



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ

ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

## Σχεδίαση Συστήματος Επικοινωνιών Βαθέως Διαστήματος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κυριακή Δ. Χριστοπούλου

Επιβλέπων: Αθανάσιος Παναγόπουλος

Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2010





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ

ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

## Σχεδίαση Συστήματος Επικοινωνιών Βαθέως Διαστήματος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κυριακή Δ. Χριστοπούλου

Επιβλέπων: Αθανάσιος Παναγόπουλος  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την .....

.....  
Α. Παναγόπουλος  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

.....  
Ι. Κανελλόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Φ. Κωνσταντίνου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2010

.....

Κυριακή Δ. Χριστοπούλου

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών

Ε.Μ.Π.

Copyright © Κυριακή Δ. Χριστοπούλου, 2010

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

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

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι πρώτες μου θερμές ευχαριστίες απευθύνονται στον καθηγητή μου και επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, Λέκτορα Ε.Μ.Π. κ. Αθανάσιο Παναγόπουλο, ο οποίος μου έδωσε την ευκαιρία να γνωρίσω έναν τομέα των επικοινωνιών που παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον. Η καθοδήγησή του υπήρξε καθοριστική για την ολοκλήρωσή αυτής της προσπάθειας.

Ευχαριστώ ιδιαιτέρως και τον Διδάκτορα Ε.Μ.Π. Παντελή Αράπογλου για τη βοήθεια που μου προσέφερε σε όλα τα στάδια της συγγραφής, διαθέτοντας αρκετό από τον προσωπικό του χρόνο σε αυτήν τη συνεργασία. Τα εύστοχα σχόλια και οι συμβουλές του αποτέλεσαν πολύτιμη συνδρομή αλλά και συνεχή ενθάρρυνση για την επίτευξη ενός αποτελέσματος περισσότερο συγκροτημένου και εύληπτου.



## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της λειτουργίας ενός συστήματος επικοινωνιών βαθέως διαστήματος στη ζώνη συχνοτήτων Ka (32GHz) καθώς και των ενδεχόμενων πλεονεκτημάτων από τη μετάβαση σε υψηλότερη συχνότητα λειτουργίας και συγκεκριμένα στη ζώνη W (90GHz).

Αρχικά, γίνεται μια επισκόπηση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των επικοινωνιών βαθέως διαστήματος και παρουσιάζονται οι τάσεις για τις μελλοντικές εξελίξεις στον τομέα αυτό. Στη συνέχεια αναλύονται τα διάφορα ατμοσφαιρικά και περιβαλλοντικά φαινόμενα τα οποία επηρεάζουν τις ζεύξεις βαθέως διαστήματος. Συγκεκριμένα αριθμητικά αποτελέσματα που αφορούν στην ατμοσφαιρική απόσβεση υπολογίζονται για τις περιπτώσεις δύο επίγειων σταθμών βαθέως διαστήματος, στη Μαδρίτη και την Canberra. Έπειτα, χρησιμοποιούνται στοιχεία από τρεις πραγματικές διαστημικές αποστολές (MRO, Venus Express, BepiColombo) και γίνεται ισολογισμός ισχύος για λειτουργία τόσο στη ζώνη Ka όσο και στη ζώνη W. Τέλος, θεωρώντας διάφορες περιπτώσεις διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, υπολογίζεται ο ρυθμός εσφαλμένων ψηφίων που μπορεί να επιτευχθεί από τις συγκεκριμένες ζεύξεις σε δίαυλο AWGN.

Λέξεις κλειδιά: Επικοινωνίες Βαθέως Διαστήματος, Ζώνη Συχνοτήτων Ka και W, Δίκτυο Βαθέως Διαστήματος, EOD/ESA, NASA, Διαστημική αποστολή, MRO, Venus Express, BepiColombo, Πιθανότητα Διακοπής, Επίδοση BER





## Abstract

The aim of this diploma thesis is to study the performance of deep space communications systems currently operating in Ka band (32GHz) as well as the possible advantages of the future use of W band (90GHz) for deep space communications.

Firstly, the special characteristics of deep space communications are presented along with the trends for future advances in this field. Secondly, the various atmospheric and environmental effects that have an impact on the link performance are discussed. Specific results for the atmospheric attenuation are calculated in the case of two earth stations in Madrid and Canberra. Moreover, a link budget calculation concerning both Ka and W band is performed using real data from three space missions (MRO, Venus Express, BepiColombo). Lastly, the BER performance in a AWGN channel is calculated for different scenarios of coding and modulation schemes.

Key words: Deep Space Communications, Ka and W frequency band, Deep Space Network (DSN), ESA, NASA, Space Mission, MRO, Venus Express, BepiColombo, Outage Probability, BER Performance



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ:

### Επισκόπηση και Χαρακτηριστικά

Επικοινωνιών Βαθέως Διαστήματος.....	- 15 -
<b>1.1 Εισαγωγή</b> .....	- 15 -
<b>1.2 Επικοινωνίες Βαθέως Διαστήματος</b> .....	- 16 -
1.2.1 Επίγειοι Σταθμοί .....	- 16 -
1.2.2 Διαστημικά Σκάφη.....	- 21 -
<b>1.3 Διαπλανητικά Δίκτυα Βαθέως Διαστήματος</b> .....	- 22 -
1.3.1 Πλεονεκτήματα Πλανητικών Δικτύων .....	- 24 -
<b>1.4 Τεχνολογίες Επικοινωνιών Βαθέως Διαστήματος</b> .....	- 24 -
1.4.1 Ζώνες Συχνοτήτων .....	- 25 -
1.4.2 Πομπός και Δέκτης .....	- 28 -
1.4.3 Ενισχυτές.....	- 29 -
1.4.4 Κεραίες .....	- 30 -
<b>1.5 Ιδιαιτερότητες Επικοινωνιών Βαθέως Διαστήματος</b> .....	- 32 -
<b>1.6 Διαμόρφωση και Κωδικοποίηση</b> .....	- 36 -
1.6.1 Διαμόρφωση.....	- 36 -
1.6.2 Κωδικοποίηση .....	- 38 -
<b>1.7 Τεχνικές σχεδίασης</b> .....	- 39 -
1.7.1 Διαθεσιμότητα – Περιθώριο Διαλείψεων .....	- 39 -
1.7.2 Τεχνικές για την Αντιμετώπιση των Διαλείψεων.....	- 40 -
1.7.2.1 Τεχνικές Ελέγχου της Ισχύος.....	- 40 -
1.7.2.2 Προσαρμοστικές Τεχνικές Μετάδοσης .....	- 40 -
1.7.2.3 Τεχνικές Διαφορικής Λήψης .....	- 41 -
1.7.2.4 Τεχνικές Στρώματος Ζεύξης Δεδομένων .....	- 43 -
1.7.3 Εφαρμογή σε Ζεύξεις Βαθέως Διαστήματος .....	- 43 -
Βιβλιογραφία.....	- 45 -

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ:

Ατμοσφαιρικά και Περιβαλλοντικά Φαινόμενα .....	- 47 -
<b>2.1 Γενικά</b> .....	- 47 -
<b>2.2 Ατμοσφαιρικά Φαινόμενα στις Δορυφορικές Επικοινωνίες</b> .....	- 47 -
<b>2.3 Ατμοσφαιρικά Φαινόμενα: Επίγειοι Σταθμοί Βαθέως Διαστήματος</b> .....	- 51 -
2.3.1 Θερμοκρασία Θορύβου .....	- 51 -
2.3.2 Ατμοσφαιρική Συνεισφορά στην Απόσβεση και τη Θερμοκρασία Θορύβου .....	- 54 -
2.3.3 Απόσβεση Λόγω Βροχής.....	- 63 -
<b>2.4 Περιβαλλοντικά Φαινόμενα</b> .....	- 64 -
2.4.1 Πλανητικός Θόρυβος .....	- 65 -
2.4.2 Σεληνιακός Θόρυβος .....	- 69 -
2.4.3 Ηλιακός Θόρυβος .....	- 69 -
2.4.4 Γαλαξιακός Θόρυβος .....	- 74 -
2.4.5 Συνολική Θερμοκρασία Θορύβου Συστήματος .....	- 74 -
Βιβλιογραφία.....	- 75 -

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ:

Ισολογισμός Ισχύος Αποστολών Βαθέως Διαστήματος στις Ζώνες Συχνοτήτων $K_a$ και $W$ .....	- 77 -
<b>3.1 Εισαγωγή</b> .....	- 77 -
<b>3.2 Στοιχεία Αποστολών</b> .....	- 78 -
3.2.1 Επίγειοι Σταθμοί .....	- 78 -
3.2.2 Διαστημικά Σκάφη.....	- 80 -
<b>3.3 Ισολογισμός Ισχύος</b> .....	- 81 -
<b>3.4 Επίδραση ατμοσφαιρικών φαινομένων</b> .....	- 87 -
3.4.1 Υπολογισμός Απόσβεσης Λόγω Βροχόπτωσης.....	- 88 -
3.4.2 Υπολογισμός Ατμοσφαιρικής Συνεισφοράς στην Απόσβεση και τη Θερμοκρασία Θορύβου .....	- 89 -
3.4.2.1 Ζώνη $K_a$ .....	- 89 -
3.4.2.2 Ζώνη $W$ .....	- 91 -

<b>3.5 Αριθμητικά Αποτελέσματα</b> .....	- 95 -
3.5.1 Mars Reconnaissance Orbiter.....	- 96 -
3.5.2 Venus Express .....	- 101 -
3.5.3 Mercury Planet Orbiter .....	- 106 -
3.5.4 Παρατηρήσεις .....	- 111 -
Βιβλιογραφία.....	- 115 -

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ:

##### Τεχνικές Κωδικοποίησης FEC

σε Αποστολές Βαθέως Διαστήματος .....	- 117 -
---------------------------------------	---------

<b>4.1 Γενικά</b> .....	- 117 -
-------------------------	---------

<b>4.2 Αριθμητικά Αποτελέσματα</b> .....	- 119 -
--	---------

4.2.1 Κωδικοποίηση Turbo .....	- 120 -
--------------------------------	---------

4.2.2 Κωδικοποίηση LDPC .....	- 123 -
-------------------------------	---------

4.2.3 Σύγκριση με τη Ζώνη Συχνοτήτων W .....	- 126 -
--	---------

Βιβλιογραφία.....	- 129 -
-------------------	---------

#### Παράρτημα Α:

Υπολογισμός Απόσβεσης Λόγω Βροχής (Σύσταση ITU-R P.618-10).....	- 131 -
---	---------



## Κεφάλαιο Πρώτο:

### Επισκόπηση και Χαρακτηριστικά

### Επικοινωνιών Βαθέως Διαστήματος

#### 1.1 Εισαγωγή

Η εξερεύνηση του διαστήματος αποτελεί μια από τις μεγάλες κατακτήσεις της σύγχρονης επιστήμης και τεχνολογίας. Ειδικά τις τελευταίες δεκαετίες έχουν παγκοσμίως δαπανηθεί τεράστια ποσά για την εκπόνηση μεγάλων διαστημικών προγραμμάτων, με σκοπό τη συλλογή πληροφοριών που θα ενισχύσουν την επιστημονική γνώση σε διάφορους τομείς. Μέχρι στιγμής έχουν πραγματοποιηθεί αποστολές στη Σελήνη και σε διάφορους πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος όπως ο Άρης, ο Ερμής, ο Δίας και ο Ουρανός. Οι αποστολές στη Σελήνη και τον Άρη είναι οι πιο συχνές και έχουν αποδώσει πολύ σημαντικά αποτελέσματα. Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται οι κυριότερες διαστημικές αποστολές των τελευταίων ετών. [1, 2]

<b>Αποστολή</b>	<b>Πλανήτης</b>	<b>Διάρκεια</b>	<b>Οργανισμός</b>
Mars Global Surveyor	Άρης	1996-2006	NASA
Mars Pathfinder	Άρης	1996-1997	NASA
Mars Odyssey	Άρης	2001- σήμερα	NASA
Mars Exploration Rovers (MER-A και MER-B)	Άρης	2003- σήμερα	NASA
Mars Reconnaissance Orbiter	Άρης	2005- σήμερα	NASA
Lunar Reconnaissance Orbiter	Σελήνη	2009- σήμερα	NASA
Cassini-Huygens	Κρόνος	1997- σήμερα	NASA,ESA,ASI
Mars Express	Άρης	2003- σήμερα	ESA
Venus Express	Αφροδίτη	2005- σήμερα	ESA
BepiColombo	Ερμής	2014	ESA

Πιν. 1.1 Οι σημαντικότερες διαστημικές αποστολές των τελευταίων ετών

## 1.2 Επικοινωνίες Βαθέως Διαστήματος

Οι Επικοινωνίες Βαθέως Διαστήματος (Deep Space Communications) κατέχουν πολύ σημαντικό ρόλο στην εξερεύνηση του διαστήματος και αποτελούν σημαντικό τμήμα κάθε διαστημικής αποστολής. Με τον όρο Βαθύ Διάστημα (Deep Space) αναφερόμαστε στο διάστημα σε αποστάσεις μεγαλύτερες από δύο εκατομμύρια χιλιόμετρα από τη Γη. Η εξερεύνηση του διαστήματος σε τέτοιες αποστάσεις γίνεται μέσω μη επανδρωμένων διαστημικών σκαφών, τα οποία φέρουν τον απαραίτητο εξοπλισμό για τη συλλογή επιστημονικών δεδομένων. Ο ρόλος των Επικοινωνιών Βαθέως Διαστήματος είναι να προσφέρουν την απαραίτητη αμφίδρομη ζεύξη μεταξύ σκάφους και Γης, η οποία χρησιμοποιείται για τον έλεγχο και την πλοήγηση του σκάφους και για τη μετάδοση των πληροφοριών που συλλέγονται από το σκάφος στον επίγειο σταθμό. Η ζεύξη uplink χρησιμοποιείται για τη μετάδοση των εντολών ελέγχου από τον επίγειο σταθμό προς το διαστημικό σκάφος, ενώ μέσω της ζεύξης downlink ο επίγειος σταθμός λαμβάνει τα δεδομένα τηλεμετρίας. Πρόκειται για δεδομένα που προέρχονται από τα επιστημονικά όργανα του διαστημικού σκάφους και τους αισθητήρες που παρακολουθούν την κατάσταση του καθώς και δεδομένα συντήρησης. Τα δεδομένα αυτά πρέπει να είναι πάντοτε διαθέσιμα ώστε να διασφαλίζεται η ασφάλεια και η επιτυχία κάθε αποστολής. Συνεπώς απαιτείται για τη μετάδοσή τους μια αξιόπιστη ζεύξη ανεξάρτητη των καιρικών συνθηκών με επαρκή χωρητικότητα. [3]

### 1.2.1 Επίγειοι Σταθμοί

Οι ζεύξεις βαθέως διαστήματος παρουσιάζουν ιδιαιτερότητες σε σχέση με τις συμβατικές δορυφορικές ζεύξεις, κυρίως λόγω των αχανών αποστάσεων που εμπλέκονται, τη σχετική κίνηση των διαστημικών σταθμών ως προς τη Γη και τα ειδικά περιβαλλοντικά και ατμοσφαιρικά φαινόμενα που εμφανίζονται και αναλύονται στο Κεφάλαιο 2 της διπλωματικής. Συνεπώς οι αντίστοιχοι επίγειοι σταθμοί είναι ειδικών προδιαγραφών και συνήθως αποτελούνται από ένα σύνολο κεραιών μεγάλης διαμέτρου, ένα σύστημα πομποδεκτών και ένα κέντρο επεξεργασίας (Signal Processing Center).



Τέτοιοι σταθμοί λειτουργούν υπό την αιγίδα της NASA, του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (European Space Association – ESA) καθώς και μεμονωμένων χωρών που διαθέτουν διαστημικά προγράμματα όπως η Ρωσία, η Ιαπωνία και η Ινδία. Στον Πίνακα 1.2 παρουσιάζεται η θέση των κυριότερων επίγειων σταθμών βαθέως διαστήματος. [3]

Διοίκηση	Τοποθεσία	Γεωγραφικό πλάτος	Γεωγραφικό μήκος
Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος	Cebreros (Ισπανία)	40° 27' N	4° 22' W
	New Norcia (Αυστραλία)	31° 20' S	116° 11' E
Ουκρανία	Evporiyya	45° 11' N	33° 11' E
Ρωσία	Medvezhi ozera	55° 52' N	37° 57' E
	Ussuriisk	44° 01' N	131° 45' E
Ιαπωνία	Usuda, Nagano	36° 08' N	138° 22' E
Η.Π.Α	Canberra (Αυστραλία)	35° 28' S	148° 59' E
	Goldstone (Η.Π.Α)	35° 22' N	115° 51' W
	Madrid (Ισπανία)	40° 26' N	4° 17' W

Πιν. 1.2 Τοποθεσία επίγειων σταθμών βαθέως διαστήματος

Συγκεκριμένα, το Δίκτυο Βαθέως Διαστήματος της NASA (NASA Deep Space Network – DSN) υποστηρίζει διαπλανητικές αποστολές καθώς και αστρονομικές παρατηρήσεις για την εξερεύνηση του ηλιακού συστήματος. Αποτελείται από τρία επίγεια συγκροτήματα βαθέως διαστήματος (Deep Space Communication Complexes), τα οποία είναι τοποθετημένα με διαφορά περίπου 120° στην περιφέρεια της Γης, ώστε να προσφέρουν τη δυνατότητα συνεχούς παρατήρησης των διαστημοπλοίων καθώς η Γη περιστρέφεται. Οι επίγειοι αυτοί σταθμοί βρίσκονται στην Αυστραλία, κοντά στην Canberra, στο Goldstone της Καλιφόρνια και κοντά στη Μαδρίτη στην Ισπανία. (βλ. Σχ.1.1).



Σχ. 1.1 Τα τρία συγκροτήματα βαθέως διαστήματος του DSN

Κάθε συγκρότημα διαθέτει μια παραβολική κεραία 70 μέτρων για υποστήριξης μέγιστης απόδοσης καθώς και έναν αριθμό κεραιών 34 μέτρων: δύο στην Canberra, τέσσερεις στο Goldstone και μία στη Μαδρίτη. Επίσης διαθέτουν από μία κεραία 26 μέτρων για εφαρμογές που αφορούν σε τροχιά γύρω από τη γη. [1]



Σχ. 1.2 Παραβολική κεραία 70m στο συγκρότημα βαθέως διαστήματος της NASA κοντά στη Μαδρίτη



Σχ. 1.3 Άποψη του συγκροτήματος βαθέως διαστήματος της NASA στη Μαδρίτη



Σχ. 1.4 Παραβολική κεραία 70m στο συγκρότημα βαθέως διαστήματος της NASA στο Goldstone

Ο οργανισμός ESA διαθέτει επίσης ένα συγκρότημα στην Ισπανία (Cebreros) και ένα στην Αυστραλία (New Norcia). Οι σταθμοί αυτοί διαθέτουν από μια κεραία 34 μέτρων. Τελευταία προσθήκη στις εγκαταστάσεις του οργανισμού θα αποτελέσει ένα τρίτο συγκρότημα στην Αργεντινή (Matarque). [2]

Η Κίνα θα χρησιμοποιήσει για το δικό της πρόγραμμα εξερεύνησης της Σελήνης δύο επίγειους σταθμούς βαθέως διαστήματος (Beijing και Urumchi).  
[4]



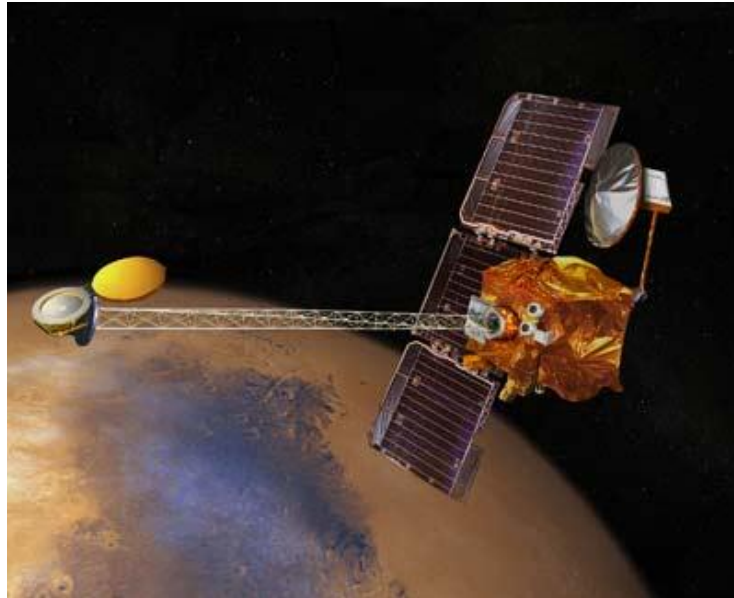
Σχ. 1.5 Η πρώτη κεραία 34m του οργανισμού ESA (New Norcia, Αυστραλία)



Σχ. 1.6 Παραβολική κεραία 34m στο συγκρότημα βαθέως διαστήματος του οργανισμού ESA (Cebreros, Ισπανία)

### 1.2.2 Διαστημικά Σκάφη

Όσον αφορά στα διαστημικά σκάφη, αυτά μπορεί να είναι δορυφόροι σε τροχιά γύρω από κάποιον πλανήτη ή και σκάφη που κινούνται στο μακρινό διάστημα.



Σχ. 1.7 Ο Mars Odyssey Orbiter, σε τροχιά γύρω από τον πλανήτη Άρη

Τα τελευταία έτη διακρίνεται μεταξύ των διεθνών διαστημικών υπηρεσιών μια τάση μετάβασης από το μοντέλο των ζεύξεων σημείου – προς – σημείο μεταξύ διαστημικών σκαφών και επίγειων σταθμών σε ένα νέο μοντέλο συστήματος. Μελλοντικές αποστολές θα αποτελούνται από ένα σύνολο εξερευνητικών σκαφών εδάφους και σκαφών που θα βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τον υπό εξέταση πλανήτη και θα λειτουργούν ως αναμεταδότες των δεδομένων που συλλέγονται. Οι αποστολές αυτές θα υποστηρίζονται από πλανητικά δίκτυα, τα οποία θα λειτουργούν ως μια κοινή τηλεπικοινωνιακή υποδομή και θα συνεργάζονται με διαστημόπλοια και δορυφόρους δημιουργώντας τελικά ένα διαπλανητικό δίκτυο ή ένα διαδίκτυο του διαστήματος. [5]

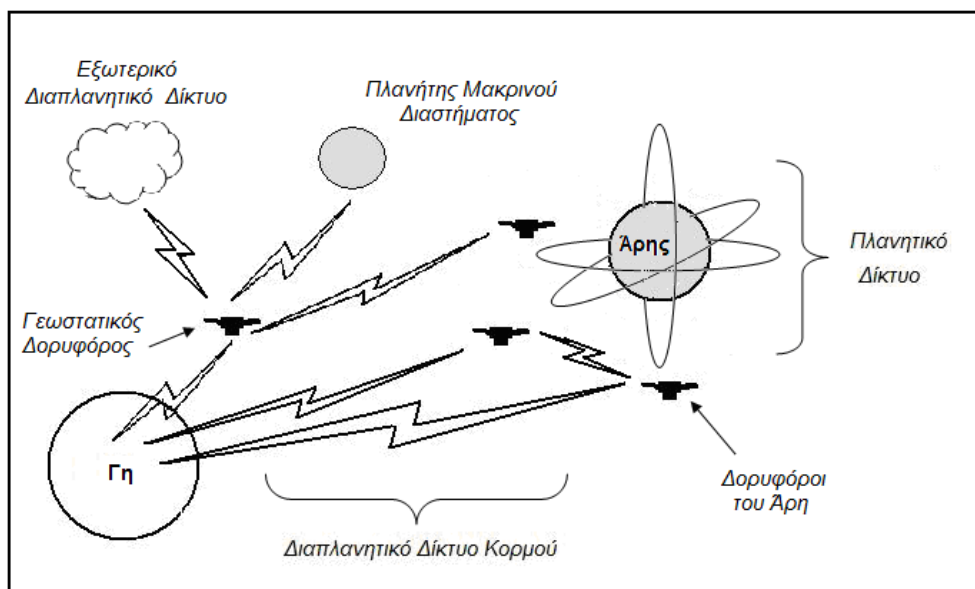
Σχετικά με την αρχιτεκτονική αυτού του δικτύου έχει προταθεί από τη NASA μια δομή που περιλαμβάνει ένα δίκτυο κορμού (backbone network), ένα δίκτυο πρόσβασης, ένα δίκτυο μεταξύ σκαφών και ένα δίκτυο μικρής απόστασης. Το διαδίκτυο του διαστήματος περιγράφεται ως ένα δίκτυο από

διαδίκτυα, με ένα εξειδικευμένο δίκτυο κορμού βαθέως διαστήματος που θα συνδέει τα διάφορα επιμέρους τοπικά δίκτυα. [4]

### 1.3 Διαπλανητικά Δίκτυα Βαθέως Διαστήματος

Στο Σχήμα 1.8 παρουσιάζεται το μοντέλο του διαπλανητικού διαδικτύου (Interplanetary Network internet – IPN internet). [4] Αυτό αποτελείται από:

- ένα διαπλανητικό δίκτυο κορμού
- εξωτερικά διαπλανητικά δίκτυα και
- πλανητικά δίκτυα.



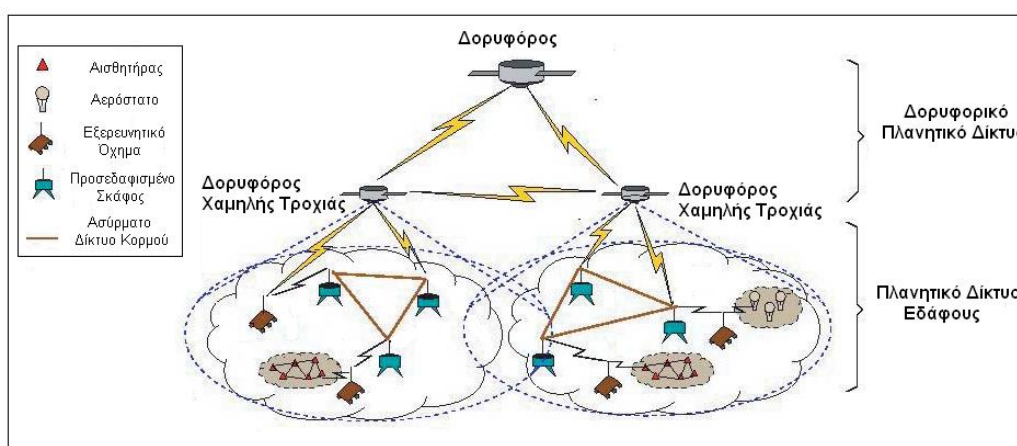
Σχ. 1.8 Η αρχιτεκτονική του διαπλανητικού διαδικτύου

Το δίκτυο κορμού (backbone network) αποτελεί την κεντρική δομή για την επικοινωνία μεταξύ Γης, πλανητών και των δορυφόρων τους καθώς και ενδιάμεσων σταθμών αναμετάδοσης.

Τα εξωτερικά διαπλανητικά δίκτυα (interplanetary external networks) αποτελούνται από διαστημικά σκάφη που κινούνται σε ομάδες μεταξύ πλανητών, από σχηματισμούς κόμβων αισθητήρων ή και από ομάδες διαστημικών σταθμών.

Τα πλανητικά δίκτυα (planetary networks) αποτελούνται από το δορυφορικό πλανητικό δίκτυο (planetary satellite network) και το πλανητικό δίκτυο εδάφους (planetary surface network) (βλ Σχήμα 1.9). Το πρώτο

περιλαμβάνει ένα σύνολο δορυφόρων που βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τον πλανήτη. Χρησιμοποιείται για ενδιάμεση προσωρινή αποθήκευση και αναμετάδοση δεδομένων προς τη Γη καθώς και για αναμετάδοση δεδομένων μεταξύ των κόμβων που βρίσκονται στην επιφάνεια του πλανήτη. Το πλανητικό δίκτυο εδάφους αποτελεί ένα δίκτυο κορμού για τον πλανήτη, μέσω του οποίου τα εξερευνητικά οχήματα επικοινωνούν με τους δορυφόρους. Επίσης, το δίκτυο εδάφους περιλαμβάνει στοιχεία που δεν έχουν τη δυνατότητα άμεσης επικοινωνίας με τους δορυφόρους. Τέτοια στοιχεία, όπως κόμβοι αισθητήρων, συνήθως οργανώνονται σε σχηματισμούς και λειτουργούν ως ad hoc δίκτυα.



Σχ. 1.9 Πλανητικό Δίκτυο

Παράδειγμα πλανητικού δικτύου αποτελεί το δίκτυο της NASA στον πλανήτη Άρη. Οι πρώτοι κόμβοι που δημιούργησαν το συγκεκριμένο δίκτυο ήταν τα διαστημικά σκάφη Mars Global Surveyor και Mars Odyssey, δύο δορυφόροι σε τροχιά γύρω από τον πλανήτη. Μέσω αυτών των σκαφών έχει πραγματοποιηθεί η μεταφορά στη Γη της πλειοψηφίας των επιστημονικών δεδομένων που συνέλεξαν τα εξερευνητικά οχήματα Spirit και Opportunity. Πρόσφατα, ο Mars Reconnaissance Orbiter προστέθηκε στο πλανητικό αυτό δίκτυο, ως ένας ακόμα αναμεταδότης μεταξύ Άρη και Γης. [5]

### 1.3.1 Πλεονεκτήματα Πλανητικών Δικτύων

Τα πλεονεκτήματα από τη δημιουργία τέτοιων πλανητικών δικτύων είναι ιδιαίτερα σημαντικά. [5]

Πρώτον, αυξάνεται ο όγκος της πληροφορίας που επιστρέφει στη Γη. Επειδή η απόσταση μεταξύ ενός εξερευνητικού σκάφους που έχει προσεδαφιστεί στην επιφάνεια του πλανήτη και ενός δορυφόρου του είναι κατά πολλές τάξεις μεγέθους μικρότερη από την απόσταση ως προς τη Γη, το σκάφος μπορεί να μεταδώσει δεδομένα στο δορυφόρο με πολύ μεγαλύτερο ρυθμό απ' ότι απευθείας στη Γη. Στη συνέχεια, η μετάδοση των δεδομένων στη Γη εναπόκειται στο δορυφόρο του πλανήτη που διαθέτει υψηλότερη ισχύ εκπομπής και κεραία μεγαλύτερου κέρδους.

Παράλληλα, βελτιώνεται η επίδοση του συστήματος, καθώς οι πιο κοντινές ζεύξεις αναμετάδοσης απαιτούν λιγότερη ενέργεια ανά ψηφίο για να πραγματοποιηθεί η μετάδοση και επιτρέπουν τη μείωση των απαιτήσεων όχι μόνο σε ενέργεια αλλά και στον όγκο του εξοπλισμού και στην ακρίβεια στόχευσης των κεραιών.

Επίσης, η χρήση ενός πλανητικού δικτύου μπορεί να καταστήσει δυνατή την επικοινωνία σε περιπτώσεις όπου δεν είναι διαθέσιμη μια απευθείας ζεύξη με τη Γη. Για παράδειγμα, ένα πλανητικό δίκτυο μπορεί να επιτρέψει την εξερεύνηση των πόλων της Σελήνης, που δεν είναι διαρκώς ορατοί από τη Γη, καθώς και της σκοτεινής πλευράς της Σελήνης, που δεν είναι ποτέ ορατή από τη Γη. Επιπρόσθετα, μπορεί η απευθείας ζεύξη προς τη Γη να μην υφίσταται ή να μη λειτουργεί κατά τη διάρκεια εκτάκτων γεγονότων όπως η είσοδος ενός σκάφους σε τροχιά, η κάθοδος και η προσεδάφισή του. Και σε αυτές τις περιπτώσεις, η αποστολή/λήψη των σημάτων τηλεμετρίας πραγματοποιείται μέσω του πλανητικού δικτύου.

### 1.4 Τεχνολογίες Επικοινωνιών Βαθέως Διαστήματος

Οι διαστημικές αποστολές ενσωματώνουν τον πιο εξελιγμένο τεχνολογικό εξοπλισμό σε όλους τους τομείς. Συνεπώς δεν προκαλεί έκπληξη το γεγονός ότι οι επικοινωνίες βαθέως διαστήματος πολλές φορές προσφέρουν ένα



περιβάλλον πειραματισμού και πρώτες αυτές δοκιμάζουν στο πραγματικό πεδίο νέες τεχνολογικές λύσεις.

Οι παράμετροι του συστήματος επικοινωνιών που θα εξεταστούν περιλαμβάνουν τη συχνότητα λειτουργίας, τα χαρακτηριστικά πομπών, δεκτών και κεραιών καθώς και τις λοιπές σχεδιαστικές επιλογές που στοχεύουν στην επίτευξη της επιθυμητής επίδοσης.

#### 1.4.1 Ζώνες Συχνοτήτων

Όμοια με την τάση στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, οι επικοινωνίες βαθέως διαστήματος ξεκίνησαν λειτουργώντας υπό φέρουσες συχνότητες κάτω των 10GHz, όπως η ζώνη συχνοτήτων S (2GHz). Με το πέρασμα των ετών και την εξέλιξη της τεχνολογίας υπάρχει η τάση για μετάβαση σε υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων. Η τάση αυτή δικαιολογείται από την ανάγκη για χρήση μεγαλύτερου εύρου ζώνης, η οποία επιβάλλεται από την εξέλιξη των αποστολών εξερεύνησης του διαστήματος, καθώς και από το πλεονέκτημα της σημαντικής αύξησης του κέρδους των κεραιών σε μεγαλύτερες συχνότητες. Αυτή τη στιγμή η καθιερωμένη ζώνη συχνοτήτων για τέτοιου είδους επικοινωνίες είναι η ζώνη X (8GHz) ενώ έχει αρχίσει η σταδιακή μετάβαση στη ζώνη Ka (32GHz). Στη ζώνη αυτή το διαθέσιμο φάσμα είναι εύρους 500MHz, δεκαπλάσιο από το εύρος των 50MHz που είναι διαθέσιμο στη ζώνη X. [5]

Στον Πίνακα 1.3 παρουσιάζονται οι ζώνες συχνοτήτων που έχουν ανατεθεί από τη Διεθνή Ένωση Επικοινωνιών (International Telecommunications Union – ITU) για τις επικοινωνίες βαθέως διαστήματος. [6]

Παράλληλα, πραγματοποιείται έρευνα για τα πιθανά οφέλη μετάβασης σε ακόμα υψηλότερες συχνότητες. Συγκεκριμένα, επειδή στην περιοχή μεταξύ 50GHz και 70GHz παρατηρείται μια ζώνη απορρόφησης από το οξυγόνο της ατμόσφαιρας, ερευνάται η μετάβαση στην αμέσως επόμενη ζώνη συχνοτήτων, η οποία είναι η ζώνη W (90GHz). [7]

Βέβαια, καθώς αυξάνεται η συχνότητα λειτουργίας ενός συστήματος, τα πλεονεκτήματα αντισταθμίζονται από κάποιες δυσμενείς συνέπειες. Ως γνωστόν, τα διάφορα ατμοσφαιρικά φαινόμενα προκαλούν σημαντική υποβάθμιση της ποιότητας της λήψης και διαθέτουν εξάρτηση ως προς τη

συχνότητα. Για παράδειγμα, η απόσβεση που υφίσταται το ραδιοσήμα λόγω βροχής είναι ανάλογη του τετραγώνου της συχνότητας ενώ και η απόσβεση που εισάγεται από τα αέρια της ατμόσφαιρας είναι υψηλότερη σε συγκεκριμένες περιοχές συχνοτήτων. [8] Οι επιδράσεις των ατμοσφαιρικών φαινομένων εξετάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2 της διπλωματικής.

Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το γεγονός ότι, ενώ στη ζώνη Ka η απόσβεση λόγω βροχής είναι ο κύριος παράγοντας που επιδρά αρνητικά στη διάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος, με την αύξηση της συχνότητας αυξάνεται και η επίδραση των υπόλοιπων ατμοσφαιρικών φαινομένων, τα οποία παύουν να είναι δευτερεύουσας σημασίας. [7]

<b>Ζώνες Συχνοτήτων για Ζεύξεις Βαθέως Διαστήματος</b>		
	<b>Ζεύξη Uplink</b>	<b>Ζεύξη Downlink</b>
<b>Ζώνη S</b>	2110-2120	2290-2300
<b>Ζώνη X</b>	7145-7190	8400-8450
<b>Ζώνη Ka</b>	34200-34700	31800-32300

Πιν. 1.3 Ζώνες συχνοτήτων για ζεύξεις βαθέως διαστήματος (MHz)

Στους Πίνακες 1.4 και 1.5 παρουσιάζονται οι προτεινόμενες ζώνες συχνοτήτων για ζεύξεις βαθέως διαστήματος στις περιοχές 1- 40GHz και 40 - 120 GHz αντίστοιχα. [9,10] Είναι φανερή η επίδραση των καιρικών φαινομένων στην επιλογή της συχνότητας λειτουργίας. Επίσης, για μεγάλες συχνότητες είναι συμφέρουσα η χρήση ενός δορυφόρου ως επαναλήπτη αντί για την απευθείας ζεύξη επίγειου σταθμού – διαστημικού σκάφους.

<b>Συχνότητα (GHz)</b>	<b>Λειτουργία</b>	<b>Καιρικές Συνθήκες</b>	<b>Κεραία</b>
1-2	Γη προς Διάστημα (uplink)	Καθαρός ουρανός ή βροχή	Κεραία χαμηλού κέρδους του σκάφους
1-4	Διάστημα προς Γη (downlink)	Βροχή	
1-6.5	Διάστημα προς Γη (downlink)	Καθαρός ουρανός	
3.5-9	Διάστημα προς Γη (downlink)	Βροχή	Κύρια κεραία του σκάφους
6-16	Γη προς Διάστημα (uplink)	Βροχή	
11.5-35.5	Γη προς Διάστημα (uplink)	Καθαρός ουρανός	
26-40	Διάστημα προς Γη (downlink)	Καθαρός ουρανός	

Πιν. 1.4 Προτεινόμενες ζώνες συχνοτήτων στην περιοχή 1-40GHz

<b>Συχνότητα (GHz)</b>	<b>Λειτουργία</b>
56-64	Δορυφόρος αναμετάδοσης προς βαθύ διάστημα, αμφίδρομη ζεύξη
80-100	Γη προς βαθύ διάστημα, αμφίδρομη ζεύξη
98-110	Δορυφόρος αναμετάδοσης προς βαθύ διάστημα
117.7-119.8	Βαθύ διάστημα προς δορυφόρο αναμετάδοσης

Πιν. 1.5 Προτεινόμενες ζώνες συχνοτήτων στην περιοχή 40-120GHz

### 1.4.2 Πομπός και Δέκτης

Σε ένα σύστημα επικοινωνιών βαθέως διαστήματος η κρίσιμη ζεύξη είναι η ζεύξη downlink καθώς αφενός είναι αυτή που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση του κύριου όγκου των δεδομένων και αφετέρου η σχεδίασή της περιορίζεται από το μέγεθος και τις συνθήκες υπό τις οποίες λειτουργεί το διαστημικό σκάφος. Για το λόγο αυτό και χωρίς να υποβαθμίζεται η σημασία της ζεύξης ανόδου, η οποία είναι απαραίτητη για τη μετάδοση των εντολών ελέγχου προς το σκάφος, στο εξής θα δοθεί έμφαση στα χαρακτηριστικά του διαστημικού σκάφους ως πομπού του συστήματος και του επίγειου σταθμού ως δέκτη.

#### Επίγειος Σταθμός

Οι επίγειοι σταθμοί που χρησιμοποιούνται για ζεύξεις βαθέως διαστήματος απαιτείται να έχουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά λειτουργίας, καθώς η στάθμη του λαμβανόμενου σήματος είναι εξαιρετικά χαμηλή με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ευαισθησία του συστήματος στο θόρυβο. Έτσι, ενώ μια εμπορική δορυφορική εφαρμογή στη ζώνη συχνοτήτων Ka μπορεί να απαιτεί μια ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου δέκτη της τάξης των 150K, σε ένα σύστημα επικοινωνιών βαθέως διαστήματος ο δέκτης απαιτείται να έχει σημαντικά μικρότερη θερμοκρασία θορύβου της τάξης των 25K. Αντίστοιχα, ενώ σε ένα συμβατικό δορυφορικό σύστημα ο λόγος G/T μπορεί να έχει μια τυπική τιμή των 41dB/K, σε σύστημα επικοινωνιών βαθέως διαστήματος η τιμή του λόγου G/T είναι περίπου 50dB/K για λειτουργία στα 2.3GHz και 59.5dB/K για λειτουργία στα 8.4GHz. [3] Οι απαιτήσεις αυτές θέτουν σημαντικούς περιορισμούς για την υλοποίηση ενός κατάλληλου δέκτη σε ένα σύστημα βαθέως διαστήματος και συνήθως προς τούτο υιοθετούνται κρυογενείς δέκτες ιδιαίτερα υψηλών προδιαγραφών (άρα και κόστους).

#### Διαστημικό σκάφος

Το διαστημικό σκάφος διαθέτει έναν αναμεταδότη (transponder) ο οποίος χρησιμοποιείται για τη λήψη εντολών ελέγχου και την αποστολή δεδομένων. Λόγω της μεγάλης απόστασης της ζεύξης ο διαστημικός δέκτης θα πρέπει να διαθέτει αυξημένη ευαισθησία σε σχέση με τους συμβατικούς δορυφορικούς

δέκτες. Επίσης, όπως ήδη αναφέραμε, το διαστημικό σκάφος μπορεί να λειτουργεί ως αναμεταδότης των δεδομένων που συλλέγονται από άλλα εξερευνητικά σκάφη. Μάλιστα, η ζεύξη προς τη Γη ενδέχεται να έχει περιορισμένη χωρητικότητα σε σχέση με το συνολικό όγκο των προς μετάδοση δεδομένων. Σε αυτήν την περίπτωση το διαστημικό σκάφος θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα προσωρινής αποθήκευσης των δεδομένων τα οποία αναλαμβάνει να αναμεταδώσει προς τη Γη.

### 1.4.3 Ενισχυτές

Στον πομπό οποιουδήποτε ασύρματου συστήματος εκπομπής περιλαμβάνεται ενισχυτής υψηλής ισχύος (high power amplifier, HPA) που αναλαμβάνει την ενίσχυση του σήματος εκπομπής ώστε η ισχύς λήψης να είναι ικανοποιητική. Στα καθιερωμένα δορυφορικά συστήματα χρησιμοποιούνται ενισχυτές τύπου σωλήνα οδεύοντος κύματος (TWTA). Ειδικά σε ένα σύστημα βαθέως διαστήματος, τα χαρακτηριστικά του ενισχυτή του διαστημικού σκάφους παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην επίδοση του συστήματος, καθώς επηρεάζουν καθοριστικά την τιμή της ισχύος εκπομπής.

Ο Mars Reconnaissance Orbiter είναι εφοδιασμένος με δύο ενισχυτές ισχύος 100W, απόδοσης 60% στη ζώνη X καθώς και με έναν ενισχυτή 35W, απόδοσης 48% στη ζώνη Ka. Η αποστολή Mars Science Orbiter, που θα εκκινήσει το 2013, πρόκειται να χρησιμοποιήσει έναν ενισχυτή TWTA ισχύος 180W στη ζώνη Ka. [5] Μια τέτοια αύξηση της ισχύος των ενισχυτών μπορεί να αποφέρει μεγάλο κέρδος ως προς την επίδοση μελλοντικών ζεύξεων.

Σε μεγαλύτερες συχνότητες, δύσκολα μπορεί να γίνει μια ακριβής εκτίμηση για την απόδοση μελλοντικών ενισχυτών, η οποία πάντως αναμένεται να είναι αρκετά χαμηλότερη. Για παράδειγμα, ένας ενισχυτής με συχνότητα λειτουργίας στη ζώνη W έχει απόδοση της τάξης του 25-30%. [11]

Στον δέκτη ενός ασύρματου συστήματος, οι ενισχυτές χαμηλού θορύβου (low noise amplifiers, LNA) αποτελούν την πρώτη βαθμίδα επεξεργασίας του σήματος. Η τοποθέτηση των ενισχυτών αυτών αμέσως μετά την κεραία εκμεταλλεύεται τη χαμηλή θερμοκρασία θορύβου και το μεγάλο κέρδος του ενισχυτή με σκοπό την επίτευξη όσο το δυνατό μικρότερης ισοδύναμης

θερμοκρασίας θορύβου του δέκτη. Ειδικά σε έναν επίγειο σταθμό βαθέως διαστήματος, οι απαιτήσεις για χαμηλή θερμοκρασία θορύβου του δέκτη είναι εξαιρετικά αυξημένες σε σχέση με τις συμβατικές δορυφορικές εφαρμογές. Συνεπώς, απαιτούνται ενισχυτές με βελτιωμένα χαρακτηριστικά ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή επίδοση του δέκτη.

Ένας ενισχυτής χαμηλού θορύβου που λειτουργεί στη ζώνη X έχει θερμοκρασία θορύβου περίπου 22K, ενώ ενισχυτές σε υψηλότερες συχνότητες έχουν, αντίστοιχα, υψηλότερες θερμοκρασίες θορύβου. Για παράδειγμα, ενισχυτές που λειτουργούν στη ζώνη W αναμένεται να έχουν θερμοκρασία θορύβου στην περιοχή μεταξύ 40K και 60K. [11]

#### 1.4.4 Κεραίες

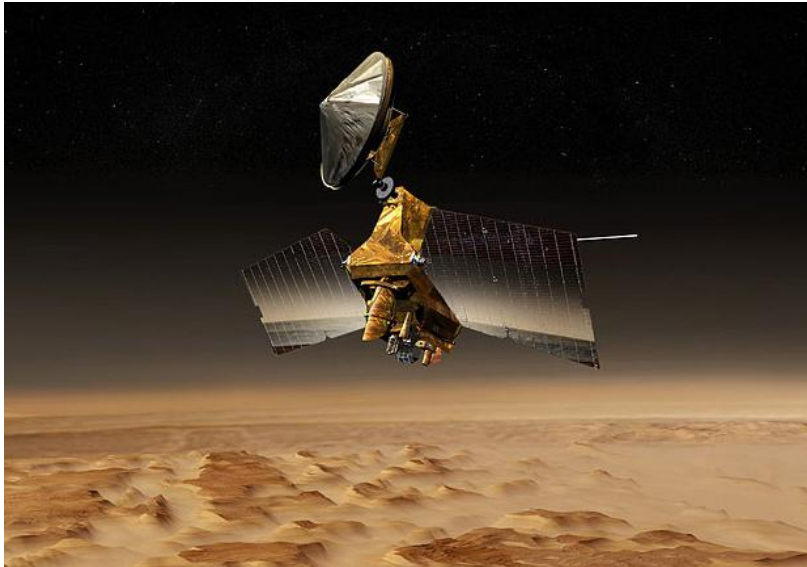
Είναι φανερό ότι στην περίπτωση ζεύξεων βαθέως διαστήματος απαιτούνται κεραίες με πολύ υψηλό κέρδος για την αντιστάθμιση της σημαντικής εξασθένησης διάδοσης στην οποία υπόκειται το σήμα. Οι κεραίες που κατά κανόνα χρησιμοποιούνται είναι παραβολικά κάτοπτρα, καθώς παρουσιάζουν διάγραμμα ακτινοβολίας με υψηλή κατευθυντικότητα και χαμηλή στάθμη πλευρικών λοβών.

Στους επίγειους σταθμούς, όπου δεν υπάρχει περιορισμός μεγέθους, μπορούν να αξιοποιηθούν παραβολικές κεραίες μεγάλης διαμέτρου μέχρι και 70 μέτρων (βλ Σχ.1.2 και Σχ.1.4). Οι κεραίες αυτές είναι εξαιρετικά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες που χρησιμοποιούνται στα καθιερωμένα δορυφορικά συστήματα, όπου στον επίγειο κεντρικό σταθμό (gateway or hub station) χρησιμοποιεί συνήθως κεραίες διαμέτρου μερικών μέτρων ενώ σε ένα σύστημα VSAT τα τερματικά μπορεί να διαθέτουν κεραίες διαμέτρου μέχρι 3m. Άλλωστε, οι τυπικοί οικιακοί δέκτες διαθέτουν κεραία στο εύρος 0.6-1.2m. Καθώς κάθε επίγειος σταθμός βαθέως διαστήματος διαθέτει έναν αριθμό κεραιών διαφορετικού μεγέθους, κάθε ζεύξη μπορεί να χρησιμοποιήσει είτε μια κεραία μεγάλης διαμέτρου είτε ένα σύνολο από μικρότερες κεραίες (arraying). Τότε τα σήματα που λαμβάνονται από διαφορετικές κεραίες συνδυάζονται δημιουργώντας το ίδιο αποτέλεσμα με μία κεραία πολύ μεγάλης διαμέτρου. Έτσι, πολλές κεραίες μικρής διαμέτρου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα για τη βελτίωση της επίδοσης μιας ζεύξης.

Επίσης, χρησιμοποιώντας αυτήν την τεχνική μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη διαθεσιμότητα, καθώς βλάβη σε μια κεραία δεν προκαλεί αναγκαστικά διακοπή της ζεύξης αλλά μπορεί να αντιμετωπιστεί με τεχνικές όπως η προσωρινή μείωση του ρυθμού μετάδοσης.

Όπως έχει αναφερθεί, οι κεραίες που χρησιμοποιούνται αυτή τη στιγμή λειτουργούν κυρίως στη ζώνη συχνοτήτων X, ενώ κάποιες υποστηρίζουν λειτουργία και στις δύο ζώνες X και Ka. Μια κεραία 34m που λειτουργεί στη ζώνη X έχει απόδοση 76.66%, ενώ στη ζώνη Ka έχει απόδοση 61.19%. Η ίδια κεραία αν χρησιμοποιηθεί στη ζώνη W θα έχει πολύ μικρότερη απόδοση, της τάξης του 18%. Η ακρίβεια σκόπευσης είναι  $0.001^\circ$ . [11] Μια κεραία διαμέτρου 70m μπορεί να έχει μέγιστο κέρδος 84dBi στη ζώνη συχνοτήτων Ka και εύρος κύριου λοβού ίσο με  $0.01^\circ$ . [3]

Στο άλλο άκρο, όμως, της ζεύξης δεν υπάρχει η δυνατότητα χρήσης πολύ μεγάλων κεραιών λόγω περιορισμού στον όγκο του σκάφους και στη διαθέσιμη ισχύ. Χρησιμοποιούνται λοιπόν παραβολικές κεραίες με διάμετρο της τάξης μερικών μέτρων. Το διαστημικό σκάφος Mars Reconnaissance Orbiter, για παράδειγμα, διαθέτει μια παραβολική κεραία διαμέτρου 3m, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 1.10. Παράλληλα, εκτός από αυτήν την κύρια κατευθυντική του κεραία το σκάφος διαθέτει πάντα και μία ή περισσότερες εφεδρικές κεραίες που χρησιμοποιούνται σε ειδικές περιστάσεις, όπως κατά την προσέγγισή του σε κάποιον πλανήτη ή σε περίπτωση ανάγκης. Οι κεραίες αυτές έχουν γενικά μεγάλη απόδοση, τυπικά μεγαλύτερη από 85%, και ακρίβεια σκόπευσης της τάξης των  $0.035^\circ$ . [11] Τυπικές τιμές του κέρδους της κύριας κεραίας είναι 48dB στη ζώνη X και 60dB στη ζώνη Ka. Αντίστοιχα, για το εύρος του κύριου λοβού ακτινοβολίας της κεραίας, τυπικές τιμές είναι οι  $0.64^\circ$  για τη ζώνη X και οι  $0.17^\circ$  για τη ζώνη Ka. [3]



Σχ. 1.10 Αναπαράσταση του Mars Reconnaissance Orbiter, διακρίνεται η κύρια κεραία του σκάφους διαμέτρου 3m.

## 1.5 Ιδιαιτερότητες Επικοινωνιών Βαθέως Διαστήματος

Σε σχέση με τις καθιερωμένες επίγειες και δορυφορικές επικοινωνίες, οι επικοινωνίες βαθέως διαστήματος εμφανίζουν πιο απαιτητικό περιβάλλον για τη μετάδοση δεδομένων, γεγονός που οφείλεται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους.

Καταρχήν, η εξαιρετικά μεγάλη απόσταση μεταξύ Γης και διαφόρων πλανητών (βλ Πίνακα 1.6) μειώνει σημαντικά το λόγο ισχύος σήματος προς ισχύ θορύβου (SNR) που φθάνει στον δέκτη λόγω των εξαιρετικά υψηλών απωλειών διάδοσης. Συνέπεια είναι η επίδοση της ζεύξης να είναι περισσότερο ευάλωτη προς τα διάφορα είδη θορύβου και τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα. Μάλιστα, μολονότι λαμβάνουν χώρα σε ένα μικρό μόνο τμήμα της συνολικής διαδρομής του σήματος, τα φαινόμενα που συντελούνται εντός της γήινης ατμόσφαιρας μπορεί, ενδεχομένως, να αποτελούν τον πιο σημαντικό παράγοντα υπονόμησης της επίδοσης του συστήματος.

Παράλληλα, η μεγάλη απόσταση διάδοσης προκαλεί και αυξημένη καθυστέρηση διάδοσης, η οποία εισάγει δυσκολίες στην υλοποίηση λειτουργιών του δικτύου που είναι ευαίσθητες ως προς την καθυστέρηση και αφορούν τηλεπικοινωνιακά στρώματα ψηλότερα του φυσικού. Για παράδειγμα, τα υφιστάμενα πρωτόκολλα στο στρώμα μεταφοράς δεν είναι



αποδοτικά όταν εφαρμόζονται σε δίκτυα βαθέως διαστήματος, καθώς οι μηχανισμοί αύξησης της διέλευσης (throughput) των πρωτοκόλλων TCP/IP (transport control protocol/Internet protocol) δεν ενδείκνυνται για δίκτυα με μεγάλη καθυστέρηση διάδοσης.

Πλανήτης	Μέση Ελάχιστη Απόσταση από τη Γη (10 <sup>6</sup> km)
Ερμής	91.7
Αφροδίτη	41.4
Άρης	78.3
Δίας	628.7
Κρόνος	1279.8
Ουρανός	2721.4
Ποσειδώνας	4354.4
Πλούτωνας	5763.9

Πιν. 1.6 Ελάχιστη απόσταση των πλανητών του ηλιακού μας συστήματος (και του Πλούτωνα) από τη Γη

Επίσης, η κίνηση των πλανητών είναι ένας επιπλέον παράγοντας που πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη κατά τη σχεδίαση μιας ζεύξης. Η σχετική κίνηση όλων των ουρανίων σωμάτων μπορεί να επηρεάσει μια ζεύξη όταν, για παράδειγμα, ένας πλανήτης βρεθεί μεταξύ διαστημοπλοίου και Γης ή όταν ένα εξερευνητικό σκάφος βρεθεί στη σκοτεινή πλευρά ενός πλανήτη. Όταν υπάρχει ανάγκη για αδιάλειπτη επικοινωνία μεταξύ σκάφους και Γης, απαιτείται η διερεύνηση λύσεων όπως η χρήση ενδιάμεσων κόμβων (επαναληπτών/μεταγωγέων) για τη μεταφορά των δεδομένων. Σε μια τέτοια περίπτωση, ένα δεύτερο σκάφος ή ένας δορυφόρος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναμετάδοση των δεδομένων προς τους επίγειους σταθμούς.

Τέλος, ένα σημαντικό χαρακτηριστικό μιας ζεύξης βαθέως διαστήματος είναι η ασυμμετρία εύρους ζώνης μεταξύ της ζεύξης uplink (Γη προς διάστημα) και της ζεύξης downlink (διάστημα προς Γη). Κατά κανόνα, η ζεύξη

downlink απαιτεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος ζώνης ενώ η ζεύξη ανόδου χρησιμοποιείται μέχρι στιγμής για τη μετάδοση σημάτων ελέγχου και τηλεμετρίας και χρειάζεται μικρότερο εύρος ζώνης. Βέβαια, μελλοντικές αποστολές ενδέχεται σύντομα να κινηθούν προς την κατεύθυνση της χρήσης επανδρωμένων σκαφών για εξερεύνηση πλανητών όπως η Σελήνη και ο Άρης. Σε αυτήν την περίπτωση θα αυξηθούν και οι απαιτήσεις της ζεύξης ανόδου σε εύρος ζώνης, καθώς αμφότερα τα δύο άκρα της ζεύξης θα υποστηρίζουν συμμετρική κίνηση.

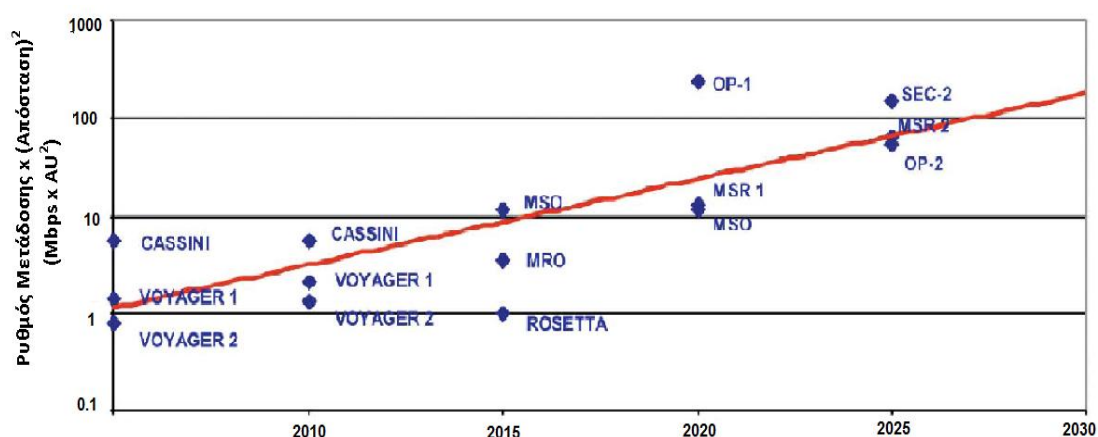
Οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις των διαστημικών αποστολών δεν περιορίζονται στη δυνατότητα μετάδοσης μεγάλου όγκου δεδομένων σε μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης. Υπάρχουν και άλλοι σημαντικοί παράγοντες που αφορούν το χαρακτήρα των διαστημικών αποστολών και την αναμενόμενη μελλοντική τους εξέλιξη, οι οποίοι καθορίζουν τη σχεδίαση ενός συστήματος επικοινωνιών βαθέως διαστήματος. Μάλιστα, έχοντας υπόψη μας ένα μελλοντικό διαπλανητικό διαδίκτυο (βλ Ενότητα 1.3) ενδιαφέρον παρουσιάζουν όχι μόνο οι περιορισμοί που αφορούν στο φυσικό στρώμα του συστήματος αλλά και οι προκλήσεις που καλείται να αντιμετωπίσει η σχεδίαση των ανωτέρων στρωμάτων (layers) του.

Όσον αφορά στη χωρητικότητα των ζεύξεων, οι απαιτήσεις διαρκώς αυξάνουν καθώς οδηγούμαστε σε αποστολές μεγαλύτερης διάρκειας που στοχεύουν σε όλο και πιο λεπτομερή εξερεύνηση των διαφόρων πλανητών με αποτέλεσμα να συγκεντρώνουν συνεχώς μεγαλύτερο όγκο δεδομένων προς μετάδοση.

Από την άλλη, σταθερή θα παραμένει πάντα η απαίτηση για την επίτευξη όσο το δυνατόν μεγαλύτερης διαθεσιμότητας της ζεύξης για όσο αυτή είναι ορατή (συνήθως λαμβάνει τιμές από 95~99%). Συνεπώς η σχεδίαση του συστήματος προβλέπει την προστασία της ζεύξης με χρήση εφεδρείας, για παράδειγμα μια εφεδρική ζεύξη για τα σήματα ελέγχου. Για την πραγματοποίηση μιας τέτοιας ζεύξης μέσω της εφεδρικής ομοιοκατευθυντικής κεραίας του διαστημικού σκάφους, ο επίγειος σταθμός θα πρέπει να διαθέτει τη δυνατότητα αύξησης της ισχύος εκπομπής του σε περίπτωση ανάγκης (έλεγχος της ισχύος).

Παράλληλα, ο αριθμός των ζεύξεων που αναμένεται να βρίσκονται σε λειτουργία τα επόμενα χρόνια σταδιακά αυξάνεται, καθώς οι υπό σχεδίαση

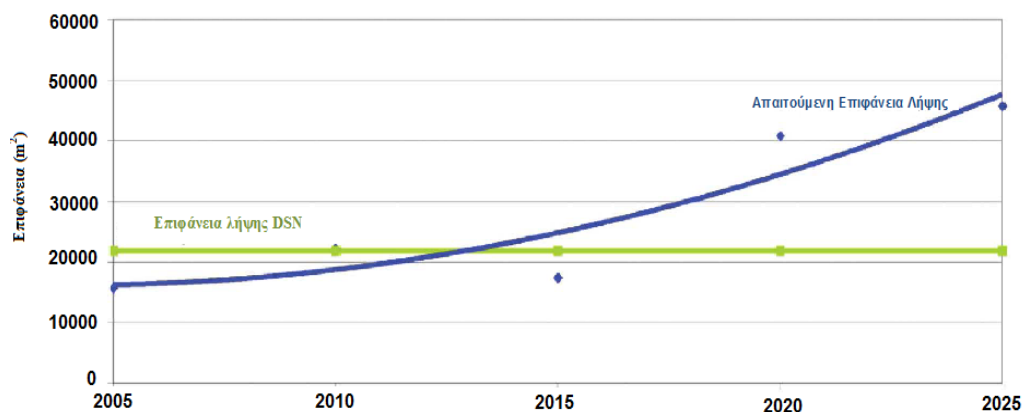
αποστολές πολλαπλασιάζονται και θα αποτελούνται από πολλά διαστημικά σκάφη που θα συνεργάζονται μεταξύ τους. Μάλιστα, καθώς οι ζεύξεις αυτές θα πραγματοποιούνται σε ακόμα πιο απομακρυσμένα σημεία του ηλιακού μας συστήματος και με υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, αναμένεται να παρουσιάζουν αυξημένη δυσκολία υλοποίησης. Για την εκτίμηση της δυσκολίας υλοποίησης μιας ζεύξης μπορεί να χρησιμοποιηθεί το γινόμενο του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων επί το τετράγωνο της απόστασης. Στο Σχήμα 1.11 φαίνεται πως το γινόμενο αυτό αναμένεται να αυξηθεί περίπου δύο τάξεις μεγέθους ως το 2025. [5] Η απόσταση εδώ εκφράζεται σε Αστρονομικές Μονάδες ( $1\text{AU}=150 \times 10^6 \text{ km}$ ).



Σχ. 1.11 Αναμενόμενη δυσκολία υλοποίησης μελλοντικών ζεύξεων

Επομένως, οι επίγειοι σταθμοί για επικοινωνίες βαθέως διαστήματος στο άμεσο μέλλον πρέπει να υποστηρίζουν πολλαπλές ζεύξεις μεγαλύτερης χωρητικότητας με υψηλή διαθεσιμότητα.

Προς τούτο, θα χρειαστεί καταρχήν μια αύξηση στη συνολική ισοδύναμη επιφάνεια λήψης των επίγειων σταθμών. Με βάση τα στοιχεία αποστολών που βρίσκονται στο στάδιο του σχεδιασμού, η ισοδύναμη επιφάνεια λήψης του DSN θα πρέπει να υπερδιπλασιαστεί τα επόμενα 20 χρόνια (Σχ. 1.12). [5]



Σχ. 1.12 Απαιτούμενη ισοδύναμη επιφάνεια λήψης του DSN

Βέβαια, οι απαιτήσεις των μελλοντικών αποστολών δε θα αντιμετωπιστούν μονοσήμαντα. Ταυτόχρονα, είναι απαραίτητο να γίνει κατάλληλη εκμετάλλευση όλων των τεχνολογικών εξελίξεων για τη βελτίωση της επίδοσης του συστήματος. Προς αυτήν την κατεύθυνση, πραγματοποιούνται έρευνες για υλοποίηση αποδοτικότερων στοιχείων του συστήματος, όπως κεραίες και ενισχυτές. Επίσης, εξετάζεται η ενσωμάτωση λογισμικού στους πομπούς, με σκοπό την πιο ευέλικτη λειτουργία τους (Software Defined Radio) καθώς και η μετάβαση σε οπτικές συχνότητες, όπου υπάρχει άφθονο ελεύθερο διαθέσιμο φάσμα και μπορεί να μειωθεί ο όγκος του εξοπλισμού. [5]

## 1.6 Διαμόρφωση και Κωδικοποίηση

### 1.6.1 Διαμόρφωση

Στα συστήματα βαθέως διαστήματος υπάρχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις για υψηλή φασματική απόδοση, η οποία εκφράζεται σε bps/Hz, καθώς το διαθέσιμο φάσμα είναι περιορισμένο και ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων συνεχώς αυξάνεται. Επίσης, είναι επιθυμητή η λειτουργία των ενισχυτών ισχύος των πομπών κοντά στην περιοχή κορεσμού, η οποία αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη ισχύ που μπορούν να αποδώσουν. Ταυτόχρονα, όμως, πρέπει να αποφεύγονται φαινόμενα μη γραμμικής παραμόρφωσης τα οποία οδηγούν σε φασματική διεύρυνση του σήματος. Έτσι, οδηγούμαστε στην επιλογή

σχημάτων διαμόρφωσης που δεν παρουσιάζουν, κατά το δυνατόν, ευαισθησία σε τέτοιου είδους παραμόρφωση. Ένας δείκτης αυτής της ευαισθησίας ενός σχήματος διαμόρφωσης είναι ο λόγος της μέγιστης προς τη μέση ισχύ του σήματος (Peak-to-Average Power Ratio – PAPR) . Εάν η τιμή αυτού του λόγου είναι μηδέν, τότε δεν υπάρχει μεταβολή στην ισχύ του σήματος, πρόκειται δηλαδή για μια διαμόρφωση σταθερής περιβάλλουσας η οποία δεν επηρεάζεται από μη γραμμικά φαινόμενα. Αντίθετα, για μεγαλύτερες τιμές του λόγου PAPR έχουμε διαμορφώσεις μεταβλητής περιβάλλουσας οι οποίες επιβάλλουν τη λειτουργία των ενισχυτών με μεγάλο περιθώριο από την ισχύ κορεσμού (backoff), μειώνοντας έτσι την απόδοσή τους.

Οι διαμορφώσεις φάσης που χρησιμοποιούνται συνήθως σε δορυφορικά συστήματα ανήκουν στην κατηγορία των διαμορφώσεων σταθερής περιβάλλουσας. Πρακτικά, όμως, σε όλα τα συστήματα επικοινωνιών το στάδιο της διαμόρφωσης ακολουθείται από στάδιο φιλτραρίσματος, (φίλτρο μορφοποίησης/ανυψωμένου συνημιτόνου) το οποίο εισάγει μια μεταβολή στην αρχικά σταθερή περιβάλλουσα. Η μεταβολή αυτή εξαρτάται από το είδος του φίλτρου που χρησιμοποιείται και τον παράγοντα αναδίπλωσης. Σχήματα διαμόρφωσης που έχουν προταθεί για επικοινωνίες βαθέως διαστήματος είναι τα ακόλουθα: Offset QPSK, pre-encoded GMSK, FQPSK.

Η αντισταθμισμένη διαμόρφωση QPSK (Offset Quadrature Phase shift Keying) αποτελεί μια παραλλαγή της απλής QPSK όπου οι δύο κυματομορφές βασικής ζώνης έχουν μια σταθερή χρονική ολίσθηση μεταξύ των ψηφίων τους. Το φάσμα του σήματος είναι το ίδιο με αυτό στην περίπτωση της QPSK αλλά η περιβάλλουσα της OQPSK είναι πιο σταθερή. Μια άλλη παραλλαγή της QPSK είναι η FQPSK (Feher patented QPSK), η οποία συνδυάζει καλή επίδοση και υψηλή φασματική απόδοση. Η GMSK είναι και αυτή μια διαμόρφωση σχεδόν σταθερής περιβάλλουσας, η οποία χρησιμοποιεί παλμούς Gauss με σκοπό τον περιορισμό του φασματικού περιεχομένου του διαμορφωμένου σήματος.

### 1.6.2 Κωδικοποίηση

Για επιπλέον μείωση της πιθανότητας λάθους σε όλα τα ασύρματα συστήματα χρησιμοποιείται κωδικοποίηση για ανίχνευση και διόρθωση λανθασμένων ψηφίων. Στα συστήματα βαθέως διαστήματος είναι ιδιαίτερα επιτακτική η ανάγκη για χρήση ισχυρών σχημάτων κωδικοποίησης με μεγάλο κέρδος κωδικοποίησης που θα προστατεύουν επαρκώς τα μεταδιδόμενα δεδομένα. Οι block κώδικες είναι κατάλληλοι για την αντιμετώπιση καταγισμών σφαλμάτων που οφείλονται σε γεγονότα όπως οι διαλείψεις. Αντίθετα, οι συνελκτικοί κώδικες διορθώνουν τα τυχαία σφάλματα που εισάγει ο δίαυλος. Με σκοπό το συνδυασμό των πλεονεκτημάτων αυτών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και τα δύο αυτά είδη κωδίκων για τη δημιουργία ενός αλυσιδωτού κώδικα. Τέτοιο παράδειγμα αποτελεί το σχήμα κωδικοποίησης που υλοποιήθηκε στην αποστολή Mars Global Surveyor. Ως εξωτερικός κώδικας χρησιμοποιείται block κώδικας Reed Solomon (255,223), ενώ ως εσωτερικός κώδικας χρησιμοποιείται συνελκτικός κώδικας ρυθμού κώδικα  $\frac{1}{2}$  και μήκους περιορισμού 7. [4]

Βέβαια, οι αυξανόμενες απαιτήσεις των ζεύξεων τροφοδοτούν συνεχώς την προσπάθεια για τη βελτιστοποίηση των κωδίκων που χρησιμοποιούνται στα συστήματα βαθέως διαστήματος. Οι πιο αποτελεσματικοί κώδικες που χρησιμοποιούνται σήμερα αλλά και αποτελούν αντικείμενο έρευνας για περεταίρω εξέλιξη είναι οι κώδικες Turbo και LDPC. Οι κώδικες Turbo ήταν οι πρώτοι κώδικες που σχεδιάστηκαν για να πλησιάσουν το όριο της χωρητικότητας του διαύλου. Έχουν την καλύτερη επίδοση στην περίπτωση κώδικα μικρού μήκους αλλά απαιτούν πολύπλοκη διαδικασία αποκωδικοποίησης. Από την άλλη, οι κώδικες LDPC προσφέρουν υψηλή ταχύτητα αποκωδικοποίησης που τους καθιστά κατάλληλους για χρήση σε συνδυασμό με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Επίσης, έχουν καλύτερη επίδοση όταν χρησιμοποιούνται υπό πολύ χαμηλό ποσοστό λανθασμένων ψηφίων (Bit Error Ratio – BER). Τέλος, χρήσιμοι για τα συστήματα βαθέως διαστήματος είναι οι διάτρητοι κώδικες (punctured codes). Στην περίπτωση αυτή, το ίδιο κύκλωμα κωδικοποίησης χρησιμοποιείται για να πετύχουμε κώδικες διαφορετικού ρυθμού. Εάν μάλιστα η επιλογή του εκάστοτε ρυθμού γίνεται με βάση τις συνθήκες στο δίαυλο, υλοποιείται με αυτόν τον τρόπο μια

τεχνική προσαρμοστικής κωδικοποίησης για την αντιμετώπιση των διαλείψεων (βλ Ενότητα 1.7).

## 1.7 Τεχνικές Σχεδίασης

Όπως έχει αναφερθεί, τα διάφορα ατμοσφαιρικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας έχουν δυσμενή επίδραση στη διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Οι απότομες μεταβολές στη στάθμη του σήματος, οι οποίες ονομάζονται διαλείψεις, μπορεί να έχουν βάθος της τάξης των 30dB, συνεπώς αλλάζουν δραματικά το προφίλ του λαμβανόμενου στον πομπό σήματος. Κατά τη σχεδίαση ενός συστήματος πρέπει, λοιπόν, να λαμβάνεται ειδική μέριμνα για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου.

### 1.7.1 Διαθεσιμότητα – Περιθώριο Διαλείψεων

Η ποιότητα ενός ψηφιακού συστήματος επικοινωνιών καθορίζεται από τη διαθεσιμότητα (availability) και την ποιότητα υπηρεσιών (Quality of Service - QoS) που επιτυγχάνει. Η διαθεσιμότητα εκφράζεται από το χρονικό ποσοστό στη διάρκεια ενός έτους κατά το οποίο ο δέκτης διατηρεί το συγχρονισμό του. Η ποιότητα υπηρεσιών σχετίζεται με το ποσοστό λανθασμένων ψηφίων (BER) που προκύπτει στον δέκτη του συστήματος. Το ποσοστό αυτό των λαθών μεταβάλλεται ανάλογα με τη στάθμη της λαμβανόμενης ισχύος, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από τις συνθήκες στο δίαυλο. Επομένως, χρησιμοποιείται η έννοια της πιθανότητας υπέρβασης μιας στάθμης ποσοστού λαθών ή της αντίστοιχης στάθμης απόσβεσης που προκαλούν τα διάφορα ατμοσφαιρικά φαινόμενα. Η στάθμη απόσβεσης η οποία προκαλεί αύξηση του ρυθμού σφαλμάτων πάνω από το όριο που θέτουν οι προδιαγραφές με συγκεκριμένη πιθανότητα ονομάζεται περιθώριο διαλείψεων (fade margin). Στην περίπτωση που αναφερόμαστε στην πιθανότητα διακοπής, το περιθώριο διαλείψεων ισούται με την επιπρόσθετη στάθμη απόσβεσης η οποία θέτει το σύστημα εκτός συγχρονισμού.

## 1.7.2 Τεχνικές για την Αντιμετώπιση των Διαλείψεων

Για να μπορέσει κανείς να εγγυηθεί τη διαθεσιμότητα και την ποιότητα υπηρεσίας που απαιτείται, θα πρέπει η υλοποίηση του συστήματος να γίνει με μεγάλο στατικό περιθώριο διαλείψεων, το οποίο θα εξασφαλίζει την ελαχιστοποίηση του χρόνου διακοπής. Μια τέτοια προσέγγιση, όμως, δεν είναι οικονομικά αποδοτική, πολλές φορές μάλιστα δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί λόγω τεχνολογικών περιορισμών. Έτσι, παρουσιάζεται η ανάγκη για μια εναλλακτική σχεδιαστική προσέγγιση, η οποία θα χρησιμοποιεί μεθόδους μέσω των οποίων θα αντισταθμίζονται οι αρνητικές επιδράσεις των διαλείψεων (fade mitigation techniques).

### 1.7.2.1 Τεχνικές Ελέγχου της Ισχύος

Η τεχνική αυτή συνίσταται στην προσαρμογή της εκπεμπόμενης ισχύος στις συνθήκες που επικρατούν στο δίαυλο, με στόχο την αντιστάθμιση της επιπρόσθετης απόσβεσης που προκαλούν τα διάφορα ατμοσφαιρικά φαινόμενα. Μπορεί να αφορά είτε στη ζεύξη ανόδου (Uplink Power Control) είτε στη ζεύξη καθόδου (Downlink Power Control). Επίσης, σε αυτήν την κατηγορία ανήκει και η τεχνική μορφοποίησης της δέσμης από το δορυφόρο (Beam Shaping). Όταν οι συνθήκες στο δίαυλο είναι δυσμενείς, μειώνεται το εύρος δέσμης της κεραίας και η συνακόλουθη αύξηση του κατευθυντικού κέρδους είναι αυτή που προκαλεί αύξηση της ισοδύναμης ιστροπικά ακτινοβολούμενης ισχύος (EIRP).

### 1.7.2.2 Προσαρμοστικές Τεχνικές Μετάδοσης

Οι τεχνικές αυτές αφορούν στην προσαρμογή μιας παραμέτρου του συστήματος με σκοπό τη βελτίωση της επίδοσης μιας ζεύξης παρουσία διαλείψεων. Συγκεκριμένα, επιτρέπουν τη μείωση του απαιτούμενου σηματοθορυβικού λόγου στην είσοδο του δέκτη, διατηρώντας σταθερή την επίδοση του συστήματος, όπως αυτή περιγράφεται σε όρους ρυθμού εσφαλμένων ψηφίων.



Προσαρμοστική Κωδικοποίηση (Adaptive Coding): Όταν οι συνθήκες στο δίαυλο είναι ευνοϊκές χρησιμοποιείται ρυθμός κωδικοποίησης κοντά στη μονάδα, με αποτέλεσμα να μεταδίδονται περισσότερα ψηφία πληροφορίας. Γίνεται μετάβαση σε πιο εύρωστα σχήματα κωδικοποίησης (με μικρότερο ρυθμό) όταν οι συνθήκες στο δίαυλο γίνονται δυσμενείς.

Προσαρμοστική Διαμόρφωση (Adaptive Modulation): Όταν οι συνθήκες στο δίαυλο είναι ευνοϊκές χρησιμοποιούνται σχήματα διαμόρφωσης με υψηλή φασματική απόδοση (αύξηση του αριθμού των επιπέδων διαμόρφωσης  $M$ ). Αντίθετα, κατά τη διάρκεια δυσμενών συνθηκών στο δίαυλο, γίνεται μετάβαση σε περισσότερα ανθεκτικά σχήματα διαμόρφωσης, με μικρότερη φασματική απόδοση. Τα σχήματα αυτά απαιτούν μικρότερο σηματοθορυβικό λόγο στην είσοδο του δέκτη για την επίτευξη της ίδιας πιθανότητας λάθους.

Μείωση του ρυθμού δεδομένων (Data Rate Reduction): Οι δυσμενείς συνθήκες στο δίαυλο προκαλούν μία μείωση του λόγου  $C/N$  στην είσοδο του δέκτη, η οποία μπορεί να αντισταθμιστεί με μια αντίστοιχη μείωση του ρυθμού μετάδοσης ώστε να διατηρηθεί τελικά σταθερός ο λόγος  $E_b/N_0$ .

Τα σχήματα ACM (Adaptive Coding and Modulation) χρησιμοποιούν μεθόδους εκτίμησης του διαύλου, θέτοντας διάφορα κριτήρια (όπως είναι η λαμβανόμενη ισχύς και ο ρυθμός σφαλμάτων) για τον χαρακτηρισμό της κατάστασής του. Όμως, η πρόβλεψη μιας ενδεχόμενης διάλειψης αλλά και του βάθους αυτής δεν είναι εύκολη και θέτει σημαντικά θέματα υλοποίησης. Η υλοποίηση μπορεί να είναι είτε ανοιχτού είτε κλειστού βρόχου, με το σύστημα πρόβλεψης να βρίσκεται είτε στον επίγειο σταθμό είτε στον δορυφόρο.

### 1.7.2.3 Τεχνικές Διαφορικής Λήψης

Οι τεχνικές αυτές αποσκοπούν στη βελτίωση της επίδοσης μιας ζεύξης παρουσία διαλείψεων μέσω της μεταβολής της συχνότητας λειτουργίας ή της γεωμετρίας του συστήματος. Έχουν το πλεονέκτημα ότι, σε αντίθεση με τις προσαρμοστικές τεχνικές, δεν απαιτούν εκτίμηση της κατάστασης του διαύλου. Το διαφορικό κέρδος (diversity gain) ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της απόσβεσης κατά την απλή λήψη και της απόσβεσης κατά τη διαφορική

λήψη για το ίδιο ποσοστό του χρόνου. Ακολουθεί μια αναφορά στις βασικές τεχνικές διαφορικής λήψης για δορυφορικά συστήματα.

Διαφορική Λήψη Θέσης (Site Diversity): Η τεχνική αυτή συνίσταται στη χρήση περισσότερων του ενός επίγειων σταθμών για τη λήψη του σήματος. Το πλεονέκτημα αυτής της υλοποίησης προέρχεται από την εκμετάλλευση της χωρικής ανομοιογένειας των ατμοσφαιρικών φαινομένων και κυρίως της βροχής. Υπάρχουν τουλάχιστον δύο ξεχωριστές διαδρομές που ακολουθεί το σήμα, άρα η συνολική πιθανότητα υπέρβασης είναι μικρότερη από αυτήν μιας απλής ζεύξης, αφού ισούται με την πιθανότητα ταυτόχρονης υπέρβασης μιας συγκεκριμένης στάθμης απόσβεσης σε όλες τις ζεύξεις. Το διαφορικό κέρδος αυξάνεται καθώς αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των επίγειων σταθμών, μέχρι ένα μέγιστο σημείο στο οποίο οι αποσβέσεις των επιμέρους ζεύξεων καθίστανται πλήρως ασυσχέτιστες.

Διαφορική Λήψη Δορυφορικής Τροχιάς (Orbital Diversity): Η τεχνική αυτή συνίσταται στη λήψη του σήματος από περισσότερους του ενός δορυφόρους, οι οποίοι έχουν τοποθετηθεί σε γωνιακή απόσταση  $\theta$  μοιρών μεταξύ τους. Και πάλι η συνολική πιθανότητα υπέρβασης είναι μικρότερη από αυτήν μιας απλής ζεύξης και το διαφορικό κέρδος αυξάνεται με την αύξηση της γωνίας  $\theta$ .

Διαφορική Λήψη Συχνότητας (Frequency Diversity): Προϋποθέτει τη δυνατότητα λειτουργίας του συστήματος σε περισσότερες από μία ζώνες συχνοτήτων. Όταν οι συνθήκες στο δίαυλο είναι δυσμενείς, πραγματοποιείται μετάβαση σε χαμηλότερη συχνότητα, στην οποία οι επιδράσεις των ατμοσφαιρικών φαινομένων είναι λιγότερο δυσμενείς. Έχει το μειονέκτημα ότι σε αυτήν τη χαμηλότερη ζώνη συχνοτήτων είναι μικρότερο και το διαθέσιμο εύρος ζώνης.

Διαφορική Λήψη Χρόνου (Time Diversity): Όταν συμβαίνει ένα γεγονός διάλειψης, το σύστημα περιμένει τη λήξη του για να μεταδώσει τα δεδομένα. Έτσι εκμεταλλευόμαστε το γεγονός ότι η κατάσταση του διαύλου δεν είναι χρονικά σταθερή και αναμεταδίδουμε όταν αυτή επιτρέπει τη σωστή μετάδοση των δεδομένων. Η υλοποίηση αυτή δεν είναι κατάλληλη για εφαρμογές πραγματικού χρόνου ενώ απαιτεί και ένα μοντέλο μεσοπρόθεσμης πρόβλεψης για τον δίαυλο.

#### 1.7.2.4 Τεχνικές Στρώματος Ζεύξης Δεδομένων

Τεχνικές για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων των διαλείψεων είναι δυνατό να υλοποιηθούν όχι μόνο στο φυσικό στρώμα αλλά και στο στρώμα ζεύξης δεδομένων (Layer 2). Οι τεχνικές αυτές δεν στοχεύουν στην αντιστάθμιση της απόσβεσης αλλά βασίζονται στην αναμετάδοση μηνυμάτων όταν οι δυσμενείς συνθήκες του διαύλου προκαλούν απώλεια δεδομένων.

Automatic Repeat Request (ARQ): Τα δεδομένα χωρίζονται σε πλαίσια και όταν ένα πλαίσιο χαθεί αποστέλλεται στον πομπό μία αίτηση επανεκπομπής. Ο δέκτης χρησιμοποιεί κυκλικό έλεγχο πλεονασμού (CRC) για να ελέγξει την ορθότητα ενός πλαισίου. Η τεχνική αυτή μπορεί να συνδυαστεί με κωδικοποίηση για διόρθωση λαθών και τότε ονομάζεται υβριδική ARQ. Το πλεονέκτημά της είναι ότι μπορεί να αυξήσει τη διεκπεραιωτική ικανότητα του συστήματος και να εκμεταλλευτεί τη δυνατότητα μεταβολής του ρυθμού κωδικοποίησης μεταξύ αναμεταδόσεων.

#### 1.7.3 Εφαρμογή σε Ζεύξεις Βαθέως Διαστήματος

Σε ένα διαστημικό σκάφος, η επιλογή της ισχύος εκπομπής καθορίζεται κυρίως από τον περιορισμό της διαθέσιμης ενέργειας και όχι από τις ανάγκες της ζεύξης, οι οποίες μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερες. Συνεπώς, κατά κανόνα, δεν υπάρχει περιθώριο αύξησης της ισχύος για να αντισταθμιστούν τα διάφορα φαινόμενα.

Τα διάφορα προσαρμοστικά σχήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ποικίλους τρόπους. Έμφαση δίνεται σε σχήματα προσαρμοστικού ρυθμού, τα οποία πραγματοποιούν κάποιου είδους πρόβλεψη για την κατάσταση του διαύλου. [12] Επίσης, μπορεί να γίνει συνδυασμός τεχνικών, όπως συμβαίνει στο υβριδικό ARQ, όπου το κλασσικό σχήμα αίτησης επανεκπομπής συνδυάζεται με μια προσαρμοστική τεχνική κωδικοποίησης για διόρθωση λαθών.

Όσον αφορά στη διαφορική λήψη, αυτή μπορεί να πάρει διάφορες μορφές. Καταρχήν, μπορεί να χρησιμοποιηθεί διαφορική λήψη θέσης, με δύο επίγειους σταθμούς να επικοινωνούν με το διαστημικό σκάφος. [13] Επίσης, αν πρόκειται για ένα δίκτυο δύο βημάτων το οποίο χρησιμοποιεί έναν

δορυφόρο ως αναμεταδότη μεταξύ διαστημικού σκάφους και επίγειου σταθμού, ένα άλλο είδος διαφορικής λήψης μπορεί να εξεταστεί. Συγκεκριμένα, εάν ο επίγειος σταθμός λαμβάνει το σήμα και μέσω του αναμεταδότη αλλά και απευθείας από το διαστημικό σκάφος πρόκειται για ένα σύστημα συνεργατικής διαφορικής λήψης (cooperative diversity). [14] Μάλιστα, το σχήμα αυτό προσομοιάζει αυτό της διαφορικής λήψης τροχιάς, με τη διαφορά ότι δεν εμπλέκει δύο ή περισσότερους δορυφόρους αλλά έναν δορυφόρο – αναμεταδότη και το διαστημικό σκάφος.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] <http://deepspace.jpl.nasa.gov/dsn/>
- [2] [www.esa.int](http://www.esa.int)
- [3] “Telecommunication Requirements for manned and unmanned deep-space research”. Int.Telecom.Union, Rec.ITU-R SA.1014-1
- [4] X. Song, Li Yunsong, Bai Baoming, Z.Youxi “The Key Technologies of Deep Space Communications”, ISN National Key Lab, Xidian University, Xi’an, 710071, China. China Communications December 2006
- [5] R.J.Cesarone, D.S.Abraham, L.J.Deutsch. “Prospects for a Next-Generation Deep-Space Network” , Proceedings of the IEEE Vol.95, No.10, October 2007
- [6] “Frequency and Channel Assignments”, 201, Rev.B, DSN Telecommunications Link Design Handbook, December 15, 2009
- [7] S. de Fina, M. Ruggieri, Ada Vittoria Bosisio. “Exploitation of the W-band for High Capacity Satellite Communications”, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems Vol.39, No.1 January 2003
- [8] Π.Κωπτής, Χ.Καψάλης, “Δορυφορικές Επικοινωνίες”, Εκδόσεις Τζιόλα 2006
- [9] “Preferred frequency bands for deep-space research in the 1-40 GHz range”. Rec. ITU-R SA.1012
- [10] “Preferred frequency bands for deep-space research in the 40-120 GHz range”. Rec. ITU-R SA.1013
- [11] S. Shambayati. “On the Use of W-Band for Deep-Space Communications”, IPN Progress Report 42-154 August 15, 2003.
- [12] Jun Sun, Jay Gao, Shervin Shambayati, Eytan Modiano, “Ka – band link optimization with rate adaptation for Mars and lunar communications” , Int. J. Satell. Commun. Network, 2007; 25:147-165
- [13] P.D.Arapoglou, A.Panagopoulos. “Benefitting from Spatial Diversity in Ka and W Band Deep Space Communications” in EUCAP 2010, Barcelona, April 2010.
- [14] P.D.Arapoglou, A.Panagopoulos, M. Bertinelli “Cooperative Deep Space Communications at Ka Band : Outage Performance Analysis” in SPACOMM 2010, Athens, June 2010.



## Κεφάλαιο Δεύτερο:

### Ατμοσφαιρικά και Περιβαλλοντικά Φαινόμενα

#### 2.1 Γενικά

Καθώς τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται μέσω της γήινης ατμόσφαιρας υφίστανται αρνητικές επιπτώσεις λόγω των διάφορων φυσικών φαινομένων που σχετίζονται με τη διάδοσή τους. Οι επιπτώσεις αυτές λαμβάνονται σοβαρά υπόψη στη σχεδίαση των παραδοσιακών δορυφορικών ζεύξεων, καθώς αν δεν αντιμετωπιστούν μπορούν να επηρεάσουν δυσμενώς την επίδοσή τους. Μάλιστα, για να καταστεί δυνατή η λειτουργία ενός σύγχρονου δορυφορικού συστήματος σε συχνότητες άνω των 10GHz είναι απαραίτητη η χρήση κατάλληλων τεχνικών αντιμετώπισης των διαλείψεων (fade mitigation techniques, FMT). Στις ζεύξεις βαθέως διαστήματος, όπου ήδη χρησιμοποιείται η ζώνη συχνοτήτων Ka και εξετάζεται η μετάβαση σε ακόμα υψηλότερες συχνότητες, παρουσιάζεται ακόμα πιο επιτακτική η ανάγκη για την καταρχήν εκτίμηση και τη μετέπειτα αντιμετώπιση των αρνητικών επιδράσεων που οφείλονται στα διάφορα ατμοσφαιρικά φαινόμενα. Παράλληλα, η σχεδίαση μιας ζεύξης βαθέως διαστήματος αντιμετωπίζει την επίδραση και πρόσθετων παραγόντων επιβάρυνσης που δεν υφίστανται στις συμβατικές δορυφορικές ζεύξεις. Οι παράγοντες αυτοί αφορούν το ιδιαίτερο περιβάλλον διάδοσης που παρουσιάζει το διάστημα. Το ηλιακό μας σύστημα είναι γεμάτο από πηγές θερμής ακτινοβολίας διάφορων ειδών, όπως ο ήλιος και οι διάφοροι πλανήτες. Όταν ένα διαστημικό σκάφος βρεθεί κοντά σε μια τέτοια πηγή η επικοινωνία του με τον επίγειο σταθμό επηρεάζεται σημαντικά από την ακτινοβολία αυτή αν δεν έχει υπάρξει η κατάλληλη πρόνοια κατά τη σχεδίαση της ζεύξης.

#### 2.2 Ατμοσφαιρικά Φαινόμενα στις Δορυφορικές Επικοινωνίες

Η επίδραση των διάφορων ατμοσφαιρικών φαινομένων στην ποιότητα μιας ζεύξης εξαρτάται καταρχήν από δύο χαρακτηριστικά της: το μήκος της διαδρομής διάδοσης του κύματος μέσω της γήινης ατμόσφαιρας και τη συχνότητα. Όσο μεγαλύτερη απόσταση διανύει ένα H/M κύμα στην περιοχή

όπου λαμβάνουν χώρα διάφορα επιβαρυντικά για αυτό φαινόμενα, τόσο ο χαρακτήρας της επίδρασής τους γίνεται πλέον επιβαρυντικός. Καθώς, μάλιστα, η εν λόγω διαδρομή είναι μικρότερη για μεγάλες γωνίες ανύψωσης. οι κατακόρυφες μεταδόσεις επιβαρύνονται λιγότερο σε σχέση με αυτές που πραγματοποιούνται υπό χαμηλή γωνία ανύψωσης, αφού η απόσβεση που υφίσταται το σήμα θα είναι τότε μικρότερη.

Όσον αφορά στη συχνότητα, έχει παρατηρηθεί ότι τα διάφορα φυσικά φαινόμενα που πραγματοποιούνται στα στρώματα της ατμόσφαιρας έχουν διαφορετικά αποτελέσματα σε διαφορετικές περιοχές συχνοτήτων. Κατά κανόνα, σε συστήματα που λειτουργούν σε υψηλότερες συχνότητες οι επιπτώσεις λόγω της διάδοσης μέσω της ατμόσφαιρας είναι δυσμενέστερες. Ας επιχειρήσουμε όμως μια πιο συστηματική καταγραφή των διαφόρων ατμοσφαιρικών φαινομένων στις διάφορες ζώνες συχνοτήτων.

Για συχνότητες χαμηλότερες των 3GHz, η διάδοση επηρεάζεται δυσμενώς από ατμοσφαιρικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην ιονόσφαιρα. Τα φαινόμενα αυτά είναι :

- Η στροφή Faraday, δηλαδή η στροφή γραμμικά πολωμένων Η/Μ κυμάτων λόγω αλληλεπίδρασης με το μαγνητικό πεδίο της Γης
- Οι ιονοσφαιρικοί σπινθηρισμοί, δηλαδή ταχείες μεταβολές του πλάτους, της φάσης και της γωνίας άφιξης των Η/Μ κυμάτων λόγω μεταβολών του συντελεστή διάθλασης της ιονόσφαιρας

Για συχνότητες άνω των 3GHz, τα ανωτέρω φαινόμενα έχουν αμελητέα επίδραση στη διάδοση των ραδιοκυμάτων. Αντίθετα, φαινόμενα που συναντώνται στην τροπόσφαιρα είναι αυτά που έχουν πολύ σημαντικές επιδράσεις. Τα φαινόμενα αυτά οφείλονται στην ύπαρξη υδρομετεωρητών (βροχή, χιόνι, ομίχλη), στα αέρια της ατμόσφαιρας (οξυγόνο, υδρατμοί) αλλά και στη μεταβολή του δείκτη διάθλασης της τροπόσφαιρας. Συγκεκριμένα, τα σημαντικότερα τροποσφαιρικά φαινόμενα διάδοσης έχουν ως εξής:

- Απόσβεση από υδρομετεωρήτες.

Οφείλεται στην απορρόφηση και τη σκέδαση από υδρομετεωρήτες όπως η βροχή, το χιόνι, τα νέφη και η ομίχλη. Εξαρτάται από τα κλιματικά χαρακτηριστικά κάθε περιοχής αλλά και από τη γωνία ανύψωσης. Σε



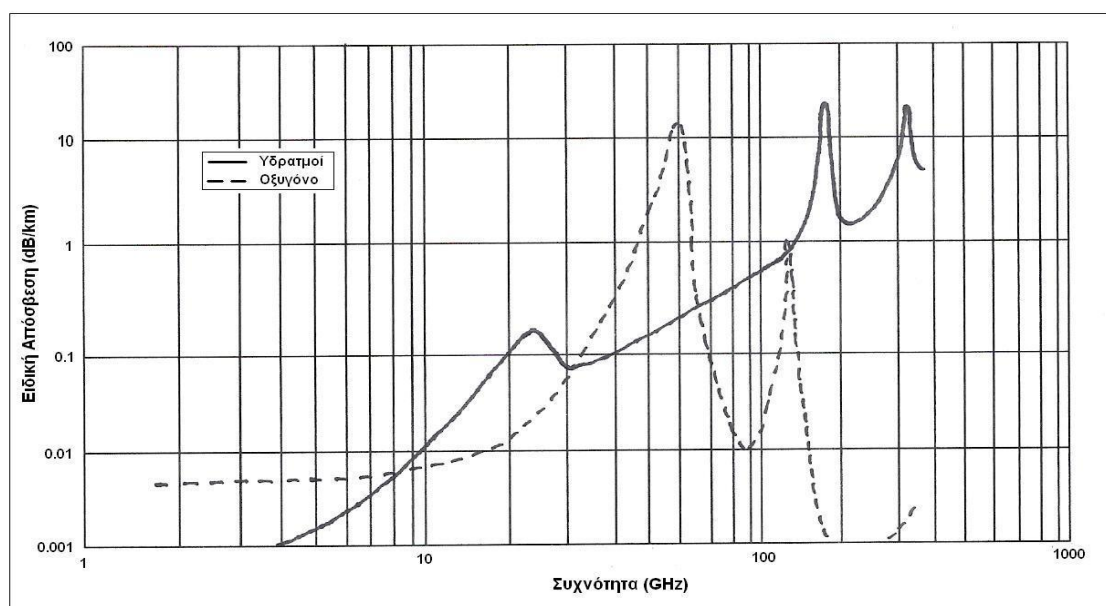
συχνότητες άνω των 10GHz οι βροχοπτώσεις είναι αυτές που προκαλούν τη σημαντικότερη απόσβεση, συνεπώς είναι ιδιαίτερα επιβαρυντικές για τις ζεύξεις βαθέως διαστήματος που χρησιμοποιούν τη ζώνη συχνοτήτων Ka. Για τον υπολογισμό της απόσβεσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν δεδομένα από μετρήσεις, αν αυτά είναι διαθέσιμα για τη συγκεκριμένη περιοχή, ή κάποιο εμπειρικό μοντέλο που δίδει την κατανομή της τυχαίας απόσβεσης λόγω βροχής. Στη Σύσταση ITU-R P.618 παρουσιάζεται ένα μοντέλο θεωρητικού υπολογισμού της απόσβεσης λόγω βροχής. [1] Η απόσβεση λόγω νεφών και ομίχλης οφείλεται στο νερό που περιέχεται σε αυτά και είναι σημαντικά μικρότερη από την απόσβεση λόγω βροχής. Στη Σύσταση ITU-R P.840 περιλαμβάνεται ένα μοντέλο για τον υπολογισμό της. [2]

- Απόσβεση από αέρια της ατμόσφαιρας.

Οφείλεται στην απορρόφηση από το οξυγόνο και τους υδρατμούς της ατμόσφαιρας και μεγιστοποιείται για συγκεκριμένες τιμές του φάσματος. [3] Η απόσβεση λόγω απορρόφησης από το οξυγόνο εμφανίζει συμπεριφορά σχεδόν ανεξάρτητη των κλιματολογικών συνθηκών, καθώς η συγκέντρωση του οξυγόνου στην ατμόσφαιρα είναι περίπου σταθερή. Αντίθετα, η απόσβεση λόγω απορρόφησης από τους υδρατμούς εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την απόλυτη υγρασία. Στο Σχήμα 2.1 απεικονίζονται τρεις περιοχές συχνοτήτων όπου η απόσβεση λόγω των υδρατμών της ατμόσφαιρας εμφανίζεται αυξημένη, στα 22.5GHz, στα 183GHz και στα 323GHz. Αντίστοιχα, αυξημένη απόσβεση λόγω του οξυγόνου της ατμόσφαιρας εμφανίζεται σε μία ζώνη γύρω από τα 60GHz καθώς και στα 119GHz.

Όσον αφορά το εύρος που ενδιαφέρει τη σχεδίαση ασυρμάτων ζεύξεων, παρατηρούμε ότι η τιμή της απόσβεσης είναι σχετικά μικρή για χαμηλές συχνότητες, όπως για παράδειγμα στη ζώνη συχνοτήτων X (8 GHz), ενώ είναι μεγαλύτερη στη ζώνη συχνοτήτων Ka (32GHz). Επίσης, φαίνεται και το παράθυρο μικρότερης απόσβεσης από το οξυγόνο που εμφανίζεται γύρω από τα 90GHz και καθιστά τη ζώνη W κατάλληλη ως υποψήφια για τη μετάβαση των συστημάτων βαθέως διαστήματος σε υψηλότερες συχνότητες. Γενικά, η τιμή της απόσβεσης εξαρτάται από τη συχνότητα, τη γωνία ανύψωσης, το υψόμετρο από την επιφάνεια της θάλασσας και την απόλυτη

υγρασία. Στη Σύσταση ITU-R P.676 περιλαμβάνονται μοντέλα για τον ακριβή υπολογισμό της απόσβεσης από αέρια της ατμόσφαιρας. [4]



Σχ. 2.1 Ειδική απόσβεση λόγω απορρόφησης από το οξυγόνο και τους υδρατμούς της ατμόσφαιρας ως συνάρτηση της συχνότητας.

- Τροποσφαιρικοί σπινθηρισμοί.

Πρόκειται για διακυμάνσεις της στάθμης του σήματος που οφείλονται στις μεταβολές του δείκτη διάθλασης της τροπόσφαιρας, συνεπώς έχει διαφορετικό χαρακτήρα από αυτόν της απόσβεσης που εισάγουν οι υδρομετεωρήτες και τα αέρια της ατμόσφαιρας καθώς το φαινόμενο αυτό προκαλεί τη λιγότερο δυσμενή επίδραση αλλά μεταβάλλεται ταχέως σε σχέση με τις διαλείψεις λόγω βροχής. Οι διαλείψεις λόγω σπινθηρισμών μπορούν να υπολογιστούν σύμφωνα με μοντέλο που περιλαμβάνεται στη Σύσταση ITU-R P.618-10 . [1]

Η συνολική απόσβεση αναπαριστά τη συνολική επίδραση που προκαλεί ο συνδυασμός των διάφορων ατμοσφαιρικών φαινομένων και μπορεί να υπολογιστεί θεωρητικά εάν είναι γνωστές οι επιμέρους αποσβέσεις για κάθε πιθανότητα υπέρβασης. Επίσης, εξαρτάται από το βαθμό συσχέτισης μεταξύ των φαινομένων καθώς, για παράδειγμα, οι σπινθηρισμοί έχουν διαφορετική συμπεριφορά υπό συνθήκες καθαρού ουρανού και υπό συνθήκες

βροχόπτωσης. Ένας τρόπος υπολογισμού της συνολικής απόσβεσης που αντιστοιχεί σε πιθανότητα υπέρβασης  $p$  είναι ο εξής [1] :

$$A_T(p) = A_G(p) + \sqrt{[A_R(p) + A_c(p)]^2 + A_S^2(p)} \quad (2.1)$$

όπου  $A_G$  η απόσβεση λόγω ατμοσφαιρικών αερίων

$A_R$  η απόσβεση λόγω βροχής

$A_S$  η απόσβεση λόγω τροποσφαιρικών σπινθηρισμών.

$A_c$  η απόσβεση λόγω νεφών και ομίχλης

## 2.3 Ατμοσφαιρικά Φαινόμενα: Επίγειοι Σταθμοί Βαθέως Διαστήματος

### 2.3.1 Θερμοκρασία Θορύβου

Τα διάφορα ατμοσφαιρικά φαινόμενα, εκτός της απόσβεσης που εισάγουν σε μια ζεύξη, προκαλούν και αύξηση της θερμοκρασίας θορύβου της ατμόσφαιρας. Η αύξηση αυτή του ουράνιου θορύβου είναι ιδιαίτερα σημαντική στην περίπτωση επίγειων σταθμών που είναι υποχρεωμένοι να λειτουργούν υπό ιδιαίτερως χαμηλή ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου, όπως είναι οι επίγειοι σταθμοί βαθέως διαστήματος.

Η συνολική θερμοκρασία θορύβου λειτουργίας ενός επίγειου σταθμού αποτελείται από δύο μέρη (Σχέση 2.2). Το πρώτο μέρος αναπαριστά τον κυκλωματικό θόρυβο που οφείλεται στους ενισχυτές ισχύος, τις απώλειες των κυματοδηγών και τη συνολική συμπεριφορά του δέκτη ( $T_{AMW}$ ). Η συνεισφορά του είναι σταθερή. Το δεύτερο μέρος αφορά στο θόρυβο τον οποίο προσλαμβάνει η κεραία λήψης ( $T_{sky}$ ) και εξαρτάται από το περιβάλλον, τις καιρικές συνθήκες και τη γωνία ανύψωσης.

$$T_{op} = T_{AMW} + T_{SKY} \quad (2.2)$$

Ο θόρυβος που προσλαμβάνει η κεραία είναι ατμοσφαιρικός θόρυβος αλλά και θόρυβος λόγω κοσμικής ακτινοβολίας (Σχέση 2.3).

$$T_{sky} = T_{atm} + T_{CMB} \quad (2.3)$$

Εάν είναι γνωστή η συνολική απόσβεση που προκαλούν τα διάφορα ατμοσφαιρικά φαινόμενα σε μια συγκεκριμένη γωνία ανύψωσης, η αντίστοιχη θερμοκρασία θορύβου της ατμόσφαιρας υπολογίζεται ως εξής :

$$T_{atm}(\theta) = T_p \left[ 1 - \frac{1}{L(\theta)} \right], \text{ } ^\circ\text{K} \quad (2.4)$$

όπου  $L(\theta)$  ο παράγοντας απωλειών της ατμόσφαιρας σε γραμμικές μονάδες

$$L(\theta) = 10^{\left[ \frac{A(\theta)}{10} \right]} \quad (2.5)$$

$A(\theta)$  η ατμοσφαιρική απόσβεση για κάθε γωνία ανύψωσης σε dB

$$A(\theta) = 10 \log L(\theta) \quad (\text{dB}) \quad (2.6)$$

$T_p$  η μέση φυσική θερμοκρασία της ατμόσφαιρας, η οποία εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες και την τοποθεσία όπου λειτουργεί ο επίγειος σταθμός. Η θερμοκρασία αυτή είναι μια τυχαία μεταβλητή, για την περιγραφή της οποίας χρησιμοποιείται η αθροιστική της κατανομή (cumulative distribution). Η κατανομή αυτή προσεγγίζεται από τη σχέση

$$T_p = 255 + 25 \times CDF \quad (2.7)$$

Ως CDF εκφράζεται η πιθανότητα η τιμή της μεταβλητής να μην υπερβεί μια συγκεκριμένη στάθμη κατωφλίου, δηλαδή

$$CDF = \Pr[T_p \leq T_{th}].$$

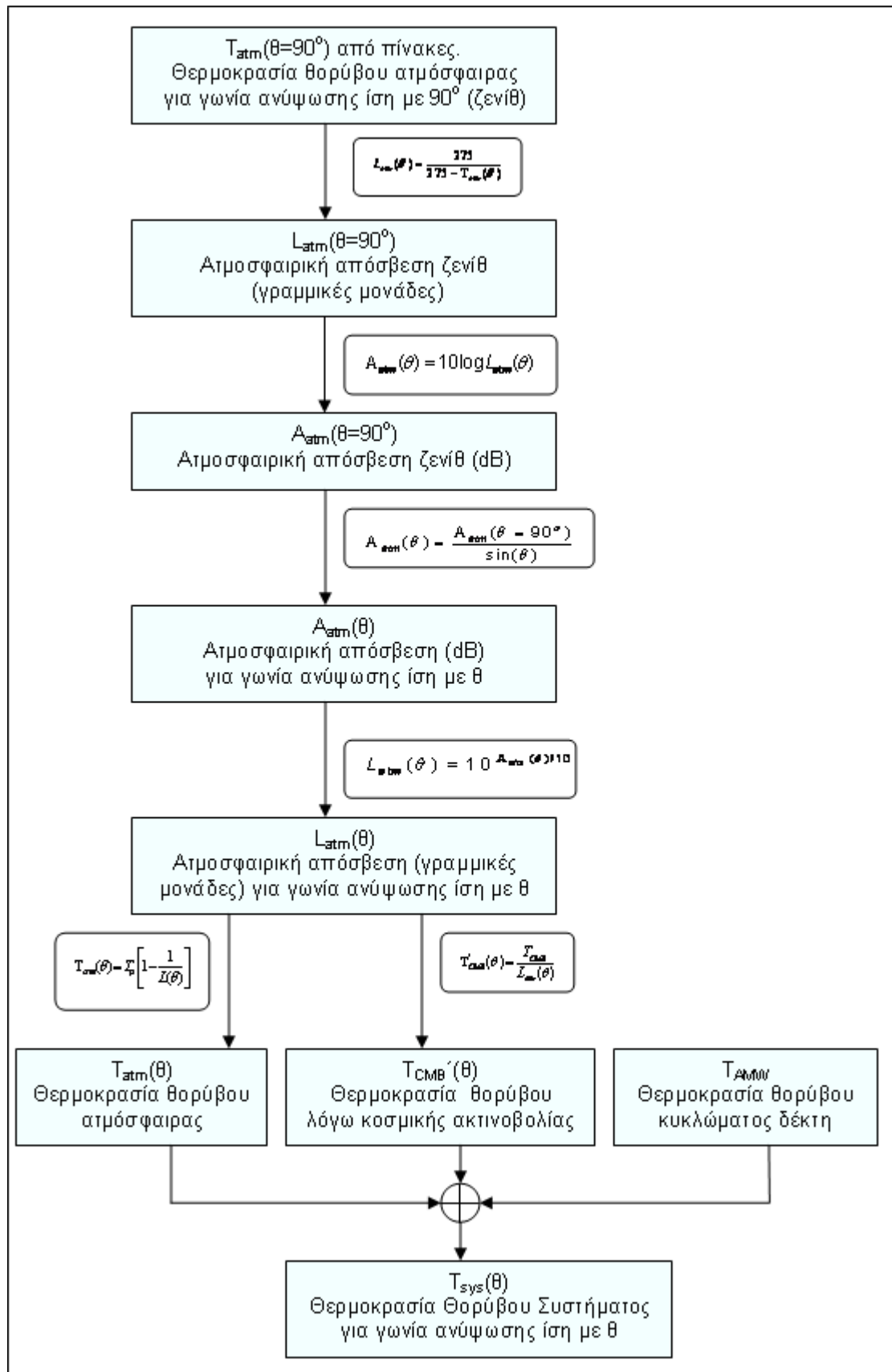
Όσον αφορά στη θερμοκρασία θορύβου λόγω κοσμικής ακτινοβολίας, τυπικές τιμές της αντιστοιχούν σε  $T_{CMB} = 2.725^\circ\text{K}$ . [4] Η ακτινοβολία, όμως, αυτή καθώς οδεύει προς τον δέκτη υφίσταται την αρνητική επίδραση της ατμόσφαιρας και συγκεκριμένα την απόσβεση λόγω ατμοσφαιρικών φαινομένων. Συνεπώς, η πραγματική συνεισφορά της στη θερμοκρασία θορύβου του συστήματος είναι μειωμένη κατά τον παράγοντα ατμοσφαιρικών απωλειών  $L(\theta)$ , όπως παρουσιάζεται στη (2.8).

$$T'_{CMB}(\theta) = \frac{T_{CMB}}{L(\theta)} \quad (2.8)$$

Τελικά, η συνολική θερμοκρασία θορύβου του συστήματος είναι:

$$T_{op}(\theta) = T_{AMW} + T_{SKY} = T_{AMW} + T_{atm}(\theta) + T'_{CMB}(\theta) \quad (2.9)$$

Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας θορύβου του συστήματος για γωνία ανύψωσης ίση με  $\theta$  χρησιμοποιούνται τα δεδομένα των Πινάκων 2.1 και 2.3 για τη θερμοκρασία θορύβου της ατμόσφαιρας. Τα βήματα που ακολουθούνται παρουσιάζονται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 2.2.



Σχ. 2.2 Διάγραμμα ροής υπολογισμού της συνολικής θερμοκρασίας θορύβου του συστήματος για συγκεκριμένη γωνία ανύψωσης.

### 2.3.2 Ατμοσφαιρική Συνεισφορά στην Απόσβεση και τη Θερμοκρασία Θορύβου

Όσον αφορά στις ζεύξεις βαθέως διαστήματος συγκεκριμένα, η επίδραση της ατμόσφαιρας μπορεί να ληφθεί υπόψη με βάση τις διαθέσιμες μετρήσεις για κάθε συγκρότημα βαθέως διαστήματος. Τα σχετικά δεδομένα για τα τρία συγκροτήματα της NASA παρουσιάζονται υπό τη μορφή πινάκων της συνάρτησης αθροιστικής κατανομής (cumulative distribution function, CDF) της θερμοκρασίας θορύβου της ατμόσφαιρας (Πίνακες 2.1 έως 2.3).[5] Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται επίσης γραφικά στα Σχήματα 2.3 έως 2.6. Για παράδειγμα, η τιμή  $CDF=0.90$  χρησιμοποιείται για να δηλώσει ότι για ποσοστό 90% του χρόνου η εκάστοτε μεταβλητή είναι μικρότερη ή ίση μιας δεδομένης τιμής. Πρόκειται δηλαδή για την πιθανότητα μη υπέρβασης της συγκεκριμένης στάθμης θερμοκρασίας. Προφανώς, η συμπληρωματική της πιθανότητα είναι η πιθανότητα υπέρβασης της συγκεκριμένης στάθμης, η οποία είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς αντιστοιχίζεται με την πιθανότητα διακοπής ενός συστήματος (outage probability). Οι τιμές στους πίνακες ταξινομούνται ανά μήνα ενός μέσου έτους, αποτελούν δηλαδή μέσες μηνιαίες κατανομές. Με αυτό τον τρόπο παρουσίασης μπορεί να εξακριβωθεί ποιους μήνες ή εποχές τα υπό μελέτη φαινόμενα είναι πλέον επιβαρυντικά.

CDF	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος
0.00	7.031	7.031	7.031	7.031	7.031	7.031	7.031	7.031
0.10	7.917	8.116	8.715	9.288	10.414	10.847	11.231	11.291
0.20	8.667	8.815	9.499	10.079	11.329	11.929	12.130	12.323
0.25	9.014	9.135	9.848	10.416	11.734	12.397	12.459	12.734
0.30	9.355	9.452	10.212	10.754	12.137	12.817	12.785	13.106
0.40	10.035	10.036	10.897	11.465	12.977	13.632	13.417	13.810
0.50	10.800	10.710	11.589	12.306	13.777	14.377	14.046	14.458
0.60	11.826	11.574	12.346	13.138	14.669	15.209	14.722	15.164
0.70	13.442	12.868	13.480	13.984	15.770	16.223	15.481	16.003
0.80	15.982	15.364	15.723	15.801	17.506	17.338	16.425	16.954
0.85	18.624	18.101	18.211	18.157	19.366	18.012	16.990	17.541
0.90	25.049	25.707	24.508	24.309	24.641	19.004	17.697	18.301
0.92	30.357	32.191	29.500	28.914	29.105	19.764	18.085	18.734
0.93	34.240	36.391	32.975	32.238	32.260	20.299	18.363	19.004
0.94	39.448	41.239	37.239	36.641	36.253	21.150	18.693	19.394
0.95	45.521	47.130	42.834	42.262	41.378	22.593	19.067	19.849
0.96	52.798	54.035	49.709	48.880	48.292	24.545	19.493	20.572
0.97	61.472	62.056	59.116	57.616	56.709	28.512	20.056	21.932
0.98	72.073	74.162	70.976	69.380	69.279	37.615	21.266	24.932
0.99	88.574	102.902	88.910	86.871	93.083	59.247	25.961	35.742

Πιν. 2.1 Αθροιστική Κατανομή της Θερμοκρασίας Θορύβου της Ατμόσφαιρας Μαδρίτη, Ζώνη Ka (°K)

CDF	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	Ελάχιστο	Ετήσια Μέση Τιμή	Μέγιστο
0.00	7.031	7.031	7.031	7.031	7.031	7.031	7.031
0.10	10.753	10.232	8.679	8.434	7.917	9.118	11.291
0.20	11.812	11.481	9.498	9.242	8.667	10.21	12.323
0.25	12.215	11.954	9.857	9.567	9.014	10.692	12.734
0.30	12.618	12.387	10.203	9.877	9.355	11.160	13.106
0.40	13.548	13.277	10.855	10.526	10.035	12.100	13.810
0.50	14.379	14.448	11.660	11.431	10.710	13.065	14.458
0.60	15.217	15.740	12.820	12.605	11.574	14.108	15.740
0.70	16.162	17.427	14.406	14.289	12.868	15.370	17.427
0.80	17.493	21.368	17.194	17.564	15.364	17.106	21.368
0.85	18.493	26.471	20.164	20.586	16.990	18.494	26.471
0.90	19.889	37.624	28.836	27.355	17.697	22.131	37.624
0.92	21.140	45.639	36.525	32.56	18.085	25.817	45.639
0.93	21.973	50.818	41.688	36.413	18.363	28.671	50.818
0.94	23.146	57.229	47.408	41.475	18.693	32.601	57.229
0.95	24.932	64.158	53.424	47.924	19.067	37.982	64.158
0.96	27.620	72.847	60.846	55.300	19.493	45.384	72.847
0.97	32.427	83.872	69.514	64.492	20.056	54.876	83.872
0.98	43.186	100.258	81.000	77.019	21.266	67.778	100.258
0.99	66.313	126.721	100.838	97.609	25.961	89.323	126.721

Πιν. 2.1 (συν.) Αθροιστική Κατανομή της Θερμοκρασίας Θορύβου της Ατμόσφαιρας Μαδρίτη, Ζώνη Ka (°K)

CDF	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος
0.00	6.693	6.693	6.693	6.693	6.693	6.693	6.693	6.693
0.10	7.387	7.489	7.710	7.864	8.286	8.180	8.872	8.905
0.20	7.940	7.959	8.152	8.332	8.795	8.831	9.954	9.833
0.25	8.158	8.157	8.350	8.546	9.034	9.103	10.445	10.241
0.30	8.366	8.378	8.550	8.756	9.257	9.368	10.877	10.660
0.40	8.769	8.826	8.946	9.151	9.697	9.909	11.704	11.705
0.50	9.183	9.228	9.314	9.502	10.132	10.564	12.941	12.893
0.60	9.680	9.690	9.684	9.910	10.659	11.257	14.640	14.075
0.70	10.248	10.309	10.137	10.390	11.357	12.253	16.132	15.403
0.80	11.251	11.317	10.811	10.974	12.351	13.643	17.449	16.749
0.85	12.154	12.175	11.320	11.397	13.040	14.401	18.243	17.743
0.90	13.558	13.781	12.072	11.965	14.022	15.282	19.189	19.068
0.92	14.545	15.132	12.572	12.314	14.560	15.786	19.694	19.621
0.93	15.381	16.440	12.981	12.523	14.928	16.142	20.082	19.969
0.94	16.604	18.169	13.392	12.790	15.523	16.550	20.565	20.416
0.95	18.421	20.574	13.96	13.217	16.311	17.036	21.194	20.903
0.96	21.328	24.083	15.151	13.857	17.522	17.947	22.097	21.567
0.97	25.367	28.690	17.474	15.062	19.256	19.135	23.468	22.566
0.98	32.106	36.676	21.430	17.761	24.107	22.473	26.565	25.128
0.99	47.790	51.483	32.661	26.277	32.206	31.250	34.857	28.622

Πιν. 2.2 Αθροιστική Κατανομή της Θερμοκρασίας Θορύβου της Ατμόσφαιρας Goldstone, Ζώνη Ka (°K)

CDF	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	Ελάχιστο	Ετήσια Μέση Τιμή	Μέγιστο
0.00	6.693	6.693	6.693	6.693	6.693	6.693	6.693
0.10	8.540	8.221	7.713	7.503	7.387	7.919	8.905
0.20	9.164	8.935	8.218	8.013	7.940	8.520	9.954
0.25	9.417	9.194	8.443	8.241	8.157	8.789	10.445
0.30	9.668	9.428	8.686	8.454	8.366	9.045	10.877
0.40	10.211	9.883	9.181	8.847	8.769	9.545	11.705
0.50	10.926	10.371	9.710	9.246	9.183	10.090	12.941
0.60	11.892	10.906	10.285	9.715	9.680	10.771	14.640
0.70	13.096	11.566	11.032	10.446	10.137	11.695	16.132
0.80	14.983	12.545	12.051	11.466	10.811	13.220	17.449
0.85	16.142	13.131	12.853	12.269	11.320	14.425	18.243
0.90	17.405	14.141	13.995	13.473	11.965	16.141	19.189
0.92	18.074	14.788	14.716	14.180	12.314	16.989	19.694
0.93	18.409	15.208	15.262	14.664	12.523	17.519	20.082
0.94	18.780	15.660	15.779	15.456	12.790	18.151	20.565
0.95	19.228	16.207	16.306	16.783	13.217	18.867	21.194
0.96	19.817	16.983	16.972	18.958	13.857	19.763	24.083
0.97	20.679	18.192	18.785	22.478	15.062	21.372	28.690
0.98	22.790	20.924	23.183	28.431	17.761	25.260	36.676
0.99	30.030	29.984	34.996	46.045	26.277	35.311	51.483

Πιν. 2.2 (συν.) Αθροιστική Κατανομή της Θερμοκρασίας Θορύβου της Ατμόσφαιρας Goldstone, Ζώνη Ka (°K)

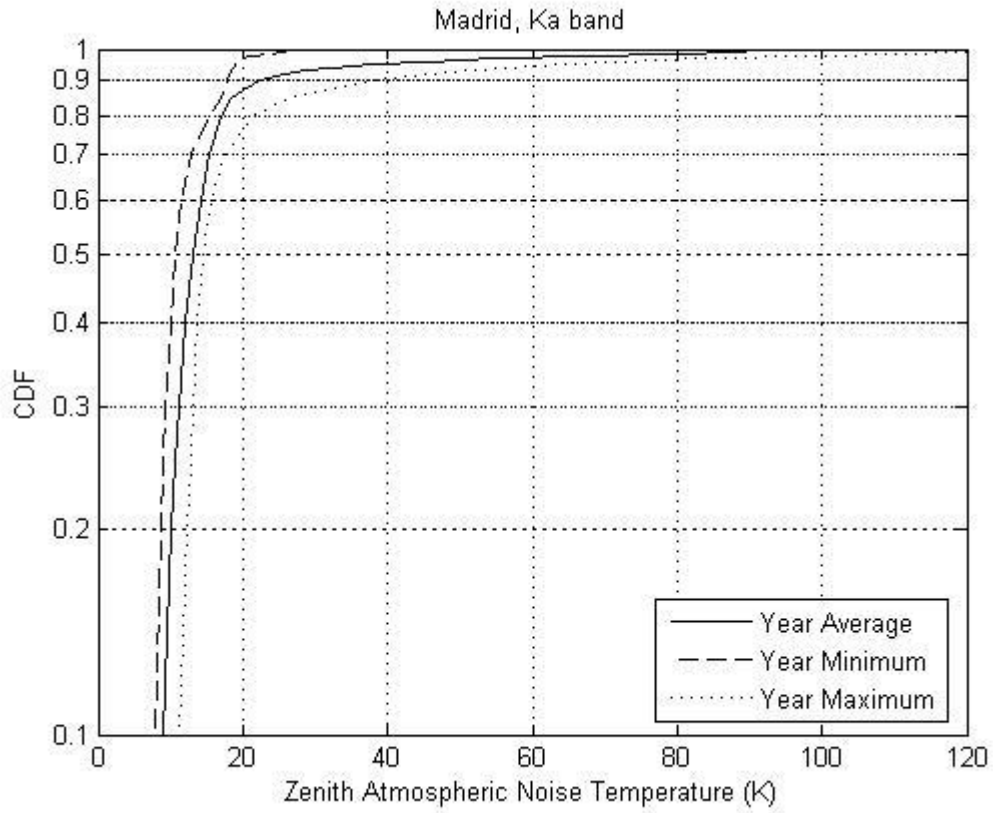


CDF	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος
0.00	7.173	7.173	7.173	7.173	7.173	7.173	7.173	7.173
0.10	11.932	13.702	12.103	10.806	10.396	9.720	9.555	9.472
0.20	13.379	15.336	13.382	11.911	11.104	10.290	10.145	10.017
0.25	13.982	16.057	13.874	12.326	11.398	10.559	10.397	10.244
0.30	14.559	16.792	14.377	12.666	11.677	10.812	10.629	10.478
0.40	15.737	18.113	15.383	13.329	12.210	11.408	11.081	10.952
0.50	16.946	19.422	16.616	14.093	12.748	12.116	11.645	11.422
0.60	18.347	20.852	17.995	15.125	13.339	13.105	12.357	11.988
0.70	20.233	22.675	19.571	16.273	14.200	14.386	13.321	12.794
0.80	22.953	25.872	21.783	17.734	15.807	16.130	14.712	14.084
0.85	24.876	28.734	23.384	18.818	17.227	17.525	15.978	15.200
0.90	27.386	32.908	26.109	20.88	20.040	20.608	18.603	17.451
0.92	30.141	36.204	27.619	22.419	22.231	23.232	20.460	19.389
0.93	31.676	39.029	28.526	23.518	23.714	25.054	21.930	20.920
0.94	33.554	43.699	29.867	25.184	25.461	27.771	23.828	22.814
0.95	36.251	50.110	32.005	27.665	27.765	32.256	26.411	25.598
0.96	40.158	59.425	35.457	31.358	30.918	38.704	30.047	29.793
0.97	48.413	72.023	40.908	35.950	35.556	46.862	35.105	36.687
0.98	64.059	89.600	50.625	44.197	43.945	58.075	44.401	48.510
0.99	89.543	123.144	71.405	61.596	61.418	76.624	60.655	68.451

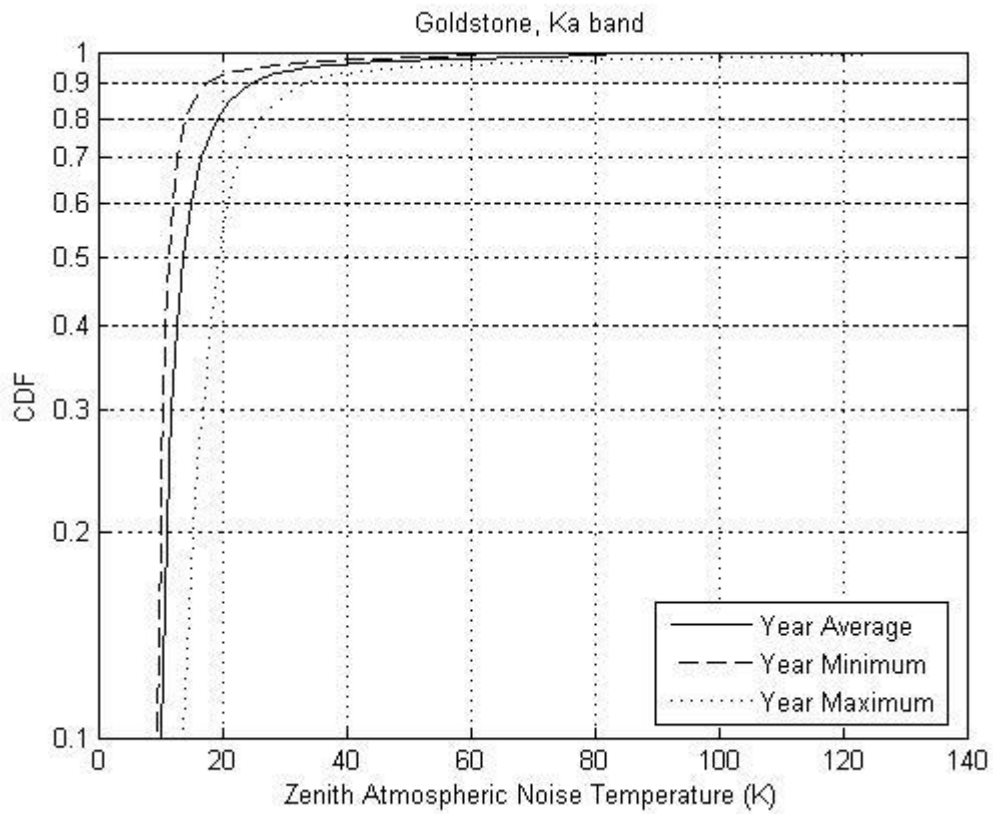
Πιν. 2.3 Αθροιστική Κατανομή της Θερμοκρασίας Θορύβου της Ατμόσφαιρας Canberra, Ζώνη Ka (°K)

CDF	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	Ελάχιστο	Ετήσια Μέση Τιμή	Μέγιστο
0.00	7.173	7.173	7.173	7.173	7.173	7.173	7.173
0.10	9.906	10.060	11.313	11.195	9.472	10.154	13.702
0.20	10.657	10.909	12.326	12.471	10.017	11.041	15.336
0.25	10.967	11.253	12.810	13.004	10.244	11.458	16.057
0.30	11.277	11.596	13.281	13.518	10.478	11.876	16.792
0.40	11.858	12.231	14.262	14.574	10.952	12.761	18.113
0.50	12.497	12.913	15.301	15.726	11.422	13.758	19.422
0.60	13.247	13.671	16.672	17.071	11.988	14.997	20.852
0.70	14.232	14.733	18.582	18.608	12.794	16.695	22.675
0.80	15.728	16.716	21.507	21.263	14.084	19.246	25.872
0.85	17.040	18.539	23.932	23.397	15.200	21.286	28.734
0.90	19.727	21.919	29.017	27.403	17.451	24.618	32.908
0.92	22.033	24.364	33.008	30.198	19.389	26.958	36.204
0.93	23.686	26.255	36.212	32.052	20.920	28.559	39.029
0.94	25.744	28.663	40.003	34.837	22.814	30.702	43.699
0.95	28.746	31.913	44.777	39.182	25.598	33.611	50.110
0.96	33.562	36.578	52.598	45.334	29.793	38.111	59.425
0.97	40.838	43.102	63.667	55.774	35.105	45.608	72.023
0.98	50.787	54.088	78.616	71.380	43.945	58.090	89.600
0.99	74.946	78.153	103.207	98.705	60.655	81.790	123.144

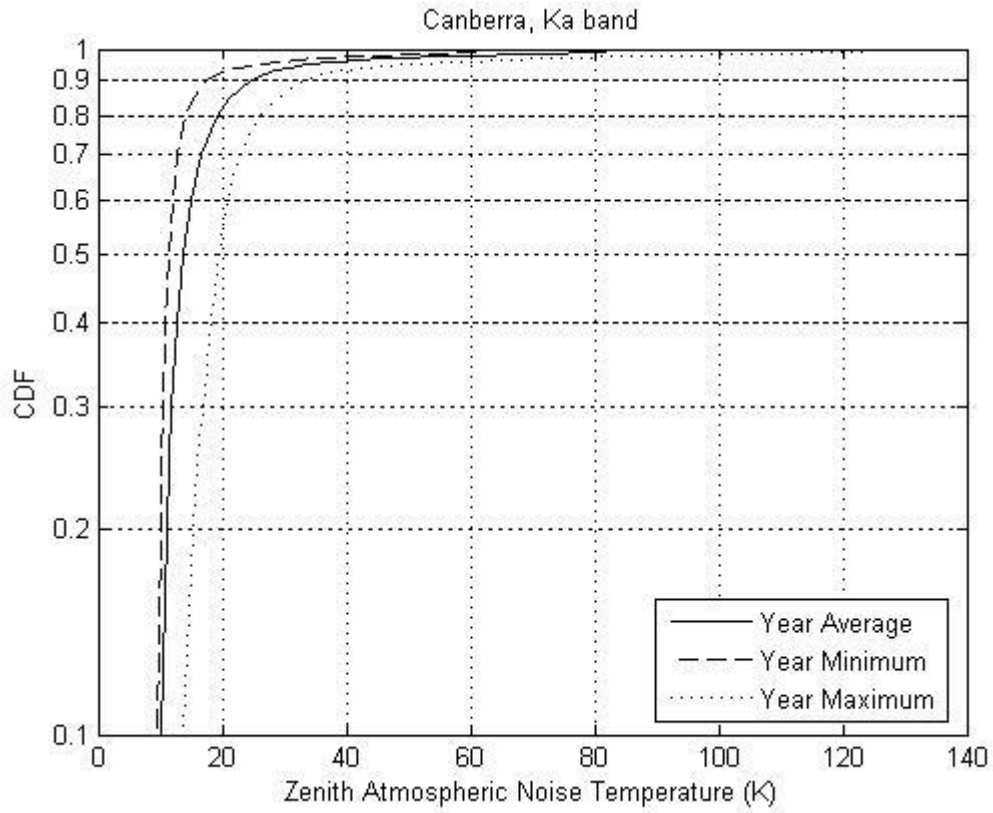
Πιν. 2.3 (συν.) Αθροιστική Κατανομή της Θερμοκρασίας Θορύβου της Ατμόσφαιρας Canberra, Ζώνη Ka (°K)



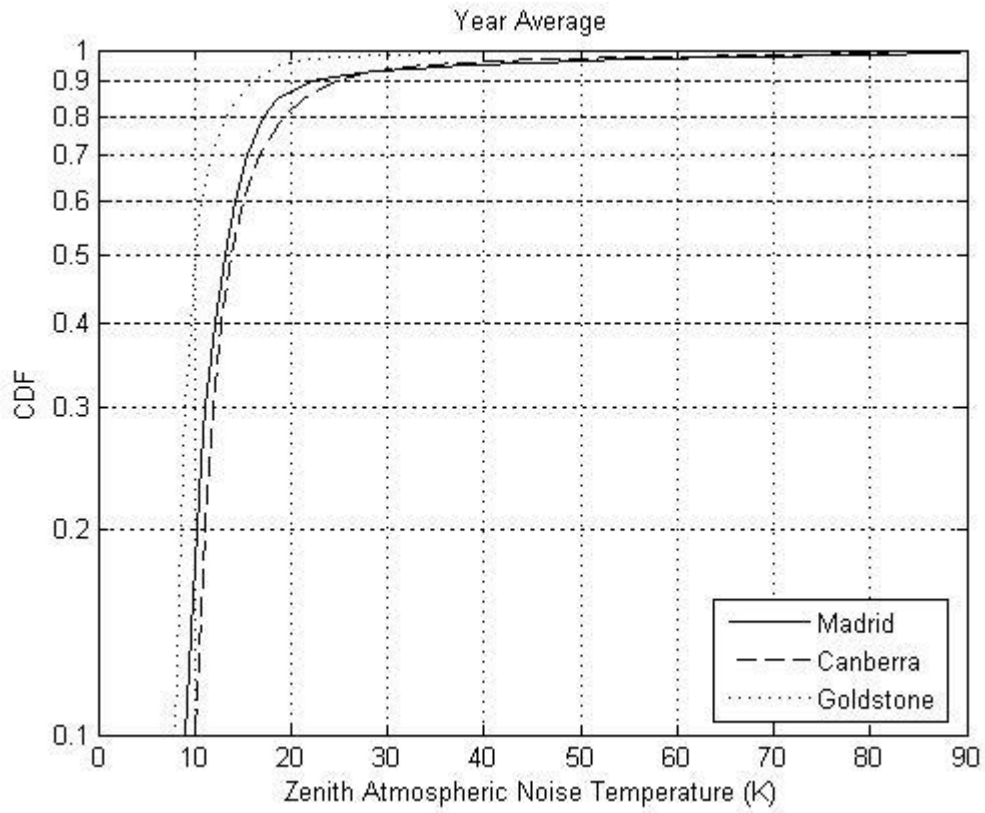
Σχ. 2.3 Αθροιστική κατανομή της θερμοκρασίας θορύβου της ατμόσφαιρας για γωνία ανύψωσης  $\theta=90^\circ$ , Επίγειος Σταθμός Μαδρίτης, Ζώνη Ka.



Σχ. 2.4 Αθροιστική κατανομή της θερμοκρασίας θορύβου της ατμόσφαιρας για γωνία ανύψωσης  $\theta=90^\circ$ , Επίγειος Σταθμός Goldstone, Ζώνη Ka.



Σχ. 2.5 Αθροιστική κατανομή της θερμοκρασίας θορύβου της ατμόσφαιρας για γωνία ανύψωσης  $\theta=90^\circ$ , Επίγειος Σταθμός Canberra, Ζώνη Ka.



Σχ.2.6 Αθροιστική κατανομή της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας θορύβου της ατμόσφαιρας για γωνία ανύψωσης  $\theta=90^\circ$ , Ζώνη Ka.

Με βάση αυτά τα δεδομένα μετρήσεων είναι δυνατό να υπολογιστεί η προσεγγιστική σχέση που συνδέει τη θερμοκρασία θορύβου της ατμόσφαιρας με την αντίστοιχη πιθανότητα υπέρβασης ( $p' = 1 - CDF$ ) για κάθε περίπτωση επίγειου σταθμού. Πρόκειται για μια εκθετική σχέση της μορφής:

$$p' = Ae^{-BT} \quad (2.10)$$

Για τον υπολογισμό των σταθερών A, B της (2.10) γίνεται χρήση των τιμών των Πινάκων 2.1 έως 2.3 και προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις για τη ζώνη συχνοτήτων Ka:

$$p' = 0.806e^{-0.059T} \quad , \text{ επίγειος σταθμός Μαδρίτης} \quad (2.11)$$

$$p' = 1.006e^{-0.0703T} \quad , \text{ επίγειος σταθμός Canberra} \quad (2.12)$$

$$p' = 2.974e^{-0.194T} \quad , \text{ επίγειος σταθμός Goldstone} \quad (2.13)$$

Οι τιμές της θερμοκρασίας θορύβου που περιλαμβάνονται στους ανωτέρω πίνακες αντιστοιχούν σε κάποια τιμή ατμοσφαιρικής απόσβεσης. Η συνεισφορά αυτή της θερμοκρασίας θορύβου της ατμόσφαιρας στις ατμοσφαιρικές απώλειες για δεδομένη γωνία ανύψωσης υπολογίζεται με βάση τη (2.14).

$$L_{atm}(\theta) = \frac{275}{275 - T_{atm}(\theta)} \quad (2.14)$$

Συνεπώς, με βάση τα δεδομένα των Πινάκων 2.1 έως 2.3, μπορούν να υπολογιστούν οι ατμοσφαιρικές απώλειες  $L_{zen} = L_{atm}(\theta = 90^\circ)$  και στη συνέχεια η ατμοσφαιρική απόσβεση  $A_{zen} = A_{atm}(\theta = 90^\circ)$  σε dB (Σχέση 2.6). Στη συνέχεια, ανάλογα με τη γωνία ανύψωσης που ενδιαφέρει, είναι δυνατή η αναγωγή της απόσβεσης που προκύπτει για διαφορετική γωνία ανύψωσης  $A(\theta)$  χρησιμοποιώντας το μοντέλο επίπεδης Γης.

$$A(\theta) = A_{zen} \times AM = \frac{A_{zen}}{\sin(\theta)} \quad (\text{σε dB}) \quad (2.15)$$

όπου  $A_{zen}$  η ατμοσφαιρική απόσβεση στο ζενίθ (γωνία ανύψωσης  $90^\circ$ )

$\theta$  η γωνία ανύψωσης της κεραίας

$$AM \text{ ο αριθμός των αερίων μαζών, } AM = \frac{1}{\sin \theta} \quad (2.16)$$

Ο παράγοντας AM (number of air masses<sup>1</sup>) χρησιμοποιείται για να δηλώσει την εξάρτηση της ατμοσφαιρικής απόσβεσης από τη διαδρομή του H/M κύματος μέσω της ατμόσφαιρας. Η διαδρομή αυτή για γωνία ανύψωσης  $\theta$  ισούται με  $D = \frac{D_{zen}}{\sin \theta}$ , όπου  $D_{zen}$  η διαδρομή που αντιστοιχεί στη γωνία ζενίθ. Αφού η απόσβεση είναι ανάλογη του μήκους της διαδρομής αυτής προκύπτει η (2.15) για την ατμοσφαιρική απόσβεση.

### 2.3.3 Απόσβεση Λόγω Βροχής

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η απόσβεση λόγω βροχόπτωσης αποτελεί τον κύριο επιβαρυντικό παράγοντα κατά τη μετάδοση του σήματος σε ένα σύστημα Επικοινωνιών Βαθέως Διαστήματος. Για τον υπολογισμό της στους επίγειους σταθμούς της Μαδρίτης και της Canberra χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο που περιλαμβάνεται στη σύσταση ITU-R P.618 και παρουσιάζεται αναλυτικά στο Παράρτημα Α. [1] Αν και το μοντέλο αυτό αφορά σε συχνότητες μέχρι 55GHz χρησιμοποιείται εδώ και για τη ζώνη συχνοτήτων W, καθώς ένας θεωρητικός υπολογισμός καθίσταται αναγκαίος απουσία πραγματικών δεδομένων.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με τη μορφή αθροιστικής κατανομής της πιθανότητας υπέρβασης κάθε στάθμης απόσβεσης στον Πίνακα 2.4. Ο υπολογισμός έγινε για γωνία ανύψωσης ίση με  $20^\circ$  και κάθετη πόλωση.

Η πιθανότητα του Πίνακα 2.4 αντιστοιχεί στην πιθανότητα διακοπής (outage probability) του συστήματος και ισούται με 1-CDF, όπου CDF είναι η πιθανότητα μη υπέρβασης μιας στάθμης όπως παρουσιάστηκε στην Ενότητα 2.3.2. Η έννοια της είναι η εξής: όσον αφορά στο συγκρότημα της Μαδρίτης και στη ζώνη Ka η απόσβεση λόγω βροχής θα είναι πάντα τουλάχιστον ίση με 3.4dB ενώ με πιθανότητα 0.1 (ή για ποσοστό του χρόνου ίσο με 10%) θα υπερβαίνει τα 12.9dB.

1. Air mass: Το μήκος της διαδρομής του φωτός από ένα ουράνιο σώμα μέσω της γήινης ατμόσφαιρας σε σχέση με το μήκος που αντιστοιχεί στη γωνία ζενίθ. Χρησιμοποιείται ειδικά για φωτοβολταϊκά, για να δηλώσει τη διαφορά στο ηλιακό φάσμα ανάλογα με τη διαδρομή του φωτός μέσω της ατμόσφαιρας.

Πιθανότητα Υπέρβασης	Madrid		Canberra	
	Ζώνη Ka	Ζώνη W	Ζώνη Ka	Ζώνη W
0.01	33.9	93.6	50.7	135
0.02	26.2	75	43.2	118.5
0.03	22.3	64.8	38.7	108.2
0.05	17.9	53.1	33	94.53
0.1	12.9	39.5	25.7	75.8
0.2	9	28.4	18.9	57.4
0.3	7.1	23.1	15.2	46.5
0.5	5.3	17.5	10.8	34.1
1	3.4	11.7	5.6	18.2

Πιν.2.4 Αθροιστική κατανομή της απόσβεσης λόγω βροχόπτωσης στις ζώνες συχνότητων Ka και W για δύο επίγειους σταθμούς (Μαδρίτη, Canberra).

Παρατηρούμε ότι η απόσβεση λόγω βροχόπτωσης στον επίγειο σταθμό της Canberra είναι μεγαλύτερη από αυτήν στη Μαδρίτη. Επίσης, ιδιαίτερα σημαντικό είναι το γεγονός πως και για τους δύο επίγειους σταθμούς η απόσβεση αυτή τριπλασιάζεται στη ζώνη W σε σχέση με τη ζώνη Ka. Αυτή η επιδείνωση της ατμοσφαιρικής επίδρασης μπορεί να καταστεί καταλυτική για την επίδοση μιας ζεύξης στη ζώνη W σε περίπτωση που δεν αντισταθμίζεται από την αύξηση του κέρδους των κεραιών ή από κάποια προσαρμοστική τεχνική.

## 2.4 Περιβαλλοντικά Φαινόμενα

Στις επικοινωνίες βαθέως διαστήματος σε κάθε σταθμό λήψης εισάγεται επιπρόσθετος θόρυβος ο οποίος δε σχετίζεται με τη διάδοση στην ατμόσφαιρα. Πρόκειται για τη συνεισφορά των διαφόρων ειδών ακτινοβολίας που προέρχονται από το διάστημα και ενδεχομένως προσλαμβάνονται από την κεραία λήψης.



### 2.4.1 Πλανητικός Θόρυβος

Όταν το διαστημικό σκάφος κινείται πλησίον σε κάποιον πλανήτη, προκύπτει μια αύξηση της θερμοκρασίας θορύβου του συστήματος που υπολογίζεται ως εξής:

$$T_{pl} = \left( \frac{T_k G d^2}{16R^2} \right) e^{-2.77 \left( \frac{\omega}{\omega_o} \right)^2}, \text{K} \quad (2.17)$$

όπου  $T_k$  η θερμοκρασία μέλανος σώματος του πλανήτη σε °K

$d$  η διάμετρος του πλανήτη σε km

$R$  η απόσταση του πλανήτη από τη Γη σε km

$\omega$  η γωνιακή απόσταση ανάμεσα στο κέντρο του πλανήτη και το κέντρο του λοβού ακτινοβολίας της κεραίας

$\omega_o$  το εύρος μισής ισχύος της κεραίας

$G$  το ισοδύναμο κέρδος (effective antenna gain) της κεραίας λήψης του επίγειου σταθμού  $[10^{(G(\text{dBi})/10)}]$ . Ισούται με το κέρδος της κεραίας στο κενό μείον την ατμοσφαιρική απόσβεση. Βέβαια, το κέρδος της κεραίας δεν επηρεάζεται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, χρησιμοποιείται όμως εδώ αυτή η έννοια του ισοδύναμου κέρδους για να ληφθεί υπόψη η επίδραση της ατμοσφαιρικής απόσβεσης στη θερμοκρασία θορύβου που αντιλαμβάνεται ο δέκτης.

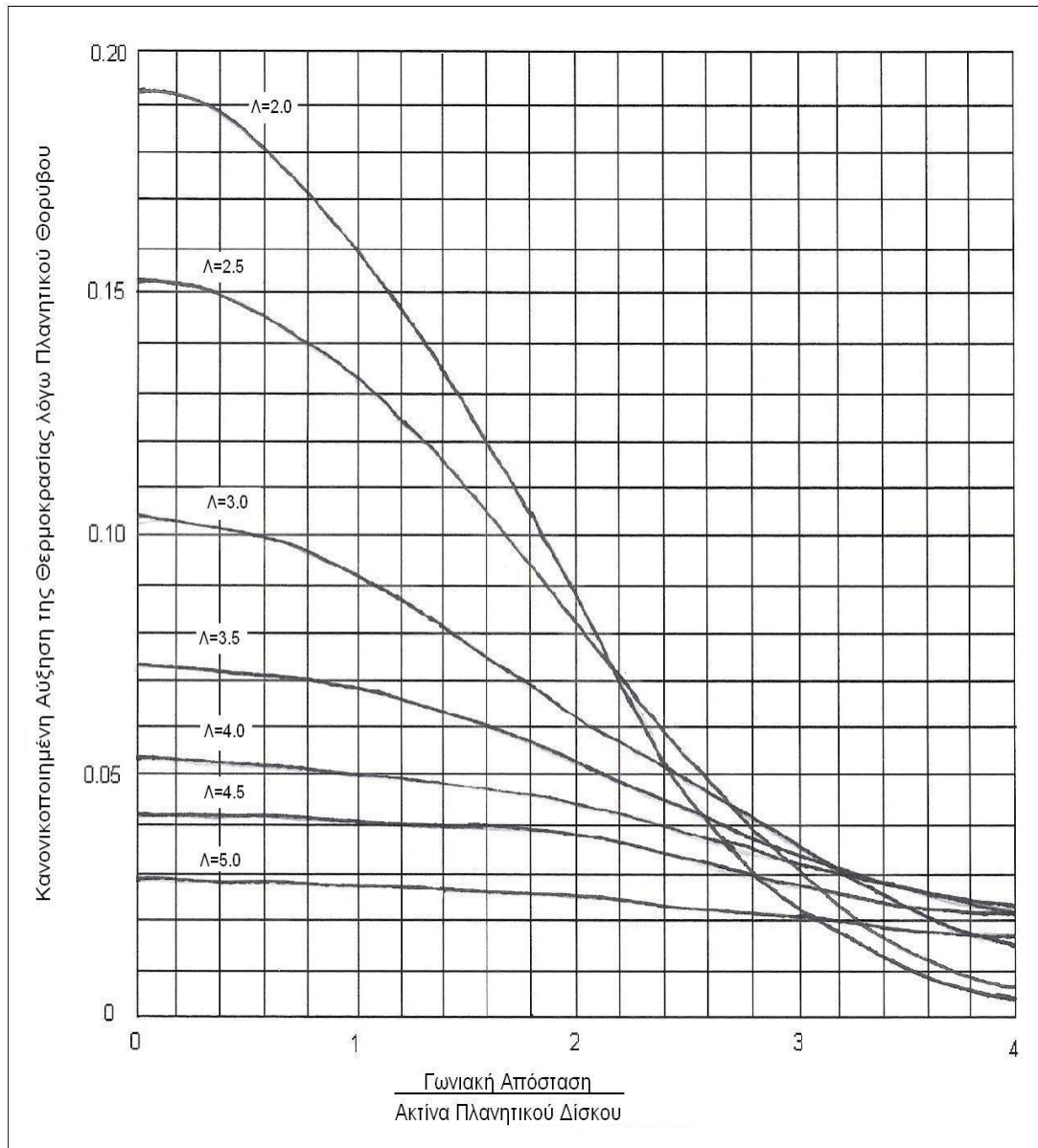
Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζεται η αύξηση της θερμοκρασίας πλανητικού θορύβου για διάφορες τιμές του λόγου Εύρους Μισής Ισχύος προς τη

Γωνιακή Διάμετρο του πλανητικού δίσκου  $\left( \Lambda = \frac{\omega_o}{d_a} \right)$ . Ως γωνιακή διάμετρος

(angular diameter) αναφέρεται το μέγεθος  $d_a = \tan^{-1} \left( \frac{d}{R} \right)$ , όπου  $d$  η διάμετρος

του πλανήτη και  $R$  η απόστασή του από τη Γη. Στον άξονα  $X$  του διαγράμματος παρουσιάζεται η γωνιακή απόσταση  $\omega$  κανονικοποιημένη ως προς την ακτίνα του πλανητικού δίσκου. Το σχήμα αυτό, για παράδειγμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας θορύβου της Αφροδίτης στη ζώνη  $X$  υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Η θερμοκρασία μέλανος σώματος της Αφροδίτης είναι 634°K στη ζώνη  $X$  ενώ η διάμετρός της είναι  $d=12104\text{km}$ . Για απόσταση  $R=47572800\text{km}$  από τη Γη προκύπτει γωνιακή

διάμετρος ίση με  $d_a = \tan^{-1}\left(\frac{d}{R}\right) = 0.0146^\circ$ . Για εύρος μισής ισχύος της κεραίας  $\omega_0 = 0.066^\circ$  προκύπτει λόγος  $\Lambda = 4.521$ . Από το Σχήμα 2.7 προκύπτει ότι ο παράγοντας αύξησης της θερμοκρασίας θα είναι 0.041 για γωνιακή απόσταση  $\omega = 0^\circ$  (μέγιστη αύξηση). Ο παράγοντας αυτός αντιστοιχεί στο ποσοστό της ισχύος της κεραίας που βρίσκεται στο εσωτερικό του πλανητικού δίσκου. Με δεδομένη την τιμή της απόδοσης της κεραίας λήψης, η οποία ισούται με 0.663, υπολογίζεται η τελική αύξηση της θερμοκρασίας θορύβου λόγω του πλανητικού θορύβου της Αφροδίτης:  $T_{Venus} = 634 \times 0.041 \times 0.663 = 17.23K$ . Η θερμοκρασία αυτή μετρήθηκε πειραματικά και βρέθηκε ίση με  $16.18^\circ K$ , δηλαδή ο υπολογισμός μέσω του Σχήματος 2.6 κατέληξε σε μια υπερεκτίμηση του αποτελέσματος κατά 6.5%. Αντίθετα, ο υπολογισμός με βάση τη (2.9) σε αυτήν την περίπτωση δίνει ως αποτέλεσμα θερμοκρασία  $15.30^\circ K$ , δηλαδή 5.4% χαμηλότερη από την τιμή που μετρήθηκε.



Σχ.2.7 Κανονικοποιημένη αύξηση της θερμοκρασίας πλανητικού θορύβου για λόγους Εύρους μισής ισχύος προς Διάμετρο πλανητικού δίσκου από 2.0 έως 5.0

Στον Πίνακα 2.5 παρουσιάζονται οι παράμετροι για τον υπολογισμό του πλανητικού θορύβου. [4]

Πλανήτης	Διάμετρος Πλανήτη (km)	Μέση Απόσταση από τη Γη (10 <sup>6</sup> km)		Θερμοκρασία Μέλανος Σώματος (°K)	T <sub>planet</sub> στην ελάχιστη απόσταση		
					Ζώνη X		Ζώνη Ka
		Ελάχιστη	Μέγιστη		70m (G=74.4dBi)	34m (G=68.3dBi)	34m (G=78.8dBi)
Ερμής	4880	91.7	207.5	625	3.05	0.75	8.39
Αφροδίτη	12104	41.4	257.8	634 (ζώνη X) 472 (ζώνη Ka)	93.29 -	22.90 -	- 191.28
Γη	12757	-	-	250-300	-	-	-
Άρης	6794	78.3	377.5	180	2.33	0.57	6.43
Δίας	142984	628.7	927.9	152	13.53	3.32	37.27
Κρόνος	120536	1279.8	1579.0	155	2.37	0.58	6.52
Ουρανός	51118	2721.4	3020.6	160	0.10	0.02	0.27
Ποσειδώνας	49532	4354.4	4653.6	160	0.04	0.01	0.10
Πλούτωνας	2274	5763.9	6063.1	160	0.00	0.00	0.00

Πιν. 2.5 Παράμετροι υπολογισμού της θερμοκρασίας θορύβου των πλανητών του ηλιακού μας συστήματος.

### 2.4.2 Σεληνιακός Θόρυβος

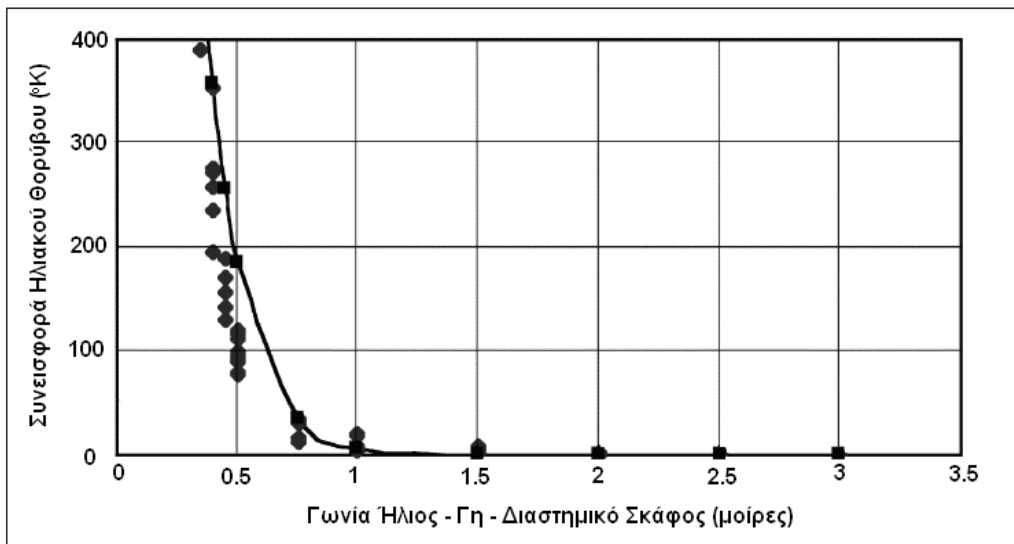
Για κεραιές με στόχευση προς την κατεύθυνση της Σελήνης θα πρέπει να πραγματοποιηθεί ένας αντίστοιχος υπολογισμός για τον υπολογισμό του σεληνιακού θορύβου. Η θερμοκρασία μέλανος σώματος της Σελήνης είναι περίπου 240°K στις ζώνες συχνοτήτων X και Ka και 220°K στη ζώνη S, ενώ η γωνιακή διάμετρός της είναι περίπου  $d_a=0.5^\circ$ . Για όλες της κεραιές του δικτύου DSN της NASA, όταν στοχεύουν στη Σελήνη, πάνω από το 90% της ισχύος είναι στο εσωτερικό του σεληνιακού δίσκου και η μέγιστη θερμοκρασία θορύβου που εισέρχεται στο δέκτη υπολογίζεται από την προσεγγιστική σχέση

$$T_{moon} = T_b \times 0.90 \times \eta_{ant} \quad (2.18)$$

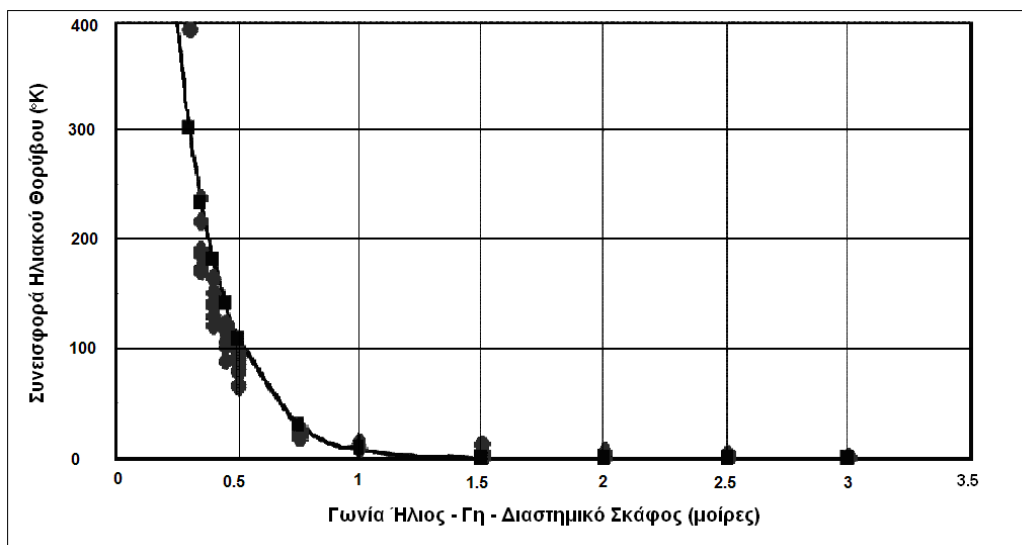
όπου  $T_b=240^\circ\text{K}$  και  $\eta_{ant}$  ο συντελεστής απόδοσης της κεραιάς (περίπου 0.70). Επομένως, η μέγιστη συνεισφορά της σεληνιακής ακτινοβολίας για τις περισσότερες κεραιές θα είναι περίπου 150°K.

### 2.4.3 Ηλιακός θόρυβος

Όταν ένα διαστημικό σκάφος βρεθεί σε μικρή γωνιακή απόσταση σε σχέση με τον ήλιο προκαλείται μια αύξηση της θερμοκρασίας θορύβου λειτουργίας του συστήματος, η οποία οφείλεται στην ηλιακή ακτινοβολία. Η αύξηση αυτή εξαρτάται από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στη συχνότητα λήψης καθώς και από τη θέση του ήλιου σε σχέση με το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραιάς. Στα Σχήματα 2.8 και 2.9 παρουσιάζεται η αύξηση της θερμοκρασίας θορύβου συναρτήσει της γωνιακής απόστασης όπως καταγράφηκε από μετρήσεις σε κεραιά 34m. [4]



Σχ.2.8 Συνεισφορά ηλιακού θορύβου στη θερμοκρασία θορύβου συναρτήσει της γωνιακής απόστασης από το κέντρο του ηλιακού δίσκου (Ζώνη X, Επίγειος Σταθμός DSS13, Μάρτιος 1996).



Σχ.2.9 Συνεισφορά ηλιακού θορύβου στη θερμοκρασία θορύβου συναρτήσει της γωνιακής απόστασης από το κέντρο του ηλιακού δίσκου (Ζώνη Ka, Επίγειος Σταθμός DSS13, Μάρτιος 1996).

Το άνω φράγμα της θερμοκρασίας θορύβου λόγω της ηλιακής δραστηριότητας υπολογίζεται σε αυτήν την περίπτωση από τις ακόλουθες σχέσεις, ανάλογα με τη ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας.

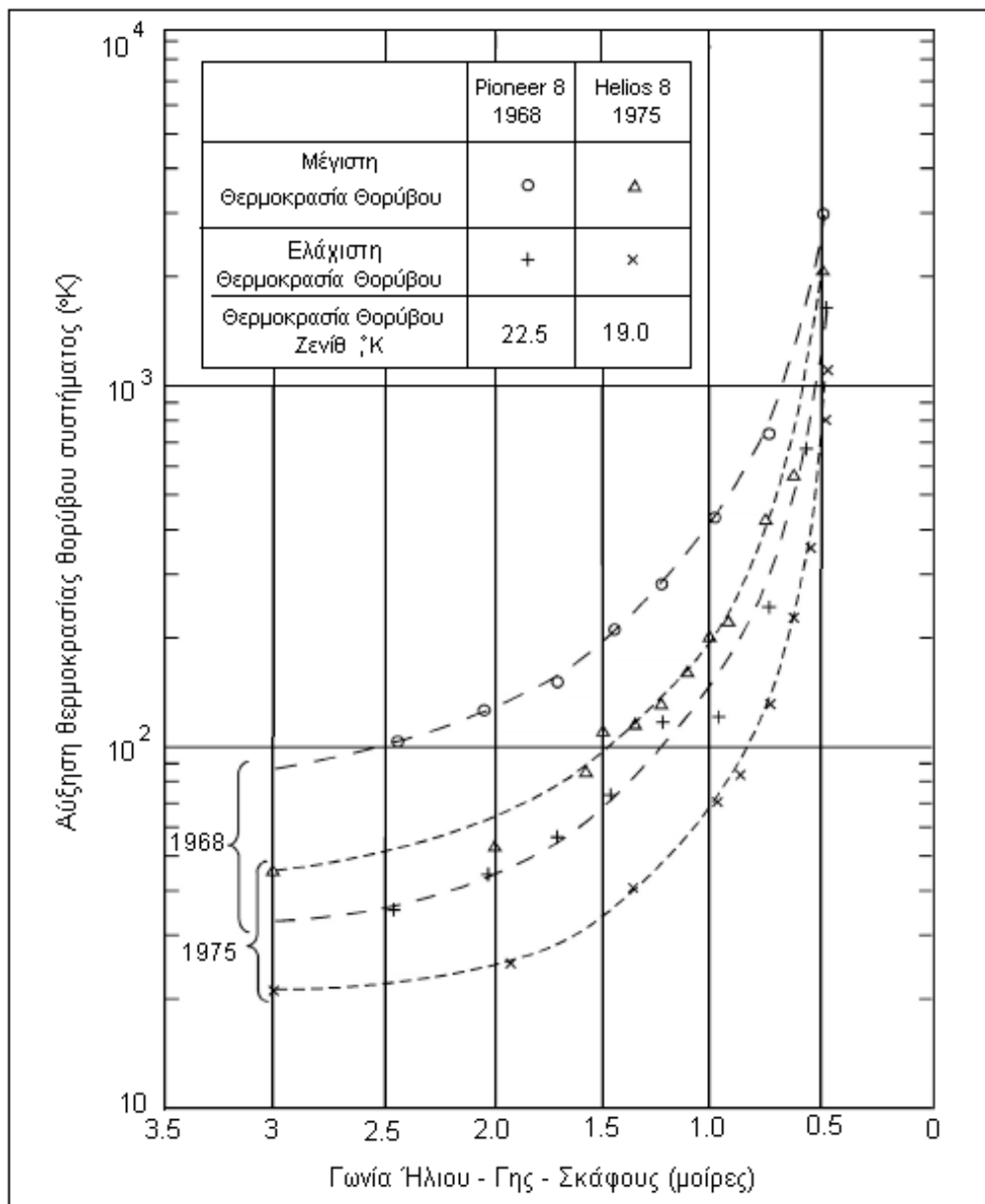
$$T_{sun} = \begin{cases} 1400e^{-5.1\varphi}, 0.35^\circ < \varphi < 0.75^\circ \\ 86e^{-1.4\varphi}, \varphi > 0.75^\circ \end{cases} \quad \text{στη ζώνη X} \quad (2.19)$$

$$T_{sun} = \begin{cases} 5000e^{-6.6\varphi}, 0.35^\circ < \varphi < 0.75^\circ \\ 100e^{-1.4\varphi}, \varphi > 0.75^\circ \end{cases} \quad \text{στη ζώνη Ka} \quad (2.20)$$

Η γωνία  $\varphi$  είναι η γωνιακή απόσταση μεταξύ του κέντρου του λοβού ακτινοβολίας και του κέντρου του ηλιακού δίσκου σε μοίρες. Για γωνίες μικρότερες των  $0.35^\circ$  η συνεισφορά του σεληνιακού θορύβου ενδέχεται να ξεπερνά τους  $300^\circ\text{K}$ . Για γωνίες μεγαλύτερες των  $4^\circ$  η αντίστοιχη συνεισφορά είναι αμελητέα.

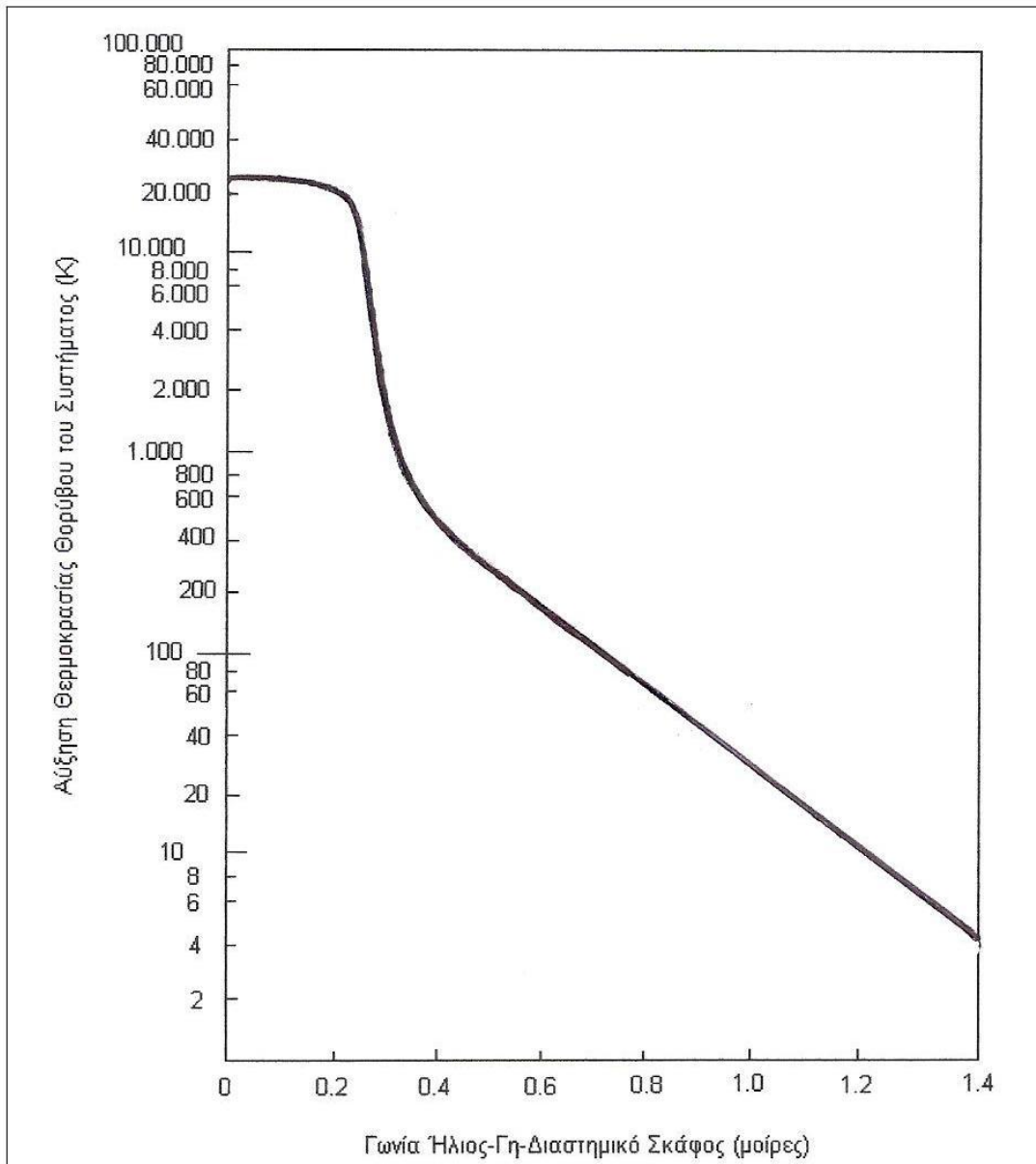
Στο Σχήμα 2.10 παρουσιάζεται η θερμοκρασία θορύβου συστήματος στη Ζώνη S. Οι τιμές προκύπτουν από μετρήσεις που έγιναν σε κεραία 64m που παρακολουθούσε αρχικά το διαστημικό σκάφος Pioneer 8 (Νοέμβριος 1968, κοντά στο ηλιακό μέγιστο) και στη συνέχεια το σκάφος Helios (Απρίλιος 1975, κοντά στο ηλιακό ελάχιστο). Παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία θορύβου είναι μεγαλύτερη πλησιέστερα προς το ηλιακό μέγιστο καθώς τότε η ηλιακή δραστηριότητα είναι αυξημένη. Επίσης, μια αύξηση της γωνιακής απόστασης κατά  $2.5^\circ$  έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της θερμοκρασίας θορύβου κατά δύο τάξεις μεγέθους.

Στο Σχήμα 2.11 παρουσιάζεται μια θεωρητική καμπύλη της θερμοκρασίας θορύβου για κεραία 70m στη ζώνη X. Για τον υπολογισμό της θεωρήθηκε ότι η θερμοκρασία μέλανος σώματος του Ήλιου στη ζώνη X είναι περίπου  $23000^\circ\text{K}$ , τιμή που αντιπροσωπεύει έναν μέσο όρο για τον ηλιακό κύκλο.



Σχ.2.10 Θερμοκρασία θορύβου συστήματος στη ζώνη S για κεραία 70m και σκάφος κοντά στον Ήλιο (με βάση μετρήσεις σε κεραία 64m).





Σχ.2.11 Αύξηση θερμοκρασίας θορύβου για κεραία 70m στη ζώνη συχνοτήτων X ως συνάρτηση της γωνίας Ήλιος – Γη – Διαστημικό Σκάφος, θερμοκρασία ηλιακού δίσκου 23000K.

#### 2.4.4 Γαλαξιακός Θόρυβος

Ένα διαστημικό σκάφος μπορεί κάποια στιγμή να βρεθεί σε μικρή γωνιακή απόσταση από το κέντρο του γαλαξία. Για τη ζώνη συχνοτήτων  $S$  αυτό το γεγονός προκαλεί μια αύξηση της θερμοκρασίας θορύβου κατά  $10^{\circ}\text{K}$ . Σε συχνότητες άνω των  $10\text{GHz}$  η επίδραση του γαλαξιακού θορύβου είναι αμελητέα.

#### 2.4.5 Συνολική θερμοκρασία θορύβου συστήματος

Μετά τα παραπάνω, γίνεται φανερό πως στην περίπτωση των ζεύξεων βαθέως διαστήματος η θερμοκρασία θορύβου του συστήματος ενδέχεται να αυξηθεί λόγω των περιβαλλοντικών φαινομένων που αναφέρθηκαν . Ανάλογα με την περίπτωση, ένα ή περισσότερα από αυτά τα φαινόμενα μπορεί να λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα και η επίδραση του καθενός θα πρέπει να προστεθεί στη θερμοκρασία θορύβου που υπολογίζεται από τη (2.9) για τον υπολογισμό της συνολικής θερμοκρασίας θορύβου του συστήματος.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] “Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems”, Rec. ITU-R P.618-10.
- [2] “Attenuation due to clouds and fog”, Rec. ITU-R P.840.
- [3] “Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων σε Γήινο Περιβάλλον”, Ι.Δ.Κανελλόπουλος, Εκδόσεις Τζιόλας, 2006.
- [4] “Attenuation by atmospheric gases”, Rec. ITU-R P.676.
- [5] “Atmospheric and Environmental Effects”, 105, Rev.C.  
DSN Telecommunications Link Design Handbook. August 1, 2009.



## Κεφάλαιο Τρίτο:

### Ισολογισμός Ισχύος Αποστολών Βαθέως Διαστήματος στις Ζώνες Συχνοτήτων Ka και W.

#### 3.1 Εισαγωγή

Στα Κεφάλαια 1 και 2 της παρούσας διπλωματικής αναλύθηκαν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν οι Επικοινωνίες Βαθέως Διαστήματος καθώς και οι τάσεις για τη μελλοντική τους εξέλιξη. Όπως έχει αναφερθεί, στην παρούσα εργασία εξετάζονται τα ενδεχόμενα οφέλη από τη μετάβαση σε υψηλότερες συχνότητες και συγκεκριμένα στη ζώνη W (90GHz). Τέτοια οφέλη είναι η αύξηση του διαθέσιμου φάσματος και του ρυθμού μετάδοσης που μπορεί να επιτευχθεί. Παράλληλα, όμως, τα διάφορα ατμοσφαιρικά φαινόμενα έχουν δυσμενέστερη επίδραση καθώς η συχνότητα αυξάνεται. Ειδικά η απόσβεση λόγω βροχής, η οποία είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας επιβάρυνσης στη ζώνη συχνοτήτων Ka, αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά κατά τη λειτουργία στη ζώνη W.

Στο παρόν κεφάλαιο επιχειρείται μια ρεαλιστική εκτίμηση της επίδοσης συγκεκριμένων ζεύξεων βάθους διαστήματος στις ζώνες συχνοτήτων Ka και W με τελικό στόχο τον υπολογισμό μεγεθών σηματοθορυβικού λόγου (Signal to Noise Ratio, SNR) στον επίγειο δέκτη του DSN, δηλαδή του ισοζυγίου ισχύος (link budget) της ζεύξης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται δεδομένα που αφορούν δύο από τους επίγειους σταθμούς της NASA καθώς και δεδομένα από πραγματικές διαστημικές αποστολές.

Συγκεκριμένα, δύο κύριοι φορείς της διαστημικής έρευνας, η NASA και ο οργανισμός ESA, διαθέτουν μεταξύ άλλων επίγειους σταθμούς στην Ισπανία και την Αυστραλία. Συνεπώς, και με τη βοήθεια των διαθέσιμων δεδομένων για τη θερμοκρασία θορύβου της ατμόσφαιρας των επίγειων σταθμών της NASA υπολογίζεται στο κεφάλαιο αυτό το SNR για την περίπτωση της Μαδρίτης και της Canberra.

Εξάλλου, για τα διαστημικά σκάφη χρησιμοποιούνται στοιχεία από τις εξής αποστολές:

- Mars Reconnaissance Orbiter - NASA (εξερεύνηση του πλανήτη Άρη),
- Venus Express - ESA (εξερεύνηση του πλανήτη Αφροδίτη) και
- BepiColombo ESA/JAXA (εξερεύνηση του πλανήτη Ερμή).

Οι αποστολές αυτές συζητούνται στην Ενότητα 3.2.2.

Τέλος, ας σημειωθεί ότι τα διαθέσιμα δεδομένα για τη ζώνη Ka είναι αρκετά ακριβή καθώς η συγκεκριμένη ζώνη βρίσκεται ήδη σε χρήση για Επικοινωνίες Βαθέως Διαστήματος. Αντίθετα, για τη ζώνη W δεν υπάρχουν διαθέσιμα πραγματικά δεδομένα, επομένως, σε πολλές περιπτώσεις υπεισέρχονται απλουστευτικές προσεγγίσεις με γνώμονα την αντικειμενική αναπαράσταση των αναμενόμενων συνθηκών λειτουργίας στη νέα αυτή ζώνη συχνοτήτων.

### 3.2 Στοιχεία Αποστολών

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα χαρακτηριστικά των συστημάτων βάθους διαστήματος που θα χρησιμοποιηθούν στα αριθμητικά αποτελέσματα που ακολουθούν. Για την κατάστρωση του ισολογισμού ισχύος μιας ζεύξης (link budget) εμπλέκονται διάφορα μεγέθη όπως ισχύς εκπομπής, απόδοση και κέρδος κεραιών πομπού και δέκτη, ενδεχόμενες επιπρόσθετες απώλειες συστήματος (πχ. απώλειες κυματοδηγών, απώλειες στόχευσης, ατμοσφαιρικές απώλειες).

#### 3.2.1 Επίγειοι Σταθμοί

Για τον υπολογισμό του λόγου SNR υποθέτουμε κεραιές επίγειου σταθμού με διάμετρο 34m και 70m. Για την απόδοση όλων των κεραιών χρησιμοποιείται η τιμή 0.6 σε αμφότερες τις ζώνες συχνοτήτων Ka και W. Η τιμή αυτή δεν επιτυγχάνεται στα 90GHz με τις σύγχρονες κεραιές, επιλέγεται όμως εδώ για τους ακόλουθους λόγους. Πρώτον, αναμένεται μια βελτίωση του εξοπλισμού στη ζώνη W καθώς θα αυξάνεται το ενδιαφέρον για την αξιοποίησή της. Δεύτερον, το ενδιαφέρον στην παρούσα διπλωματική εστιάζεται στον εντοπισμό των ενδεχόμενων μη τεχνολογικών περιορισμών στην επίδοση της ζώνης W, όπως ενδεχομένως είναι η επίδραση των

ατμοσφαιρικών φαινομένων. Συνεπώς, επιλέγουμε μια δίκαιη σύγκριση με τη ζώνη Ka.

Για τις κεραιές 34m στη ζώνη Ka το κέρδος είναι 76.7dB [1] ενώ για τις κεραιές 70m είναι 84dBi. [2] Για τον υπολογισμό του κέρδους παραβολικών κεραιών στην κατεύθυνση μεγίστου χρησιμοποιείται η προσεγγιστική σχέση

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

όπου  $\lambda$  το μήκος κύματος.

Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζονται συγκεντρωμένα στον Πίνακα 3.1.

Διάμετρος Κεραίας $D_r$ (m)	Κέρδος Κεραίας $G_r$ (dBi)		Απόδοση Κεραίας $\eta_r$
	Ζώνη Ka	Ζώνη W	
34	76.7	84.7	0.6
70	84	96.4	

Πιν. 3.1 Χαρακτηριστικά κεραιών επίγειων σταθμών

Ας σημειωθεί ότι για τους περαιτέρω υπολογισμούς θεωρείται πως το διαστημικό σκάφος είναι μόνιμα συνδεδεμένο με τον εκάστοτε επίγειο σταθμό. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει στην πραγματικότητα, καθώς η σχετική κίνηση του σκάφους και της Γης έχει ως αποτέλεσμα να μην υπάρχει πάντα ορατή ζεύξη με έναν συγκεκριμένο επίγειο σταθμό. Τότε, την επικοινωνία με το διαστημικό σκάφος αναλαμβάνει άλλος επίγειος σταθμός, ο οποίος διαθέτει οπτική επαφή με το διαστημικό σκάφος. Για το λόγο αυτό, η NASA και η ESA διαθέτουν επίγειους σταθμούς που απέχουν κατά γεωγραφικό μήκος περίπου  $120^\circ$  μεταξύ τους (Αμερική, Ισπανία, Αυστραλία) και καλύπτουν την περιφέρεια της Γης ώστε πάντοτε ένας από αυτούς να μπορεί να επικοινωνήσει με το διαστημικό σκάφος. Για να μπορεί ο επίγειος σταθμός να παρακολουθεί την κίνηση του διαστημικού σκάφους χρησιμοποιεί ένα σύστημα αυτόματης παρακολούθησης τροχιάς (automatic tracking system). Μέσω του συστήματος αυτού ο επίγειος σταθμός γνωρίζει ανά πάσα στιγμή το διάνυσμα κατάστασης (θέση και ταχύτητα) του σκάφους.

### 3.2.2 Διαστημικά Σκάφη

#### Mars Reconnaissance Orbiter (MRO)

Η συγκεκριμένη διαστημική αποστολή πραγματοποιείται υπό την αιγίδα της NASA και το διαστημικό σκάφος MRO βρίσκεται σε τροχιά γύρω από τον Πλανήτη Άρη από το 2005 έως σήμερα. Το τηλεπικοινωνιακό σύστημα του σκάφους διαθέτει ικανότητα λειτουργίας σε δύο ζώνες συχνοτήτων, X και Ka. Όσον αφορά στη ζώνη X, ο ενισχυτής του σκάφους διαθέτει ισχύ 100W ενώ στη ζώνη Ka χρησιμοποιείται ενισχυτής ισχύος 35W. Το σκάφος διαθέτει μια παραβολική κεραία 3m, κέρδους 59.6dB, καθώς και δύο μικρότερες εφεδρικές κεραίες που χρησιμοποιούνται για επικοινωνία μικρότερου ρυθμού μετάδοσης. Το υποσύστημα επικοινωνιών επιτυγχάνει ρυθμό μετάδοσης 6Mbps όταν το σκάφος βρίσκεται σε απόσταση 100 εκατομμυρίων χιλιομέτρων από τη Γη. [3]

#### Venus Express

Η αποστολή Venus Express ξεκίνησε το 2005 ως η πρώτη προσπάθεια του οργανισμού ESA για την εξερεύνηση της Αφροδίτης. Το διαστημικό σκάφος διαθέτει ενισχυτή 65W και μία κύρια κεραία διαμέτρου 1.3m για λειτουργία στις ζώνες X και S. Επίσης, διαθέτει μια κεραία διαμέτρου 0.3m που λειτουργεί στη ζώνη X καθώς και δύο ομοιοκατευθυντικές κεραίες που λειτουργούν στη ζώνη S. Ο μέσος ρυθμός μετάδοσης που επιτυγχάνεται είναι 17kbps. [4]

#### BepiColombo

Η αποστολή αυτή στον πλανήτη Ερμή αποτελεί μια κοινή προσπάθεια των οργανισμών ESA και JAXA (Ιαπωνική Εταιρεία Εξερεύνησης του Διαστήματος), η οποία αναμένεται να εκκινήσει το 2014. Στην αποστολή αυτή συμμετέχει το διαστημικό σκάφος Mercury Planetary Orbiter (MPO). Το διαστημικό σκάφος MPO θα χρησιμοποιεί τις ζώνες X και Ka και θα διαθέτει ισχύ 20W στην έξοδο του ενισχυτή. Θα είναι εφοδιασμένο με μια κεραία διαμέτρου 1.5m με κέρδος 39.5dB<sub>i</sub> στη ζώνη Ka. [5]



Για τον υπολογισμό του κέρδους των κεραιών, όπου χρειάζεται, χρησιμοποιείται η (3.1). Έτσι προκύπτουν όλα τα κέρδη για τη ζώνη W, αφού η συγκεκριμένη ζώνη δεν χρησιμοποιείται από κανένα μεταξύ των υπό μελέτη διαστημικών σκαφών.

Τα στοιχεία των κεραιών παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2. Ας σημειωθεί ότι ως ισχύς εκπομπής αναφέρεται η ισχύς στην έξοδο του ενισχυτή ισχύος του πομπού. Θεωρούμε την ίδια τιμή της ισχύος και για τις δύο ζώνες συχνοτήτων.

Παράμετροι	MRO		Venus Express		BepiColombo	
	Ζώνη Ka	Ζώνη W	Ζώνη Ka	Ζώνη W	Ζώνη Ka	Ζώνη W
Ισχύς Εκπομπής $P_t$ (W)	35		65		20	
Απόδοση Ενισχυτή	0.48	0.3	0.48	0.3	0.48	0.3
Διάμετρος Κεραίας $D_t$ (m)	3		1.3		1.5	
Απόδοση Κεραίας $\eta_t$	0.6		0.6		0.6	
Κέρδος Κεραίας $G_t$ (dBi)	59.6	67.6	52.78	61.77	39.5	63.09

Πιν. 3.2 Χαρακτηριστικά διαστημικών σκαφών για τρεις διαστημικές αποστολές.

### 3.3 Ισολογισμός Ισχύος

Για τον υπολογισμό του λόγου SNR της ζεύξης downlink υπό συνθήκες καθαρού ουρανού (clear sky) χρησιμοποιούνται τα στοιχεία των Πινάκων 3.1 και 3.2.

Αρχικά υπολογίζονται οι απώλειες ελευθέρου χώρου για κάθε αποστολή σε κάθε μια από τις δύο ζώνες συχνοτήτων που μας ενδιαφέρουν. Γίνεται χρήση της (3.2), όπου  $f$  η συχνότητα σε MHz και  $d$  η απόσταση σε km.

$$FSL = 20 \log f + 20 \log d + 32.45 \quad (\text{σε dB}) \quad (3.2)$$

Για τη σχεδίαση υπό την υπόθεση της πλέον απαισιόδοξης περίπτωσης χρησιμοποιείται για κάθε διαστημική αποστολή η μέση μέγιστη απόσταση του πλανήτη από τη Γη. Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τους τρεις πλανήτες – Άρης, Αφροδίτη και Ερμής – και για τις δύο ζώνες συχνοτήτων Ka και W.

Πλανήτης	Μέση Μέγιστη Απόσταση (10 <sup>6</sup> km)	Απώλειες Ελευθέρου Χώρου FSL (dB)	
		Ζώνη Ka	Ζώνη W
Άρης	377.5	294.09	302.05
Αφροδίτη	257.8	290.78	298.74
Ερμής	207.5	288.89	296.85

Πιν. 3.3 Απώλειες ελευθέρου χώρου για τους πλανήτες Άρη, Αφροδίτη και Ερμή που αντιστοιχούν στη μέση μέγιστη απόσταση από τη Γη.

Ο λόγος SNR καθαρού ουρανού ( $SNR_{cs}$ ) υπολογίζεται ως εξής:

- Αρχικά υπολογίζεται η ισοδύναμη ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύς (EIRP) από τον διαστημικό σταθμό.

$$EIRP = 10\log P_t + 10\log \eta_t + G_t \quad (\text{dBW}) \quad (3.3)$$

- $P_t$  η ισχύς εκπομπής του διαστημικού σκάφους (W)
- $G_t$  το κέρδος της κεραίας του διαστημικού σκάφους (dBi)
- $\eta_t$  ο συντελεστής απόδοσης της κεραίας του διαστημικού σκάφους

- Στη συνέχεια υπολογίζεται η ισχύς λήψης στον επίγειο σταθμό, λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις απώλειες ελευθέρου χώρου.

$$P_{rec} = EIRP - FSL + G_r + 10\log \eta_r \quad (\text{dBW}) \quad (3.4)$$

- $G_r$  το κέρδος της κεραίας του επίγειου σταθμού (dBi)
- $\eta_r$  ο συντελεστής απόδοσης της κεραίας του επίγειου σταθμού

- Τέλος, υπολογίζεται ο λόγος SNR καθαρού ουρανού.

$$SNR_{cs} = P_{rec} - 10\log(kBT_{sys}) \quad (3.5)$$

- $k$  η σταθερά του Boltzmann ( $=1.38 \cdot 10^{23}$  J/K)
- $B$  το εύρος ζώνης λειτουργίας του συστήματος
- $T_{sys}$  η συνολική θερμοκρασία θορύβου του συστήματος

Δεν λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες στόχευσης των κεραιών και οι απώλειες στα κυκλώματα πομπού και δέκτη. Επίσης, ο υπολογισμός γίνεται με βάση εύρος ζώνης αναφοράς  $B=1\text{Hz}$  καθώς ενδιαφέρει κυρίως η αποτύπωση των χαρακτηριστικών του διαύλου. Τα αποτελέσματα αυτά

μπορούν εύκολα στη συνέχεια να αναχθούν στο κατά περίπτωση εύρος ζώνης κάθε συστήματος.

Στους Πίνακες 3.4 έως 3.6 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα δεδομένα για κάθε αποστολή για τις δύο ζώνες συχνοτήτων Ka και W.

Παράμετροι	Ζώνη Ka		Ζώνη W		Μονάδες
Πλανήτη	<b>Άρης</b>				
Μέση Μέγιστη Απόσταση	377.5		377.5		10 <sup>6</sup> km
Συχνότητα	32		90		GHz
Ισχύς Εκπομπής	35		35		W
Απόδοση Ενισχυτή HPA	0.48		0.3		
Απόδοση Κεραίας ΔΣ	0.6		0.6		
Κέρδος Κεραίας ΔΣ	59.6		67.6		dBi
Διάμετρος Κεραίας ΔΣ	3		3		M
EIRP	72.82		80.82		dBW
Απώλειες Ελευθέρου Χώρου	294.09		303.07		dB
Διάμετρος Κεραίας ΕΣ	34	70	34	70	M
Κέρδος Κεραίας ΕΣ	76.7	84	84.7	95	dBi
Απόδοση Κεραίας ΕΣ	0.6		0.6		
Ισχύς Λήψης P <sub>rec</sub>	-146.79	-139.49	-139.77	-128.07	dBW
Θερμοκρασία Θορύβου Συστήματος T <sub>sys</sub>	35		75		°K
kT <sub>sys</sub>	-213.16		-209.85		dBW
Εύρος Ζώνης Αναφοράς	1		1		Hz
SNR Καθαρού Ουρανού SNR <sub>CS</sub> =P <sub>rec</sub> -kT <sub>sys</sub>	66.37	73.67	70.47	81.78	dB/Hz

Πιν. 3.4 Υπολογισμός SNR καθαρού ουρανού για το διαστημικό σκάφος MRO.

Παράμετροι	Ζώνη Ka		Ζώνη W		Μονάδες
Πλανήτη	Αφροδίτη				
Μέση Μέγιστη Απόσταση	257.8				10 <sup>6</sup> km
Συχνότητα	32		90		GHz
Ισχύς Εκπομπής	65				W
Απόδοση Ενισχυτή ΗΡΑ	0.48		0.3		
Απόδοση Κεραίας ΔΣ	0.6				
Κέρδος Κεραίας ΔΣ	52.78		61.77		dBi
Διάμετρος Κεραίας ΔΣ	1.3				M
EIRP	68.69		77.68		dBW
Απώλειες Ελευθέρου Χώρου	290.78		299.76		dB
Διάμετρος Κεραίας ΕΣ	34	70	34	70	M
Κέρδος Κεραίας ΕΣ	76.7	84	84.7	96.4	dBi
Απόδοση Κεραίας ΕΣ	0.6		0.6		
Ισχύς Λήψης P <sub>rec</sub>	-147.61	-140.31	-139.60	-127.90	dBW
Θερμοκρασία Θορύβου Συστήματος T <sub>sys</sub>	35		75		°K
kT <sub>sys</sub>	-213.16		-209.85		dBW
Εύρος Ζώνης Αναφοράς	1		1		Hz
SNR Καθαρού Ουρανού SNR <sub>CS</sub> =P <sub>rec</sub> -kT <sub>sys</sub>	65.55	72.85	70.78	81.95	dB/Hz

Πιν. 3.5 Υπολογισμός SNR καθαρού ουρανού για το διαστημικό σκάφος Venus Express.

Παράμετροι	Ζώνη Ka		Ζώνη W		Μονάδες
Πλανήτης	Ερμής				
Μέση Μέγιστη Απόσταση	207.5				10 <sup>6</sup> km
Συχνότητα	32		90		GHz
Ισχύς Εκπομπής	20				W
Απόδοση Ενισχυτή HPA	0,48		0,3		
Απόδοση Κεραίας ΔΣ	0,6				
Κέρδος Κεραίας ΔΣ	33.5		63.09		dBi
Διάμετρος Κεραίας ΔΣ	1.5				M
EIRP	44.29		73.88		dBW
Απώλειες Ελευθέρου Χώρου	288.89		297.88		dB
Διάμετρος Κεραίας ΕΣ	34	70	34	70	M
Κέρδος Κεραίας ΕΣ	76,7	84	84,7	96,4	dBi
Απόδοση Κεραίας ΕΣ	0,6		0,6		
Ισχύς Λήψης P <sub>rec</sub>	-170.12	-162.82	-141.51	-129.81	dBW
Θερμοκρασία Θορύβου Συστήματος T <sub>sys</sub>	35		75		°K
kT <sub>sys</sub>	-213,16		-209,85		dBW
Εύρος Ζώνης Αναφοράς	1		1		Hz
SNR Καθαρού Ουρανού SNR <sub>cs</sub> =P <sub>rec</sub> -kT <sub>sys</sub>	49.04	56.34	68.34	80.04	dB/Hz

Πιν. 3.6 Υπολογισμός SNR καθαρού ουρανού για το διαστημικό σκάφος MPO.

Ως θερμοκρασία θορύβου συστήματος ( $T_{sys}$ ) λαμβάνεται το άθροισμα της θερμοκρασίας θορύβου του δέκτη και της θερμοκρασίας θορύβου της ατμόσφαιρας υπό συνθήκες καθαρού ουρανού. Η θερμοκρασία θορύβου του επίγειου δέκτη αποτελεί μια γνωστή παράμετρο του συστήματος η οποία εξαρτάται από τα κυκλωματικά χαρακτηριστικά του δέκτη. Θεωρούμε ότι η τιμή της είναι  $25^{\circ}\text{K}$  στη ζώνη Ka και  $50^{\circ}\text{K}$  στη ζώνη W. Για τη θερμοκρασία θορύβου της ατμόσφαιρας υπό συνθήκες καθαρού ουρανού χρησιμοποιείται η τιμή που αντιστοιχεί σε πιθανότητα μη υπέρβασης (CDF) περίπου 10%, καθώς αυτό το ποσοστό θεωρείται ότι αντιστοιχεί σε συνθήκες καθαρού ουρανού. Η τιμή αυτή είναι περίπου  $10^{\circ}\text{K}$  στη ζώνη Ka και  $25^{\circ}\text{K}$  στη ζώνη W. [6] (βλ. Ενότητα 2.3.2). Δε γίνεται διάκριση μεταξύ των δύο επίγειων σταθμών αφού μπορεί να θεωρηθεί πως υπό συνθήκες καθαρού ουρανού και οι δύο περιοχές παρουσιάζουν την ίδια ατμοσφαιρική θερμοκρασία θορύβου. Έτσι οι τιμές αυτές καλύπτουν αμφότερες τις περιπτώσεις της Μαδρίτης και της Canberra.

Μέσω της ισχύος λήψης υπό συνθήκες καθαρού ουρανού ( $P_{rec}$ ) λαμβάνονται υπόψη όλα τα αμετάβλητα χαρακτηριστικά του συστήματος όπως τα κέρδη των κεραιών και οι απώλειες ελευθέρου χώρου. Στη συνέχεια ενσωματώνεται η επίδραση των περιβαλλοντικών φαινομένων στους υπολογισμούς και η τιμή αυτή θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του SNR που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη πιθανότητα υπέρβασης.

Τα αποτελέσματα για τις τρεις διαστημικές αποστολές συνοψίζονται στους Πίνακες 3.7 και 3.8. Παρατηρούμε ότι στη ζώνη W εμφανίζεται μια σημαντική αύξηση της ισχύος λήψης σε σχέση με τη ζώνη Ka. Μάλιστα, η μεγαλύτερη αύξηση σημειώνεται στην περίπτωση του διαστημικού σκάφους MPO, όπου η αύξηση της ισχύος λήψης είναι  $28.61\text{dB}$  για κεραία 34m και  $33.01\text{dB}$  για κεραία 70m. Η αντίστοιχη αύξηση του  $\text{SNR}_{cs}$  είναι  $19.3\text{dB}$  και  $23.7\text{dB}$ . Επίσης, η αύξηση της ισχύος λήψης όταν χρησιμοποιείται κεραία 70m είναι ίση με  $7.3\text{dB}$  στη ζώνη Ka και  $11.7\text{dB}$  στη ζώνη W και για τις τρεις διαστημικές αποστολές.

SNR <sub>cs</sub> (dBW)				
Αποστολή	Ζώνη Ka		Ζώνη W	
	D <sub>r</sub> =34m	D <sub>r</sub> =70m	D <sub>r</sub> =34m	D <sub>r</sub> =70m
MRO	66.37	73.67	70.47	81.78
Venus Express	65.55	72.85	70.78	81.95
BeriColombo	49.04	56.34	68.34	80.04

Πιν. 3.7 SNR καθαρού ουρανού (ανά Hz εύρους ζώνης).

Ισχύς Λήψης P <sub>rec</sub> (dBm)				
Αποστολή	Ζώνη Ka		Ζώνη W	
	D <sub>r</sub> =34m	D <sub>r</sub> =70m	D <sub>r</sub> =34m	D <sub>r</sub> =70m
MRO	-176.79	-169.49	-169.77	-158.07
Venus Express	-177.61	-170.31	-169.60	-157.90
BeriColombo	-200.12	-192.82	-171.51	-159.81

Πιν. 3.8 Ισχύς λήψης στον επίγειο σταθμό (σε συνθήκες καθαρού ουρανού, λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις απώλειες ελευθέρου χώρου).

### 3.4 Επίδραση Ατμοσφαιρικών Φαινομένων

Ο λόγος SNR καθαρού ουρανού που υπολογίστηκε στην Ενότητα 3.3 είναι ενδεικτικός για το κάθε σύστημα αλλά δεν επαρκεί για την εκτίμηση της συνολικής επίδοσής του. Στην πραγματικότητα, τα διάφορα περιβαλλοντικά φαινόμενα υποβαθμίζουν σημαντικά την ποιότητα του σήματος με αποτέλεσμα να καταγράφονται μεγάλες αποκλίσεις του πραγματικού λόγου SNR από αυτή την ενδεικτική τιμή για το μεγαλύτερο ποσοστό του χρόνου. Συνεπώς, είναι αναγκαίο να ενσωματωθεί στους υπολογισμούς η τυχαία πρόσθετη απόσβεση που εισάγει η ατμόσφαιρα.

### 3.4.1 Υπολογισμός Απόσβεσης Λόγω Βροχόπτωσης

Στην περίπτωση των επίγειων σταθμών βαθέως διαστήματος στη Μαδρίτη και την Canberra, η απόσβεση λόγω βροχής έχει υπολογιστεί στο Κεφάλαιο 2 (Ενότητα 2.3.3). Τα αποτελέσματα που αφορούν στην κατανομή της απόσβεσης στις ζώνες συχνοτήτων Ka και W επαναλαμβάνονται στον Πίνακα 3.9 συναρτήσει της πιθανότητας μη υπέρβασης κάθε στάθμης. Ας σημειωθεί ότι, για τη σχεδίαση χειρότερης περίπτωσης, μας ενδιαφέρει η ελάχιστη γωνία ανύψωσης, η οποία είναι ίση με  $20^\circ$ . Αυτό συμβαίνει διότι σε αυτήν την περίπτωση οι ατμοσφαιρικές απώλειες μεγιστοποιούνται καθώς η διαδρομή του σήματος μέσα στην ατμόσφαιρα γίνεται μέγιστη.

Πιθανότητα Μη Υπέρβασης (CDF)	Απόσβεση Λόγω Βροχής (dB)			
	Madrid		Canberra	
	Ζώνη Ka	Ζώνη W	Ζώνη Ka	Ζώνη W
0	3.4	11.7	5.6	18.2
0.5	5.3	17.5	10.8	34.1
0.7	7.1	23.1	15.2	46.5
0.8	9	28.4	18.9	57.4
0.9	12.9	39.5	25.7	75.8
0.95	17.9	53.1	33	94.5
0.97	22.3	64.8	38.7	108.2
0.98	26.2	75.0	43.2	118.5
0.99	33.9	93.6	50.7	135.0

Πιν.3.9 Αθροιστική κατανομή της απόσβεσης λόγω βροχόπτωσης στις ζώνες συχνοτήτων Ka και W για δύο επίγειους σταθμούς (Μαδρίτη, Canberra).



### 3.4.2 Υπολογισμός Ατμοσφαιρικής Συνεισφοράς στην Απόσβεση και τη Θερμοκρασία Θορύβου

Η θερμοκρασία θορύβου του συστήματος για συγκεκριμένη γωνία ανύψωσης υπολογίζεται με βάση τη (2.8) η οποία επαναλαμβάνεται εδώ.

$$T_{op}(\theta) = T_{AMW} + T_{SKY} = T_{AMW} + T_{atm}(\theta) + T'_{CMB}(\theta) \quad (3.6)$$

Στον υπολογισμό αυτό δεν περιλαμβάνεται μια ενδεχόμενη αύξηση της θερμοκρασίας θορύβου εξαιτίας πλανητικού θορύβου. Από υπολογισμούς για τη μέση μέγιστη απόσταση της Γης από τους τρεις πλανήτες που ενδιαφέρουν, η θερμοκρασία αυτή είναι πολύ μικρή. Για γωνία μεταξύ του κέντρου του πλανήτη και του λοβού ακτινοβολίας της κεραίας ίση με μηδέν μοίρες (χειρότερη περίπτωση) κυμαίνεται από 0.1 έως 1°K, ανάλογα με την κεραία λήψης και τις ατμοσφαιρικές απώλειες. Συνεπώς μπορεί να αγνοηθεί.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η θερμοκρασία θορύβου του δέκτη είναι σταθερή, ανεξάρτητη της γωνίας ανύψωσης και θεωρείται ίση με 25°K στη ζώνη Ka και 50°K στη ζώνη W.

#### 3.4.2.1 Ζώνη Ka

Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας θορύβου του συστήματος για γωνία ανύψωσης ίση με 20° στη ζώνη Ka χρησιμοποιούνται τα δεδομένα των Πινάκων 2.1 και 2.3 (Κεφάλαιο 2) και συγκεκριμένα οι τιμές της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας θορύβου της ατμόσφαιρας. Τα βήματα που ακολουθούνται παρουσιάζονται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 2.2.

Τα αποτελέσματα για τους επίγειους σταθμούς της Μαδρίτης και της Canberra παρουσιάζονται στους Πίνακες 3.10 και 3.11 αντίστοιχα, ως συνάρτηση της πιθανότητας μη υπέρβασης (CDF) μιας συγκεκριμένης στάθμης. Οι δυσμενέστερες ατμοσφαιρικές συνθήκες που σχετίζονται με αυξημένες τιμές του CDF προκαλούν μια πρόσθετη ατμοσφαιρική απόσβεση, η οποία ισοδυναμεί με αύξηση της θερμοκρασίας θορύβου της ατμόσφαιρας  $T_{atm}$ . Το αντίθετο ισχύει για τη θερμοκρασία θορύβου λόγω κοσμικής ακτινοβολίας  $T'_{CMB}$ . Σε αυτήν την περίπτωση, η αυξημένη ατμοσφαιρική απόσβεση προκαλεί μείωση της επίδρασης της κοσμικής ακτινοβολίας που φθάνει στο δέκτη διασχίζοντας όλα τα στρώματα της ατμόσφαιρας. Συνεπώς,

καθώς το CDF αυξάνεται, η τιμή της  $T'_{CMB}$  μειώνεται. Η συνολική θερμοκρασία θορύβου του συστήματος  $T_{sys}$  επίσης αυξάνεται για μεγαλύτερες τιμές του CDF. Αυτό συμβαίνει διότι η αύξηση της  $T_{atm}$  υπερτερεί έναντι της μείωσης της  $T'_{CMB}$  καθώς το CDF αυξάνεται, με αποτέλεσμα ο παράγοντας της  $T_{atm}$  να κυριαρχεί στον καθορισμό της  $T_{sys}$ .

CDF	$T_P$ (°K)	$T_{atm}(\theta=90^\circ)$ (°K)	$L_{atm}(\theta=90^\circ)$	$A_{atm}(\theta=90^\circ)$ (dB)	$A_{atm}(\theta=20^\circ)$ (dB)	$L_{atm}(\theta=20^\circ)$	$T'_{CMB}(\theta=20^\circ)$ (°K)	$T_{atm}(\theta=20^\circ)$ (°K)	$T_{sys}(\theta=20^\circ)$ (°K)
0	255	7.031	1.026	0.112	0.123	1.029	2.649	7.133	34.781
0.5	267.5	13.065	1.050	0.211	0.232	1.055	2.584	13.889	41.472
0.7	272.5	15.370	1.059	0.250	0.274	1.065	2.559	16.637	44.196
0.8	275	17.106	1.066	0.279	0.306	1.073	2.540	18.681	46.220
0.9	277.5	22.131	1.088	0.364	0.399	1.096	2.486	24.365	51.851
0.95	278.75	37.982	1.160	0.646	0.707	1.177	2.316	41.881	69.197
0.97	279.25	54.876	1.249	0.967	1.059	1.276	2.135	60.418	87.554
0.98	279.5	67.778	1.327	1.229	1.346	1.363	1.999	74.494	101.493
0.99	279.75	89.323	1.481	1.706	1.868	1.538	1.772	97.809	124.581

Πιν. 3.10 Υπολογισμός αθροιστικής κατανομής της θερμοκρασίας θορύβου του συστήματος στη ζώνη συχνοτήτων Ka. Γωνία ανύψωσης ίση με  $20^\circ$ , Επίγειος Σταθμός Μαδρίτης.

CDF	$T_P$ (°K)	$T_{atm}(\theta=90^\circ)$ (°K)	$L_{atm}(\theta=90^\circ)$	$A_{atm}(\theta=90^\circ)$ (dB)	$A_{atm}(\theta=20^\circ)$ (dB)	$L_{atm}(\theta=20^\circ)$	$T'_{CMB}(\theta=20^\circ)$ (°K)	$T_{atm}(\theta=20^\circ)$ (°K)	$T_{sys}(\theta=20^\circ)$ (°K)
0	255	7.173	1.027	0.115	0.126	1.029	2.647	7.276	34.924
0.5	267.5	13.758	1.053	0.223	0.244	1.058	2.576	14.623	42.199
0.7	272.5	16.695	1.065	0.272	0.298	1.071	2.544	18.067	45.612
0.8	275	19.246	1.075	0.315	0.345	1.083	2.517	21.009	48.526
0.9	277.5	24.618	1.098	0.407	0.446	1.108	2.459	27.091	54.550
0.95	278.75	33.611	1.139	0.566	0.620	1.153	2.362	37.092	64.454
0.97	279.25	45.608	1.199	0.788	0.863	1.220	2.234	50.306	77.540
0.98	279.5	58.090	1.268	1.031	1.129	1.297	2.101	63.973	91.074
0.99	279.75	81.790	1.423	1.533	1.679	1.472	1.851	89.708	116.560

Πιν. 3.11 Υπολογισμός αθροιστικής κατανομής της θερμοκρασίας θορύβου του συστήματος στη ζώνη συχνοτήτων Ka. Γωνία ανύψωσης ίση με  $20^\circ$ , Επίγειος Σταθμός Canberra.

### 3.4.2.2 Ζώνη W

Για τη ζώνη W δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα από μετρήσεις της θερμοκρασίας θορύβου της ατμόσφαιρας όπως συμβαίνει με τη ζώνη Ka. Συνεπώς, για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας θορύβου της ατμόσφαιρας θα πρέπει να γίνει μετατροπή των διαθέσιμων δεδομένων. Προς το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η τιμή της θερμοκρασίας  $T_{SKY}$  της (3.6), για την οποία ισχύει

$$T_{SKY}(\theta) = T_{atm}(\theta) + T_{CMB}(\theta) \quad (3.7)$$

Η θερμοκρασία αυτή, όταν αναφέρεται σε γωνία ανύψωσης ίση με  $90^\circ$  συμβολίζεται ως  $T_B$  και ονομάζεται θερμοκρασία ζενίθ “sky-brightness”.

Για τους επίγειους σταθμούς της Μαδρίτης και της Canberra, για τη μετατροπή των δεδομένων της ζώνης Ka στη ζώνη W ισχύει η ακόλουθη έκφραση. [6]

$$T_B^{(W)} = -25.84 + 4.7810T_B^{(Ka)} - 0.0222(T_B^{(Ka)})^2 \quad (3.8)$$

Η (3.8) προκύπτει ως ένα κατάλληλο μοντέλο μετατροπής μετρήσεων σε συχνότητα 31.4GHz που έγιναν στον επίγειο σταθμό της Μαδρίτης. Τέτοιες μετρήσεις έχουν γίνει και στον επίγειο σταθμό της NASA στο Goldstone, δίνοντας ένα αντίστοιχο μοντέλο. Στην περίπτωση της Μαδρίτης θεωρείται ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ίδιο μοντέλο με αυτό για την Canberra.

Αρχικά, λοιπόν, υπολογίζεται η  $T_B^{(Ka)}$  για κάθε επίγειο σταθμό. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται η (3.8) για τη μετάβαση στη ζώνη W, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους Πίνακες 3.12 και 3.13.

CDF	Ka band				W band
	$L_{atm}(\theta=90^\circ)$	$T_{atm}(\theta=90^\circ)$ (°K)	$T'_{CMB}(\theta=90^\circ)$ (°K)	$T_B(\theta=90^\circ)$ (°K)	$T_B(\theta=90^\circ)$ (°K)
0	1.267	7.031	2.655	9.686	18.39
0.5	1.273	13.065	2.596	15.661	43.59
0.7	1.276	15.370	2.573	17.943	52.80
0.8	1.278	17.106	2.555	19.661	59.58
0.9	1.285	22.131	2.506	24.637	78.47
0.95	1.306	37.982	2.349	40.331	130.87
0.97	1.333	54.876	2.181	57.057	174.68
0.98	1.357	67.778	2.053	69.831	199.77
0.99	1.406	89.323	1.840	91.163	225.51

Πιν. 3.12 Υπολογισμός  $T_B$  για τη ζώνη συχνοτήτων W με βάση τα δεδομένα της ζώνης Ka μέσω της σχέσης μετατροπής, Επίγειος Σταθμός Μαδρίτης

CDF	Ka band				W band
	$L_{atm}(\theta=90^\circ)$	$T_{atm}(\theta=90^\circ)$ (°K)	$T'_{CMB}(\theta=90^\circ)$ (°K)	$T_B(\theta=90^\circ)$ (°K)	$T_B(\theta=90^\circ)$ (°K)
0	1.267	7.031	2.152	9.183	16.19
0.5	1.273	13.065	2.140	15.205	41.72
0.7	1.276	15.370	2.135	17.505	51.05
0.8	1.278	17.106	2.132	19.238	57.92
0.9	1.285	22.131	2.121	24.252	77.05
0.95	1.306	37.982	2.086	40.068	130.08
0.97	1.333	54.876	2.044	56.920	174.37
0.98	1.357	67.778	2.008	69.786	199.69
0.99	1.406	89.323	1.938	91.261	225.58

Πιν. 3.13 Υπολογισμός  $T_B$  για τη ζώνη συχνοτήτων W με βάση τα δεδομένα της ζώνης Ka μέσω της σχέσης μετατροπής, Επίγειος Σταθμός Canberra

Για  $\theta=90^\circ$  υπολογίζουμε τη θερμοκρασία θορύβου της ατμόσφαιρας στη ζώνη W κάνοντας χρήση έκφρασης (3.9)

$$T_B = T_{atm} + \frac{2.725}{L_{atm}} = T_{atm} + 2.725 \frac{275 - T_{atm}}{275} = 0.99T_{atm} + 2,727 \Rightarrow T_{atm} = \frac{T_B - 2,725}{0.99} \quad (3.9)$$

Ας σημειωθεί ότι με βάση τα αποτελέσματα της (3.9) είναι δυνατό να υπολογιστούν προσεγγιστικές σχέσεις αντίστοιχες των (2.11) ως (2.13) (βλ. Κεφ. 2) κατάλληλες για τη ζώνη W. Στην περίπτωση αυτή, προκύπτει πως η αθροιστική κατανομή της θερμοκρασίας θορύβου της ατμόσφαιρας προσεγγίζεται από τις (3.10) και (3.11).

$$p' = 0.845e^{-0.0199T} , \text{ επίγειος σταθμός Μαδρίτης} \quad (3.10)$$

$$p' = 0.807e^{-0.0197T} , \text{ επίγειος σταθμός Canberra} \quad (3.11)$$

Μετά τον υπολογισμό της θερμοκρασίας θορύβου της ατμόσφαιρας για γωνία ανύψωσης ίση με  $90^\circ$ , ακολουθούμε τη διαδικασία που παρουσιάζεται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 2.2 για τον υπολογισμό της συνολικής θερμοκρασίας θορύβου του συστήματος στη ζώνη συχνοτήτων W για γωνία ανύψωσης ίση με  $20^\circ$ . Τα αποτελέσματα για τους επίγειους σταθμούς της Μαδρίτης και της Canberra παρουσιάζονται στους Πίνακες 3.14 και 3.15. Τα διάφορα μεγέθη εμφανίζονται από αριστερά προς τα δεξιά με τη σειρά που υπολογίζονται σύμφωνα με το διάγραμμα ροής.

CDF	$T_{atm}(\theta=90^\circ)$ (°K)	$L_{atm}(\theta=90^\circ)$	$A_{atm}(\theta=90^\circ)$ (dB)	$A_{atm}(\theta=20^\circ)$ (dB)	$L_{atm}(\theta=20^\circ)$	$T_{atm}(\theta=20^\circ)$ (°K)	$T_{sys}(\theta=20^\circ)$ (°K)
0	15.82	1.06	0.26	0.28	1.07	16.02	68.58
0.5	41.28	1.18	0.71	0.77	1.19	43.65	95.93
0.7	50.58	1.23	0.88	0.97	1.25	54.39	106.57
0.8	57.43	1.26	1.02	1.11	1.29	62.23	114.34
0.9	76.51	1.39	1.42	1.55	1.43	83.34	135.25
0.95	129.44	1.89	2.76	3.03	2.01	139.89	191.25
9.97	173.69	2.71	4.34	4.75	2.99	185.72	236.63
0.98	199.03	3.62	5.59	6.12	4.09	211.20	261.87
0.99	225.04	5.50	7.41	8.11	6.48	236.55	286.97

Πιν. 3.14 Υπολογισμός αθροιστικής κατανομής της θερμοκρασίας θορύβου του συστήματος στη ζώνη συχνοτήτων W. Γωνία ανύψωσης ίση με 20°, Επίγειος Σταθμός Μαδρίτης.

CDF	$T_{atm}(\theta=90^\circ)$ (°K)	$L_{atm}(\theta=90^\circ)$	$A_{atm}(\theta=90^\circ)$ (dB)	$A_{atm}(\theta=20^\circ)$ (dB)	$L_{atm}(\theta=20^\circ)$	$T_{atm}(\theta=20^\circ)$ (°K)	$T_{sys}(\theta=20^\circ)$ (°K)
0	13.60	1.05	0.22	0.24	1.06	13.78	66.36
0.5	39.39	1.17	0.67	0.74	1.18	41.67	93.97
0.7	48.81	1.22	0.85	0.93	1.24	52.51	104.71
0.8	55.75	1.25	0.98	1.08	1.28	60.44	112.56
0.9	75.08	1.38	1.38	1.52	1.42	81.80	133.72
0.95	128.65	1.88	2.74	3.00	2.00	139.06	190.43
9.97	173.38	2.71	4.32	4.74	2.98	185.40	236.32
0.98	198.95	3.62	5.58	6.11	4.09	211.13	261.79
0.99	225.11	5.51	7.41	8.12	6.49	236.62	287.04

Πιν. 3.15 Υπολογισμός αθροιστικής κατανομής της θερμοκρασίας θορύβου του συστήματος στη ζώνη συχνοτήτων W. Γωνία ανύψωσης ίση με 20°, Επίγειος Σταθμός Canberra.

### 3.5 Αριθμητικά Αποτελέσματα

Για τον υπολογισμό του λόγου SNR λαμβάνονται υπόψη τα εξής μεγέθη:

- η τιμή της ισχύος λήψης  $P_{rec}$  για κάθε περίπτωση κεραίας επίγειου σταθμού (Πιν. 3.8)
- η κατανομή της ατμοσφαιρικής απόσβεσης  $A_{atm}$  (Πιν. 3.10,3.11 για τη ζώνη Ka και Πιν. 3.14,3.15 για τη ζώνη W)
- η κατανομή της απόσβεσης λόγω βροχής  $A_{rain}$  (Πιν. 3.9)
- η κατανομή της θερμοκρασίας θορύβου του συστήματος  $T_{sys}$  (Πιν. 3.10,3.11 για τη ζώνη Ka και Πιν. 3.14,3.15 για τη ζώνη W)

Για κάθε στάθμη πιθανότητας (ή ισοδύναμα ποσοστού του χρόνου) ισχύει (σε dB):

$$SNR(p\%) = P_{rec}(p\%) - A_{atm}(p\%) - A_{rain}(p\%) - (kT_{sys}(p\%))_{dB} \quad (3.12)$$

Στις Ενότητες 3.5.1 έως 3.5.3 παρουσιάζονται οι υπολογισμοί στις περιπτώσεις των διαστημικών σκαφών MRO, Venus Express και MPO.

### 3.5.1 Mars Reconnaissance Orbiter

- MRO – Μαδρίτη

Στους Πίνακες 3.16 και 3.17 παρουσιάζεται ο υπολογισμός του λόγου SNR για κάθε πιθανότητα CDF με βάση την (3.12).

CDF	$kT_{\text{sys}}$ (dBW)	$D_r=34\text{m}$		$D_r=70\text{m}$	
		$P_{\text{rec}}-A_{\text{atm}}-A_{\text{rain}}$ (dBW)	SNR (dB/Hz)	$P_{\text{rec}}-A_{\text{atm}}-A_{\text{rain}}$ (dBW)	SNR (dB/Hz)
0	-213.19	-150.31	62.87	-143.01	70.17
0.5	-212.42	-152.32	60.10	-145.02	67.40
0.7	-212.15	-154.16	57.98	-146.86	65.28
0.8	-211.95	-156.10	55.86	-148.80	63.16
0.9	-211.45	-160.09	51.36	-152.79	58.66
0.95	-210.20	-165.40	44.80	-158.10	52.10
0.97	-209.18	-170.15	39.03	-162.85	46.33
0.98	-208.54	-174.34	34.20	-167.04	41.50
0.99	-207.65	-182.56	25.09	-175.26	32.39

Πιν. 3.16 Κατανομή SNR για το διαστημικό σκάφος MRO, ζώνη συχνοτήτων Ka, Επίγειος Σταθμός Μαδρίτης.

CDF	$kT_{\text{sys}}$ (dBW)	$D_r=34\text{m}$		$D_r=70\text{m}$	
		$P_{\text{rec}} - A_{\text{atm}} - A_{\text{rain}}$ (dBW)	SNR (dB/Hz)	$P_{\text{rec}} - A_{\text{atm}} - A_{\text{rain}}$ (dBW)	SNR (dB/Hz)
0	-210.24	-151.75	58.49	-140.05	70.19
0.5	-208.78	-158.04	50.74	-146.34	62.44
0.7	-208.32	-163.84	44.49	-152.14	56.19
0.8	-208.02	-169.28	38.73	-157.58	50.43
0.9	-207.29	-180.82	26.47	-169.12	38.17
0.95	-205.79	-195.90	9.89	-184.20	21.59
0.97	-204.86	-209.32	-4.46	-197.62	7.24
0.98	-204.42	-220.89	-16.47	-209.19	-4.77
0.99	-204.02	-241.48	-37.46	-229.78	-25.76

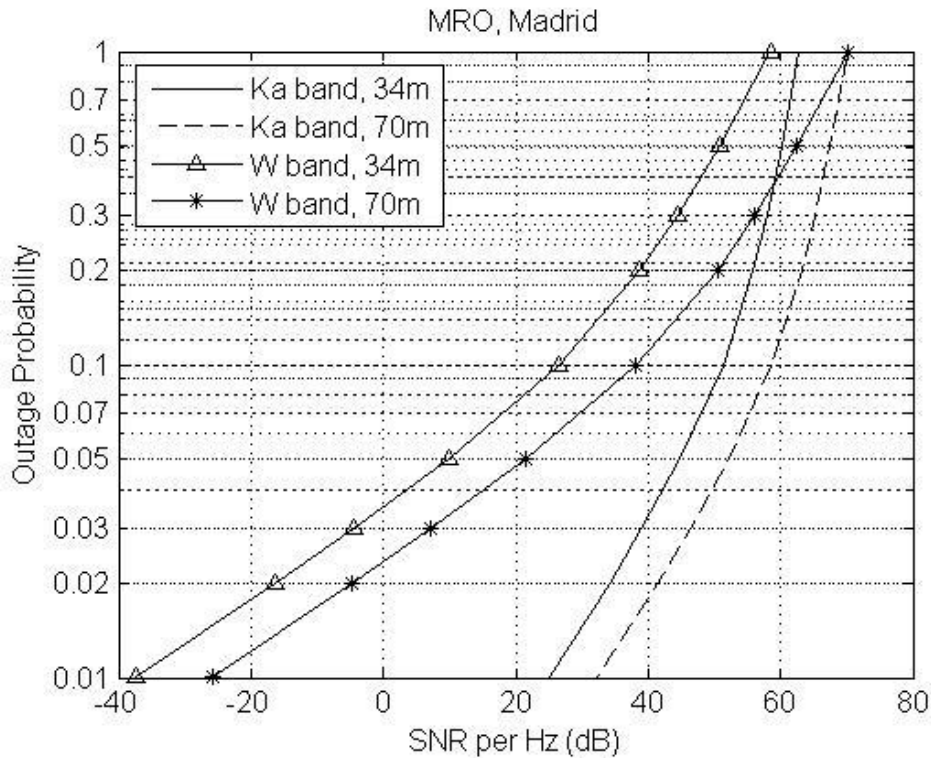
Πιν. 3.17 Κατανομή SNR για το διαστημικό σκάφος MRO, ζώνη συχνοτήτων W, Επίγειος Σταθμός Μαδρίτης.



Στο σημείο αυτό χρήσιμο είναι να αποσαφηνιστεί η έννοια των πιθανοτήτων που παρουσιάζονται στους πίνακες μέσω ενός παραδείγματος. Για τον υπολογισμό των δεδομένων του Πίνακα 3.17 έχει χρησιμοποιηθεί η πιθανότητα μη υπέρβασης για τη θερμοκρασία  $T_{sys}$  και τις αποσβέσεις  $A_{rain}$  και  $A_{atm}$ . Επομένως, ισχύει ότι για 90% του χρόνου η τιμή του μεγέθους ( $kT_{sys}$ ) είναι μικρότερη από -207.29dB (δηλαδή CDF είναι η πιθανότητα μη υπέρβασης). Επίσης, η τιμή του μεγέθους ( $P_{rec} - A_{atm} - A_{rain}$ ) για κεραία 34m είναι μεγαλύτερη από -180.82dB για 90% του χρόνου (δηλαδή CDF είναι η πιθανότητα μη υπέρβασης για το μέγεθος αυτό). Ο λόγος SNR προκύπτει ως η διαφορά των δύο αυτών μεγεθών. Συνεπώς η στάθμη 26.47dB που αντιστοιχεί στην πιθανότητα 0.9 θα είναι η μικρότερη τιμή που μπορεί να πάρει ο λόγος SNR για το συγκεκριμένο ποσοστό του χρόνου. Επομένως, όσον αφορά στο λόγο SNR η πιθανότητα CDF των Πινάκων 3.16 και 3.17 εκφράζει την πιθανότητα υπέρβασης κάθε συγκεκριμένης στάθμης. Για την αξιολόγηση της επίδοσης του συστήματος, όμως, ενδιαφέρει κυρίως η πιθανότητα διακοπής (outage probability), η οποία ισοδυναμεί με την πιθανότητα μη υπέρβασης κάθε στάθμης. Για το λόγο αυτό τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και συναρτήσει της πιθανότητας μη υπέρβασης για τον λόγο SNR (Πίν. 3.18 και Σχ.3.1).

Πιθανότητα Μη Υπέρβασης	SNR (dB/Hz)			
	Ka band		W band	
	$D_r=34m$	$D_r=70m$	$D_r=34m$	$D_r=70m$
1	62.87	70.17	58.49	70.19
0.5	60.1	67.4	50.74	62.44
0.3	57.98	65.28	44.49	56.19
0.2	55.86	63.16	38.73	50.43
0.1	51.36	58.66	26.47	38.17
0.05	44.8	52.1	9.89	21.59
0.03	39.03	46.33	-4.46	7.24
0.02	34.2	41.5	-16.47	-4.77
0.01	25.09	32.39	-37.46	-25.76

Πιν. 3.18 Κατανομή SNR συναρτήσει της πιθανότητας μη υπέρβασης (διαστημικό σκάφος MRO, ζώνη συχνοτήτων W, Επίγειος Σταθμός Μαδρίτης).



Σχ. 3.1 SNR ανά Hz για τη ζεύξη MRO – Επίγειος Σταθμός Μαδρίτης.

Παρατηρούμε ότι, στην περίπτωση των κεραιών διαμέτρου 70m, για το ίδιο ποσοστό διακοπής επιτυγχάνεται υψηλότερο SNR κατά 7.3dB στη ζώνη Ka και κατά 11.7dB στη ζώνη W σε σχέση με το αντίστοιχο SNR που επιτυγχάνεται για τις κεραιές διαμέτρου 34m. Επίσης, παρατηρείται μια μεγάλη μείωση του SNR που επιτυγχάνεται στη ζώνη W. Η μείωση του SNR οφείλεται κατά κύριο λόγο στην κατά πολύ υψηλότερη απόσβεση λόγω βροχόπτωσης στη ζώνη αυτή. Συγκεκριμένα, για πιθανότητα διακοπής ίση με 0.05, ο λόγος SNR στη ζώνη W υπολείπεται κατά 34.91dB του αντίστοιχου λόγου στη ζώνη Ka στην περίπτωση κεραιάς διαμέτρου 34m. Η αντίστοιχη διαφορά για κεραιά διαμέτρου 70m είναι 30.57dB. Δηλαδή, ενώ σε συνθήκες καθαρού ουρανού η τιμή του SNR είναι μεγαλύτερη στη ζώνη W, το πλεονέκτημα αυτό δε διατηρείται υπό την επίδραση της βροχόπτωσης, για την οποία σημειώνεται ωστόσο ότι υπολογίστηκε με επέκταση του υπάρχοντος μοντέλου της Σύστασης ITU-R P.618, χωρίς αντίστοιχη επαλήθευση με πειραματικά δεδομένα.

- MRO – Canberra

Με την ίδια διαδικασία υπολογίζεται ο λόγος SNR στην περίπτωση του επίγειου σταθμού της Canberra (Πιν. 3.19, 3.20, 3.21)

CDF	$kT_{sys}$ (dBW)	34m		70m	
		$P_{rec} - A_{atm} - A_{rain}$ (dBW)	SNR (dB/Hz)	$P_{rec} - A_{atm} - A_{rain}$ (dBW)	SNR (dB/Hz)
0	-213.17	-152.52	60.65	-145.22	67.95
0.5	-212.35	-157.83	54.51	-150.53	61.81
0.7	-212.01	-162.29	49.72	-154.99	57.02
0.8	-211.74	-166.04	45.71	-158.74	53.01
0.9	-211.23	-172.94	38.30	-165.64	45.60
0.95	-210.51	-180.41	30.10	-173.11	37.40
0.97	-209.71	-186.35	23.35	-179.05	30.65
0.98	-209.01	-191.12	17.89	-183.82	25.19
0.99	-207.94	-199.17	8.77	-191.87	16.07

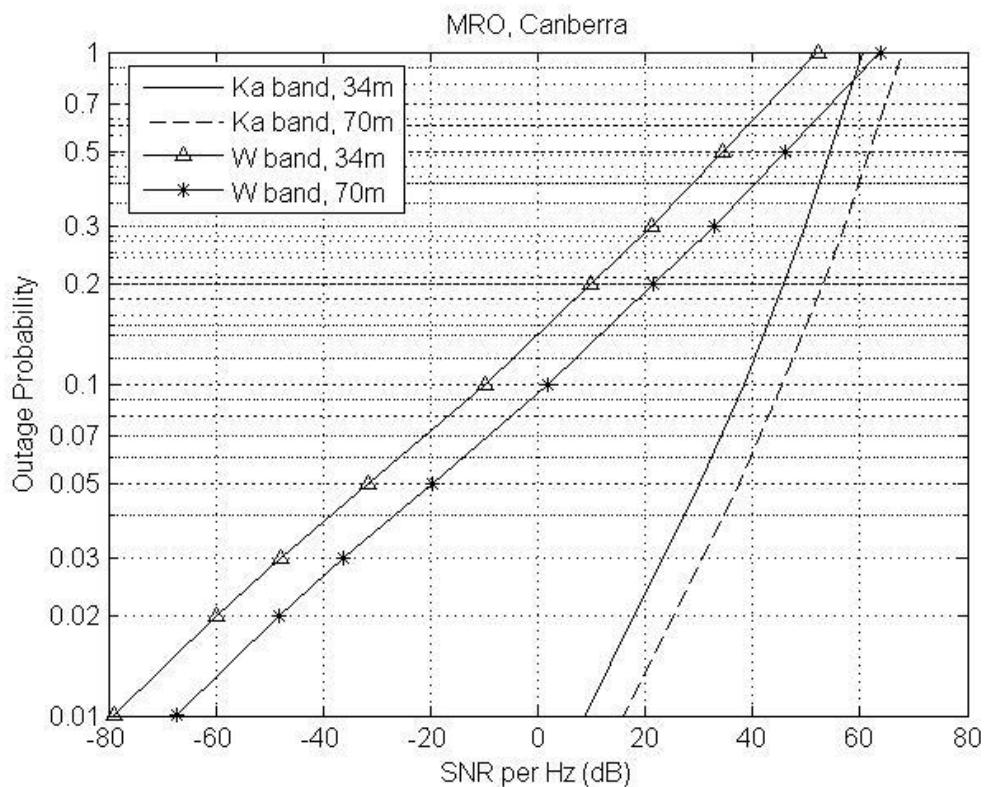
Πιν. 3.19 Κατανομή SNR για το διαστημικό σκάφος MRO, ζώνη συχνοτήτων Ka, Επίγειος Σταθμός Canberra

CDF	$kT_{sys}$ (dBW)	$D_r=34m$		$D_r=70m$	
		$P_{rec} - A_{atm} - A_{rain}$ (dBW)	SNR (dB/Hz)	$P_{rec} - A_{atm} - A_{rain}$ (dBW)	SNR (dB/Hz)
0	-210.38	-158.21	52.17	-146.51	63.87
0.5	-208.87	-174.61	34.27	-162.91	45.97
0.7	-208.40	-187.20	21.20	-175.50	32.90
0.8	-208.09	-198.25	9.84	-186.55	21.54
0.9	-207.34	-217.09	-9.75	-205.39	1.95
0.95	-205.80	-237.30	-31.50	-225.60	-19.80
0.97	-204.87	-252.71	-47.84	-241.01	-36.14
0.98	-204.42	-264.38	-59.96	-252.68	-48.26
0.99	-204.02	-282.89	-78.87	-271.19	-67.17

Πιν. 3.20 Κατανομή SNR για το διαστημικό σκάφος MRO, ζώνη συχνοτήτων W, Επίγειος Σταθμός Canberra

Πιθανότητα Μη Υπέρβασης	SNR (dB/Hz)			
	Ka band		W band	
	$D_r=34m$	$D_r=70m$	$D_r=34m$	$D_r=70m$
1	60.65	67.95	52.17	63.87
0.5	54.51	61.81	34.27	45.97
0.3	49.72	57.02	21.20	32.90
0.2	45.71	53.01	9.84	21.54
0.1	38.30	45.60	-9.75	1.95
0.05	30.10	37.40	-31.50	-19.80
0.03	23.35	30.65	-47.84	-36.14
0.02	17.89	25.19	-59.96	-48.26
0.01	8.77	16.07	-78.87	-67.17

Πιν. 3.21 Κατανομή SNR συναρτήσει της πιθανότητας μη υπέρβασης (διαστημικό σκάφος MRO, ζώνη συχνοτήτων W, Επίγειος Σταθμός Canberra).



Σχ. 3.2 SNR ανά Hz για τη ζεύξη MRO - Επίγειος Σταθμός Canberra.

Στην περίπτωση της ζεύξης του MRO με τον επίγειο σταθμό της Canberra παρατηρείται μια μείωση του SNR και στις δύο ζώνες συχνοτήτων σε σχέση με τη Μαδρίτη, γεγονός αναμενόμενο καθώς εδώ η απόσβεση λόγω βροχοπτώσης είναι μεγαλύτερη. Εξάλλου, στη ζώνη W παρατηρείται και πάλι μια υποβάθμιση της επίδοσης του συστήματος σε σχέση με τη ζώνη Ka, η οποία μάλιστα είναι εξαιρετικά μεγαλύτερη απ' ό,τι στην περίπτωση της Μαδρίτης. Συγκεκριμένα, για πιθανότητα διακοπής 0.05 και κεραία 34m, ο λόγος SNR στη ζώνη W υπολείπεται κατά 61.6dB του αντίστοιχου λόγου στη ζώνη Ka. Για κεραία 70m η αντίστοιχη διαφορά είναι 57.2dB.

### 3.5.2 Venus Express

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία υπολογίζεται ο λόγος σήματος προς θόρυβο για τη ζεύξη downlink με το διαστημικό σκάφος Venus Express. Τα αποτελέσματα της (3.12) παρουσιάζονται στους Πίνακες 3.22-3.27 και στα Σχήματα 3.3 και 3.4 για κάθε επίγειο σταθμό και κάθε ζώνη συχνοτήτων.

- Venus Express – Μαδρίτη

CDF	$kT_{sys}$ (dBW)	$D_r=34m$		$D_r=70m$	
		$P_{rec}-A_{atm}-A_{rain}$ (dBW)	SNR (dB/Hz)	$P_{rec}-A_{atm}-A_{rain}$ (dBW)	SNR (dB/Hz)
0	-213.19	-151.13	62.05	-143.83	69.35
0.5	-212.42	-153.14	59.28	-145.84	66.58
0.7	-212.15	-154.98	57.16	-147.68	64.46
0.8	-211.95	-156.92	55.04	-149.62	62.34
0.9	-211.45	-160.91	50.54	-153.61	57.84
0.95	-210.20	-166.22	43.98	-158.92	51.28
0.97	-209.18	-170.97	38.21	-163.67	45.51
0.98	-208.54	-175.16	33.38	-167.86	40.68
0.99	-207.65	-183.38	24.27	-176.08	31.57

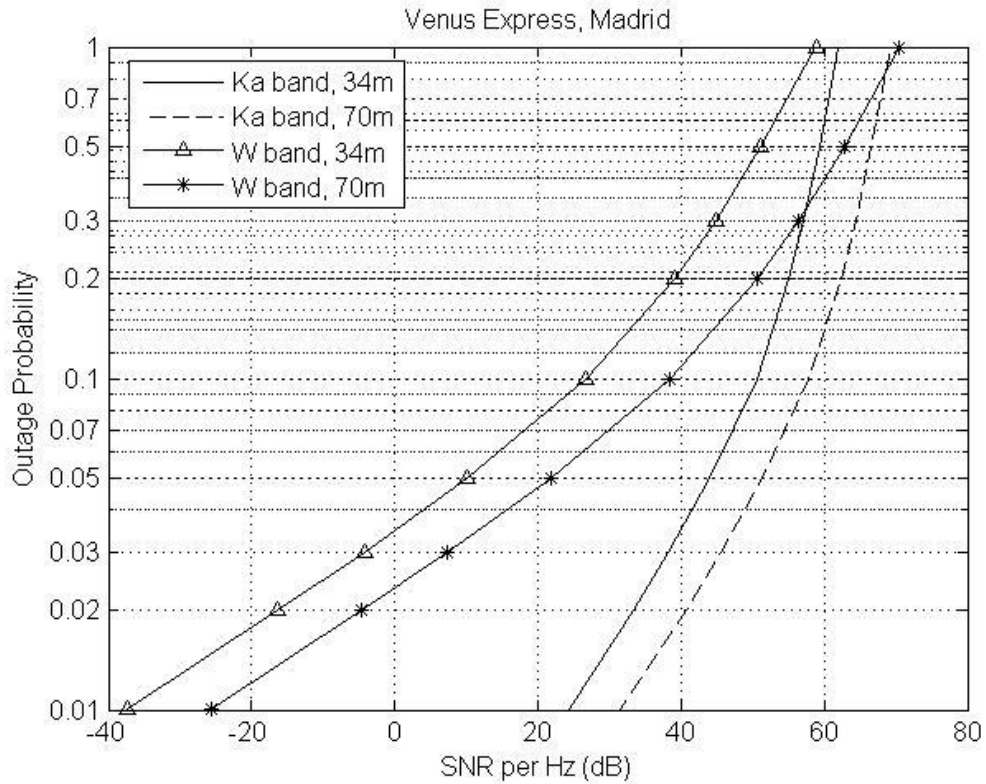
Πιν. 3.22 Αθροιστική κατανομή SNR για το διαστημικό σκάφος Venus Express, ζώνη συχνοτήτων Ka, Επίγειος Σταθμός Μαδρίτης.

CDF	$kT_{sys}$ (dBW)	$D_r=34m$		$D_r=70m$	
		$P_{rec}-A_{atm}-A_{rain}$ (dBW)	SNR (dBW)	$P_{rec}-A_{atm}-A_{rain}$ (dBW)	SNR (dB/Hz)
0	-210.38	-151.54	58.84	-139.84	70.54
0.5	-208.87	-157.84	51.04	-146.14	62.74
0.7	-208.40	-163.63	44.77	-151.93	56.47
0.8	-208.09	-169.08	39.01	-157.38	50.71
0.9	-207.34	-180.62	26.72	-168.92	38.42
0.95	-205.80	-195.70	10.10	-184.00	21.80
0.97	-204.87	-209.14	-4.27	-197.44	7.43
0.98	-204.42	-220.71	-16.29	-209.01	-4.59
0.99	-204.02	-241.32	-37.30	-229.62	-25.60

Πιν. 3.23 Αθροιστική κατανομή SNR για το διαστημικό σκάφος Venus Express, ζώνη συχνοτήτων W, Επίγειος Σταθμός Μαδρίτης.

Πιθανότητα Μη Υπέρβασης	SNR (dB/Hz)			
	Ka band		W band	
	$D_r=34m$	$D_r=70m$	$D_r=34m$	$D_r=70m$
1	62.05	69.35	58.84	70.54
0.5	59.28	66.58	51.04	62.74
0.3	57.16	64.46	44.77	56.47
0.2	55.04	62.34	39.01	50.71
0.1	50.54	57.84	26.72	38.42
0.05	43.98	51.28	10.10	21.80
0.03	38.21	45.51	-4.27	7.43
0.02	33.38	40.68	-16.29	-4.59
0.01	24.27	31.57	-37.30	-25.60

Πιν. 3.24 Κατανομή SNR συναρτήσει της πιθανότητας μη υπέρβασης (διαστημικό σκάφος Venus Express, ζώνη συχνοτήτων W, Επίγειος Σταθμός Μαδρίτης).



Σχ. 3.3 SNR ανά Hz για τη ζεύξη Venus Express – Επίγειος Σταθμός Μαδρίτης.

Οι τιμές του λόγου SNR που προκύπτουν εδώ είναι παραπλήσιες με αυτές για το διαστημικό σκάφος MRO. Για πιθανότητα διακοπής ίση με 0.05 η διαφορά ανάμεσα στις ζώνες Ka και W είναι 33.88dB για κεραία διαμέτρου 34m και 29.48dB για κεραία διαμέτρου 70m.

- Venus Express – Canberra

CDF	$kT_{\text{sys}}$ (dBW)	$D_r=34\text{m}$		$D_r=70\text{m}$	
		$P_{\text{rec}}-A_{\text{atm}}-A_{\text{rain}}$ (dBW)	SNR (dB/Hz)	$P_{\text{rec}}-A_{\text{atm}}-A_{\text{rain}}$ (dBW)	SNR (dB/Hz)
0	-213.17	-153.34	59.83	-146.04	67.13
0.5	-212.35	-158.65	53.69	-151.35	60.99
0.7	-212.01	-163.11	48.90	-155.81	56.20
0.8	-211.74	-166.86	44.89	-159.56	52.19
0.9	-211.23	-173.76	37.48	-166.46	44.78
0.95	-210.51	-181.23	29.28	-173.93	36.58
0.97	-209.71	-187.17	22.53	-179.87	29.83
0.98	-209.01	-191.94	17.07	-184.64	24.37
0.99	-207.94	-199.99	7.95	-192.69	15.25

Πιν. 3.25 Αθροιστική κατανομή SNR για το διαστημικό σκάφος Venus Express, ζώνη συχνοτήτων Ka, Επίγειος Σταθμός Canberra.

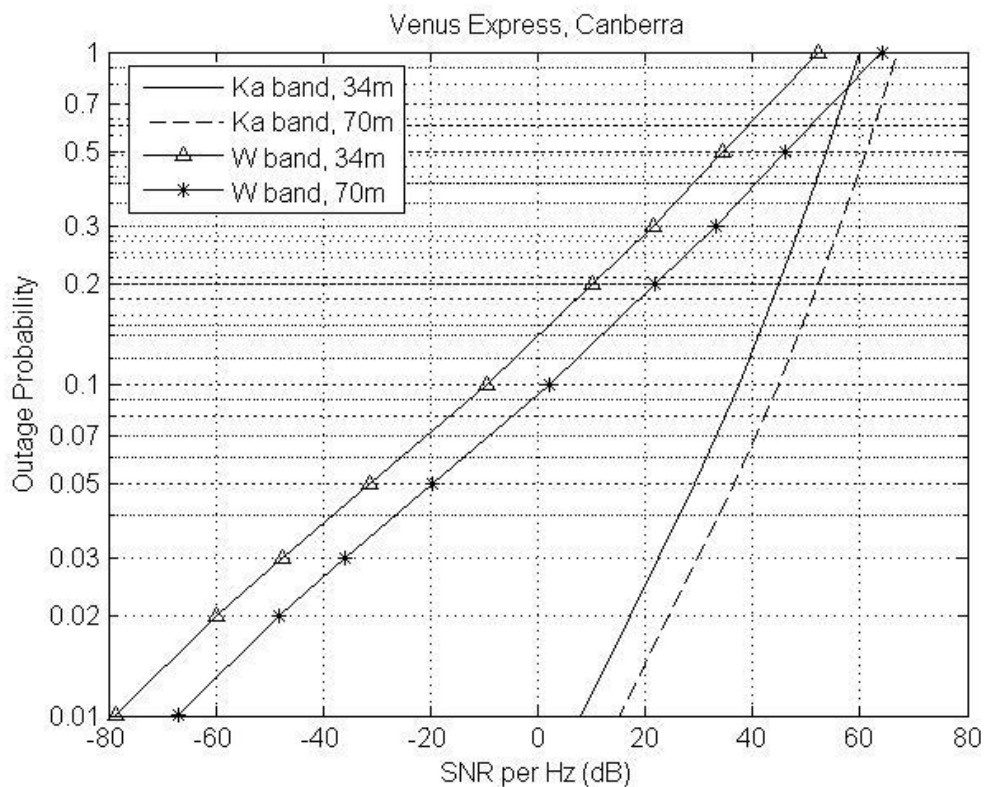
CDF	$kT_{\text{sys}}$ (dBW)	$D_r=34\text{m}$		$D_r=70\text{m}$	
		$P_{\text{rec}}-A_{\text{atm}}-A_{\text{rain}}$ (dBW)	SNR (dB/Hz)	$P_{\text{rec}}-A_{\text{atm}}-A_{\text{rain}}$ (dBW)	SNR (dB/Hz)
0	-210.38	-158.04	52.34	-146.34	64.04
0.5	-208.87	-174.44	34.44	-162.74	46.14
0.7	-208.40	-187.03	21.37	-175.33	33.07
0.8	-208.09	-198.08	10.01	-186.38	21.71
0.9	-207.34	-216.92	-9.58	-205.22	2.12
0.95	-205.80	-237.13	-31.33	-225.43	-19.63
0.97	-204.87	-252.54	-47.67	-240.84	-35.97
0.98	-204.42	-264.21	-59.79	-252.51	-48.09
0.99	-204.02	-282.72	-78.70	-271.02	-67.00

Πιν. 3.26 Αθροιστική κατανομή SNR για το διαστημικό σκάφος Venus Express, ζώνη συχνοτήτων W, Επίγειος Σταθμός Canberra.



Πιθανότητα Μη Υπέρβασης	SNR (dB/Hz)			
	Ka band		W band	
	$D_r=34m$	$D_r=70m$	$D_r=34m$	$D_r=70m$
1	59.83	67.13	52.34	64.04
0.5	53.69	60.99	34.44	46.14
0.3	48.90	56.20	21.37	33.07
0.2	44.89	52.19	10.01	21.71
0.1	37.48	44.78	-9.58	2.12
0.05	29.28	36.58	-31.33	-19.63
0.03	22.53	29.83	-47.67	-35.97
0.02	17.07	24.37	-59.79	-48.09
0.01	7.95	15.25	-78.70	-67.00

Πιν. 3.27 Κατανομή SNR συναρτήσει της πιθανότητας μη υπέρβασης (διαστημικό σκάφος Venus Express, ζώνη συχνοτήτων W, Επίγειος Σταθμός Canberra).



Σχ. 3.4 SNR ανά Hz για τη ζεύξη Venus Express – Επίγειος Σταθμός Canberra.

Για πιθανότητα διακοπής ίση με 0.05 και κεραία 34m η διαφορά ανάμεσα στις ζώνες Ka και W είναι 60.61dB για κεραία διαμέτρου 34m και 56.21dB για κεραία διαμέτρου 70m. Οι τιμές αυτές είναι περίπου ίσες με τις αντίστοιχες για την περίπτωση του διαστημικού σκάφους MRO. Παρατηρείται, δηλαδή, μια μείωση του SNR στη ζώνη W η οποία εξαρτάται από τα κλιματικά χαρακτηριστικά της περιοχής του κάθε επίγειου σταθμού και είναι περίπου ίδια για τις δύο αυτές διαστημικές αποστολές.

### 3.5.3 Mercury Planet Orbiter

Τα αποτελέσματα για την περίπτωση του διαστημικού σκάφους MPO παρουσιάζονται στους Πίνακες 3.28 έως 3.33 και στα Σχήματα 3.5 και 3.6.

- MPO – Μαδρίτη

CDF	$kT_{sys}$ (dBW)	$D_r=34m$		$D_r=70m$	
		$P_{rec}-A_{atm}-A_{rain}$ (dBW)	SNR (dB/Hz)	$P_{rec}-A_{atm}-A_{rain}$ (dBW)	SNR (dB/Hz)
0	-213.19	-167.64	45.54	-160.34	52.84
0.5	-212.42	-169.65	42.77	-162.35	50.07
0.7	-212.15	-171.49	40.65	-164.19	47.95
0.8	-211.95	-173.43	38.53	-166.13	45.83
0.9	-211.45	-177.42	34.03	-170.12	41.33
0.95	-210.20	-182.73	27.47	-175.43	34.77
0.97	-209.18	-187.48	21.70	-180.18	29.00
0.98	-208.54	-191.67	16.87	-184.37	24.17
0.99	-207.65	-199.89	7.76	-192.59	15.06

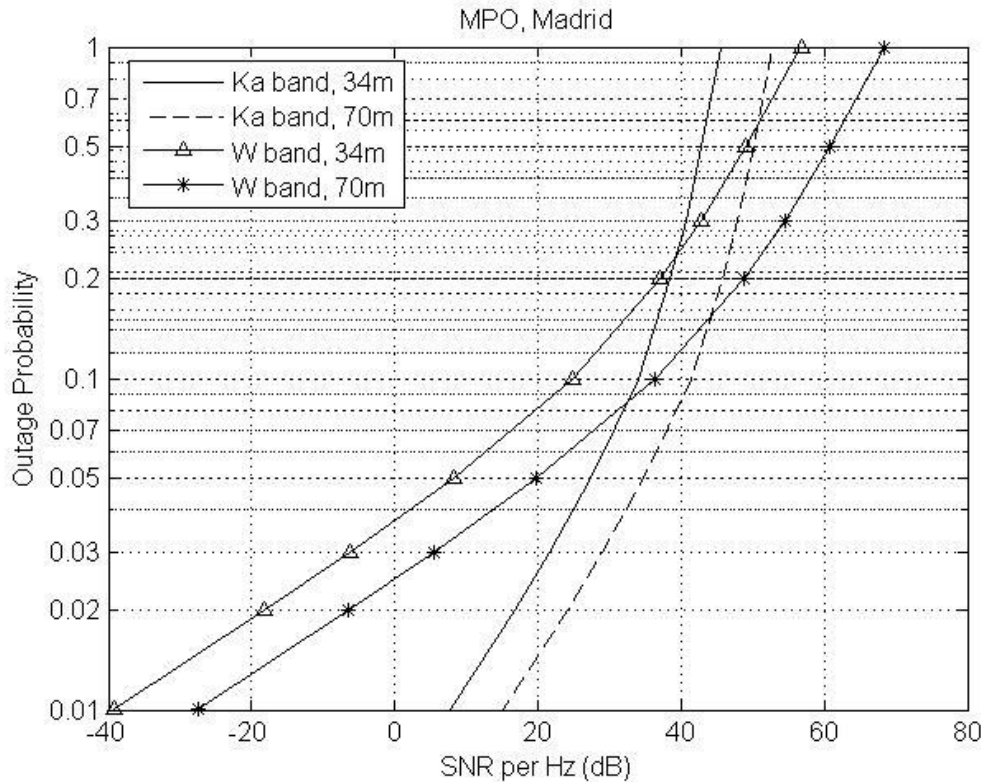
Πιν. 3.28 Αθροιστική κατανομή SNR για το διαστημικό σκάφος MPO, ζώνη συχνοτήτων Ka, Επίγειος Σταθμός Μαδρίτης

CDF	$kT_{sys}$ (dBW)	$D_r=34m$		$D_r=70m$	
		$P_{rec}-A_{atm}-A_{rain}$ (dBW)	SNR (dB/Hz)	$P_{rec}-A_{atm}-A_{rain}$ (dBW)	SNR (dB/Hz)
0	-210.24	-153.49	56.75	-141.79	68.45
0.5	-208.78	-159.78	49.00	-148.08	60.70
0.7	-208.32	-165.58	42.75	-153.88	54.45
0.8	-208.02	-171.02	36.99	-159.32	48.69
0.9	-207.29	-182.56	24.73	-170.86	36.43
0.95	-205.79	-197.64	8.15	-185.94	19.85
0.97	-204.86	-211.06	-6.20	-199.36	5.50
0.98	-204.42	-222.63	-18.21	-210.93	-6.51
0.99	-204.02	-243.22	-39.20	-231.52	-27.50

Πιν. 3.29 Αθροιστική κατανομή SNR για το διαστημικό σκάφος MPO, ζώνη συχνοτήτων W, Επίγειος Σταθμός Μαδρίτης

Πιθανότητα Μη Υπέρβασης	SNR (dB/Hz)			
	Ka band		W band	
	$D_r=34m$	$D_r=70m$	$D_r=34m$	$D_r=70m$
1	45.54	52.84	56.75	68.45
0.5	42.77	50.07	49.00	60.70
0.3	40.65	47.95	42.75	54.45
0.2	38.53	45.83	36.99	48.69
0.1	34.03	41.33	24.73	36.43
0.05	27.47	34.77	8.15	19.85
0.03	21.70	29.00	-6.20	5.50
0.02	16.87	24.17	-18.21	-6.51
0.01	7.76	15.06	-39.20	-27.50

Πιν. 3.30 Κατανομή SNR συναρτήσει της πιθανότητας μη υπέρβασης (διαστημικό σκάφος MPO, ζώνη συχνοτήτων W, Επίγειος Σταθμός Μαδρίτης).



Σχ. 3.5 SNR ανά Hz για τη ζεύξη MPO – Επίγειος Σταθμός Μαδρίτης.

Στην περίπτωση του διαστημικού σκάφους MPO παρατηρείται μια διαφορετική εικόνα σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, υπάρχει ένα εύρος πιθανοτήτων διακοπής για το οποίο η ζώνη W παρουσιάζει καλύτερη επίδοση από τη ζώνη Ka, ανεξάρτητα από την κεραία λήψης. Το πλεονέκτημα όμως αυτό δε διατηρείται για μικρές τιμές της πιθανότητας διακοπής οι οποίες πρακτικά ενδιαφέρουν τη σχεδίαση του συστήματος. Συγκεκριμένα, για πιθανότητα διακοπής ίση με 0.05 η ζώνη W υπολείπεται της ζώνης Ka κατά 19.32dB όσον αφορά στο λόγο SNR για κεραία διαμέτρου 34m. Για κεραία διαμέτρου 70m η αντίστοιχη διαφορά γίνεται 14.92dB. Αυτές οι τιμές είναι σημαντικά μικρότερες από εκείνες που υπολογίστηκαν για τις προηγούμενες δύο διαστημικές αποστολές, όμως η υπονόμευση της επίδοσης του συστήματος με την αύξηση της συχνότητας λειτουργίας γίνεται και εδώ φανερή.

- MPO – Canberra

CDF	$kT_{\text{sys}}$ (dBW)	$D_r=34\text{m}$		$D_r=70\text{m}$	
		$P_{\text{rec}}-A_{\text{atm}}-A_{\text{rain}}$ (dBW)	SNR (dB/Hz)	$P_{\text{rec}}-A_{\text{atm}}-A_{\text{rain}}$ (dBW)	SNR (dB/Hz)
0	-213.17	-169.85	43.32	-162.55	50.62
0.5	-212.35	-175.16	37.18	-167.86	44.48
0.7	-212.01	-179.62	32.39	-172.32	39.69
0.8	-211.74	-183.37	28.38	-176.07	35.68
0.9	-211.23	-190.27	20.97	-182.97	28.27
0.95	-210.51	-197.74	12.77	-190.44	20.07
0.97	-209.71	-203.68	6.02	-196.38	13.32
0.98	-209.01	-208.45	0.56	-201.15	7.86
0.99	-207.94	-216.50	-8.56	-209.20	-1.26

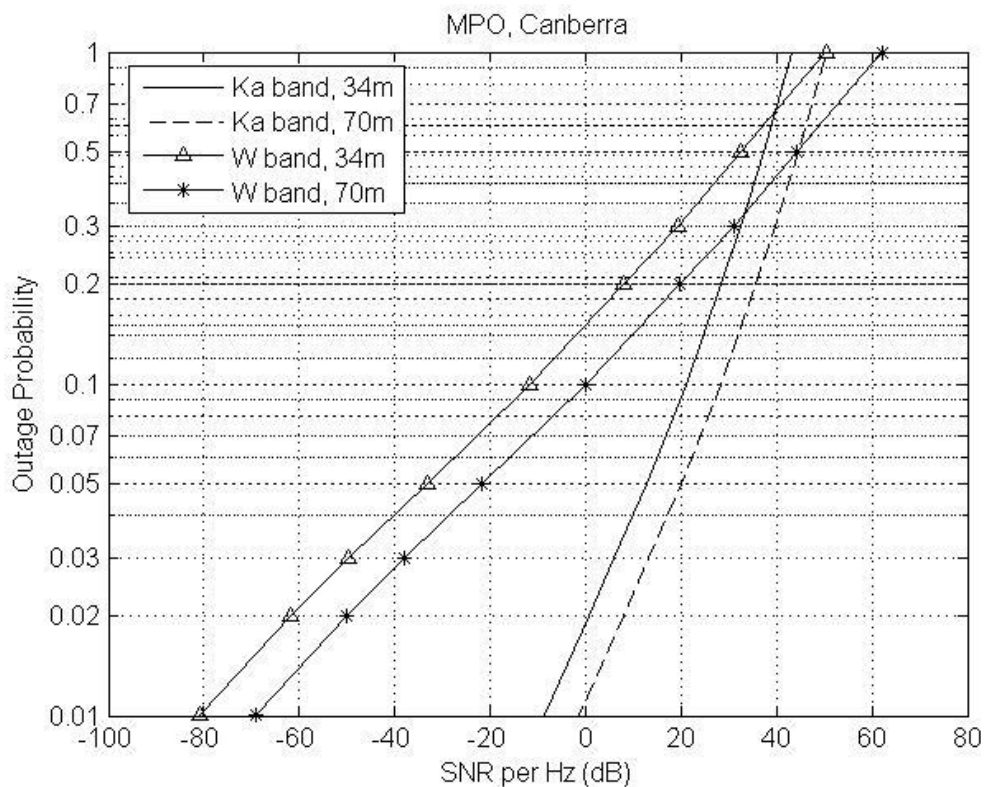
Πιν. 3.31 Αθροιστική κατανομή SNR για το διαστημικό σκάφος MPO, ζώνη συχνοτήτων Ka, Επίγειος Σταθμός Canberra

CDF	$kT_{\text{sys}}$ (dBW)	$D_r=34\text{m}$		$D_r=70\text{m}$	
		$P_{\text{rec}}-A_{\text{atm}}-A_{\text{rain}}$ (dBW)	SNR (dB/Hz)	$P_{\text{rec}}-A_{\text{atm}}-A_{\text{rain}}$ (dBW)	SNR (dB/Hz)
0	-210.38	-160.03	50.35	-148.33	62.05
0.5	-208.87	-176.43	32.45	-164.73	44.15
0.7	-208.40	-189.02	19.38	-177.32	31.08
0.8	-208.09	-200.07	8.02	-188.37	19.72
0.9	-207.34	-218.91	-11.57	-207.21	0.13
0.95	-205.80	-239.12	-33.32	-227.42	-21.62
0.97	-204.87	-254.53	-49.66	-242.83	-37.96
0.98	-204.42	-266.20	-61.78	-254.50	-50.08
0.99	-204.02	-284.71	-80.69	-273.01	-68.99

Πιν. 3.32 Αθροιστική κατανομή SNR για το διαστημικό σκάφος MPO, ζώνη συχνοτήτων W, Επίγειος Σταθμός Canberra

Πιθανότητα Μη Υπέρβασης	SNR (dB/Hz)			
	Ka band		W band	
	$D_r=34m$	$D_r=70m$	$D_r=34m$	$D_r=70m$
1	43.32	50.62	50.35	62.05
0.5	37.18	44.48	32.45	44.15
0.3	32.39	39.69	19.38	31.08
0.2	28.38	35.68	8.02	19.72
0.1	20.97	28.27	-11.57	0.13
0.05	12.77	20.07	-33.32	-21.62
0.03	6.02	13.32	-49.66	-37.96
0.02	0.56	7.86	-61.78	-50.08
0.01	-8.56	-1.26	-80.69	-68.99

Πιν. 3.33 Κατανομή SNR συναρτήσει της πιθανότητας μη υπέρβασης (διαστημικό σκάφος MPO, ζώνη συχνοτήτων W, Επίγειος Σταθμός Canberra).



Σχ. 3.6 SNR ανά Hz για τη ζεύξη MPO – Επίγειος Σταθμός Canberra.

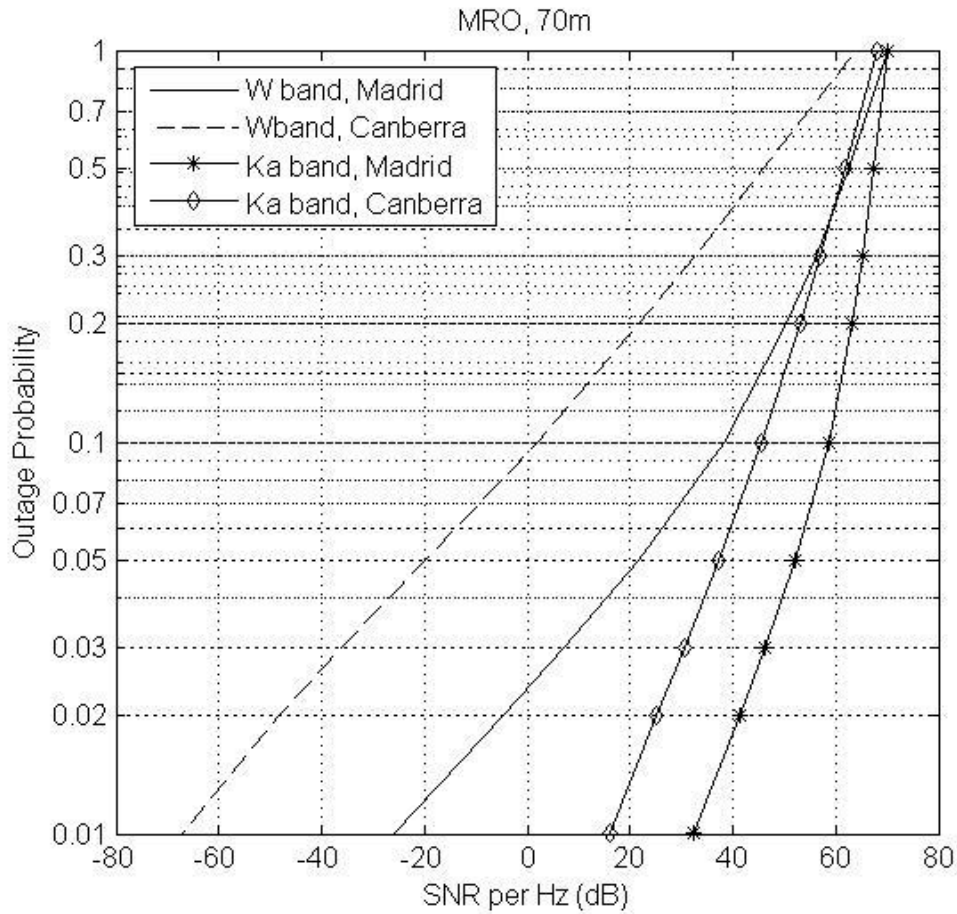
Όπως συνέβη σε όλους τους υπολογισμούς για τον επίγειο σταθμό της Canberra μέχρι στιγμής, ο λόγος SNR παρουσιάζει σημαντικά μικρότερες τιμές απ' ό,τι στην περίπτωση της Μαδρίτης, γεγονός που γίνεται πιο έντονο στη ζώνη W. Εξάλλου, οι τιμές του λόγου SNR στη ζώνη W παραμένουν σημαντικά χαμηλότερες απ' ό,τι στη ζώνη Ka. Για πιθανότητα διακοπής ίση με 0.05 η διαφορά του λόγου SNR ανάμεσα στις δύο ζώνες συχνοτήτων είναι 46.09dB στην περίπτωση κεραίας διαμέτρου 34m και 41.69dB στην περίπτωση κεραίας διαμέτρου 70m. Οι τιμές αυτές είναι και πάλι αρκετά μικρότερες από τις αντίστοιχες για τα διαστημικά σκάφη MRO και Venus Express, δεν παύουν όμως να αποτυπώνουν μια σημαντική επιδείνωση της επίδοσης στη ζώνη W.

#### 3.5.4 Παρατηρήσεις

Συγκρίνοντας τα αριθμητικά αποτελέσματα των Ενοτήτων 3.5.1-3.5.2 μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για την επίδραση των διαφόρων χαρακτηριστικών μιας ζεύξης στην τιμή του λόγου SNR που επιτυγχάνεται στο δέκτη.

Συγκεκριμένα:

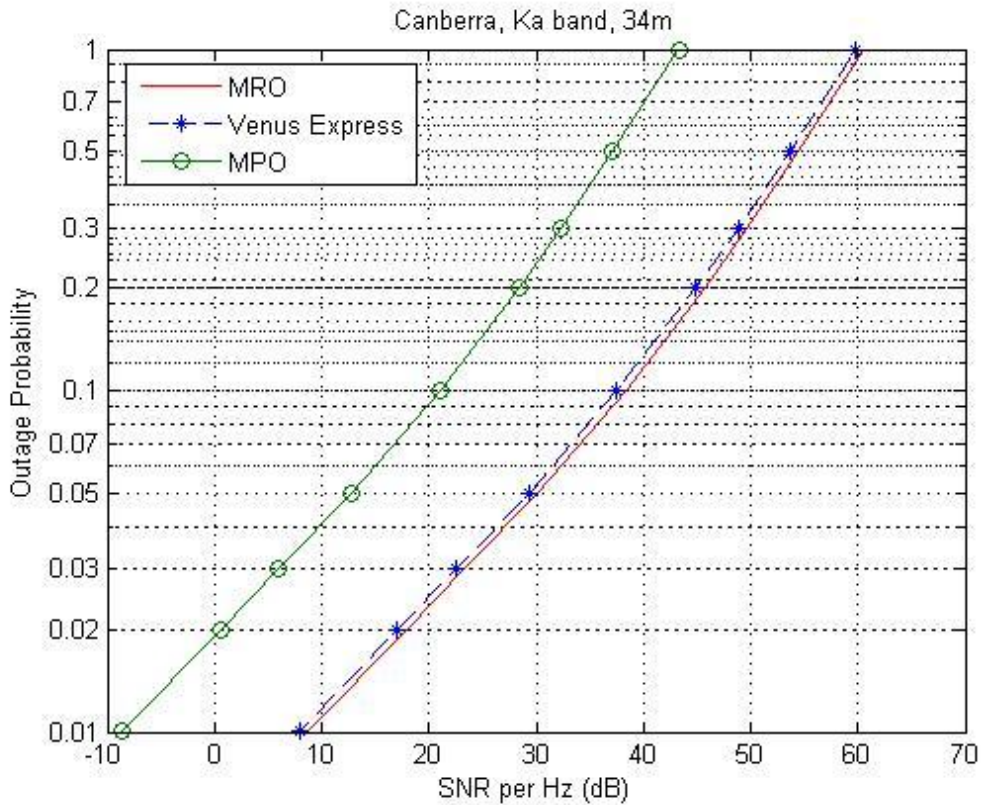
- Λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της ατμόσφαιρας προκύπτει για κάθε περίπτωση μια μείωση στην τιμή του SNR η οποία εξαρτάται από τον επίγειο σταθμό που εξετάζεται. Έτσι, η μείωση του λόγου SNR παρουσιάζεται μεγαλύτερη στην περίπτωση της Canberra απ' ό,τι στην περίπτωση της Μαδρίτης, καθώς η αντίστοιχη επιβάρυνση λόγω ατμοσφαιρικών φαινομένων είναι μεγαλύτερη. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 3.7 απεικονίζεται αυτή η διαφορά ανάμεσα στους δύο επίγειους σταθμούς στην περίπτωση του διαστημικού σκάφους MRO, σε αμφότερες τις ζώνες Ka και W και για κεραία διαμέτρου 70m. Για πιθανότητα διακοπής ίση με 0.05 η διαφορά του λόγου SNR ανάμεσα στους δύο επίγειους σταθμούς είναι περίπου 27dB σε όλες τις περιπτώσεις αποστολών και κεραιών λήψης.



Σχ. 3.7 SNR ανά Hz για το διαστημικό σκάφος MRO, ζώνη συχνοτήτων W, κεραία λήψης 70m

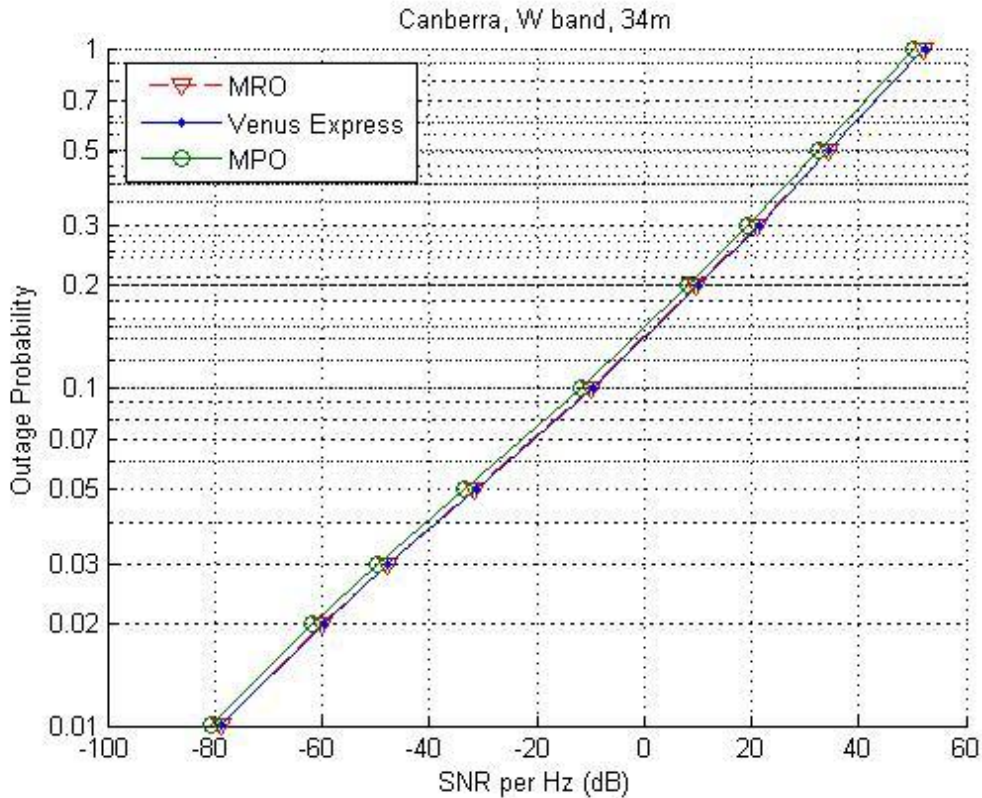
- Όσον αφορά στη ζώνη συχνοτήτων Ka οι αποστολές MRO και Venus Express παρουσιάζουν παραπλήσια μεταξύ τους αποτελέσματα. Στην περίπτωση της αποστολής Bericolombo, όμως, προκύπτουν μικρότερες τιμές του λόγου SNR για δεδομένη πιθανότητα διακοπής, δηλαδή το σύστημα παρουσιάζει χειρότερη επίδοση. Το γεγονός αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 3.8 για την περίπτωση του επίγειου σταθμού της Canberra και για κεραία διαμέτρου 34m.





Σχ. 3.8 SNR ανά Hz για τη ζώνη συχνοτήτων Ka, επίγειος σταθμός Canberra, κεραία λήψης 34m

Όσον αφορά στη ζώνη W, δεν παρατηρείται σημαντική διαφορά ανάμεσα στην επίδοση των τριών διαστημικών αποστολών. Αντίθετα, και στις τρεις περιπτώσεις τα αριθμητικά αποτελέσματα είναι παραπλήσια (Σχ.3.9). Δηλαδή, ενώ η ζεύξη με το διαστημικό σκάφος MPO εμφανίζει χειρότερη επίδοση στη ζώνη Ka το μειονέκτημά της αυτό σε σχέση με τις άλλες δύο διαστημικές αποστολές εξαλείφεται στη ζώνη W.



Σχ. 3.9 SNR ανά Hz για τη ζώνη συχνοτήτων W, επίγειος σταθμός Canberra, κεραία λήψης 34m

- Όπως ήταν αναμενόμενο, σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρούνται υψηλότερες τιμές του λόγου SNR στην περίπτωση κεραίας διαμέτρου 70m. Συγκεκριμένα, για πιθανότητα διακοπής ίση με 0.05, το κέρδος από τη χρήση κεραιών μεγαλύτερης διαμέτρου μεταφράζεται σε μια μείωση κατά 4.4dB της διαφοράς του λόγου SNR ανάμεσα στη ζώνη Ka και W (σε σχέση με την περίπτωση κεραίας 34m).
- Οι επίγειοι σταθμοί της ESA στην Ισπανία και την Αυστραλία βρίσκονται σε μικρή απόσταση από τους αντίστοιχους σταθμούς της NASA και σε παρόμοια κλιματικά περιβάλλοντα. Επομένως, αναμένεται και εκεί να καταγράφονται παρόμοιες επιδόσεις με αυτές που παρουσιάστηκαν εδώ για τους επίγειους σταθμούς της NASA.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] P.D.Arapoglou, A.Panagopoulos, M. Bertinelli “Cooperative Deep Space Communications at Ka Band : Outage Performance Analysis” in SPACOMM 2010, Athens, June 2010.
- [2] “Telecommunication requirements for manned and unmanned deep-space research”, Rec. ITU\_R SA.1014-1
- [3] <http://marsprogram.jpl.nasa.gov/mro/mission/communications/>
- [4] <http://www.aerospaceguide.net/spacecraft/venusexpress.html>
- [5] <http://www.rssd.esa.int/SB-general/Projects/BepiColombo-OLD/BepiColomboSTRep/Chapter6fin.pdf>
- [6] S. Shambayati, On the Use of W – Band for Deep Space Communications, IPN Progress Report 42-154 August 15, 2003
- [7] Propagation data and prediction methods required for the design of Earth – space telecommunication systems Rec. ITU-R P.618-10



## Κεφάλαιο Τέταρτο:

### Τεχνικές Κωδικοποίησης FEC σε Αποστολές Βαθέως Διαστήματος

#### 4.1 Γενικά

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η κωδικοποίηση FEC (Forward Error Correction) παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της επίδοσης ενός συστήματος επικοινωνιών βαθέως διαστήματος καθώς χωρίς την εφαρμογή κωδικοποίησης καθίσταται αδύνατη η αξιοποίηση των ζεύξεων βαθέων διαστήματος. Μάλιστα, η πρόοδος στις τεχνικές κωδικοποίησης FEC από την οποία ωφελήθηκαν όλες οι κατηγορίες ασύρματων συστημάτων οφείλεται στην αναγκαιότητα εντατικής μελέτης των τεχνικών κωδικοποίησης προκειμένου να λειτουργήσουν σε ζεύξεις βαθέως διαστήματος.

Μέχρι σήμερα το κύριο ζητούμενο για την κωδικοποίηση διαύλου ήταν η επίτευξη υψηλού κέρδους κωδικοποίησης για τις πολύ χαμηλές τιμές του λόγου  $E_b/N_0$  στη λήψη. Ως κέρδος κωδικοποίησης ορίζεται η μείωση που επιτυγχάνεται λόγω της κωδικοποίησης στην απαιτούμενη τιμή σηματοθορυβικού λόγου για την επίτευξη συγκεκριμένης πιθανότητας λανθασμένων ψηφίων. Για τις ζεύξεις βαθέως διαστήματος κύριος περιοριστικός παράγοντας υπήρξε πάντα η περιορισμένη ισχύς που είναι διαθέσιμη σε ένα διαστημικό σκάφος. Όσο ο ρυθμός μετάδοσης παρέμενε χαμηλός και το διαθέσιμο εύρος ζώνης αρκετά ευρύ δεν εμφανίζονταν σημαντικοί περιορισμοί ως προς τη φασματική απόδοση και μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν κώδικες χαμηλού ρυθμού, δηλαδή υψηλής διορθωτικής ικανότητας. Όμως, η μεταβολή του χαρακτήρα των διαστημικών αποστολών θέτει νέες απαιτήσεις για την επίδοση των κωδίκων που θα χρησιμοποιούνται μελλοντικά. [1] Οι μελλοντικές αποστολές αναμένεται να απαιτούν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης ενώ θα υπόκεινται σε σημαντικούς περιορισμούς ως προς το εύρος ζώνης. Επομένως, προκύπτει η ανάγκη για την υλοποίηση νέων σχημάτων κωδικοποίησης, μέσω των οποίων θα επιτυγχάνεται υψηλή φασματική απόδοση, λειτουργία κοντά στο όριο Shannon και χαμηλή πολυπλοκότητα. Κυρίαρχο ρόλο στη βελτίωση της επίδοσης διαδραματίζουν

νέες ισχυρές μέθοδοι επαναληπτικής κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης, με χαρακτηριστικότερα παραδείγματα τους κώδικες turbo και LDPC (Low Density Parity Check). [2]

Η αρχική μορφή των κωδίκων turbo περιελάμβανε την παράλληλη χρήση δύο συνελκτικών κωδικοποιητών και ένα σχήμα επαναληπτικής αποκωδικοποίησης. Σήμερα, η έρευνα σε αυτόν τον τομέα έχει οδηγήσει σε διάφορες αρχιτεκτονικές που σκοπεύουν στην περεταίρω βελτίωση της επίδοσής τους. Κοινό χαρακτηριστικό των κωδίκων αυτής της οικογένειας είναι βέβαια η υψηλή διορθωτική τους ικανότητα, η οποία επιτρέπει σε ένα σύστημα επικοινωνιών να λειτουργεί κοντά στο όριο Shannon. Αυτή τη στιγμή, οι κώδικες turbo αποτελούν την καλύτερη επιλογή για συστήματα που απαιτούν τη χρήση κωδίκων χαμηλού ρυθμού. Οι κώδικες LDPC αποτελούν την εναλλακτική σχεδιαστική επιλογή που εγγυάται αυξημένες επιδόσεις. Το κοινό τους χαρακτηριστικό είναι ότι για την αναπαράστασή τους γίνεται χρήση αραιών πινάκων ελέγχου ισοτιμίας. Οι κώδικες LDPC εμφανίζουν μικρότερη πολυπλοκότητα στη διαδικασία αποκωδικοποίησής τους σε σχέση με τους κώδικες turbo με αποτέλεσμα να είναι κατάλληλοι για συστήματα που λειτουργούν υπό υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Επίσης παρουσιάζουν καλύτερη επίδοση για λειτουργία υπό πολύ χαμηλές τιμές BER ( $10^{-9}$ ).

Παράλληλα, η μετάβαση από ένα μοντέλο ζεύξεων σημείου προς σημείο σε μια αρχιτεκτονική διαπλανητικού δικτύου (βλ. Ενότητα 1.3) συνεπάγεται ότι τα νέα σχήματα κωδικοποίησης θα πρέπει να ενσωματώνουν πρόσθετα χαρακτηριστικά ανάλογα με το τμήμα του (υπο)συστήματος στο οποίο εφαρμόζονται. Για παράδειγμα, στην περίπτωση ζεύξεων μεταξύ εξερευνητικών σκαφών που συμμετέχουν σε πλανητικό δίκτυο, η χαμηλή πολυπλοκότητα είναι αυτή που οδηγεί κάθε σχεδιαστική επιλογή. Επομένως, παρουσιάζεται η ανάγκη για αποτελεσματικούς κώδικες που θα παρέχουν τη δυνατότητα απλής υλοποίησης. Σε άλλες περιπτώσεις το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι ο πιο σημαντικός περιοριστικός παράγοντας της επίδοσης μιας ζεύξης με αποτέλεσμα να υφίσταται ανάγκη για κώδικες που επιτυγχάνουν υψηλή φασματική απόδοση.

Τα είδη κωδίκων που αναφέρθηκαν αφορούν κωδικοποίηση σε επίπεδο ψηφίων. Σε αυτήν την κωδικοποίηση είναι δυνατό να προστεθεί μια κωδικοποίηση σε επίπεδο πακέτων, η οποία υλοποιείται σε ανώτερα

στρώματα της ζεύξης (link layer/packet level FEC). Σκοπός της είναι να αντιμετωπίσει καταιγισμούς λαθών που οδηγούν σε εσφαλμένη λήψη ολόκληρων πακέτων. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν οι κώδικες LEC (Long Erasure Correcting codes).

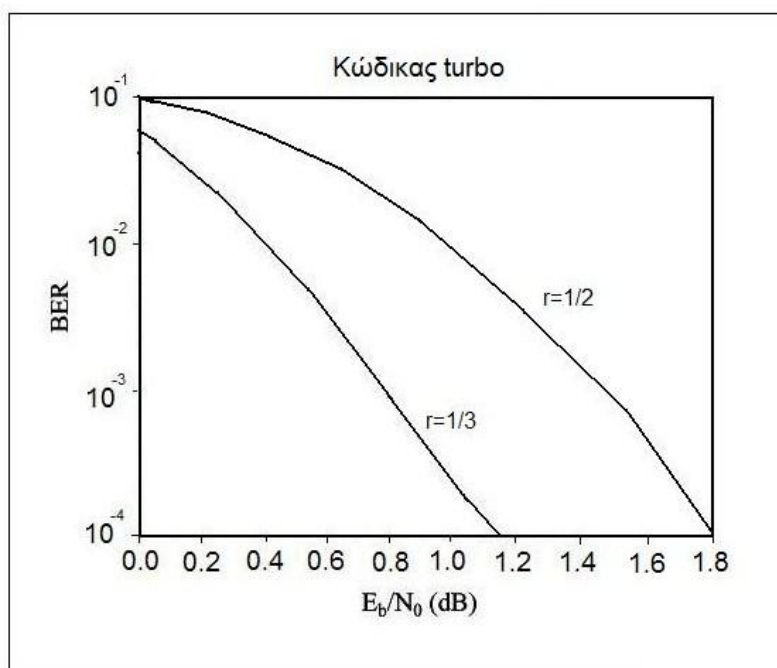
Οι σύγχρονες αποστολές έχουν ήδη ενσωματώσει ορισμένες από τις εξελίξεις στον τομέα της κωδικοποίησης. Στην περίπτωση του διαστημικού σκάφους MRO υπάρχει η δυνατότητα για χρήση διαφορετικών σχημάτων κωδικοποίησης αλλά και διαμόρφωσης. Για την επίτευξη μέγιστου ρυθμού μετάδοσης (6Mbps) χρησιμοποιείται κώδικας Reed Solomon (255, 223). Ο κώδικας αυτός μπορεί να συνδυαστεί με συνελκτικό κώδικα (7, 1/2) για τη δημιουργία ενός αλυσιδωτού κώδικα που επιτυγχάνει ρυθμό κωδικοποιημένης πληροφορίας ίσο με 3Mbps. Όμως, υπάρχει και η δυνατότητα χρήσης turbo κώδικα ( $r = 1/2$  ή  $1/3$  ή  $1/4$  ή  $1/6$ ) για τη μεγιστοποίηση του κέρδους κωδικοποίησης. [3] Στην περίπτωση του διαστημικού σκάφους Venus Express συνδυάζεται συνελκτικός κώδικας με κώδικα Reed Solomon.

## 4.2 Αριθμητικά Αποτελέσματα

Στην Ενότητα αυτή υπολογίζεται η επίδοση σε όρους πιθανότητας λανθασμένων bit (Bit Error Rate, BER) των ζεύξεων βαθέως διαστήματος που εξετάστηκαν στο Κεφάλαιο 3. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η ζεύξη του επίγειου σταθμού της Μαδρίτης με το διαστημικό σκάφος MRO για διάφορες περιπτώσεις ρυθμού κωδικοποίησης και στάθμης διαμόρφωσης. Αρχικά πραγματοποιούνται υπολογισμοί για την περίπτωση turbo κωδικοποίησης με  $r=1/2$  και  $1/3$  σε συνδυασμό με διαμόρφωση BPSK. Στη συνέχεια, θεωρείται κωδικοποίηση LDPC σε συνδυασμό με διάφορα σχήματα κωδικοποίησης. Για την πραγματοποίηση των υπολογισμών θεωρούμε το εύρος ζώνης του συστήματος ίσο με 50kHz.

### 4.2.1 Κωδικοποίηση Turbo

Σε κάθε συνδυασμό διαμόρφωσης και κωδικοποίησης αντιστοιχεί μια καμπύλη που δίνει την τιμή του BER που επιτυγχάνεται για δεδομένη τιμή του λόγου SNR ή  $E_b/N_0$ . Το μέγεθος της ενέργειας ψηφίου προς τη φασματική πυκνότητα θορύβου είναι μέγεθος εναλλακτικό του SNR το οποίο χρησιμοποιείται γιατί επιτρέπει τη σύγκριση μεταξύ συστημάτων διαφορετικού εύρους ζώνης. Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η τιμή BER που επιτυγχάνεται συναρτήσει της τιμής  $E_b/N_0$  σε δίαυλο AWGN για turbo κωδικοποίηση με ρυθμό κώδικα 1/2 και 1/3. [4]



Σχ. 4.1 BER συναρτήσει  $E_b/N_0$  για turbo κώδικα ρυθμού 1/2 και 1/3.

Γνωρίζοντας τις τιμές του λόγου SNR για μια ζεύξη, ο λόγος  $E_b/N_0$  υπολογίζεται ακολουθώντας την εξής διαδικασία:

- Για τον λόγο SNR ισχύει γενικά:

$$SNR = \frac{P_R}{N_o B} \quad (4.1)$$

όπου  $P_R$  η ισχύς λήψης,  $N_o$  φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου και  $B$  το εύρος ζώνης του συστήματος.

Για την ισχύ λήψης ισχύει:



$$P_R = \frac{E_S}{T_S} \quad (4.2)$$

όπου  $E_S$  η ενέργεια συμβόλου και  $T_S$  η διάρκεια συμβόλου.

Θεωρώντας ιδανικούς παλμούς μορφοποίησης, οπότε ισχύει  $B = \frac{1}{T_S}$ ,

προκύπτει τελικά:

$$SNR = \frac{E_S}{N_o} \quad (4.3)$$

Ας σημειωθεί εδώ ότι με τον όρο SNR αναφερόμαστε στο σηματοθορυβικό λόγο του συστήματος ο οποίος διαφέρει από το μέγεθος SNR ανά Hz που υπολογίσαμε στο Κεφάλαιο 3. Συγκεκριμένα, για  $B=50\text{kHz}$  ο λόγος SNR προκύπτει από τον λόγο SNR ανά Hz ως εξής:

$$SNR_{50\text{kHz}} = SNR_{1\text{Hz}} - 47\text{dB} \quad (4.4)$$

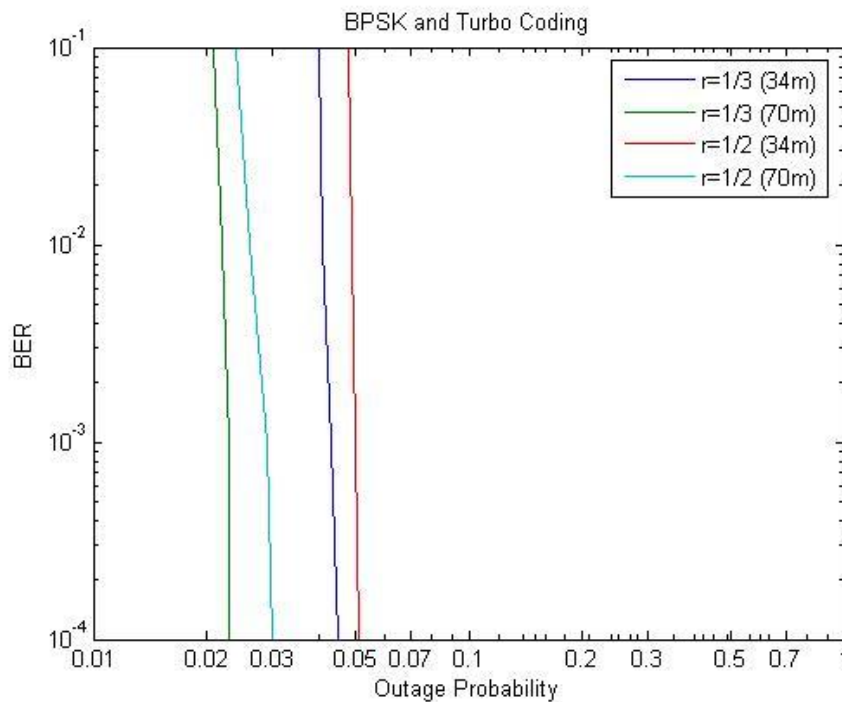
- Ο υπολογισμός του λόγου  $E_b/N_o$  γίνεται γνωρίζοντας τον ρυθμό κώδικα  $r_c$  του σχήματος κωδικοποίησης και τη στάθμη διαμόρφωσης  $M$  που χρησιμοποιείται, όπου κάθε σύμβολο αποτελείται από  $\log_2 M$  bits. Συνεπώς,

$$\frac{E_S}{N_o} = \frac{E_b}{N_o} \times r_c \times \log_2 M \quad (4.5)$$

Επομένως, χρησιμοποιώντας τις (4.3),(4.4) και (4.5) μπορεί να υπολογιστεί η τιμή  $E_b/N_o$  που αντιστοιχεί σε κάθε τιμή του λόγου SNR ανά Hz που υπολογίστηκε στο Κεφάλαιο 3 για τη συγκεκριμένη ζεύξη. Στη συνέχεια, με βάση το Σχήμα 4.1 εντοπίζεται η αντίστοιχη τιμή του BER για κάθε ρυθμό κώδικα. Καθώς κάθε τιμή SNR (ή ισοδύναμα  $E_b/N_o$ ) αντιστοιχεί σε κάποια πιθανότητα διακοπής, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται τελικά με τη μορφή διαγράμματος του ρυθμού εσφαλμένων ψηφίων συναρτήσει της πιθανότητας αυτής (Σχ. 4.2).

Παρατηρούμε ότι σε κάθε περίπτωση η καμπύλη που προκύπτει είναι μια ευθεία σχεδόν κατακόρυφη, η οποία αντιστοιχεί σε μια ουσιαστικά σταθερή τιμή της πιθανότητας διακοπής. Αυτό συμβαίνει γιατί το εύρος των τιμών του λόγου  $E_b/N_o$  που αντιστοιχεί στο εύρος τιμών BER που συνήθως ενδιαφέρει

(έως  $10^{-4}$ ) είναι πολύ μικρό σε σχέση με το εύρος των τιμών SNR που επιτυγχάνονται από τη ζεύξη. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα η μεταβολή του  $E_b/N_0$  μέσα σε αυτό το μικρό διάστημα να επιφέρει μια πολύ μικρή μεταβολή της αντίστοιχης τιμής της πιθανότητας διακοπής. Για παράδειγμα, στην περίπτωση ρυθμού 1/2, ο λόγος  $E_b/N_0$  του Σχήματος 4.1 βρίσκεται στο διάστημα από 0dB έως 1.8dB. Οι δύο ακραίες τιμές αντιστοιχούν σε SNR ανά Hz ίσο με 44dB και 45.8dB αντίστοιχα. Με βάση το Σχήμα 3.1 για την περίπτωση της ζώνης Ka και κεραίας επίγειου σταθμού 70m, οι αντίστοιχες πιθανότητες διακοπής είναι 0.024 και 0.03. Ας σημειωθεί εδώ ότι το σύστημα μπορεί να επιτύχει SNR ανά Hz μεγαλύτερο των 45.8dB που θα αντιστοιχεί σε τιμή του BER μικρότερη του  $10^{-4}$ .

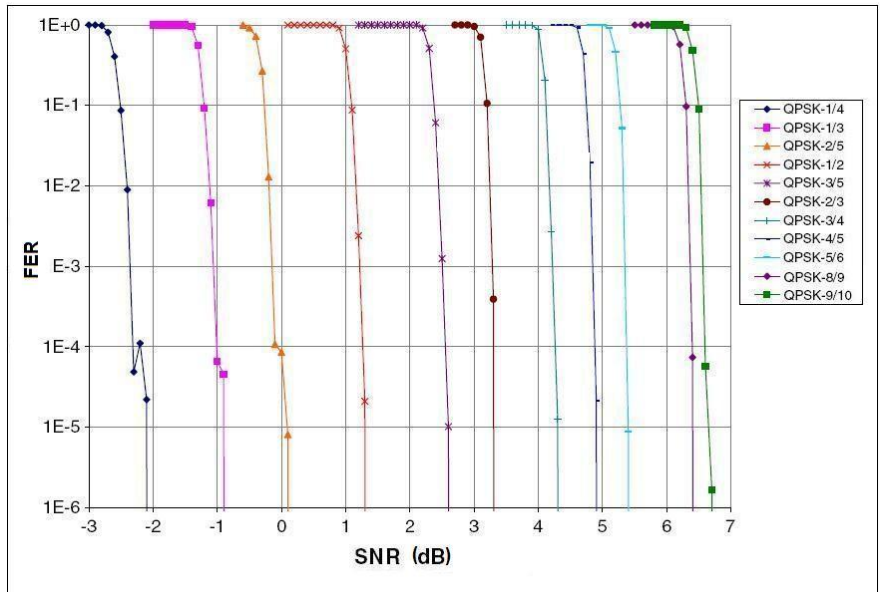


Σχ. 4.2 Ρυθμός εσφαλμένων ψηφίων και πιθανότητα διακοπής για τη ζεύξη επίγειου σταθμού Μαδρίτης – διαστημικού σκάφους MRO, ζώνη συχνοτήτων Ka. Κεραία επίγειου σταθμού διαμέτρου 34m και 70m. Διαμόρφωση BPSK και κωδικοποίηση turbo ρυθμού 1/2 και 1/3.

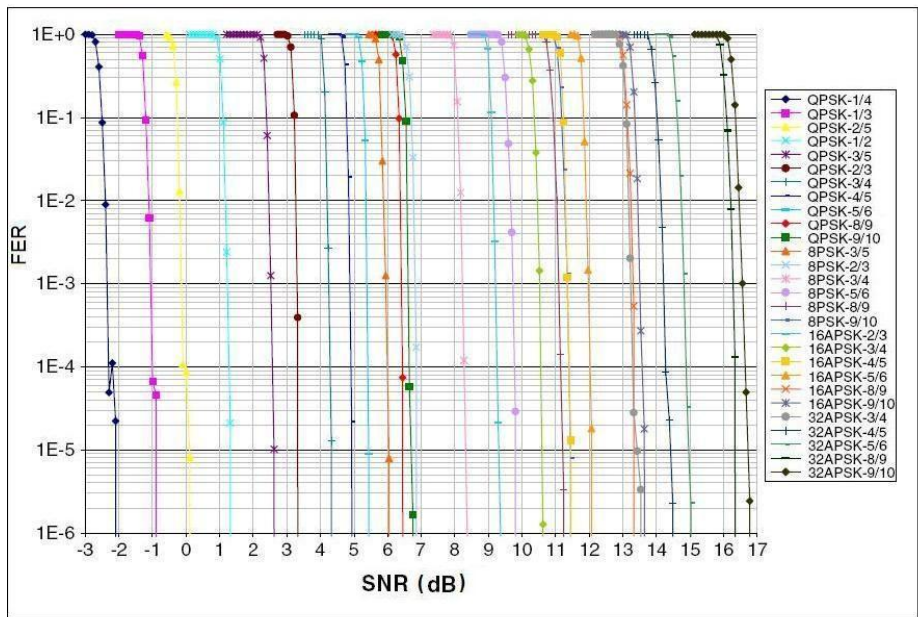
### 4.2.2 Κωδικοποίηση LDPC

Τα Σχήματα 4.3 και 4.4 παρουσιάζουν την επίδοση κωδίκων LDPC διαφόρων ρυθμών σε όρους ρυθμού εσφαλμένων πακέτων (Frame Error Rate, FER) για διάφορες περιπτώσεις σχήματος διαμόρφωσης. [5] Στην περίπτωση αυτή δε χρειάζεται να υπολογιστεί η τιμή του λόγου  $E_b/N_0$ . Χρησιμοποιείται μόνο η (4.4) για τον υπολογισμό του συνολικού SNR του συστήματος με βάση το SNR ανά Hz του Κεφαλαίου 3. Στη συνέχεια, με βάση το κατάλληλο από τα Σχήματα 4.3 και 4.4 υπολογίζεται η κατανομή FER που αντιστοιχεί σε κάθε περίπτωση λόγω της τυχαίας επίδρασης των ατμοσφαιρικών φαινομένων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.5 και 4.6.

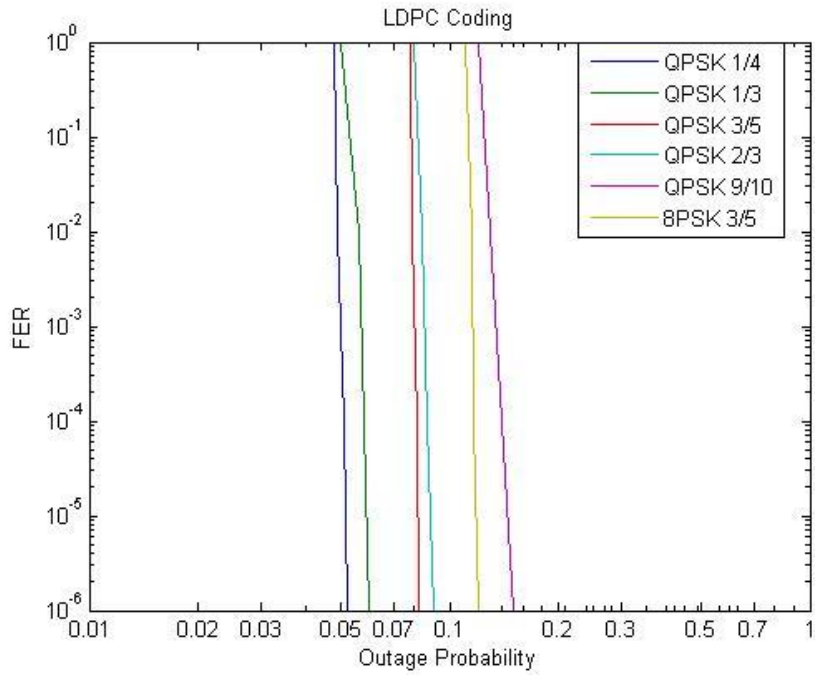
Και πάλι τα αποτελέσματα έχουν την ίδια μορφή η οποία σχολιάστηκε στην περίπτωση της κωδικοποίησης turbo. Παρατηρούμε, επίσης, ότι η επίδοση για κεραία διαμέτρου 70m υπερτερεί και στην περίπτωση της κωδικοποίησης turbo αλλά και σε αυτήν της κωδικοποίησης LDPC. Μάλιστα, επιτυγχάνονται μικρές τιμές της πιθανότητας διακοπής ακόμα και στην περίπτωση κωδίκων υψηλού ρυθμού, όπως για παράδειγμα  $r=9/10$  (Σχ.4.6).



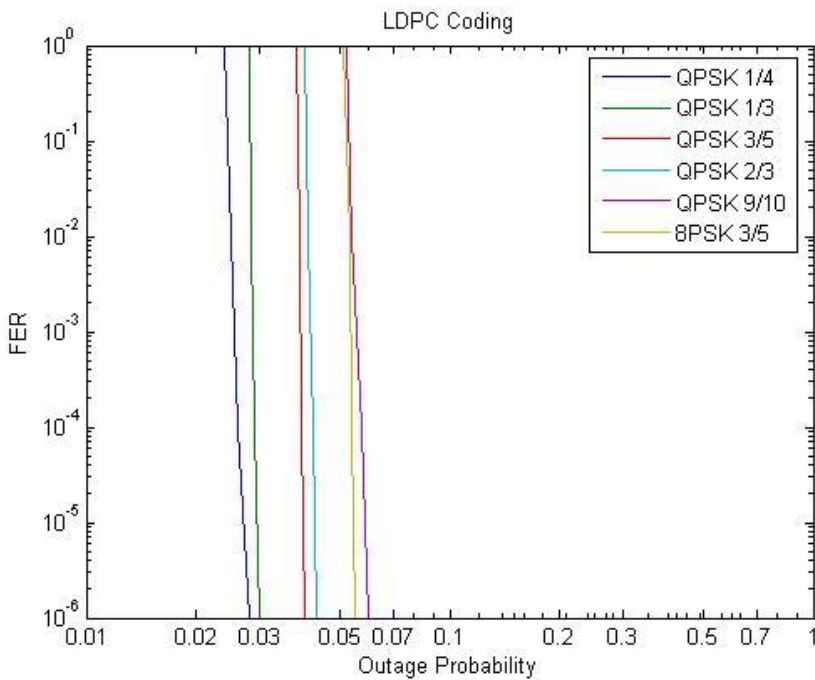
Σχ. 4.3 Ρυθμός εσφαλμένων πακέτων συναρτήσει σηματοθρομβικού λόγου για διαμόρφωση QPSK και διάφορες τιμές ρυθμού κώδικα στην περίπτωση κωδικοποίησης LDPC.



Σχ. 4.4 Ρυθμός εσφαλμένων πακέτων συναρτήσει σηματοθρομβικού λόγου για διάφορους συνδυασμούς στάθμης διαμόρφωσης και ρυθμού κώδικα στην περίπτωση κωδικοποίησης LDPC.



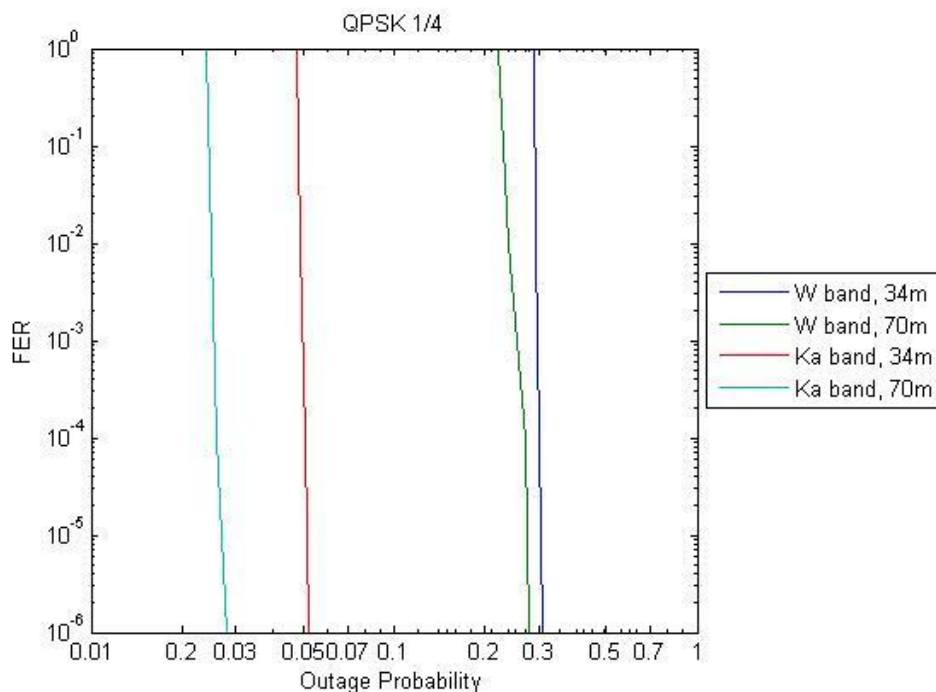
Σχ. 4.5 Ρυθμός εσφαλμένων πακέτων και πιθανότητα διακοπής για τη ζεύξη επίγειου σταθμού Μαδρίτης – διαστημικού σκάφους MRO, ζώνη συχνοτήτων Ka, κεραία επίγειου σταθμού διαμέτρου 34m. Κωδικοποίηση LDPC.



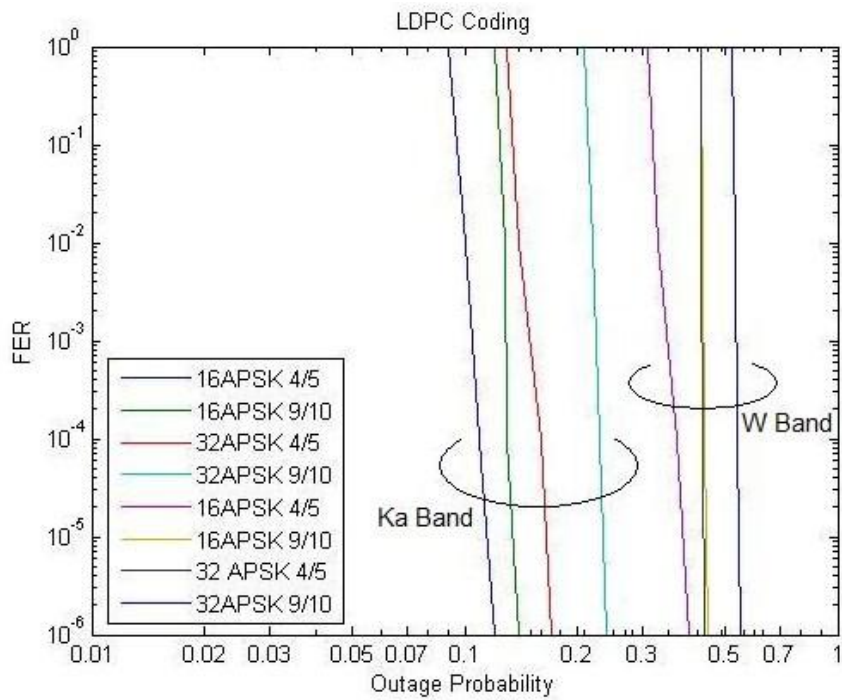
Σχ. 4.6 Ρυθμός εσφαλμένων πακέτων και πιθανότητα διακοπής για τη ζεύξη επίγειου σταθμού Μαδρίτης – διαστημικού σκάφους MRO, ζώνη συχνοτήτων Ka, κεραία επίγειου σταθμού διαμέτρου 70m. Κωδικοποίηση LDPC.

### 4.2.3 Σύγκριση με τη Ζώνη Συχνοτήτων W

Όσον αφορά στη ζώνη συχνοτήτων W, αναμένεται χειρότερη επίδοση καθώς τότε η ζεύξη επηρεάζεται περισσότερο από τα περιβαλλοντικά φαινόμενα. Ενδεικτικά, για διαμόρφωση QPSK και κωδικοποίηση LDPC ρυθμού  $r=1/4$ , παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.7 τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Παρατηρούμε ότι, ενώ η πιθανότητα διακοπής είναι αρκετά μικρή στην περίπτωση της ζώνης Ka, γίνεται ιδιαίτερα μεγάλη για λειτουργία στη ζώνη W. Τέλος, στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για διαμορφώσεις μεγαλύτερης τάξης.



Σχ. 4.7 Ρυθμός εσφαλμένων πακέτων και πιθανότητα διακοπής για τη ζεύξη επίγειου σταθμού Μαδρίτης – διαστημικού σκάφους MRO, ζώνες συχνοτήτων Ka και W, κεραία επίγειου σταθμού διαμέτρου 34 και 70m. Διαμόρφωση QPSK και κωδικοποίηση LDPC ρυθμού 1/4.



Σχ. 4.8 Ρυθμός εσφαλμένων πακέτων και πιθανότητα διακοπής για τη ζεύξη επίγειου σταθμού Μαδρίτης – διαστημικού σκάφους MRO, ζώνες συχνοτήτων Ka και W, κεραία επίγειου σταθμού διαμέτρου 70m. Κωδικοποίηση LDPC.





## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] G. P. Calzolari, M. Chiani, F. Chiaraluce, R. Garelo, E. Paolini, “Channel Coding for Future Space Missions: New Requirements and Trends”, Proceedings of the IEEE, Vol. 95, No.11, September 2007
- [2] K. S. Andrews, D. Divsalar, S. Dolinar, J. Hamkins, C. Jones, F. Pollara, “The Development of Turbo and LDPC codes for Deep – Space Applications”, Proceedings of the IEEE Vol.95, No. 11, November 2007
- [3] <http://csse.usc.edu/gsaw/gsaw2006/s10d/shambayati.pdf>
- [4] L. Hanzo, J.P. Woodard, P. Robertson, “Turbo Decoding and Detection for Wireless Applications”, Proceedings of the IEEE Vol.95, No.6, June 2007
- [5] H. Bischl, H. Brandt, T. de Cola, R. De Gaudenzi, E. Eberlein, N. Girault, E.Alberty, S. Lipp, R. Rinaldo, B.Rislow, J.A. Skard, J.Tousch, G. Ulbricht, “Adaptive Coding and Modulation for Satellite Broadband Networks: from theory to practice”, International Journal of Satellite Communications, Int. J. Syst. Networks (2009)



## Παράρτημα Α: Υπολογισμός Απόσβεσης Λόγω Βροχής. (Σύσταση ITU-R P.618-10)

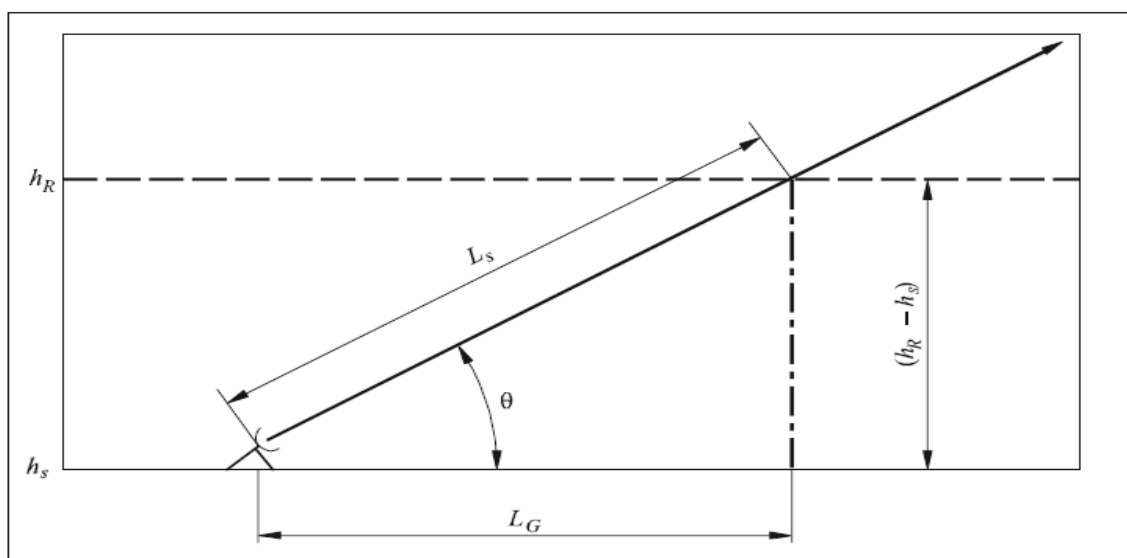
Η ακόλουθη διαδικασία προσφέρει εκτιμήσεις της μακροπρόθεσμης (ετήσιας) στατιστικής της απόσβεσης λόγω βροχής σε κεκλιμένους ραδιοδρόμους ανά την Υφήλιο και για συχνότητες λειτουργίας μέχρι 55GHz.

Το εμπειρικό μοντέλο υπολογισμού της απόσβεσης λόγω βροχής χρησιμοποιεί τις εξής παραμέτρους:

- $R_{0.01}$  : Σημειακή ένταση βροχόπτωσης (point rainfall rate) για τη συγκεκριμένη τοποθεσία που αντιστοιχεί σε πιθανότητα υπέρβασης 0.01% ενός μέσου έτους (mm/h). Η σημειακή ένταση βροχόπτωσης εκφράζει το ύψος του νερού που φτάνει στη γη ανά μονάδα χρόνου. Μεταβάλλεται κατά τυχαίο τρόπο ως προς το χώρο και το χρόνο.
- $h_s$  : Υψόμετρο επίγειου σταθμού πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας (km)
- $\theta$  : Γωνία ανύψωσης του κεκλιμένου ραδιοδρόμου (μοίρες)
- $\varphi$  : Γεωγραφικό πλάτος του επίγειου σταθμού (μοίρες)
- $f$  : Συχνότητα (GHz)
- $R_e$  : Μέση ακτίνα της Γης (8500 km)

Σε περίπτωση που δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για το υψόμετρο του επίγειου σταθμού σε σχέση με την επιφάνεια της θάλασσας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια εκτίμηση με βάση τους τοπογραφικούς χάρτες που δίδονται στη Σύσταση ITU-R P.1511.

Η γεωμετρία της ζεύξης παρουσιάζεται στο Σχήμα Α.1.



Σχήμα 1. Γεωμετρική αναπαράσταση ενός ραδιοδρόμου Γη-προς-Διάστημα, όπου παρουσιάζονται οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της απόσβεσης λόγω βροχής

**Βήμα 1:** Υπολογισμός του ενεργού ύψους βροχής  $h_R$  σύμφωνα με τη Σύσταση ITU-R P.839. Το ενεργό ύψος βροχής αντιστοιχεί στο υψόμετρο της επιφάνειας στην οποία η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας είναι  $0^\circ\text{C}$  (ισόθερμη των  $0^\circ\text{C}$ ). Σε ύψος μεγαλύτερο από αυτό υπάρχει παγετός που δεν εξασθενεί σημαντικά το Η/Μ κύμα σε συχνότητες χαμηλότερες των 60GHz. Συνεπώς, η απόσβεση του σήματος λόγω βροχόπτωσης προκαλείται από τη διέλευσή του στο στρώμα της ατμόσφαιρας μέχρι το μέσο ύψος της ισόθερμης των  $0^\circ\text{C}$ .

**Βήμα 2:** Υπολογισμός του μήκους του κεκλιμένου ραδιοδρόμου κάτω από το ενεργό ύψος βροχής,  $L_S$ .

Για γωνία ανύψωσης  $\theta \geq 5^\circ$  είναι:

$$L_S = \frac{(h_R - h_S)}{\sin \theta} \text{ km} \quad (\text{A.1})$$

Για γωνία ανύψωσης  $\theta < 5^\circ$  είναι:

$$L_S = \frac{2(h_R - h_S)}{(\sin^2 \theta + \frac{2(h_R - h_S)}{R_e})^{1/2} + \sin \theta} \text{ km} \quad (\text{A.2})$$

**Βήμα 3:** Υπολογισμός της οριζόντιας προβολής του ενεργού μήκους της ζεύξης.

$$L_G = L_S \cos \theta \text{ km} \quad (\text{A.3})$$

**Βήμα 4:** Εύρεση της έντασης βροχόπτωσης  $R_{0.01}$  η οποία αντιστοιχεί σε ποσοστό υπέρβασης 0.01% του χρόνου. Αν τα ετήσια δεδομένα δεν είναι διαθέσιμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια εκτίμηση με βάση τους χάρτες έντασης βροχόπτωσης που δίδονται στη σύσταση ITU-R P.837. Εάν η ένταση βροχόπτωσης  $R_{0.01}$  είναι ίση με μηδέν τότε η απόσβεση λόγω βροχής θα είναι μηδενική για κάθε χρονικό ποσοστό και δεν απαιτούνται περαιτέρω υπολογισμοί.

**Βήμα 5:** Υπολογισμός της ειδικής απόσβεσης  $\gamma_R$  με βάση τους συντελεστές  $k$  και  $\alpha$  (που δίδονται στη Σύσταση ITU-R P.838) και την ένταση βροχόπτωσης του Βήματος 4.

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

Η ειδική απόσβεση λόγω βροχής είναι η απόσβεση ανά μονάδα μήκους που υφίσταται το Η/Μ κύμα κατά τη διάδοσή του στο μέσο βροχής. Οι συντελεστές  $k$ ,  $\alpha$  εξαρτώνται από τη συχνότητα, το είδος της πώλωσης του Η/Μ κύματος και τη γωνία ανύψωσης.

**Βήμα 6:** Υπολογισμός του παράγοντα οριζόντιας κανονικοποίησης που αντιστοιχεί στο 0.01% του χρόνου.

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

**Βήμα 7:** Υπολογισμός του παράγοντα κατακόρυφης κανονικοποίησης που αντιστοιχεί στο 0.01% του χρόνου.

$$\text{Αρχικά υπολογίζουμε τον παράγοντα } \zeta = \tan^{-1}\left(\frac{h_R - h_S}{L_G r_{0.01}}\right) \quad (\text{A.6})$$

$$\text{Εάν } \zeta > \theta \text{ τότε } L_R = \frac{L_G r_{0.01}}{\cos \theta} \text{ km} \quad (\text{A.7})$$

$$\text{Αλλιώς είναι : } L_R = \frac{h_R - h_S}{\sin \theta} \text{ km} \quad (\text{A.8})$$

$$\text{Εάν } |\varphi| < 36^\circ \text{ τότε } \chi = 36 - |\varphi| \text{ μοίρες} \quad (\text{A.9})$$

$$\text{Αλλιώς } \chi = 0 \text{ μοίρες} \quad (\text{A.10})$$

$$\text{Τελικά: } v_{0.01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \theta} \left( 31(1 - e^{-\theta/(1+\chi)}) \frac{\sqrt{L_R \gamma_R}}{f^2} - 0.45 \right)} \quad (\text{A.11})$$

**Βήμα 8:** Υπολογισμός του ενεργού μήκους της ζεύξης,  $L_E$ .

$$L_E = L_R v_{0.01} \text{ km} \quad (\text{A.12})$$

**Βήμα 9:** Υπολογισμός της απόσβεσης λόγω βροχής που αντιστοιχεί σε πιθανότητα υπέρβασης 0.01% ενός μέσου έτους.

$$A_{0.01} = \gamma_R L_E \text{ dB} \quad (\text{A.13})$$

**Βήμα 10:** Υπολογισμός της απόσβεσης λόγω βροχής που αντιστοιχεί σε πιθανότητα υπέρβασης από 0.001% έως 5%, με βάση την απόσβεση που αντιστοιχεί σε πιθανότητα υπέρβασης 0.01%.

$$\text{Εάν } p \geq 1\% \text{ ή } |\varphi| \geq 36^\circ \text{ τότε } \beta = 0 \quad (\text{A.14})$$

$$\text{Εάν } p < 1\% \text{ και } |\varphi| < 36^\circ \text{ και } \theta \geq 25^\circ \text{ τότε } \beta = -0.005(|\varphi| - 36) \quad (\text{A.15})$$

$$\text{Αλλιώς: } \beta = -0.005(|\varphi| - 36) + 1.8 - 4.25 \sin \theta \quad (\text{A.16})$$

Η απόσβεση λόγω βροχής που αντιστοιχεί σε πιθανότητα υπέρβασης  $p$  υπολογίζεται τελικά από την ακόλουθη σχέση:

$$A_p = A_{0.01} \left( \frac{p}{0.01} \right)^{-(0.655 + 0.033 \ln(A_{0.01}) - \beta(1-p) \sin \theta)} \quad (\text{A.17})$$