\Lambda|, H = 0 \quad (6.8\epsilon)$$

2) Υπολογισμός του ενεργού μήκους ζεύξης που διέρχεται από βροχή (Κm)

$$\text{Αν } \varphi > 5^{\circ} \text{ τότε } L_a = \frac{H - H_0}{\sin \varphi}, \quad (6.9\alpha)$$

(όπου  $H_0$ : υψόμετρο επίγειου σταθμού)

$$\text{Αν } \varphi \leq 5^{\circ}, L_a = \frac{2(H - H_0)}{\left[ \sin^2 \varphi + \frac{2H - H_0}{R_{\Gamma, \text{ισοδ}}} \right]^{1/2} + \sin \varphi} \quad (6.9\beta)$$

3) Υπολογισμός του συντελεστή μείωσης  $r_{0.01}$ :

Η οριζόντια προβολή  $L_D$  του  $L_a$  είναι:

$$L_D = L_a \cos \varphi \quad (6.10)$$

$$\text{Επομένως: } r_{0.01} = \frac{1}{1 + \frac{L_D}{35e^{(-0,015R_{0.01})}}} \quad (6.11)$$

4) Υπολογισμός της ειδικής απόσβεσης  $A_0$  (dB/Km)

$$\text{Είναι } A_0 = \alpha R_{0.01}^b \quad (6.12)$$

5) Εκτίμηση της απόσβεσης για υπέρβαση 0,01% του χρόνου (dB)

Η εκτίμηση της απόσβεσης  $A_{0.01}$  γίνεται μέσω της σχέσης:

$$A_{0.01} = A_0 \cdot L_a \cdot r_{0.01} \quad (6.13)$$

6) Τελικός υπολογισμός της απόσβεσης λόγω βροχής (dB)

Σύμφωνα με την ITU – R, η απόσβεση  $A_p$  που εισάγεται λόγω βροχής για ποσοστό χρόνου  $p\%$  συνδέεται με την αντίστοιχη για ποσοστό χρόνου 0.01% μέσω της σχέσης:

$$L_r = A_p = 0,12A_{0,01} \cdot p^{-(0,546+0,043\log p)} \quad (6.14)$$

Στη συνέχεια ακολουθεί η ανάλυση της ζεύξης για τα ενδεχόμενα βροχοπτώσης, μόνο στην ανοδική ζεύξη και μόνο στην καθοδική ζεύξη, αφού, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το ενδεχόμενο ταυτόχρονης βροχοπτώσης και στα δυο τμήματα της ζεύξης χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά μικρή πιθανότητα και αγνοείται.

**6.6 Ανάλυση της ζεύξης με βροχή μόνο στην ανοδική ζεύξη**

**6.6.1 Λόγος σήματος προς θόρυβο για την ανοδική ζεύξη**

Με δεδομένη την πυκνότητα ροής ισχύος εισόδου  $\Omega_{sat}$  (dBW/m<sup>2</sup>) που αντιστοιχεί στον κορεσμό του ενισχυτή TWT μπορεί να υπολογισθεί η ισοδύναμη ισοτροπική ακτινοβολούμενη ισχύς  $EIRP_{sat}$  που απαιτείται για λειτουργία του TWT στον κορεσμό. Είναι:

$$EIRP_{sat} (dBW) = \Omega_{sat} + 10\log(4\pi \cdot d_{T-S}^2) + L_u \quad (6.15)$$

όπου  $d_{T-S}$  (m) η απόσταση μεταξύ επίγειου σταθμού εκπομπής και δορυφόρου.

Με δεδομένο το περιθώριο ισχύος εξόδου  $BO_o$  (dB) του ενισχυτή TWT, το περιθώριο ισχύος εισόδου του,  $BO_i$ , μπορεί να υπολογιστεί από τη χαρακτηριστική καμπύλη κέρδους του ενισχυτή. Ο λόγος σήματος προς θόρυβο (σε dB) για την ανοδική ζεύξη δίνεται από τη σχέση:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{u,r} = EIRP_{sat} - 20\log\left(\frac{4\pi f_u d_{T-S}}{c}\right) + \frac{G}{T} - 10\log k - 10\log B - BO_i - L_u - L_{r,u} \quad (6.16)$$

όπου  $c=3 \cdot 10^8$  m/sec και  $k=1,381 \cdot 10^{-23}$  Joules/°K.

### 6.6.2 Λόγος σήματος προς παρεμβολή για την ανοδική ζεύξη

Αρχικά υπολογίζεται ο λόγος φέροντος σήματος προς παρεμβολή υπό συνθήκες «καθαρού ουρανού» στην περιοχή του επίγειου σταθμού εκπομπής από τους λόγους σήματος προς παρεμβολή γειτονικού δορυφόρου και γειτονικού καναλιού:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_u = \left[ \left(\frac{C}{I}\right)_{u,c}^{-1} + \left(\frac{C}{I}\right)_{u,s}^{-1} \right]^{-1} \quad (6.17)$$

Όταν βρέχει, υπάρχει απόσβεση λόγω βροχής τόσο στο επιθυμητό όσο και στο παρεμβάλλον σήμα. Η χειρότερη ωστόσο περίπτωση, που είναι αυτή που ενδιαφέρει τη σχεδίαση, είναι όταν το παρεμβάλλον σήμα δεν υφίσταται απόσβεση και το επιθυμητό σήμα υφίσταται τη μέγιστη επιτρεπτή απόσβεση  $L_{r,u}$ . Τότε:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{u,r} = \left(\frac{C}{N}\right)_u - L_{r,u} \quad (6.18)$$

### 6.6.3 Λόγος σήματος προς θόρυβο μαζί με παρεμβολή για την ανοδική ζεύξη

Είναι:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{u,r} = \left[ \left(\frac{C}{N}\right)_{u,r}^{-1} + \left(\frac{C}{I}\right)_{u,r}^{-1} \right]^{-1} \quad (6.19)$$

### 6.6.4 Λόγος σήματος προς θόρυβο για την καθοδική ζεύξη

Ο ελάχιστος λόγος φέροντος σήματος προς θόρυβο στην είσοδο του δέκτη που εξασφαλίζει πιθανότητα εσφαλμένης αναγνώρισης bits μικρότερη του κατωφλίου  $10^{-4}$  είναι 10,6 dB. Λαμβάνοντας υπόψη και το περιθώριο διασυμβολικής παρεμβολής  $M_{ISI}$ , προκύπτει ότι, για τη διαθεσιμότητα της ζεύξης ο ελάχιστος συνολικός λόγος σήματος προς θόρυβο:

$$\left(\frac{C}{N}\right) = 10,6 + M_{ISI} \quad (6.20)$$

Με γνωστό το λόγο  $\left(\frac{C}{N}\right)_{u,r}$  υπολογίζεται ο λόγος:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_d^{-1} = \left[ \left(\frac{C}{N}\right)^{-1} + \left(\frac{C}{I}\right)_{u,r}^{-1} \right] \quad (6.21)$$

### 6.6.5 Λόγος σήματος προς παρεμβολή για την καθοδική ζεύξη

Με τη βοήθεια των προδιαγραφών για λόγους σήματος προς παρεμβολή από γειτονικό δορυφόρο και γειτονικό κανάλι, υπολογίζεται ο λόγος σήματος προς παρεμβολή για την καθοδική ζεύξη υπό συνθήκες «καθαρού ουρανού»:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{d,nom}^{-1} = \left[ \left(\frac{C}{N}\right)_{d,c}^{-1} + \left(\frac{C}{I}\right)_{d,s}^{-1} \right] \quad (6.22)$$

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η τιμή αυτή ισχύει υπό συνθήκες «καθαρού ουρανού». Όταν όμως βρέχει στο ανοδικό τμήμα της ζεύξης, το επιθυμητό σήμα μπορεί να υποστεί απόσβεση λόγω βροχής μέχρι και την τιμή  $L_{r,u}$ . Αυτό σημαίνει ότι το περιθώριο ισχύος εισόδου του ενισχυτή TWT μετατοπίζεται από την τιμή  $BO_i$  στην τιμή:

$$BO'_i = BO_i + L_{r,u} \quad (6.23)$$

Από τη χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας του ενισχυτή TWT προκύπτει ότι περιθώριο εισόδου  $BO'_i$  αντιστοιχεί σε περιθώριο εξόδου  $BO'_0$ . Άρα η διαφορά των περιθωρίων εξόδου παρουσία και απουσία βροχής είναι:

$$\Delta BO_0 = BO'_0 - BO_0 \quad (6.24)$$

Αυτό σημαίνει ότι η ισχύς του σήματος που εκπέμπεται από το δορυφόρο είναι χαμηλότερη από την ισχύ που εκπέμπεται από το δορυφόρο, όταν δεν βρέχει στον επίγειο σταθμό εκπομπής. Επομένως:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_d = \left(\frac{C}{N}\right)_{d.nom} - \Delta B_0 \quad (6.25)$$

### 6.6.6 Λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή για την καθοδική ζεύξη

Είναι:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_d = \left[ \left(\frac{C}{N}\right)_d^{-1} + \left(\frac{C}{I}\right)_d^{-1} \right] \quad (6.26)$$

### 6.6.7 Λόγος κέρδους κεραιάς προς θερμοκρασία θορύβου δέκτη

Εφόσον είναι γνωστή η EIRP κορεσμού εξόδου του δορυφορικού αναμεταδότη  $EIRP_{s,sat}$  ο λόγος  $G_r/T$  (dB/°K) που αναφέρεται στον επίγειο σταθμό λήψης, μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\frac{G_r}{T} = \left(\frac{C}{N}\right)_d - EIRP_{s,sat} + 20 \log \left( \frac{4\pi f_d d_{R-S}}{c} \right) + 10 \log k + 10 \log B + BO_0' + L_d \quad (6.27)$$

όπου  $d_{R-S}$  (km) είναι η απόσταση του επίγειου σταθμού λήψης από το δορυφόρο.

### 6.6.8 Ενεργός ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύς από την κεραιά του επίγειου σταθμού εκπομπής

Με τη βοήθεια της  $EIRP_{sat}$  που υπολογίστηκε προηγουμένως προκύπτει ότι η EIRP του επίγειου σταθμού εκπομπής είναι:

$$EIRP = EIRP_{sat} - BO_i \quad (6.28)$$

## 6.7 Ανάλυση της ζεύξης με βροχή μόνο στην καθοδική ζεύξη

### 6.7.1 Αύξηση της θερμοκρασίας θορύβου της κεραιάς του δέκτη στον επίγειο σταθμό λήψης

Αρχικά, εξαιτίας της βροχής στην καθοδική ζεύξη, αυξάνεται η θερμοκρασία θορύβου της κεραιάς του δέκτη κατά  $\Delta T_r$ , όπου

$$\Delta T_r = 273 \left( 1 - \frac{1}{10^{L_{r,d}/10}} \right) \quad (6.29)$$



Η αύξηση αυτή προστίθεται στη συνολική θερμοκρασία θορύβου  $T_s$  του συστήματος λήψης υπό συνθήκες «καθαρού ουρανού».

### 6.7.2 Λόγος σήματος προς θόρυβο μαζί με παρεμβολή για την ανοδική ζεύξη

Με χρήση της τιμής για το λόγο σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή που υπολογίστηκε προηγουμένως, προσδιορίζεται ο λόγος σήματος προς θόρυβο  $(C/N)_u$  χωρίς να υπάρχει βροχοπτώση στην ανοδική ζεύξη, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_u = \left(\frac{C}{N}\right)_{u,r} + L_{r,u} \quad (6.30)$$

### 6.7.3 Λόγος σήματος προς θόρυβο για την καθοδική ζεύξη

Για την απαιτούμενη διαθεσιμότητα του συστήματος υπολογίστηκε ο ελάχιστος λόγος  $(C/N)$  που απαιτείται στην είσοδο του δέκτη από την εξίσωση (6.20). Επομένως ο λόγος σήματος προς θόρυβο για την καθοδική ζεύξη με βροχή μόνο στην καθοδική ζεύξη, υπολογίζεται ως εξής:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{d,r} = \left[ \left(\frac{C}{N}\right)^{-1} + \left(\frac{C}{N}\right)_u^{-1} \right]^{-1} \quad (6.31)$$

### 6.7.4 Λόγος σήματος προς παρεμβολή για την καθοδική ζεύξη

Αναφέρθηκε παραπάνω ότι υπό συνθήκες βροχοπτώσης, η χειρότερη περίπτωση είναι αυτή όπου το παρεμβάλλον σήμα δεν υφίσταται απόσβεση και το επιθυμητό σήμα υφίσταται τη μέγιστη επιτρεπτή απόσβεση. Συνεπώς, ο λόγος σήματος προς παρεμβολή ισούται με τον αντίστοιχο λόγο υπό συνθήκες «καθαρού ουρανού» μειωμένο κατά ένα ποσό  $r_d$  που αντιστοιχεί στη δορυφορική απόσβεση λόγω βροχής, δηλαδή:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{d,r} = \left(\frac{C}{I}\right)_{d,nom} - r_d \quad (6.32)$$

Αν και η λεπτομερής ανάλυση επιβάλλει τον ακριβή υπολογισμό της ποσότητας  $r_d$ , θεωρώντας ως κύριο αίτιο παρενόχλησης το θόρυβο τίθεται  $r_d = 0$  dB. Επομένως, ο λόγος σήματος προς παρεμβολή στην καθοδική ζεύξη είναι:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{d,r} = \left(\frac{C}{I}\right)_{d,nom} \quad (6.33)$$

### 6.7.5 Λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή για την καθοδική ζεύξη

Είναι:

$$\left(\frac{C}{N}\right)_{d,r} = \left[ \left(\frac{C}{N}\right)_{d,r}^{-1} + \left(\frac{C}{I}\right)_{d,r}^{-1} \right]^{-1} \quad (6.34)$$

### 6.7.6 Λόγος κέρδους κεραίας προς θερμοκρασία θορύβου δέκτη

Λαμβάνοντας υπόψη και την αύξηση της θερμοκρασίας θορύβου της κεραίας του δέκτη στον επίγειο σταθμό λήψης, ισχύει:

$$\frac{G_r}{T} = \left(\frac{C}{N}\right)_{d,r} - EIRP_{s,sat} - 20 \log \left( \frac{4\pi f_d d_{R-S}}{c} \right) + 10 \log k + 10 \log B + BO_0 + L_d + L_{r,d} \quad (6.35)$$

### 6.8 Υπολογισμός κέρδους και διαμέτρου της κεραίας του επίγειου σταθμού λήψης

Στον επίγειο σταθμό λήψης, η ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου του δέκτη, θα είναι το άθροισμα της θερμοκρασία περιβάλλοντος  $T_N \approx 300$  °K, της αύξησης της θερμοκρασίας θορύβου λόγω βροχής στην καθοδική ζεύξη  $\Delta T_r$  (°K), της αύξησης της θερμοκρασίας θορύβου του δέκτη λόγω των ενισχυτών του ( $\Delta T_{\text{ampl}} \approx 50$  °K, για τρανζίστορ FET GaAs χαμηλού θορύβου) και της αύξησης της θερμοκρασίας θορύβου του δέκτη ( $\Delta T_{\text{wg}}$ ) λόγω της εξασθένισης που εισάγει ο κυματοδηγός που συνδέει την κεραία λήψης με το δέκτη. Δηλαδή:

$$T'_N = T_N + \Delta T_r + \Delta T_{\text{ampl}} + \Delta T_{\text{wg}} \quad (6.36)$$

όπου  $\Delta T_{(\text{wg})} = \frac{T_N(L-1)}{L}$  ( $L \approx 2$  dB, οι απώλειες στον κυματοδηγό).

Στη συνέχεια, έχοντας υπολογίσει το λόγο ( $G_r/T$ ) από την εξίσωση (6.35) και λαμβάνοντας υπόψη την ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου του δέκτη  $T'_N$ , υπολογίζεται το κέρδος της κεραίας λήψης  $G_r$  (dB).

Τέλος, η απαιτούμενη διάμετρος της κεραίας λήψης υπολογίζεται από τη σχέση (3.1), αν λύσουμε ως προς  $D$  και λάβουμε ως βαθμό απόδοσης της κεραίας  $\eta \approx 0,7$ :

$$D = \sqrt{\frac{G_r \lambda_d^2}{\eta \pi^2}} \quad (6.37)$$

όπου  $\lambda_d$  είναι το μήκος κύματος λειτουργίας της καθοδικής ζεύξης.

(Σημείωση: Το κέρδος της κεραίας λήψης στην παραπάνω εξίσωση, πρέπει να είναι εκφρασμένο σε καθαρό αριθμό και όχι σε dB).

### 6.9 Υπολογισμός κέρδους, διαμέτρου κεραίας και ισχύος εκπομπής του επίγειου σταθμού εκπομπής

Στον επίγειο σταθμό εκπομπής, η προτεινόμενη διάμετρος της κεραίας συνήθως είναι  $D=10$  m, οπότε το κέρδος της υπολογίζεται από τη σχέση (3.1):

$$G_t = \eta \left( \frac{\pi D}{\lambda_u} \right)^2 \quad (6.38)$$

όπου  $\lambda_u$  είναι το μήκος κύματος λειτουργίας της ανοδικής ζεύξης. Στη συνέχεια υπολογίζεται το κέρδος  $G_t$  σε dB, από τη σχέση  $G_t(\text{dB})=10 \log G_t$ .

Έχοντας υπολογίσει το EIRP του επίγειου σταθμού εκπομπής από τη σχέση (6.28), η ισχύς εκπομπής του επίγειου σταθμού εκπομπής μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

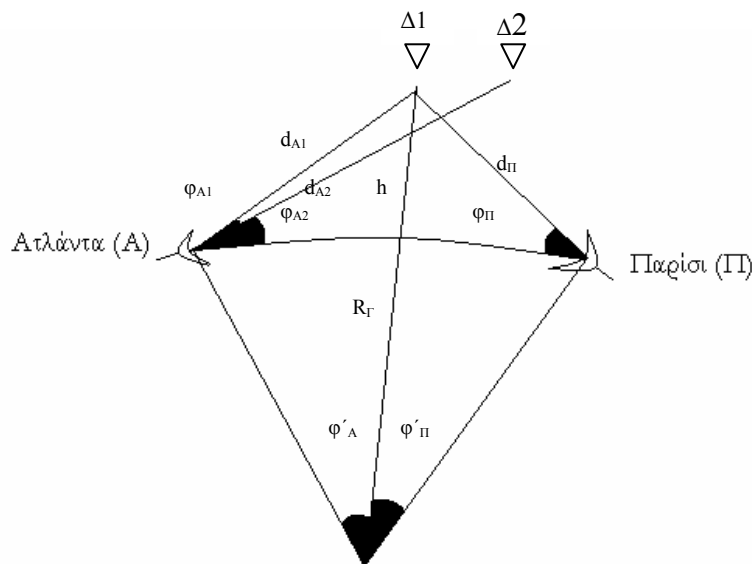
$$P_t \text{ (dBW)} = \text{EIRP (dBW)} - G_t \text{ (dB)} \quad (6.39)$$

απ' όπου στη συνέχεια μπορεί να υπολογιστεί η  $P_t$  σε Watts.

## 7 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗΣ ΖΕΥΞΗΣ «ΠΑΡΙΣΙ – ΑΤΛΑΝΤΑ»

### 7.1 Χαρακτηριστικά της ζεύξης

Στο Κεφάλαιο αυτό εφαρμόζεται η μεθοδολογία σχεδιασμού και οι εξισώσεις που αναπτύχθηκαν στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, για το σχεδιασμό της δορυφορικής ζεύξης «Παρίσι-Ατλάντα». Οι υπολογισμοί των διαφόρων μεγεθών πραγματοποιούνται με τη βοήθεια του προγράμματος “Excel”. Το διάγραμμα της ζεύξης παριστάνεται στο σχήμα 7.1 και θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της ζεύξης που ακολουθεί.



Σχήμα 7.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ζεύξης.

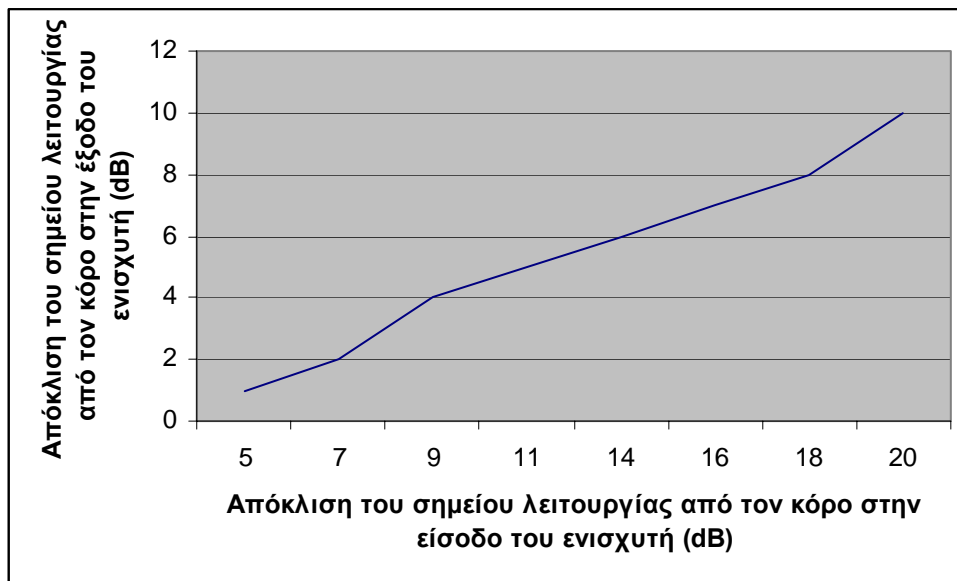
Στον πίνακα 7.1 παρουσιάζονται τα γενικά χαρακτηριστικά της ζεύξης, τα χαρακτηριστικά του δορυφορικού αναμεταδότη και τα χαρακτηριστικά παρεμβολής του συστήματος. Στο σχήμα 7.2 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική καμπύλη κέρδους του ενισχυτή TWT.

Πίνακας 7.1: Χαρακτηριστικά της ζεύξης «Παρίσι – Ατλάντα».

Δορυφορική ζεύξη "Παρίσι - Ατλάντα"			
Γενικά χαρακτηριστικά της ζεύξης			
Τοποθεσία επίγειου σταθμού εκπομπής (Παρίσι)	Παρίσι (degrees) ( <sup>0</sup> N, <sup>0</sup> E)	49	-3,00
Τοποθεσία επίγειου σταθμού λήψης (Ατλάντα)	Ατλάντα (degrees) ( <sup>0</sup> N, <sup>0</sup> W)	34	84
Θέση δορυφορικού αναμεταδότη Δ1 (Γεωγρ. Μήκος)	(degrees) ( <sup>0</sup> W)	30	
Συχνότητα λειτουργίας ανοδικής ζεύξης (uplink)	$f_u$ (GHz)	14	
Συχνότητα λειτουργίας καθοδικής ζεύξης (downlink)	$f_d$ (GHz)	12	
Τύπος διαμόρφωσης	QPSK		
Εύρος ζώνης θορύβου	B (MHz)	36	
Υψόμετρα επίγειων σταθμών (εκπομπής και λήψης)	$H_o$ (m)	200	200
Ρυθμός βροχοπτώσης στην περιοχή του Παρισιού που ξεπερνιέται για 0,01% του χρόνου	$R_{0,01}$ (mm/h)	32	
Παράμετρος βροχοπτώσης a στη συχνότητα της ανοδικής ζεύξης	a (dB/km)	0,0310	
Παράμετρος βροχοπτώσης b στη συχνότητα της ανοδικής ζεύξης	b (dB/km)	1,1403	
Ρυθμός βροχοπτώσης στην περιοχή της Ατλάντας που ξεπερνιέται για 0,01% του χρόνου	$R_{0,01}$ (mm/h)	63	
Παράμετρος βροχοπτώσης a στη συχνότητα της καθοδικής ζεύξης	a (dB/km)	0,0169	
Παράμετρος βροχοπτώσης b στη συχνότητα της καθοδικής ζεύξης	b (dB/km)	1,2034	
Χαρακτηριστικά δορυφορικού αναμεταδότη			
Πυκνότητα ροής ισχύος εισόδου που οδηγεί τον ενισχυτή TWT του δορυφορικού αναμεταδότη στον κορεσμό	$\Omega_{sat}$ (dBW/m <sup>2</sup> )		-80
Λόγος κέρδους κεραίας δορυφόρου προς θερμοκρασία θορύβου	G/T (dB/ <sup>0</sup> K)		3
Ισχύς κορεσμού εξόδου EIRP του ενισχυτή TWT	EIRP <sub>s,sat</sub> (dBW)		40
Περιθώριο ισχύος εξόδου του ενισχυτή TWT υπό συνθήκες "καθαρού ουρανού"	BO <sub>o</sub> (dB)		3
Περιθώριο ισχύος εισόδου του ενισχυτή TWT υπό συνθήκες "καθαρού ουρανού"	BO <sub>i</sub> (dB)		8
Απώλειες κέρδους λόγω σφάλματος σιόπωσης και ατμοσφαιρικών απωλειών στην ανοδική ζεύξη	L <sub>u</sub> (dB)		3,5
Απώλειες κέρδους λόγω σφάλματος σιόπωσης και ατμοσφαιρικών απωλειών στην καθοδική ζεύξη	L <sub>d</sub> (dB)		2

Χαρακτηριστικά παρεμβολής		
Θέση παρεμβάλλοντος δορυφόρου Δ2 (Γεωγρ. Μήκος)	(Degrees) ( $^{\circ}$ W)	25
Λόγος σήματος προς παρεμβολή από γειτονικό δορυφόρο υπό συνθήκες "καθαρού ουρανού" για την ανοδική ζεύξη	(C/I) <sub>u.s</sub> (dB)	32
Λόγος σήματος προς παρεμβολή από γειτονικό δορυφόρο υπό συνθήκες "καθαρού ουρανού" για την καθοδική ζεύξη	(C/I) <sub>d.s</sub> (dB)	30
Λόγος σήματος προς παρεμβολή από γειτονικό κανάλι υπό συνθήκες "καθαρού ουρανού" για την ανοδική ζεύξη	(C/I) <sub>u.c</sub> (dB)	29
Λόγος σήματος προς παρεμβολή από γειτονικό κανάλι υπό συνθήκες "καθαρού ουρανού" για την καθοδική ζεύξη	(C/I) <sub>d.c</sub> (dB)	30
Περιθώριο διασυμβολικής παρεμβολής	M <sub>ISI</sub> (dB)	1,5

Χαρακτηριστικά επίδοσης του συστήματος		
Ελάχιστος λόγος σήματος προς θόρυβο που απαιτείται στην είσοδο του δέκτη του επίγειου σταθμού, ώστε ο μέγιστος ανεκτός ρυθμός σφαλμάτων κατά την αναγνώριση bits να είναι BER=10 <sup>-4</sup>	C/N (dB)	10,60
Συνολική πιθανότητα να τεθεί εκτός λειτουργίας το σύστημα για ένα έτος	P <sub>out</sub>	0,06%
Προτεινόμενη αναλογία χρόνων διακοπής λειτουργίας της ανοδικής και της καθοδικής ζεύξης	1 προς 2	



Σχήμα 7.2: Χαρακτηριστική καμπύλη κέρδους του ενισχυτή TWTF.

## 7.2 Προδιαγραφές διαθεσιμότητας του συστήματος

Το κατώφλι της πιθανότητας εσφαλμένης αναγνώρισης bits στο δέκτη του επίγειου σταθμού λήψης, είναι ίσο με  $10^{-4}$ . Αυτό σημαίνει ότι, αν η πιθανότητα σφάλματος γίνει μεγαλύτερη από αυτή την τιμή, θα έχουμε απώλεια συγχρονισμού στο δέκτη και διακοπή της ζεύξης. Η προδιαγραφή για την υπό μελέτη ζεύξη υπαγορεύει ότι η πιθανότητα σφάλματος αναγνώρισης bits επιτρέπεται να υπερβαίνει το κατώφλι  $10^{-4}$  για όχι περισσότερο από το  $P_{out}=0.06\%$  του ετήσιου χρόνου λειτουργίας της ζεύξης. Επειδή θεωρείται σχεδόν απίθανο να υπάρχει ταυτόχρονη διακοπή και της ανοδικής και της καθοδικής ζεύξης, η  $P_{out}=0,06\%$  μπορεί να γραφεί ως το άθροισμα

$$P_{out}=P_{out,u} + P_{out,d}$$

όπου  $P_{out,u}$ ,  $P_{out,d}$  είναι οι πιθανότητες να τεθούν εκτός λειτουργίας η ανοδική ή η καθοδική ζεύξη, αντίστοιχα. Με δεδομένη την προτεινόμενη κατανομή των χρόνων διακοπής λειτουργίας της ζεύξης (1:2) προκύπτει ότι

$$P_{out,u}=0,02\% \text{ και } P_{out,d}=0,04\%$$

Η ενδεχόμενη διακοπή της ζεύξης οφείλεται κυρίως στις βροχοπτώσεις αλλά και στην παρεμβολή από γειτονικό δορυφόρο. Επειδή θεωρείται ελάχιστα πιθανό το ενδεχόμενο ταυτόχρονης βροχόπτωσης στις περιοχές των επίγειων σταθμών εκπομπής και λήψης, η ανάλυση της ζεύξης διαχωρίζεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος θεωρείται ότι βρέχει μόνο στην περιοχή του επίγειου σταθμού εκπομπής (Παρίσι), ενώ στο δεύτερο μέρος θεωρείται ότι βρέχει μόνο στην περιοχή του επίγειου σταθμού λήψης (Ατλάντα).

## 7.3 Ανάλυση της ζεύξης, με βροχή μόνο στην ανοδική ζεύξη «Παρίσι – Δορυφόρος»

Στον πίνακα 7.2 παρουσιάζονται οι υπολογισμοί της ζεύξης, για βροχή μόνο στην ανοδική ζεύξη «Παρίσι – Δορυφόρος».

**Πίνακας 7.2:** Υπολογισμοί της ζεύξης, για βροχή μόνο στην ανοδική ζεύξη «Παρίσι – Δορυφόρος».

**Ανάλυση της ζεύξης, με βροχή μόνο στην ανοδική ζεύξη (Παρίσι-Δορυφόρος)**

Υπολογισμός γεωμετρικών παραμέτρων		Παρίσι-Δ1
Γωνία ανύψωσης του επίγειου σταθμού εκπομπής (Παρίσι) προς το δορυφόρο	$\varphi$ (degrees)	25,54
Γωνιακή απόσταση του επίγειου σταθμού εκπομπής (Παρίσι) σε σχέση με το δορυφόρο με σημείο αναφοράς το κέντρο της γης	$\varphi'$ (degrees)	56,62
Απόσταση μεταξύ επίγειου σταθμού και δορυφόρου	$d$ (km)	39018
Γωνιακή απόσταση των δύο δορυφόρων: Δ1 (κύριος δορυφόρος), Δ2 (παρεμβάλλον δορυφόρος)	$\beta$ (degrees)	5

Υπολογισμός της απόσβεσης λόγω βροχής για την ανοδική ζεύξη		
Υπολογισμός του μέσου ύψους της ισόθερμης των 0 °C	$H$ (Km)	3,05
Υπολογισμός του ενεργού μήκους της ζεύξης που διέρχεται από βροχή	$L_a$ (Km)	6,611
Οριζόντια προβολή $L_D$ του $L_a$	$L_D$ (Km)	5,965
Υπολογισμός του συντελεστή μείωσης $r_{0,01}$	$r_{0,01}$	0,7840
Υπολογισμός της ειδικής απόσβεσης λόγω βροχής	$A_0$ (dB/Km)	1,613
Εκτίμηση της απόσβεσης λόγω βροχής για υπέρβαση 0,01% του χρόνου	$A_{0,01}$ (dB)	8,362
Τελικός υπολογισμός της απόσβεσης λόγω βροχής $L_{r,u} = A_{0,02}$	$L_{r,u}$ (dB)	6,37

Λόγος σήματος προς θόρυβο για την ανοδική ζεύξη		
Ισοδύναμη ιστροπική ακτινοβολούμενη ισχύς του επίγειου σταθμού του Παρισιού που απαιτείται για λειτουργία του ενισχυτή TWT στον κορεσμό	$EIRP_{sat}$ (dBW)	86,32
Λόγος σήματος προς θόρυβο της ανοδικής ζεύξης, παρουσία βροχής μόνο στην ανοδική ζεύξη	$(C/N)_{u,r}$ (dB)	17,30

Λόγος σήματος προς παρεμβολή για την ανοδική ζεύξη		
Λόγος σήματος προς παρεμβολή της ανοδικής ζεύξης, για "καθαρό ουρανό"	$(C/I)_u$ (dB)	27,24
Λόγος σήματος προς παρεμβολή της ανοδικής ζεύξης, παρουσία βροχής μόνο στην ανοδική ζεύξη	$(C/I)_{u,r}$ (dB)	20,87



<b>Λόγος σήματος προς θόρυβο μαζί με την παρεμβολή για την ανοδική ζεύξη</b>		
Λόγος σήματος προς θόρυβο μαζί με παρεμβολή για την ανοδική ζεύξη, παρουσία βροχής μόνο στην ανοδική ζεύξη	$(C/N)_{u,r}$ (dB)	15,72

<b>Ισοδύναμη ιστροπική ακτινοβολούμενη ισχύς από την κεραία του επίγειου σταθμού εκπομπής (Παρίσι)</b>		
Ισοδύναμη ιστροπική ακτινοβολούμενη ισχύς από την κεραία του επίγειου σταθμού εκπομπής (Παρίσι)	<b>EIRP (dBW)</b>	78,32

<b>Λόγος σήματος προς θόρυβο για την καθοδική ζεύξη</b>		
Ελάχιστος απαιτούμενος συνολικός λόγος σήματος προς θόρυβο στην είσοδο του δέκτη του επίγειου σταθμού λήψης (Ατλάντα)	$(C/N)$ (dB)	12,1
Λόγος σήματος προς θόρυβο της καθοδικής ζεύξης, παρουσία βροχής μόνο στην ανοδική ζεύξη	$(C/N)_d$ (dB)	10,53

<b>Λόγος σήματος προς παρεμβολή για την καθοδική ζεύξη</b>		
Λόγος σήματος προς παρεμβολή για την καθοδική ζεύξη, υπό συνθήκες "καθαρού ουρανού"	$(C/I)_{d,nom}$ (dB)	26,99
Περιθώριο ισχύος εισόδου του ενισχυτή TWT, παρουσία βροχής μόνο στην ανοδική ζεύξη	$BO'_i$ (dB)	14,37
Διαφορά περιθωρίων εξόδου του ενισχυτή TWT (παρουσία & απουσία βροχής στην ανοδική ζεύξη)	$\Delta BO_o$ (dB)	3,24
Λόγος σήματος προς παρεμβολή για την καθοδική ζεύξη, παρουσία βροχής μόνο στην ανοδική ζεύξη	$(C/I)_d$ (dB)	23,75

<b>Λόγος σήματος προς θόρυβο μαζί με την παρεμβολή για την καθοδική ζεύξη</b>		
Λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή της καθοδικής ζεύξης, παρουσία βροχής μόνο στην ανοδική ζεύξη	$(C/N)_d$ (dB)	10,33

<b>Λόγος κέρδους κεραίας λήψης προς θερμοκρασία θορύβου δέκτη</b>		
Λόγος κέρδους κεραίας λήψης του δέκτη του επίγειου σταθμού λήψης (Ατλάντα) προς θερμοκρασία θορύβου δέκτη	$G_r/T$ (dB/ <sup>0</sup> K)	31,48

#### 7.4 Ανάλυση της ζεύξης, με βροχή μόνο στην καθοδική ζεύξη «Δορυφόρος - Ατλάντα»

Στον πίνακα 7.3 παρουσιάζονται οι υπολογισμοί της ζεύξης, για βροχή μόνο στην καθοδική ζεύξη «Δορυφόρος - Ατλάντα».

**Πίνακας 7.3:** Υπολογισμοί της ζεύξης, για βροχή μόνο στην καθοδική ζεύξη «Δορυφόρος - Ατλάντα».

#### Ανάλυση της ζεύξης, με βροχή μόνο στην καθοδική ζεύξη (Δορυφόρος - Ατλάντα)

Υπολογισμός γεωμετρικών παραμέτρων		Ατλάντα-Δ1	Ατλάντα-Δ2
Γωνία ανύψωσης του επίγειου σταθμού λήψης (Ατλάντα) σε σχέση με τον κύριο δορυφόρο (Δ1) και τον παρεμβάλλοντα δορυφόρο (Δ2)	$\varphi$ (degrees)	21,05	16,96
Γωνιακή απόσταση του επίγειου σταθμού λήψης (Ατλάντα) σε σχέση με το δορυφόρο, με σημείο αναφοράς το κέντρο της γης	$\varphi'$ (degrees)	60,84	64,72
Απόσταση μεταξύ επίγειου σταθμού λήψης (Ατλάντα) και δορυφόρων Δ1, Δ2	$d$ (km)	39449	39858
Γωνιακή απόσταση των δύο δορυφόρων: Δ1 (κύριος δορυφόρος) και Δ2 (παρεμβάλλον δορυφόρος)	$\beta$ (degrees)	5	5

Υπολογισμός της απόσβεσης λόγω βροχής για την καθοδική ζεύξη		
Υπολογισμός του μέσου ύψους της ισόθερμης των 0 °C	$H$ (Km)	4,175
Υπολογισμός του ενεργού μήκους ζεύξης που διέρχεται από βροχή	$L_a$ (Km)	11,068
Οριζόντια προβολή $L_D$ του $L_a$	$L_D$ (Km)	10,330
Υπολογισμός του συντελεστή μείωσης $r_{0,01}$	$r_{0,01}$	0,5684
Υπολογισμός της ειδικής απόσβεσης λόγω βροχής	$A_0$ (dB/Km)	2,473
Εκτίμηση της απόσβεσης λόγω βροχής για υπέρβαση 0,01% του χρόνου	$A_{0,01}$ (dB)	15,558

Τελικός υπολογισμός της απόσβεσης λόγω βροχής $L_{r,d} = A_{0,02}$	$L_{r,d}$ (dB)	8,91
--	----------------	------

<b>Λόγος σήματος προς θόρυβο για την καθοδική ζεύξη</b>		
Λόγος σήματος προς θόρυβο της καθοδικής ζεύξης, παρουσία βροχής μόνο στην καθοδική ζεύξη	$(C/N)_{d,r}$ (dB)	11,68
Λόγος σήματος προς παρεμβολή για την καθοδική ζεύξη, παρουσία βροχής μόνο στην καθοδική ζεύξη	$(C/I)_{d,r}$ (dB)	27
Λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή της καθοδικής ζεύξης, παρουσία βροχής μόνο στην καθοδική ζεύξη	$(C/N)_{d,r}$ (dB)	11,56

<b>Λόγος σήματος προς θόρυβο μαζί με την παρεμβολή για την ανοδική ζεύξη</b>		
Λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή για την ανοδική ζεύξη, παρουσία βροχής μόνο στην καθοδική ζεύξη	$(C/N)_u$ (dB)	22,09

<b>Λόγος κέρδους κεραιάς λήψης προς θερμοκρασία θορύβου δέκτη</b>		
Λόγος κέρδους κεραιάς λήψης του δέκτη του επίγειου σταθμού λήψης (Ατλάντα) προς θερμοκρασία θορύβου δέκτη	$G_r/T$ (dB/ $^{\circ}$ K)	38,37

<b>Αύξηση της θερμοκρασίας θορύβου της κεραιάς λήψης του δέκτη</b>		
Αύξηση της θερμοκρασίας θορύβου της κεραιάς λήψης του επίγειου σταθμού λήψης (Ατλάντα), λόγω βροχής μόνο στην καθοδική ζεύξη	$\Delta T_r$ ( $^{\circ}$ K)	237,9

Το κρίσιμο μέγεθος που πρέπει να προσδιορισθεί σε μια δορυφορική ζεύξη είναι ο λόγος  $G/T$  του επίγειου σταθμού λήψης. Για τη συγκεκριμένη δορυφορική ζεύξη Παρισίου – Ατλάντας με την υπόθεση ότι υπάρχει βροχόπτωση μόνο στο ανοδικό τμήμα της ζεύξης, ο αναγκαίος λόγος  $G/T$  προσδιορίσθηκε στην τιμή 31,48 dB/ $^{\circ}$ K. Η αντίστοιχη απαιτούμενη τιμή με την υπόθεση ότι βρέχει μόνο στο καθοδικό τμήμα της ζεύξης προέκυψε

38.37dB/°K. Επομένως, ο επίγειος σταθμός λήψης στην Ατλάντα πρέπει να επιτυγχάνει λόγο G/T τουλάχιστον 38.37 dB/°K Με βάση την παρατήρηση αυτή και τις παραμέτρους που υπολογίστηκαν, είναι πλέον δυνατή η σχεδίαση της ζεύξης, δηλαδή ο προσδιορισμός των κερδών και των διαστάσεων των κεραιών εκπομπής και λήψης στους επίγειους σταθμούς, της θερμοκρασίας θορύβου του συστήματος λήψης στην Ατλάντα, καθώς και της ισχύος εκπομπής στο σταθμό εκπομπής στο Παρίσι (πίνακας 7.4).

**Πίνακας 7.4:** Υπολογισμός των χαρακτηριστικών των επίγειων σταθμών εκπομπής (Παρίσι) και λήψης (Ατλάντα).

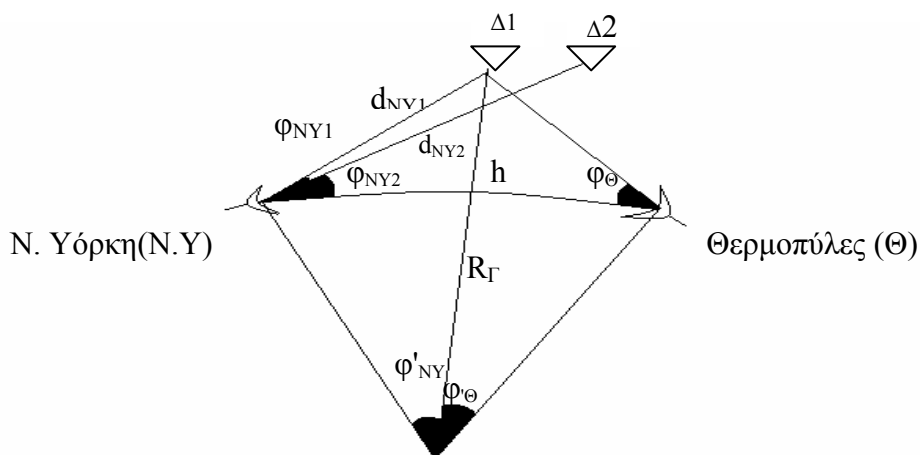
<b>Υπολογισμός διαμέτρου κεραιάς επίγειου σταθμού λήψης (Ατλάντα)</b>		
Θερμοκρασία περιβάλλοντος του δέκτη στον επίγειο σταθμό λήψης (27°C)	$T_N$ (°K)	300
Ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου της κεραιάς λήψης λόγω βροχής στην καθοδική ζεύξη, στον επίγειο σταθμό λήψης ( $T_N + \Delta T_r$ )	$T_{Nr}$ (°K)	537,896
Αύξηση της θερμοκρασίας θορύβου του δέκτη λόγω των ενισχυτών του	$\Delta T_{ampl}$ (°K)	50
Αύξηση της θερμοκρασίας θορύβου του δέκτη λόγω εξασθένησης στον κυματοδηγό της κεραιάς λήψης	$\Delta T_{wg}$ (°K)	110,713
Συνολική ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου του δέκτη στον επίγειο σταθμό λήψης	$T_N'$ (°K)	698,609
Λόγος κέρδους κεραιάς λήψης προς θερμοκρασία θορύβου δέκτη	$G_r/T$ (°K)	6871,010
Μήκος κύματος λειτουργίας καθοδικής ζεύξης	$\lambda_d$ (m)	0,025
Κέρδος κεραιάς επίγειου σταθμού λήψης	$G_r$	4800150,153
Κέρδος κεραιάς επίγειου σταθμού λήψης (dB)	$G_r$ (dB)	66,813
Διάμετρος κεραιάς επίγειου σταθμού λήψης	$D$ (m)	20,849

<b>Υπολογισμός ισχύος εκπομπής επίγειου σταθμού εκπομπής (Παρίσι)</b>		
Προτεινόμενη διάμετρος κεραιάς επίγειου σταθμού εκπομπής	$D$ (m)	10
Μήκος κύματος λειτουργίας ανοδικής ζεύξης	$\lambda_u$ (m)	0,0214
Κέρδος κεραιάς επίγειου σταθμού εκπομπής	$G_t$ (dB)	61,774
Ισχύς εκπομπής επίγειου σταθμού εκπομπής	$P_t$ (W)	45,093

## 8 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗΣ ΖΕΥΞΗΣ «ΘΕΡΜΟΠΥΛΕΣ – Ν. ΥΟΡΚΗ»

### 8.1 Χαρακτηριστικά της ζεύξης

Στο Κεφάλαιο αυτό εφαρμόζεται η μεθοδολογία σχεδιασμού και οι εξισώσεις που αναπτύχθηκαν στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, για το σχεδιασμό της δορυφορικής ζεύξης «Θερμοπύλες – Ν. Υόρκη». Οι υπολογισμοί των διαφόρων μεγεθών πραγματοποιούνται με τη βοήθεια του προγράμματος “Excel”. Το διάγραμμα της ζεύξης παριστάνεται στο σχήμα 8.1 και θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της ζεύξης που ακολουθεί.



**Σχήμα 8.1:** Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ζεύξης «Θερμοπύλες–Ν. Υόρκη».

Στον πίνακα 8.1 παρουσιάζονται τα γενικά χαρακτηριστικά της ζεύξης, τα χαρακτηριστικά του δορυφορικού αναμεταδότη και τα χαρακτηριστικά παρεμβολής του συστήματος. Στο σχήμα 8.2 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική καμπύλη κέρδους του ενισχυτή TWT.

Πίνακας 8.1: Χαρακτηριστικά της ζεύξης «Θερμοπύλες – Ν. Υόρκη».

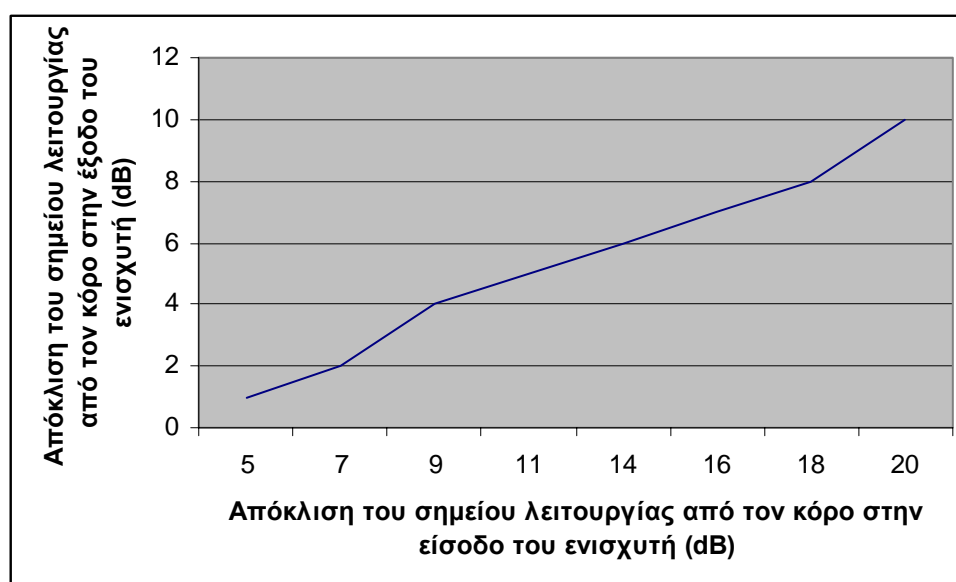
### Δορυφορική ζεύξη "Θερμοπύλες - Ν. Υόρκη"

Γενικά χαρακτηριστικά της ζεύξης			
Τοποθεσία επίγειου σταθμού εκπομπής (Θερμοπύλες)	Θερμοπύλες (degrees) ( <sup>0</sup> N, <sup>0</sup> E)	38	-22
Τοποθεσία επίγειου σταθμού λήψης (Ν. Υόρκη)	Ν. Υόρκη (degrees) ( <sup>0</sup> N, <sup>0</sup> W)	40	74
Θέση δορυφορικού αναμεταδότη Δ1 (Γεωγρ. Μήκος)	(degrees) ( <sup>0</sup> W)	30	
Συχνότητα λειτουργίας ανοδικής ζεύξης (uplink)	$f_u$ (GHz)	14	
Συχνότητα λειτουργίας καθοδικής ζεύξης (downlink)	$f_d$ (GHz)	12	
Τύπος διαμόρφωσης	QPSK		
Εύρος ζώνης θορύβου	B (MHz)	36	
Υψόμετρα επίγειων σταθμών (εκπομπής και λήψης)	$H_o$ (m)	15	200
Ρυθμός βροχόπτωσης στην περιοχή των Θερμοπυλών που ξεπερνιέται για 0,01% του χρόνου	$R_{0,01}$ (mm/h)	40	
Παράμετρος βροχόπτωσης a στη συχνότητα της ανοδικής ζεύξης	a (dB/km)	0,0310	
Παράμετρος βροχόπτωσης b στη συχνότητα της ανοδικής ζεύξης	b (dB/km)	1,1403	
Ρυθμός βροχόπτωσης στην περιοχή της Ν. Υόρκης που ξεπερνιέται για 0,01% του χρόνου	$R_{0,01}$ (mm/h)	45	
Παράμετρος βροχόπτωσης a στη συχνότητα της καθοδικής ζεύξης	a (dB/km)	0,0169	
Παράμετρος βροχόπτωσης b στη συχνότητα της καθοδικής ζεύξης	b (dB/km)	1,2034	

Χαρακτηριστικά δορυφορικού αναμεταδότη		
Πυκνότητα ροής ισχύος εισόδου που οδηγεί τον ενισχυτή TWT του δορυφορικού αναμεταδότη στον κορεσμό	$\Omega_{sat}$ (dBW/m <sup>2</sup> )	-80
Λόγος κέρδους κεραίας δορυφόρου προς θερμοκρασία θορύβου	G/T (dB/ <sup>0</sup> K)	3
Ισχύς κορεσμού εξόδου EIRP του ενισχυτή TWT	EIRP <sub>s,sat</sub> (dBW)	40
Περιθώριο ισχύος εξόδου του ενισχυτή TWT υπό συνθήκες "καθαρού ουρανού"	BO <sub>o</sub> (dB)	3
Περιθώριο ισχύος εισόδου του ενισχυτή TWT υπό συνθήκες "καθαρού ουρανού"	BO <sub>i</sub> (dB)	8
Απώλειες κέρδους λόγω σφάλματος σκόπευσης και ατμοσφαιρικών απωλειών στην ανοδική ζεύξη	L <sub>u</sub> (dB)	3,5
Απώλειες κέρδους λόγω σφάλματος σκόπευσης και ατμοσφαιρικών απωλειών στην καθοδική ζεύξη	L <sub>d</sub> (dB)	2

Χαρακτηριστικά παρεμβολής		
Θέση παρεμβάλλοντος δορυφόρου Δ2 (Γεωργ. Μήκος)	(Degrees) ( <sup>0</sup> W)	25
Λόγος σήματος προς παρεμβολή από γειτονικό δορυφόρο υπό συνθήκες "καθαρού ουρανού" για την ανοδική ζεύξη	(C/I) <sub>u.s</sub> (dB)	32
Λόγος σήματος προς παρεμβολή από γειτονικό δορυφόρο υπό συνθήκες "καθαρού ουρανού" για την καθοδική ζεύξη	(C/I) <sub>d.s</sub> (dB)	30
Λόγος σήματος προς παρεμβολή από γειτονικό κανάλι υπό συνθήκες "καθαρού ουρανού" για την ανοδική ζεύξη	(C/I) <sub>u.c</sub> (dB)	29
Λόγος σήματος προς παρεμβολή από γειτονικό κανάλι υπό συνθήκες "καθαρού ουρανού" για την καθοδική ζεύξη	(C/I) <sub>d.c</sub> (dB)	30
Περιθώριο διασυμβολικής παρεμβολής	M <sub>ISI</sub> (dB)	1,5

Χαρακτηριστικά επίδοσης του συστήματος		
Ελάχιστος λόγος σήματος προς θόρυβο που απαιτείται στην είσοδο του δέκτη του επίγειου σταθμού, ώστε ο μέγιστος ανεκτός ρυθμός σφαλμάτων κατά την αναγνώριση bits να είναι BER=10 <sup>-4</sup>	C/N (dB)	10,60
Συνολική πιθανότητα να τεθεί εκτός λειτουργίας το σύστημα για ένα έτος	P <sub>out</sub>	0,06%
Προτεινόμενη αναλογία χρόνων διακοπής λειτουργίας της ανοδικής και της καθοδικής ζεύξης	1 προς 2	



Σχήμα 8.2: Χαρακτηριστική καμπύλη κέρδους του ενισχυτή TWTF.

## 8.2 Προδιαγραφές διαθεσιμότητας του συστήματος

Το κατώφλι της πιθανότητας εσφαλμένης αναγνώρισης bits στο δέκτη του επίγειου σταθμού λήψης, είναι ίσο με  $10^{-4}$ . Αυτό σημαίνει ότι, αν η πιθανότητα σφάλματος γίνει μεγαλύτερη από αυτή την τιμή, θα έχουμε απώλεια συγχρονισμού στο δέκτη και διακοπή της ζεύξης. Η προδιαγραφή για την υπό μελέτη ζεύξη υπαγορεύει ότι η πιθανότητα σφάλματος αναγνώρισης bits επιτρέπεται να υπερβαίνει το κατώφλι  $10^{-4}$  για όχι περισσότερο από το  $P_{out}=0.06\%$  του ετήσιου χρόνου λειτουργίας της ζεύξης. Επειδή θεωρείται σχεδόν απίθανο να υπάρχει ταυτόχρονη διακοπή και της ανοδικής και της καθοδικής ζεύξης, η  $P_{out}=0,06\%$  μπορεί να γραφεί ως το άθροισμα

$$P_{out}=P_{out,u} + P_{out,d}$$

όπου  $P_{out,u}$ ,  $P_{out,d}$  είναι οι πιθανότητες να τεθούν εκτός λειτουργίας η ανοδική ή η καθοδική ζεύξη, αντίστοιχα. Με δεδομένη την προτεινόμενη κατανομή των χρόνων διακοπής λειτουργίας της ζεύξης (1:2) προκύπτει ότι

$$P_{out,u}=0,02\% \text{ και } P_{out,d}=0,04\%$$

Η ενδεχόμενη διακοπή της ζεύξης οφείλεται κυρίως στις βροχοπτώσεις αλλά και στην παρεμβολή από γειτονικό δορυφόρο. Επειδή θεωρείται ελάχιστα πιθανό το ενδεχόμενο ταυτόχρονης βροχόπτωσης στις περιοχές των επίγειων σταθμών εκπομπής και λήψης, η ανάλυση της ζεύξης διαχωρίζεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος θεωρείται ότι βρέχει μόνο στην περιοχή του επίγειου σταθμού εκπομπής (Θερμοπύλες), ενώ στο δεύτερο μέρος θεωρείται ότι βρέχει μόνο στην περιοχή του επίγειου σταθμού λήψης (Ν. Υόρκη).

## 8.3 Ανάλυση της ζεύξης, με βροχή μόνο στην ανοδική ζεύξη «Θερμοπύλες – Δορυφόρος»

Στον πίνακα 8.2 παρουσιάζονται οι υπολογισμοί της ζεύξης, για βροχή μόνο στην ανοδική ζεύξη «Θερμοπύλες – Δορυφόρος».



**Πίνακας 8.2:** Υπολογισμοί της ζεύξης, για βροχή μόνο στην ανοδική ζεύξη «Θερμοπύλες – Δορυφόρος».

**Ανάλυση της ζεύξης, με βροχή μόνο στην ανοδική ζεύξη  
(Θερμοπύλες - Δορυφόρος)**

Υπολογισμός γεωμετρικών παραμέτρων		Θερμοπύλες-Δ1
Γωνία ανύψωσης του επίγειου σταθμού εκπομπής (Θερμοπύλες) προς το δορυφόρο	$\varphi$ (degrees)	20,90
Γωνιακή απόσταση του επίγειου σταθμού εκπομπής (Θερμοπύλες) σε σχέση με το δορυφόρο με σημείο αναφοράς το κέντρο της γης	$\varphi'$ (degrees)	60,98
Απόσταση μεταξύ του επίγειου σταθμού εκπομπής (Θερμοπύλες) και δορυφόρου	$d$ (km)	39464
Γωνιακή απόσταση των δύο δορυφόρων: Δ1 (κύριος δορυφόρος), Δ2 (παρεμβάλλον δορυφόρος)	$\beta$ (degrees)	5

Υπολογισμός της απόσβεσης λόγω βροχής για την ανοδική ζεύξη		
Υπολογισμός του μέσου ύψους της ισόθερμης των 0 °C	$H$ (Km)	3,875
Υπολογισμός του ενεργού μήκους της ζεύξης που διέρχεται από βροχή	$L_a$ (Km)	10,821
Οριζόντια προβολή $L_D$ του $L_a$	$L_D$ (Km)	10,110
Υπολογισμός του συντελεστή μείωσης $r_{0,01}$	$r_{0,01}$	0,6552
Υπολογισμός της ειδικής απόσβεσης λόγω βροχής	$A_0$ (dB/Km)	2,081
Εκτίμηση της απόσβεσης λόγω βροχής για υπέρβαση 0,01% του χρόνου	$A_{0,01}$ (dB)	14,751
Τελικός υπολογισμός της απόσβεσης λόγω βροχής $L_{r,u} = A_{0,02}$	$L_{r,u}$ (dB)	11,24

Λόγος σήματος προς θόρυβο για την ανοδική ζεύξη		
Ισοδύναμη ιστροπική ακτινοβολούμενη ισχύς του επίγειου σταθμού των Θερμοπυλών που απαιτείται για λειτουργία του ενισχυτή TWT στον ιορεσμό	$EIRP_{sat}$ (dBW)	86,41
Λόγος σήματος προς θόρυβο της ανοδικής ζεύξης, παρουσία βροχής μόνο στην ανοδική ζεύξη	$(C/N)_{u,r}$ (dB)	12,43

Λόγος σήματος προς παρεμβολή για την ανοδική ζεύξη		
Λόγος σήματος προς παρεμβολή της ανοδικής ζεύξης, για "καθαρό ουρανό"	$(C/I)_u$ (dB)	27,24
Λόγος σήματος προς παρεμβολή της ανοδικής ζεύξης, παρουσία βροχής μόνο στην ανοδική ζεύξη	$(C/I)_{u,r}$ (dB)	16,00

Λόγος σήματος προς θόρυβο μαζί με την παρεμβολή για την ανοδική ζεύξη		
Λόγος σήματος προς θόρυβο μαζί με παρεμβολή για την ανοδική ζεύξη, παρουσία βροχής μόνο στην ανοδική ζεύξη	$(C/N)_{u,r}$ (dB)	10,85

Ισοδύναμη ιστροπική ακτινοβολούμενη ισχύς από την κεραία του επίγειου σταθμού εκπομπής (Θερμοπύλες)		
Ισοδύναμη ιστροπική ακτινοβολούμενη ισχύς από την κεραία του επίγειου σταθμού εκπομπής (Θερμοπύλες)	EIRP (dBW)	78,41

Λόγος σήματος προς θόρυβο για την καθοδική ζεύξη		
Ελάχιστος απαιτούμενος συνολικός λόγος σήματος προς θόρυβο στην είσοδο του δέκτη του επίγειου σταθμού λήψης (N. Υόρκη)	$(C/N)$ (dB)	12,1
Λόγος σήματος προς θόρυβο της καθοδικής ζεύξης, παρουσία βροχής μόνο στην ανοδική ζεύξη	$(C/N)_d$ (dB)	8,42

Λόγος σήματος προς παρεμβολή για την καθοδική ζεύξη		
Λόγος σήματος προς παρεμβολή για την καθοδική ζεύξη, υπό συνθήκες "καθαρού ουρανού"	$(C/I)_{d,nom}$ (dB)	26,99
Περιθώριο ισχύος εισόδου του ενισχυτή TWT, παρουσία βροχής μόνο στην ανοδική ζεύξη	$BO'_i$ (dB)	19,24
Διαφορά περιθωρίων εξόδου του ενισχυτή TWT (παρουσία & απουσία βροχής στην ανοδική ζεύξη)	$\Delta BO_o$ (dB)	3,24
Λόγος σήματος προς παρεμβολή για την καθοδική ζεύξη, παρουσία βροχής μόνο στην ανοδική ζεύξη	$(C/I)_d$ (dB)	23,75

Λόγος κέρδους κεραίας λήψης προς θερμοκρασία θορύβου δέκτη		
Λόγος κέρδους κεραίας λήψης του δέκτη του επίγειου σταθμού λήψης (N. Υόρκη) προς θερμοκρασία θορύβου του δέκτη	$G_r/T$ (dB/ $^{\circ}$ K)	29,35

Λόγος σήματος προς θόρυβο μαζί με την παρεμβολή για την καθοδική ζεύξη		
Λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή της καθοδικής ζεύξης, παρουσία βροχής μόνο στην ανοδική ζεύξη	$(C/N)_d$ (dB)	8,29

#### 8.4 Ανάλυση της ζεύξης, με βροχή μόνο στην καθοδική ζεύξη «Δορυφόρος – Ν. Υόρκη»

Στον πίνακα 8.3 παρουσιάζονται οι υπολογισμοί της ζεύξης, για βροχή μόνο στην καθοδική ζεύξη «Δορυφόρος – Ν. Υόρκη».

**Πίνακας 8.3:** Υπολογισμοί της ζεύξης, για βροχή μόνο στην καθοδική ζεύξη «Δορυφόρος – Ν. Υόρκη».

**Ανάλυση της ζεύξης, με βροχή μόνο στην καθοδική ζεύξη  
(Δορυφόρος - Ν. Υόρκη)**

Υπολογισμός γεωμετρικών παραμέτρων		Ν. Υόρκη-Δ1	Ν. Υόρκη-Δ2
Γωνία ανύψωσης του επίγειου σταθμού λήψης (Ν. Υόρκη) σε σχέση με το δορυφόρο	$\varphi$ (degrees)	25,60	22,11
Γωνιακή απόσταση του επίγειου σταθμού λήψης (Ν. Υόρκη) σε σχέση με το δορυφόρο με σημείο αναφοράς το κέντρο της γης	$\varphi'$ (degrees)	56,56	59,83
Απόσταση μεταξύ επίγειου σταθμού λήψης (Ν. Υόρκη) και δορυφόρου	$d$ (km)	39012	39345
Γωνιακή απόσταση των δύο δορυφόρων: Δ1 (κύριος δορυφόρος), Δ2 (παρεμβάλλον δορυφόρος)	$\beta$ (degrees)	5	5

Υπολογισμός της απόσβεσης λόγω βροχής για την καθοδική ζεύξη		
Υπολογισμός του μέσου ύψους της ισόθερμης των 0 °C	$H$ (Km)	3,725
Υπολογισμός του ενεργού μήκους ζεύξης που διέρχεται από βροχή	$L_a$ (Km)	8,159
Οριζόντια προβολή $L_D$ του $L_a$	$L_D$ (Km)	7,358
Υπολογισμός του συντελεστή μείωσης $r_{0.01}$	$r_{0.01}$	0,7078
Υπολογισμός της ειδικής απόσβεσης λόγω βροχής	$A_0$ (dB/Km)	1,650
Εκτίμηση της απόσβεσης λόγω βροχής για υπέρβαση 0,01% του χρόνου	$A_{0.01}$ (dB)	9,525
Τελικός υπολογισμός της απόσβεσης λόγω βροχής $L_{r,d} = A_{0.02}$	$L_{r,d}$ (dB)	5,45

Λόγος σήματος προς θόρυβο για την καθοδική ζεύξη		
Λόγος σήματος προς θόρυβο της καθοδικής ζεύξης, παρουσία βροχής μόνο στην καθοδική ζεύξη	$(C/N)_{d,r}$ (dB)	11,68
Λόγος σήματος προς παρεμβολή της καθοδικής ζεύξης, παρουσία βροχής μόνο στην καθοδική ζεύξη	$(C/I)_{d,r}$ (dB)	27

Λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή της καθοδικής ζεύξης, παρουσία βροχής μόνο στην καθοδική ζεύξη	$(C/N)_{d,r}$ (dB)	11,56
--	--------------------	-------

<b>Λόγος σήματος προς θόρυβο μαζί με την παρεμβολή για την ανοδική ζεύξη</b>		
Λόγος σήματος προς θόρυβο μαζί με παρεμβολή για την ανοδική ζεύξη, παρουσία βροχής μόνο στην καθοδική ζεύξη	$(C/N)_u$ (dB)	22,09

<b>Λόγος κέρδους κεραίας λήψης προς θερμοκρασία θορύβου δέκτη</b>		
Λόγος κέρδους κεραίας λήψης του δέκτη του επίγειου σταθμού λήψης (N. Υόρκη) προς θερμοκρασία θορύβου του δέκτη	$G_r/T$ (dB/ <sup>0</sup> K)	34,82

<b>Αύξηση της θερμοκρασίας θορύβου της κεραίας λήψης του δέκτη</b>		
Αύξηση της θερμοκρασίας θορύβου της κεραίας λήψης του επίγειου σταθμού λήψης (N. Υόρκη), λόγω βροχής μόνο στην καθοδική ζεύξη	$\Delta T_r$ ( <sup>0</sup> K)	195,2

Το κρίσιμο μέγεθος που πρέπει να προσδιορισθεί σε μια δορυφορική ζεύξη είναι ο λόγος  $G/T$  του επίγειου σταθμού λήψης. Για τη συγκεκριμένη δορυφορική ζεύξη Θερμοπυλών – Ν. Υόρκης με την υπόθεση ότι υπάρχει βροχόπτωση μόνο στο ανοδικό τμήμα της ζεύξης, ο αναγκαίος λόγος  $G/T$  προσδιορίσθηκε στην τιμή 29,35 dB/<sup>0</sup>K. Η αντίστοιχη απαιτούμενη τιμή με την υπόθεση ότι βρέχει μόνο στο καθοδικό τμήμα της ζεύξης προέκυψε 34.82dB/<sup>0</sup>K. Επομένως, ο επίγειος σταθμός λήψης στη Ν. Υόρκη πρέπει να επιτυγχάνει λόγο  $G/T$  τουλάχιστον 34.82 dB/<sup>0</sup>K Με βάση την παρατήρηση αυτή και τις παραμέτρους που υπολογίστηκαν, είναι πλέον δυνατή η σχεδίαση της ζεύξης, δηλαδή ο προσδιορισμός των κερδών και των διαστάσεων των κεραιών εκπομπής και λήψης στους επίγειους σταθμούς, της θερμοκρασίας θορύβου του συστήματος λήψης στη Ν. Υόρκη, καθώς και της ισχύος εκπομπής στο σταθμό εκπομπής στις Θερμοπύλες (πίνακας 8.4).

**Πίνακας 8.4:** Υπολογισμός των χαρακτηριστικών των επίγειων σταθμών εκπομπής (Θερμοπύλες) και λήψης (Ν. Υόρκη).

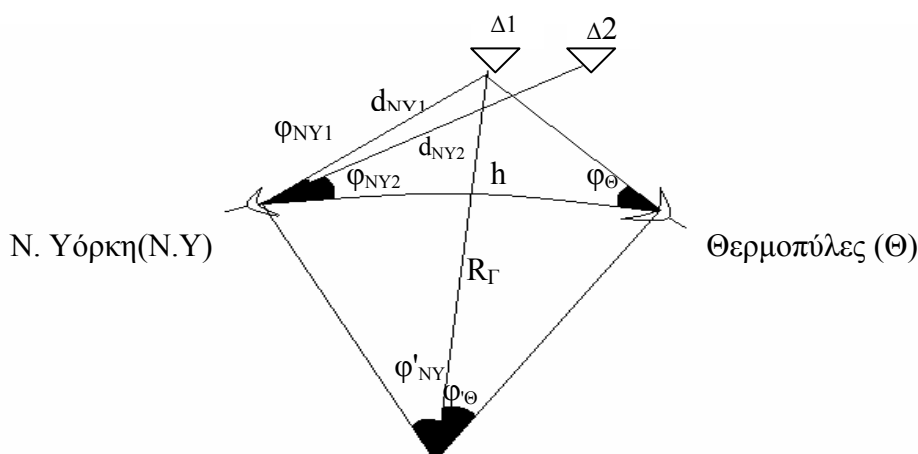
<b>Υπολογισμός διαμέτρου κεραίας επίγειου σταθμού λήψης (Ν. Υόρκη)</b>		
Θερμοκρασία περιβάλλοντος του δέκτη στον επίγειο σταθμό λήψης (27°C)	$T_N$ (°K)	300
Ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου της κεραίας λήψης λόγω βροχής στην καθοδική ζεύξη, στον επίγειο σταθμό λήψης ( $T_N + \Delta T_r$ )	$T_{Nr}$ (°K)	495,239
Αύξηση της θερμοκρασίας θορύβου του δέκτη λόγω των ενισχυτών του	$\Delta T_{ampl}$ (°K)	50
Αύξηση της θερμοκρασίας θορύβου του δέκτη λόγω εξασθένισης στον κυματοδηγό της κεραίας λήψης	$\Delta T_{wg}$ (°K)	110,713
Συνολική ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου του δέκτη στον επίγειο σταθμό λήψης	$T_N'$ (°K)	655,952
Λόγος κέρδους κεραίας λήψης προς θερμοκρασία θορύβου δέκτη	$G_r/T$ (°K)	3033,452
Μήκος κύματος λειτουργίας καθοδικής ζεύξης	$\lambda_u$ (m)	0,025
Κέρδος κεραίας επίγειου σταθμού λήψης	$G_r$	1989798,067
Κέρδος κεραίας επίγειου σταθμού λήψης (dB)	$G_r$ (dB)	62,988
Διάμετρος κεραίας επίγειου σταθμού λήψης	$D$ (m)	13,424

<b>Υπολογισμός ισχύος εκπομπής επίγειου σταθμού εκπομπής (Θερμοπύλες)</b>		
Προτεινόμενη διάμετρος κεραίας επίγειου σταθμού εκπομπής	$D$ (m)	10
Μήκος κύματος λειτουργίας ανοδικής ζεύξης	$\lambda_d$ (m)	0,0214
Κέρδος κεραίας επίγειου σταθμού εκπομπής	$G_t$ (dB)	61,774
Ισχύς εκπομπής επίγειου σταθμού εκπομπής	$P_t$ (W)	46,129

## 9 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗΣ ΖΕΥΞΗΣ «ΘΕΡΜΟΠΥΛΕΣ – Λ. ΑΝΤΖΕΛΕΣ»

### 9.1 Χαρακτηριστικά της ζεύξης

Στο Κεφάλαιο αυτό εφαρμόζεται η μεθοδολογία σχεδιασμού και οι εξισώσεις που αναπτύχθηκαν στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, για το σχεδιασμό της δορυφορικής ζεύξης «Θερμοπύλες – Ν. Υόρκη». Οι υπολογισμοί των διαφόρων μεγεθών πραγματοποιούνται με τη βοήθεια του προγράμματος “Excel”. Το διάγραμμα της ζεύξης παριστάνεται στο σχήμα 9.1 και θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της ζεύξης που ακολουθεί.



**Σχήμα 9.1:** Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ζεύξης «Θερμοπύλες–Λ. Αντζελες».

Στον πίνακα 9.1 παρουσιάζονται τα γενικά χαρακτηριστικά της ζεύξης, τα χαρακτηριστικά του δορυφορικού αναμεταδότη και τα χαρακτηριστικά παρεμβολής του συστήματος. Στο σχήμα 9.2 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική καμπύλη κέρδους του ενισχυτή TWT.

**Πίνακας 9.1:** Χαρακτηριστικά της ζεύξης «Θερμοπύλες – Λ. Αντζελες».

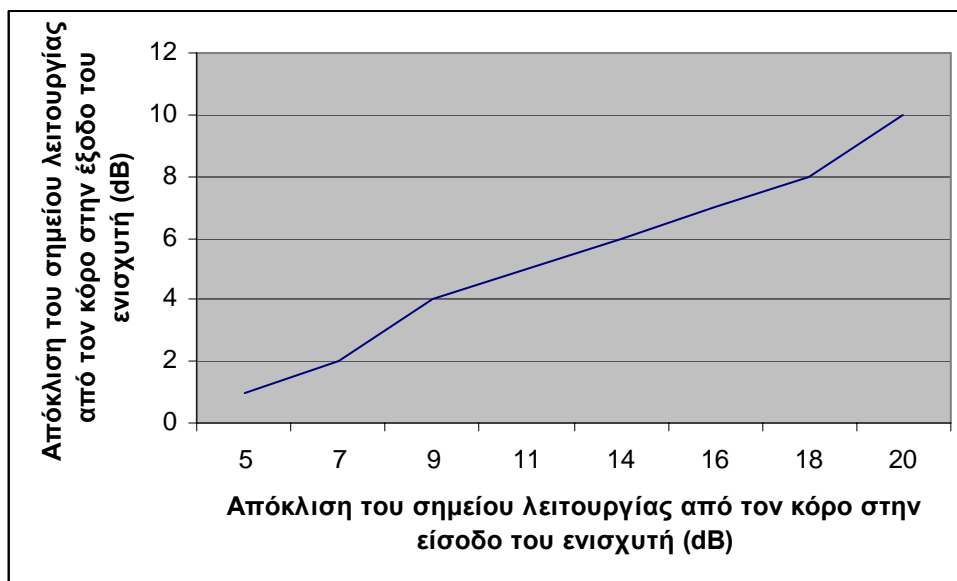
## Δορυφορική ζεύξη "Θερμοπύλες - Λ. Άντζελες"

Γενικά χαρακτηριστικά της ζεύξης			
Τοποθεσία επίγειου σταθμού εκπομπής (Θερμοπύλες)	Θερμοπύλες (degrees) ( <sup>0</sup> N, <sup>0</sup> E)	38	-22
Τοποθεσία επίγειου σταθμού λήψης (Λ. Άντζελες)	Λ. Άντζελες (degrees) ( <sup>0</sup> N, <sup>0</sup> W)	34	118
Θέση δορυφορικού αναμεταδότη Δ1 (Γεωγρ. Μήκος)	(Degrees) ( <sup>0</sup> W)	41	
Συχνότητα λειτουργίας ανοδικής ζεύξης (uplink)	f <sub>u</sub> (GHz)	14	
Συχνότητα λειτουργίας καθοδικής ζεύξης (downlink)	f <sub>d</sub> (GHz)	12	
Τύπος διαμόρφωσης	QPSK		
Εύρος ζώνης θορύβου	B (MHz)	36	
Υψόμετρα επίγειων σταθμών (εκπομπής και λήψης)	H <sub>o</sub> (m)	15	400
Ρυθμός βροχόπτωσης στην περιοχή των Θερμοπυλών που ξεπερνιέται για 0,01% του χρόνου	R <sub>0,01</sub> (mm/h)	40	
Παράμετρος βροχόπτωσης a στη συχνότητα της ανοδικής ζεύξης	a (dB/km)	0,0310	
Παράμετρος βροχόπτωσης b στη συχνότητα της ανοδικής ζεύξης	b (dB/km)	1,1403	
Ρυθμός βροχόπτωσης στην περιοχή του Λ. Άντζελες που ξεπερνιέται για 0,01% του χρόνου	R <sub>0,01</sub> (mm/h)	20	
Παράμετρος βροχόπτωσης a στη συχνότητα της καθοδικής ζεύξης	a (dB/km)	0,0169	
Παράμετρος βροχόπτωσης b στη συχνότητα της καθοδικής ζεύξης	b (dB/km)	1,2034	

Χαρακτηριστικά δορυφορικού αναμεταδότη		
Πυκνότητα ροής ισχύος εισόδου που οδηγεί τον ενισχυτή TWT του δορυφορικού αναμεταδότη στον κορεσμό	Ω <sub>sat</sub> (dBW/m <sup>2</sup> )	-80
Λόγος κέρδους κεραιάς δορυφόρου προς θερμοκρασία θορύβου	G/T (dB/ <sup>0</sup> K)	3
Ισχύς κορεσμού εξόδου EIRP του ενισχυτή TWT	EIRP <sub>s, sat</sub> (dBW)	40
Περιθώριο ισχύος εξόδου του ενισχυτή TWT υπό συνθήκες "καθαρού ουρανού"	BO <sub>o</sub> (dB)	3
Περιθώριο ισχύος εισόδου του ενισχυτή TWT υπό συνθήκες "καθαρού ουρανού"	BO <sub>i</sub> (dB)	8
Απώλειες κέρδους λόγω σφάλματος σκόπευσης και ατμοσφαιρικών απωλειών στην ανοδική ζεύξη	L <sub>u</sub> (dB)	3,5
Απώλειες κέρδους λόγω σφάλματος σκόπευσης και ατμοσφαιρικών απωλειών στην καθοδική ζεύξη	L <sub>d</sub> (dB)	2

Χαρακτηριστικά παρεμβολής		
Θέση παρεμβάλλοντος δορυφόρου Δ2 (Γεωργ. Μήκος)	(Degrees, °W)	45
Λόγος σήματος προς παρεμβολή από γειτονικό δορυφόρο υπό συνθήκες "καθαρού ουρανού" για την ανοδική ζεύξη	(C/I) <sub>u.s</sub> (dB)	32
Λόγος σήματος προς παρεμβολή από γειτονικό δορυφόρο υπό συνθήκες "καθαρού ουρανού" για την καθοδική ζεύξη	(C/I) <sub>d.s</sub> (dB)	30
Λόγος σήματος προς παρεμβολή από γειτονικό κανάλι υπό συνθήκες "καθαρού ουρανού" για την ανοδική ζεύξη	(C/I) <sub>u.c</sub> (dB)	29
Λόγος σήματος προς παρεμβολή από γειτονικό κανάλι υπό συνθήκες "καθαρού ουρανού" για την καθοδική ζεύξη	(C/I) <sub>d.c</sub> (dB)	30
Περιθώριο διασυμβολικής παρεμβολής	M <sub>ISI</sub> (dB)	1,5

Χαρακτηριστικά επίδοσης του συστήματος		
Ελάχιστος λόγος σήματος προς θόρυβο που απαιτείται στην είσοδο του δέκτη του επίγειου σταθμού, ώστε ο μέγιστος ανεκτός ρυθμός σφαλμάτων κατά την αναγνώριση ψηφίων να είναι BER=10 <sup>-4</sup>	C/N (dB)	10,60
Συνολική πιθανότητα να τεθεί εκτός λειτουργίας το σύστημα για ένα έτος	P <sub>out</sub>	0,06%
Προτεινόμενη αναλογία χρόνων διακοπής λειτουργίας της ανοδικής και της καθοδικής ζεύξης	1 προς 2	



Σχήμα 9.2: Χαρακτηριστική καμπύλη κέρδους του ενισχυτή TWTF.



## 9.2 Προδιαγραφές διαθεσιμότητας του συστήματος

Το κατώφλι της πιθανότητας εσφαλμένης αναγνώρισης bits στο δέκτη του επίγειου σταθμού λήψης, είναι ίσο με  $10^{-4}$ . Αυτό σημαίνει ότι, αν η πιθανότητα σφάλματος γίνει μεγαλύτερη από αυτή την τιμή, θα έχουμε απώλεια συγχρονισμού στο δέκτη και διακοπή της ζεύξης. Η προδιαγραφή για την υπό μελέτη ζεύξη υπαγορεύει ότι η πιθανότητα σφάλματος αναγνώρισης bits επιτρέπεται να υπερβαίνει το κατώφλι  $10^{-4}$  για όχι περισσότερο από το  $P_{out}=0.06\%$  του ετήσιου χρόνου λειτουργίας της ζεύξης. Επειδή θεωρείται σχεδόν απίθανο να υπάρχει ταυτόχρονη διακοπή και της ανοδικής και της καθοδικής ζεύξης, η  $P_{out}=0,06\%$  μπορεί να γραφεί ως το άθροισμα

$$P_{out}=P_{out,u} + P_{out,d}$$

όπου  $P_{out,u}$ ,  $P_{out,d}$  είναι οι πιθανότητες να τεθούν εκτός λειτουργίας η ανοδική ή η καθοδική ζεύξη, αντίστοιχα. Με δεδομένη την προτεινόμενη κατανομή των χρόνων διακοπής λειτουργίας της ζεύξης (1:2) προκύπτει ότι

$$P_{out,u}=0,02\% \text{ και } P_{out,d}=0,04\%$$

Η ενδεχόμενη διακοπή της ζεύξης οφείλεται κυρίως στις βροχοπτώσεις αλλά και στην παρεμβολή από γειτονικό δορυφόρο. Επειδή θεωρείται ελάχιστα πιθανό το ενδεχόμενο ταυτόχρονης βροχόπτωσης στις περιοχές των επίγειων σταθμών εκπομπής και λήψης, η ανάλυση της ζεύξης διαχωρίζεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος θεωρείται ότι βρέχει μόνο στην περιοχή του επίγειου σταθμού εκπομπής (Θερμοπύλες), ενώ στο δεύτερο μέρος θεωρείται ότι βρέχει μόνο στην περιοχή του επίγειου σταθμού λήψης (Λ. Αντζελες).

## 9.3 Ανάλυση της ζεύξης, με βροχή μόνο στην ανοδική ζεύξη «Θερμοπύλες – Δορυφόρος»

Στον πίνακα 9.2 παρουσιάζονται οι υπολογισμοί της ζεύξης, για βροχή μόνο στην ανοδική ζεύξη «Θερμοπύλες – Δορυφόρος».

**Πίνακας 9.2:** Υπολογισμοί της ζεύξης, για βροχή μόνο στην ανοδική ζεύξη «Θερμοπύλες – Δορυφόρος».

**Ανάλυση της ζεύξης, με βροχή μόνο στην ανοδική ζεύξη  
(Θερμοπύλες-Δορυφόρος)**

Υπολογισμός γεωμετρικών παραμέτρων		Θερμοπύλες-Δ1
Γωνία ανύψωσης του επίγειου σταθμού εκπομπής (Θερμοπύλες) προς το δορυφόρο	$\varphi$ (degrees)	12,47
Γωνιακή απόσταση του επίγειου σταθμού εκπομπής (Θερμοπύλες) σε σχέση με το δορυφόρο με σημείο αναφοράς το κέντρο της γης	$\varphi'$ (degrees)	69,04
Απόσταση μεταξύ του επίγειου σταθμού εκπομπής (Θερμοπύλες) και δορυφόρου	$d$ (km)	40323
Γωνιακή απόσταση των δύο δορυφόρων: Δ1 (κύριος δορυφόρος), Δ2 (παρεμβάλλον δορυφόρος)	$\beta$ (degrees)	4

Υπολογισμός της απόσβεσης λόγω βροχής για την ανοδική ζεύξη		
Υπολογισμός του μέσου ύψους της ισόθερμης των 0 °C	$H$ (Km)	3,875
Υπολογισμός του ενεργού μήκους της ζεύξης που διέρχεται από βροχή	$L_a$ (Km)	17,879
Οριζόντια προβολή $L_D$ του $L_S$	$L_D$ (Km)	17,457
Υπολογισμός του συντελεστή μείωσης $r_{0,01}$	$r_{0,01}$	0,5239
Υπολογισμός της ειδικής απόσβεσης λόγω βροχής	$A_0$ (dB/Km)	2,081
Εκτίμηση της απόσβεσης λόγω βροχής για υπέρβαση 0,01% του χρόνου	$A_{0,01}$ (dB)	19,488
Τελικός υπολογισμός της απόσβεσης λόγω βροχής $L_{r,u} = A_{0,02}$	$L_{r,u}$ (dB)	14,85

Λόγος σήματος προς θόρυβο για την ανοδική ζεύξη		
Ισοδύναμη ιστροπική ακτινοβολούμενη ισχύς του επίγειου σταθμού των Θερμοπυλών που απαιτείται για λειτουργία του ενισχυτή TWT στον κορεσμό	$EIRP_{sat}$ (dBW)	86,60
Λόγος σήματος προς θόρυβο της ανοδικής ζεύξης, παρουσία βροχής μόνο στην ανοδική ζεύξη	$(C/N)_{u,r}$ (dB)	8,82

Λόγος σήματος προς παρεμβολή για την ανοδική ζεύξη		
Λόγος σήματος προς παρεμβολή της ανοδικής ζεύξης, για "καθαρό ουρανό"	$(C/I)_u$ (dB)	27,24
Λόγος σήματος προς παρεμβολή της ανοδικής ζεύξης, παρουσία βροχής μόνο στην ανοδική ζεύξη	$(C/I)_{u,r}$ (dB)	12,39

**Λόγος σήματος προς θόρυβο μαζί με την παρεμβολή για την ανοδική ζεύξη**

Λόγος σήματος προς θόρυβο μαζί με παρεμβολή για την ανοδική ζεύξη, παρουσία βροχής μόνο στην ανοδική ζεύξη	$(C/N)_{u,r}$ (dB)	7,24
--	--------------------	------

**Ισοδύναμη ιστροπική ακτινοβολούμενη ισχύς από την κεραία του επίγειου σταθμού εκπομπής (Θερμοπύλες)**

Ισοδύναμη ιστροπική ακτινοβολούμενη ισχύς από την κεραία του επίγειου σταθμού εκπομπής (Θερμοπύλες)	EIRP (dBW)	78,60
---	------------	-------

**Λόγος σήματος προς θόρυβο για την καθοδική ζεύξη**

Ελάχιστος απαιτούμενος συνολικός λόγος σήματος προς θόρυβο στην είσοδο του δέκτη του επίγειου σταθμού λήψης (Λ. Άντζελες)	$(C/N)$ (dB)	12,1
Λόγος σήματος προς θόρυβο της καθοδικής ζεύξης, παρουσία βροχής μόνο στην ανοδική ζεύξη	$(C/N)_d$ (dB)	6,01

**Λόγος σήματος προς παρεμβολή για την καθοδική ζεύξη**

Λόγος σήματος προς παρεμβολή για την καθοδική ζεύξη, υπό συνθήκες "καθαρού ουρανού"	$(C/I)_{d,nom}$ (dB)	26,99
Περιθώριο ισχύος εισόδου του ενισχυτή TWT, παρουσία βροχής μόνο στην ανοδική ζεύξη	$BO'_i$ (dB)	22,85
Διαφορά περιθωρίων εξόδου του ενισχυτή TWT (παρουσία & απουσία βροχής στην ανοδική ζεύξη)	$\Delta BO_o$ (dB)	3,24
Λόγος σήματος προς παρεμβολή για την καθοδική ζεύξη, παρουσία βροχής μόνο στην ανοδική ζεύξη	$(C/I)_d$ (dB)	23,75

**Λόγος κέρδους κεραίας λήψης προς θερμοκρασία θορύβου δέκτη**

Λόγος κέρδους κεραίας λήψης του δέκτη του επίγειου σταθμού λήψης (Λ. Άντζελες) προς θερμοκρασία θορύβου του δέκτη	$G_r/T$ (dB/°K)	27,52
---	-----------------	-------

**Λόγος σήματος προς θόρυβο μαζί με την παρεμβολή για την καθοδική ζεύξη**

Λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή της καθοδικής ζεύξης, παρουσία βροχής μόνο στην ανοδική ζεύξη	$(C/N)_d$ (dB)	5,94
---	----------------	------

**9.4 Ανάλυση της ζεύξης, με βροχή μόνο στην καθοδική ζεύξη «Δορυφόρος – Λ. Άντζελες»**

Στον πίνακα 9.3 παρουσιάζονται οι υπολογισμοί της ζεύξης, για βροχή μόνο στην καθοδική ζεύξη «Δορυφόρος – Λ. Άντζελες».

**Πίνακας 9.3:** Υπολογισμοί της ζεύξης, για βροχή μόνο στην καθοδική ζεύξη «Δορυφόρος – Λ. Άντζελες».

**Ανάλυση της ζεύξης, με βροχή μόνο στην καθοδική ζεύξη  
(Δορυφόρος - Λ. Άντζελες)**

Υπολογισμός γεωμετρικών παραμέτρων		Λ Άντζελες-Δ1	Λ. Άντζελες-Δ2
Γωνία ανύψωσης του επίγειου σταθμού λήψης (Λ. Άντζελες) σε σχέση με το δορυφόρο	$\varphi$ (degrees)	2,05	5,37
Γωνιακή απόσταση του επίγειου σταθμού λήψης (Λ. Άντζελες) σε σχέση με το δορυφόρο με σημείο αναφοράς το κέντρο της γης	$\varphi'$ (degrees)	79,25	75,97
Απόσταση μεταξύ επίγειου σταθμού λήψης (Λ. Άντζελες) και δορυφόρου	$d$ (km)	41449	41085
Γωνιακή απόσταση των δύο δορυφόρων: Δ1 (κύριος δορυφόρος), Δ2 (παρεμβάλλον δορυφόρος)	$\beta$ (degrees)	4	4

Υπολογισμός της απόσβεσης λόγω βροχής για την καθοδική ζεύξη		
Υπολογισμός του μέσου ύψους της ισόθερμης των 0 °C	$H$ (Km)	4,175
Υπολογισμός του ενεργού μήκους ζεύξης που διέρχεται από βροχή	$L_a$ (Km)	105,373
Οριζόντια προβολή $L_D$ του $L_a$	$L_D$ (Km)	105,305
Υπολογισμός του συντελεστή μείωσης $r_{0,01}$	$r_{0,01}$	0,1976
Υπολογισμός της ειδικής απόσβεσης λόγω βροχής	$A_0$ (dB/Km)	0,622
Εκτίμηση της απόσβεσης λόγω βροχής για υπέρβαση 0,01% του χρόνου	$A_{0,01}$ (dB)	12,942
Τελικός υπολογισμός της απόσβεσης λόγω βροχής $L_{r,d} = A_{0,02}$	$L_{r,d}$ (dB)	7,41

<b>Λόγος σήματος προς θόρυβο για την καθοδική ζεύξη</b>		
Λόγος σήματος προς θόρυβο της καθοδικής ζεύξης, παρουσία βροχής μόνο στην καθοδική ζεύξη	$(C/N)_{d,r}$ (dB)	11,68
Λόγος σήματος προς παρεμβολή της καθοδικής ζεύξης, παρουσία βροχής μόνο στην καθοδική ζεύξη	$(C/I)_{d,r}$ (dB)	27
Λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή της καθοδικής ζεύξης, παρουσία βροχής μόνο στην καθοδική ζεύξη	$(C/N)_{d,r}$ (dB)	11,56

<b>Λόγος σήματος προς θόρυβο μαζί με παρεμβολή για την ανοδική ζεύξη</b>		
Λόγος σήματος προς θόρυβο μαζί με παρεμβολή για την ανοδική ζεύξη, παρουσία βροχής μόνο στην καθοδική ζεύξη	$(C/N)_u$ (dB)	22,09

<b>Λόγος κέρδους κεραίας λήψης προς θερμοκρασία θορύβου δέκτη</b>		
Λόγος κέρδους κεραίας λήψης του δέκτη του επίγειου σταθμού λήψης (Λ. Αντζελες) προς θερμοκρασία θορύβου του δέκτη	$G_r/T$ (dB/°K)	37,30

<b>Αύξηση της θερμοκρασίας θορύβου της κεραίας λήψης του δέκτη</b>		
Αύξηση της θερμοκρασίας θορύβου της κεραίας λήψης του επίγειου σταθμού λήψης (Λ. Αντζελες), λόγω βροχής μόνο στην καθοδική ζεύξη	$\Delta T_r$ (°K)	223,4

Το κρίσιμο μέγεθος που πρέπει να προσδιορισθεί σε μια δορυφορική ζεύξη είναι ο λόγος  $G/T$  του επίγειου σταθμού λήψης. Για τη συγκεκριμένη δορυφορική ζεύξη Θερμοπυλών – Λ. Αντζελες με την υπόθεση ότι υπάρχει βροχόπτωση μόνο στο ανοδικό τμήμα της ζεύξης, ο αναγκαίος λόγος  $G/T$  προσδιορίσθηκε στην τιμή 27,52 dB/°K. Η αντίστοιχη απαιτούμενη τιμή με την υπόθεση ότι βρέχει μόνο στο καθοδικό τμήμα της ζεύξης προέκυψε 37,30dB/°K. Επομένως, ο επίγειος σταθμός λήψης στη Ν. Υόρκη πρέπει να επιτυγχάνει λόγο  $G/T$  τουλάχιστον 37,30 dB/°K Με βάση την παρατήρηση αυτή και τις παραμέτρους που υπολογίστηκαν, είναι πλέον δυνατή η σχεδίαση

της ζεύξης, δηλαδή ο προσδιορισμός των κερδών και των διαστάσεων των κεραιών εκπομπής και λήψης στους επίγειους σταθμούς, της θερμοκρασίας θορύβου του συστήματος λήψης στο Λ. Άντζελες, καθώς και της ισχύος εκπομπής στο σταθμό εκπομπής στις Θερμοπύλες (πίνακας 9.4).

**Πίνακας 9.4:** Υπολογισμός των χαρακτηριστικών των επίγειων σταθμών εκπομπής (Θερμοπύλες) και λήψης (Λ. Άντζελες).

<b>Υπολογισμός διαμέτρου κεραιάς επίγειου σταθμού λήψης (Λ. Άντζελες)</b>		
Θερμοκρασία περιβάλλοντος του δέκτη στον επίγειο σταθμό λήψης (27°C)	$T_N$ (°K)	300
Ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου της κεραιάς λήψης λόγω βροχής στην καθοδική ζεύξη, στον επίγειο σταθμό λήψης ( $T_N + \Delta T_r$ )	$T_{Nr}$ (°K)	523,442
Αύξηση της θερμοκρασίας θορύβου του δέκτη λόγω των ενισχυτών του	$\Delta T_{ampl}$ (°K)	50
Αύξηση της θερμοκρασίας θορύβου του δέκτη λόγω εξασθένισης στον κυματοδηγό της κεραιάς λήψης	$\Delta T_{wg}$ (°K)	110,713
Συνολική ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου του δέκτη στον επίγειο σταθμό λήψης	$T_N'$ (°K)	684,155
Λόγος κέρδους κεραιάς λήψης προς θερμοκρασία θορύβου δέκτη	$G_r/T$ (°K)	5372,933
Μήκος κύματος λειτουργίας καθοδικής ζεύξης	$\lambda_d$ (m)	0,025
Κέρδος κεραιάς επίγειου σταθμού λήψης	$G_r$	3675918,136
Κέρδος κεραιάς επίγειου σταθμού λήψης (dB)	$G_r$ (dB)	65,654
Διάμετρος κεραιάς επίγειου σταθμού λήψης	$D$ (m)	18,245

<b>Υπολογισμός ισχύος εκπομπής επίγειου σταθμού εκπομπής (Θερμοπύλες)</b>		
Προτεινόμενη διάμετρος κεραιάς επίγειου σταθμού εκπομπής	$D$ (m)	10
Μήκος κύματος λειτουργίας ανοδικής ζεύξης	$\lambda_u$ (m)	0,0214
Κέρδος κεραιάς επίγειου σταθμού εκπομπής	$G_t$ (dB)	61,774
Ισχύς εκπομπής επίγειου σταθμού εκπομπής	$P_t$ (W)	48,159

# 10 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Από την ανάλυση των δορυφορικών ζεύξεων που αναπτύχθηκαν στα Κεφάλαια 7<sup>ο</sup>, 8<sup>ο</sup> και 9<sup>ο</sup>, προκύπτει ότι το κρίσιμο μέγεθος που πρέπει να προσδιορισθεί σε μια δορυφορική ζεύξη είναι ο λόγος G/T του επίγειου σταθμού λήψης. Λόγω του ότι η πιθανότητα ταυτόχρονης βροχόπτωσης και στους δύο επίγειους σταθμούς εκπομπής και λήψης θεωρείται πολύ μικρή, η ανάλυση έγινε αρχικά με την υπόθεση ότι υπάρχει βροχόπτωση μόνο στο ανοδικό τμήμα της ζεύξης και στη συνέχεια ότι υπάρχει βροχόπτωση μόνο στο καθοδικό τμήμα της ζεύξης. Έτσι, προέκυψαν δύο τιμές για τον απαιτούμενο λόγο G/T και για τον υπολογισμό του απαιτούμενου κέρδους της κεραιάς και της διαμέτρου της στον επίγειο σταθμό λήψης, καθώς και της ισοδύναμης θερμοκρασίας θορύβου του δέκτη στο σταθμό λήψης, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η μεγαλύτερη εκ' των δύο τιμών, που εκφράζει και το χειρότερο σενάριο. Βεβαίως, εάν θεωρηθούν ακόμη πιο αυστηρές προδιαγραφές λειτουργίας, θα πρέπει μια δορυφορική ζεύξη να μελετηθεί, λαμβάνοντας υπόψη το ενδεχόμενο ταυτόχρονης βροχόπτωσης στους δύο επίγειους σταθμούς.

Επίσης, από την ανάλυση του καθοδικού τμήματος των δορυφορικών ζεύξεων που αναπτύχθηκαν στα Κεφάλαια 7<sup>ο</sup>, 8<sup>ο</sup> και 9<sup>ο</sup>, προέκυψε ότι όταν βρέχει, υπάρχει μια σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας θορύβου της κεραιάς λήψης σε σχέση με την τιμή της υπό συνθήκες «καθαρού ουρανού». Η αύξηση αυτή είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερος είναι και ο ρυθμός βροχόπτωσης που ξεπερνιέται για 0,01% του χρόνου ( $R_{0,01}$ ) στην περιοχή του επίγειου σταθμού λήψης. Έτσι, για τον επίγειο σταθμό λήψης στην Ατλάντα - που παρουσιάζει και το μεγαλύτερο ρυθμό βροχόπτωσης ( $R_{0,01}=63$  mm/h) – προέκυψε και η μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας θορύβου της κεραιάς λήψης σε σχέση με

τους δύο άλλους σταθμούς λήψης: Ν. Υόρκη ( $R_{0.01}=45$  mm/h) και Λ. Άντζελες ( $R_{0.01}=20$  mm/h). Κατά συνέπεια, στον επίγειο σταθμό λήψης της Ατλάντας προέκυψε και η μεγαλύτερη απαιτούμενη διάμετρος κεραίας. Είναι επομένως πολύ σημαντικό, να είναι γνωστή η ακριβής τιμή του ρυθμού βροχόπτωσης  $R_{0.01}$  σε μία συγκεκριμένη γεωγραφικοί περιοχής. Δυστυχώς, οι χάρτες της ITU παρέχουν ρυθμούς βροχόπτωσης  $R_{0.01}$  σε πολύ ευρείες γεωγραφικές περιοχές, με αποτέλεσμα τη χονδρική εκτίμηση του ρυθμού βροχόπτωσης  $R_{0.01}$ . Για το λόγο αυτό απαιτούνται εμπειριστατωμένες μελέτες από τους τοπικούς φορείς σε κάθε χώρα, οι οποίες θα δώσουν ακριβέστερες εκτιμήσεις των ρυθμών βροχόπτωσης  $R_{0.01}$ , από δεδομένα τοπικής κλιματολογίας.

Η σημαντική αυτή αύξηση της θερμοκρασίας θορύβου λόγω βροχής, μπορεί να αντιμετωπιστεί με δύο τρόπους: είτε με χρησιμοποίηση κεραίας με μεγάλο κέρδος (και κατά συνέπεια με μεγάλη διάμετρο), είτε με χρήση διαφορικής λήψης χώρου. Εφόσον εγκατασταθεί σύστημα διαφορικής λήψης χώρου, η απόσβεση λόγω βροχής στο καθοδικό τμήμα της ζεύξης, μειώνεται κατά το διαφορικό κέρδος λόγω διαφορικής λήψης, με συνέπεια τη μικρότερη αύξηση της θερμοκρασίας θορύβου της κεραίας λήψης. Αυτό το αποτέλεσμα δίνει τη δυνατότητα σημαντικής μείωσης των διαστάσεων της κεραίας λήψης. Τεχνικοί και οικονομικοί λόγοι είναι αυτοί που τελικά θα καθορίσουν την απόφαση για εγκατάσταση ή όχι συστήματος διαφορικής λήψης χώρου.

Βεβαίως, η συνολική θερμοκρασία θορύβου του δέκτη, καθορίζεται εκτός από τη θερμοκρασία θορύβου της κεραίας λήψης και από δύο άλλους παράγοντες: α) την ισοδύναμη εσωτερική θερμοκρασία θορύβου του δέκτη (κυρίως λόγω των ενισχυτικών του διατάξεων) και β) τη θερμοκρασία θορύβου που εισάγει ο κυματοδηγός που συνδέει την κεραία λήψης με το δέκτη. Οι δύο τελευταίοι παράγοντες όμως, επηρεάζουν σε μικρότερο βαθμό το θόρυβο στο δέκτη σε σχέση με την αύξηση του θορύβου λόγω βροχής. Παρ' όλα αυτά, είναι η



απαραίτητη η τοποθέτηση προενισχυτών χαμηλού θορύβου (LNAs), ως το πρώτο στάδιο ενίσχυσης στους δέκτες, καθώς και η τοποθέτηση ψυκτικών διατάξεων που θα επιτρέψουν χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας των ενισχυτών.

Τέλος, κατά το σχεδιασμό μιας δορυφορικής ζεύξης θα πρέπει να λαμβάνονται και τα κατάλληλα μέτρα, για την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών από γειτονικούς δορυφόρους και γειτονικά κανάλια: εκλογή κεραιών με το κατάλληλο σχήμα της ηλεκτρομαγνητικής δέσμης του κύριου και των πλευρικών λοβών, ακρίβεια σκόπευσης της κεραιάς του δορυφόρου και του επίγειου σταθμού, διατήρηση της τροχιάς του δορυφόρου και διάκριση διασταυρούμενης πόλωσης (XPD) του δορυφόρου και του επίγειου σταθμού.