



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Προσομοίωση Κίνησης Διαδικτύου και Εκχώρηση Συχνοτήτων σε  
Δορυφορικά Τερματικά Πολύ Μικρού Ανοίγματος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ειρήνη Φ. Λιάκου

Επιβλέπων: Παναγιώτης Κωττής  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2007





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Προσομοίωση Κίνησης Διαδικτύου και Εκχώρηση Συχνοτήτων σε  
Δορυφορικά Τερματικά Πολύ Μικρού Ανοίγματος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ειρήνη Φ. Λιάκου

Επιβλέπων: Παναγιώτης Κωττής  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 24<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2007.

.....  
Παναγιώτης Κωττής  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....  
Χρήστος Καψάλης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....  
Ιωάννης Κανελλόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2007



.....  
Ειρήνη Φ. Λιάκου

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

Copyright © Ειρήνη Φ. Λιάκου, 2007

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι η μελέτη των δορυφορικών δικτύων Τερματικών Πολύ Μικρού Ανοίγματος (VSAT), με αφορμή την επικείμενη ανάπτυξη του δημόσιου δορυφορικού δικτύου ΔΟΡΥ, και η προσομοίωση δικτυακής κίνησης που αποβλέπει στη βελτίωση απόδοσης των δικτύων. Αρχικά, στα Κεφάλαια 1 και 2 γίνεται αναφορά στη βασικής θεωρίας δορυφορικών επικοινωνιών, περιγραφή και ανάλυση των τεχνικών χαρακτηριστικών του δορυφόρου Hellas Sat, καθώς και των τεχνικών προδιαγραφών για το δημόσιο δορυφορικό δίκτυο ΔΟΡΥ. Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται ανάλυση και υπολογισμός του ισοζυγίου ισχύος για το δίκτυο ΔΟΡΥ. Το δίκτυο αυτό βασίζεται στο δορυφορικό πρότυπο Digital Video Broadcasting with Return Channel via Satellite (DVB-RCS), του οποίου ο σχεδιασμός αποβλέπει στη βέλτιστη χρησιμοποίηση της διαθέσιμης χωρητικότητας για μεγάλο αριθμό χρηστών, με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του κόστους. Αυτό είναι εφικτό με τη χρήση μιας μεθόδου πολλαπλής προσπέλασης. Το σχήμα πολλαπλής προσπέλασης που χρησιμοποιείται στο DVB-RCS είναι το σχήμα Πολλαπλή Πρόσβαση Διάρθρωσης Χρόνου – Πολλαπλών Συχνοτήτων (MF-TDMA, Multi Frequency – Time Division Multiple Access). Στο κεφάλαιο 4 γίνεται πλήρης περιγραφή και ανάλυση της διαδικτυακής κίνησης, η οποία εμφανίζει ιδιότητες αυτό-όμοιων (SS, Self-Similar) διαδικασιών και είναι εκρηκτική και μη προβλέψιμη. Έπειτα, στο Κεφάλαιο 5, γίνεται αναφορά στα τεχνικά χαρακτηριστικά του σχήματος MF-TDMA και παρουσιάζεται αναλυτικά το θεωρητικό υπόβαθρο του προτύπου DVB-RCS. Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 γίνεται η προσομοίωση τόσο της παραγόμενης δικτυακής κίνησης, όσο και της εκχώρησης του διαθέσιμου εύρους ζώνης του δικτύου στους χρήστες, με σκοπό να εξεταστεί η αποδοτικότητα του δικτύου υπό το πρίσμα της βέλτιστης χρησιμοποίησης της χωρητικότητάς του. Η προσομοίωση πραγματοποιείται για όλους τους συνδυασμούς χρονοσχισμών-συχνοτήτων ενός πλαισίου MF-TDMA που προβλέπει το πρότυπο DVB-RCS, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται τα γραφικά αποτελέσματα, τόσο για ομοιόμορφη όσο και για Self-Similar πηγή κίνησης, οι αντίστοιχες παρατηρήσεις και τα τελικά συμπεράσματα. Ως μέτρα απόδοσης του δικτύου DVB-RCS, εξετάζονται το ποσοστό μη χρησιμοποίησής του και ο μέσος αριθμός αιτήσεων που ικανοποιούνται.

### Λέξεις Κλειδιά

Δορυφορικές επικοινωνίες, δορυφορικό δίκτυο, VSAT, πολλαπλή πρόσβαση διάρθρωσης χρόνου – πολλαπλών συχνοτήτων, MF-TDMA, DVB-RCS, εκχώρηση δικτυακών πόρων, διαθέσιμο εύρος ζώνης, απόδοση δικτύου.

# ABSTRACT

The aim of this dissertation thesis is to study satellite networks that use Very Small Aperture Terminals (VSAT) technology in view of the upcoming development of the DORY public satellite network, and to simulate IP traffic in order to improve network performance. To begin with, in Chapters 1 and 2 present the basic satellite communications theory and an analysis of the technical specifications regarding the Hellas-Sat satellite and DORY network. In Chapter 3, the Link Budget for the DORY network is calculated and analyzed. The above-mentioned network is based upon the Digital Video Broadcasting with Return Channel via Satellite (DVB-RCS) template, which demands careful design in order to maximize its available capacity (bandwidth, power) and simultaneously to minimize the running costs. The Multi Frequency – Time Division Multiple Access (MF-TDMA) is the access scheme used by a DVB-RCS network. IP traffic is by nature bursty, non-predictable and can be described with the help of Self-Similar (SS) processes, as thoroughly described and analyzed in Chapter 4. Furthermore, in Chapter 5, MF-TDMA's technical characteristics are mentioned and the theoretical basis for the DVB-RCS template is presented. Finally, Chapter 6 demonstrates the simulation of IP traffic and bandwidth allocation among the networks' users. The aim the simulation process is to test the networks' efficiency for all the available slot-frequency combinations for an MF-TDMA frame, according to the DVB-RCS template. The results are presented graphically for both Uniform and Self-Similar traffic sources, along with the corresponding comments and conclusions. In order to measure the DVB-RCS network efficiency, the non-utilization percentage and the mean number of users serviced are taken into account.

## **Key Words**

Satellite Communications, Satellite network, VSAT, Multi Frequency – Time Division Multiple Access, MF-TDMA, DVB-RCS, network resource allocation, available bandwidth, network efficiency.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Π. Κωττή για την ανάθεση, τη συνεχή επίβλεψη και βοήθεια που μου παρείχε καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες Π. Αράπογλου και Δ. Πετράκη, για την πολύτιμη βοήθειά τους, τη συνεχή τους καθοδήγηση μέσα σε αυτούς τους τελευταίους μήνες φοίτησής μου στο ΕΜΠ.





---

---

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

---

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....</b>	<b>6</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>7</b>
<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....</b>	<b>8</b>
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	14
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	18
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ.. .....	19
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ .....</b>	<b>22</b>
1.1 Γενικά .....	22
1.2 Ορισμός και είδη δορυφορικών τροχιών .....	24
1.2.1 Ορισμός δορυφόρου και Γεωστατική Τροχιά.....	24
1.2.2 Είδη εναλλακτικών τροχιών.....	27
1.3 Δομή ενός δορυφορικού συστήματος επικοινωνιών .....	28
1.3.1 Επίγειος σταθμός.....	31
1.3.2 Δορυφόρος:.....	32
1.4 Εκχώρηση Δορυφορικού Φάσματος .....	33
1.5 Δυσμενείς επιδράσεις της ατμόσφαιρας κατά τη διάδοση των δορυφορικών σημάτων .....	38
1.6 Δορυφορικά δίκτυα VSAT: .....	41
1.6.1 Κεντρικός σταθμός .....	43
1.6.2 Απομακρυσμένοι σταθμοί VSAT:.....	44
1.6.3 Αρχιτεκτονική δικτύου VSAT .....	47
1.7 Πρωτόκολλα μετάδοσης – Το πρότυπο DVB-S .....	48
1.7.1 Εισαγωγή .....	48
1.7.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά DVB-RCS .....	50
1.7.3 Μελλοντικές εξελίξεις .....	51

1.8 Βιβλιογραφία: .....	52
-------------------------	----

## **ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥ ΔΗΜΟΣΙΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ «ΔΟΡΥ»**54

2.1 Γενική περιγραφή του δικτύου «ΔΟΡΥ».....	54
2.1.1 Γενικές πληροφορίες.....	54
2.1.2 Εφαρμογές.....	55
2.1.3 Αρχιτεκτονική δικτύου.....	56
2.2 Δορυφορικό τμήμα δικτύου ΔΟΡΥ - τεχνικά χαρακτηριστικά δορυφόρου Hellas Sat.....	57
2.2.1 Γενικές πληροφορίες και προδιαγραφές.....	57
2.2.2 Συχνότητες.....	60
2.2.3 Πόλωση Κεραιών .....	62
2.3 Επίγειο τμήμα «ΔΟΡΥ».....	65
2.4 Βιβλιογραφία .....	66

## **ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΙΣΧΥΟΣ ΤΟΥ ΔΗΜΟΣΙΟΥ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ «ΔΟΡΥ»**..... 67

3.1 Εισαγωγή.....	67
3.2 Δεδομένα της ζεύξης.....	68
3.2.1 Δορυφόρος Hellas Sat:.....	69
3.2.2 Ευθεία ζεύξη και Ζεύξη επιστροφής.....	70
3.2.3 Η προς τα άνω ζεύξη (uplink) .....	70
3.2.4 Η προς τα κάτω ζεύξη (downlink) .....	71
3.3 Υπολογισμός και ανάλυση των παραμέτρων του ισοζυγίου ισχύος .....	72
3.3.1 Κέρδος κεραίας.....	72
3.3.2 Απόσταση επίγειου σταθμού – δορυφόρου .....	73
3.3.3 Απώλειες διάδοσης .....	74
3.3.4 Ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου του δέκτη .....	80
3.3.5 Λόγος G/T .....	82
3.4 Αποτελέσματα για το ισοζύγιο ισχύος .....	83

3.4.1 Uplink .....	83
3.4.2 Downlink.....	84
3.4.3 Αποτελέσματα της συνολικής ζεύξης .....	84
3.4.4 Παρεμβολές.....	85
3.4.5 Ψηφιακή διαμόρφωση και κωδικοποίηση .....	87
3.5 Πίνακας ισοζυγίου ισχύος .....	90
3.6 Βιβλιογραφία .....	94

**ΘΕΩΡΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΙ Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΩΝ ΑΥΤΟ-ΟΜΟΙΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ (SELF-SIMILARITY)..... 95**

4.1 Εισαγωγικά στοιχεία δικτυακής κίνησης IP .....	95
4.2 Ορισμός του self-similarity .....	100
4.2.1 Μαθηματικός ορισμός .....	100
4.2.2 Μέθοδοι εκτίμησης παραμέτρου H.....	102
4.3 Κατανομή Pareto και ON/OFF κατανομές .....	106
4.3.1 Κατανομές με βαριά ουρά (Heavy-Tailed):.....	106
4.3.2 Εξάρτηση μεγάλης κλίμακας (Long-Range Dependence) .....	108
4.4 Βιβλιογραφία .....	110

**ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ DVB-RCS ΚΑΙ ΤΟ ΣΧΗΜΑ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ MF-TDMA 111**

5.1 Δομή δικτύου DVB-RCS .....	111
5.2 Πολλαπλή Προσπέλαση στο DVB-RCS.....	115
5.2.1 Δορυφορικά τερματικά της άνω ζεύξης (RCST) .....	116
5.2.2 Σταθερό MF-TDMA .....	117
5.2.3 Δυναμικό MF-TDMA .....	117
5.3 Κατάτμηση του διαύλου άνω ζεύξης .....	118
5.3.1 Υπερ-Πλαίσιο (Superframe).....	118
5.3.2 Πλαίσιο (Frame) .....	120

5.3.3 Χρονοσχισμές (Time Slots).....	121
5.4 Χρονοσχισμές κίνησης ATM .....	122
5.4.1 Αιτήσεις χρηστών - εκρήξεις κίνησης ATM.....	124
5.5 Ανάθεση πόρων στο MF-TDMA.....	125
5.6 Βιβλιογραφία .....	127

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΘΕΣΗΣ ΧΡΟΝΟΣΧΙΣΜΩΝ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ MF-TDMA..... 128**

6.1 Εισαγωγικά στοιχεία προσομοίωσης .....	128
6.2 Προσομοίωση κίνησης διαδικτύου μέσω πηγής ON-OFF με κατανομή Pareto .....	128
6.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	131
6.4 Προσομοίωση για την ανάθεση πόρων στο MF-TDMA.....	136
6.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	137
6.5.1 Σχόλια και παρατηρήσεις .....	145
6.5.2 Σύνοψη και τελικά συμπεράσματα .....	147
6.6 Βιβλιογραφία .....	149

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

## ΣΕΛΙΔΕΣ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

22	Σχήμα 1.1 Απευθείας ζεύξη μεταξύ δορυφόρων στο διάστημα (intersatellite link)
24	Σχήμα 1.2 Η Επικοινωνία δορυφόρου με διάφορες κατηγορίες τερματικών στην ξηρά, τη θάλασσα και τον αέρα.
25	Σχήμα 1.3 Κάλυψη της Γης από δορυφόρο γεωστατικής τροχιάς
26	Σχήμα 1.4 Περιοχή κάλυψης (coverage area) δορυφόρου
28	Σχήμα 1.5 Απεικόνιση των δορυφορικών τροχιών
29	Σχήμα 1.6 Απεικόνιση του δορυφορικού τμήματος
30	Σχήμα 1.7 Μπλοκ-διάγραμμα του επίγειου τμήματος
30	Σχήμα 1.8 Η προς τα πάνω και η προς τα κάτω ζεύξη
34	Σχήμα 1.9 Οι 3 γεωγραφικές ζώνες εκχώρησης συχνοτήτων
36	Σχήμα 1.10 Δορυφορικές ζώνες συχνοτήτων
37	Σχήμα 1.11 Ένα αστικό δορυφορικό δίκτυο σε διάφορες ζώνες συχνοτήτων
39	Σχήμα 1.12 Κλιματολογικές ζώνες βροχοπτώσεων
42	Σχήμα 1.13 Φορητός σταθμός VSAT τύπου “fly-away”
42	Σχήμα 1.14 Αρχιτεκτονική ενός δικτύου VSAT
43	Σχήμα 1.15 Η δομή του κεντρικού σταθμού
45	Σχήμα 1.16 Η εξωτερική μονάδα (ODU)
46	Σχήμα 1.17 Τα υποσυστήματα του hub
47	Σχήμα 1.18 Δομή ενός σταθμού VSAT
48	Σχήμα 1.19 Δίκτυο VSAT με τοπολογία (α) πλέγματος (mesh) και (β) αστέρα (star)
51	Σχήμα 1.20 Η απεικόνιση ενός τυπικού συστήματος DVB-RCS

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

56	Σχήμα 2.1 Αρχιτεκτονική δικτύου ΔΟΡΥ
57	Σχήμα 2.2 Η εκτόξευση του δορυφόρου Hellas Sat
58	Σχήμα 2.3 Αρχιτεκτονική κεραίας του Hellas Sat (Payload Layout)
59	Σχήμα 2.4 Η εμβέλεια λήψης της σταθερής κεραίας F1, 13.8 GHz, τιμές G/T
59	Σχήμα 2.5 Η εμβέλεια εκπομπής της σταθερής κεραίας F1, 12.5 GHz, τιμές EIRP
60	Σχήμα 2.6 Το σχεδιάγραμμα συχνοτήτων του Hellas Sat (Frequency Plan)

- 62 Σχήμα 2.7 Κατανομή φάσματος  
65 Σχήμα 2.8 Η εσωτερική δομή ενός Gateway σταθμού

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

- 68 Σχήμα 3.1 Τυπική δορυφορική ζεύξη και παράγοντες που εμπλέκονται στον  
υπολογισμό του ισοζυγίου ισχύος της ζεύξης  
69 Σχήμα 3.2 Περιοχή λειτουργίας (Ισχύς Εξόδου ως προς Ισχύ Εισόδου) ενός Ενισχυτή  
72 Σχήμα 3.3 Γραφική παράσταση κέρδους κεραίας σε σχέση με τη διάμετρό της για  
δεδομένη συχνότητα  
74 Σχήμα 3.4 Η διάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος και οι παράγοντες που την  
περιορίζουν  
75 Σχήμα 3.5 Γραφική παράσταση των απωλειών ελευθέρου χώρου για ένα γεωστατικό  
δορυφόρο σε απόσταση  $d = 37500 \text{ km}$  από τον επίγειο σταθμό  
76 Σχήμα 3.6 Σχηματική αναπαράσταση του μονοπατιού από τη γη προς το διάστημα  
78 Σχήμα 3.7 Η ένταση της βροχόπτωσης (mm/h) που υπερβαίνει το 0.01% ενός μέσου  
έτους  
81 Σχήμα 3.8 Διάγραμμα δέκτη  
86 Σχήμα 3.9 Παρεμβολή μεταξύ γειτονικών δορυφόρων

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

- 96 Σχήμα 4.1 Ανάλυση κίνησης Internet σε επίπεδο πρωτοκόλλου  
97 Σχήμα 4.2 Ανάλυση κίνησης TCP σε επίπεδο εφαρμογών  
98 Σχήμα 4.3 TCP κίνηση σε χρονική κλίμακα 100 δευτερολέπτων  
99 Σχήμα 4.4 TCP κίνηση σε χρονική κλίμακα 3.5 δευτερολέπτων  
100 Σχήμα 4.5 Απεικόνιση ενός απλού fractal  
103 Σχήμα 4.6 Γραφική παράσταση διακύμανσης-χρόνου  
104 Σχήμα 4.7 Γραφική παράσταση R/S για επιλεγμένο δείγμα  
106 Σχήμα 4.8 Περιοδογράφημα  
107 Σχήμα 4.9 Κατανομή Pareto  
108 Σχήμα 4.10 ON/OFF πηγή

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

- 113 Σχήμα 5.1 Ένα μοντέλο αναφοράς για το Δορυφορικό Δίκτυο Αλληλεπίδρασης  
114 Σχήμα 5.2 Παράδειγμα ροής σηματοδοσίας κατά την είσοδο του τερματικού στο

σύστημα

- 115 Σχήμα 5.3 Τυπική δομή του MF-TDMA
- 116 Σχήμα 5.4 Γενικό μπλοκ διάγραμμα του καναλιού επιστροφής RCST για την  
επεξεργασία σήματος βασικής ζώνης
- 117 Σχήμα 5.5 MF-TDMA σταθερών χρονοσχισμών
- 118 Σχήμα 5.6 Προαιρετικό MF-TDMA δυναμικών χρονοσχισμών, το οποίο χρησιμοποιεί  
ευέλικτα RCSTs
- 119 Σχήμα 5.7 Ένα τυπικό σχήμα διαδοχικών υπερ-πλαισίων
- 120 Σχήμα 5.8 Μια αναλυτική σχηματική απεικόνιση της δομής πλαισίων MF-TDMA
- 121 Σχήμα 5.9 Παράδειγμα σύνθεσης υπερ-πλαισίου από πλαίσια
- 122 Σχήμα 5.10 Παράδειγμα σύνθεσης πλαισίων
- 123 Σχήμα 5.11 Σύνθεση ενός ATM traffic burst

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

- 131 Σχήμα 6.1 Κίνηση που παράγεται από έναν χρήστη κανονικοποιημένη στον μέγιστο  
ρυθμό μετάδοσης των 2048 kbps
- 132 Σχήμα 6.2 Κίνηση που παράγεται από έναν χρήστη κανονικοποιημένη στον μέγιστο  
ρυθμό μετάδοσης των 1024 kbps
- 132 Σχήμα 6.3 Κίνηση που παράγεται από έναν χρήστη κανονικοποιημένη στον μέγιστο  
ρυθμό μετάδοσης των 384 kbps
- 133 Σχήμα 6.4 Κίνηση που παράγεται από έναν χρήστη κανονικοποιημένη στον μέγιστο  
ρυθμό μετάδοσης των 144 kbps
- 135 Σχήμα 6.5 Αθροιστική κίνηση SS για κλίμακα 6 δευτερολέπτων
- 135 Σχήμα 6.6 Αθροιστική κίνηση SS για κλίμακα 25 δευτερολέπτων
- 138 Σχήμα 6.7 Μη χρησιμοποίηση του δικτύου για 9 χρονοσχισμές και 60 φέρουσες  
συχνότητες
- 139 Σχήμα 6.8 Μέσος αριθμός αιτήσεων που ικανοποιήθηκαν για 9 χρονοσχισμές και 60  
φέρουσες συχνότητες
- 139 Σχήμα 6.9 Μη χρησιμοποίηση του δικτύου για 24 χρονοσχισμές και 23 φέρουσες  
συχνότητες
- 140 Σχήμα 6.10 Μέσος αριθμός αιτήσεων που ικανοποιήθηκαν για 24 χρονοσχισμές και 23  
φέρουσες συχνότητες
- 140 Σχήμα 6.11 Μη χρησιμοποίηση του δικτύου για 64 χρονοσχισμές και 9 φέρουσες  
συχνότητες



- 141 Σχήμα 6.12 Μέσος αριθμός αιτήσεων που ικανοποιήθηκαν για 64 χρονοσχιμές και 9  
φέρουσες συχνότητες
- 141 Σχήμα 6.13 Μη χρησιμοποίηση του δικτύου για 128 χρονοσχιμές και 4 φέρουσες  
συχνότητες
- 142 Σχήμα 6.14 Μέσος αριθμός αιτήσεων που ικανοποιήθηκαν για 128 χρονοσχιμές και 4  
φέρουσες συχνότητες
- 142 Σχήμα 6.15 Συγκεντρωτικό διάγραμμα μη χρησιμοποίησης δικτύου για τους τέσσερις  
τύπους σύνθεσης των πλαισίων MF-TDMA για ομοιόμορφη πηγή
- 143 Σχήμα 6.16 Συγκεντρωτικό διάγραμμα μέσου αριθμού αιτήσεων που ικανοποιούνται  
για τους τέσσερις τύπους σύνθεσης των πλαισίων MF-TDMA για  
ομοιόμορφη πηγή
- 143 Σχήμα 6.17 Συγκεντρωτικό διάγραμμα μη χρησιμοποίησης δικτύου για τους τέσσερις  
τύπους σύνθεσης των πλαισίων MF-TDMA για πηγή Self-Similar
- 144 Σχήμα 6.18 Συγκεντρωτικό διάγραμμα μέσου αριθμού αιτήσεων που ικανοποιούνται  
για τους τέσσερις τύπους σύνθεσης των πλαισίων MF-TDMA για πηγή Self-  
Similar

# ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

<u>ΣΕΛΙΔΕΣ</u>	<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</u>
36	Πίνακας 1.1 Οι δορυφορικές ζώνες συχνότητων και οι αντίστοιχες υπηρεσίες
	<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</u>
61	Πίνακας 2.1 Κεντρικές συχνότητες αναμεταδοτών
64	Πίνακας 2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου Hellas-Sat
	<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</u>
70	Πίνακας 3.1 Δεδομένα χαρακτηριστικά της ζεύξης uplink
71	Πίνακας 3.2 Δεδομένα χαρακτηριστικά ζεύξης Downlink
89	Πίνακας 3.3 Τελικά αποτελέσματα ισοζυγίου ισχύος για το κωδικοποιημένο σήμα
91	Πίνακας 3.4 Ισοζύγιο ισχύος για το Forward Link: Αθήνα → Δορυφόρος Hellas Sat → Ξάνθη
93	Πίνακας 3.5 Πίνακας 3.5 Ισοζύγιο ισχύος για το Return Link: Ξάνθη (Terminal) → Δορυφόρος Hellas Sat → Αθήνα (Gateway)
	<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</u>
109	Πίνακας 4.1 Εκτιμώμενες τιμές $H$ για τις διάφορες τιμές $\alpha$ των πηγών ON/OFF που ακολουθούν την κατανομή Pareto
	<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5</u>
123	Πίνακας 5.1 Σύνοψη πλαισίων στο MF-TDMA για το RCST

## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

<b>ALC</b>	(Automatic Level Control) Αυτομάτος Έλεγχος Επιπέδων
<b>ASK</b>	(Amplitude Shift Keying) Διαμόρφωση κατά Πλάτος
<b>ATM</b>	(Asynchronous Transfer Mode) Ασύγχρονος Τρόπος Μεταφοράς
<b>BER</b>	(Bit Error Rate) Ρυθμός Σφαλμάτων Δυαδικών Ψηφίων
<b>BoD</b>	(Bandwidth on Demand) Εύρος Ζώνης κατ' Απαίτηση
<b>BPSK</b>	(Binary PSK) Δυαδική Διαμόρφωση κατά Φάση
<b>BSS</b>	(Broadcast Satellite Service) Υπηρεσία Εκπομπής μέσω Δορυφόρου
<b>CDMA</b>	(Code Division Multiple Access) Πολλαπλή Προσπέλαση με Διάρθρωση Κώδικα
<b>CNR</b>	(Carrier to Noise Ratio) Λόγος φέροντος προς θόρυβο
<b>CSC</b>	(Common Signalling Channel) Κοινό Κανάλι Σηματοδοσίας
<b>DBO</b>	(Delta Back-Off) Διαφορά περιθωρίου ισχύος Εισόδου - Εξόδου
<b>DVB</b>	(Digital Video Broadcast) Πρότυπο Ψηφιακής Μετάδοσης Βίντεο
<b>DVB-RCS</b>	(DVB with Return Channel via Satellite) DVB με Κανάλι Επιστροφής μέσω Δορυφόρου
<b>DVB-S</b>	(DVB via Satellite) DVB μέσω Δορυφόρου
<b>EIRP</b>	(Effective Isotropic Radiated Power) Ισοδύναμη Ισοτροπικά Ακτινοβολούμενη Ισχύς
<b>FDMA</b>	(Frequency Division Multiple Access) Πολλαπλή Προσπέλαση με Διάρθρωση Συχνότητας
<b>FEC</b>	(Forward Error Correction) Προς-τα-μπρος Διόρθωση Λαθών
<b>FGM</b>	(Fixed Gain Model) Μοντέλο Σταθερού Κέρδους
<b>FMT</b>	(Fade Mitigation Techniques) Τεχνικές Αντιμετώπισης των Διαλείψεων
<b>FSK</b>	(Frequency Shift Keying) Διαμόρφωση κατά Συχνότητα
<b>FSL</b>	(Free Space Loss) Απώλειες Ελευθέρου Χώρου
<b>FSS</b>	(Fixwd Satellite Service) Σταθερή Υπηρεσία μέσω Δορυφόρου
<b>FTP</b>	(File Transfer Protocol) Πρωτόκολλο Μεταφοράς Αρχείων
<b>G/T</b>	(Gain/Temperature) Λόγος κέρδους προς τη θερμοκρασία θορύβου της κεραίας
<b>GEO</b>	(Geostationary Orbit) Γεωστατική Τροχιά
<b>HEO</b>	(Higly Elliptical Orbits) Ελλειπτικές Τροχιές

<b>HRA</b>	(High Power Amplifier) Ενισχυτής Υψηλής Τάσης
<b>HTTP</b>	(Hypertext Transfer Protocol) Πρωτόκολλο Μεταφοράς Υπερκειμένου
<b>IBO</b>	(Input Back-Off) Περιθώριο Ισχύος Εισόδου
<b>IDU</b>	(Indoor Unit) Εσωτερική Μονάδα
<b>IF</b>	(Intermediate Frequency) Ενδιάμεση συχνότητα
<b>IFL</b>	(Interfacility Link) Καλώδιο Διασύνδεσης
<b>IP</b>	(Internet Protocol) Πρωτόκολλο Διαδικτύου
<b>ITU</b>	(International Telecommunication Union) Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών
<b>ITU-R</b>	(ITU Radiocommunication Assembly) Σύνοδος Ραδιοκυματικών Επικοινωνιών της ITU
<b>LEO</b>	(Low Earth Orbits) Χαμηλές Τροχιές
<b>LLCD</b>	(Log-Log Complementary Plot) Λογαριθμικό Διάγραμμα Συμπληρωματικής Κατανομής
<b>LMSS</b>	(Land MSS) Κινητή Υπηρεσία Ξηράς μέσω Δορυφόρου
<b>LNA</b>	(Low Noise Amplifier) Ενισχυτής Χαμηλού Θορύβου
<b>MCPC</b>	(Multiple Channel per Carrier) Πολλαπλά Κανάλια ανά Φέρον
<b>MEO</b>	(Medium Earth Orbits) Μεσαίες Τροχιές
<b>MF-TDMA</b>	(Multi Frequency - TDMA) TDMA Πολλαπλών Συχνοτήτων
<b>MPEG</b>	(Moving Pictures Experts Group) Τυποποίηση Κινούμενων Εικόνων
<b>MSS</b>	(Mobile Satellite Service) Κινητή Υπηρεσία μέσω Δορυφόρου
<b>MTCS</b>	(MF-TDMA Channel Structure) Δομή Καναλιών του MF-TDMA
<b>NCC</b>	(Network Control Center) Κέντρο Ελέγχου Δικτύου
<b>NRC</b>	(Network Reference Clock) Ρολόι Αναφοράς Δικτύου
<b>OBO</b>	(Output Back-Off) Περιθώριο Ισχύος Εξόδου
<b>ODU</b>	(Outdoor Unit) Εξωτερική Μονάδα
<b>PSK</b>	(Phase Shift Keying) Διαμόρφωση κατά Φάση
<b>PSTN</b>	(Public Switched Telephone Network) Δημόσιο Τηλεφωνικό Δίκτυο
<b>QoS</b>	(Quality of Service) Ποιότητα Υπηρεσιών
<b>QPSK</b>	(Quadrature PSK) Διαμόρφωση Τετραγωνικής Διαφοράς Φάσης
<b>R/S</b>	(Rescaled Range Statistics) Στατιστικά Αναδιαμορφούμενης Κλίμακας

<b>RCSTs</b>	(Return Channel Satellite Terminals) Δορυφορικά Τερματικά Καναλιού Επιστροφής
<b>RF</b>	(Radio Frequency) Ραδιο-συχνότητα
<b>SAC</b>	(Satellite Access Control) Έλεγχος Δορυφορικής Πρόσβασης
<b>SFD</b>	(Saturation Flux Density) Πυκνότητα Κορεσμού Ροής
<b>SHF</b>	(Super High Frequency) Υπερ-υψηλή Συχνότητα
<b>SRS</b>	(Space Research Service) Υπηρεσία Έρευνας του Διαστήματος
<b>SS</b>	(Self-Similar) Αυτό-όμοιος
<b>SIT</b>	(Satellite Interactive Terminal) Δορυφορικό Διαδραστικό Τερματικό
<b>TBTP</b>	(Terminal Burst Time Plan) Σχεδιάγραμμα Χρόνων Εκρήξεων των Τερματικών
<b>TCP</b>	(Transmission Control Protocol) Πρωτόκολλο Ελέγχου Μετάδοσης
<b>TDM</b>	(Time Division Multiplexing) Πολύπλεξη Διάρθρωσης Χρόνου
<b>TDMA</b>	(Time Division Multiple Access) Πολλαπλή Πρόσβαση Διάρθρωσης Χρόνου
<b>TG</b>	(Traffic Gateway) Πύλη Κίνησης
<b>TS</b>	(Time Slot) Χρονοθυρίδα
<b>TT&amp;C</b>	(Telemetry, Tracking & Control) Σύστημα Τηλεμετρίας, Παρακολούθησης και Ελέγχου
<b>TWTA</b>	(Travelling Wave Tube Amplifier) Ενισχυτής Σωλήνα Οδεύοντος Κύματος
<b>UDP</b>	(User Datagram Protocol) Πρωτόκολλο Δεδομενογραφήματος Χρήστη
<b>UHF</b>	(Ultra High Frequency)
<b>VHF</b>	(Very High Frequency) Πολύ Υψηλή Συχνότητα
<b>VoIP</b>	(Voice over IP) Διαδικτυακή Τηλεφωνία
<b>VPN</b>	(Virtual Private Network) Εικονικό Ιδιωτικό Δίκτυο
<b>VSAT</b>	(Very Small Apperture Terminal) Τερματικό πολύ μικρής επιφάνειας
<b>WWW</b>	(World Wide Web) Παγκόσμιος Ιστός
<b>XPD</b>	(Cross Polar Discrimination) Διαχωρισμός Διασταύρωσης Πόλωσης
<b>XPI</b>	(Cross Polar Isolation) Απομόνωση Διασταύρωσης Πόλωσης

---

---

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

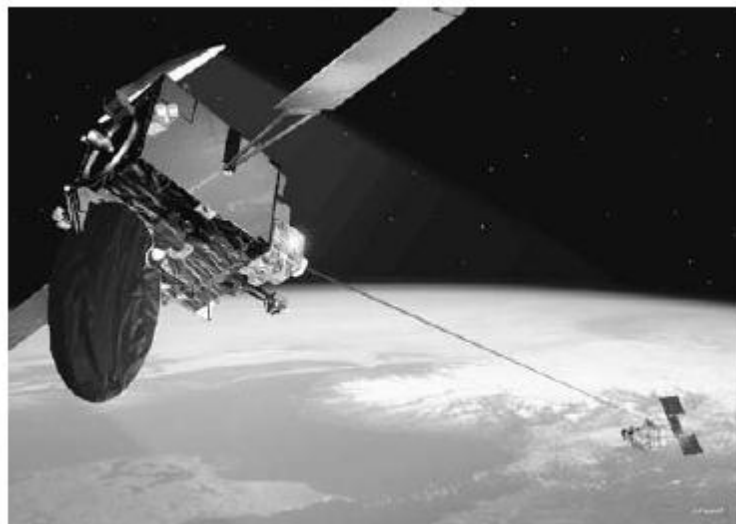
---

---

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

### 1.1 Γενικά

Η ανάπτυξη στον τομέα των τηλεπικοινωνιών τα τελευταία 50 χρόνια ήταν ραγδαία. Από την εφεύρεση του transistor το 1947 μέχρι σήμερα, η ιστορία των τηλεπικοινωνιών έχει περάσει από διάφορα καθοριστικά στάδια. Έτσι, γινόμαστε μάρτυρες μιας εξέλιξης που καθιστά εφικτές τις προσωπικές επικοινωνίες για μετάδοση φωνής, δεδομένων και βίντεο, γεγονός που οδήγησε στην ανάπτυξη εφαρμογών πολυμέσων (multimedia). Δορυφορικά δίκτυα και δίκτυα οπτικών ινών παρέχουν σήμερα τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες κορμού σε ολόκληρο σχεδόν τον πλανήτη, λόγω του σημαντικού διαθέσιμου εύρους ζώνης. Οι δορυφόροι παρέχουν τη δυνατότητα κάλυψης μεγάλων γεωγραφικών περιοχών, δυνατότητα η οποία είναι καθοριστικής σημασίας σε εφαρμογές όπως η τηλεφωνία, η διασύνδεση μεγάλων τηλεπικοινωνιακών κόμβων, οι κινητές επικοινωνίες, η ευρυεκπομπή (broadcasting) και άλλες. Για το λόγο αυτό, κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, η εκμετάλλευση γεωσύγχρονων δορυφόρων για επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων γνώρισε αλματώδη ανάπτυξη σε παγκόσμια κλίμακα.



Σχήμα 1.1 Απευθείας ζεύξη μεταξύ δορυφόρων στο διάστημα (intersatellite link)

Η εκτόξευση του πρώτου τεχνητού δορυφόρου Sputnik από τη Ρωσία το 1957 σηματοδότησε την απαρχή της διαστημικής εποχής. Οι Ηνωμένες Πολιτείες κατέβαλαν, αντίστοιχα, σημαντική προσπάθεια προκειμένου να ανταποκριθούν στον ανταγωνισμό, εκτοξεύοντας το δορυφόρο Score το 1958. Αυτός ήταν ο πρώτος δορυφόρος τηλεπικοινωνιακού χαρακτήρα.

Την τελευταία δεκαετία, προκειμένου οι δορυφορικές επικοινωνίες να καταστούν ανταγωνιστικές στη βιομηχανία των τηλεπικοινωνιών, ακολούθησαν την οδό της σταδιακής μεταπήδησης σε ζώνες συχνοτήτων λειτουργίας των συστημάτων τους άνω των 10GHz. Τα πλεονεκτήματα από τη μετάβαση αυτή σχετίζονται με την αύξηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης για ποικίλες εφαρμογές, ώστε να επιτυγχάνεται η λεγόμενη ενοποίηση των υπηρεσιών (service integration). Με τον όρο ενοποίηση των υπηρεσιών εννοείται η υποστήριξη πολλαπλών υπηρεσιών με ποικίλα χαρακτηριστικά από ένα μοναδικό δίκτυο.

Παράλληλα, τα συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών αντιμετωπίζουν τον έντονο ανταγωνισμό από τα συστήματα οπτικών ινών όσον αφορά τις σημείου-προς-σημείο (point-to-point) επικοινωνίες. Στις περισσότερες αναπτυγμένες χώρες προτιμάται η λύση των ενσύρματων συστημάτων για τις υπηρεσίες κορμού, οδηγώντας, έτσι, στην επέκταση του επίγειου ενσύρματου δικτύου επικοινωνιών. Για τη διατήρηση της ανταγωνιστικότητάς τους, υπήρξε αναγκαία η εφαρμογή τους σε πιο εξειδικευμένες αγορές και η ενσωμάτωση σε αυτές νέων εφαρμογών, όπως η παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών Διαδικτύου (Internet). Πλέον, τα δορυφορικά συστήματα χρησιμοποιούνται συχνά για να συμπληρώσουν και να ενισχύσουν την κάλυψη από τα σύγχρονα επίγεια δίκτυα, κυρίως σε απομονωμένες και δύσβατες (αγροτικές, ορεινές, νησιωτικές) περιοχές. Συνεπώς, στο προσεχές μέλλον οι δορυφορικές επικοινωνίες αναμένεται να αναλάβουν έναν ειδικό ρόλο στις τηλεπικοινωνίες παρέχοντας υπηρεσίες σε εξειδικευμένες κατηγορίες αγορών.

Έτσι, από την απαρχή της χρήσης δορυφορικών επικοινωνιών έχουν καταστεί οικονομικά προσιτές οι ζεύξεις μεταξύ μεγάλων αποστάσεων, αλλά πρωτίστως έχει καταστεί δυνατή η επικοινωνία με απομακρυσμένες περιοχές, όπου τα επίγεια δίκτυα δεν επαρκούν. Αυτό φαίνεται από το γεγονός ότι η δορυφορική κάλυψη εκτείνεται στο 99% της επιφάνειας του πλανήτη. Επίσης, παρέχεται ταχεία πρόσβαση κάθε χρήστη ανεξάρτητα της θέσης του, και ελαχιστοποιούνται οι πιθανότητες σφάλματος ή καθυστερήσεων σε σχέση με το παραδοσιακό τηλεφωνικό δίκτυο. Ακόμα, είναι δυνατή η εκπομπή ζωντανών τηλεοπτικών προγραμμάτων σε πλοία με τη χρήση τεχνικών συμπίεσης εικόνας, έχει αναπτυχθεί μια παγκόσμια υπηρεσία τηλε-ειδοποίησης, αλλά και έχει καταστεί δυνατή η ανίχνευση της θέσης οποιουδήποτε αντικειμένου, κινούμενου ή σταθερού, στην επιφάνεια της Γης.

Από την άλλη πλευρά όμως, το υψηλό κόστος του δορυφόρου καθιστά το κόστος εγκατάστασης ενός τέτοιου δορυφορικού συστήματος επικοινωνιών απρόσιτο για τους περισσότερους ιδιωτικούς φορείς, μη παραλείποντας την μεγάλη εξάρτηση της παροχής τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών από τον

χρόνο ζωής και την απόδοση των δορυφόρων. Στην περίπτωση δε γεωστατικού δορυφόρου, προστίθεται ο περιορισμός της καθυστέρησης στη μετάδοση των σημάτων λόγω της μεγάλης διαδρομής του σήματος και των αποκλίσεων από την ονομαστική τους θέση που συνεπάγεται τη χρήση δαπανηρών μηχανισμών αυτόματου ελέγχου και διόρθωσης της θέσης.

Από τα ανωτέρω γίνεται αντιληπτό ότι τα πλεονεκτήματα έχουν υπερκεράσει τα μειονεκτήματα που προκύπτουν από τη χρήση των δορυφορικών συστημάτων επικοινωνιών, δημιουργώντας έτσι πρόσφορο έδαφος για την περαιτέρω ανάπτυξή τους.



Σχήμα 1.2 Η Επικοινωνία δορυφόρου με διάφορες κατηγορίες τερματικών στην ξηρά, τη θάλασσα και τον αέρα.

## 1.2 Ορισμός και είδη δορυφορικών τροχιών

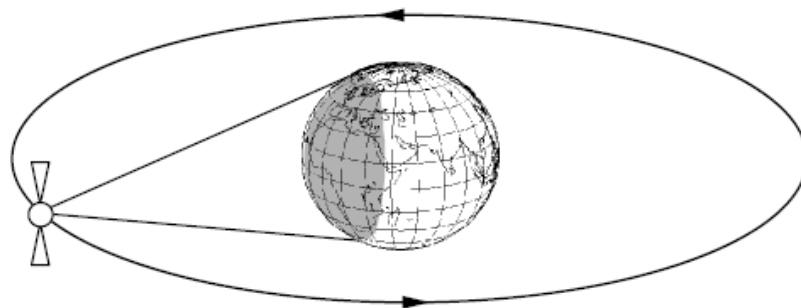
### 1.2.1 Ορισμός δορυφόρου και Γεωστατική Τροχιά

Δορυφόρος ονομάζεται κάθε ουράνιο σώμα που βρίσκεται σε τροχιά γύρω από ένα μεγαλύτερο σώμα. Η περιφορά γύρω από το τελευταίο γίνεται με περιοδικό τρόπο ως αποτέλεσμα της βαρυτικής έλξης και η τροχιά που διαγράφεται από το δορυφόρο μπορεί να είναι κυκλική ή ελλειπτική. Υπάρχουν οι φυσικοί δορυφόροι, όπως η σελήνη, και οι τεχνητοί δορυφόροι. Ο όρος «δορυφόρος» χρησιμοποιείται κυρίως για να περιγράψει δορυφόρους κατασκευασμένους από τον άνθρωπο, οι

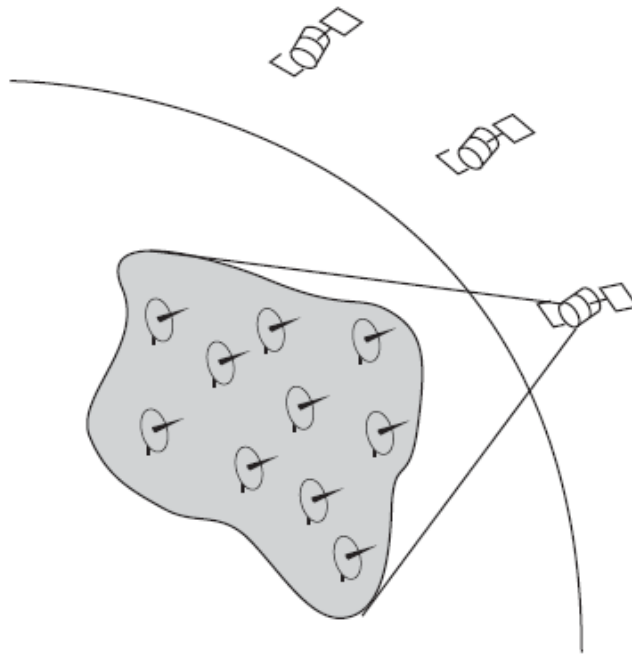


οποίοι εκτοξεύονται ώστε να εκτελέσουν κάποια χρήσιμη αποστολή και έχουν συγκεκριμένη διάρκεια ζωής.

Γεωσύγχρονος (geosynchronous) ονομάζεται ο δορυφόρος του οποίου η ταχύτητα περιστροφής ισούται με την ταχύτητα περιστροφής της γης., δηλαδή  $T \cong 23h,56min,4.1sec$ . Αντίστοιχα, η τροχιά την οποία διαγράφει ένας τέτοιος δορυφόρος κατά την κίνησή του ονομάζεται γεωσύγχρονη. Η κυκλική γεωσύγχρονη τροχιά έχει ακτίνα περίπου ίση με 35,786 km από την επιφάνεια της γης. Στην ειδική περίπτωση που ο γεωσύγχρονος δορυφόρος βρίσκεται ακριβώς πάνω από τον Ισημερινό, ονομάζεται γεωστατικός δορυφόρος (geostationary, GEO) και η αντίστοιχη τροχιά γεωστατική τροχιά (GEO). Μάλιστα, η γεωστατική τροχιά χρησιμοποιείται από την πλειοψηφία των σύγχρονων συστημάτων δορυφορικών επικοινωνιών. Η θέση ενός γεωστατικού δορυφόρου δεν μεταβάλλεται σε σχέση με έναν ακίνητο παρατηρητή επί της Γης, παρόλο που, λόγω της έλξης από τον Ήλιο και της μη ομοιόμορφης κατανομής της μάζας της Γης, πραγματοποιεί μια μικρή ελλειπτική κίνηση γύρω από ένα κεντρικό σημείο. Λόγω αυτής της ελαφρώς ελλειπτικής τροχιάς παρουσιάζεται μια αβεβαιότητα ως προς τη θέση του.



Σχήμα 1.3 Κάλυψη της Γης από δορυφόρο γεωστατικής τροχιάς



Σχήμα 1.4 Περιοχή κάλυψης (coverage area) δορυφόρου

Η επιλογή της γεωστατικής τροχιάς σε συντριπτικό βαθμό από τους παρόχους δορυφορικών υπηρεσιών γίνεται κατανοητή λαμβάνοντας υπόψη τα πλεονεκτήματα της εκμετάλλευσης της συγκεκριμένης τροχιάς. Λόγω της φαινομενικής σταθερότητας του δορυφόρου από τους επίγειους σταθμούς, η παρακολούθηση της θέσης του είναι σχετικά απλή και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ζεύξης που αφορούν την απόσταση πομπού και δέκτη μεταβάλλονται ελάχιστα. Επίσης, εκτός του ότι καλύπτονται όλες οι πυκνοκατοικημένες περιοχές της γης, η σταθερή γεωμετρία που προκύπτει από τη χρήση γεωστατικής τροχιάς ελαχιστοποιεί το φαινόμενο της ολίσθησης συχνότητας Doppler και καθιστά τυχόν μεταβολές της θέσης του δορυφόρου προβλέψιμες σε σχέση με άλλα τηλεπικοινωνιακά συστήματα.

Παρόλα ταύτα, οι γεωστατικοί δορυφόροι παρουσιάζουν και μία σειρά από μειονεκτήματα. Σημαντικότερο μειονέκτημα είναι η χρονική καθυστέρηση λόγω της διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος μεταξύ Γης και δορυφόρου (περίπου 125ms), γεγονός το οποίο δυσχεραίνει τις επικοινωνίες σε πραγματικό χρόνο (real-time). Αντίστοιχα μεγάλη είναι και η απόσβεση της ισχύος του σήματος λόγω της μεγάλης απόστασης μεταξύ δορυφόρου και επίγειου σταθμού. Ακόμα, όταν ο ήλιος, ο οποίος αποτελεί μια ισχυρή πηγή θορύβου, βρίσκεται μέσα στο εύρος του κυρίου λοβού ακτινοβολίας του επίγειου σταθμού, μειώνεται η απόδοση της ζεύξης, καθώς και η ποιότητα της επικοινωνίας. Επίσης αξίζει να επισημανθεί το γεγονός ότι με τη χρήση γεωστατικών δορυφόρων καλύπτεται μεγάλο μέρος του πλανήτη, ωστόσο, οι γεωστατικοί δορυφόροι αδυνατούν να παρέχουν κάλυψη σε περιοχές με γεωγραφικό πλάτος άνω των  $75^\circ$ . Τέλος, η εκτόξευση και επιτυχής τοποθέτηση δορυφόρων στη

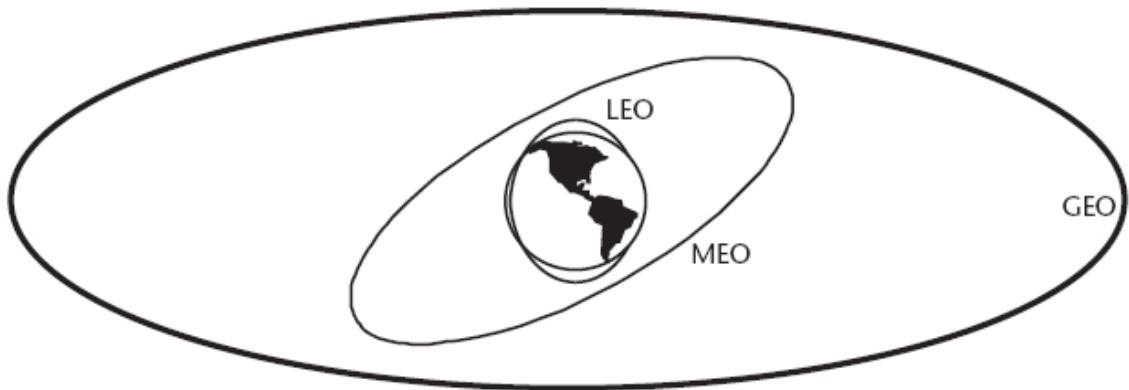
γεωστατική τροχιά προϋποθέτει υψηλό κόστος και κίνδυνο απώλειας του δορυφόρου. Όμως, για την πλειοψηφία των εφαρμογών, τα πλεονεκτήματα υπερτερούν των μειονεκτημάτων και, επομένως, η γεωστατική τροχιά χρησιμοποιείται για τα περισσότερα υπάρχοντα δορυφορικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα.

### 1.2.2 Είδη εναλλακτικών τροχιών

Η προσπάθεια αντιμετώπισης των μειονεκτημάτων που προαναφέρθηκαν οδήγησε στη χρήση εναλλακτικών τροχιών. Άλλες δημοφιλείς τροχιές στις οποίες τοποθετούνται δορυφόροι είναι :

- Οι Ελλειπτικές (Highly Elliptical Orbits, HEO): Οι τροχιές αυτές είναι κεκλιμένες σε σχέση με το επίπεδο του Ισημερινού και δίνουν τη δυνατότητα κάλυψης περιοχών υψηλού γεωγραφικού πλάτους για μεγάλο ποσοστό της περιόδου περιστροφής καθώς αυτός διέρχεται από το απόγειο της τροχιάς του. Επιπλέον, οι δορυφόροι σε αυτή την τροχιά αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της υψηλής καθυστέρησης διάδοσης, ενώ πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η σημαντική επίδραση του φαινομένου Doppler.
  
- Οι Μεσαίες (Medium Earth Orbits, MEO): Το ύψος των τροχιών αυτών κυμαίνεται από 5000 έως 12000Km με κλίση περίπου  $50^\circ$ . Μπορούν να παρέχουν παγκόσμια κάλυψη, αλλά για να καταστεί αυτό δυνατό απαιτείται ένα σύμπλεγμα ή αστερισμός (constellation) 10 έως 15 δορυφόρων. Εδώ παρατηρούνται λιγότερες απώλειες διαδρομής και μικρότερη καθυστέρηση διάδοσης. Από την άλλη πλευρά, απαιτείται η σχεδίαση πολύπλοκων αρχιτεκτονικών δικτύου, ενώ η αξιοπιστία του συστήματος είναι μέχρι στιγμής σχετικά χαμηλή. Τέλος, η εκτόξευση, συντήρηση και αντικατάσταση μεγάλου αριθμού δορυφόρων οδηγούν σε δραματική αύξηση του κόστους.

- Οι Χαμηλές (Low Earth Orbits, LEO): Το ύψος των τροχιών αυτών είναι μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα (500-900Km) και η κλίση τους περίπου  $90^\circ$ . Προσφέρουν παγκόσμια κάλυψη και διεθνείς επικοινωνίες σε πραγματικό χρόνο, με αντίτιμο την ανάπτυξη ενός αστερισμού αποτελούμενου από αρκετές δεκάδες δορυφόρους. Οι χαμηλές απώλειες διαδρομής δίνουν τη δυνατότητα χρήσης μικρότερων σε διαστάσεις επίγειων τερματικών, ενώ η καθυστέρηση διάδοσης ελαχιστοποιείται σε επίπεδα συγκρίσιμα με αυτά των συστημάτων οπτικών ινών. Εντούτοις, παρουσιάζονται και εδώ τα μειονεκτήματα του υψηλού κόστους και της πολύπλοκης σχεδίασης. Επιπλέον, η μεγάλη ταχύτητα των δορυφόρων επιφέρει ταχεία εξάντληση των συστημάτων τροφοδοσίας τους, μειώνοντας έτσι σημαντικά τη διάρκεια ζωής τους, ενώ προϋποθέτει και πολύπλοκες διαδικασίες παρακολούθησης και διαπομπής (handover).

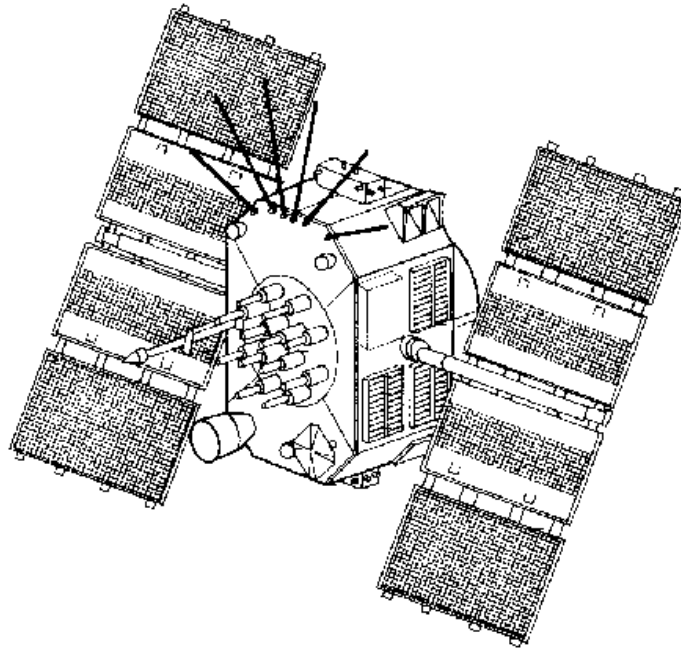


Σχήμα 1.5 Απεικόνιση των δορυφορικών τροχιών

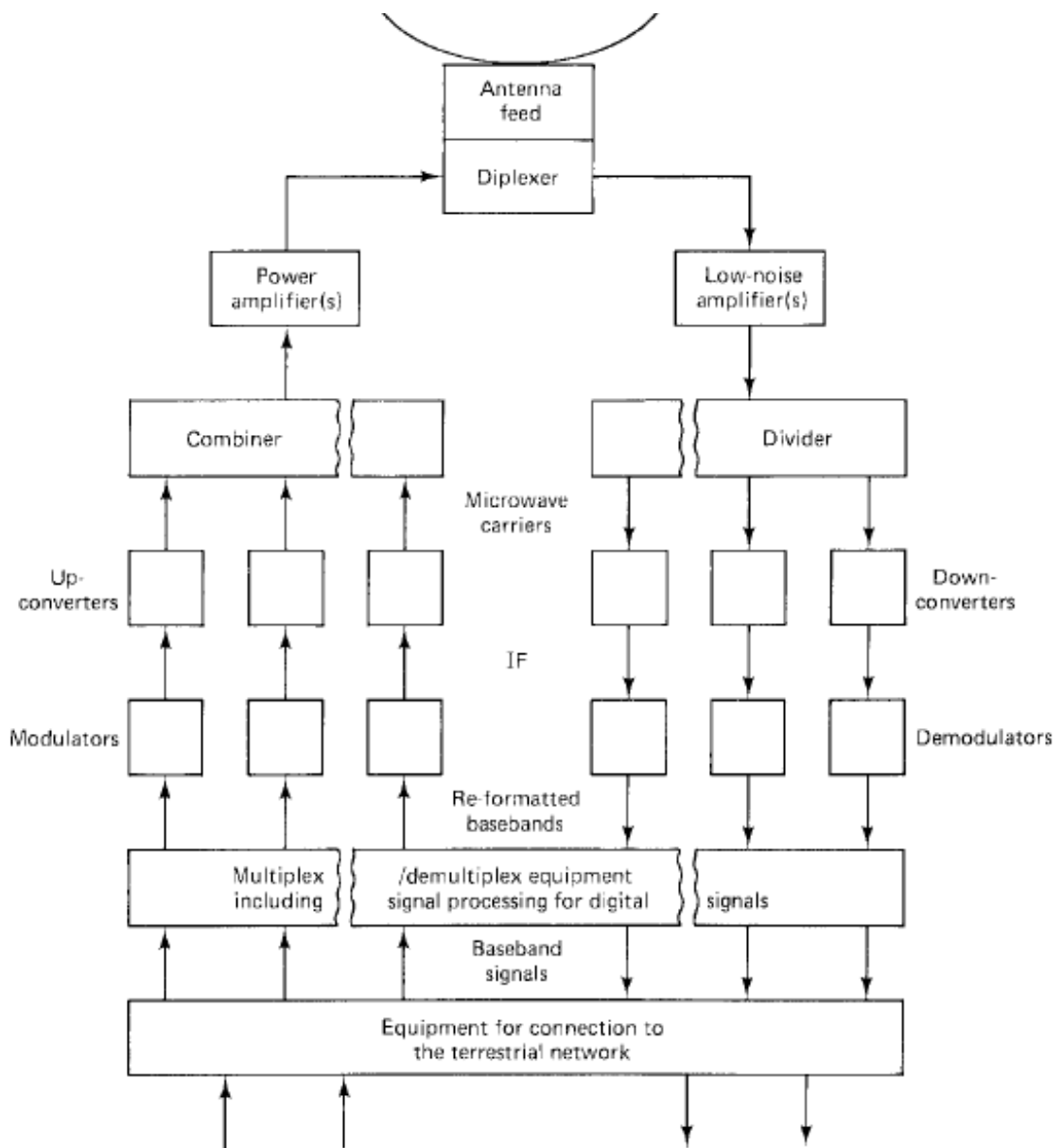
### 1.3 Δομή ενός δορυφορικού συστήματος επικοινωνιών

Ένα σύστημα δορυφορικών επικοινωνιών αποτελείται από το δορυφορικό τμήμα (space segment - Σχήμα 1.6) και το επίγειο τμήμα (earth segment - Σχήμα 1.7), τα χαρακτηριστικά των οποίων εξαρτώνται από τις εφαρμογές που υποστηρίζονται από το σύστημα. Οι εφαρμογές αυτές μπορεί να αφορούν σταθερές, κινητές υπηρεσίες ή υπηρεσίες ευρυεκπομπής.

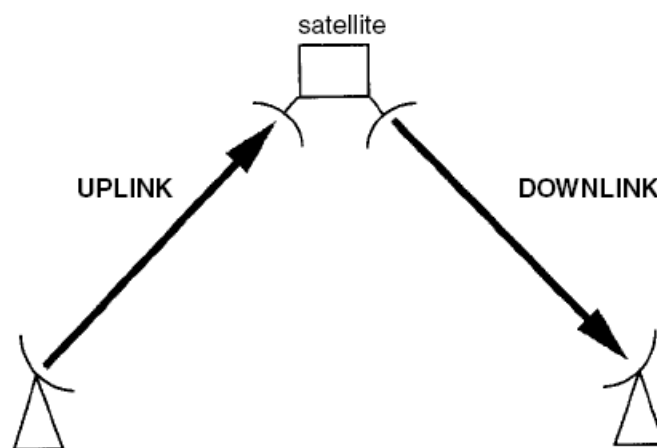
Η συνολική διαδρομή που διανύουν τα σήματα από τον πομπό μέχρι τον τελικό δέκτη διακρίνεται σε δυο επιμέρους ζεύξεις, την προς τα άνω (ζεύξη από τον επίγειο σταθμό προς το δορυφόρο, uplink) και την προς τα κάτω ζεύξη (ζεύξη από το δορυφόρο προς τον επίγειο σταθμό, downlink), όπως αυτές παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.8. Η ποιότητα μιας δορυφορικής ζεύξης εξαρτάται κατά βάση από το λόγο φέροντος προς θόρυβο (carrier-to-noise ratio, CNR), ο οποίος εξετάζεται χωριστά για την προς τα άνω και την προς τα κάτω ζεύξη.



Σχήμα 1.6 Απεικόνιση του δορυφορικού τμήματος



Σχήμα 1.7 Μπλοκ-διάγραμμα του επίγειου τμήματος



Σχήμα 1.8 Η προς τα πάνω και η προς τα κάτω ζεύξη

### 1.3.1 Επίγειος σταθμός

Ο επίγειος σταθμός αποτελείται από τα υποσυστήματα επικοινωνιών, παρακολούθησης και ελέγχου και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

#### ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Το υποσύστημα επικοινωνιών περιλαμβάνει τα τμήματα ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency, RF), ενδιάμεσης συχνότητας (Intermediate Frequency, IF) και βασικής ζώνης (Baseband).

Στην πλευρά της εκπομπής, το σήμα βασικής ζώνης μετατρέπεται σε σήμα RF και στη συνέχεια εκπέμπεται από την κεραία προς το δίαυλο. Ο πομπός πραγματοποιεί ομαδοποίηση ψηφίων σε πακέτα, διαμόρφωση των επιμέρους καναλιών στην ενδιάμεση συχνότητα, άνω μετατροπή από τη συχνότητα IF στη συχνότητα RF καθώς και ενίσχυση των σημάτων μέσω του ενισχυτή HPA (High Power Amplifier) πριν από την εκπομπή τους.

Στην πλευρά της λήψης, το σήμα που διαδίδεται μέσω του δορυφορικού διαύλου λαμβάνεται από την κεραία και ακολουθεί η αντίστροφη διαδικασία μετατροπής από τη ζώνη RF στη βασική ζώνη. Τη λήψη του σήματος ακολουθεί η ενίσχυση χαμηλού θορύβου (Low Noise Amplifier, LNA), φιλτράρισμα, κάτω μετατροπή συχνότητας από RF σε IF, αποδιαμόρφωση, ανάκτηση των ψηφίων και αποκωδικοποίηση για διόρθωση λαθών.

#### ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑ ΤΗΛΕΜΕΤΡΙΑΣ, ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ

Η βασική λειτουργία του υποσυστήματος τηλεμετρίας, παρακολούθησης και ελέγχου (Telemetry, Tracking and Control, TT&C) είναι η παροχή πληροφοριών για τον έλεγχο του επίγειου σταθμού και της θέσης του δορυφόρου, η ενεργοποίηση σημάτων συναγερμού, η δημιουργία σημάτων ελέγχου και διόρθωσης σε περίπτωση αστοχίας κάποιου τμήματος και η μεταπήδηση, όταν αυτό κρίνεται απαραίτητο, σε εφεδρικό σύστημα.

## ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Το συγκεκριμένο υποσύστημα ρυθμίζει την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος στα επιμέρους τμήματα του επίγειου σταθμού και παρέχει εφεδρική προστασία στα τμήματα που τη χρειάζονται, ανάλογα με το αν επιδέχονται ή όχι παρατεταμένες διακοπές λειτουργίας.

### 1.3.2 Δορυφόρος:

Πρόκειται για έναν πολύπλοκης κατασκευής πομποδέκτη υψηλού κόστους, ο οποίος λειτουργεί υπό αντίξοες συνθήκες που συνιστά το διαστημικό περιβάλλον. Ο δορυφόρος αποτελείται από τα υποσυστήματα επικοινωνιών, ελέγχου της θέσης και σταθεροποίησης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

## ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Αποτελείται από την κεραία και τον τηλεπικοινωνιακό επαναλήπτη. Η κεραία λαμβάνει και, στη συνέχεια, επανεκπέμπει τα σήματα από τη ζεύξη uplink προς τη ζεύξη downlink μέσω του ενισχυτή TWTA (Traveling Wave Tube Amplifier). Υπάρχουν δυο είδη δορυφορικών συστημάτων, οι διαφανείς (transparent ή bent pipe) και οι αναγεννητικοί (regenerative ή on-board processing). Στο διαφανές δορυφορικό σύστημα δε μεταβάλλεται η βασική μορφή των σημάτων που λαμβάνονται, αλλά απλά πραγματοποιείται ενίσχυσή τους. Στο αναγεννητικό δορυφορικό σύστημα ανακτάται το αρχικό σήμα, στη συνέχεια πραγματοποιείται η επεξεργασία του ώστε να διαμορφωθούν εκ νέου τα φέροντα της συχνότητας downlink.

Ο επαναλήπτης είναι μια διασύνδεση πολλών απλών αναμεταδοτών και αποτελείται από το υποσύστημα δέκτη/κάτω μετατροπέα συχνότητας, τον πολυπλέκτη εισόδου, τις βαθμίδες ενίσχυσης και τον πολυπλέκτη εξόδου.

## ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑ ΤΗΛΕΜΕΤΡΙΑΣ / ΕΛΕΓΧΟΥ ΘΕΣΗΣ

Παρακολουθεί όλα τα υποσυστήματα και τα τμήματα του δορυφόρου και στέλνει κατάλληλα σήματα πληροφοριών στον επίγειο σταθμό. Εκτός από σήματα πληροφορίας, ο δορυφόρος εκπέμπει



σήματα τηλεμετρίας / λαμβάνει σήματα ελέγχου, στο άλλο άκρο του συστήματος ΤΤ&C. Προσδιορίζεται με ακρίβεια η πραγματική θέση και απόσταση του δορυφόρου από τον επίγειο σταθμό έλεγχου, σταθεροποιείται η θέση του και παρακολουθείται η κατεύθυνση εκπομπής της κεραίας.

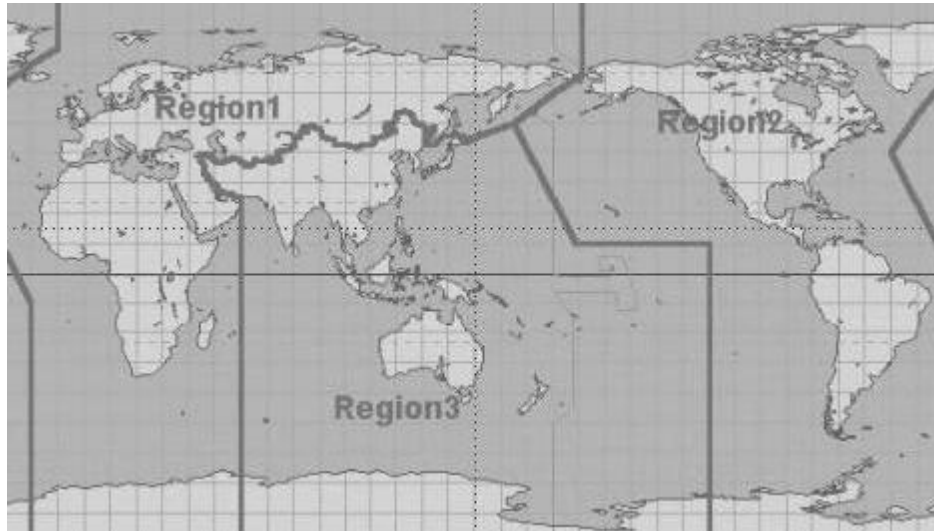
## ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ως βασική μορφή ενέργειας χρησιμοποιείται η ηλιακή, η οποία εδώ μετατρέπεται σε ηλεκτρική με τη βοήθεια μιας διάταξης ηλιακών κυψελών. Ως εφεδρική παροχή ενέργειας χρησιμοποιούνται συσσωρευτές που επαναφορτίζονται από τις ηλιακές κυψέλες, οι οποίες λόγω των αντίξοων συνθηκών στις οποίες λειτουργεί ο δορυφόρος, υπόκεινται μεγάλη φθορά. Η φθορά αυτή των ηλιακών συσσωρευτών αποτελεί τον βασικότερο περιορισμό στον χρόνο ζωής των δορυφόρων, ο οποίος εκτιμάται στα 15 έτη.

### **1.4 Εκχώρηση Δορυφορικού Φάσματος**

Το διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων για τις διάφορες εφαρμογές ανατίθεται από τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών ITU (International Telecommunication Union), η οποία λειτουργεί υπό την αιγίδα των Ηνωμένων Εθνών με έδρα τη Γενεύη. Επειδή το φάσμα των ραδιοσυχνοτήτων είναι περιορισμένο, η ITU έχει εκχωρήσει κοινό τμήμα του φάσματος σε περισσότερες χώρες και για ποικίλους σκοπούς ανά την υφήλιο. Συνέπεια της αναχρησιμοποίησης του φάσματος είναι οι παρεμβολές που προκαλούνται, οι οποίες πρέπει να ελαχιστοποιούνται, προληπτικά, μέσω της κατάλληλης σχεδίασης των συστημάτων ή, κατασταλτικά, με επιπρόσθετες τεχνικές. Η ITU έχει χωρίσει τη γη σε 3 Περιοχές (Regions) για την εκχώρηση των συχνοτήτων αυτών, οι οποίες είναι (βλ. Σχήμα 1.9):

- Περιοχή 1) Ευρώπη, Αφρική, Μέση Ανατολή, Ασιατικές περιοχές πρώην Σοβιετικής Ένωσης
- Περιοχή 2) Βόρεια και Νότια Αμερική
- Περιοχή 3) Υπόλοιπο Ασίας, Αυστραλία



Σχήμα 1.9 Οι 3 γεωγραφικές ζώνες εκχώρησης συχνοτήτων

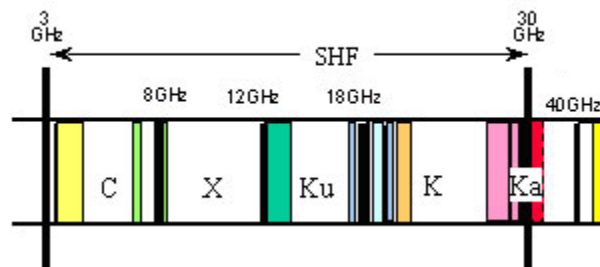
Ακόμα, για τη βέλτιστη εκμετάλλευση του ραδιοφάσματος, η ΙΤΥ έχει καθορίσει συχνότητες για όλες τις δορυφορικές υπηρεσίες, τόσο για την άνω ζεύξη (επίγειος σταθμός – δορυφόρος), όσο και για την κάτω ζεύξη (δορυφόρος – επίγειος σταθμός). Οι ζώνες συχνοτήτων και οι αντίστοιχες υπηρεσίες όπως έχουν ανατεθεί από την ΙΤΥ φαίνονται παρακάτω, στον Πίνακα 1.1.

Ονομασία Ζώνης Συχνοτήτων	Συχνότητα κάτω ζεύξης	Συχνότητα άνω ζεύξης	Κατηγορίες Τηλεπικοινωνιακών Υπηρεσιών
L-ζώνη	1 GHz	2 GHz	Κινητή υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Mobile Satellite Service, MSS)
			Κινητή υπηρεσία ξηράς μέσω δορυφόρου (Land Mobile Satellite Service, LMSS)
S-ζώνη	2 GHz	4 GHz	Κινητή υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Mobile Satellite Service, MSS)
			Υπηρεσία έρευνας του διαστήματος (Space Research Service, SRS)
C-ζώνη	4 GHz	8 GHz	Σταθερή Υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Fixed Satellite Service, FSS)
X-ζώνη	8 GHz	12.5 GHz	Σταθερή Υπηρεσία μέσω δορυφόρου για στρατιωτικούς σκοπούς (Fixed Satellite Service Military Communication)
Ku-ζώνη	12.5 GHz	18 GHz	Σταθερή Υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Fixed Satellite Service, FSS)
			Υπηρεσία εκπομπής μέσω δορυφόρου (Broadcast Satellite Service, BSS)

Όνομασία Ζώνης Συχνοτήτων	Συχνότητα κάτω ζεύξης	Συχνότητα άνω ζεύξης	Κατηγορίες Τηλεπικοινωνιακών Υπηρεσιών
K-ζώνη	18 GHz	26.5 GHz	Σταθερή Υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Fixed Satellite Service, FSS)
			Υπηρεσία εκπομπής μέσω δορυφόρου (Broadcast Satellite Service, BSS)
Ka-ζώνη	26.5 GHz	30 GHz	Σταθερή Υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Fixed Satellite Service, FSS)
			Υπηρεσία εκπομπής μέσω δορυφόρου (Broadcast Satellite Service, BSS)

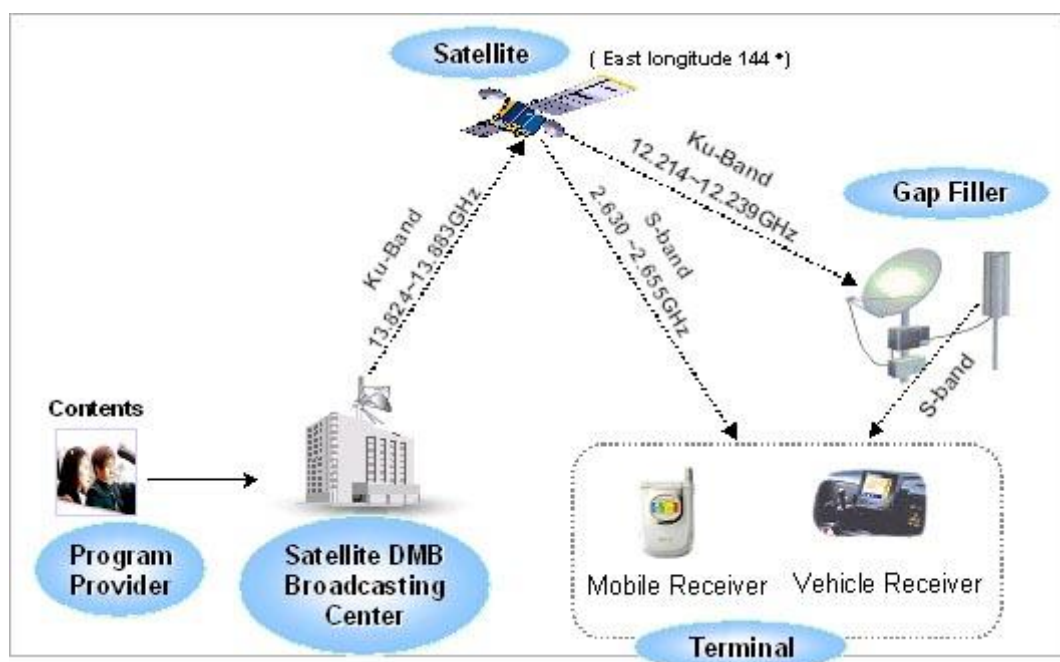
Πίνακας 1.1 Οι δορυφορικές ζώνες συχνοτήτων και οι αντίστοιχες υπηρεσίες

Οι ζώνες συχνοτήτων που ενδιαφέρουν τις δορυφορικές επικοινωνίες βρίσκονται άνω των 100MHz, όπου συναντώνται οι συχνότητες VHF, UHF και υπερυψηλές συχνότητες SHF (Super High Frequency). Εξαιτίας της ευρείας χρήσης της, η ζώνη συχνοτήτων SHF έχει διασπαστεί σε επιμέρους ζώνες, τις L, S, C, X, Ku και Ka (οι αντίστοιχες συχνότητες φαίνονται στο Σχήμα 1.10).



Σχήμα 1.10 Δορυφορικές ζώνες συχνοτήτων

Γενικά, η ζώνη Ku και οι χαμηλότερες από αυτήν βρίσκονται σε ευρεία χρήση, εξαιτίας του σχετικά μικρού κόστους του διαθέσιμου εξοπλισμού και τα σχετικά ευνοϊκά χαρακτηριστικά διάδοσης, με αποτέλεσμα τη δημιουργία φασματικής συμφόρησης. Στη ζώνη Ka υποστηρίζονται σήματα σε χιλιοστομετρικά μήκη κύματος, ενώ η ζώνη αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι κατά τη μετάδοση σε πολύ υψηλές συχνότητες, τα μεγέθη των κεραιών εκπομπής/λήψης είναι μειωμένα. Ταυτόχρονα, η εκμετάλλευση σημάτων σε χιλιοστομετρικά μήκη κύματος εμφανίζει το μειονέκτημα του υψηλού κόστους εξοπλισμού, αλλά της αυξημένης απόσβεσης που εισάγεται λόγω των μηχανισμών διάδοσης (βλ. παρακάτω).



Σχήμα 1.11 Ένα αστικό δορυφορικό δίκτυο σε διάφορες ζώνες συχνοτήτων.

Σημειώνεται ότι οι ζώνες συχνοτήτων που έχουν διατεθεί από την ΙΤU για την άνω ζεύξη είναι υψηλότερες από αυτές της προς τα κάτω ζεύξης, λόγω του ότι οι ενισχυτές HPA του επίγειου σταθμού έχουν μεγαλύτερες δυνατότητες ισχύος σε σχέση με τους ενισχυτές TWTA του δορυφόρου λόγω περιορισμών μεγέθους και μάζας που αυτός έχει. Ένα φυσικό χαρακτηριστικό των μικροκυματικών ενισχυτών είναι ότι η αποτελεσματικότητα της μετατροπής από εναλλασσόμενο ρεύμα σε RF ισχύ τείνει να ελαττώνεται όσο αυξάνει η συχνότητα.

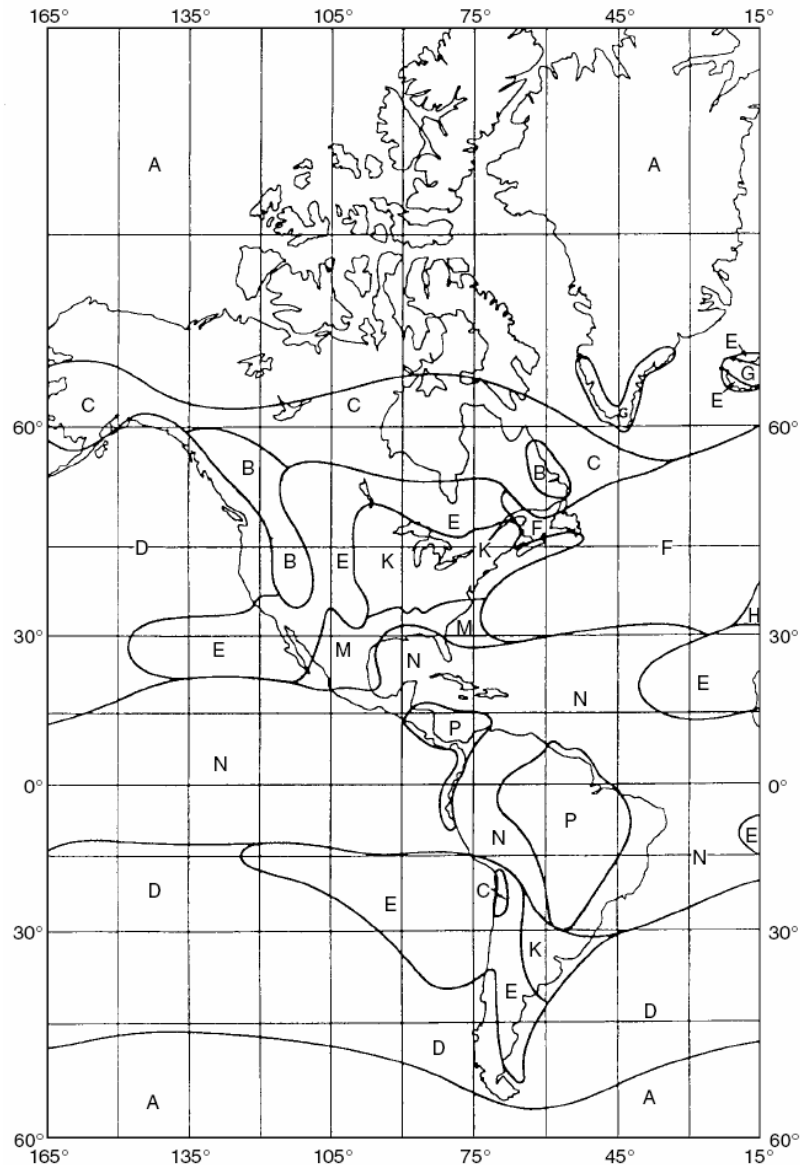
## **1.5 Δυσμενείς επιδράσεις της ατμόσφαιρας κατά τη διάδοση των δορυφορικών σημάτων**

Κατά τη διάδοσή τους μέσω της ατμόσφαιρας, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα υφίστανται απόσβεση λόγω διάδοσης, απορρόφησης και διάθλασης, καθώς και αποπόλωση. Τα φαινόμενα διάδοσης που επηρεάζουν τις δορυφορικές ζεύξεις δημιουργούνται στην τροπόσφαιρα και έχουν επίπτωση σε συχνότητες υψηλότερες των 3GHz καθώς και στην ιονόσφαιρα οπότε και έχουν επίπτωση σε συχνότητες χαμηλότερες των 3GHz. Λόγω, όμως, της σύγχρονης τάσης των δορυφορικών επικοινωνιών να λειτουργούν σε συχνότητες υψηλότερες των 10GHz, ενδιαφέρουν περισσότερο τα τροποσφαιρικά φαινόμενα και οι επιπτώσεις τους.

Παρακάτω παρατίθενται συνοπτικά τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα που δυσχεραίνουν τη μετάδοση δορυφορικών σημάτων.

### **ΔΙΑΛΕΙΨΕΙΣ (FADING) ΛΟΓΩ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΕΩΝ**

Κατά τη διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσω βροχής και χιονιού προκαλείται εξασθένηση λόγω της σκέδασης και απορρόφησης από τους υδρομετεωρίτες, ο συνδυασμός των οποίων προκαλεί απόσβεση στο σήμα ανάλογη με το τετράγωνο της συχνότητας σε dB. Το βάθος των διαλείψεων λόγω των ατμοσφαιρικών κατακρημνήσεων εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά του δορυφορικού συστήματος, όπως η γωνία ανύψωσης του δορυφόρου και η πόλωση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, όσο και από φυσικά χαρακτηριστικά του φαινομένου, όπως τον ρυθμό της βροχόπτωσης και το μέγεθος/μορφή των σταγόνων βροχής. Η δυσμενέστερη επίδραση των φαινομένων αυτών εμφανίζεται στις τροπικές και υποτροπικές περιοχές. Επομένως, για τον αποδοτικό σχεδιασμό μιας δορυφορικής ζεύξης πρέπει απαραίτητα να λαμβάνονται υπόψη τα μοντέλα πρόβλεψης της απόσβεσης λόγω βροχόπτωσης για την τοποθεσία εγκατάστασης.



Σχήμα 1.12 Κλιματολογικές ζώνες βροχοπτώσεων.

Ο παραπάνω χάρτης (Σχήμα 1.12) δε χρησιμοποιείται πλέον από την ΙΤΥ, αλλά δείχνει τις περιοχές που είναι πιο ευαίσθητες στα φαινόμενα ατμοσφαιρικών κατακρμνήσεων.

### ΑΠΟΣΒΕΣΗ (ATTENUATION) ΑΠΟ ΑΕΡΙΑ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ

Η απόσβεση που εισάγεται στο μεταδιδόμενο σήμα λόγω ατμοσφαιρικών αερίων δεν είναι τόσο ισχυρή όσο αυτή λόγω βροχόπτωσης, αλλά είναι σημαντική, ιδιαίτερα όταν η γωνία ανύψωσης του δορυφόρου είναι μικρή. Ατμοσφαιρικά αέρια όπως το οξυγόνο και οι υδρατμοί είναι απορροφητικά μέσα διάδοσης και συμβάλλουν στην περαιτέρω εξασθένηση του δορυφορικού σήματος. Για

συχνότητες κάτω των 30GHz, η απορρόφηση προκαλείται κυρίως από τους υδρατμούς και εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την απόλυτη υγρασία μιας γεωγραφικής περιοχής.

### ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗ ΛΟΓΩ ΝΕΦΩΣΕΩΝ

Τα νέφη περιλαμβάνουν ποσότητες ύδατος και για το λόγο αυτό δημιουργούν εξασθένηση. Έτσι, οι νεφώσεις και η ομίχλη προκαλούν πρόσθετη απόσβεση στα ραδιοκύματα και έχουν μεγαλύτερη επίπτωση στην ζώνη συχνοτήτων Ku.

### ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΣΤΡΩΜΑ ΤΗΞΗΣ ΤΟΥ ΠΑΓΟΥ

Υπάρχει ένα συγκεκριμένο υψόμετρο πάνω από την επιφάνεια της Γης (ενεργό ύψος), στο οποίο το χιόνι και οι παγοκρύσταλλοι μετατρέπονται σε σταγόνες βροχής. Η περιοχή όπου λαμβάνει χώρα το φαινόμενο αυτό ονομάζεται στρώμα τήξης. Η διέλευση δορυφορικών σημάτων μέσω του στρώματος τήξης προκαλεί εξασθένηση, ιδιαίτερα αν ο δορυφόρος έχει μικρή γωνία ανύψωσης.

### ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΟΙ ΣΠΙΝΘΙΡΙΣΜΟΙ (SCINTILLATIONS)

Τα δορυφορικά σήματα υφίστανται περαιτέρω διακυμάνσεις λόγω των μεταβολών στο δείκτη διάθλασης της τροπόσφαιρας. Οι διακυμάνσεις αυτές ονομάζονται σπινθιρισμοί, αυξάνονται ανάλογα με τη συχνότητα και εξαρτώνται από το συνολικό μήκος της δορυφορικής ζεύξης.

### ΑΠΟΠΟΛΩΣΗ (DEPOLARIZATION)

Σε συχνότητες υψηλότερες των 10GHz οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις αποτελούν περιοριστικό παράγοντα για έναν ακόμη λόγο. Οι σταγόνες βροχής και οι παγοκρύσταλλοι είναι μη σφαιρικοί σκεδαστές και προκαλούν έτσι αποπόλωση του κύματος. Στις τεχνικές αναχρησιμοποίησης συχνότητας που χρησιμοποιούνται στις δορυφορικές επικοινωνίες για τη βέλτιστη αξιοποίηση του ραδιοφάσματος, χρησιμοποιούνται δυο ορθογώνιες πολώσεις. Η αποπόλωση λοιπόν αναιρεί την απομόνωση μεταξύ των ορθογώνιων πολώσεων, με αποτέλεσμα μέρος της ισχύος της μίας πόλωσης να δημιουργεί παρεμβολή στην ορθογώνιά της.



Από τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι ο πλέον επιβαρυντικός παράγοντας εξασθένησης στα δορυφορικά σήματα είναι η απόσβεση λόγω βροχής. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου, γίνονται εδώ και δεκαετίας έρευνες για την εξέλιξη των τεχνικών αντιμετώπισης των διαλείψεων (Fade Mitigation Techniques, FMT), οι οποίες σκοπό έχουν την ελαχιστοποίηση των επιδράσεων της βροχής σε συχνότητες άνω των 10GHz. Τέτοιες τεχνικές είναι ο έλεγχος της ισχύος (power control), η προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση των σημάτων (adaptive coding modulation) και τα σχήματα διαφορικής προστασίας (diversity protection).

## 1.6 Δορυφορικά δίκτυα VSAT:

Ο όρος VSAT (Very Small Aperture Terminal) που αναφέρεται πλέον σε τερματικά πολύ μικρού ανοίγματος, που χρησιμοποιούνται στις δορυφορικές επικοινωνίες, ήταν αρχικά ένα εμπορικό σήμα για έναν μικρό γήινο σταθμό που κατασκευάστηκε στη δεκαετία του '80 από την εταιρεία Telcom General στις ΗΠΑ. Οι VSATs είναι μικροί σταθμοί με διάμετρο κεραίας μικρότερη από 2.4m, αιτιολογώντας έτσι το όνομά τους. Τέτοιοι σταθμοί μπορούν να υποστηρίξουν δορυφορικές συνδέσεις με ανταγωνιστικούς ρυθμούς μετάδοσης, ενώ, ταυτόχρονα, είναι οικονομικοί, με το κόστος παραγωγής να κυμαίνεται από \$1000 έως \$5000. Επιπλέον, οι σταθμοί VSAT εγκαθίστανται εύκολα με μια πρόσθετη δαπάνη εγκατάστασης, η οποία είναι συνήθως μικρότερη από \$2000. Κατά συνέπεια, οι επίγειοι σταθμοί VSAT είναι μέσα στις οικονομικές δυνατότητες μικρών επιχειρήσεων και μπορούν να προσφέρουν δικτυακές υπηρεσίες με υψηλή ποιότητα υπηρεσιών (QoS, Quality of Service). Η δορυφορική σύνδεση σε ένα τέτοιο δίκτυο είναι της τάξης των μερικών δεκάδων kbits/s. Το προσιτό τους κόστος λοιπόν, έχει μετατρέψει τα δίκτυα VSAT σε ιδιαίτερα δημοφιλή, με ραγδαία αύξηση της αγοράς τους (20%-25% ετησίως) από τη δεκαετία του '90, φαινόμενο που πιθανολογείται να συνεχιστεί και στο άμεσο μέλλον.

Ανάλογα με το είδος τους, τα δίκτυα VSAT προσφέρουν ποικίλες υπηρεσίες, όπως η μεταφορά δεδομένων, η μετάδοση τηλεόρασης, video και φωνής. Καθεμία από τις υπηρεσίες αυτές έχει τις δικές της απαιτήσεις σε ρυθμό μετάδοσης, QoS και πρωτόκολλα επικοινωνίας.

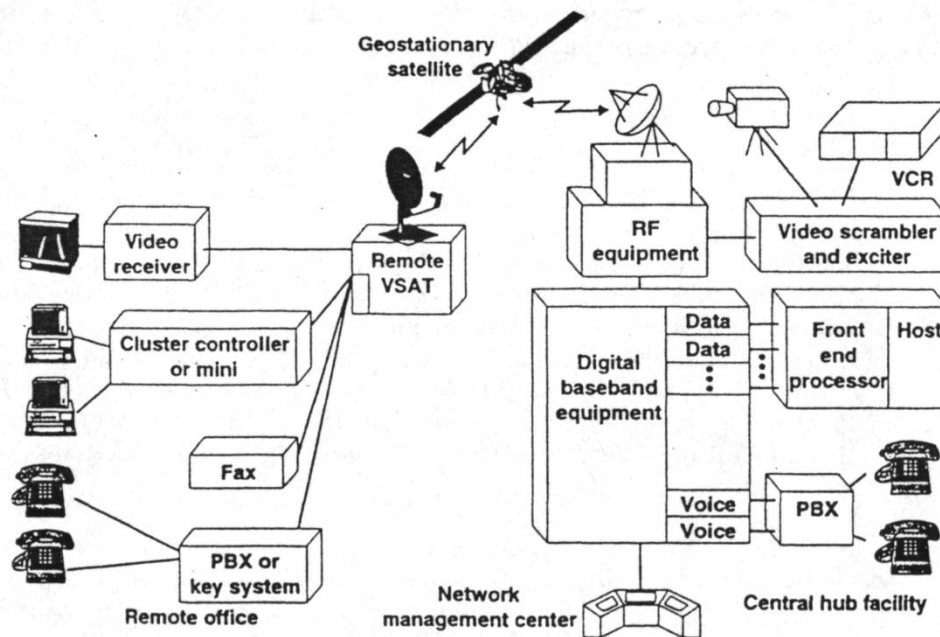
Αν οι χρήστες του δορυφορικού δικτύου είναι μεγάλοι οργανισμοί ή πολυεθνικές επιχειρήσεις, προτιμάται η αγορά ενός ολοκληρωμένου δικτύου VSAT, συμπεριλαμβανομένου του κεντρικού σταθμού (Gateway ή Hub). Στα συστήματα VSAT, ο δορυφόρος παίζει το ρόλο του κοινού σημείου διασύνδεσης για το δίκτυο. Με αυτόν τον τρόπο αναιρείται η απαίτηση για ξεχωριστή φυσική σύνδεση μεταξύ του Hub με κάθε απομακρυσμένο σημείο. Τη συνολική κίνηση δεδομένων στο δίκτυο αποτελούν η προς τα μέσα (inbound traffic) και η προς τα έξω (outbound traffic) κίνηση. Στην outbound κίνηση, της οποίας ο

ρυθμός κυμαίνεται ανάλογα με τη δομή του συγκεκριμένου δικτύου μεταξύ 64Kbps και 2Mbps, εκτός από τα δεδομένα των χρηστών περιλαμβάνονται και πληροφορίες ελέγχου του δικτύου.



Σχήμα 1.13 Φορητός σταθμός VSAT τύπου “fly-away”

Ένα τυπικό δίκτυο VSAT αποτελείται από τον κεντρικό σταθμό και από τα απομακρυσμένα επίγεια τερματικά (Σχήμα 1.14).

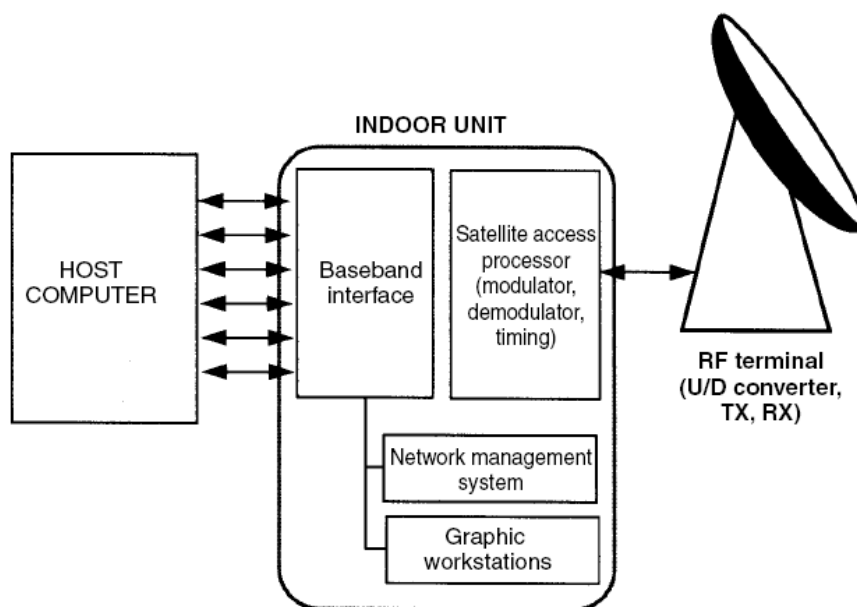


Σχήμα 1.14 Αρχιτεκτονική ενός δικτύου VSAT

### 1.6.1 Κεντρικός σταθμός

Ο κεντρικός σταθμός είναι το σημείο αφετηρίας για την outbound κίνησης, η οποία διαμοιράζεται μεταξύ των τερματικών VSAT του δικτύου. Έχει σταθερή χωρητικότητα και η πληροφορία μεταδίδεται με σταθερό ρυθμό, ενώ χρησιμοποιείται πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου (Time Division Multiple Access, TDMA) στη ζεύξη uplink και πολύπλεξη διαίρεσης χρόνου (Time Division Multiplexing, TDM) στη ζεύξη downlink. Διαφορετικά μηνύματα (πλην εκείνων που περιέχουν πληροφορία) που αποστέλλονται από τον κεντρικό σταθμό προς τους άλλους επίγειους σταθμούς είναι τα μηνύματα ελέγχου και σηματοδοσίας του δικτύου.

Οι τυπικές κεραιές που χρησιμοποιούνται στις δορυφορικές επικοινωνίες είναι παραβολικά κάτοπτρα με διάμετρο από 4 έως 11 μέτρα. Εκτός από την κεραιά, ο κεντρικός σταθμός διαχωρίζεται στην εξωτερική μονάδα (outdoor Unit, ODU), η οποία περιλαμβάνει το τμήμα ραδιοσυχνοτήτων και την εσωτερική μονάδα (Indoor Unit, IDU), η οποία περιλαμβάνει το τμήμα βασικής ζώνης (Baseband). Οι δυο μονάδες συνδέονται μέσω μιας διεπαφής ενδιάμεσων συχνοτήτων. Στο τμήμα ραδιοσυχνοτήτων εκτελούνται κατά τη λήψη σημάτων οι διαδικασίες ενίσχυσης χαμηλού θορύβου, φιλτραρίσματος και εξίσωσης συχνότητας και κατά την εκπομπή σημάτων εκτελείται ενίσχυση. Στο τμήμα βασικής ζώνης εκτελούνται όλες οι λειτουργίες που ελέγχουν την ομαλή ροή και την κίνηση των πληροφοριών, αλλά μπορεί επίσης να υποστηρίξει και εφαρμογές τηλεφωνίας και video.



Σχήμα 1.15 Η δομή του κεντρικού σταθμού.

## 1.6.2 Απομακρυσμένοι σταθμοί VSAT:

Είτε πρόκειται για απομακρυσμένα τερματικά VSAT ή για κεντρικούς σταθμούς διασύνδεσης (Hub), αποτελούνται από τρία υποσυστήματα: την εσωτερική μονάδα το καλώδιο διασύνδεσης (Interfacility Link ή IFL) και την εξωτερική μονάδα όπως φαίνεται στο σχήμα 1.17

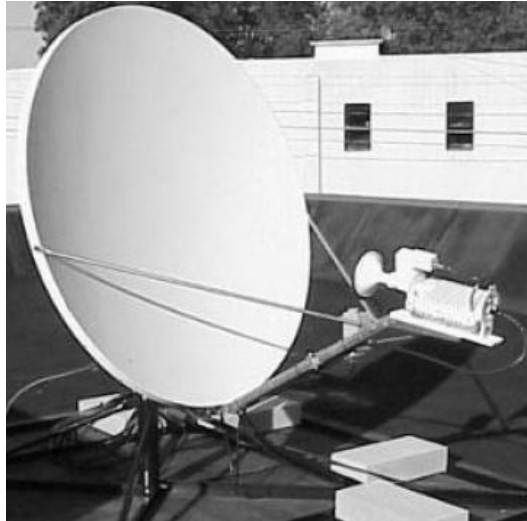
### ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ (IDU)

Η λειτουργία της εσωτερικής μονάδας είναι η επεξεργασία του σήματος βασικής ζώνης και η διασύνδεση με τους χρήστες του δικτύου σε επίπεδο πρωτοκόλλων και πρόσβασης. Η επεξεργασία του σήματος βασικής ζώνης συνίσταται στην πολύπλεξη και αποπολύπλεξη του (multiplexing, demultiplexing), κωδικοποίηση για διόρθωση λαθών καθώς και διαμόρφωση και αποδιαμόρφωσή του.

Για τον προσδιορισμό της IDU, οι ακόλουθοι παράγοντες είναι σημαντικοί:

- Αριθμός των θυρών που προσφέρονται στους χρήστες.
- Ο τύπος των θυρών (οι οποίες υποστηρίζουν interface μηχανικό, ηλεκτρικό ή λειτουργικό).
- Οι ταχύτητες στις θύρες
- Τα πρωτόκολλα που υποστηρίζονται ως διεπαφές με τοπικά δίκτυα (Local Area Networks, LAN), εφαρμογές video και άλλα.
- Η μέθοδος πολλαπλής πρόσβασης (FDMA – Frequency Division Multiple Access, TDMA – Time Division Multiple Access, CDMA – Code Division Multiple Access)

## ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ (ODU)



Σχήμα 1.16 Η εξωτερική μονάδα (ODU)

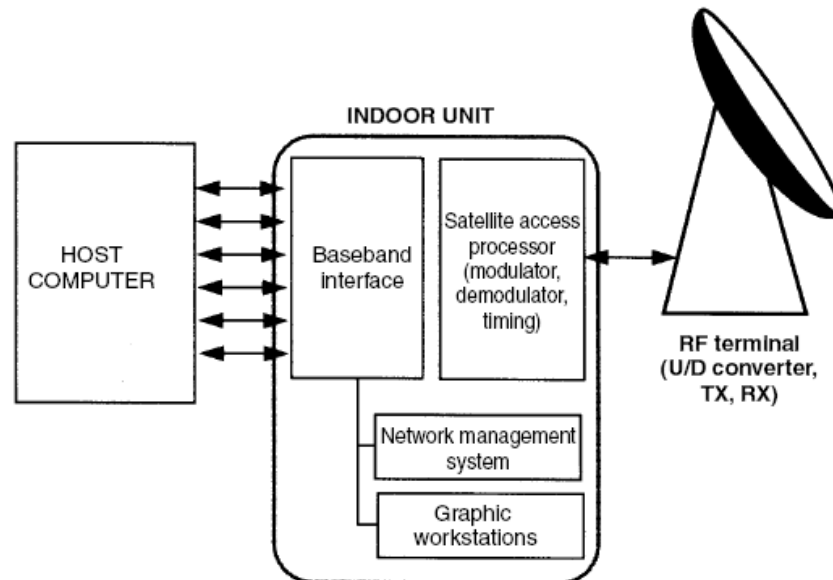
Πρόκειται για το τμήμα εκείνο του σταθμού που τοποθετείται στον εξωτερικό χώρο, όπως φαίνεται στο σχήμα, και εκτελεί τις λειτουργίες αποστολής και λήψης των σημάτων. Αποτελείται από μια κεραία και μία μονάδα που περιέχει τον ενισχυτή εκπομπής, τον ενισχυτή LNA, τους προς τα πάνω και προς τα κάτω μετατροπείς καθώς και τη μονάδα σύνθεσης συχνοτήτων (Frequency synthesizer).

Κατά το σχεδιασμό της ODU, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν οι επόμενοι παράγοντες:

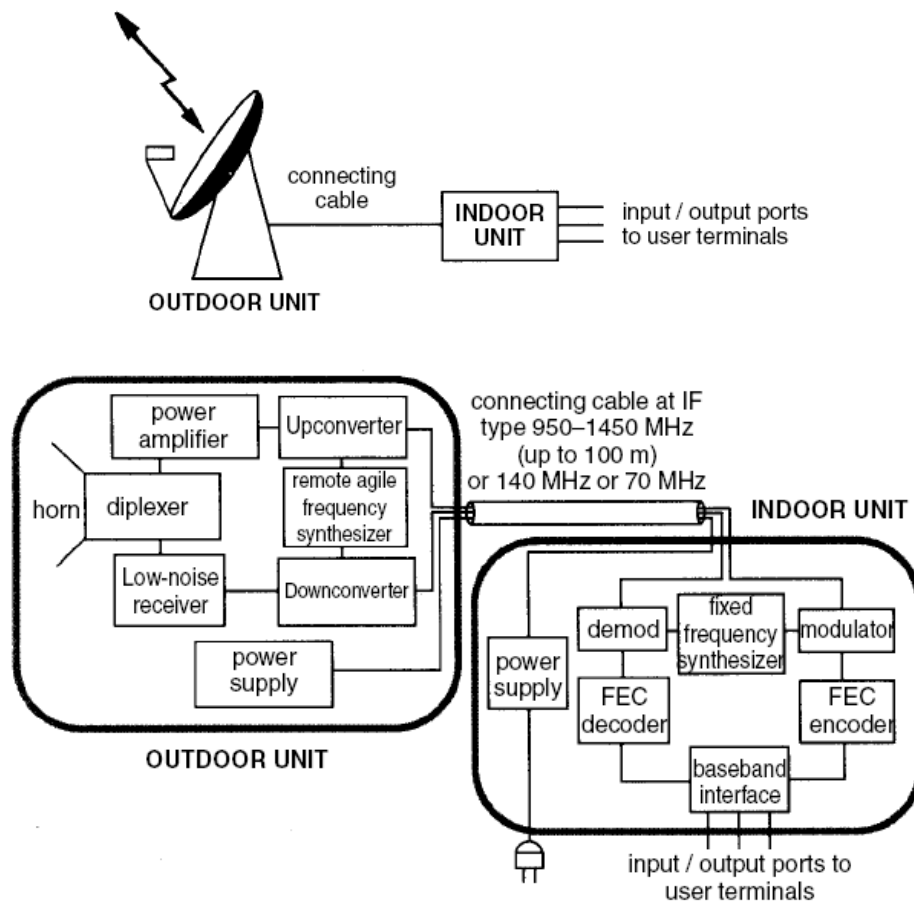
- Οι συχνότητες εκπομπής και λήψης.
- Η διακριτική ικανότητα του πομποδέκτη (transceiver) ως προς τη συχνότητα.
- Η ισοδύναμη ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύς (Effective Isotropic Radiated Power, EIRP) της κεραίας.
- Ο λόγος του κέρδους προς τη θερμοκρασία θορύβου της κεραίας (G/T), ο οποίος καθορίζει την επίδοση της ζεύξης downlink.
- Το διάγραμμα ακτινοβολίας των κεραιών και ιδιαίτερα οι δευτερεύοντες λοβοί.

- Οι κλιματολογικές συνθήκες (θερμοκρασία λειτουργίας, βροχοπτώσεις και υγρασία, ισχύς ανέμων).

Ο σταθμός διανομής διαφέρει από έναν σταθμό VSAT στο ότι η IDU του διασυνδέεται είτε με έναν host υπολογιστή, ή με ένα τηλεφωνικό δίκτυο PSTN (Public Switched Telephone Network) ή με ιδιωτικές γραμμές.



Σχήμα 1.17 Τα υποσυστήματα του hub

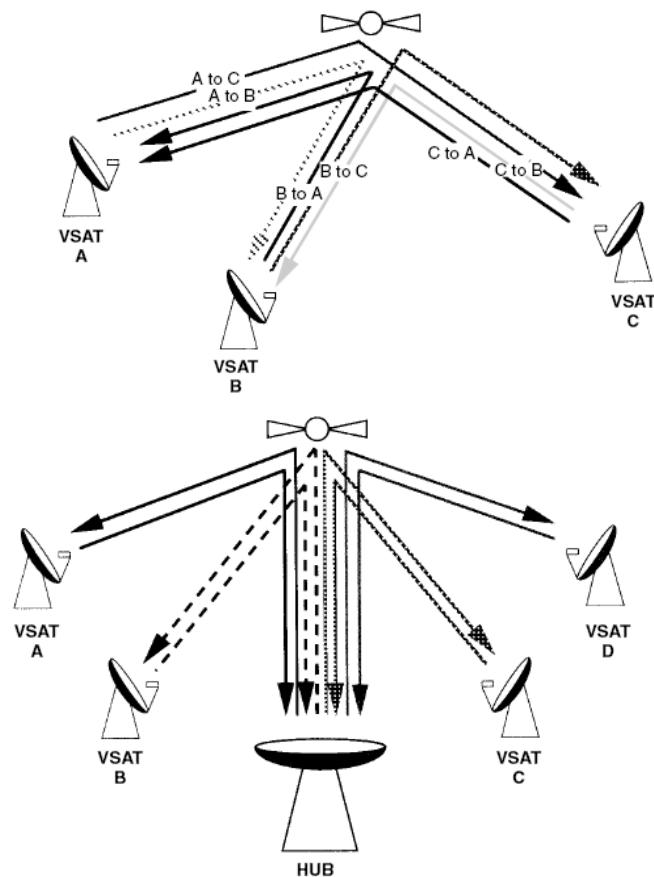


Σχήμα 1.18 Δομή ενός σταθμού VSAT

### 1.6.3 Αρχιτεκτονική δικτύου VSAT

Για την υλοποίηση ενός δικτύου VSAT είναι απαραίτητος ο καθορισμός της αρχιτεκτονικής του δικτύου VSAT. Υπάρχουν δυο βασικά είδη αρχιτεκτονικών: η τοπολογία πλέγματος (mesh) και η τοπολογία αστέρα (star). Το βασικό χαρακτηριστικό γνώρισμα της τοπολογίας πλέγματος είναι ότι για την ολοκλήρωση κάθε επικοινωνίας μεταξύ τερματικών πραγματοποιείται σε ένα βήμα (hop), δηλαδή μια μόνο διαδρομή (round trip) αποτελούμενη από μια ζεύξη uplink και μια ζεύξη downlink. Κάθε διαδρομή εισάγει χρονική καθυστέρηση (round trip time) της τάξης των 0.25s. Το βασικό χαρακτηριστικό γνώρισμα της τοπολογίας αστέρα είναι ότι για την εγκατάσταση της ζεύξης μεταξύ δύο τερματικών σταθμών απαιτείται μια διπλή διαδρομή (hop), εξαιτίας της οποίας εισάγεται μια χρονική καθυστέρηση της τάξης των 0.5sec, η οποία και δημιουργεί σημαντικό πρόβλημα σε εφαρμογές όπως αυτή της μετάδοσης φωνής, που είναι ευαίσθητη στη χρονοκαθυστέρηση.

Παραδείγματα των δυο αυτών βασικών τοπολογιών παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1.19 Δίκτυο VSAT με τοπολογία (α) πλέγματος (mesh) και (β) αστέρα (star).

## 1.7 Πρωτόκολλα μετάδοσης – Το πρότυπο DVB-S

### 1.7.1 Εισαγωγή

Η Ομάδα Προτυποποίησης DVB (Digital Video Broadcasting) αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '90 ως τμήμα της διαδικασίας μεταπήδησης των τηλεπικοινωνιών από αναλογικά σε ψηφιακά συστήματα. Για το λόγο αυτό, το πρόγραμμα DVB ξεκίνησε το 1993, προσανατολισμένο στις δορυφορικές και ενσύρματες επικοινωνίες εξαιτίας των προτεραιοτήτων της αγοράς. Όσον αφορά τα δορυφορικά συστήματα, αρχικά δημοσιεύτηκε το πρότυπο DVB-S που περιλαμβάνει την προδιαγραφή της εμπρόσθιας ζεύξης (forward link)<sup>1</sup> ενώ, στη συνέχεια ακολούθησε η δημοσίευση του προτύπου

<sup>1</sup> Μετάδοση από τον κεντρικό σταθμό προς τα δορυφορικά τερματικά μέσω του δορυφόρου.



DVB-RCS, που περιλαμβάνει την προδιαγραφή της οπίσθιας ζεύξης (return link)<sup>2</sup> και πρόσφατα δημοσιεύτηκε το νέο πρότυπο DVB-S2, το οποίο και αντικατέστησε το παλαιότερο DVB-S.

Υπάρχουν περίπου 300 οργανισμοί από 57 χώρες που συμμετέχουν στο πρόγραμμα DVB, το οποίο υπηρετεί εμπορικούς κυρίως σκοπούς. Τα πρωτόκολλα DVB σχετίζονται με την κωδικοποίηση πηγής και καναλιών, σήματα DVB, επιλεκτική πρόσβαση, διασυνδέσεις χρηστών και κανάλι επιστροφής. Αυτή η οικογένεια πρωτοκόλλων αφορούσε αρχικά την τηλεόραση, που είναι μια ευρυζωνική εφαρμογή. Όμως, εξαιτίας της υποστήριξης ψηφιακής μετάδοσης του συστήματος, μπορεί να μεταδώσει οποιαδήποτε πληροφορία μπορεί να ψηφιοποιηθεί.

Το DVB-RCS (Digital Video Broadcast with Return Channel via Satellite) χρησιμοποιεί δύο κανάλια και ακολουθώντας την υλοποίηση του πρωτοκόλλου DVB-S επιτρέπει την ταχύτερη υλοποίηση των αλγορίθμων, μειώνοντας έτσι τον χρόνο που απαιτείται για την ανάπτυξη εφαρμογών. Είναι ένα δορυφορικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα που προσφέρει διασύνδεση σε χρήστες που ανταλλάσσουν πληροφορίες οποιασδήποτε μορφής σε πραγματικό χρόνο. Το πρωτόκολλο DVB-S (Digital Video Broadcast via Satellite) ήταν το πρώτο πρωτόκολλο της οικογένειας DVB και χρησιμοποιείται σε όλο τον κόσμο εδώ και πολύ καιρό.

Στο DVB-RCS όμως, και οι δυο ροές επικοινωνίας μεταφέρονται μέσω δορυφόρου. Το κανάλι εκπομπής, από τον φορέα υπηρεσιών προς τους χρήστες, παρέχει μια υπηρεσία ενός σημείου προς πολλά σημεία (point-to-multipoint) και περιλαμβάνει εφαρμογές βίντεο, ήχου και εικόνας. Το αμφίδρομο διαδραστικό κανάλι εγκαθίσταται μεταξύ του φορέα υπηρεσιών και των χρηστών και αποτελείται από δύο μονοπάτια, το ευθύ (Forward Interaction Path) και το μονοπάτι επιστροφής (Return Interaction Path), από τα οποία και προκύπτουν τα δυο κανάλια που περιγράφονται παρακάτω.

Ένα πλήρες δορυφορικό διαδραστικό δίκτυο, μέσα στο οποίο θα λειτουργήσει ένας μεγάλος αριθμός τερματικών, με κανάλι δορυφορικής επιστροφής RCSTs (return channel satellite terminals), περιλαμβάνουν κέντρο ελέγχου δικτύων, πύλη κυκλοφορίας και τροφοδοτικό (feeder). Όλη η ροή δεδομένων διέρχεται από το σταθμό hub (feeder/ gateway), με το μεγαλύτερο ποσοστό αυτής να κατευθύνεται προς τον παγκόσμιο ιστό (internet backbone). Υπάρχει και δυνατότητα σύνδεσης του hub με δίκτυα κλασικής τηλεφωνίας (PSTN) και ασύγχρονα δίκτυα (ATM). Επίσης, όσον αφορά τα τερματικά RCSTs, μπορούν να συνδεθούν είτε με μεμονωμένους χρήστες είτε με επίγεια, ασύρματα ή ενσύρματα δίκτυα.

Η κυκλοφορία της ευθείας ζεύξης, που κατευθύνεται προς το μεμονωμένο τερματικό, πολυπλέκεται σε ένα συμβατικό DVB/MPEG-2 ρεύμα εκπομπής στο κεντρικό σταθμό και αναμεταδίδεται στον χρήστη. Αυτό το ρεύμα εκπομπής διαβιβάζεται μέσω της ζώνης συχνοτήτων Ku

---

<sup>2</sup> Μετάδοση από τα δορυφορικά τερματικά προς τον κεντρικό σταθμό μέσω του δορυφόρου.

χρησιμοποιώντας, τη διαμόρφωση μετατόπισης φάσης τατραγωνισμού (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK), παρέχοντας έτσι έναν μέγιστο ρυθμό μετάδοσης στο ευθύ κανάλι, περίπου 45 Mbps.

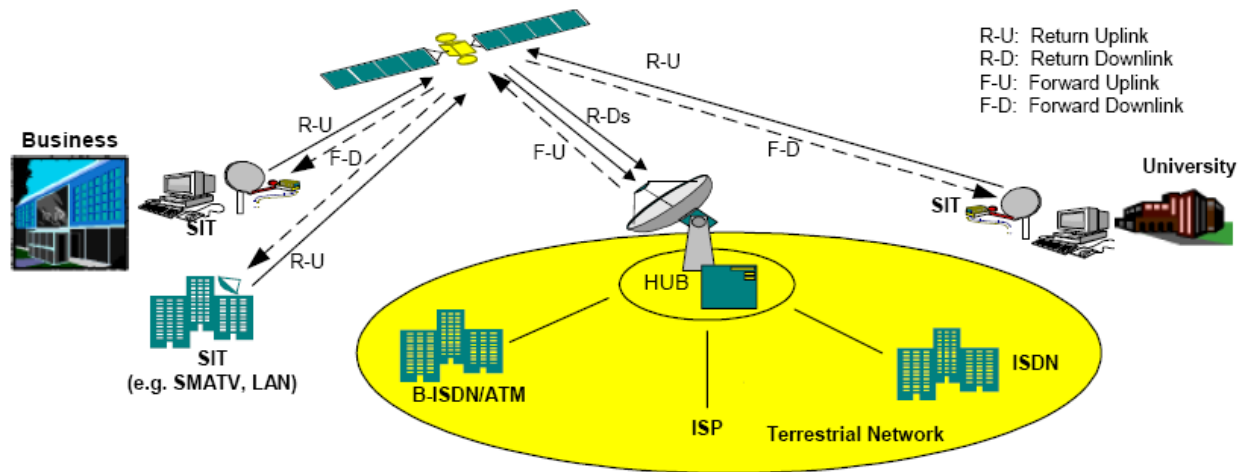
Το κανάλι RCSTs λειτουργεί ως τμήμα ενός ψηφιακού δικτύου, με το σταθμό Hub να παρέχει, μέσω της πύλης (gateway), σύνδεση προς άλλα δίκτυα. Για την εξασφάλιση συμβατότητας με άλλα δίκτυα, χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο διαδικτύου IP και ο τρόπος ασύγχρονης μεταφοράς δεδομένων (ATM) από τα τερματικά των χρηστών προς τον σταθμό Hub.

### 1.7.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά DVB-RCS

Τα βασικά χαρακτηριστικά του DVB-RCS είναι τα εξής:

- Μορφοποίηση QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) με τη χρήση κώδικα Grey.
- Πολύπλεξη TDM (Time Division Multiplexing)
- Μεταβλητή ταχύτητα από 1 έως 50 Mbits.
- Ρολόι δικτύου NRC (Network Reference Clock)
- Για τη μεταφορά δεδομένων χρησιμοποιείται κωδικοποίηση 188-Byte MPEG2
- Πεδία σηματοδότησης DVB-s και πίνακες πληροφοριών υπηρεσίας

Το κανάλι επιστροφής διαμοιράζεται μεταξύ των τερματικών χρησιμοποιώντας τη χωρητικότητα ενός ή περισσότερων δορυφορικών μεταδοτών. Το σύστημα που χρησιμοποιείται είναι το MF-TDMA, πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχουν πολλά κανάλια συχνότητων, όπου κάθε ένα εξ αυτών είναι χωρισμένο σε χρονοθυρίδες (time slots).



Σχήμα 1.20 Η απεικόνιση ενός τυπικού συστήματος DVB-RCS

### 1.7.3 Μελλοντικές εξελίξεις

Το μέλλον του DVB-RCS ως μια εξελιγμένη τεχνολογία για τα δίκτυα VSAT είναι εξασφαλισμένη. Είναι ιδανική λύση κατασκευής εξειδικευμένων δορυφορικών δικτύων και για την σταθερή υπηρεσία παράδοσης και για συνηθισμένες λύσεις για δίκτυο κορμού (backbone). Το μέλλον του ως ένα πρότυπο μαζικής αγοράς VSAT, παρέχοντας ευρυζωνικές υπηρεσίες σε οικιακούς χρήστες αποτελεί μεγαλύτερη πρόκληση ως ένα μελλοντικό σενάριο για το DVB-RCS, καθώς απαιτεί μια διαλειτουργικότητα (interoperability) υψηλότερου επιπέδου, επιπρόσθετα εργαλεία διαχείρισης και διαρκή ανάπτυξη του προτύπου.

## 1.8 Βιβλιογραφία:

- [1] G. Maral & M. Bousquet, "Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology" (Third edition), John Wiley & Sons, [1998]
- [2] Bruce E. Elbert, "Satellite Communications Handbook" (Second Edition), Artech House [2004]
- [3] Ray E. Sheriff and Y. Fun Hu, "Mobile Satellite Communication Networks", John Wiley & Sons, [2001]
- [4] Dennis Roddy, "Satellite Communications" (Third Edition), McGraw-Hill, [2001]
- [5] Global Change Agents, "Communication Satellites"
- [6] O. Benzal, "A VSAT island server based on DVB-RCS", MSc Thesis, [March 2006]
- [7] J. Neale and A. Mohsen, "Impact of CF-DAMA on TCP via satellite performance" (0-7803-7206-9/01), IEEE, [2001]
- [8] M. Richharia, "Satellite Communication Systems" (Second Edition), McGraw-Hill, [1999]
- [9] Π. Μ. Αράπογλου, "Τεχνικές διαφορικής λήψης για την άμβλυση των διαλείψεων λόγω βροχής στις δορυφορικές τηλεπικοινωνίες", Διπλωματική Εργασία, [Ιούλιος 2003]
- [10] Μ. Ε. Ταουσάνης και Α. Α. Τζίμα, "Διαστασιοποίηση δικτύων VSAT για τη μεταφορά δεδομένων στη νησιωτική περιοχή της Ελλάδας", Διπλωματική Εργασία, [Απρίλιος 2004]
- [11] Π. Θ. Βελτσίστας και Γ. Ε. Καλαμπούκας και Γ. Ι. Κονιτόπουλος, "Μελέτη – ολοκλήρωση και μετρήσεις εσωτερικού χώρου με δορυφορικό σύστημα VSAT", Διπλωματική Εργασία, [Φεβρουάριος 2006]
- [12] Χ. Γ. Αρβαντινός και Π. Γ. Σκλάβου και Α. Στ. Τσαπατσάρη, "DVB-RCS και Wi-Fi", Διπλωματική Εργασία, [Μάρτιος 2005]
- [13] Η. Γ. Τσαγκλής, "Το νέο δορυφορικό πρότυπο εκπομπής DVB-S2: θέματα ενθυλάκωσης, σηματοδότησης και συμβατότητας", Διπλωματική Εργασία, [Ιούλιος 2006]
- [14] Π. Κωπτής και Χ. Καψάλης, "Δορυφορικές Επικοινωνίες" (2<sup>η</sup> έκδοση), Εκδόσεις Τζιόλα, [2006]

[15] J.G.Proakis & M.Salehi, “Συστήματα Τηλεπικοινωνιών”, Εκδόση Εθνικού και Καποδοστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, [2002]

[16] <http://tpub.com/neets/book17/76.htm>

[17] <http://www.grc.nasa.gov>

[18] <http://www.apsc.or.kr/pub>

[19] <http://ru6.cti/broadband/images/sat.php>

---

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

---

---

### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥ ΔΗΜΟΣΙΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ «ΔΟΡΥ»

#### 2.1 Γενική περιγραφή του δικτύου «ΔΟΡΥ»

##### 2.1.1 Γενικές πληροφορίες

Τα τελευταία έτη πραγματοποιούνται πολλαπλές δραστηριότητες στο διεθνές προσκήνιο για την υλοποίηση της λεγόμενης «Κοινωνίας της Πληροφορίας». Στα πλαίσια μιας γενικότερης λοιπόν αναπτυξιακής πολιτικής στον τομέα επικοινωνιών, κρίνεται αναγκαίο να αναπτυχθεί ένα δορυφορικό δίκτυο εξυπηρέτησης των αναγκών των φορέων του ελληνικού Δημοσίου που βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές. Σκοπός του δικτύου ΔΟΡΥ λοιπόν είναι η παροχή δορυφορικών τηλεπικοινωνιακών και τηλεματικών υπηρεσιών με διασύνδεση με το Διαδίκτυο και το εσωτερικό δίκτυο των Φορέων του Δημοσίου Τομέα, ώστε να ενισχυθούν οι προσπάθειες περιφερειακής ανάπτυξης για βελτίωση της παραγωγικότητας στο Ελληνικό Δημόσιο και να βελτιωθεί η ποιότητα ζωής των πολιτών.

Το δίκτυο ΔΟΡΥ αποτελείται από:

- έναν κεντρικό σταθμό διανομής (hub), ο οποίος θα τοποθετηθεί στη θέση Κρεβάτια Υμηττού,
- 53 σταθμούς VSAT και
- 1620 δορυφορικά τερματικά IP, εκ των οποίων τα 1551 θα έχουν σταθερή θέση και θα είναι μοιρασμένα σε όλη την ελληνική επικράτεια, τα 17 θα είναι εγκατεστημένα πάνω σε πλοία, 11 σε ειδικά αυτοκίνητα και 41 θα αποτελούν φορητούς σταθμούς.

Το δίκτυο θα είναι επεκτάσιμο, ώστε να δέχεται την εισαγωγή νέων σημείων πρόσβασης και εξυπηρέτηση νέων υπηρεσιών. Επίσης, στο προκείμενο δίκτυο διατίθεται χωρητικότητα περίπου 31MHz από δυο συγκεκριμένους αναμεταδότες του δορυφόρου που έχουν παραχωρηθεί στο Δημόσιο.

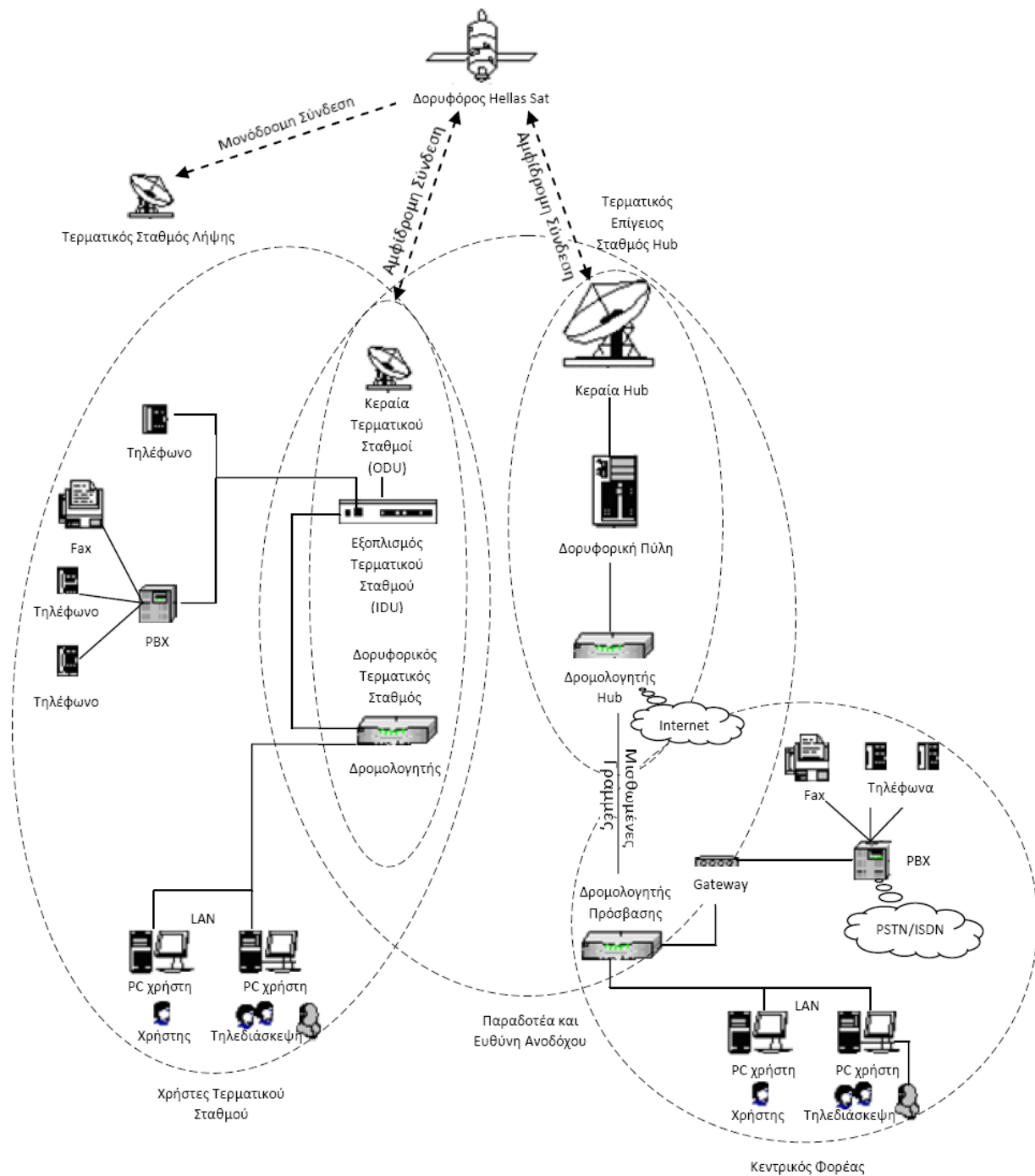
## 2.1.2 Εφαρμογές

Στα πλαίσια λειτουργίας του δικτύου ΔΟΡΥ υποστηρίζονται οι παρακάτω εφαρμογές:

- Πλήρης πρόσβαση στο διαδίκτυο των δορυφορικών τερματικών σταθμών
- Διαμόρφωση καθαρών καναλιών (συνδέσεις τύπου πχ RS232)
- Διοχέτευση δεδομένων (IP, TV και Radio streaming)
- Δυνατότητα εποπτείας εξοπλισμού και λογισμικού
- Υπηρεσίες φιλοξενίας (Web hosting, Server hosting, virtual και physical Mail server hosting, virtual και physical FTP server hosting)
- Αναβάθμιση συστημάτων λογισμικού τελικών χρηστών
- Υπηρεσίες ασφαλείας (φίλτρα ιών και spam, firewalls και άλλα)
- Δυνατότητα μεταφοράς εξωτερικά κρυπτογραφημένων σημάτων
- Υπηρεσίες VPN (συμπεριλαμβανομένων λογισμικού, πυλών και εφαρμογών τερματικών σταθμών)
- Υπηρεσίες VoIP (συμπεριλαμβανομένων λογισμικού, πυλών και εφαρμογών τερματικών σταθμών, δικτύου εσωτερικής τηλεφωνίας, διασύνδεσης με δημόσιο δίκτυο τηλεφωνίας, εικονοτηλέφωνα)
- Κοστολόγηση και τιμολόγηση υπηρεσιών
- Μετάδοση δεδομένων ελέγχου και παρακολούθησης του ευρυζωνικού δορυφορικού δικτύου IP
- Απρόσκοπτη λειτουργία και παροχή υπηρεσιών του δικτύου

### 2.1.3 Αρχιτεκτονική δικτύου

Παρακάτω, βλέπουμε στο Σχήμα 2.1 την αρχιτεκτονική του δικτύου ΔΟΡΥ.



Σχήμα 2.1 Αρχιτεκτονική δικτύου ΔΟΡΥ



## 2.2 Δορυφορικό τμήμα δικτύου ΔΟΡΥ - τεχνικά χαρακτηριστικά δορυφόρου Hellas Sat

### 2.2.1 Γενικές πληροφορίες και προδιαγραφές

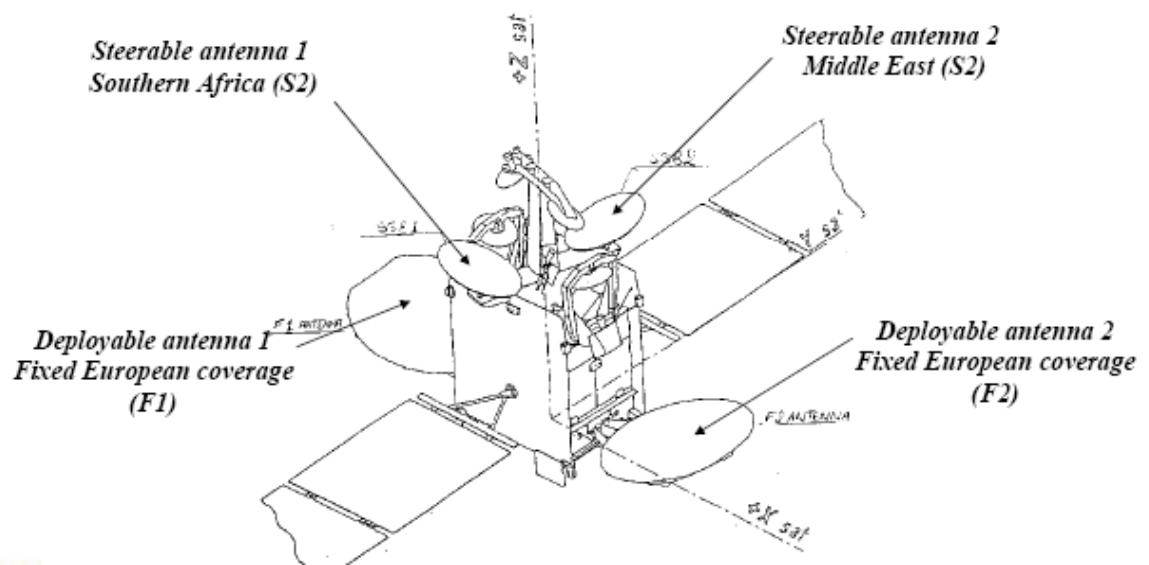
Σύμφωνα με υφιστάμενη σύμβαση μεταξύ του Ελληνικού Δημοσίου και της εταιρείας Hellas Sat, έχει παραχωρηθεί άδεια για την εκμετάλλευση των ραδιοσυχνοτήτων της ονομαστικής θέσης των 39 μοιρών ανατολικά επί της γεωστατικής τροχιάς Έτσι, διατίθεται προς εκμετάλλευση από το Ελληνικό Δημόσιο χωρητικότητα περίπου 31MHz από σύνολο 72MHz των δυο αναμεταδοτών του δορυφόρου Hellas Sat.

Ο δορυφόρος Hellas Sat κατασκευάστηκε από την γαλλο-βρετανικών συμφερόντων εταιρεία Astrium και εκτοξεύτηκε στις 13 Μαΐου 2003 από το ακρωτήριο Canaveral της Florida των Η.Π.Α. Ο Hellas Sat είναι δορυφόρος τύπου Astrium Eurostar E2000+ και το διαστημικό όχημα μεταφέρει 30 αναμεταδότες που λειτουργούν στη ζώνη συχνοτήτων Ku. Με προσεγγιστικό κόστος κατασκευής στα 170 εκατομμύρια δολάρια, έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε ο ελάχιστος χρόνος ζωής του να είναι στα 15 έτη, όμως λόγω της επιτυχημένης εκτόξευσής του, η διάρκεια ζωής του έχει παραταθεί κατά περίπου 2 έτη.

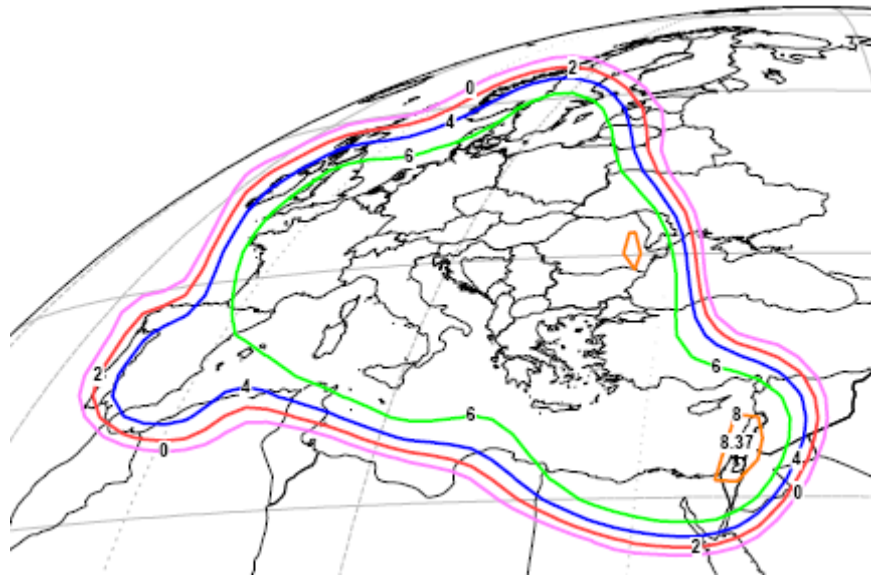


Σχήμα 2.2 Η εκτόξευση του δορυφόρου Hellas Sat

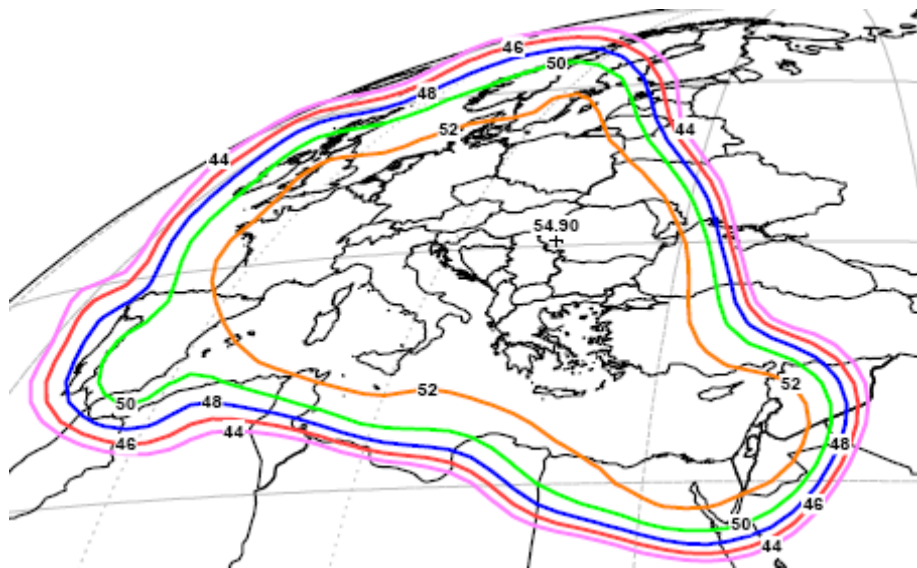
Πρόκειται για ένα γεωστατικό δορυφορικό σύστημα πολλαπλών καλύψεων. Η τροχιακή του θέση εντοπίζεται στις 39° ανατολικά. Ο τηλεπικοινωνιακός εξοπλισμός του Δορυφόρου Hellas Sat περιλαμβάνει 30 ενεργούς αναμεταδότες οι οποίοι είναι διαθέσιμοι για ταυτόχρονη λειτουργία τόσο σε περιόδους ηλιοφάνειας όσο και σε περιόδους έκλειψης ηλίου. Η αναμετάδοση γίνεται εφικτή με τη βοήθεια 4 κεραιών διπλής πόλωσης. Οι δύο εξ αυτών κεραιές (Σχήμα 2.3), σχηματίζουν σταθερές δέσμες, τις F1 και F2 (fixed beams,) και αποτελούνται η κάθε μία από ένα κύριο κάτοπτρο 2,5 μέτρων, είναι Γρηγοριανής διαμόρφωσης (Gregorian configuration) και απλής εισόδου. Το κύριο κάτοπτρο είναι διαμορφωμένο έτσι ώστε να παρέχει σύνθετες μορφές δεσμών ραδιοσυχνοτήτων για αποδοτική ισχύ κάλυψης όλης της Ευρώπης και τμήματος της Μέσης Ανατολής και της Βορείου Αφρικής. Οι άλλες δύο κεραιές σχηματίζουν κινητές δέσμες, τις S1 και S2 (Σχήμα 2.3). Με ένα παραβολικό κάτοπτρο 1,3 μέτρων η κάθε μία παρέχουν επιλεκτική κάλυψη για οποιοδήποτε σημείο της ορατής επιφάνειας της γης. Από τους 30 αναμεταδότες που αναφέρθηκαν προηγουμένως, μέχρι 12 μπορούν να ανήκουν στη σταθερή δέσμη F1, μέχρι 6 στη σταθερή δέσμη F2, μέχρι 12 στην κινητή δέσμη S1 και μέχρι 6 στην κινητή δέσμη S2.



Σχήμα 2.3 Αρχιτεκτονική κεραιάς του Hellas Sat (Payload Layout)



Σχήμα 2.4 Η εμβέλεια λήψης της σταθερής κεραίας F1, 13.8 GHz, τιμές G/T



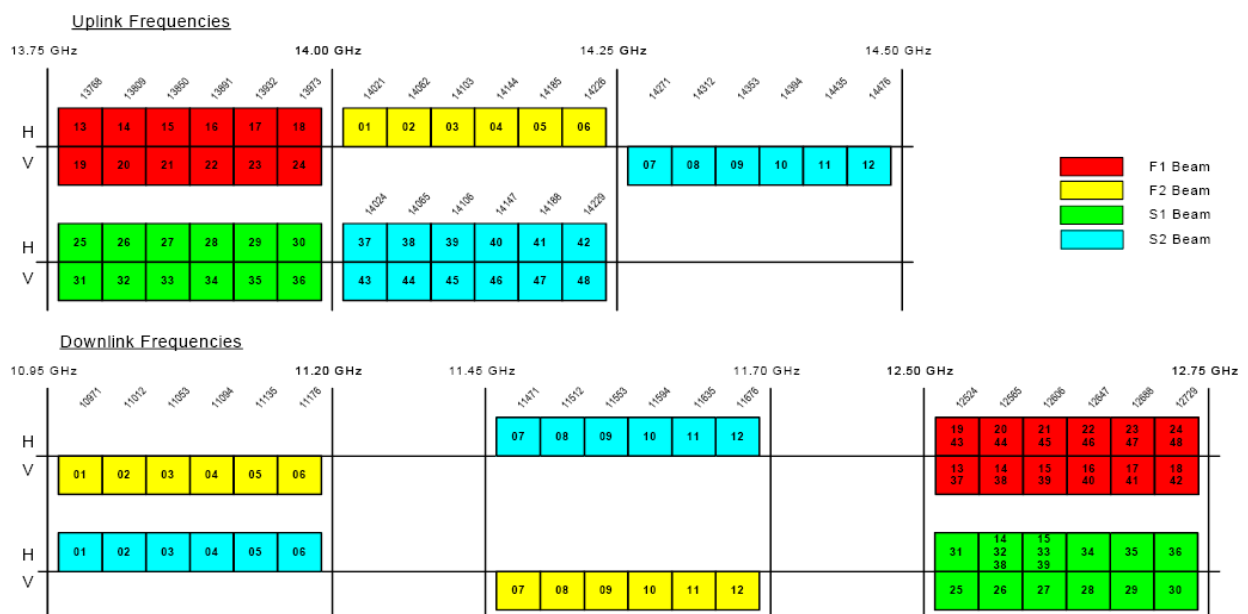
Σχήμα 2.5 Η εμβέλεια εκπομπής της σταθερής κεραίας F1, 12.5 GHz, τιμές EIRP

## 2.2.2 Συχνότητες

- Οι κεραιές σταθερής κατεύθυνσης F1 και η κατευθυνόμενη S1 λαμβάνουν σήματα στη ζώνη συχνοτήτων 13.75–14.00 GHz.
- Η κεραιά σταθερής κατεύθυνσης F2 λαμβάνει σήματα στη ζώνη συχνοτήτων 14.00–14.25 GHz.
- Η κατευθυνόμενη κεραιά S2 λαμβάνει σήματα στη ζώνη συχνοτήτων 14.00-14.25 GHz για οριζόντια πόλωση της προς τα άνω ζεύξης και στη ζώνη συχνοτήτων 14.00-14.50 GHz για κάθετη πόλωση της προς τα άνω ζεύξης.

Υπάρχουν δυο τύποι δεκτών/κάτω μετατροπέων για τη μετάθεση της συχνότητας από ζώνες συχνοτήτων της άνω ζεύξης στις ζώνες συχνοτήτων της κάτω ζεύξης (10.95-11.20 GHz, 11.45-11.70 GHz ή 12.50-12.75 GHz). Ο δέκτης τύπου 1 μετατρέπει τη συχνότητα από τις ζώνες 13.75-14.00 GHz και 14.00-14.25 GHz στη ζώνη συχνοτήτων 12.50-12.75 GHz χρησιμοποιώντας δυο τοπικούς εναλλασσόμενους ταλαντωτές (oscillators). Υπάρχουν επίσης δυο κάτω μετατροπείς που εξυπηρετούν τη ζώνη της κάτω ζεύξης 11.45-11.70 GHz.

Οι ζώνες συχνοτήτων και τα κανάλια, σε αντιστοίχιση με τις κεραιές F1, F2, S1 και S2 φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6 Το σχεδιάγραμμα συχνοτήτων του Hellas Sat (Frequency Plan)

Υπάρχουν συνολικά 30 αναμεταδότες ενεργοί καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του δορυφόρου. Οι αριθμοί των αναμεταδοτών είναι μοναδικοί. Οι κεντρικές συχνότητες που αντιστοιχούν σε κάθε αναμεταδότη για τη ζεύξη uplink και τη ζεύξη downlink φαίνονται παρακάτω στον Πίνακα 2.1.

Transponder No	Uplink center frequency	Downlink center frequency
	MHz	MHz
1	14021	10971
2	14062	11012
3	14103	11053
4	14144	11094
5	14185	11135
6	14226	11176
7	14271	11471
8	14312	11512
9	14353	11553
10	14394	11594
11	14435	11635
12	14476	11676
13,19,25,31	13768	12524
14,20,26,32	13809	12565
15,21,27,33	13850	12606
16,22,28,34	13891	12647
17,23,29,35	13932	12688
18,24,30,36	13973	12729
37,43	14024	12524
38,44	14065	12565
39,45	14106	12606
40,46	14147	12647
41,47	14188	12688
42,48	14229	12729

Πίνακας 2.1 Κεντρικές συχνότητες αναμεταδοτών

Για τις ανάγκες υλοποίησης του δικτύου ΔΟΡΥ θα χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω αναμεταδότες:

- Αναμεταδότης No 6 (14.226 / 11.176 MHz, δέσμη F2)
- Αναμεταδότης No 24 (13.973 / 12.729 MHz, δέσμη F1)

Για την κατανομή του διαθέσιμου φάσματος στους δυο αναμεταδότες ακολουθείται η κατανομή που φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7 Κατανομή φάσματος

### 2.2.3 Πόλωση Κεραιών

Οι κεραίες του Hellas Sat μπορούν να εκπέμπουν και να λαμβάνουν σήματα ταυτόχρονα σε δύο γραμμικές πολώσεις, στην ίδια συχνότητα. Η πόλωση της κεραιάς χρησιμοποιείται για το διπλασιασμό της διαθέσιμης χωρητικότητας, εφόσον και οι αντίστοιχοι επίγειοι σταθμοί είναι εφοδιασμένοι με κεραίες ευθυγραμμισμένες στην πόλωση της αντίστοιχης κεραιάς του δορυφόρου. Οι ορθογώνιες πολώσεις ορίζονται ως Η-πόλωση (Horizontal polarization) και V-πόλωση (Vertical polarization). Τα σήματα που λαμβάνονται σε μία εκ των Η και V πολώσεων εκπέμπονται στην ορθογωνική αυτής πόλωση, V και Η αντίστοιχα. Οι δορυφορικοί δέκτες διαθέτουν διάκριση πόλωσης εύρους τουλάχιστον 30 dB (με τα 25 dB ως αρχική ρύθμιση) εντός της περιοχής κάλυψης. Η διάκριση πόλωσης των κεραιών εκπομπής είναι τουλάχιστον 31 dB (με τα 25 dB ως αρχική ρύθμιση) εντός της περιοχής κάλυψης. Συνεπώς, η λήψη και η εκπομπή στην ίδια συχνότητα μπορεί να πραγματοποιηθεί με ελάχιστη έως καθόλου παρεμβολή μεταξύ των δύο μεταδόσεων.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου Hellas-Sat φαίνονται στον Πίνακα 2.2.

<b>Περιγραφή</b>	Γεωστατικό δορυφορικό σύστημα πολλαπλών καλύψεων
<b>Τροχιακή θέση</b>	39° Ανατολικά
<b>Τηλεπικοινωνιακό φορτίο</b>	30 αναμεταδότες των 36 MHz (συν 8 εφεδρικοί). Εξ αυτών έως 12 στην σταθερή δέσμη F1, έως 6 στην σταθερή δέσμη F2, έως 12 στην κινητή δέσμη S1 και έως 6 στην κινητή δέσμη S2.
<b>Κάλυψη</b>	Πανευρωπαϊκή για τις σταθερές δέσμες F1 και F2. Οι κινητές δέσμες μπορούν να καλύπτουν δυο από τις εξής περιοχές: Νότιος Αφρική, Μέση Ανατολή, Νοτιοανατολική Ασία, μέρος της Ινδίας, μέρος της Αυστραλίας.
<b>EIRP καθοδικής ζεύξης</b>	53dBW στο κέντρο της δέσμης για τις σταθερές δέσμες 51dBW στο κέντρο της δέσμης για τις κινητές δέσμες
<b>G/T ανοδικής ζεύξης</b>	+ 6dB/K στο κέντρο της δέσμης για τις σταθερές δέσμες + 4dB/K στο κέντρο της δέσμης για τις κινητές δέσμες
<b>Συχνότητες</b>	Ku-band Καθοδική ζεύξη 10.95-11.2/ 11.45-11.70/12.50-12.75 GHz Ανοδική ζεύξη 13.75-14.5 GHz Beacon 11.4515 GHz (Κάθετη)
<b>Πόλωση</b>	Κάθετη/Οριζόντια
<b>SFD σε 0dB εξασθένηση, G/T = 0</b>	- 92 dBW/m <sup>2</sup>
<b>Περιοχή εξασθένησης καναλιού</b>	18 dB
<b>Τρόποι λειτουργίας αναμεταδότη</b>	Fixed Gain Model (FGM)/ Automatic Level Control (ALC)
<b>Διατήρηση θέσης</b>	0.03°
<b>Χρόνος ζωής</b>	15 έτη
<b>Κατασκευαστής</b>	ASTRIUM

<b>Όχημα εκτόξευσης</b>	Atlas V 401
<b>Μάζα κατά την εκτόξευση</b>	4150 kg
<b>Μάζα χωρίς καύσιμο</b>	1729 kg
<b>Εκπέτασμα</b>	2 x 9.72m ηλιακοί συλλέκτες
<b>Ηλεκτρική ισχύς</b>	5.6 kW
<b>Πομποί</b>	100 W TWTA
<b>Εφεδρεία πομπών</b>	38 : 30
<b>Εφεδρεία δεκτών</b>	3:2 για την F1 2:1 για την F2 2:1 για την S1 3:2 για την S2

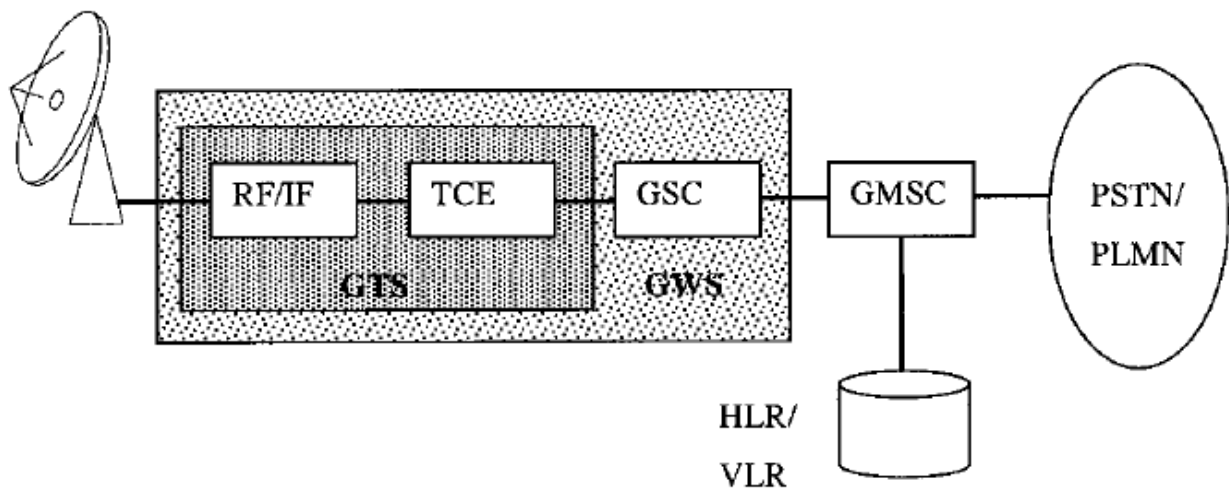
Πίνακας 2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου Hellas-Sat



## 2.3 Επίγειο τμήμα «ΔΟΡΥ»

Όπως έχει αναφερθεί, το επίγειο κομμάτι του δικτύου ΔΟΡΥ θα αποτελείται από ένα κεντρικό σταθμό διανομής (hub, Gateway), ο οποίος θα τοποθετηθεί στη θέση Κρεβάτια Υμηττού, από 53 σταθμούς VSAT και από 1620 δορυφορικά τερματικά IP, εκ των οποίων τα 1551 θα έχουν σταθερή θέση και θα είναι μοιρασμένα σε όλη την Ελληνική Επικράτεια, τα 17 θα είναι εγκατεστημένα πάνω σε πλοία, 11 σε ειδικά αυτοκίνητα και 41 θα αποτελούν φορητούς σταθμούς.

Παρακάτω, στο σχήμα 2.8 φαίνεται η εσωτερική δομή ενός κεντρικού σταθμού (Gateway).



Σχήμα 2.8 Η εσωτερική δομή ενός Gateway σταθμού

Στο Σχήμα 2.8 φαίνεται η εσωτερική δομή ενός κεντρικού σταθμού (Gateway). Σύμφωνα με το σχήμα αυτό, το τμήμα μετατροπής συχνότητας RF/IF (Radio Frequency/Intermediate Frequency) μαζί με τον εξοπλισμό καναλιού κίνησης (TCE, Traffic Channel Equipment) αποτελούν το υποσύστημα πομποδέκτη του κεντρικού σταθμού (GTS, Gateway Tranceiver Subsystem). Το υποσύστημα του κεντρικού σταθμού (GWS, GateWay Subsystem) αποτελείται από το υποσύστημα του πομποδέκτη (GTS) και το σταθμό ελέγχου (GSC, Gateway Station Controller), καθώς συνδέεται και με το κέντρο μεταγωγής GMSC (Gateway Mobile Switching Centre). Το κέντρο μεταγωγής συνδέεται τόσο με μια βάση δεδομένων για τους χρήστες που επιτρέπεται να έχουν πρόσβαση στο δορυφορικό δίκτυο (HLR, Home Location Register και VLR, Visitor Location Register), όσο και με το ίδιο το δίκτυο.

## 2.4 Βιβλιογραφία

- [1] Hellas Sat, “Hellas-Sat 2 Satellite Handbook”, [Μάρτιος 2004]
- [2] Υπουργείο Μεταφορών και Επικοινωνιών, “Ανάπτυξη υποδομών για την αρχική εξυπηρέτηση αναγκών των φορέων του Δημοσίου Τομέα απομακρυσμένων περιοχών για προηγμένες τεχνολογίες επικοινωνιών με τη χρήση του Δημοσίου Δορυφορικού Συστήματος Hellas Sat «ΔΟΡΥ»”
- [3] Ray E. Sheriff and Y. Fun Hu, “Mobile Communication Networks”, John Wiley & Sons, [2001]
- [4] [www.trackmobile.com/images/DSC\\_0025\\_high\\_res2.gif](http://www.trackmobile.com/images/DSC_0025_high_res2.gif)
- [5] [www.hellas-sat.net](http://www.hellas-sat.net)

---

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

---

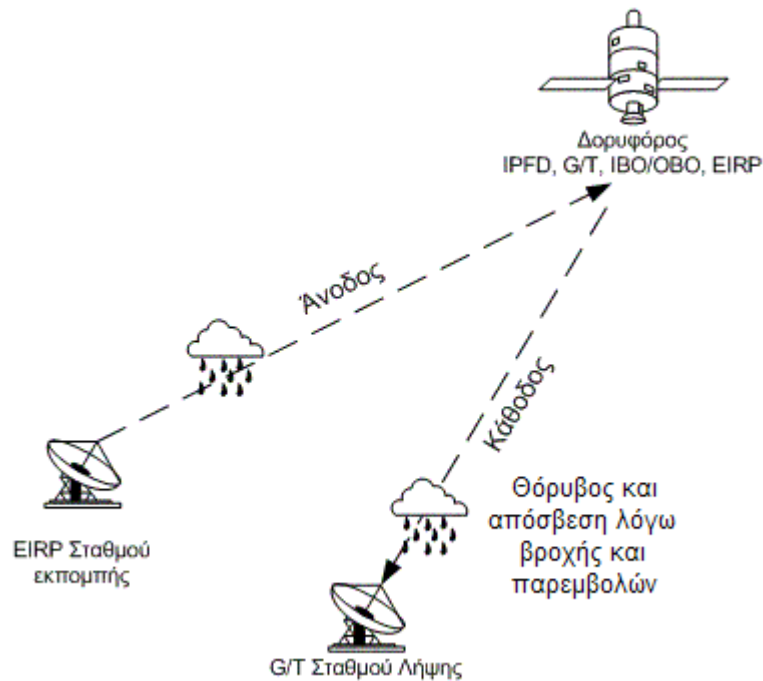
---

### ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΙΣΧΥΟΣ ΤΟΥ ΔΗΜΟΣΙΟΥ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ «ΔΟΡΥ»

#### 3.1 Εισαγωγή

Ο σχεδιασμός ενός δορυφορικού συστήματος αποβλέπει τόσο στη βέλτιστη αξιοποίηση της διαθέσιμης χωρητικότητας με την καλύτερη εκμετάλλευση όλων των παραμέτρων που επηρεάζουν την επικοινωνία δυο επίγειων σταθμών μέσω δορυφόρου, όσο και στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους με παράλληλη μεγιστοποίηση του αριθμού των τελικών χρηστών. Η διαδρομή της ανοδικής ζεύξης (uplink) από τον επίγειο πομπό προς το δορυφόρο πρέπει να δημιουργεί την απαιτούμενη πυκνότητα ισχύος (Input Power Flux Density) στη είσοδο των αναμεταδοτών. Επιπλέον, η καθοδική ζεύξη (downlink) από το δορυφόρο προς τη Γη πρέπει να αξιοποιεί την ισχύ εξόδου EIRP (Equivalent Isotropic Radiated Power) των αναμεταδοτών για να εξασφαλίζει ικανοποιητικό σήμα στο δέκτη. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των ζεύξεων uplink και downlink καθορίζονται από τα χαρακτηριστικά διάδοσης των ραδιοκυμάτων μέσω της ατμόσφαιρας και του διαστήματος. Έτσι, συνεκτιμώντας τις τιμές για τις προαναφερθείσες παραμέτρους, κατασκευάζεται ο πίνακας του Ισοζυγίου Ισχύος της Ζεύξης (Link Budget).

Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται ο υπολογισμός των απαραίτητων τιμών προκειμένου για την κατάστρωση του πίνακα ισοζυγίου ισχύος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, θα αναλυθεί η ζεύξη μεταξύ του κεντρικού σταθμού (Gateway) του δικτύου ΔΟΡΥ (σταθμός εκπομπής) και ενός απομακρυσμένου δορυφορικού τερματικού (σταθμός λήψης). Ο κεντρικός σταθμός του ΔΟΡΥ εντοπίζεται στην τοποθεσία Κρεβάτια Υμηττού στην Αθήνα, ενώ το απομακρυσμένο τερματικό τοποθετείται στο Κέντρο εξυπηρέτησης Πολιτών (ΚΕΠ) του Δήμου Μύκης στην Ν. Ξάνθη. Παρακάτω, στο Σχήμα 3.1 δίδεται το μοντέλο ενός απλού συστήματος. Η επιλογή του απομακρυσμένου τερματικού είναι τυχαία, όμως θα χρησιμοποιηθεί ως πρότυπο σταθμού λήψης για τον υπολογισμό του ισοζυγίου ισχύος και για τις προσομοιώσεις που θα γίνουν στα επόμενα κεφάλαια.



Σχήμα 3.1 Τυπική δορυφορική ζεύξη και παράγοντες που εμπλέκονται στον υπολογισμό του ισοζυγίου ισχύος της ζεύξης

### 3.2 Δεδομένα της ζεύξης

Στη συνέχεια, παρατίθενται τα δεδομένα της συγκεκριμένης ζεύξης μεταξύ του κεντρικού σταθμού στην Αθήνα ( $37.58^\circ \text{ N}$ ,  $23.43^\circ \text{ E}$ ) και του απομακρυσμένου στην Ξάνθη ( $41.08^\circ \text{ N}$ ,  $24.53^\circ \text{ E}$ ), και επαναλαμβάνονται οι βασικές παράμετροι του δορυφόρου Hellas Sat.

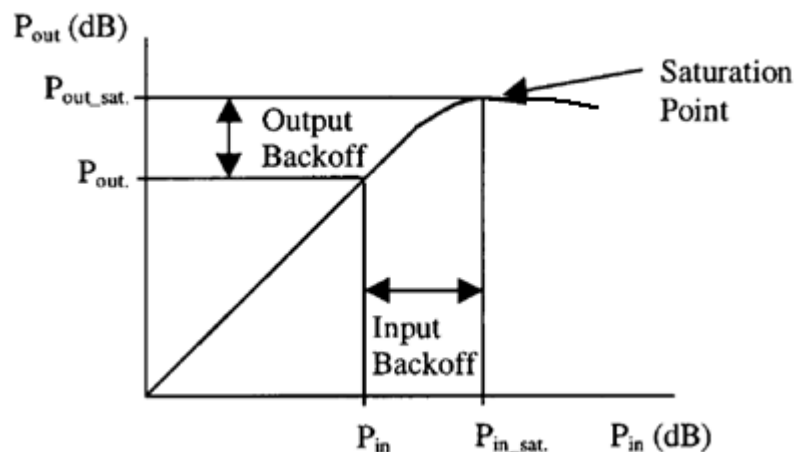
Αρχικά, πρέπει να αναφερθεί ότι από όλους τους φορείς του δικτύου ΔΟΡΥ, η μελέτη αυτή θα επικεντρωθεί αποκλειστικά στα Κέντρα Εξυπηρέτησης Πολιτών (81 σταθερά τερματικά Satellite IP).

Όλοι οι υπολογισμοί θα γίνουν για τον αναμεταδότη 24 του Hellas Sat, ο οποίος ανήκει στη δέσμη F1 και έχει κεντρικές συχνότητες:

- Ζεύξη uplink:  $f_{UP} = 13973\text{MHz}$
- Ζεύξη downlink:  $f_{DOWN} = 12729\text{MHz}$

### 3.2.1 Δορυφόρος Hellas Sat:

- $EIRP_{SAT} = 53dBW$
- Πρόκειται για το επίπεδο ισχύος του σήματος που εκπέμπεται από τη δορυφορική κεραία στο κέντρο της δέσμης. Είναι η ισχύς του σήματος στο κέντρο του λοβού ακτινοβολίας της κεραίας όταν ο ενισχυτής του αναμεταδότη λειτουργεί στο επίπεδο κορεσμού.
- $DBO = 3dB$
- Το DBO (Delta Back Off) ορίζεται ως η διαφορά του περιθωρίου ισχύος εξόδου (Output Back Off, OBO) από το περιθώριο ισχύος εισόδου (Input Back Off, IBO) σε dB. Ο παράγοντας OBO είναι η διαφορά της εξερχόμενης ισχύος από την ισχύ κορεσμού, ενώ ο παράγοντας IBO η αντίστοιχη απόσταση στην έξοδο (Σχήμα 3.2).
- $SFD = -92dBW / m^2$
- Η πυκνότητα ισχύος κορεσμού SFD (Saturation Flux Density) είναι η απαιτούμενη πυκνότητα ισχύος στην είσοδο της κεραίας λήψης του δορυφόρου ώστε να οδηγηθεί ο αναμεταδότης στον κορεσμό, στην κατάσταση δηλαδή όπου η περαιτέρω αύξηση ισχύος στην είσοδο του ενισχυτή δεν επιφέρει καμία αύξηση στην ισχύ εξόδου (Σχήμα 3.2).
- $(G/T)_{SAT} = 6dB/K$
- Το πηλίκο του κέρδους της κεραίας του δορυφόρου προς την ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου στην είσοδο του δέκτη.



Σχήμα 3.2 Περιοχή λειτουργίας (Ισχύς Εξόδου ως προς Ισχύ Εισόδου) ενός Ενισχυτή

### 3.2.2 Ευθεία ζεύξη και Ζεύξη επιστροφής

#### ΕΥΘΕΙΑ ΖΕΥΞΗ (FORWARD LINK):

Κεντρικός σταθμός (Gateway) → Δορυφόρος Hellas Sat → Τερματικά (Terminals)

- Ως πρωτόκολλο μετάδοσης χρησιμοποιεί το πρότυπο DVB-S (συμβατότητα με DVB-S2)
- Χρησιμοποιεί πολύπλεξη χρόνου: Time Division Multiplexing (TDM)
- Ενδεικτική τιμή Ρυθμού μετάδοσης  $R_F = 256Kbps$

#### ΖΕΥΞΗ ΕΠΙΣΤΡΟΦΗΣ (RETURN LINK):

Τερματικά (Terminals) → Δορυφόρος Hellas Sat → Κεντρικός σταθμός (Gateway)

- Ως πρωτόκολλο μετάδοσης χρησιμοποιεί το πρότυπο DVB-RCS
- Χρησιμοποιεί πολύπλεξη χρόνου σε πολλές συχνότητες: Multi Frequency – Time Division Multiple Access (MF-TDMA)
- Ενδεικτική τιμή Ρυθμού μετάδοσης  $R_R = 128Kbps$

Οι υπολογισμοί παρακάτω θα γίνουν για την ευθεία ζεύξη, αλλά θα παρουσιαστούν και τα αποτελέσματα για τη ζεύξη επιστροφής.

### 3.2.3 Η προς τα άνω ζεύξη (uplink)

Ως uplink θεωρείται η διαδρομή από Gateway προς δορυφόρο.

Διάμετρος κεραίας εκπομπής	$D = 3.8m$
Απόδοση κεραίας	$n_A = 70\%$
Απώλειες κυματοδηγού	$L_W = 0.5dB$
Απώλειες εκτός δέσμης (off beam)	$L_{OB} = 1.5dB$
Απώλειες σκόπευσης	$L_{T,a} = 0dB$
Γωνία ανύψωσης Αθήνα – Hellas Sat	$\theta_A = 43.24^\circ$
Πόλωση	Κάθετη (Vertical, V)
Προδιαγραφή διαθεσιμότητας	99.99%

Πίνακας 3.1 Δεδομένα χαρακτηριστικά της ζεύξης uplink

### 3.2.4 Η προς τα κάτω ζεύξη (downlink)

Το downlink λαμβάνεται ως η διαδρομή από τον δορυφόρο προς το απομακρυσμένο τερματικό στην περιοχή της Ξάνθης.

Διάμετρος κεραίας λήψης	$D = 1.2m$
Απόδοση κεραίας	$n_A = 60\%$
Θερμοκρασία θορύβου βαθμίδας LNA	$T_{LNA} = 90^\circ K$
Απώλειες κυματοδηγού	$L_W = 0.2dB$
Απώλειες εκτός δέσμης (off beam)	$L_{OB} = 1.5dB$
Απώλειες σκόπευσης	$L_{T,a} = 0.5dB$
Γωνία ανύψωσης Ξάνθη – Hellas Sat	$\theta_A = 40.54^\circ$
Πόλωση	Οριζόντια (Horizontal, $H$ )
Προδιαγραφή διαθεσιμότητας	99.98%

Πίνακας 3.2 Δεδομένα χαρακτηριστικά ζεύξης Downlink

### 3.3 Υπολογισμός και ανάλυση των παραμέτρων του ισοζυγίου ισχύος

Στο εδάφιο αυτό πραγματοποιείται ταυτόχρονα η θεωρητική επεξήγηση καθώς και ο υπολογισμός όλων των παραμέτρων που θα χρειαστούν για την μετέπειτα κατάστρωση του πίνακα ισοζυγίου ισχύος. Θα υπολογιστούν τα κέρδη των κεραιών, η ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου του δέκτη, ο λόγος G/T και θα αναλυθούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι απώλειες της ζεύξης.

#### 3.3.1 Κέρδος κεραίας

Ο πλέον διαδεδομένος τύπος κεραίας τόσο σε επίγειους σταθμούς όσο και σε δορυφορικούς αναμεταδότες είναι αυτός του παραβολικού κατόπτρου. Τις παραβολικές κεραιές χαρακτηρίζουν το υψηλό κέρδος και οι μικρής στάθμης πλευρικοί λοβοί. Η διάμετρος της κεραίας ανήκει στο εύρος 2.4m-11m προκειμένου για κεντρικούς σταθμούς και μέσα στο εύρος 0.6m-2.4m προκειμένου για απομακρυσμένα τερματικά VSAT.

Το μέγιστο κέρδος της παραβολικής κεραίας δίνεται από τη σχέση

$$G_{T \max} = 10 \log_{10} \left[ n_a \left( \frac{\pi D f}{c} \right)^2 \right] \text{ dBi}^3 \quad (3.1)$$

όπου, D η διάμετρος της κεραίας,

f η συχνότητα της ζεύξης,

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  η ταχύτητα του φωτός

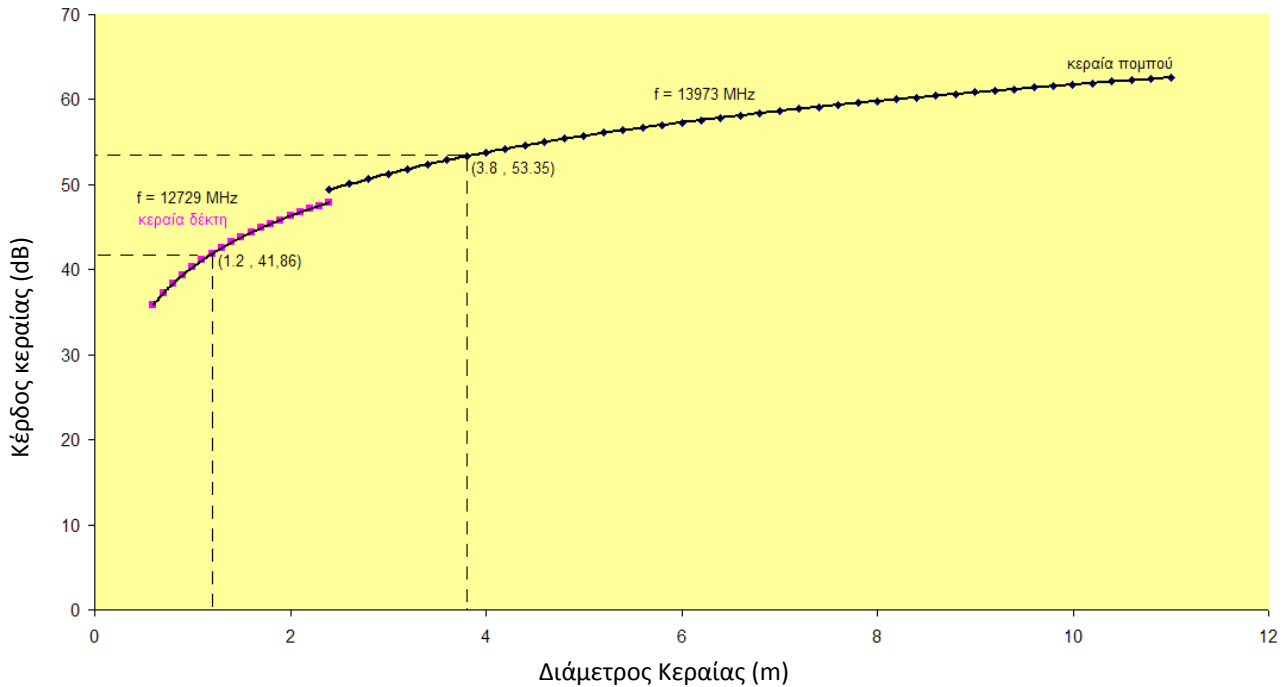
$n_a$  ο συντελεστής απόδοσης κεραίας

Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση του κέρδους του παραβολικού κατόπτρου σε σχέση με τη διάμετρο της κεραίας, για τις κεραιές πομπού και δέκτη και για τις αντίστοιχες συχνότητες λειτουργίας των uplink και downlink ζεύξεων του υπό μελέτη δικτύου.

---

<sup>3</sup> Η μονάδα dBi εκφράζει κατά πόσα dB είναι μεγαλύτερο το κέρδος της κεραίας σε σχέση με μια ιστροπική κεραία





Σχήμα 3.3 Γραφική παράσταση κέρδους κεραίας σε σχέση με τη διάμετρό της για δεδομένη συχνότητα

Έτσι, με βάση τα χαρακτηριστικά των δύο κεραιών, υπολογίζονται τα κέρδη τους.

$$\text{Κεραία πομπού (uplink): } G_{T(\max)} = 10 \log \left[ 0.7 \left( \frac{\pi \cdot 3.8 \cdot 13973 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^8} \right)^2 \right] = 53.353 \text{ dB}$$

$$\text{Κεραία δέκτη (downlink): } G_{T(\max)} = 10 \log \left[ 0.6 \left( \frac{\pi \cdot 1.2 \cdot 12729 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^8} \right)^2 \right] = 41.862 \text{ dB}$$

### 3.3.2 Απόσταση επίγειου σταθμού – δορυφόρου

Η απόσταση επίγειου σταθμού – δορυφόρου υπολογίζεται με βάση τη σχέση.

$$d = \sqrt{(R_{\Gamma} \cdot \sin \theta_A)^2 + 2R_{\Gamma} \cdot h + h^2} - R_{\Gamma} \cdot \sin \theta_A \quad (3.2)$$

όπου,  $R_{\Gamma} = 6378 \text{ km}$  η ακτίνα της γης,

$h = 35784 \text{ km}$  το ύψος της δορυφορικής τροχιάς και

$\theta_A$  η γωνία ανύψωσης

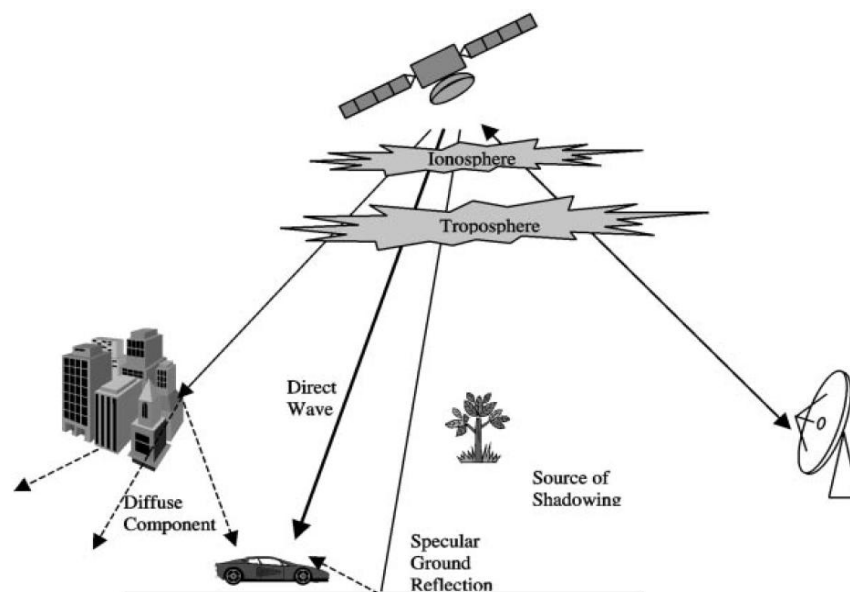
Έτσι, με βάση τα δεδομένα των δυο επίγειων σταθμών, υπολογίζονται οι αποστάσεις.

$$\text{Αθήνα: } d_{A\Theta} = 37535.92\text{km}$$

$$\text{Ξάνθη: } d_{\Xi\text{AN}\Theta} = 37736.90\text{km}$$

### 3.3.3 Απώλειες διάδοσης

Για τη σχεδίαση ενός δορυφορικού συστήματος είναι πολύ σημαντικό να είναι γνωστοί παράγοντες που επηρεάζουν δυσμενώς τη διάδοση των ραδιοσημάτων. Σε μια δορυφορική ζεύξη, τα σημαντικότερα προβλήματα κατά τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι οι απώλειες ελεύθερου χώρου, η απόσβεση του σήματος λόγω ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων, ιδίως λόγω βροχοπτώσεων, και οι απώλειες σκόπευσης. Αυτοί οι παράγοντες θα εξετασθούν αναλυτικά και ποσοτικά στη συνέχεια.

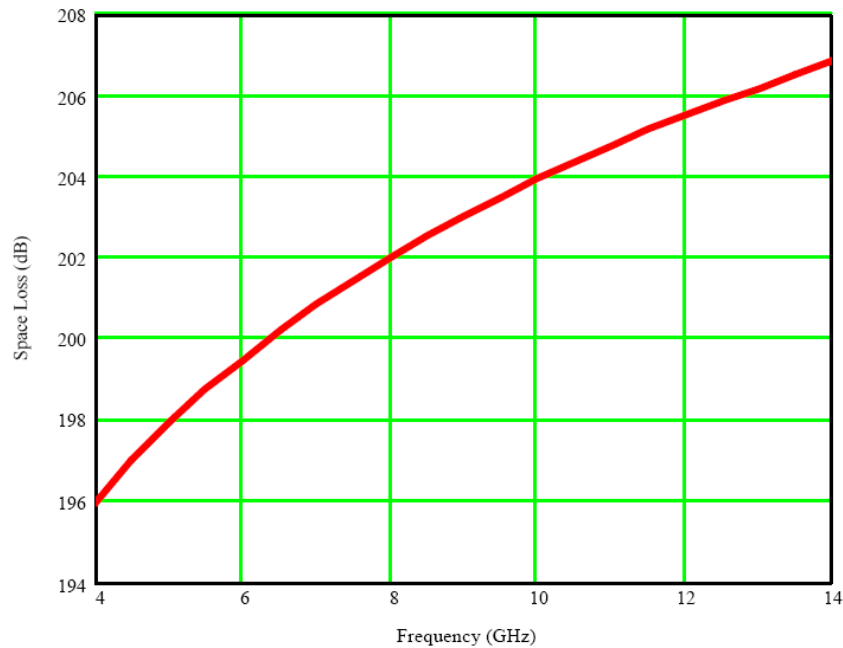


Σχήμα 3.4 Η διάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος και τα φυσικά φαινόμενα που την επηρεάζουν

### ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΧΩΡΟΥ

Πρόκειται για την απώλεια ισχύος που υφίσταται ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα κατά τη διάδοσή του στον ελεύθερο χώρο, χωρίς οντότητες που μπορούν να σκεδάσουν ή να απορροφήσουν την

ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η επίπτωση των απωλειών ελευθέρου χώρου στη διάδοση των κυμάτων φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5 Γραφική παράσταση των απωλειών ελευθέρου χώρου για ένα γεωστατικό δορυφόρο σε απόσταση  $d = 37500km$  από τον επίγειο σταθμό

Οι απώλειες ελευθέρου χώρου δίνονται από τη σχέση

$$FSL = -20 \log \left( \frac{4\pi fd}{c} \right) \quad [dB] \quad (3.2)$$

όπου  $d$  η απόσταση μεταξύ επίγειου σταθμού και δορυφόρου,  $f$  η συχνότητα της ζεύξης και  $c$  η ταχύτητα του φωτός στον ελεύθερο χώρο.

Έτσι, με βάση τα αποτελέσματα της σχέσης (3.2) προκύπτουν οι απώλειες ελευθέρου χώρου:

Uplink: Αθήνα – Δορυφόρος:  $FSL_{UP1} = -206.84dB$

Uplink: Ξάνθη – Δορυφόρος:  $FSL_{UP2} = -206.88dB$

Downlink: Δορυφόρος – Αθήνα:  $FSL_{DOWN1} = -206.03dB$

Downlink: Δορυφόρος – Ξάνθη:  $FSL_{DOWN2} = -206.07dB$

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, για τη forward ζεύξη, ενδιαφέρουν οι ζεύξεις Αθήνα – Δορυφόρος (Uplink) και Δορυφόρος – Ξάνθη (Downlink).

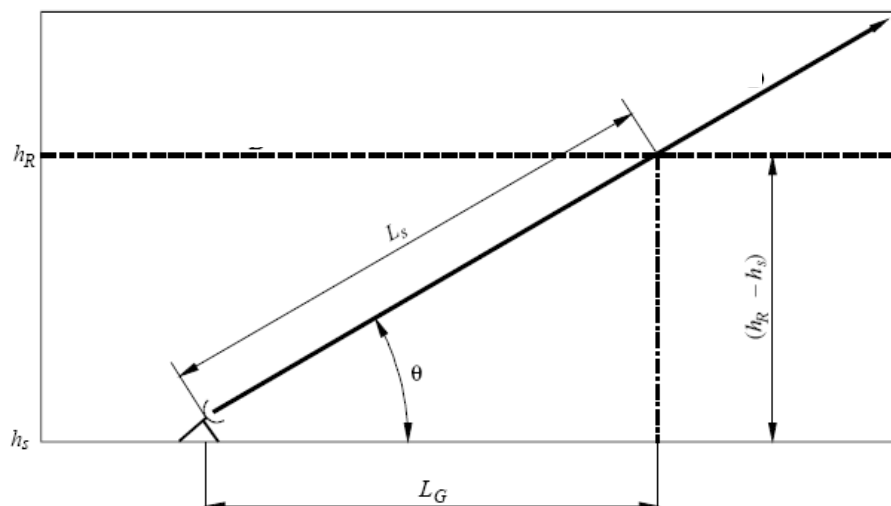
### ΑΠΟΣΒΕΣΗ ΛΟΓΩ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΩΝ

Για τον υπολογισμό της απόσβεσης λόγω βροχοπτώσεων χρησιμοποιείται το μοντέλο που συστήνεται από τον Διεθνή Οργανισμό ITU (International Telecommunications Union) και, συγκεκριμένα, από τη σύσταση P.618-8 του τμήματος ITU-R (ITU Radiocommunications), όπως αυτή περιγράφεται παρακάτω.

Η ακόλουθη διαδικασία παρέχει μια εκτίμηση των μακροχρόνιων στατιστικών της απόσβεσης λόγω βροχής για συχνότητες ζεύξης μέχρι 55 GHz. Οι ακόλουθες παράμετροι είναι απαραίτητοι:

1.  $R_{0.01} = 42mm/hr$  η αθροιστική κατανομή υπέρβασης του R για την Ελλάδα για ποσοστό 0.01% του έτους
2.  $h_s$  το μέσο υψόμετρο του επίγειου σταθμού πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας
3.  $\theta_A$  η γωνία ανύψωσης
4.  $\phi$  το γεωγραφικό πλάτος του σταθμού σε μοίρες
5.  $f$  η συχνότητα σε Hz
6.  $R_T = 8500km$  η μέση ακτίνα της γης

Για τον υπολογισμό της απόσβεσης ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:



Σχήμα 3.6 Σχηματική αναπαράσταση του μονοπατιού από τη γη προς το διάστημα

1. Αρχικά υπολογίζεται το ενεργό ύψος της βροχής  $h_R$  (βλ. Σχήμα 3.6) σύμφωνα με τη σύσταση P.839 της ITU-R.
2. Για  $\theta \geq 5^\circ$ , το ενεργό μήκος της δορυφορικής ζεύξης που διέρχεται από το μέσο βροχής, προκύπτει από τη σχέση (βλ. Σχήμα 3.6)

$$L_S = \frac{h_R - h_S}{\sin \theta} \quad [km] \quad (3.3)$$

Για  $\theta < 5^\circ$  χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$L_S = \frac{2(h_R - h_S)}{\left[ \sin^2 \theta + \frac{2(h_R - h_S)}{R_T} \right]^{1/2} + \sin \theta} \quad [km] \quad (3.4)$$

Αν  $h_R - h_S \leq 0$ , τότε η προβλεπόμενη απόσβεση λόγω βροχής είναι μηδενική για οποιοδήποτε ποσοστό του έτους και τα ακόλουθα βήματα δεν χρειάζονται.

3. Η οριζόντια προβολή  $L_G$  (βλ. Σχήμα 3.6) του ενεργού μήκους  $L_S$  της δορυφορικής ζεύξης δίνεται από τη σχέση

$$L_G = L_S \cdot \cos \theta \quad [km] \quad (3.5)$$

4. Η ένταση βροχόπτωσης  $R_{0.01}$  που υπερβαίνεται σε ένα ποσοστό 0.01% του έτους βρίσκεται με τη βοήθεια έτοιμων πινάκων ή από τους χάρτες έντασης βροχόπτωσης σύμφωνα με τη σύσταση P.837 της ITU-R και όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, για την Ελλάδα είναι  $R_{0.01} = 42mm/hr$  (βλ. Σχήμα 3.7).

5. Υπολογίζεται η ειδική απόσβεση  $\gamma_R$  με βάση τους εξαρτώμενους από τη συχνότητα όρους που έχουν δοθεί στη σύσταση P.837 της ITU-R και την ένταση βροχόπτωσης που βρέθηκε στο προηγούμενο βήμα.

$$\gamma_R = k \cdot R_{0.01}^\alpha \quad [dB/km] \quad (3.6)$$

6. Υπολογίζεται ο συντελεστής μείωσης της οριζόντιας προβολής του ενεργού μήκους για το 0.01% του χρόνου

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.78 \sqrt{\frac{L_G \cdot \gamma_R}{f}} - 0.38 \cdot (1 - e^{-2L_G})} \quad (3.7)$$

7. Ακολούθως, υπολογίζεται ο κάθετος παράγοντας ρύθμισης για το 0.01% του χρόνου

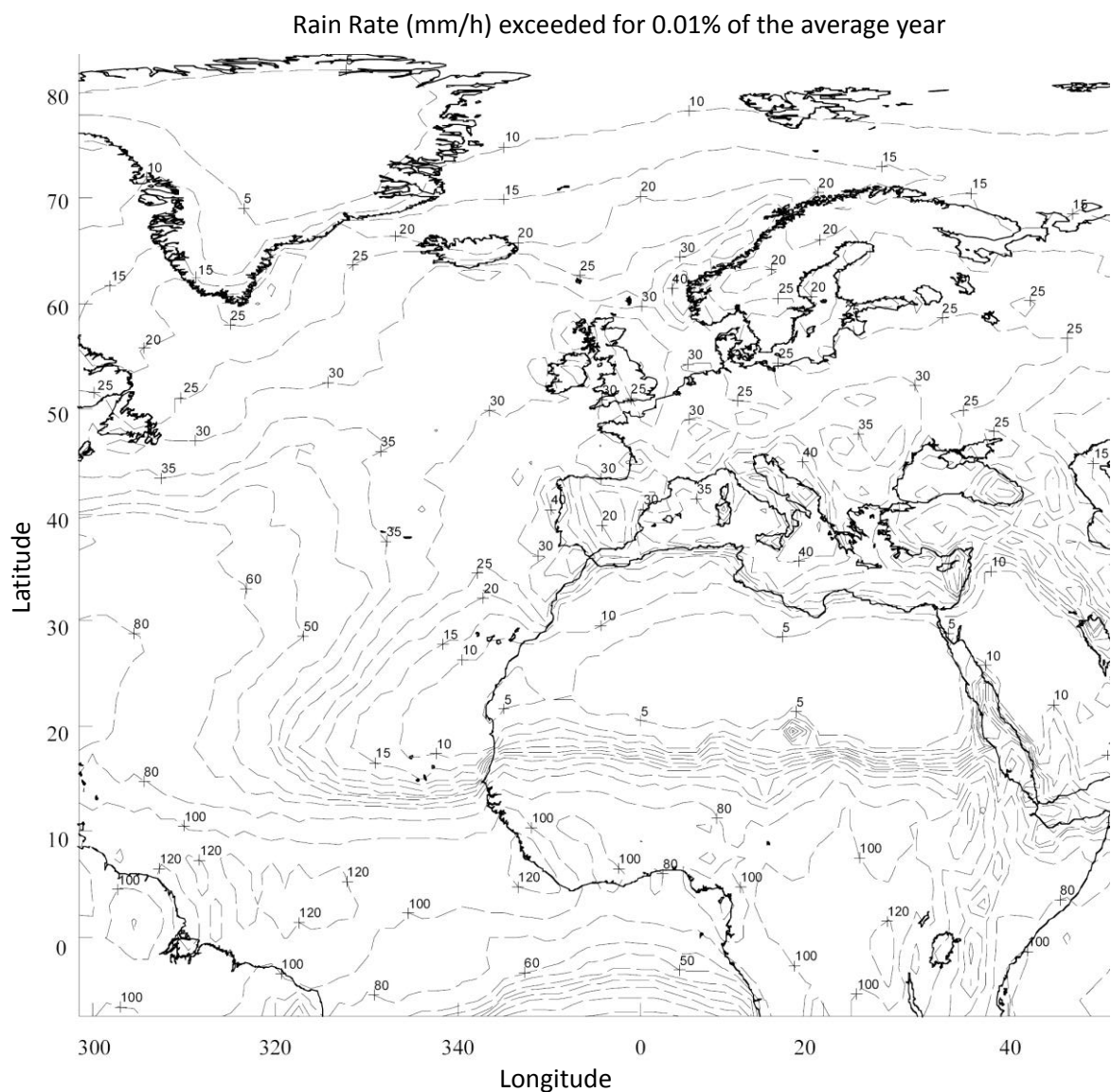
$$\zeta = \tan^{-1} \left( \frac{h_R - h_S}{L_G \cdot r_{0.01}} \right) \quad [\mu\acute{o}\iota\rho\epsilon\varsigma] \quad (3.8)$$

$$\text{Για } \zeta > \theta, L_R = \frac{L_G \cdot r_{0.01}}{\cos \theta} \quad [km] \quad (3.9)$$

$$\text{Αλλιώς, } L_R = \frac{h_R - h_S}{\sin \theta} \quad [km] \quad (3.10)$$

$$\text{Αν } |\phi| < 36^\circ, \chi = 36 - |\phi| \quad [\text{μοίρες}] \quad (3.11)$$

$$\text{Αλλιώς, } V_{0.01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \theta} \left( 31(1 - e^{-\theta/(1+\chi)}) \sqrt{\frac{L_R \cdot \gamma_R}{f^2}} - 0.45 \right)} \quad (3.12)$$



Σχήμα 3.7 Η ένταση της βροχόπτωσης (mm/h) που υπερβαίνει το 0.01% ενός μέσου έτους

8. Το ενεργό μήκος (effective length) μονοπατιού είναι

$$L_E = L_R \cdot v_{0.01} \quad [km] \quad (3.13)$$

9. Η προβλεπόμενη απόσβεση λόγω βροχής που υπερβαίνει το 0.01% του έτους υπολογίζεται από τη σχέση

$$A_{0.01} = \gamma_R \cdot L_E \quad [dB] \quad (3.14)$$

10. Η εκτιμώμενη απόσβεση για άλλες τιμές πιθανότητας υπέρβασης σε ένα μέσο έτος, από 0.001% μέχρι 5%, καθορίζεται από την απόσβεση με πιθανότητα υπέρβασης 0.01% ενός μέσου έτους

$$\text{Αν } p \geq 1\% \text{ ή } |\phi| \geq 36^\circ: \quad \beta=0 \quad (3.15)$$

$$\text{Αν } p < 1\% \text{ και } |\phi| < 36^\circ \text{ και } \theta \geq 25^\circ: \quad \beta = -0.005 \cdot (|\phi| - 36) \quad (3.16)$$

$$\text{Διαφορετικά: } \beta = -0.005 \cdot (|\phi| - 36) + 1.8 - 4.25 \cdot \sin \theta \quad (3.17)$$

$$A_p = A_{0.01} \cdot \left( \frac{p}{0.01} \right)^{-(0.655 + 0.033 \ln(p) - 0.045 \ln(A_{0.01}) - \beta(1-p) \sin \theta)} \quad [dB] \quad (3.18)$$

Η παραπάνω μέθοδος παρέχει μια εκτίμηση των μακροχρόνιων στατιστικών της απόσβεσης λόγω βροχοπτώσεων. Όταν συγκρίνονται μετρήσεις με αντίστοιχες στατιστικές προβλέψεις, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ένα περιθώριο σφάλματος εξαιτίας της μεγάλης μεταβλητότητας των στατιστικών βροχόπτωσης από έτος σε έτος.

Έτσι, με εφαρμογή του παραπάνω μοντέλου υπολογίζονται τα παρακάτω περιθώρια διαλείψεων λόγω βροχής:

$$\text{Για τη ζεύξη uplink (Αθήνα → Δορυφόρος): } A_p = 5dB$$

$$\text{Για τη ζεύξη downlink (Δορυφόρος → Ξάνθη): } A_p = 4.2dB$$

## ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΣΚΟΠΕΥΣΗΣ

Λόγω ατελειών στην ευθυγράμμιση της κεραίας του επίγειου δέκτη με την κεραία του δορυφορικού αναμεταδότη, εμφανίζονται απώλειες λόγω ατελούς σκόπευσης. Ακόμα και με τέλεια ευθυγράμμιση κατά την εγκατάσταση της κεραίας, επειδή παρουσιάζονται κάποιες μεταβολές στη θέση του δορυφόρου λόγω της ελικοειδούς κίνησής του, οι απώλειες αυτές εξακολουθούν να υφίστανται και δίδονται από τη σχέση

$$L_T = 12 \cdot \left( \frac{\theta_T}{\theta_{3dB}} \right) \quad [dB] \quad (3.19)$$

όπου  $\theta_T$  η γωνία απόκλισης από την ευθυγράμμιση των κεραιών εκπομπής και λήψης και

$$\theta_{3dB} = 70 \cdot \left( \frac{c}{f \cdot D} \right) \quad [\text{μοίρες}] \quad (3.20)$$

η γωνία 3dB της κεραίας.

Για συστήματα που χρησιμοποιούν τεχνικές παρακολούθησης της κίνησης του δορυφόρου, η γωνία  $\theta_T$  είναι της τάξης  $0.2\theta_{3dB}$ , οπότε οι απώλειες σκόπευσης προκύπτουν 0.48 dB. Γενικά οι απώλειες εξαρτώνται από το μέγεθος του παραθύρου μέσα στο οποίο επιτρέπεται να κινείται ο δορυφόρος, πριν γίνει διόρθωση της θέσης του, όπως αυτό καθορίζεται από το υποσύστημα TT&C (Tracking, Telemetry and Control). Ανάλογα με το μέγεθος λοιπόν του παραθύρου, αλλά και ανάλογα με τις συχνότητες της άνω και κάτω ζεύξης, προκύπτουν τιμές για το  $\theta_T$  από 1 έως 2.5 dB για κεραιές διαμέτρου 0.6 έως 2.4 m, σύμφωνα με τη σχέση

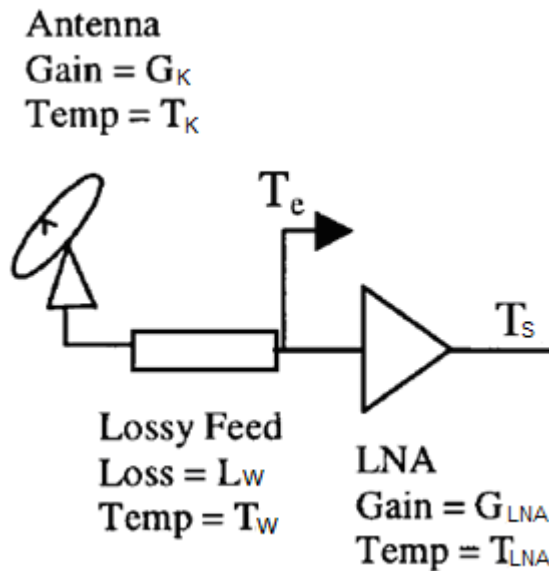
$$\theta_T \approx 0.2 \cdot 10 \log \left( 70 \cdot \left( \frac{c}{f \cdot D} \right) \right) \quad (3.21)$$

που προκύπτει με το συνδυασμό των σχέσεων 3.20 και  $\theta_T \approx 0.2\theta_{3dB}$ .

### 3.3.4 Ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου του δέκτη

Για να προσδιοριστεί ο σηματοθορυβικός λόγος στην έξοδο του RF τμήματος του δέκτη, πρέπει να υπολογιστεί η ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου του. Η θερμοκρασία θορύβου υπολογίζεται αντίστοιχα για συνθήκες καθαρού ουρανού και βροχόπτωσης, όπως περιγράφεται παρακάτω. Στο σχήμα 3.8 φαίνονται τα στάδια από τα οποία αποτελείται ο δέκτης και με βάση τα οποία υπολογίζεται η ισοδύναμη θερμοκρασία  $T_S$ .





Σχήμα 3.8 Διάγραμμα δέκτη

### ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΘΑΡΟΥ ΟΥΡΑΝΟΥ

Παρά τη μεγάλη κατευθυντικότητα της κεραίας του δέκτη, εκτός από το σήμα πληροφορίας λαμβάνεται και θόρυβος, ο οποίος προέρχεται από διάφορες πηγές ακτινοβολίας. Η θερμοκρασία θορύβου της κεραίας  $T_K$  εξαρτάται από τον προσανατολισμό της κεραίας και τη γωνία ανύψωσης του σταθμού. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θεωρείται  $T_K = 31^\circ K$ .

Η θερμοκρασία θορύβου του κυματοδηγού που συνδέει την κεραία με τον ενισχυτή LNA υπολογίζεται από τη σχέση:

$$T_W = T_g \left( 10^{\frac{L_W}{10}} - 1 \right) \quad [^\circ K] \quad (3.22)$$

όπου  $L_W = 0.2dB$  (βλ. Πίνακα 3.2) οι απώλειες του κυματοδηγού και  $T_g = \theta + 273 \quad [^\circ K]$  η φυσική θερμοκρασία της βαθμίδας εισόδου του δέκτη. Αν θεωρηθεί μια μέση εξωτερική θερμοκρασία περίπου  $\theta = 17^\circ C$ , τότε θα έχουμε  $T_g = 290^\circ K$ .

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.8, μετά τον κυματοδηγό συνδέεται η βαθμίδα ενίσχυσης LNA, με θερμοκρασία θορύβου  $T_{LNA} = 90^\circ K$  (βλ. Πίνακα 3.2).

Η ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου για συνθήκες καθαρού ουρανού υπολογίζεται από τη σχέση:

$$T_S = T_k + T_w + \frac{T_{LNA}}{G_w} \quad [^\circ K] \quad (3.23)$$

Όπου  $G_w = 10^{-L_w/10} = 0.955$  το κέρδος του κυματοδηγού.

Έτσι,  $T_S = 138.91^\circ K$

### ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ

Για συχνότητες λειτουργίας  $f > 10GHz$ , σε συνθήκες βροχόπτωσης με απόσβεση  $A_R$  αυξάνεται η θερμοκρασία θορύβου κεραίας του δέκτη κατά

$$\Delta T = T_o \left(1 - 10^{-\frac{A_R}{10}}\right) \quad [^\circ K] \quad (3.24)$$

όπου  $T_o = 300^\circ K$ .

Η αύξηση αυτή προστίθεται στη συνολική ισοδύναμη θερμοκρασία του δέκτη και έτσι προκύπτει η ισοδύναμη θερμοκρασία δέκτη υπό συνθήκες βροχόπτωσης:

$$T_S' = T_S + \Delta T \quad [^\circ K] \quad (3.25)$$

Αντικαθιστώντας τα δεδομένα στην παραπάνω σχέση προκύπτει  $T_S' = 324.85^\circ K$ .

### 3.3.5 Λόγος G/T

Ο λόγος G/T [ $dB/^\circ K$ ] καθορίζει το κέρδος της κάτω ζεύξης σε σχέση με το θόρυβο που έχει προστεθεί στο σήμα και δίνεται από την εξίσωση:

$$\left(\frac{G}{T}\right) = G_T - 10 \log_{10}(T_S') \quad dB/^\circ K \quad (3.26)$$

Έτσι, υπό συνθήκες καθαρού ουρανού προκύπτει:  $\left(\frac{G}{T}\right) = 30.66 dB/^\circ K$

Υπό συνθήκες βροχόπτωσης προκύπτει:  $\left(\frac{G}{T}\right)' = 28.24 dB/^\circ K$

Ο λόγος G/T υπολογίζεται για τις χειρότερες συνθήκες υπό τις οποίες είναι ενδεχόμενο να λειτουργήσει ο δέκτης. Για το λόγο αυτό, στους υπολογισμούς του ισοζυγίου ισχύος χρησιμοποιείται η τιμή  $\left(\frac{G}{T}\right)'$ .

### 3.4 Αποτελέσματα για το ισοζύγιο ισχύος

Το ισοζύγιο ισχύος είναι αυτό που συνδέει όλες τις απώλειες, τα κέρδη και τις συνεισφορές θορύβου μιας τηλεπικοινωνιακής ζεύξης. Χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της ποιότητας μιας ζεύξης με βάση το σηματοθορυβικό λόγο CNR (Carrier to Noise Ratio). Αρχικά θα καθοριστούν οι σηματοθορυβικοί λόγοι  $E_b / N_o$  για τις δυο ζεύξεις ξεχωριστά και έπειτα ο συνολικός, λαμβάνοντας υπόψη και τις παρεμβολές και τη χρήση κωδικοποίησης.

#### 3.4.1 Uplink

Αρχικά πρέπει να υπολογιστεί το κέρδος του δορυφόρου  $G_s$ , μέσω της σχέσης

$$G_s = EIRP_{sat} - SFD + 20\log(f_{up}) + DBO + 21.45 \quad [dB] \quad (3.27)$$

Έτσι, σύμφωνα με τα δεδομένα προκύπτει

$$G_s = 372.35dB$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται το ισοζύγιο για τη ζεύξη Uplink (Αθήνα → Δορυφόρος):

$$\left(\frac{C}{N_o}\right)_{up} = EIRP_e - FSL - L_{T,up} - L_{OB} - A_{R,up} + \left(\frac{G}{T}\right)_s - 10\log(k) \quad [dB] \quad (3.28)$$

όπου  $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ W / Hz}$  η σταθερά Boltzmann και οι υπόλοιπες παράμετροι έχουν δοθεί στον Πίνακα 3.1 και στα προηγούμενα εδάφια.

$$\text{Έπομένως, } \left(\frac{C}{N_o}\right)_{up} = 73.76dB$$

Επειδή όμως χρησιμοποιούνται ψηφιακά σήματα, ο σηματοθορυβικός λόγος σε δορυφορικά συστήματα συνηθίζεται να αποδίδεται μέσω της παραμέτρου  $(E_b / N_o)_{up}$ , που υπολογίζεται από τη σχέση

$$\left(\frac{E_b}{n_o}\right)_{up} = \left(\frac{C}{N_o}\right)_{up} - 10\log(R_{UP}) \quad [dB] \quad (3.29)$$

$$\left(\frac{E_b}{n_o}\right)_{up} = 19.69dB$$

### 3.4.2 Downlink

Ως Downlink θεωρείται η ζεύξη Δορυφόρου → Ξάνθης. Αρχικά πρέπει να υπολογιστεί η μέγιστη ισχύς που εκπέμπεται από το δορυφόρο προς τον επίγειο σταθμό.

$$EIRP_{S(max)} = EIRP_e - FSL_{DOWN} - L_{OB} + G_S \quad [dBW] \quad (3.30)$$

Με βάση τη σχέση αυτή προκύπτει  $EIRP_{S(max)} = 217.28dBW$

Λαμβάνοντας υπόψη και τις απώλειες διάδοσης στις οποίες υπόκειται το σήμα, προκύπτει:

$$EIRP_s = EIRP_{s(max)} - A_{R,up} - L_{T,up} \quad [dBW] \quad (3.31)$$

$$\text{ή } EIRP_s = 212.28dBW$$

Με βάση τα προηγούμενα, υπολογίζεται ο σηματοθρομβικός λόγος για την κάτω ζεύξη, με αποτέλεσμα

$$\left(\frac{E_b}{n_o}\right)_{Down} = 31.69dB \quad (3.32)$$

### 3.4.3 Αποτελέσματα της συνολικής ζεύξης

Με βάση τα προηγούμενα αποτελέσματα μπορεί να υπολογισθεί ο συνολικός λόγος  $(E_b / N_o)$  από τη σχέση

$$\left(\frac{E_b}{n_o}\right)_{thermal} = 10\log \left[ 10^{\frac{-(E_b/n_o)_{up}}{10}} + 10^{\frac{-(E_b/n_o)_{Down}}{10}} \right]^{-1} \quad [dB] \quad (3.33)$$

με αποτέλεσμα  $\left(\frac{E_b}{n_o}\right)_{thermal} = 19.42dB$

Ισχύει ότι  $\left(\frac{E_b}{n_o}\right)_{thermal} < \left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{up} < \left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{Down}$ , γεγονός αναμενόμενο, αφού η επίδοση

της συνολικής ζεύξης δεν μπορεί να υπερβαίνει την επίδοση μίας συμβαλλόμενης ζεύξης. Επιπλέον, η τιμή του συνολικού σηματοθορυβικού λόγου έχει προς τα κάτω περιορισμό ώστε ο σταθμός λήψης να μπορεί να αποκωδικοποιεί σωστά το λαμβανόμενο σήμα με συγκεκριμένο αριθμό σφαλμάτων. Ο περιορισμός αυτός καθορίζεται από τη σχεδίαση του δικτύου και το είδος διαμόρφωσης του σήματος.

### 3.4.4 Παρεμβολές

Στους προηγούμενους υπολογισμούς δεν έχει ληφθεί υπόψη ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει το σηματοθορυβικό λόγο μιας ζεύξης, αυτός των παρεμβολών. Στα δίκτυα VSAT χρησιμοποιούνται μικρές κεραίες με μεγάλο εύρος δέσμης, και επειδή τα σήματα που μεταδίδονται είναι σχετικά ασθενή, είναι πλέον ευαίσθητα στις παρεμβολές.

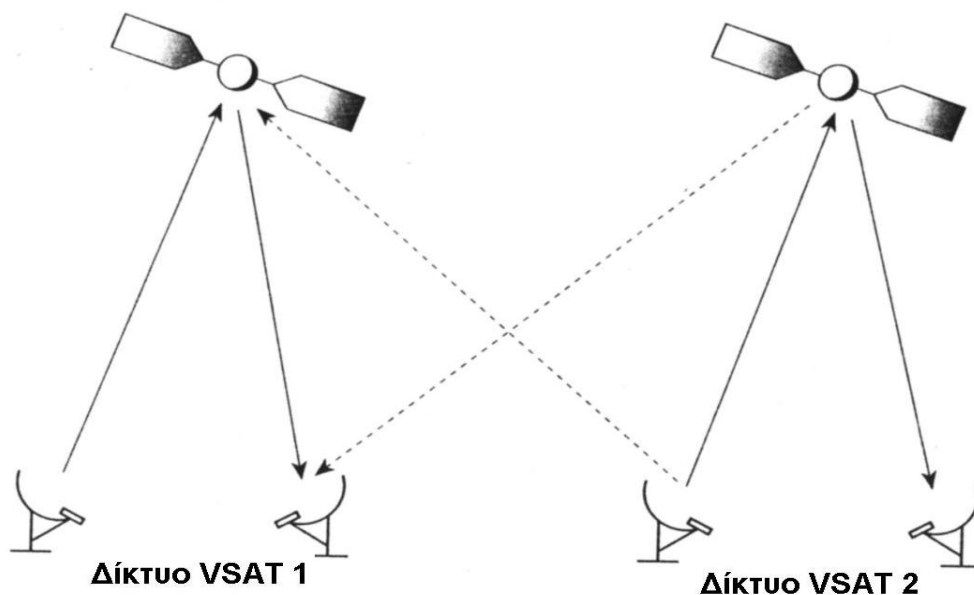
Οι συνηθέστερες παρεμβολές στα δορυφορικά συστήματα διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- Παρεμβολή γειτονικού δορυφόρου
- Παρεμβολή λόγω αποπόλωσης
- Παρεμβολή από προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης

#### ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ ΓΕΙΤΟΝΙΚΟΥ ΔΟΡΥΦΟΡΟΥ

Επειδή στη γεωστατική τροχιά προστίθενται διαρκώς νέοι δορυφόροι, η μεταξύ τους γωνιακή απόσταση μειώνεται, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται όλο και ισχυρότερες παρεμβολές μεταξύ γειτονικών δορυφόρων όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.9. Ο Διεθνής Οργανισμός ITU-R έχει προτείνει συστηματικές μεθόδους για την εκτίμηση των παρεμβολών αυτού του είδους καθώς και τον έλεγχο των επιτρεπτών τιμών του τροχιακού διαχωρισμού  $\Delta\theta$  μεταξύ γειτονικών δορυφόρων της ίδιας τροχιάς.

Για τον δορυφόρο Hellas Sat ισχύει  $(C/I)_{adj} = 18dB$ .



Σχήμα 3.9 Παρεμβολή μεταξύ γειτονικών δορυφόρων.

### ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ ΛΟΓΩ ΑΠΟΠΟΛΩΣΗΣ

Η τεχνική αναχρησιμοποίησης της συχνότητας χρησιμοποιεί δύο ορθογώνιες πολώσεις μεταξύ δυο ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων του ίδιου μήκους κύματος (ή στην ίδια φέρουσα συχνότητα) για να αυξήσει το ωφέλιμο εύρος ζώνης. Όμως λόγω αποπόλωσης κατά τη διάδοση του σήματος δημιουργούνται αντίστοιχες παρεμβολές στο σήμα που λαμβάνεται στο δέκτη. Τα μεγέθη που περιγράφουν το φαινόμενο της αποπόλωσης είναι ο Διαχωρισμός Διασταύρωσης Πόλωσης XPD (Cross-Polar Discrimination) και η Απομόνωση Διασταύρωσης Πόλωσης XPI (Cross-Polar Isolation).

Για τον Hellas Sat ισχύει  $(C/I)_{DEP} = 21dB$ .

### ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ ΛΟΓΩ ΕΝΔΟΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Ο δορυφορικός αναμεταδότης είναι ένας μη γραμμικός ενισχυτής και παράγει ανεπιθύμητα σήματα στην έξοδο, τα οποία είναι παράγωγα των σημάτων που φθάνουν στην είσοδό του. Αν λοιπόν φθάνουν στον αναμεταδότη σήματα στις φέρουσες  $f_1$  και  $f_2$ , προκύπτουν προϊόντα

ενδοδιαμόρφωσης στις φέρουσες συχνότητες  $f_1 - f_2$ ,  $f_2 - f_1$ ,  $2f_1 - f_2$  κλπ. Σε αναμεταδότες που εξυπηρετούν διάφορες συχνότητες, τα προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης είναι πάρα πολλά και συχνά δεν μπορούν να διαχωριστούν και θεωρούνται ως πρόσθετος θόρυβος στον αναμεταδότη. Τα προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης εξαρτώνται από το βαθμό μη-γραμμικότητας και το σημείο κορεσμού του ενισχυτή του αναμεταδότη (βλ. Σχήμα 3.2)

Για τον Hellas Sat ισχύει  $(C/I)_{im} = 16dB$ .

### ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ

Συνυπολογίζοντας όλους τους παραπάνω παράγοντες προκύπτει ο συνολικός λόγος σήματος προς παρεμβολή από τη σχέση

$$(C/I)_{ολικο} = 10 \log \left[ 10^{-\frac{(C/I)_{adj}}{10}} + 10^{-\frac{(C/I)_{DEP}}{10}} + 10^{-\frac{(C/I)_{im}}{10}} \right]^{-1} \quad [dB] \quad (3.34)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω,  $(C/I)_{ολικο} = 13.11dB$

### 3.4.5 Ψηφιακή διαμόρφωση και κωδικοποίηση

Τα σύγχρονα συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διαχειρίζονται κυρίως σήματα ψηφιακής μορφής. Αυτό συνήθως περιλαμβάνει μεταβολή του πλάτους, της συχνότητας ή της φάσης του φέροντος ανάλογα με το σήμα πληροφορίας, οπότε προκύπτουν τα τρία αντίστοιχα γενικά είδη ψηφιακής διαμόρφωσης.

- Η κωδικοποίηση ASK (Amplitude Shift Keying)
- Η κωδικοποίηση FSK (Frequency Shift Keying)
- Η κωδικοποίηση PSK (Phase Shift Keying)

Σε δίκτυα VSAT, λόγω της μικρής λαμβανομένης ισχύος και των μεγάλων αποστάσεων μετάδοσης, είναι απαραίτητη η διόρθωση λαθών (Forward Error Correction, FEC) για την επίτευξη της επιθυμητής

ποιότητας ζεύξης και για καλύτερη αξιοποίηση του ασύρματου διαύλου. Σε δίκτυα υπολογιστών, η κωδικοποίηση μειώνει τον αριθμό των σφαλμάτων και καθιστά ασφαλή τη μετάδοση πακέτων δεδομένων. Επίσης, το γεγονός ότι η κωδικοποίηση παρέχει πλεονέκτημα ασφάλειας και κέρδος σηματοθορυβικού λόγου στο ισοζύγιο ισχύος, αντισταθμίζεται από το μειονέκτημα αύξησης εύρους ζώνης, ώστε να διασφαλίζεται η ποιότητας της ζεύξης.

Στη συνέχεια, μελετάται το πώς μεταβάλλονται οι τιμές του σηματοθορυβικού λόγου για κωδικοποίηση BPSK (Binary PSK) και QPSK (Quadrature PSK), με ρυθμούς κωδικοποίησης διόρθωσης λαθών FEC  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{4}$  και  $\frac{7}{8}$ .

Από τη σχέση που ισχύει για το κέρδος κωδικοποίησης

$$G_c = \frac{(E_b/n_o)_u}{(E_s/n_o)_c}, \quad (3.35)$$

όπου  $(E_b/n_o)_u$  και  $(E_b/n_o)_c$  οι λόγοι ενέργειας ψηφίου προς την πυκνότητα θορύβου στη λέξη πληροφορίας χωρίς και με κωδικοποίηση αντίστοιχα,

προκύπτει με αντικατάσταση του κέρδους κωδικοποίησης και επίλυση ως προς την  $E_s$  η σχέση που δίνει την ενέργεια συμβόλου κωδικοποιημένης λέξης

$$E_s = r_{FEC} \cdot \log_2 M \cdot E_b \quad (3.36)$$

με  $M = 2^n$  τα επιπεδα κωδικοποίησης και  $n = \log_2 M$  το μήκος (σε bits) της κωδικοποιημένης λέξης.

Διαιρώντας και τα δυο μέλη της (3.36) με την πυκνότητα ισχύος θορύβου  $N_o$  και χρησιμοποιώντας λογαριθμική κλίμακα προκύπτει

$$\left( \frac{E_s}{N_o} \right) = 10 \log \frac{E_s}{N_o} = 10 \log r_{FEC} + 10 \log(\log_2 M) + 10 \log \frac{E_b}{N_o} \quad [dB] \quad (3.37)$$

Συνυπολογίζοντας την παρεμβολή, προκύπτει ο συνολικός λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή της δορυφορικής ζεύξης

$$\left( \frac{E_s}{n_o} + I \right)_{ολικο} = 10 \log \left[ 10^{-(C/I)_{ολικο}/10} + 10^{-(E_s/N_o)/10} \right]^{-1} \quad [dB] \quad (3.38)$$



Με βάση τις σχέσεις 3.35 και 3.36, προκύπτει ο παρακάτω πίνακας αποτελεσμάτων για τα δυο σχήματα κωδικοποίησης αλλά και για τους ρυθμούς κωδικοποίησης διόρθωσης λαθών:

$r_{FEC}$	M	$\log_2 M$	$E_s$	$E_b / N_0$ [dB]	$E_s / N_0$ [dB]	$(E_s / N_0 + I)_{total}$ [dB]
1/2	BPSK	1	Eb/2	19.42	16.41	11.44
3/4	2	1	3Eb/4	19.42	18.17	11.93
7/8		1	7Eb/8	19.42	18.84	12.08
1/2		QPSK	2	Eb	19.42	19.42
3/4	4	2	3Eb/2	19.42	21.18	12.48
7/8		2	7Eb/4	19.42	21.85	12.56

Πίνακας 3.3 Ισοζύγιο ισχύος για το κωδικοποιημένο σήμα

Στα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 3.3 παρατηρείται μια διαφορά περί των 3dB στους σηματοθορυβικούς λόγους του κωδικοποιημένου σήματος ( $E_s / N_0$ ) με αντίστοιχους ρυθμούς κωδικοποίησης  $r_{FEC}$  για τα δυο είδη κωδικοποίησης που εξετάζονται. Η διαφορά αυτή όμως φαίνεται να είναι το πολύ 1dB για τον συνολικό σηματοθορυβικό λόγο ( $(E_s / N_0 + I)_{total}$ ). Η παρατήρηση αυτή δείχνει ότι ο συνολικός σηματοθορυβικός λόγος εξαρτάται σε μικρότερο βαθμό από το είδος της κωδικοποίησης του σήματος, σε σχέση με τον σηματοθορυβικό λόγο κωδικοποιημένου σήματος. Παρά το γεγονός όμως ότι η εξάρτηση του  $(E_s / N_0 + I)_{total}$  από το είδος κωδικοποίησης είναι σχετικά μικρή, είναι εμφανές ότι η κωδικοποίηση QPSK με ρυθμό FEC 7/8 παρουσιάζει τον μεγαλύτερο, και κατά συνέπεια καλύτερο για τη ζεύξη, σηματοθορυβικό λόγο, γι' αυτό και επιλέγεται τελικά.

### 3.5 Πίνακας ισοζυγίου ισχύος

Παρακάτω παρατίθεται οι συγκεντρωτικοί πίνακες αποτελεσμάτων για τα μεγέθη που αφορούν το ισοζύγιο ισχύος του της δορυφορικής ζεύξης που μας ενδιαφέρει για το Forward και το Return Link αντίστοιχα.

		Μονάδες
<b>Κωδικοποίηση</b>		
Ρυθμός FEC	$\frac{7}{8}$	
Διαμόρφωση	QPSK	
<b>Προς τα άνω ζεύξη</b>		
Συχνότητα	13973	MHz
Ρυθμός μετάδοσης	256	kbps
EIRPe	52.5	dBW
Διάμετρος κεραίας πομπού	3.8	m
Κέρδος κεραίας πομπού	53.35	dBi
Συντελεστής απόδοσης κεραίας	70%	
Απώλειες ελευθέρου χώρου (FSL)	206.84	dB
Απώλειες Off-Beam	1.5	dB
Απώλειες σκόπευσης	0	dB
Απώλειες κυματοδηγού πομπού (Lw)	0.5	dB
Περιθώριο βροχής	5	dB/°K
<b>Αναμεταδότης</b>		
Δορυφορικό κέρδος	6	dB/°K
Πυκνότητα ισχύος κορεσμού	-92	dBW/m <sup>2</sup>
Delta Back Off	3	dB
EIRPsat	53	dBW
Gs	372.36	dB

Προς τα κάτω ζεύξη		
Συχνότητα	12729	MHz
Ρυθμός μετάδοσης	256	kbps
Διάμετρος κεραίας δέκτη	1.2	m
Κέρδος κεραίας δέκτη	41.86	dBi
Συντελεστής απόδοσης κεραίας	60%	
Απώλειες Ελευθέρου χώρου (FSL)	206.07	dB
Απώλειες Off-Beam	1.5	dB
Απώλειες σκόπευσης	0.5	dB
Απώλειες κυματοδηγού πομπού (Lw)	0.2	dB
Θερμοκρασία θορύβου κεραίας (Tκ)	31	°K
Μεταβολή θερμοκρασίας θορύβου κεραίας υπό βροχή	185.94	°K
G/T καθαρού ουρανού	20.43	dB/K
G/T υπό βροχή	16.74	dB/K
Περιθώριο βροχής	4.2	dB/oK
Θερμοκρασία θορύβου LNA	90	°K
Επίδοση συστήματος		
(Eb/No) <sub>up</sub>	19.69	dB
(Eb/No) <sub>down</sub>	31.69	dB
(Eb/No) <sub>therm</sub>	19.42	dB
(Es/No) <sub>therm</sub>	21.85	dB
(Es/No) που απαιτείται για κωδικοποίηση	10.37	dB
(C/I) <sub>adj</sub>	18	dB
(C/I) <sub>DEP</sub>	21	dB
(C/I) <sub>im</sub>	16	dB
(C/I) <sub>ολικό</sub>	13.11	dB
(Es/No+I)	12.56	dB

Πίνακας 3.4 Ισοζύγιο ισχύος για Forward Link: Αθήνα → Δορυφόρος Hellas Sat → Ξάνθη

		Μονάδες
<b>Κωδικοποίηση</b>		
Ρυθμός FEC	$\frac{7}{8}$	
Διαμόρφωση	QPSK	
<b>Προς τα άνω ζεύξη</b>		
Συχνότητα	13973	MHz
Ρυθμός μετάδοσης	128	kbps
EIRP <sub>e</sub>	52.5	dBW
Διάμετρος κεραίας πομπού	1.2	m
Κέρδος κεραίας πομπού	42.67	dBi
Συντελεστής απόδοσης κεραίας	60%	
Απώλειες ελευθέρου χώρου (FSL)	206.88	dB
Απώλειες Off-Beam	1.5	dB
Απώλειες σκόπευσης	0.5	dB
Απώλειες κυματοδηγού πομπού (L <sub>w</sub> )	0.2	dB
Περιθώριο βροχής	4.2	dB/°K
<b>Αναμεταδότης</b>		
Δορυφορικό κέρδος	6	dB/°K
Πυκνότητα ισχύος κορεσμού	-92	dBW/m <sup>2</sup>
Delta Back Off	3	dB
EIRP <sub>sat</sub>	53	dBW
G <sub>s</sub>	372.36	dB
<b>Προς τα κάτω ζεύξη</b>		
Συχνότητα	12729	MHz
Ρυθμός μετάδοσης	128	kbps
Διάμετρος κεραίας δέκτη	3.8	m
Κέρδος κεραίας δέκτη	52.54	dBi

Συντελεστής απόδοσης κεραίας	70%	
Απώλειες Ελευθέρου χώρου (FSL)	206.03	dB
Απώλειες Off-Beam	1.5	dB
Απώλειες σκόπευσης	0	dB
Απώλειες κυματοδηγού πομπού (Lw)	0.5	dB
Θερμοκρασία θορύβου κεραίας (Tκ)	31	°K
Μεταβολή θερμοκρασίας θορύβου κεραίας υπό βροχή	205.13	°K
G/T καθαρού ουρανού	30.3	dB/°K
G/T υπό βροχή	26.83	dB/°K
Περιθώριο βροχής	5	dB/°K
<b>Επίδοση συστήματος</b>		
(Eb/No) <sub>up</sub>	52.65	dB
(Eb/No) <sub>down</sub>	45.13	dB
(Eb/No) <sub>therm</sub>	44.43	dB
(Es/No) <sub>therm</sub>	46.86	dB
(C/I) <sub>adj</sub>	18	dB
(C/I) <sub>DEP</sub>	21	dB
(C/I) <sub>im</sub>	16	dB
(C/I) <sub>ολικό</sub>	13.11	dB
(Es/No+I)	13.10	dB

Πίνακας 3.5 Ισοζύγιο ισχύος για το Return Link: Ξάνθη (Terminal) → Δορυφόρος Hellas Sat → Αθήνα (Gateway)

### 3.6 Βιβλιογραφία

- [1] Υπουργείο Μεταφορών και Επικοινωνιών, “Ανάπτυξη Υποδομών για την αρχική εξυπηρέτηση αναγκών των φορέων του Δημοσίου Τομέα απομακρυσμένων περιοχών για προηγμένες τεχνολογίες επικοινωνιών με τη χρήση του Δημόσιου Δορυφορικού Συστήματος Hellas Sat «ΔΟΡΥ»
- [2] Hellas Sat, “Hellas-Sat 2 Satellite Handbook”, [Μάρτιος 2004]
- [3] Π. Κωπτής και Χ. Καψάλης, “Δορυφορικές Επικοινωνίες” (2<sup>η</sup> έκδοση), Εκδόσεις Τζιόλα, [2006]
- [4] Μ. Ε. Ταουσάνης και Α. Α. Τζίμα, “Διαστασιοποίηση δικτύων VSAT για τη μεταφορά δεδομένων στη νησιωτική περιοχή της Ελλάδας”, Διπλωματική Εργασία, [Απρίλιος 2004]
- [5] Ε. Ε. Νιζαστάκης, “Σημειώσεις Δορυφορικών Επικοινωνιών”, Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Υπολογιστών (Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου)
- [6] B. Woodward, “Notes on Digital Data Transmission”, Electrical and Electronic Engineering Department (Loughborough University)
- [7] R. Seager & A. Feresidis, “Communication Channels – Topic 2: The free space and satellite channel”, Electrical and Electronic Engineering Department (Loughborough University)
- [8] R. Seager & A. Feresidis, “Communication Channels – Topic 3: Noise in Communication Systems”, Electrical and Electronic Engineering Department (Loughborough University)
- [9] G. Maral, “VSAT Networks” (Second edition), John Wiley & Sons, [2003]
- [10] Ray E. Sheriff and Y. Fun Hu, “Mobile Satellite Communication Networks” John Wiley & Sons, [2001]
- [11] <http://www.hellas-sat.net>

---

---

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

---

---

## ΘΕΩΡΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΙ Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΩΝ ΑΥΤΟ-ΟΜΟΙΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ (SELF-SIMILARITY)

### 4.1 Εισαγωγικά στοιχεία δικτυακής κίνησης IP

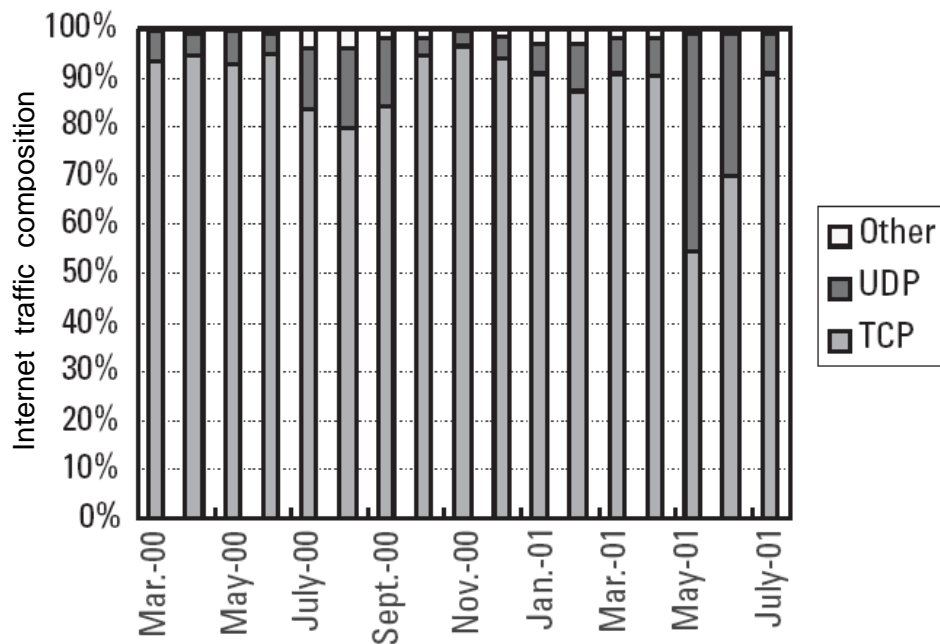
Η κίνηση που παράγεται από εφαρμογές που βασίζονται στο πρωτόκολλο του Διαδικτύου (Internet Protocol, IP) εμφανίζει πολλές βασικές διαφορές σε σχέση με την κλασική τηλεφωνική κίνηση. Για το λόγο αυτό, κατά τη σχεδίαση ενός δορυφορικού δικτύου IP, είναι απαραίτητος ο χαρακτηρισμός και η μαθηματική περιγραφή της κίνησης. Το πρώτο βήμα προς την ανάλυση και τη σχεδίαση ασύρματων δικτύων IP είναι η πλήρης περιγραφή της κίνησης και οι απαιτήσεις των εφαρμογών που θα υλοποιούνται σε αυτό. Στο Διαδίκτυο συναντώνται συχνά ετερογενείς υπηρεσίες με διαφορετικές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης (bandwidth) και Ποιότητα Υπηρεσιών (Quality of Service, QoS). Κάποιες υπηρεσίες, όπως οι υπηρεσίες φωνής και τηλεδιάσκεψης, έχουν υψηλές απαιτήσεις σε επικοινωνίες πραγματικού χρόνου (real-time), ενώ κάποιες άλλες, όπως η μεταφορά δεδομένων, δεν έχουν τόσο υψηλές προδιαγραφές.

Η κατανόηση της φύσης της κίνησης IP είναι σημαντική για την ορθή σχεδίαση και επεξεργασία των δικτύων υπολογιστών και διαδικτυακών υπηρεσιών όπως το World Wide Web (www), το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο (e-mail), το πρωτόκολλο μεταφοράς αρχείων (File Transfer Protocol, FTP), η τηλεφωνία μέσω Διαδικτύου (Voice over IP, VoIP) και άλλες εφαρμογές. Σε σύγκριση με τα παραδοσιακά δίκτυα, η κίνηση IP έχει δύο μεγάλες διαφορές

1. Η εκχώρηση πόρων γίνεται δυναμικά και δεν υπάρχει αποκλειστική υποστήριξη για την εκχώρηση συγκεκριμένου όγκου δικτυακών πόρων.
2. Πρόσφατες έρευνες που έχουν γίνει σε τοπικά δίκτυα LAN και ευρυζωνικά δίκτυα οδήγησαν σε αμφισβήτηση των καθιερωμένων μοντέλων κίνησης, όπως είναι το ευρέως διαδεδομένο μοντέλο κίνησης Poisson. Υποθέτοντας ότι η διαδικασία άφιξης της κίνησης ακολουθεί είτε το μοντέλο Poisson ή το μοντέλο Markov για τη διαδικασία άφιξης, αρχικά αυτή εμφανίζει εκρηκτικά χαρακτηριστικά (ξαφνικές και έντονες αυξομειώσεις της έντασης της κίνησης). Το μέγεθος των εκρήξεων αυτών τείνει να εξομαλυνθεί, καθώς αυξάνει το χρονικό διάστημα παρατήρησης. Αυτό

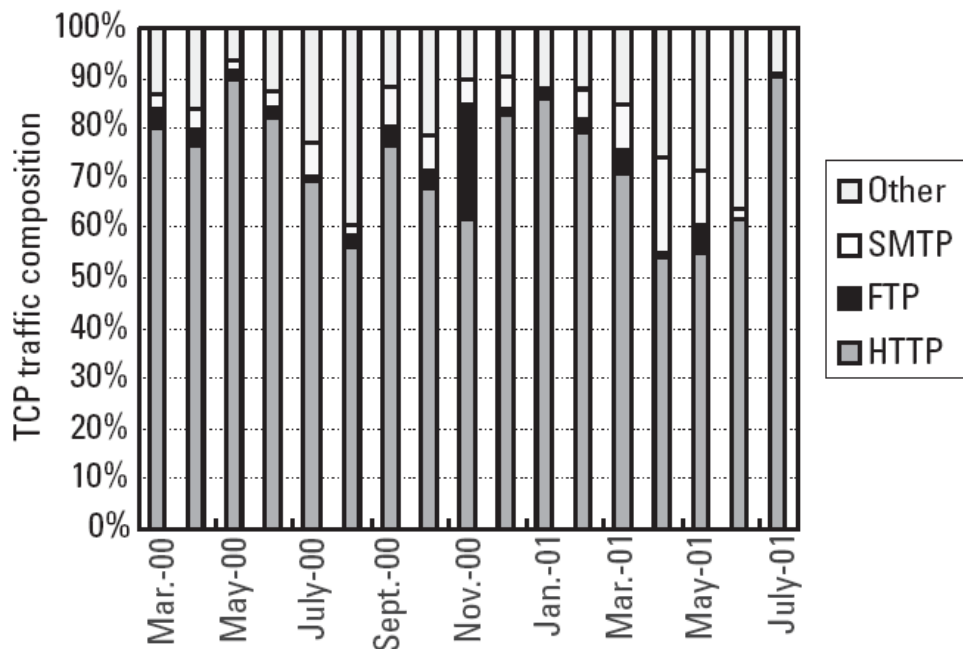
δεν ισχύει στην περίπτωση της διαδικτυακής κίνησης, καθώς είναι απρόβλεπτη και οι εκρήξεις που παρατηρούνται παραμένουν τυχαίες σε οποιαδήποτε χρονική κλίμακα και αν εξεταστεί.

Για να διαπιστωθεί η φύση της κίνησης του Διαδικτύου, απαραίτητη είναι η διάκριση σε κατηγορίες ανάλογα με το πρωτόκολλο μεταφοράς (TCP και UDP) ή με βάση την εφαρμογή που εξυπηρετείται (Δικτυακός Ιστός, telnet, FTP ή email). Κάθε ένα από αυτά τα είδη κίνησης αποτελείται από πολλές πεπλεγμένες ροές μέσω διαφορετικών ζεύξεων. Ένας μοναδικός χρήστης μπορεί για λόγους επιτάχυνσης της ροής πληροφορίας να μεταδίδει ταυτόχρονα σε παράλληλες ροές. Στα Σχήματα 4.1 και 4.2 που ακολουθούν παρουσιάζεται μια ανάλυση της σύνθεσης της κίνησης IP ως προς τις δύο κατηγορίες που αναφέρθηκαν προηγουμένως (με βάση το πρωτόκολλο ή την εφαρμογή).



Σχήμα 4.1 Ανάλυση κίνησης Internet σε επίπεδο πρωτοκόλλου





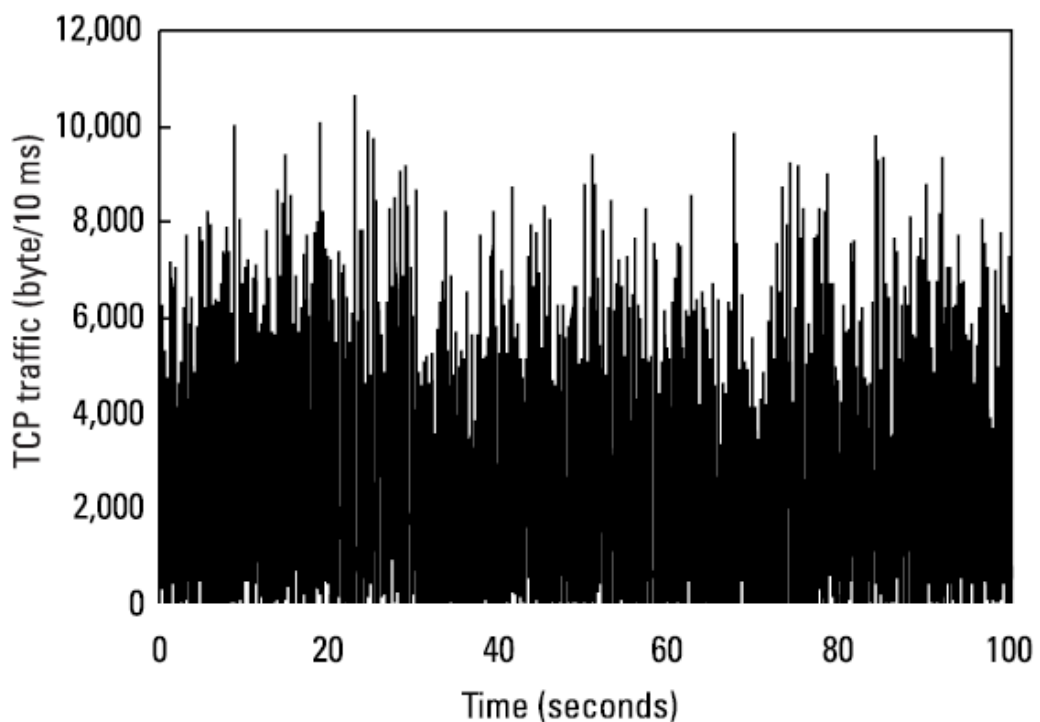
Σχήμα 4.2 Ανάλυση κίνησης TCP σε επίπεδο εφαρμογών

Η σύνθεση της κίνησης IP δείχνει την ετερογενή φύση του Διαδικτύου, λαμβάνοντας υπόψη τους διαφορετικούς τύπους υπηρεσιών και εφαρμογών. Το αποτέλεσμα δείχνει ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών με ποικίλα χαρακτηριστικά και διαφορετική ζήτηση σε δικτυακούς πόρους. Για να εξασφαλισθεί η ακριβής σχεδίαση του δικτύου όταν υπάρχει ασύρματη σύνδεση με το Internet, είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη, αφενός, η σημερινή και, αφετέρου, η μελλοντική κίνηση Διαδικτύου. Στην τηλεφωνία IP απαιτείται επικοινωνία πραγματικού χρόνου και για το λόγο αυτό διαθέτει συνήθως υψηλότερη προτεραιότητα σε σχέση με τις εφαρμογές IP μη πραγματικού χρόνου. Από την άλλη πλευρά, εφαρμογές όπως το WWW και το e-mail, δεν έχουν τόσο υψηλές απαιτήσεις σε QoS καθώς τα πακέτα δεδομένων μπορούν να αναμεταδοθούν σε περίπτωση απώλειας κάποιου. Τέλος, σημαντικές απαιτήσεις QoS έχουν και εφαρμογές όπως η διανομή ήχου και βίντεο.

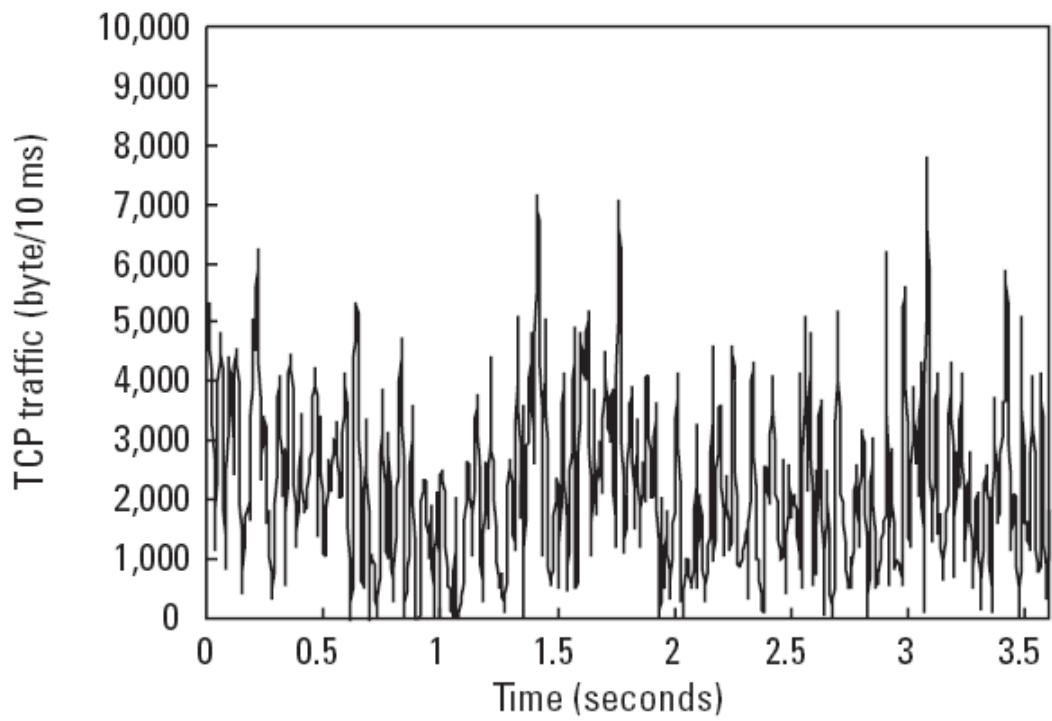
Σε σύγκριση με την τηλεφωνική κίνηση, η κίνηση δεδομένων και πολυμέσων (multimedia) χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη εκρηκτικότητα και, συνεπώς, μικρότερη δυνατότητα πρόβλεψης. Η κίνηση που είναι εκρηκτική σε πολλές ή όλες τις χρονικές κλίμακες μπορεί να περιγραφεί στατιστικά μέσω της έννοιας της αυτο-ομοιότητας (Self-Similarity, SS). SS είναι η ιδιότητα μέσω της οποίας συνδέονται τα fractals, δηλαδή οι μαθηματικές οντότητες των οποίων η εμφάνιση και η δομή παραμένουν αναλλοίωτα, ανεξάρτητα από την κλίμακα μεγέθους στην οποία τα παρατηρούμε. Στην περίπτωση στοχαστικών οντοτήτων όπως οι χρονοσειρές, η SS χρησιμοποιείται στην κατανομημένη του έννοια: όταν το αντικείμενο παρατηρείται σε διάφορες χρονικές κλίμακες, η δομή αυτοσυσχέτισης του

(autocorrelation) του παραμένει ίδια. Όπως προαναφέρθηκε, η κίνηση διαδικτύου χαρακτηρίζεται από εκρηκτικότητα (burstiness) και ομοιότητα στη δομή του σε οποιαδήποτε χρονική κλίμακα και αν εξεταστεί. Αυτό φαίνεται και στα Σχήματα 4.3 και 4.4, όπου παρατηρείται η ομοιότητα του δείγματος όταν αυτό εξετάζεται σε κλίμακα 100 δευτερολέπτων και 3.5 δευτερολέπτων. Έτσι, λόγω των ανωτέρω χαρακτηριστικών της δικτυακής κίνησης, πολλοί ερευνητές χρησιμοποιούν διαδικασίες SS κατά τη μοντελοποίηση δικτύων μεταγωγής πακέτου. Τα δίκτυα μεταγωγής πακέτου είναι ο πλέον συνήθης τύπος δικτύων υπολογιστών, όπου τα δεδομένα χωρίζονται σε «πακέτα» συγκεκριμένου πλήθους bytes και έπειτα αποστέλλονται στο πολύπλοκο δίκτυο.

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται κάποια δείγματα κίνησης IP για διαφορετικές χρονικές κλίμακες.



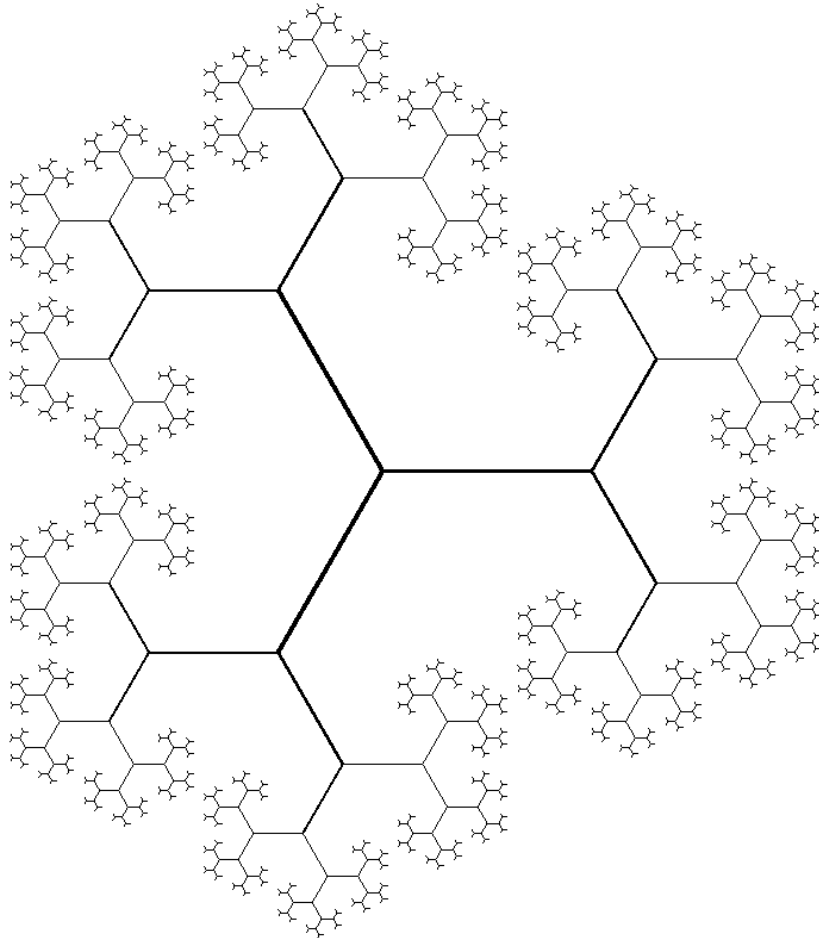
Σχήμα 4.3 Κίνηση TCP σε χρονική κλίμακα 100 δευτερολέπτων.



Σχήμα 4.4 Κίνηση TCP σε χρονική κλίμακα 3.5 δευτερολέπτων.

## 4.2 Ορισμός του self-similarity

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η *SS* είναι η μαθηματική ιδιότητα που έχουν ορισμένες οντότητες (*fractals*) τα οποία εμφανίζουν την ίδια δομή, σε οποιαδήποτε κλίμακα και αν τα εξετάσουμε. Στο Σχήμα 4.5 βλέπουμε ένα τέτοιο παράδειγμα.



Σχήμα 4.5 Απεικόνιση ενός απλού fractal

### 4.2.1 Μαθηματικός ορισμός

Στο εδάφιο αυτό παρατίθενται οι μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν ακριβώς τη έννοια *SS*.

Έστω  $X$ , μια στάσιμη υπό την ευρεία έννοια ακολουθία διακριτού χρόνου.

$$X = (X_t; \quad t = 0,1,2,3\dots) \quad (4.1)$$

Η μέση τιμή, διακύμανση και αυτοσυσχέτιση δίδονται από τις ακόλουθες εκφράσεις

$$\text{Μέση τιμή: } \mu = E\{X_t\} \quad (4.2)$$

$$\text{Διακύμανση: } \sigma^2 = E\{(X_t - \mu)^2\} \quad (4.3)$$

$$\text{Αυτοσυσχέτιση: } r(k) = \frac{E\{(X_t - \mu)(X_{t+k} - \mu)\}}{\sigma^2} \quad (4.4)$$

$$X_i^{(m)} = \frac{1}{m} \cdot \{X_{im-m+1} + \dots + X_{im}\} \quad m = 1, 2, \dots \quad (4.5)$$

$$X^{(m)} = \{X_i^{(m)}; i = 1, 2, 3, \dots\}, \quad (4.6)$$

όπου  $m$  είναι το μέγεθος του δείγματος (level of aggregation).

Σύμφωνα με τα ανωτέρω, η ακολουθία  $X$  είναι αυστηρά SS όταν

$$X^{(m)} = m^{1-H} \cdot X^{(m)}, \quad \forall m \quad (4.7)$$

όπου  $0.5 \leq H \leq 1$  η παράμετρος Hurst της ιδιότητας SS.

$$\text{var}(X^{(m)}) = \frac{\text{var}(X)}{m^B} \quad (4.8)$$

Από την (4.8) φαίνεται ότι η διακύμανση μειώνεται με κλίση μικρότερη από  $\frac{1}{m}$ .

$$\text{var}(X^{(m)}) \sim b \cdot m^{-B} \quad m \rightarrow \infty \quad (4.9)$$

$$B = 2(1 - H) \quad (4.10)$$

$$\text{Όσον αφορά την αυτοσυσχέτιση, } r^{(m)} = r(k) \quad (4.11)$$

$$\text{Με } r^{(m)} = E\{X_i^{(m)} \cdot X_{i+k}^{(m)}\} \quad (4.12)$$

$$r(k) \sim a \cdot k^{-B}, \quad a > 0 \quad (4.13)$$

Μια SS διαδικασία εμφανίζει εξάρτηση μεγάλης κλίμακας (Long-Range Dependence), γεγονός που σημαίνει ότι:

- Η αυτοσυσχέτιση εμφανίζει αργή εξασθένηση της μορφής που φαίνεται στη Σχέση 4.13
- Η μορφή της καμπύλης της απόσβεσης είναι υπερβολή

- Εμφανίζει μεγάλο συντελεστή διακύμανσης  $CV = \frac{std}{mean}$ ,

όπου  $std$  είναι η τυπική απόκλιση και  $mean$  η μέση τιμή της χρονοσειράς.

Μια ακόμα ιδιότητα των χρονοσειρών που είναι self-similar είναι ότι είναι κατανομές βαριάς ουράς (Heavy Tailed), δηλαδή ακραίες τιμές έχουν παρασύρει τις μέσες τιμές τους αλλά και την ίδια την κατανομή.

#### 4.2.2 Μέθοδοι εκτίμησης παραμέτρου $H$

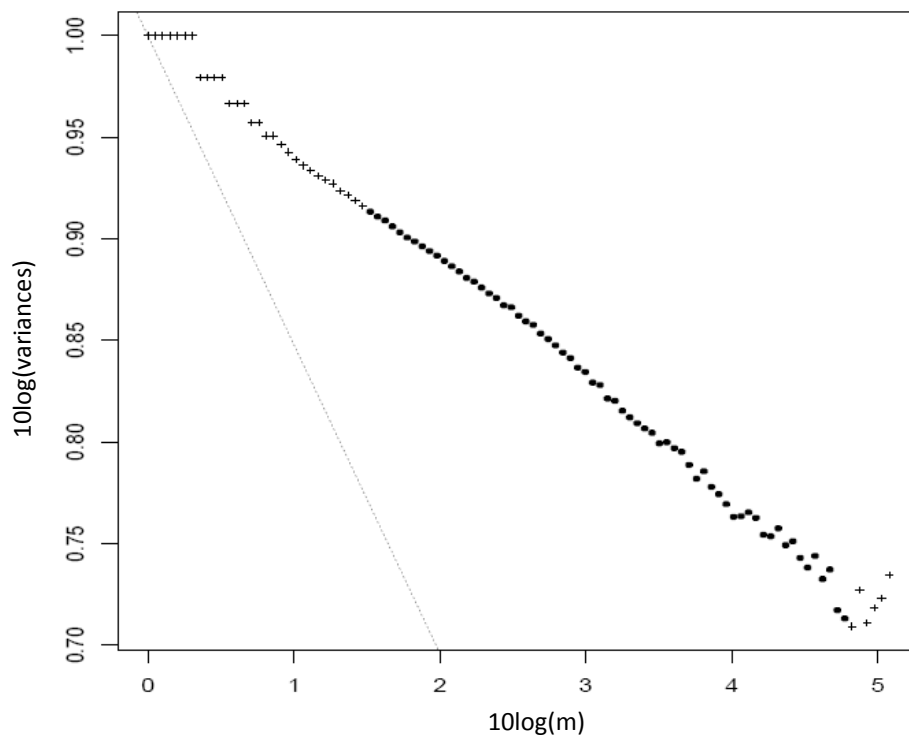
Υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι για τον έλεγχο κατά πόσο μια στάτική διαδικασία  $X$  είναι SS. Με τις ίδιες μεθόδους είναι δυνατός και ο προσδιορισμός της παραμέτρου  $H$ :

- Το διάγραμμα της διακύμανσης ως προς το χρόνο (variance time plot),
- Το διάγραμμα Στατιστικής Αλλαγής Κλίμακας (Rescaled Range Statistics R/S plot)
- και το περιοδογράφημα (periodogram).

##### 1. Το διάγραμμα της διακύμανσης ως προς το χρόνο

Πρόκειται για τη γραφική παράσταση  $\text{var}(X^{(m)})$  ως προς  $m$  σε λογαριθμική κλίμακα (log-log plot). Αφού σχεδιασθεί το συγκεκριμένο διάγραμμα, υπολογίζεται με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, η κατάλληλη ευθεία που διέρχεται από τα σημεία, αγνοώντας τις πολύ μικρές τιμές του  $m$ . Όταν η εκτιμήτρια  $\hat{\beta}$  της ασυμπτωτικής κλίσης λαμβάνει τιμές από το -1 μέχρι το 0, συνεπάγεται ότι είναι SS. Μια εκτίμηση του βαθμού SS δίνεται από τη σχέση

$$\hat{H} = 1 - \beta / 2 \quad (4.14)$$



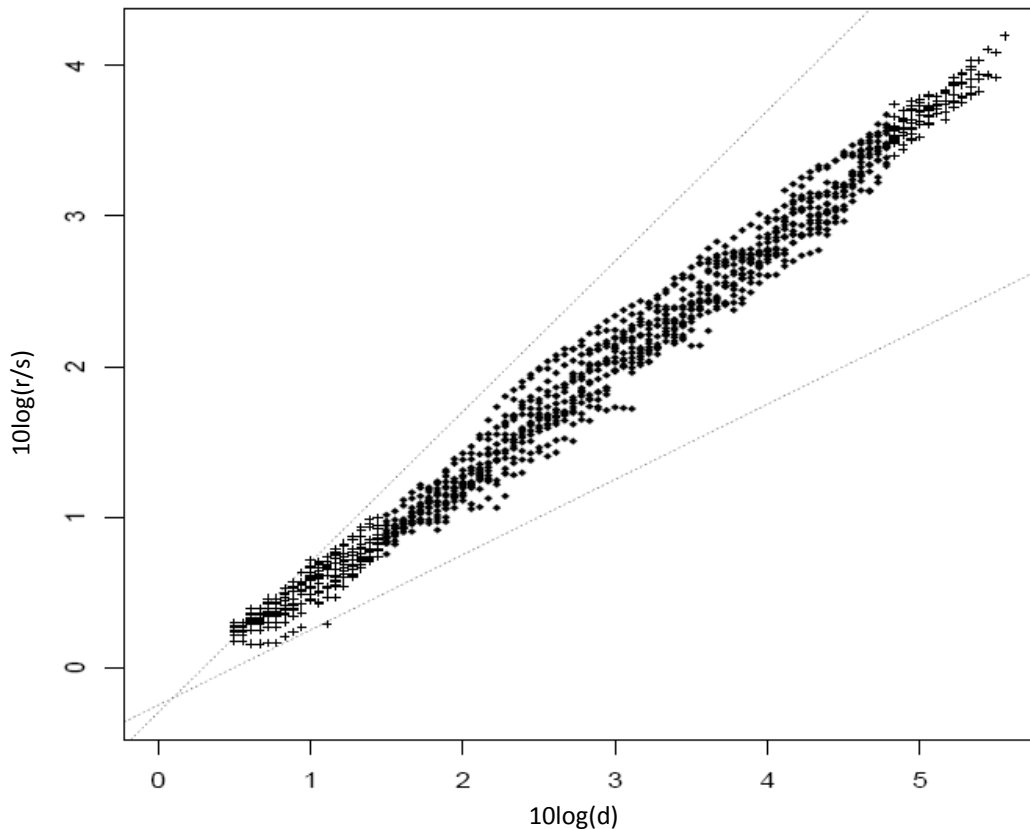
Σχήμα 4.6 Γραφική παράσταση διακύμανσης-χρόνου. Η ευθεία που μπορεί να προσαρμοστεί στη γραφική παράσταση (μεγάλες μαύρες τελείες) είναι εμφανώς μεγαλύτερη από την ευθεία αναφοράς, που έχει κλίση  $-1$ , πράγμα που σημαίνει ότι το δείγμα έχει ιδιότητες self-similarity.

Είναι προφανές ότι οι γραφικές παραστάσεις διακύμανσης-χρόνου δεν είναι τόσο αξιόπιστες σε σχέση με τις άλλες μεθόδους που περιγράφονται παρακάτω για εμπειρικά στοιχεία με μικρό μέγεθος δείγματος. Παρόλα αυτά, οι γραφικές αυτές παραστάσεις είναι πολύ χρήσιμες για να βρεθούν ενδείξεις ως προς την ύπαρξη της ιδιότητας SS.

## 2. Ανάλυση R/S

Ο στόχος της ανάλυσης R/S εμπειρικών στοιχείων είναι να προσδιοριστεί ο βαθμός ύπαρξης της ιδιότητας SS, δηλαδή να πραγματοποιηθεί μια εκτίμηση της παραμέτρου Hurst. Στην πράξη, η ανάλυση R/S βασίζεται σε μια διερευνητική γραφική προσέγγιση που εκμεταλλεύεται πλήρως όλες τις πληροφορίες που αντλούνται από ένα δείγμα. Για δεδομένο δείγμα  $N$  παρατηρήσεων, το δείγμα υποδιαιρείται σε  $K$  μη επικαλυπτόμενα τμήματα και υπολογίζεται η νέα κλίμακα R/S για κάθε ένα από νέα σημεία έναρξης  $t_1 = 1$ ,  $t_2 = N/K + 1$ ,  $t_3 = 2N/K + 1$ , ..., που ικανοποιούν τον περιορισμό  $(t_i - 1) + n \leq N$ . Αν η σχετική παράμετρος  $H$  είναι καλά ορισμένη, ένα τυπικό γράφημα R/S θα ξεκινάει με μία μεταβατική ζώνη που θα αναπαριστά τη βραχυπρόθεσμη

εξάρτηση του δείγματος. Στη συνέχεια, θα συνεχίζει ως μια σχεδόν ευθύγραμμη περιοχή συγκεκριμένης κλίσης. Η γραφική R/S ανάλυση χρησιμοποιείται για να καθορίσει αν μια τέτοια ασυμπτωτική συμπεριφορά υποστηρίζεται από τα δεδομένα. Μια εκτίμηση της παραμέτρου  $H$  μπορεί να βρεθεί βάση της ασυμπτωτικής κλίσης της ευθείας που βρίσκεται μέσω της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων. Η κλίση αυτή μπορεί να πάρει τιμές από  $1/2$  και  $1$ .



Σχήμα 4.7 Γραφική παράσταση R/S για επιλεγμένο δείγμα. Οι ευθείες αναφοράς έχουν κλίσεις  $1/2$  και  $1$  και το γεγονός ότι τα δεδομένα είναι κατανομημένα ανάμεσα στις ευθείες αναφοράς αποδεικνύει την ιδιότητα self-similarity.

Όσον αφορά την αποτελεσματικότητα της ανάλυσης R/S, είναι παρόμοια με την γραφική μέθοδο διακύμανσης-χρόνου. Το ελκυστικό της χαρακτηριστικό είναι η σχετική ανθεκτικότητά της σε αλλαγές της οριακής κατανομής. Το χαρακτηριστικό αυτό επιτρέπει να γίνονται ξεχωριστές έρευνες για την ιδιότητα του SS ενός δεδομένου εμπειρικού δείγματος και των χαρακτηριστικών κατανομής. Αμφότερα αποτελούν ιδιαιτέρως χρήσιμα εργαλεία για να αναγνωρίζουμε την ιδιότητα SS. Εντούτοις, οι μέθοδοι αυτές δεν είναι τόσο αποτελεσματικές όταν τα δείγματα εμφανίζουν ιδιαιτερότητες, όπως υπερβολικά μικρό ή μεγάλο μέγεθος.



### 3. Περιοδογράφημα (Periodogram):

Το περιοδογράφημα (βλ. Σχήμα 4.8) αποτελεί μια εκτίμηση της πραγματικής φασματικής πυκνότητας ενός σήματος. Πρόκειται για την απεικόνιση του ολοκληρώματος ενός σήματος σε διάστημα μιας χρονικής περιόδου του.

Στις διαδικασίες SS, η φασματική πυκνότητα ισχύος του σήματος υπακούει στην επόμενη σχέση

$$S(\omega) = L(1/\omega)\omega^{1-2H} \quad (4.15)$$

όπου  $S(\omega)$  η φασματική πυκνότητα ισχύος,  $\omega$  η κυκλική συχνότητα,  $H$  παράμετρος Hurst και  $L(\dots)$  μια αργά μεταβαλλόμενη συνάρτηση η οποία ικανοποιεί τη σχέση

$$\lim_{k \rightarrow \infty} L(kx)/L(k) = 1 \quad \forall x > 0 \quad (4.16)$$

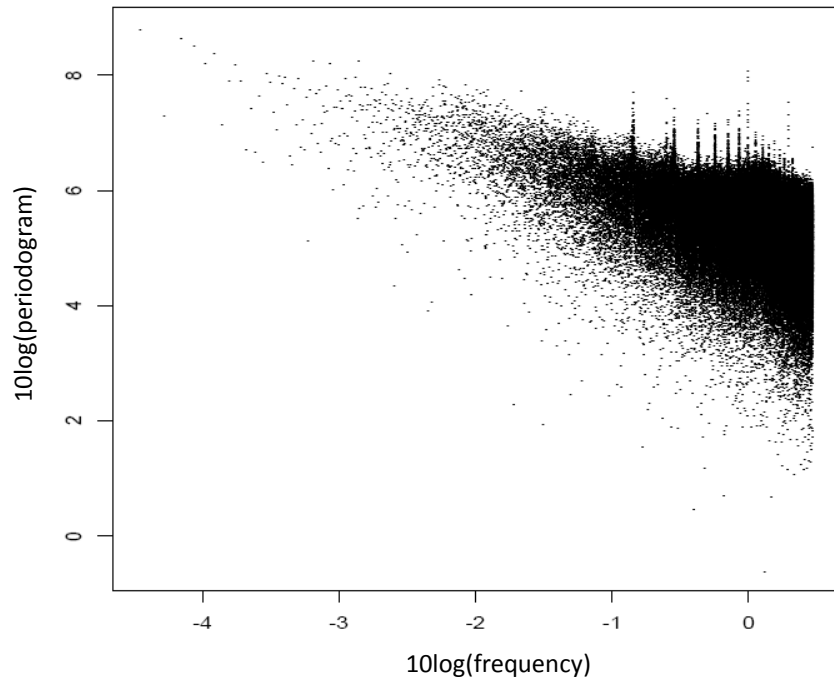
Έτσι, προκύπτει η σχέση

$$\log[S(\omega)] \approx \log[L(1/\omega)] + (1 - 2H) \cdot \log(\omega) \quad (4.17)$$

Σχεδιάζοντας το γράφημα της (4.17) σε log-log άξονες (βλ. Σχήμα 4.8) και υπολογίζοντας την κλίση της γραφικής αυτής παράστασης μπορεί να υπολογιστεί η παράμετρος  $H$  με μεγαλύτερη ακρίβεια από τις άλλες μεθόδους.

Τέλος, υπάρχει μια πλέον πολύπλοκη μέθοδος εκτίμησης της παραμέτρου  $H$ , η μέθοδος εκτίμησης Whittle, με την οποία αυξάνεται η ακρίβεια εκτίμησης της παραμέτρου Hurst. Για δεδομένες χρονοσειρές, θεωρούνται οι αντίστοιχες αθροιστικές διαδικασίες  $X^{(m)}$ , με  $m = 100, 200, 300, \dots$ , όπου η μέγιστη τιμή  $m$  έχει επιλεγεί έτσι ώστε το μέγεθος του δείγματος  $X^{(m)}$  να είναι μεγαλύτερο από περίπου 100. Για κάθε μία από τις αθροιστικές χρονοσειρές εκτιμάται η παράμετρος Hurst μέσω μιας διακριτής εκδοχής της γραφικής παράστασης R/S (αν αντικαταθεί το ολοκλήρωμα από ένα άθροισμα Riemann). Η διαδικασία αυτή δίνει εκτιμήσεις της παραμέτρου  $H$  με αρκετά μεγάλη ακρίβεια.

Στο εδάφιο αυτό έγινε συνοπτική περιγραφή των βασικότερων μεθόδων εκτίμησης της παραμέτρου  $H$ . Είναι ιδιαίτερος σημαντικό να υπολογιστεί η παράμετρος Hurst, καθώς είναι ο βασικότερος τρόπος να προσδιοριστεί η ιδιότητα SS σε μια διαδικασία. Έχουν γίνει πολλές έρευνες (E. Crovella and A. Bestavros κ.α.) για να αποδειχθεί η SS φύση της δικτυακής κίνησης. Οι έρευνες αυτές, μέσα από στατιστικές αναλύσεις πραγματικών δεδομένων κίνησης για το διαδίκτυο, αποδεικνύουν ότι η κίνηση IP εμφανίζει ιδιότητες SS διαδικασιών, χρησιμοποιώντας τις προαναφερθείσες μεθόδους εκτίμησης της παραμέτρου του self-similarity,  $H$ .



Σχήμα 4.8 Περιοδογράφημα. Η κλίση του τμήματος χαμηλής συχνότητας της γραφικής παράστασης είναι προφανώς διαφορετικό από το 0. Χρησιμοποιώντας το χαμηλότερο 10% από όλες τις συχνότητες, έχουμε μία εκτίμηση της παραμέτρου  $H$ .

### 4.3 Κατανομή Pareto και ON/OFF κατανομές

Όπως έχει προαναφερθεί, ένα δείγμα  $SS$  εμφανίζει εξάρτηση μεγάλης κλίμακας. Επιπλέον, η κίνηση IP αποτελεί μια κατανομή με βαριά ουρά (heavy-tailed). Γι' αυτό αρχικά θα οριστούν οι δυο αυτές ιδιότητες και θα περιγραφεί το πώς θα ληφθούν υπόψη κατά την ερευνητική διαδικασία.

#### 4.3.1 Κατανομές με βαριά ουρά (Heavy-Tailed):

Μια στάσιμη με την ευρεία έννοια ακολουθία τιμών  $X$  είναι βαριάς ουράς όταν

- $Var(X) = \infty$  (4.18)

- $P(X > x) \propto c \cdot x^{-a}$ , όταν  $x \rightarrow \infty$ , με  $0 < a < 2$  και  $c > 0$  (4.19)

Η απλούστερη μορφή κατανομής βαριάς ουράς είναι η Pareto (Σχήμα 4.9). Η κατανομή Pareto έχει υπερβολικό σχήμα σε όλο της το εύρος της και συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$f(x) = a \cdot k^a \cdot x^{-a-1}, \quad a, k > 0, \quad x \geq k \quad (4.20)$$

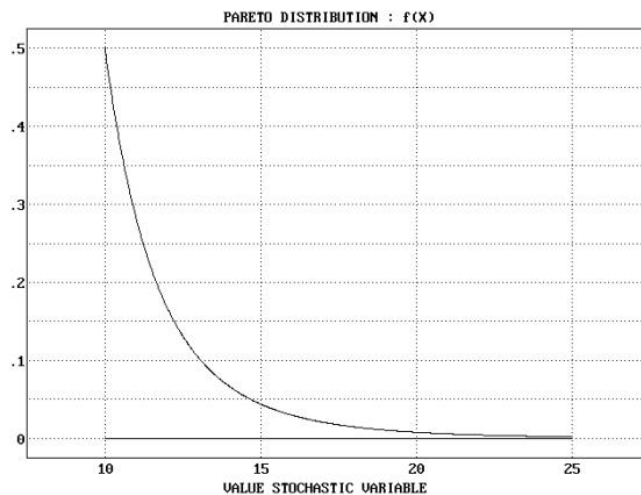
Για την αθροιστική κατανομή πυκνότητας πιθανότητας ισχύει:

$$F(x) = \begin{cases} 0, & \forall x \leq k \\ P[X \leq x] = 1 - \left(\frac{k}{x}\right)^a, & \forall x > k, \quad a > 0 \end{cases} \quad (4.21)$$

Η παράμετρος  $k$  αντιπροσωπεύει τη μικρότερη δυνατή τιμή της τυχαίας μεταβλητής.

Για τη μέση τιμή της κατανομής ισχύει:  $E[x] = \frac{a}{a-1}k, \quad a > 1$  (4.22)

Και  $H = \frac{3-a}{2}$  για την παράμετρο Hurst (4.23)



Σχήμα 4.9 Κατανομή Pareto

Οι κατανομές βαριάς ουράς έχουν και άλλες ιδιότητες που είναι ποιοτικά διαφορετικές από άλλες κοινές κατανομές κατά την περιγραφή της τηλεπικοινωνιακής κίνησης όπως η εκθετική, η κανονική και η Poisson.

- Αν  $a \leq 2$ , τότε η κατανομή έχει άπειρη διακύμανση
- Αν  $a \leq 1$ , τότε η μέση τιμή της κατανομής απειρίζεται
- Καθώς το  $a^4$  αυξάνεται, το μεγαλύτερο τμήμα της μάζας της κατανομής εμφανίζεται στην ουρά της.

<sup>4</sup> Στην περίπτωση κίνησης IP, η τιμή της παραμέτρου  $a=1.2$  είναι καλή για όλες τις χρονικές κλίμακες στις οποίες εξετάζεται το δείγμα.

Για την αξιολόγηση της παρουσίας των ουρών υψηλής τιμής στα δεδομένα, πρέπει να χρησιμοποιηθούν λογαριθμικά διαγράμματα συμπληρωματικής κατανομής (log-log complementary distribution, LLCD plots).

Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να γίνει η γραφική παράσταση της συμπληρωματικής αθροιστικής κατανομής  $\bar{F}(x) = 1 - F(x) = P[X > x] = \left(\frac{k}{x}\right)^a$  σε άξονες log-log. Με βάση αυτές τις γραφικές παραστάσεις, οι κατανομές βαριάς ουράς διακρίνονται από την πρόσθετη ιδιότητα

$$\frac{d \log \bar{F}(x)}{d \log x} = -a, \quad x > \theta \text{ για κάποιο } \theta \quad (4.24)$$

Στην πράξη, για να ελέγξουμε για την ύπαρξη των βαρέων ουρών, κατασκευάζουμε το γράφημα LLCD, στο οποίο αναζητούμε συμπτωτικά γραμμική συμπεριφορά σε αρκετά μεγάλη κλίμακα στην ουρά της κατανομής.

### 4.3.2 Εξάρτηση μεγάλης κλίμακας (Long-Range Dependence)

Μια κατανομή εμφανίζει μακροπρόθεσμη εξάρτηση όταν

$$\int_0^{\infty} c(\tau) d\tau = \infty \quad (4.25)$$

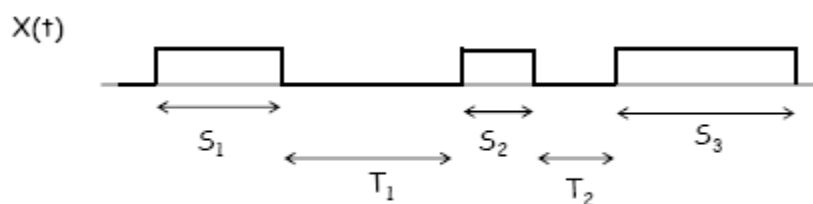
όπου  $c(\tau)$  η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του δείγματος

Η κατανομή ON/OFF (Σχήμα 4.10) είναι από τις απλούστερες κατανομές που εμφανίζουν μακροπρόθεσμη (long-range) εξάρτηση. Στην περίπτωση της κίνησης δικτύου θα αποτελείται από:

- Τις περιόδους ON που αντιπροσωπεύουν τις διάρκειες αυτόνομων αρχείων του Διαδικτύου ( $S_i$ ), με παράμετρο  $a_1$ .
- Τις περιόδους OFF που αντιπροσωπεύουν τα χρονικά διαστήματα μεταξύ μεταδόσεων ( $T_i$ ), με παράμετρο  $a_2$ .

Για την κατανομή ON/OFF ισχύει για την παράμετρο Hurst

$$H = (3 - \min(a_1, a_2)) / 2 \quad (4.26)$$



Σχήμα 4.10 ON/OFF πηγή

Η κίνηση SS συνδέεται με μια ποικιλία συμπεριφορών πηγών ON/OFF κατανομής. Δείγματα που εμφανίζουν μακροπρόθεσμη εξάρτηση μπορούν να παραχθούν με τη βοήθεια πηγών που έχουν κατανομή βαριάς ουράς OFF. Μεμονωμένες πηγές αλλά και πηγές που έχουν δημιουργηθεί από το άθροισμα πολλών μεμονωμένων πηγών με κατανομή βαριάς ουράς OFF και με κατανομή ελαφράς ή βαριάς ουράς ON, συντελούν στην παραγωγή μακροπρόθεσμης εξάρτησης, όπως έχει αποδειχθεί. Ο απλούστερος τέτοιος συνδυασμός είναι ο συνδυασμός ON/OFF κατανομής με την κατανομή Pareto που περιγράφεται ανωτέρω. Στον Πίνακα 4.1 φαίνονται εκτιμώμενες τιμές της παραμέτρου Hurst (H) για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $\alpha$  της κατανομής Pareto.

Shape Value $\alpha$	Expected $H$ $H=(3-\alpha)/2$	Estimated $H$
1.95	0.525	0.65
1.65	0.675	0.74
1.35	0.825	0.84
1.05	0.975	0.90

Πίνακας 4.1 Εκτιμώμενες τιμές H για τις διάφορες τιμές  $\alpha$  των πηγών ON/OFF που ακολουθούν την κατανομή Pareto.

## 4.4 Βιβλιογραφία

- [1] W.E.Leland, M.S.Taqqu, W.Willinger, D.V.Wilson, “On the self-semilar nature of ethernet traffic”, [Μάρτιος 2003]
- [2] M.E.Crovella, “Self-similarity in World Wide Web Traffic: Evidence and Possible Causes”, [Δεκέμβριος 1997]
- [3] Z.Sahinoglou, S.Tekinay, “On Multimedia Networks: Self-Similar Traffic and Network Performance”, [Ιανουάριος 1999]
- [4] L.Guo, M.Crovella, I.Matta, “How does TCP generate Pseudo-Self-Similarity?”, IEEE, [2001]
- [5] Kai-Lung Hua, “On Generator of Network Arrivals with Self-Similar Nature”, Chiao Tung University, [Ιούνιος 2002]
- [6] Z.Sahinoglu, S.Tekinay, “Traffic Engineering for Multimedia Networks: Data Collection on the Internet, Extensions to Wireless”, [Ιούνιος 1999]
- [7] H.Yilmaz, “IP over DVB: Management of Self Similarity”, Ege University, [1999]
- [8] <http://www.ece.ucdavis.edu/~chuah/classes/EEC274/slides/L4-selfsimilar.pdf>

---

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

---

---

### ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ DVB-RCS ΚΑΙ ΤΟ ΣΧΗΜΑ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ MF-TDMA

Τα περισσότερα δορυφορικά συστήματα της Ka ζώνης είναι σχεδιασμένα να παρέχουν τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες χαμηλού κόστους σε εκατοντάδες χρήστες. Για να μεγιστοποιηθεί η χωρητικότητα του συστήματος, συχνότητες και χρονοσχισμές (timeslots) μπορούν να εκχωρούνται δυναμικά, ώστε να γίνει εκμετάλλευση της στατιστικής πολυπλεξίας των πηγών. Εύρος ζώνης καταπαίτηση (Bandwidth on Demand, BoD) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υποστηρίξει το μέγιστο αριθμό χρηστών. Από οικονομική άποψη, οι χρήστες μπορούν να χρεώνονται μόνο για τη χωρητικότητα δικτύου που χρησιμοποιούν. Έτσι, και για το πρόγραμμα ΔΟΡΥ είναι απαραίτητος ο προγραμματισμός για τη βέλτιστη χρησιμοποίηση της διαθέσιμης χωρητικότητας για κάθε κανάλι συχνότητας.

Η τεχνολογία που θα χρησιμοποιηθεί, πρέπει να επιτρέπει τη δυναμική ανάθεση δορυφορικής χωρητικότητας, βασιζόμενη στις επικοινωνιακές ανάγκες των χρηστών του δικτύου με εξασφαλισμένη Ποιότητα Υπηρεσιών (QoS). Όπως έχει προαναφερθεί, η τεχνολογική προσέγγιση για την υλοποίηση του δικτύου ΔΟΡΥ θα είναι αυτή της ανάπτυξης ευρυζωνικού δικτύου τεχνολογίας δορυφορικού IP βασιζόμενου στο πρότυπο DVB-RCS. Το σχήμα πολλαπλής προσπέλασης για το πρότυπο αυτό είναι η σταθερή ή δυναμική Πολλαπλή Προσπέλαση Διαίρεσης Χρόνου – Πολλαπλών Συχνοτήτων (MF-TDMA, Multi Frequency – Time Division Multiple Access).

#### 5.1 Δομή δικτύου DVB-RCS

Σε ένα δίκτυο DVB-RCS εγκαθίστανται δύο κανάλια μεταξύ του παρόχου και του χρήστη:

- Κανάλι Μετάδοσης (Broadcast Channel): Ένα κανάλι ευρείας εκπομπής και μετάδοσης ευρείας ζώνης, το οποίο περιλαμβάνει μετάδοση βίντεο, ήχου και δεδομένων, εγκαθίσταται από τον πάροχο προς τους χρήστες.

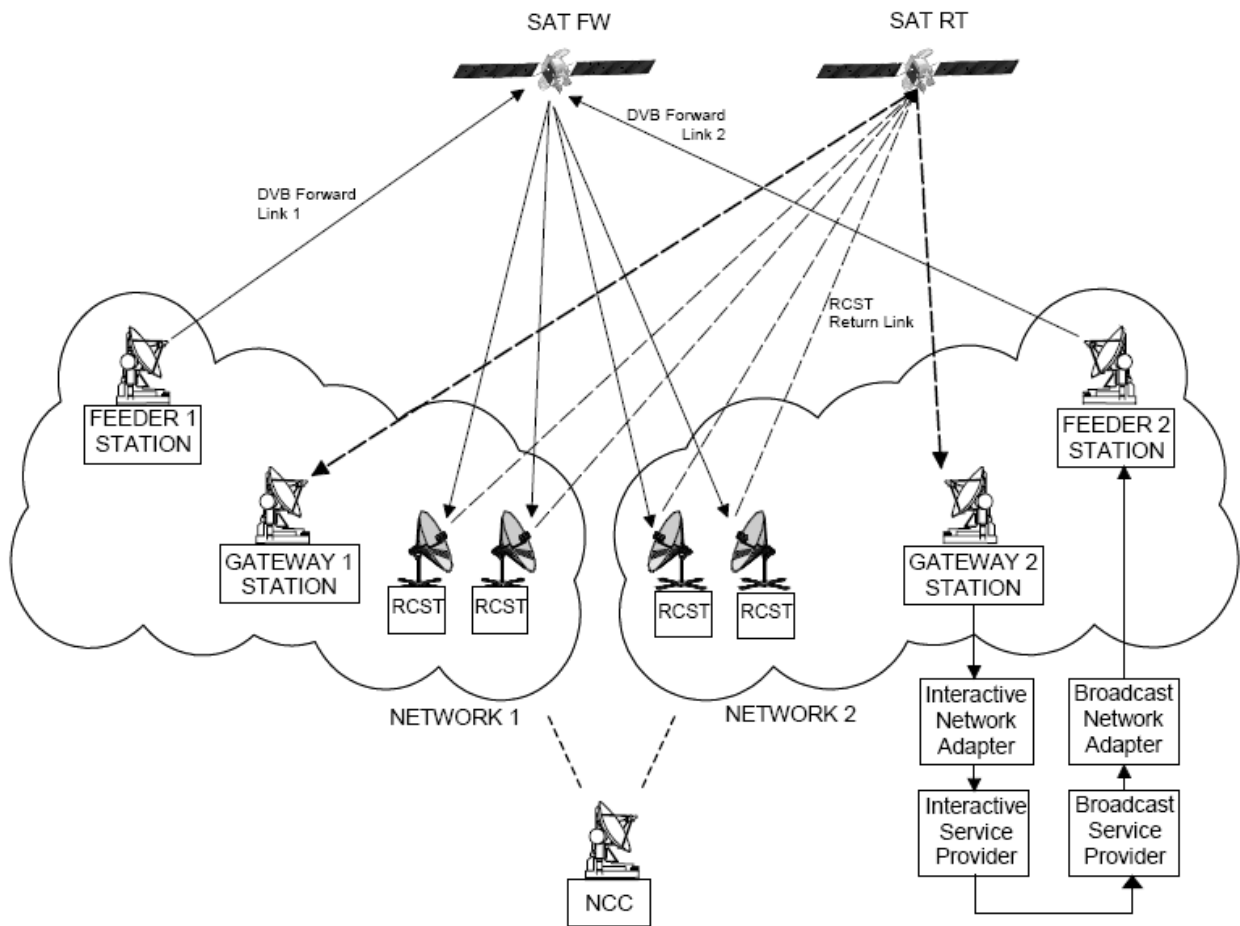
- Κανάλι αλληλεπίδρασης (Interaction Channel): ένα διπλοκατευθυντικό (bi-directional) κανάλι εγκαθίσταται μεταξύ του παρόχου/χρήστη και του χρήστη για επικοινωνιακούς σκοπούς, το οποίο αποτελείται από:
  - Κανάλι Επιστροφής (Return Channel), από το χρήστη προς τον πάροχο. Χρησιμοποιείται για τη μεταφορά αιτήσεων στον πάροχο/χρήστη, για την απάντηση ερωτήσεων και τη μεταφορά δεδομένων.
  - Ευθύ κανάλι (Forward Channel), από τον πάροχο προς το χρήστη. Χρησιμοποιείται για την παροχή πληροφοριών από τον πάροχο/χρήστη προς τους χρήστες και για κάθε άλλη απαιτούμενη για την υπηρεσία αλληλεπίδρασης επικοινωνία.

Τα δορυφορικό τερματικό καναλιού επιστροφής (RCST, Return Channel Satellite Terminal) παρέχει διασύνδεση για τα κανάλια μετάδοσης και αλληλεπίδρασης.

Το συνολικό Δορυφορικό Κανάλι Αλληλεπίδρασης, μέσα στο οποίο εγκαθίσταται ένας μεγάλος αριθμός RCSTs, αποτελείται από τα λειτουργικά τμήματα, που φαίνονται παρακάτω στο Σχήμα 5.1:

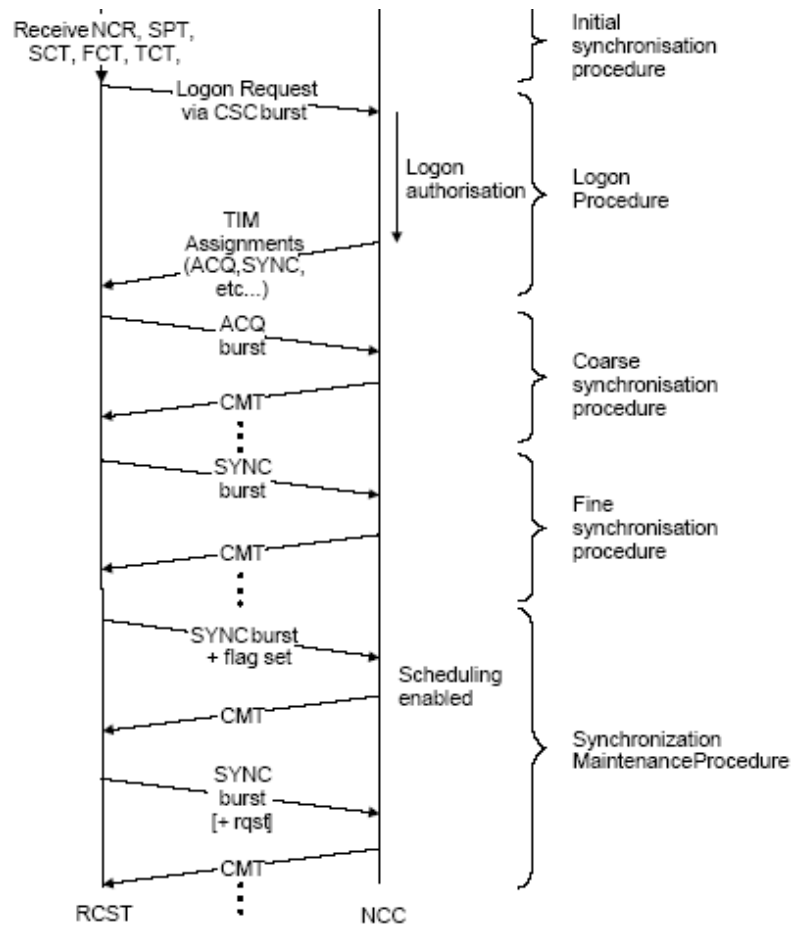
- (NCC, Network Control Centre): Το NCC παρέχει υπηρεσίες ελέγχου και παρακολούθησης. Παράγει σήματα ελέγχου και χρονισμού για τη λειτουργία του Δορυφορικού Καναλιού Αλληλεπίδρασης, ώστε να μεταδοθούν από κάποιον Σταθμό Τροφοδότησης (Feeder Station). Ένα παράδειγμα ανταλλαγής σημάτων φαίνεται στο Σχήμα 5.2.
- Πύλη Κίνησης (TG, Traffic Gateway): Ένα TG λαμβάνει τα σήματα επιστροφής των RCST, παρέχει λογιστικές λειτουργίες, υπηρεσίες αλληλεπίδρασης ή και συνδέσεις με το προς τα έξω περιβάλλον, αποκλειστικούς και ιδιωτικούς παρόχους (βάσεις δεδομένων, τηλεόραση κατ' απαίτηση ή πηγές video, κατέβασμα λογισμικού, ηλεκτρονικές αγορές, οικονομικές υπηρεσίες, πρόσβαση στην χρηματιστηριακή αγορά, παιχνίδια αλληλεπίδρασης κ.α.) και δίκτυα (Internet, ISDN, PSTN κ.α.).
- Τροφοδοτικό (Feeder): Το τροφοδοτικό μεταδίδει το σήμα της ευθείας ζεύξης, η οποία είναι μια κοινή προς τα πάνω ζεύξη δορυφορικής μετάδοσης τύπου DVB-S ή DVB-S2, επί της οποίας είναι πεπλεγμένα τα σήματα ελέγχου και χρονισμού που απαιτούνται για τη λειτουργία του Δορυφορικού Δικτύου Αλληλεπίδρασης καθώς και τα δεδομένα χρηστών.





Σχήμα 5.1 Ένα μοντέλο αναφοράς για το Δορυφορικό Δίκτυο Αλληλεπίδρασης

Στο Σχήμα 5.1 φαίνεται ένα μοντέλο δορυφορικού δικτύου DVB-RCS. Το κέντρο ελέγχου NCC (Network Control Centre) παρέχει υπηρεσίες ελέγχου και παρακολούθησης στα επίγεια δίκτυα (Network 1 και 2). Φαίνονται επίσης οι δυο τύποι ζεύξεων, η ευθεία (Forward Link) και ζεύξη επιστροφής (Return Link). Οι σταθμοί τροφοδοσίας (Feeder Stations) μεταδίδουν το σήμα της ευθείας ζεύξης προς το δορυφόρο, το οποίο λαμβάνουν τα δορυφορικά τερματικά κανάλια επιστροφής RCST. Οι σταθμοί Gateway λαμβάνουν τα σήματα επιστροφής των RCST, καθώς παρέχουν και άλλες υπηρεσίες στο δίκτυο.



Σχήμα 5.2 Παράδειγμα ροής σηματοδοσίας κατά την είσοδο του τερματικού στο σύστημα

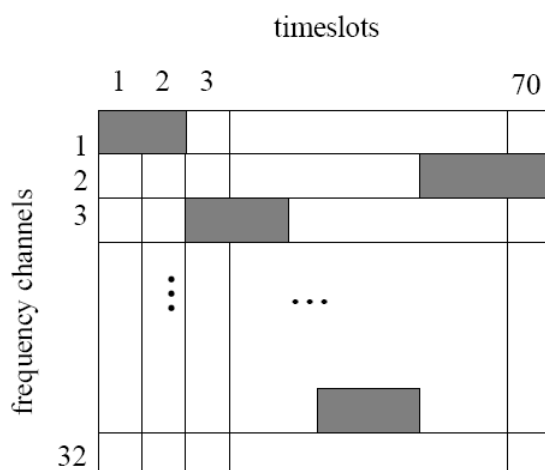
Οι απαιτήσεις του προτύπου DVB-RCS φαίνονται παρακάτω:

- Σχήμα Πολλαπλής Προσπέλασης: MF-TDMA
- Ρυθμός συμβόλων: 125ksym/sec - 4Msym/sec
- Εύρος Αναπήδης Συχνότητας (Frequency Hopping Range)  $\pm 10\text{MHz}$  περί την κεντρική συχνότητα (Center frequency)
- Διαμόρφωση: QPSK
- Κωδικοποίηση Καναλιού: Κωδικοποίηση πηγής(ON/OFF)
  - Κωδικοποίηση Reed Solomon
  - Κωδικοποίηση Αυτοσυσχέτισης
  - Κωδικοποίηση Turbo coding
- Ρυθμός Κωδικοποίησης: 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8
- Μέγεθος Εκρήξεων Κίνησης (Traffic Burst): κελί ATM (1,2,4)

## 5.2 Πολλαπλή Προσπέλαση στο DVB-RCS

Η Πολλαπλή Προσπέλαση Διαίρεσης Χρόνου – Πολλαπλών Συχνοτήτων (MF-TDMA) είναι μια υβριδική λύση που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των τεχνικών πολλαπλής προσπέλασης με διαίρεση συχνοτήτων (FDMA) και με διαίρεση χρόνου (TDMA), και για το λόγο αυτό προτιμάται από τα σύγχρονα δορυφορικά συστήματα. Το MF-TDMA επιτρέπει σε μια ομάδα δορυφορικών τερματικών της άνω ζεύξης (RCST, Return Channel Satellite Terminal) να επικοινωνούν με την πύλη TG, μέσω ενός συνόλου από φέρουσες συχνότητες, κάθε μια εκ των οποίων διαιρείται σε χρονοσχισμές. Το κέντρο ελέγχου του δικτύου εκχωρεί σε κάθε ενεργό RCST μια σειρά καταγισμών δεδομένων (bursts), κάθε μια εκ των οποίων καθορίζεται από μια συχνότητα, εύρος ζώνης, χρονική στιγμή έναρξης και διάρκεια.

Η τεχνική αυτή επιτυγχάνει την αποδοτική ροή της κίνησης, ενώ ταυτόχρονα επιτυγχάνει την ευελιξία (προσαρμοστικότητα) στην ανάθεση πόρων, αναθέτοντας σε κάθε χρήστη εύρος ζώνης για μετάδοση με δυναμικό τρόπο, όπως περιγράφεται παρακάτω. Στα συστήματα που χρησιμοποιούν MF-TDMA ως μέθοδο πρόσβασης για την άνω ζεύξη, κανάλια πολλαπλής συχνότητας ανατίθενται στην άνω ζεύξη και το σχήμα TDMA χρησιμοποιείται σε κάθε κανάλι συχνότητας. Έτσι, κάθε κανάλι χωρίζεται σε διάφορες χρονοσχισμές που μπορούν να εκχωρηθούν σε πολλαπλές συνδέσεις. Έτσι, εκχωρείται σταθερό ή δυναμικό τμήμα του εύρους ζώνης, ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε σύνδεσης σε ποιότητα υπηρεσίας (QoS). Συγκεκριμένα, ένα δορυφορικό σύστημα ενδιαφέρεται για δυο παραμέτρους Ποιότητας Υπηρεσιών, το ρυθμό δεδομένων και το μέγιστο επιτρεπτό ρυθμό σφαλμάτων (BER, Bit Error Rate). Με βάση τα προηγούμενα, το MF-TDMA χωρίζεται σε σταθερό και δυναμικό. Για την πλήρη περιγραφή του ορίζονται στα επόμενα κεφάλαια ορισμένες βασικές έννοιες.

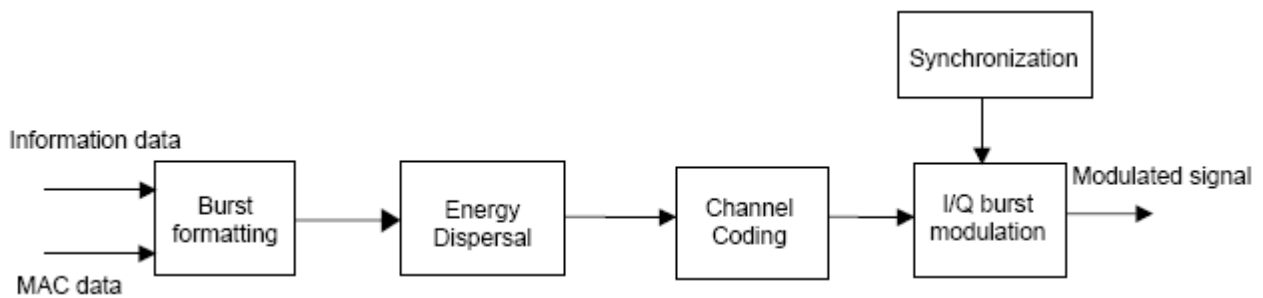


Σχήμα 5.3 Τυπική δομή του MF-TDMA στο δορυφορικό κανάλι DVB-RCS της προς τα πάνω ζεύξης υπό τη μορφή δισδιάστατου πίνακα, όπου οι γραμμές αναπαριστούν τα κανάλια συχνοτήτων και οι στήλες αναπαριστούν τη θέση των χρονοσχισμών. Ο πίνακας αυτός αναφέρεται ως MTCS (MF-TDMA Channel Structure).

### 5.2.1 Δορυφορικά τερματικά της άνω ζεύξης (RCST)

Ένα δορυφορικό τερματικό της άνω ζεύξης ή δορυφορικό διαδραστικό τερματικό (SIT, Satellite Interactive Terminal), είναι ένα τερματικό χρήστη για τη λήψη στο κανάλι μετάδοσης, στο ευθύ διαδραστικό κανάλι και για τη μετάδοση στο κανάλι επιστροφής. Το RCST έχει πρόσβαση στο δορυφορικό αναμεταδότη μέσω Πολλαπλών Καναλιών ανά Φέρον (MCPC, Multiple Channels per Carrier), χρησιμοποιώντας MF-TDMA ως μέθοδο πολλαπλής πρόσβασης με ένα σετ φερουσών συχνοτήτων, κάθε ένα εκ των οποίων χωρίζεται σε χρονοσχισμές για διαφορετικά τερματικά χρηστών. Η εκπομπή επιστροφής γίνεται είτε σε οργάνωση κατά εκρήξεις κίνησης, σε κελιά ασύγχρονου τρόπου μεταφοράς (ATM, Asynchronous Transfer Mode) 53 οκτάδων (48 οκτάδες πληροφοριακού φορτίου και 6 οκτάδες σηματοδοσίας) ή σε οργάνωση κελιών MPEG (Moving Picture Experts Group) 188 οκτάδων (182 οκτάδες πληροφοριακού φορτίου και 6 οκτάδες σηματοδοσίας).

Στο λειτουργικό διάγραμμα ενός τερματικού RCST που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.4, φαίνεται η πορεία του σήματος μέσα από διάφορα στάδια μέχρι να εκπεμφθεί προς το δορυφόρο. Σε γενικές γραμμές, η πορεία του σήματος πληροφορίας διέρχεται από τα τμήματα ραδιοσυχνότητας, ενδιάμεσης συχνότητας και βασικής ζώνης για να καταλήξει στην κεραία. Στις παρακάτω υποενότητες, θα αναλυθούν τα στάδια πολλαπλής πρόσβασης για τη ζεύξη επιστροφής, return link, του συστήματος DVB-RCS.



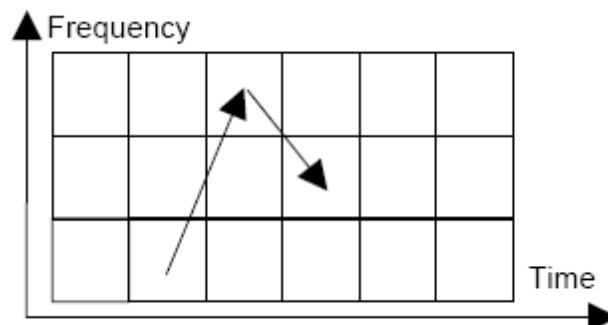
Σχήμα 5.4 Λειτουργικό διάγραμμα του καναλιού επιστροφής RCST για την επεξεργασία σήματος βασικής ζώνης

Στο Σχήμα 5.4 φαίνεται ένα λειτουργικό διάγραμμα του καναλιού επιστροφής RCST. Τα δεδομένα αρχικά διαμορφώνονται (Burst Formatting) σύμφωνα με το είδος του σήματος που θα μεταδοθεί: κίνησης (TRF, Traffic), απόκτησης (ACQ, Acquisition), συγχρονισμού (SYN, Synchronization) και σηματοδοσίας (CSC, Common Signalling Channel). Έπειτα εξασφαλίζεται η τυχαία κατανομή μονάδων και μηδενικών στο ψηφιακό σήμα (Randomization and Energy Dispersal) και γίνεται κωδικοποίηση

(Turbo ή concatenated coding) για αποφυγή σφαλμάτων κατά τη μετάδοση. Τέλος, το σήμα διαμορφώνεται κατά QPSK και το RCST συγχρονίζεται με το δορυφορικό σύστημα, ώστε να γίνει η μετάδοση.

### 5.2.2 Σταθερό MF-TDMA

Στο σταθερό MF-TDMA, το εύρος ζώνης και η διάρκεια των διαδοχικών σχισμών κίνησης που χρησιμοποιούνται από ένα RCST είναι σταθερά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5, όπου το βέλος δείχνει μια τυπική ακολουθία σχισμών που έχουν ανατεθεί από το NCC σε ένα RCST. Σε αυτή την περίπτωση, οι παράμετροι του Πίνακα Σύνθεσης των Χρονικών Σχισμών που καθορίζουν τις παραμέτρους των εκρήξεων (ρυθμός συμβόλων, τύπος εσωτερικού κώδικα, εξωτερική κωδικοποίηση, διαμόρφωση βασικής ζώνης κ.α.) ενός υπερ-πλασιού είναι σταθερές.



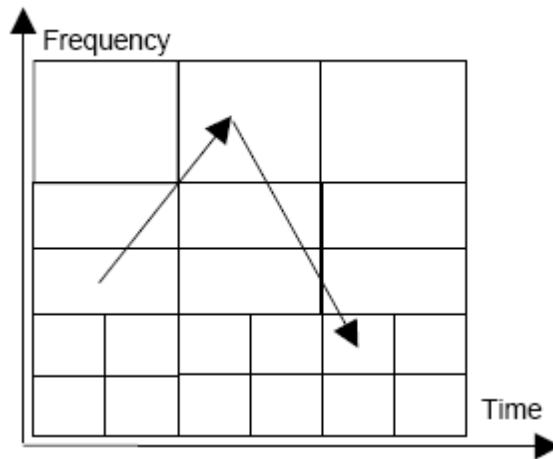
Σχήμα 5.5 Ένα MF-TDMA σταθερών χρονοσχισμών

Ένα RCST που χρησιμοποιεί το σταθερό MF-TDMA δεν επιτρέπεται να μεταδίδει κατά τη διάρκεια επαναξιολόγησης των παραμέτρων μετάδοσης. Υπάρχουν δυο βασικές οικογένειες τμηματοποίησης της χωρητικότητας του διαύλου άνω ζεύξης. Η μία βασίζεται σε χρονικές στιγμές ATM, ενώ η άλλη βασίζεται σε επιλεκτικές χρονικές σχισμές MPEG TS, όπως αυτές περιγράφονται παρακάτω.

### 5.2.3 Δυναμικό MF-TDMA

Το δυναμικό MF-TDMA χρησιμοποιεί επιπρόσθετη προσαρμοστικότητα RCST ώστε να υπάρχει ποικιλία σε εύρος ζώνης και διάρκεια των διαδοχικών εκχωρημένων χρονοσχισμών. Εκτός από την αλλαγή φερουσών συχνοτήτων και διάρκειας καταιγισμών, το RCST μπορεί να αλλάξει το ρυθμό

μετάδοσης και κώδικα μεταξύ των διαδοχικών καταιγισμών. Το πλεονέκτημα της ευελιξίας των καναλιών RCST είναι η πιο αποτελεσματική προσαρμογή στην ευρεία διακύμανση των απαιτήσεων μετάδοσης που είναι χαρακτηριστική στα δεδομένα πολυμέσων. Η βασική αρχή του ευέλικτου RCST φαίνεται στο Σχήμα 5.6, όπου τα βέλη δείχνουν ένα RCST που χρησιμοποιεί διαδοχικές χρονοσχιμές διαφορετικού εύρους ζώνης και διάρκειας.



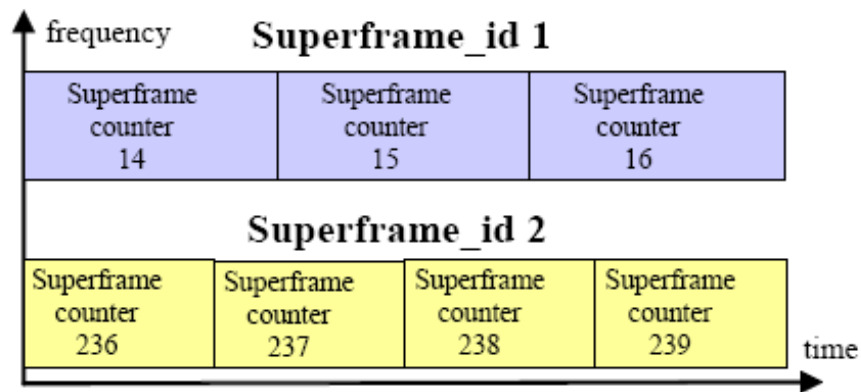
Σχήμα 5.6 Ένα προαιρετικό MF-TDMA δυναμικών χρονοσχιμών, το οποίο χρησιμοποιούν ευέλικτα RCSTs

## 5.3 Κατάτμηση του διαύλου άνω ζεύξης

### 5.3.1 Υπερ-Πλαίσιο (Superframe)

Ένα υπερ-πλαίσιο είναι ένα τμήμα χρόνου και συχνότητας του διαύλου της άνω ζεύξης. Μέσα σε ένα διαδραστικό δορυφορικό δίκτυο, η ταυτότητα ενός υπερ-πλαισίου αναγνωρίζει τους πόρους του διαύλου άνω ζεύξης στους οποίους έχει πρόσβαση μια ομάδα τερματικών RCST. Για κάθε υπερ-πλαίσιο, η εκχώρηση των χρονοσχιμών επικοινωνεί με την ομάδα των καναλιών RCST μέσω του χρονικού πλάνου καταιγισμών των τερματικών (TBTP, Terminal Burst Time Plan). Ένα RCST επιτρέπεται να μεταδίδει καταιγισμούς δεδομένων μόνο σε χρονικές σχισμές που του έχουν εκχωρηθεί ή σε χρονικές σχισμές τυχαίας προσπέλασης.

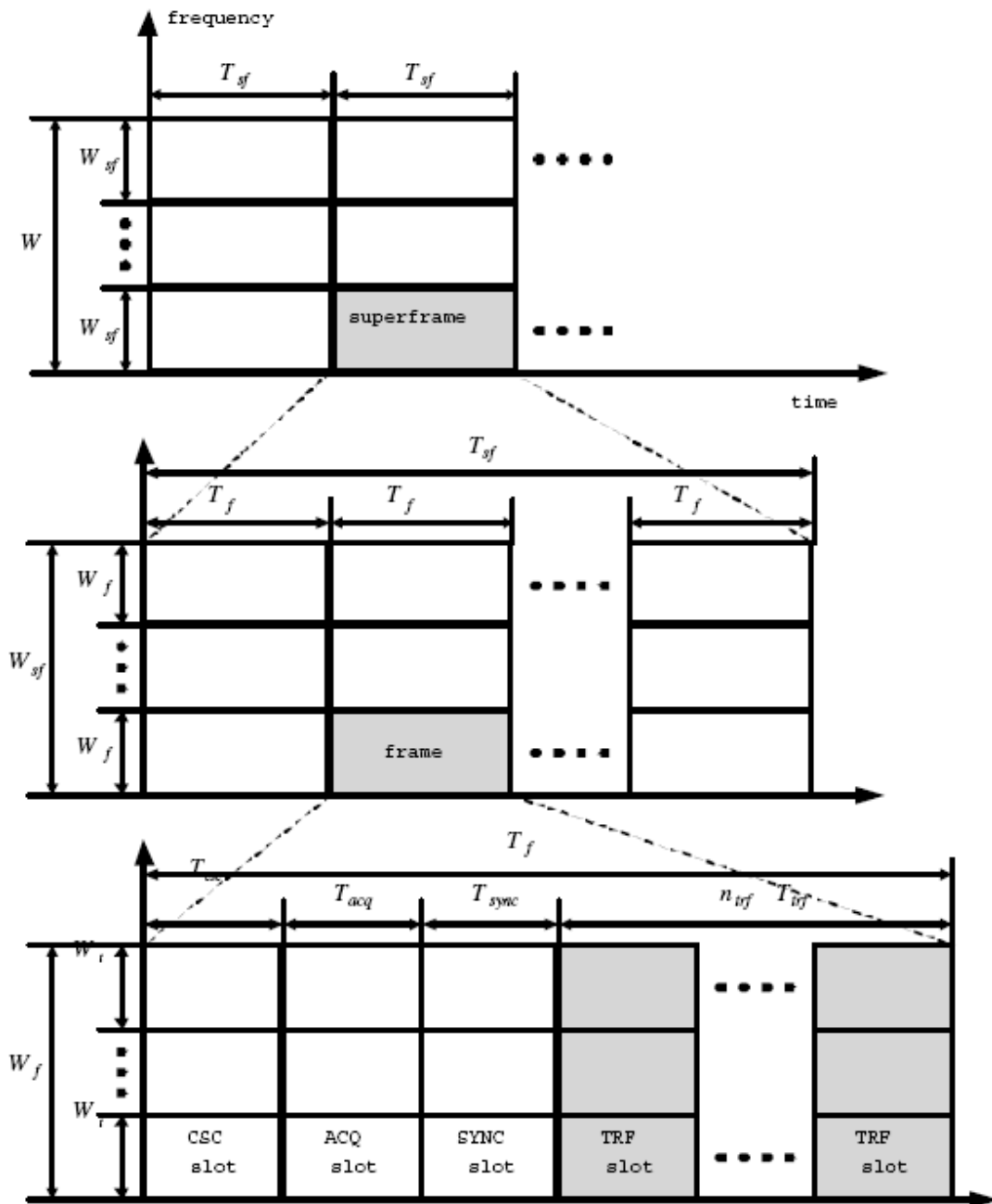
Παρακάτω, στα Σχήματα 5.7 και 5.8 βλέπουμε σχηματικές απεικονίσεις των υπερ-πλαισίων του MF-TDMA.



Σχήμα 5.7 Ένα τυπικό σχήμα διαδοχικών υπερ-πλαισίων

Παρακάτω παρατίθενται κάποιες προϋποθέσεις για την οργάνωση των υπερ-πλαισίων, υπό τις οποίες προκύπτουν πολλά πλεονεκτήματα.

- Τα πλαίσια πρέπει να έχουν τις ίδιες διάρκειες.
- Ένα πλαίσιο δεδομένης συχνότητας πρέπει να μεταφέρει ομογενή κίνηση, πράγμα που σημαίνει ότι ο ρυθμός δυαδικών συμβόλων (bit rate), ο ρυθμός κωδικοποίησης και η διάρκεια καταιγισμών πρέπει να είναι σταθερά.
- Οι φέρουσες συχνότητες πρέπει να είναι ομαδοποιημένες ανάλογα με τη διάρκεια καταιγισμών, το ρυθμό δυαδικών συμβόλων, το ρυθμό κώδικα και τη συχνότητα.
- Για την καλύτερη απόδοση της ανάθεσης πηγών στην προς τα πάνω ζεύξη, η διάρκεια υπερ-πλαισίων πρέπει να είναι μερικές δεκάδες ή εκατοντάδες milliseconds.

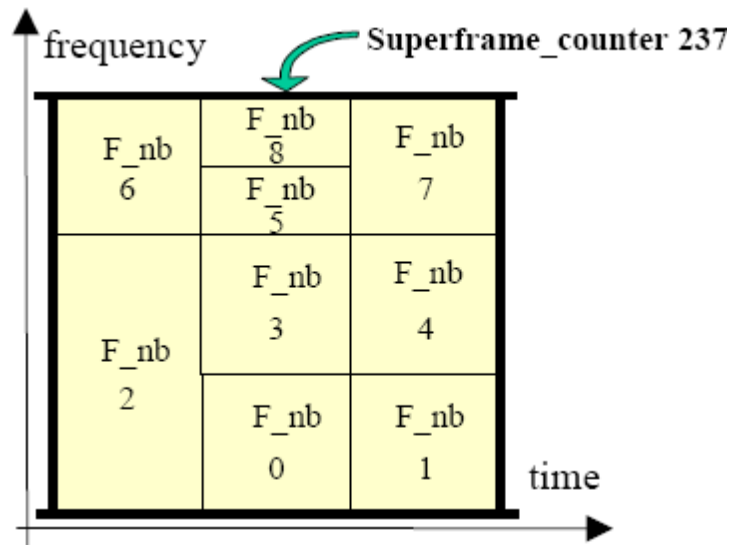


Σχήμα 5.8 Μια αναλυτική σχηματική απεικόνιση της δομής υπερ-πλαισίων MF-TDMA

### 5.3.2 Πλαίσιο (Frame)

Ένα υπερ-πλαίσιο (Σχήματα 5.7 και 5.8) αποτελείται από πλαίσια (Σχήμα 5.9), τα οποία με τη σειρά τους αποτελούνται από χρονοσχιμές. Το πλαίσιο είναι ένα ενδιάμεσο επίπεδο μεταξύ του υπερ-πλαisiού και των χρονοσχιμών. Έχει εισαχθεί στο MF-TDMA για να γίνεται αποτελεσματική σηματοδοσία. Η διάρκεια πλαισιού δε χρησιμοποιείται σαν βάση οποιασδήποτε διαδικασίας εκχώρησης χρονοσχιμών.



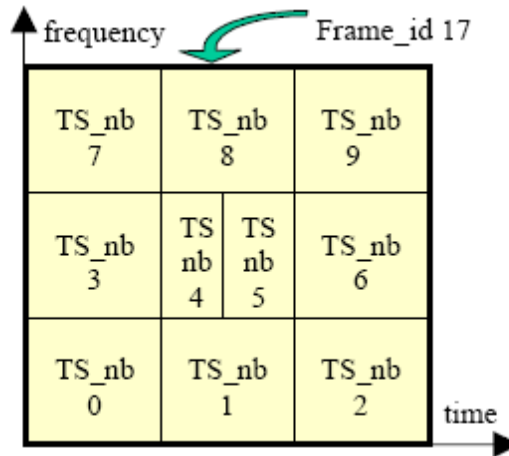


Σχήμα 5.9 Παράδειγμα σύνθεσης υπερ-πλαίσιου από πλαίσια

Σε ένα υπερ-πλαίσιο, τα πλαίσια είναι αριθμημένα από το 0 (ελάχιστη συχνότητα), μέχρι το N (μέγιστη συχνότητα), οργανωμένα στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.9. Το N λαμβάνει τιμή μικρότερη ή ίση με 31. Τα πλαίσια μέσα σε ένα υπερ-πλαίσιο μπορεί να μην έχουν όλα ίδια διάρκεια, εύρος ζώνης και σύνθεση χρονοσχισμών. Στην περίπτωση όπου έχουν ίδια τα παραπάνω χαρακτηριστικά, τα πλαίσια μπορούν να θεωρηθούν ως ζώνες συχνοτήτων μέσα στο υπερ-πλαίσιο. Στο Σχήμα 5.9 βλέπουμε ένα παράδειγμα ενός υπερ-πλαίσιου που έχει διάρκεια 3 φορές μεγαλύτερη από αυτή των πλαισίων του.

### 5.3.3 Χρονοσχιμές (Time Slots)

Ένα πλαίσιο (Σχήμα 5.9) αποτελείται από χρονικές σχισμές (Σχήμα 5.10) και μπορεί να εκτείνεται πάνω σε διάφορες φέρουσες συχνότητες. Για λόγους εκχώρησης, κάθε χρονική σχισμή προσδιορίζεται μοναδικά από την ταυτότητα υπερ-πλαίσιου (Frame\_id), το μετρητή υπερ-πλαίσιου (Superframe\_counter), τον αριθμό πλαισίου ( $F_{nb}$ ) και τον αριθμό χρονοσχιμής (TS\_nb).



Σχήμα 5.10 Παράδειγμα σύνθεσης πλαισίων

Το RCST πρέπει να επεξεργάζεται το μήνυμα TBTP που καταφθάνει από το κέντρο NCC για την περιοχή εκχώρησής του, να εξαγει το μετρητή ανάθεσης και εκχωρημένων χρονοσχημάτων, ώστε να προετοιμαστεί για τις επόμενες αναμεταδόσεις στην άνω ζεύξη. Η περίοδος λανθάνουσας κατάστασης από την άφιξη του μηνύματος TBTP στο RCST, μέχρι τη στιγμή όπου το RCST είναι έτοιμο να μεταδώσει τους καταγισμούς κίνησης που έχουν ανατεθεί από το TBTP, δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 90 ms.

## 5.4 Χρονοσχιμές κίνησης ATM

Η βασική ιδέα όπου βασίζεται το ATM είναι η μετάδοση όλων των πληροφοριών σε μικρά πακέτα σταθερού μεγέθους που ονομάζονται κελιά (cells). Τα κελιά έχουν μέγεθος 53 bytes, από τα οποία 5 bytes είναι η κεφαλίδα και τα 48 bytes είναι το ωφέλιμο φορτίο (payload). Το αναγνωριστικό της σύνδεσης αποτελεί μέρος της κεφαλίδας, έτσι ώστε οι υπολογιστές υπηρεσίας αποστολής και λήψης καθώς και όλοι οι ενδιαμέσοι δρομολογητές, να μπορούν να αντιστοιχήσουν κελιά σε συνδέσεις. Η δρομολόγηση των κελιών πραγματοποιείται στο τμήμα υλικού (Hardware), σε πολύ υψηλή ταχύτητα. Στην πραγματικότητα, το κύριο πλεονέκτημα της χρήσης κελιών σταθερού μεγέθους είναι ότι είναι εύκολο να υλοποιηθούν δρομολογητές υλικού (Hardware Routers) για τη διαχείριση μικρών κελιών σταθερού μεγέθους. Τα μεταβλητού μεγέθους πακέτα IP πρέπει να δρομολογούνται με λογισμικό, τρόπος δρομολόγησης που καθυστερεί πολύ. Ένα ακόμα θετικό σημείο του ATM είναι ότι το τμήμα υλικού (Hardware) μπορεί να ρυθμιστεί έτσι ώστε να αντιγράφει ένα εισερχόμενο κελί σε πολλαπλές γραμμές εξόδου. Τέλος, τα μικρά κελιά δεν απασχολούν τις γραμμές για πολύ χρόνο, γεγονός που διευκολύνει την παροχή εγγυήσεων για την ποιότητα των υπηρεσιών.

Σε κάθε RCST ανατίθεται ένας συγκεκριμένος ρυθμός μετάδοσης, ανάλογα με τις ικανότητες και τις κλιματικές ιδιότητές του. Χρησιμοποιούνται 4 ρυθμοί μετάδοσης πληροφοριών (βλ. Πίνακα 5.1):

- 144 Kbps
- 348 Kbps
- 1024 Kbps
- 2048 Kbps

Οι καταγισμοί κίνησης που μεταδίδονται σε χρονοσχισμές κίνησης, εμπεριέχουν ένα κελί ATM. Η κωδικοποίηση για διόρθωση σφαλμάτων και η επικεφαλίδα των καταγισμών κίνησης εξαρτώνται από το ισοζύγιο ισχύος της δορυφορικής ζεύξης, καθώς και από την απόδοση του αποδιαμορφωτή. Αυτή η εξάρτηση έχει ως αποτέλεσμα την ανάγκη για συγκεκριμένη διάρκεια των χρονοσχισμών.

Ένα πλαίσιο αποτελείται από ένα συγκεκριμένο πλήθος χρονοσχισμών ATM και ένα πλήθος από φέρουσες συχνότητες. Κάθε πλαίσιο έχει διάρκεια 26.5 ms. Το πλήθος και η σύνθεση των χρονοσχισμών καθορίζεται από το ρυθμό μετάδοσης πληροφοριών που θα υποστηρίζεται από το πλαίσιο. Στη συνέχεια, ο Πίνακας 5.1 δείχνει την εξάρτηση της σύνθεσης πλαισίων από το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης. Σε κάθε φέρον κάθε πλαισίου είναι διαθέσιμες είτε χρονοσχισμές του κοινού καναλιού σηματοδοσίας (CSC, Common Signalling Channel), είτε χρονοσχισμές συγχρονισμού (SYNC), όπως φαίνεται στις αντίστοιχες στήλες του πίνακα.

Peak information bit rate	Slots per carrier and per frame				Peak symbol rate in kBaud	Carriers per frame
	traffic slots	CSC/acquisition slots	synchronization slots	total of traffic slot durations		
144 kbit/s	9	1	0	10	238	60
		0	2			
384 kbit/s	24	2	0	26	618	23
		0	4			
1 024 kbit/s	64	4	0	68	1 618	9
		0	8			
2 048 kbit/s	128	8	0	136	3 237	4
		0	16			

Πίνακας 5.1 Σύνθεση πλαισίων στο MF-TDMA για το RCST.

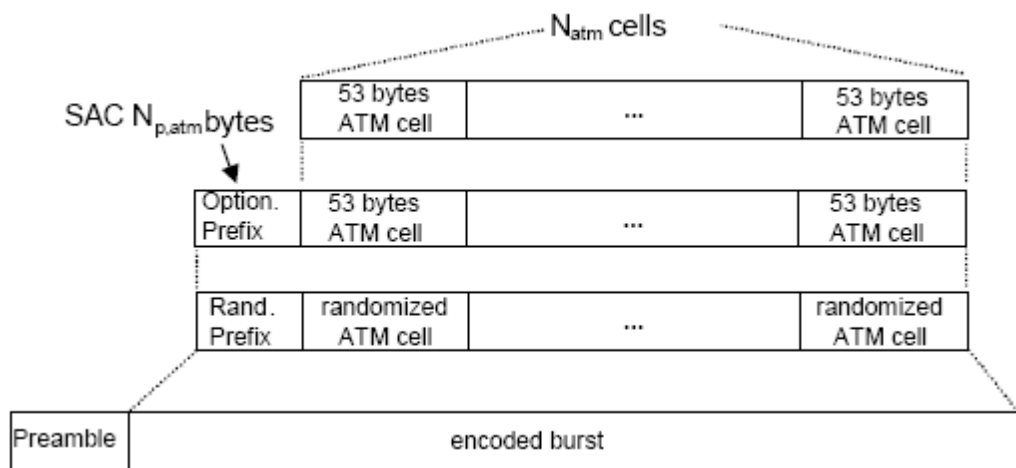
Η χωρητικότητα της κίνησης εκχωρείται στα πλαίσια. Η περίοδος επαναλήψεων του πλάνου TBTP ισούται με την περίοδο των πλαισίων και ως εκ τούτου ο πίνακας TBTP διανέμεται κάθε 26.5 ms. Το

πλήθος των χρονοσχισμών για κάθε ρυθμό μετάδοσης επιτρέπει τη δημιουργία ρυθμών μετάδοσης που είναι πολλαπλάσιοι των 16 kbit/s, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.1.

#### 5.4.1 Αιτήσεις χρηστών - εκρήξεις κίνησης ATM

Οι αιτήσεις χρηστών είναι στην ουσία καταιγισμοί κίνησης ATM (ATM traffic bursts) και χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά χρήσιμης πληροφορίας από κανάλια RCST προς άλλα RCSTs και την πύλη (Gateway). Οι εκρήξεις αυτές συνήθως ακολουθούνται από χρονικά περιθώρια για τη διακοπή εκπεμπόμενης δορυφορικής ισχύος και αντιστάθμισής τους.

Το ωφέλιμο φορτίο ενός καταιγισμού ATM αποτελείται από  $N_{atm}$  αλυσιδωτά συνδεδεμένα κελιά ATM, καθένα από τα οποία έχει μήκος 53 bytes. Προαιρετικά μπορεί να έχει ένα πρόθεμα  $N_{p,atm}$  bytes. Τα κελιά ATM ακολουθούν τη δομή ενός τυπικού ATM κελιού αλλά δεν υποστηρίζουν απαραίτητα όλες τις τάξεις των υπηρεσιών που δύναται να προσφέρει αυτό. Στο Σχήμα 5.11 φαίνεται ο καταιγισμός ATM και στη συνέχεια περιγράφονται δυο μέθοδοι οργάνωσής του (Μηχανισμός προθεματικής μεθόδου και μέθοδος mini-slot).



Σχήμα 5.11 Σύνθεση ενός ATM traffic burst

#### ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΠΡΟΘΕΜΑΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ (PREFIX METHOD MECHANISM)

Ο μηχανισμός αυτός βασίζεται στην επιλεκτική τοποθέτηση ενός προθέματος  $N_{p,atm}$  bytes σε ATM traffic bursts. Αν χρησιμοποιείται, το πρόθεμα μεταφέρει πληροφορίες ελέγχου και διαχείρισης από τα RCSTs στο NCC. Ο μηχανισμός αυτός υποστηρίζεται από το πεδίο Ελέγχου Δορυφορικής Πρόσβασης

(SAC, Satellite Access Control) και τα υπο-πεδία αιτήσεων, όταν αυτά είναι προσαρτημένα στις εκρήξεις κίνησης ATM.

## ΜΕΘΟΔΟΣ MINI-SLOT

Ο μηχανισμός αυτός βασίζεται στην περιοδική ανάθεση σε συνδεδεμένα RCSTs, εκρήξεων μικρότερου μεγέθους από τη χωρητικότητα των χρονοσχισμών κίνησης. Μεταφέρει πληροφορίες ελέγχου και διαχείρισης από τα RCSTs προς το NCC. Χρησιμοποιείται, επίσης, για τη διατήρηση συγχρονισμού των RCST. Αυτός ο μηχανισμός υποστηρίζεται από τα υπο-πεδία αιτήσεων SAC που χρησιμοποιούνται σε καταγισμούς συγχρονισμού (SYNC bursts). Ένας καταγισμός συγχρονισμού χρησιμοποιείται από το RCST για τη διατήρηση συγχρονισμού και την αποστολή πληροφοριών ελέγχου στο σύστημα. Οι καταγισμοί SYNC αποτελούνται από ένα πρόθεμα για ανίχνευση καταγισμών και ένα προαιρετικό πεδίο SAC.

## 5.5 Ανάθεση πόρων στο MF-TDMA

Για την επίλυση του προβλήματος κατανομής του διαθέσιμου εύρους ζώνης, πρέπει ο αριθμός των χρονοσχισμών στο MF-TDMA να ικανοποιεί τις απαιτήσεις σε Ποσοστό λαθών (BER, Bit Error Rate) της σύνδεσης. Το BER υπολογίζεται με βάση τα αποτελέσματα του Ισοζυγίου Ισχύος από τη σχέση:

$$BER = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad (5.1)$$

Μετά τον υπολογισμό του αριθμού των χρονοσχισμών που θα χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση πολλαπλής πρόσβασης, αποστέλλεται η αίτηση για εκχώρηση των χρονοσχισμών αυτών στον ελεγκτή πόρων (εύρος ζώνης). Κατά τη φάση της εκχώρησης, ο ελεγκτής χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο εκχώρησης πόρων στη Δομή Καναλιών του MF-TDMA (MCTS).

Ιδιαίτερου ενδιαφέροντος είναι το πρόβλημα του κατακερματισμού, που μπορεί να εμποδίσει μια έκρηξη κίνησης από το να εκχωρηθεί σε κάποιο κανάλι, παρά το γεγονός ότι υπάρχει διαθέσιμη χωρητικότητα. Εξαιτίας της δυναμικής φύσης των χρονικών στιγμών άφιξης των αιτήσεων σύνδεσης και της ποικιλίας των μεγεθών των καταγισμών κίνησης, τα κανάλια συχνοτήτων τείνουν να εμπεριέχουν πολλά διάσπαρτα κενά. Επειδή οι καταγισμοί δε μπορούν να χωριστούν σε μικρότερα τμήματα για να χωρέσουν μέσα σε αυτά τα διάσπαρτα κενά, αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη σπατάλη χωρητικότητας της άνω ζεύξης. Είναι φανερό ότι περιορίζοντας τον κατακερματισμό μπορούμε να βελτιώσουμε την αποδοτικότητα των καναλιών μεταγωγής πακέτων.

Το πρόβλημα εκχώρησης χρονοσχισμών για την άνω ζεύξη μπορεί να αντιμετωπιστεί ως πρόβλημα bin-packing. Σύμφωνα με το πρόβλημα αυτό, αντικείμενα διαφορετικών όγκων πρέπει να τοποθετηθούν σε ένα πεπερασμένο πλήθος δοχείων (bins) συγκεκριμένης χωρητικότητας με τρόπο τέτοιο, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το πλήθος των δοχείων. Έτσι, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος βέλτιστης προσαρμογής (best-fit) για την προσομοίωση ενός συστήματος MF-TDMA και την αξιολόγηση της απόδοσής του.

#### ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ BEST-FIT

Έστω  $B_1, B_2, \dots$  η αλληλουχία των δοχείων με κοινή μέγιστη χωρητικότητα  $C$ . Τα στοιχεία  $X_1, X_2, \dots, X_n$  πρέπει να τοποθετηθούν στα δοχεία που τους αντιστοιχούν. Για την τοποθέτηση ενός τυχαίου στοιχείου  $X_i$ , θα πρέπει να βρεθεί  $j$  τέτοιο ώστε το δοχείο  $B_j$  να γεμίζει στο επίπεδο  $a \leq C - X_i$ , όπου το  $a$  είναι όσο μικρότερο γίνεται ( $\min(a)$ ). Αν υπάρχουν δυο ή περισσότερα δοχεία με την ίδια τιμή  $a$ , τότε επιλέγεται το δοχείο με το μικρότερο δείκτη  $j$ . Έπειτα, το  $X_i$  τοποθετείται μέσα στο  $B_j$  αφήνοντας το μικρότερο δυνατό κενό  $a$ .

## 5.6 Βιβλιογραφία

- [1] Jung – Min Park, U.Savagaonkar, E.K.P.Chong, H.J.Siegel, S.D.Jones, “Allocation of QoS Connections in MF-TDMA Satellite Systems: A Two-Phase Approach”, IEEE [Ιανουάριος 2005]
- [2] B.C.Gremont, R.J.Watson, P.A.Watson, D.D.Hodges, “Modelling And Detection of Rain Attenuation For MF-TDMA Satellite Networks Utilizing Fade Mitigation Techniques”, [Νοέμβριος 2006]
- [3] E. Noussi, B.Gremont, M.Filip, “Integration of Fade Mitigation within centrally managed MF-TDMA /DVB-RCS networks”, IOS Press, [2006]
- [4] Z.Jiang, Y.Li, V.C.M.Leung, “A Predictive Demand Assignment Multiple Access Protocol for Broadband Satellite Networks Supporting Internet Applications”, IEEE [2002]
- [5] European Telecommunications Standards Institute, European Broadcasting Union, “Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for Satellite Distribution Systems; Guidelines for the use of EN 301 790”, ETSI TR 101 790 V1.3.1 [2006-09]
- [6] European Telecommunications Standards Institute, European Broadcasting Union , “Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for satellite distribution systems”, Chiao Tung University, [ETSI EN 301 790 V1.4.1 [2005-09]
- [7] K.-H. Li, C.Chen, “An Adaptive MAC Protocol for Satellite ATM”, IEEE [2001]
- [8] H.Jeong, J.G.Ryu, M.S.Shin,H.J.Lee, “Design and Implementation of Multi-Frequency TDMA Modulator for Satellite Terminal based on DVB-RCS”, IEEE [2003]
- [9] K.-D.Lee, Y.-H.Cho, H.-J.Lee, H.Jeong, “Optimal Scheduling for Timeslot Assignment in MF-TDMA Broadband Satellite Communications”, IEEE [2002]
- [10] H.Skinnemoen, “Visions for Future DVB-RCS Systems”, IEEE [2006]
- [11] Χ.Γ.Αραβαντινός, Π.Γ.Σκλάβου, Α.Στ.Τσαπατσάρη, “DVB-RCS και Wi-Fi”, Διπλωματική Εργασία [Μάρτιος 2005]
- [12] A.S.Tanenbaum, “Δίκτυα Υπολογιστών”, Μετάφραση, Εκδόσεις Κλειδάριθμος [2003]

---

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

---

---

### ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΘΕΣΗΣ ΧΡΟΝΟΣΧΙΣΜΩΝ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ MF-TDMA

#### 6.1 Εισαγωγικά στοιχεία προσομοίωσης

Η προσομοίωση αποτελεί μια μεθοδολογία που χρησιμοποιεί το μοντέλο ενός συστήματος για να μιμηθεί την συμπεριφορά του συστήματος, με σκοπό την αξιολόγηση εναλλακτικών αποφάσεων. Η επεξεργασία του μοντέλου, ή με άλλα λόγια η διεξαγωγή του πειράματος πάνω στο μοντέλο, γίνεται συνήθως με τη βοήθεια του υπολογιστή, και σπανιότερα χωρίς αυτή. Η τεχνική της προσομοίωσης αποσκοπεί στην κατανόηση της δομής και της λειτουργίας του υπό μελέτη συστήματος, στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς του με την πάροδο του χρόνου και στην ανάλυση «σεναρίων», ώστε να εκτιμηθούν τα αποτελέσματα πιθανών αλλαγών στη δομή και τη λειτουργία του συστήματος.

#### 6.2 Προσομοίωση κίνησης διαδικτύου μέσω πηγής ON-OFF με κατανομή Pareto

Όπως έχει ειπωθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, για να προσομοιωθεί επιτυχώς η κίνηση διαδικτύου πρέπει το αποτέλεσμα της προσομοίωσης να είναι self similar. Οι περισσότερες παλαιότερες έρευνες σε δορυφορικά πρωτόκολλα επικοινωνίας έχουν βασιστεί σε απλές πηγές ON/OFF ή Poisson, οι οποίες δεν αντικατοπτρίζουν επακριβώς τη συμπεριφορά της κίνησης διαδικτύου. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούμε στις πηγές SS διαδικασίες με μακροπρόθεσμη εξάρτηση για να αναπαραστήσουμε καλύτερα την πραγματική κίνηση διαδικτύου. Μια διαδικασία SS έχει γενικά συνάρτηση αυτοσυσχέτισης που ακολουθεί δυναμική κατανομή, σε αντίθεση με την ταχεία εκθετική απόσβεση που εμφανίζεται στα παραδοσιακά μοντέλα κίνησης Poisson. Η απλούστερη κατανομή βαριάς ουράς είναι η κατανομή Pareto. Για να προσομοιώσουμε την κίνηση δηλαδή, πρέπει να κατασκευάσουμε ένα πρόγραμμα που θα περιέχει μια πηγή ON-OFF και κατά τη διάρκεια των ON περιόδων, η κίνηση να ακολουθεί την κατανομή Pareto. Την κατανομή Pareto θα ακολουθούν επίσης οι διάρκειες περιόδων ON και OFF.



Παρακάτω βλέπουμε το πρόγραμμα σε MATLAB:

```
k=1;
x0=simpareto(1,10,1.2,k);
x1=100*x0;
tmp1=round(x1);
a=1.2;
C1=[simpareto(1,tmp1(1,1),a,k) zeros(1,tmp1(1,2))];
C2=[simpareto(1,tmp1(1,3),a,k) zeros(1,tmp1(1,4))];
C3=[simpareto(1,tmp1(1,5),a,k) zeros(1,tmp1(1,6))];
C4=[simpareto(1,tmp1(1,7),a,k) zeros(1,tmp1(1,8))];
C5=[simpareto(1,tmp1(1,9),a,k) zeros(1,tmp1(1,10))];
C=[C1 C2 C3 C4 C5];
x2=sum(x0);
x3=sum(tmp1);
x=(x2/x3);

for i=1:1:sum(tmp1)
    D(1,i)=i;
    E(1,i)=D(1,i)*x;
end

N=sum(tmp1);
k=1;
M=1;
for i=1:1:M
    for j=1:1:N
        if (C(i,j)<1)
            B(i,j) = 0;
        else B(i,j)=C(i,j);
        end
    end
end
plot(E,B);
```

Κώδικας 6.1 Κώδικας παραγωγής κίνησης SS

Το παραπάνω πρόγραμμα καταρχάς χρησιμοποιεί ένα τροποποιημένο πρόγραμμα προσομοίωσης της κατανομής pareto γραμμένο σε Matlab [2], το οποίο φαίνεται παρακάτω. Αρχικά δημιουργείται μια ακολουθία κατανομής pareto από 10 αριθμούς, οι οποίοι αντιστοιχούν στις διάρκειες των ON και OFF περιόδων (seconds), και αποθηκεύεται στη μεταβλητή x0. Ο πολλαπλασιασμός της x0 με 100 και μετά η στρογγυλοποίηση αυτού γίνεται για να παραχθεί ένα αρκετά μεγάλο δείγμα για την κίνηση διαδικτύου.

Στις κατανομές pareto έχει επιλεγεί η τιμή 1.2 για την παράμετρο  $\alpha$  και η τιμή 1 για την παράμετρο  $k$ . Η παράμετρος  $\alpha$  έχει επιλεγεί με βάση προϋπάρχουσες έρευνες [4], ενώ η παράμετρος  $k$  αντιπροσωπεύει την ελάχιστη δυνατή τιμή του δείγματος κίνησης διαδικτύου, η οποία αντιστοιχεί σε 1 Kbps.

Έπειτα δημιουργείται ο πίνακας που περιέχει εναλλάξ τις τιμές της κίνησης διαδικτύου για τις περιόδους ON της πηγής και μηδενικές τιμές για τις περιόδους OFF. Η μεταβλητή  $x$  αντιστοιχεί στον παράγοντα κανονικοποίησης της ανεξάρτητης μεταβλητής, επαναφέροντας την κλίμακα σε λεπτά. Έπειτα, για να βελτιωθεί η τελική γραφική παράσταση γίνεται η αποκοπή σε τιμές κίνησης πάνω από 100 Kb. Τέλος, κατασκευάζουμε το κανονικοποιημένο διάγραμμα κίνησης διαδικτύου (Kb) – χρόνου (sec).

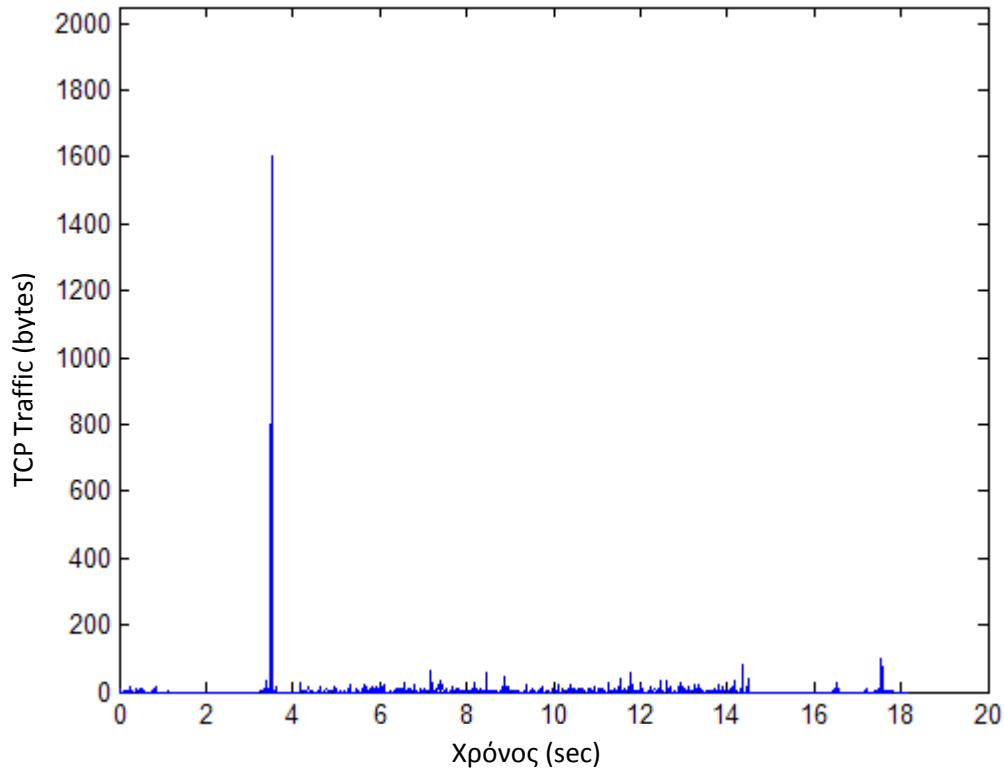
Η τροποποιημένη συνάρτηση `simpareto` που χρησιμοποιείται στο πρόγραμμα προσομοίωσης φαίνεται παρακάτω:

```
function [sample] = simpareto(M, N, alpha, k)
    % check arguments
    if (alpha <= 0)
        error('alpha negative or zero');
    end
    b = 2048;
    % generate a uniform sample and apply the inverse cdf
    sample = k * ((1 - rand(M, N)) * (1 - (1 + b) ^ (alpha))) .^ (-1/alpha) - 1;
```

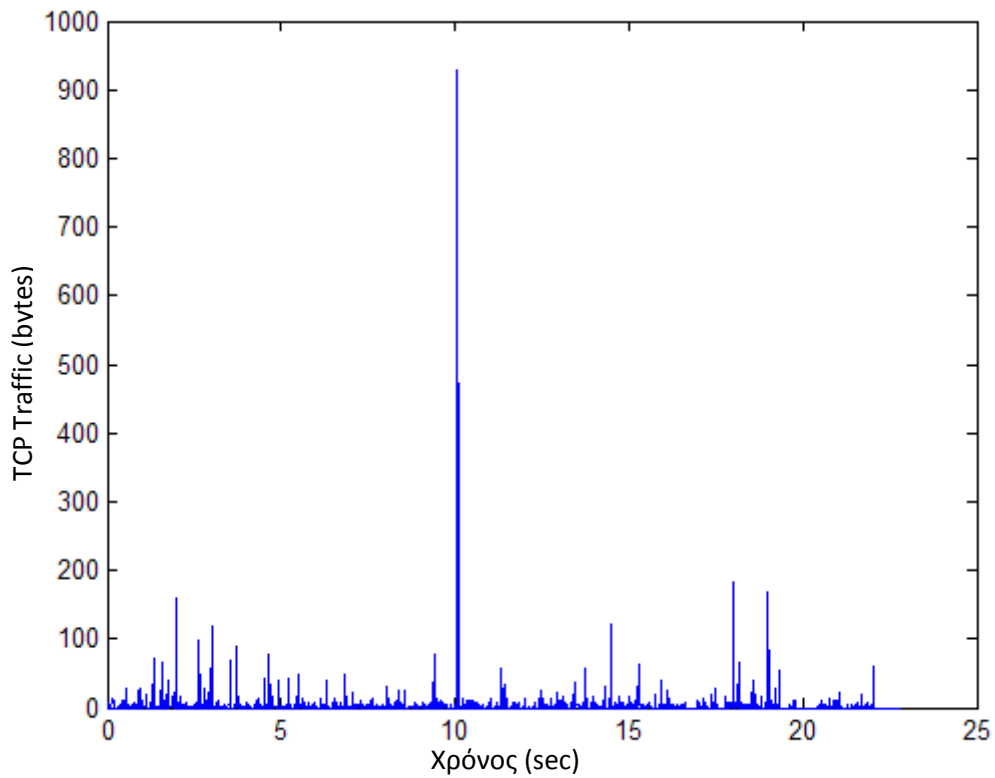
Κώδικας 6.2 Τροποποιημένο πρόγραμμα παραγωγής κατανομής Pareto

### 6.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης

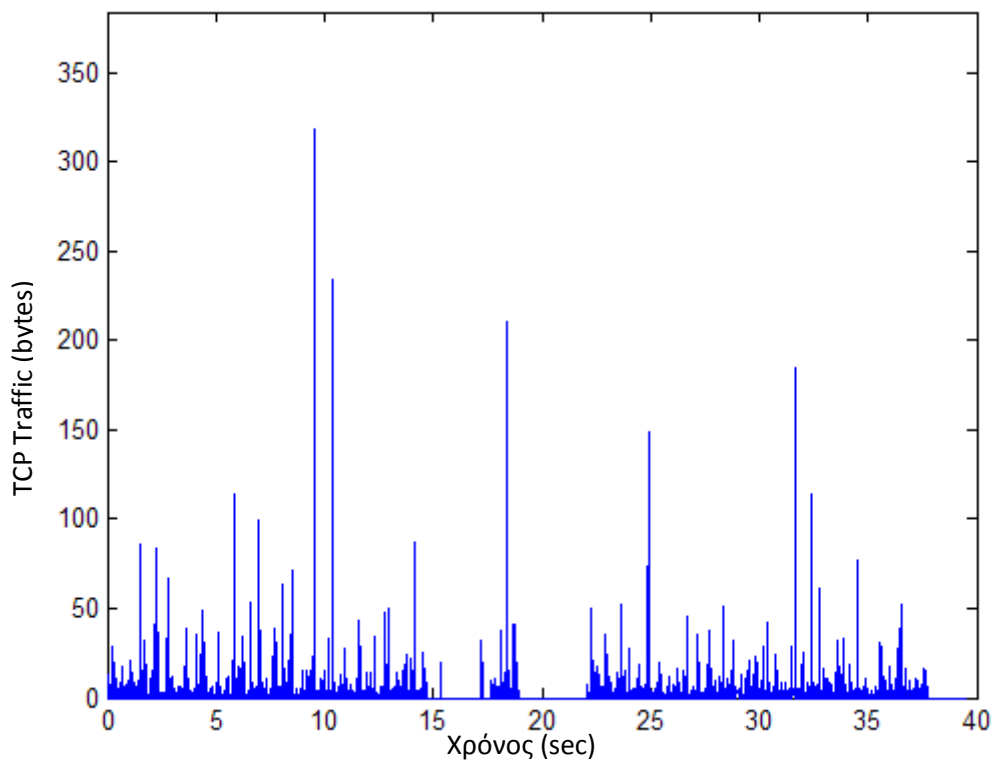
Παρακάτω βλέπουμε τις γραφικές παραστάσεις κίνησης που παράγεται από ένα τυχαίο χρήστη, σε σχέση με το χρόνο για διάφορους ρυθμούς μετάδοσης και διάρκειες προσομοίωσης. Παρατηρούμε ότι σε οποιαδήποτε κλίμακα και να εξετάσουμε την κίνηση διαδικτύου, αυτή εμφανίζει τις ίδιες ιδιότητες εκρηκτικότητας και μη-προβλεψιμότητας.



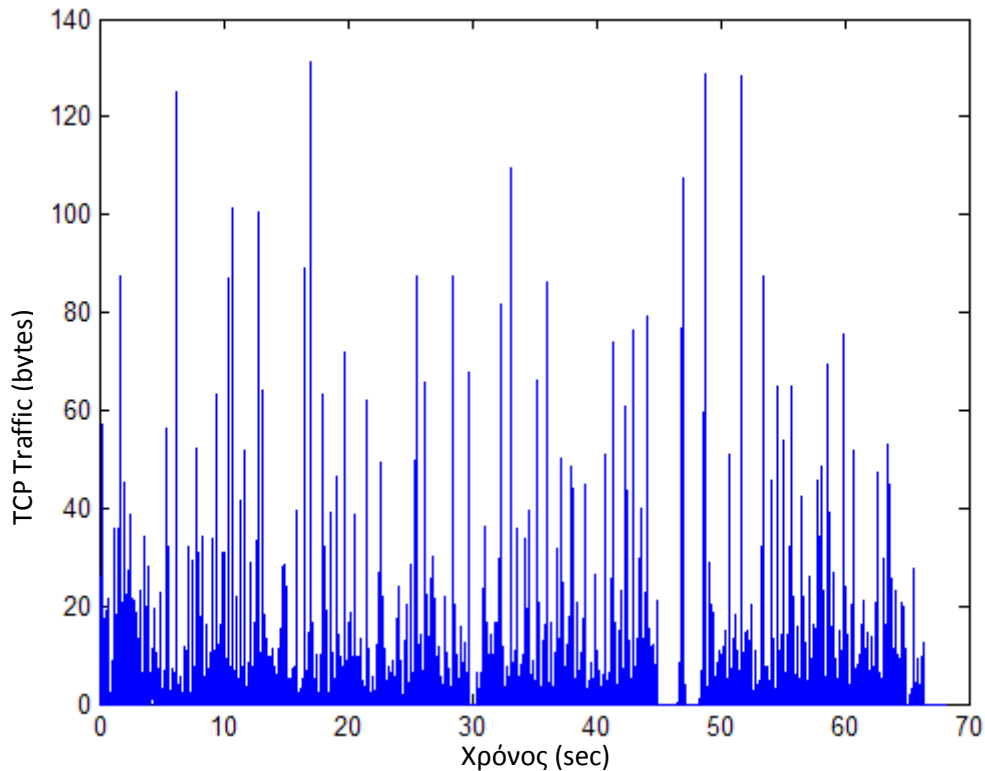
Σχήμα 6.1 Κίνηση που παράγεται από ένα χρήστη κανονικοποιημένη ως προς το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης των 2048 kbps



Σχήμα 6.2 Κίνηση που παράγεται από ένα χρήστη κανονικοποιημένη ως προς το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης των 1024 kbps



Σχήμα 6.3 Κίνηση που παράγεται από ένα χρήστη κανονικοποιημένη ως προς το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης των 384 kbps



Σχήμα 6.4 Κίνηση που παράγεται από ένα χρήστη κανονικοποιημένη ως προς το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης των 144 kbps

Στη συνέχεια, με τη βοήθεια των παρακάτω κωδικών λαμβάνονται οι γραφικές παραστάσεις πραγματικών SS αθροιστικών διαδικασιών.

```
function y = traffic_aggregated(s)
k=1;
a=1.2;

x0=simpareto(1,10,a,k);
while (sum(x0)<=s)
    x0=simpareto(1,10,a,k);
end

x1=100*x0;
tmp1=round(x1);

C1=[simpareto(1,tmp1(1,1),a,k) zeros(1,tmp1(1,2))];
C2=[simpareto(1,tmp1(1,3),a,k) zeros(1,tmp1(1,4))];
C3=[simpareto(1,tmp1(1,5),a,k) zeros(1,tmp1(1,6))];
C4=[simpareto(1,tmp1(1,7),a,k) zeros(1,tmp1(1,8))];
C5=[simpareto(1,tmp1(1,9),a,k) zeros(1,tmp1(1,10))];
C=[C1 C2 C3 C4 C5];

x2=sum(x0);
x3=sum(tmp1);
x=(x2/x3);
```

```

iter=round(s/x);
N=sum(tmp1);
k=1;
M=1;
for i=1:1:M
    for j=1:1:N

        if (C(i,j)<1)
            B(i,j) = 0;
        else B(i,j)=C(i,j);
        end
    end
end
siz=round(100*s);
for i=1:1:siz
    y(i)=C(i);
end
clear x0;
clear tmp1;
clear y(i);
clear C(i);

```

Κώδικας 6.3 Τροποποίηση του κώδικα 6.1 στη συνάρτηση traffic\_aggregated(s)

Και ο κώδικας για την εμφάνιση των γραφικών παραστάσεων φαίνεται παρακάτω.

```

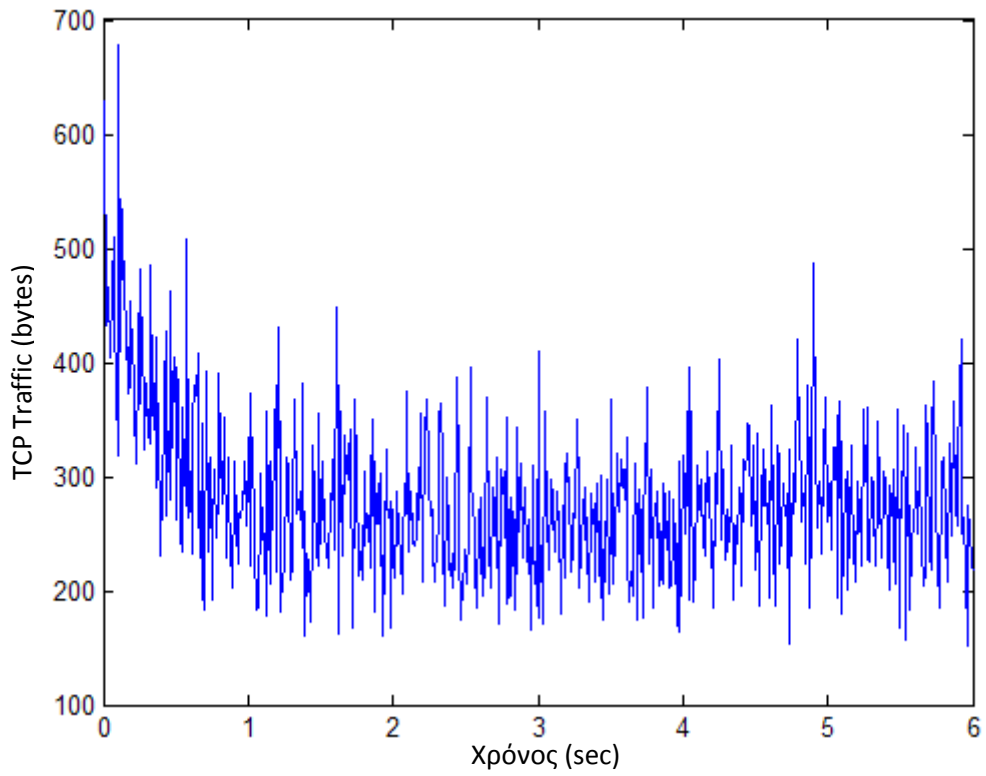
m=200;
%m=level of aggregation
stigmi=25;
for k=1:1:m
    aggregated(k,:)=traffic_aggregated(stigmi);
end

si=round(100*stigmi);

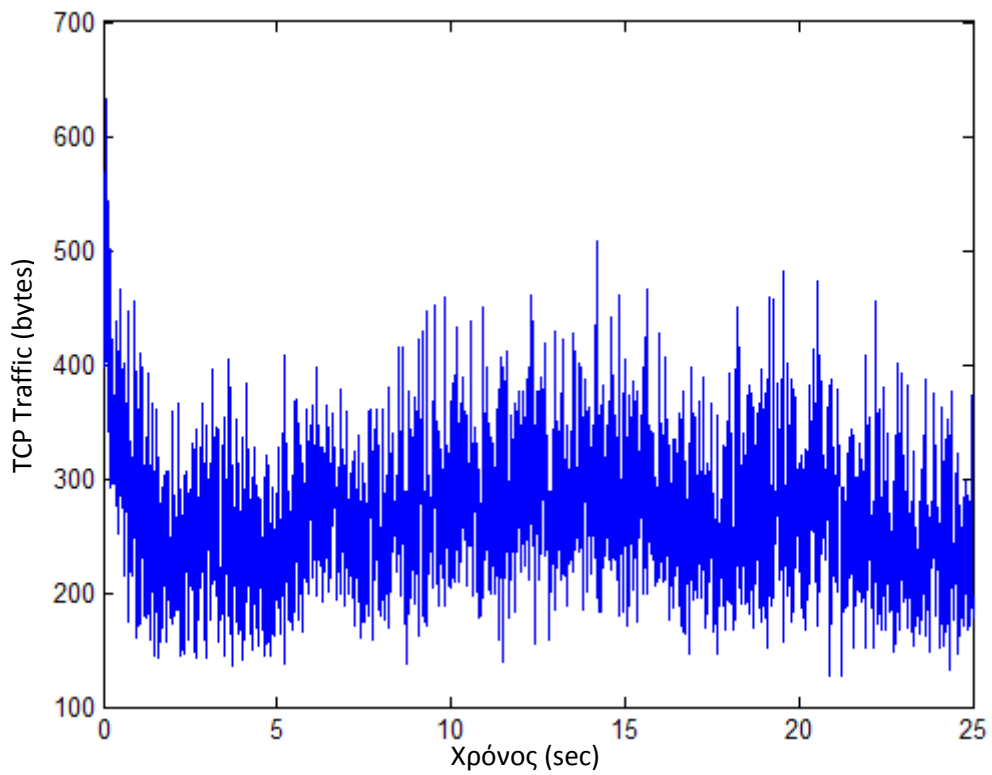
for i=1:1:si
    P(i)=sum(aggregated(:,i));
    D(i)=stigmi*(i/si);
end
plot(D,P);

```

Κώδικας 6.4 Εμφάνιση γραφικής παράστασης της SS κίνησης



Σχήμα 6.5 Αθροιστική κίνηση SS για κλίμακα 6 δευτερολέπτων



Σχήμα 6.6 Αθροιστική κίνηση SS για κλίμακα 25 δευτερολέπτων

## 6.4 Προσομοίωση για την ανάθεση πόρων στο MF-TDMA

Για τη διεξαγωγή της έρευνας γίνεται χρήση ενός έτοιμου κώδικα τροποποιημένου αλγορίθμου best-fit (Κεφάλαιο 5.5), ώστε να είναι εφικτή η βέλτιστη ανάθεση των χρονοσχημάτων των καναλιών συχνότητας στις απαιτήσεις κίνησης των χρηστών του δικτύου. Για καλύτερη κατανόηση της επιλογής SS διαδικασιών για την περιγραφή της δικτυακής κίνησης, η προσομοίωση γίνεται αρχικά με ομοιόμορφη πηγή (Uniform) και έπειτα με την πηγή SS που περιγράφηκε προηγουμένως. Ως παράμετροι επίδοσης ανάθεσης της κίνησης των δυο πηχτών χρησιμοποιούνται το ποσοστό μη χρησιμοποίησης του δικτύου (non-utilization parameter) και ο μέσος αριθμός αιτήσεων που εξυπηρετούνται από το σύστημα.

Το ποσοστό μη χρησιμοποίησης του δικτύου εκφράζει το ποσοστό των πόρων του δικτύου που μένουν ανεκμετάλλευτοι ανά πλαίσιο, ενώ ο μέσος αριθμός αιτήσεων που εξυπηρετεί το σύστημα εκφράζει το πλήθος των χρηστών που εξυπηρετήθηκαν από το σύστημα κάποια συγκεκριμένη χρονική στιγμή σε σχέση με το σύνολο των χρηστών που έκαναν αίτηση για χρήση δικτυακών πόρων. Και οι δυο αυτές παράμετροι είναι σημαντικές για την περιγραφή του δορυφορικού δικτύου. Για καλύτερη προσαρμογή στην πραγματική λειτουργία του δικτύου ΔΟΡΥ, πρέπει να γίνει προσομοίωση για το μέγιστο αριθμό των χρηστών που θα υποστηριχθούν από το δίκτυο και να υπολογιστούν τα παραπάνω μεγέθη ώστε να γίνει η βέλτιστη ανάθεση πόρων του δικτύου και η περιγραφή των απαιτήσεων του δικτύου (μέγεθος, τοπολογία, bandwidth), για πρακτικούς και οικονομικούς λόγους.

Παρακάτω παρατίθεται ο κώδικας σε Matlab (τροποποίηση του κώδικα 6.1)

```
function y = traffic
siz=200;
k=1;

x0=simpareto(1,10,1.2,k);
tmp1= round( (x0/(sum(x0))) *siz);
x=sum(x0)/siz;

for i=1:1:sum(tmp1)
    D(1,i)=i;
    E(1,i)=D(1,i)*x;
end

a=1.2;
C1=[simpareto(1,tmp1(1,1),a,k) zeros(1,tmp1(1,2))];
C2=[simpareto(1,tmp1(1,3),a,k) zeros(1,tmp1(1,4))];
C3=[simpareto(1,tmp1(1,5),a,k) zeros(1,tmp1(1,6))];
C4=[simpareto(1,tmp1(1,7),a,k) zeros(1,tmp1(1,8))];
C5=[simpareto(1,tmp1(1,9),a,k) zeros(1,tmp1(1,10))];
```



```

C=[C1 C2 C3 C4 C5];

N=sum(tmp1);
k=1;
M=1;
for i=1:1:M
    for j=1:1:N
        if (C(i,j)<1)
            B(i,j) = 0;
        else B(i,j)=C(i,j);
        end
    end
end

y=zeros(1,siz);
[bp1,temp_var]=size(C);
if temp_var<siz
    for i=1:1:temp_var
        y(i)=round(C(i));
    end
else y=round(C(1:siz));
end

clear x0;
clear tmp1;
clear D;
clear E;

```

Κώδικας 6.5 Μετατροπή του κώδικα 6.1 στη συνάρτηση traffic ώστε να επιστρέφει έναν πίνακα με τις τιμές της SS κίνησης

Το πρόγραμμα 6.5 λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο με το πρόγραμμα του κώδικα 6.1 με τις εξής διαφορές:

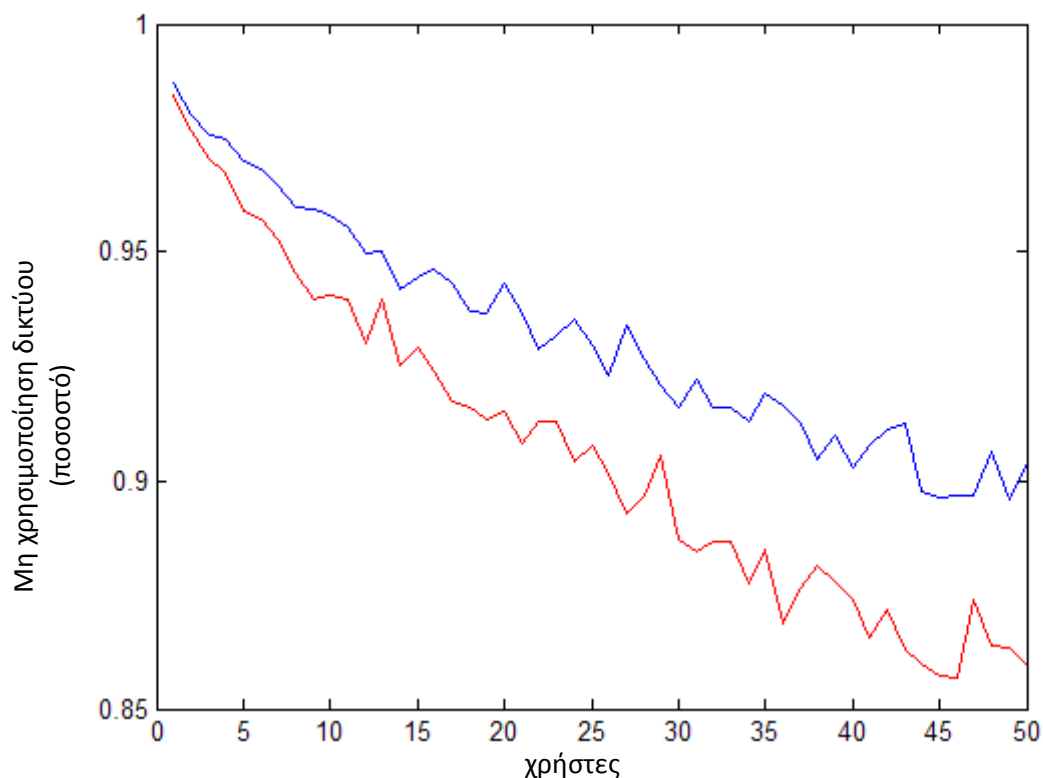
- Έχει μετατραπεί σε συνάρτηση για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μεταβλητή κάποιου άλλου προγράμματος.
- Επιστρέφει έναν πίνακα τιμών SS ορισμένου μεγέθους και αλλαγμένης κλίμακας, διατηρώντας την τυχαιότητα των τιμών.
- Δεν σχεδιάζεται το διάγραμμα κίνησης-χρόνου.

## 6.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης

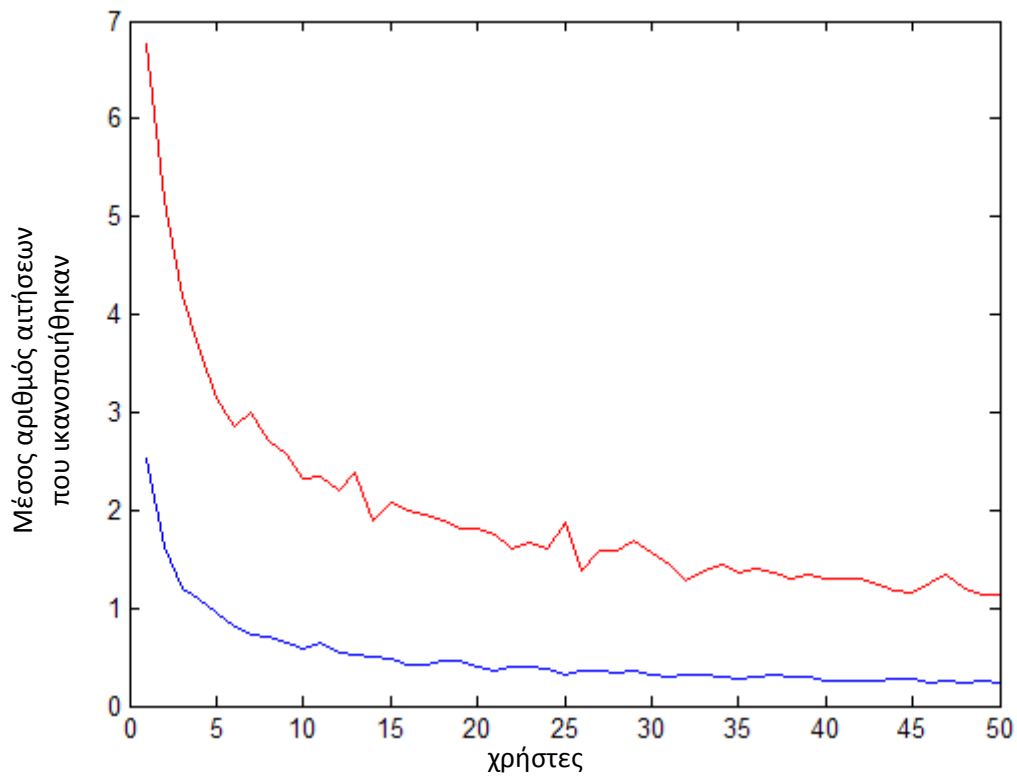
Έτσι, με τη χρήση του κώδικα 6.4 ως όρισμα στον τροποποιημένο αλγόριθμο best-fit, εκτελούμε την προσομοίωση για 10 επαναλήψεις, 50 χρήστες και διαδοχικά για κάθε ένα από τα ζευγάρια χρονοσχημάτων – φέρουσων συχνοτήτων, όπως αυτά φαίνονται στον Πίνακα 5.1 και λαμβάνουμε τις

αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις μη χρησιμοποίησης του δικτύου και μέσου αριθμού αιτήσεων που ικανοποιούνται μέσα σε ένα τυχαίο πλαίσιο MF-TDMA σε σχέση με τον αριθμό χρηστών του δικτύου. Τα δυο αυτά μεγέθη αποτελούν μέτρα επίδοσης του MF-TDMA και είναι κρίσιμα για τη σχεδίαση του δικτύου. Η μη χρησιμοποίηση του δικτύου είναι ένα ποσοστό που δείχνει ακριβώς ποιο τμήμα του συνολικού εύρους ζώνης του δικτύου παραμένει ανεκμετάλλευτο σε κάποια τυχαία χρονική στιγμή λειτουργίας του. Ο μέσος αριθμός αιτήσεων που ικανοποιήθηκαν δείχνει ακριβώς πόσες αιτήσεις ανά χρήστη ικανοποιήθηκαν μέσα σε ένα τυχαίο πλαίσιο του MF-TDMA. Όπως γίνεται αντιληπτό, για την καλύτερη απόδοση ενός δικτύου ο δείκτης μη χρησιμοποίησης πρέπει να παραμένει σε χαμηλά επίπεδα, ενώ ο μέσος αριθμός αιτήσεων που ικανοποιήθηκαν να κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα, ειδικά για μεγαλύτερους αριθμούς χρηστών.

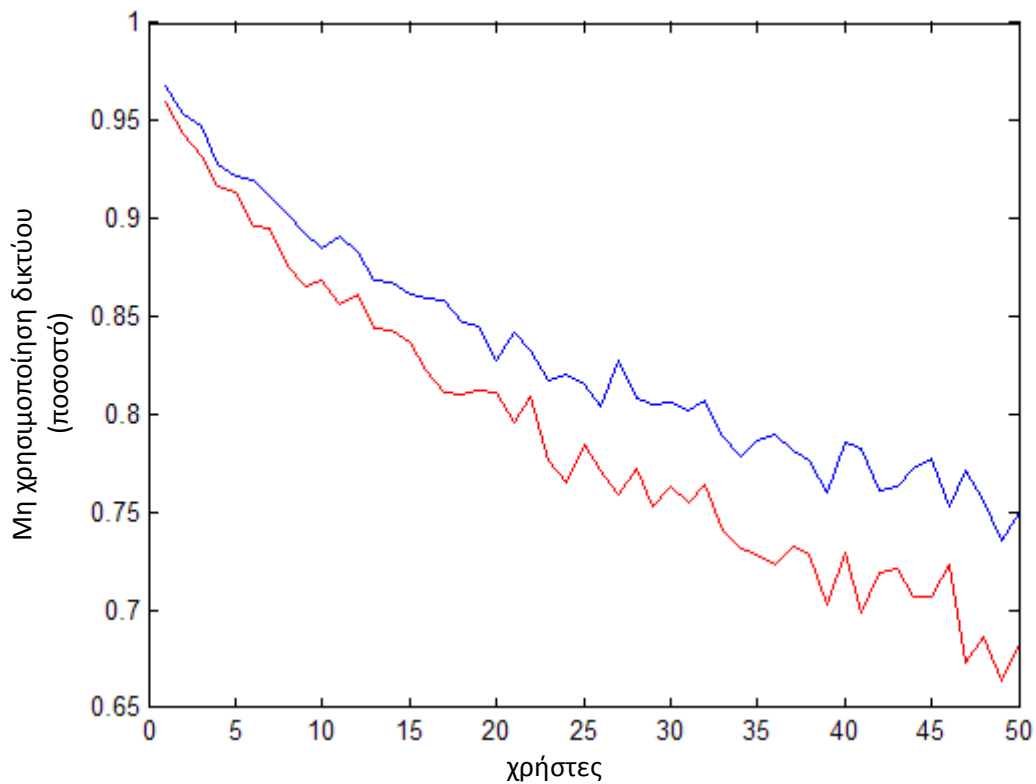
Στη συνέχεια, φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Με το μπλε χρώμα φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις για ομοιόμορφη πηγή (uniform), ενώ με το κόκκινο χρώμα φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις για πηγή Self-Similar. Τέλος, παρατίθενται και συγκριτικά γραφήματα για την καλύτερη επεξεργασία των αποτελεσμάτων αυτών. Τα σχήματα 6.6 έως και 6.13 έχουν γίνει με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab, ενώ τα σχήματα 6.14 έως και 6.17 έχουν γίνει με τη βοήθεια του προγράμματος Excel της Microsoft.



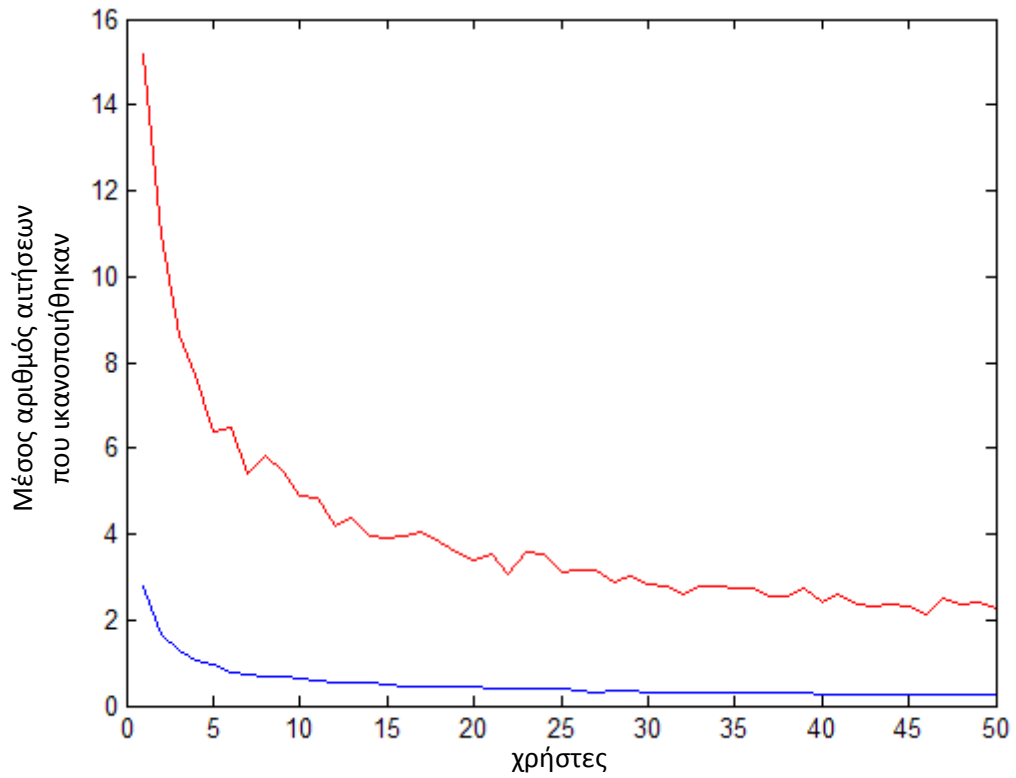
Σχήμα 6.7 Μη χρησιμοποίηση του δικτύου για 9 χρονοσχισμές και 60 φέρουσες συχνότητες



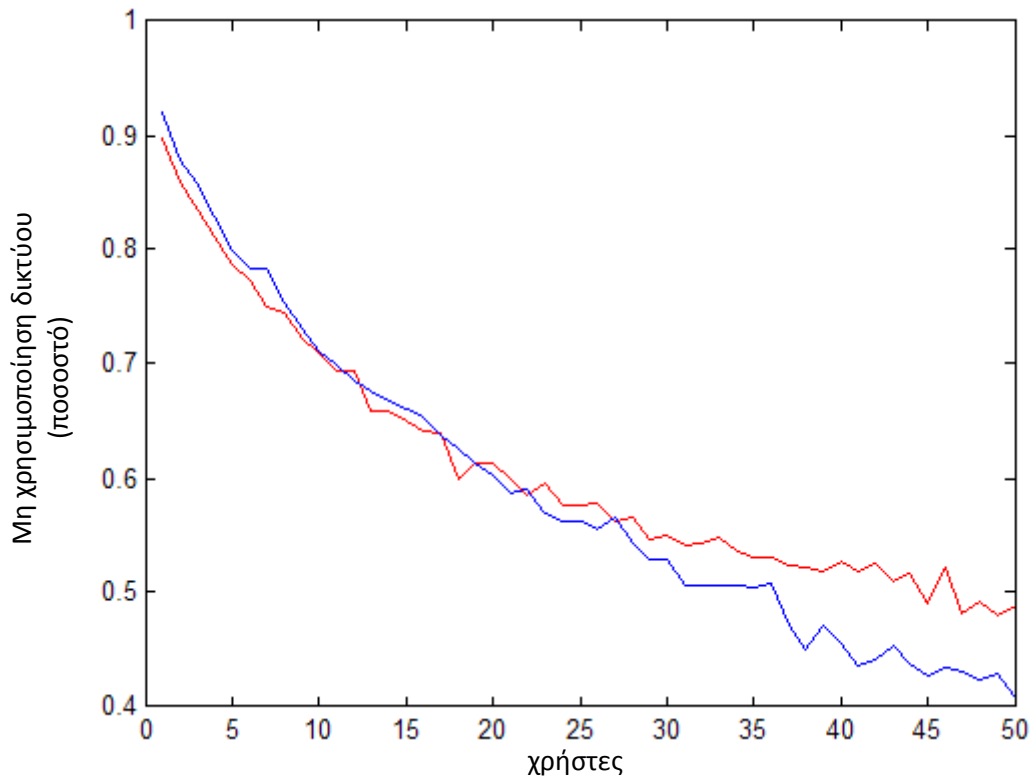
Σχήμα 6.8 Μέσος αριθμός αιτήσεων που ικανοποιήθηκαν για 9 χρονοσχισμές και 60 φέρουσες συχνότητες



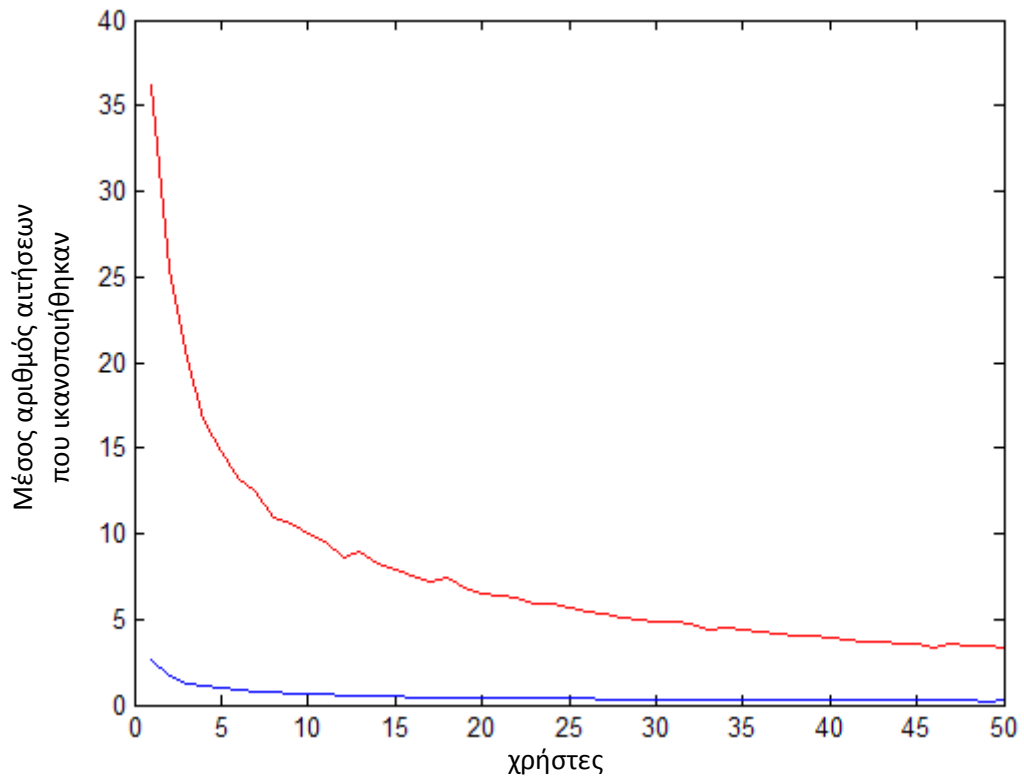
Σχήμα 6.9 Μη χρησιμοποίηση του δικτύου για 24 χρονοσχισμές και 23 φέρουσες συχνότητες



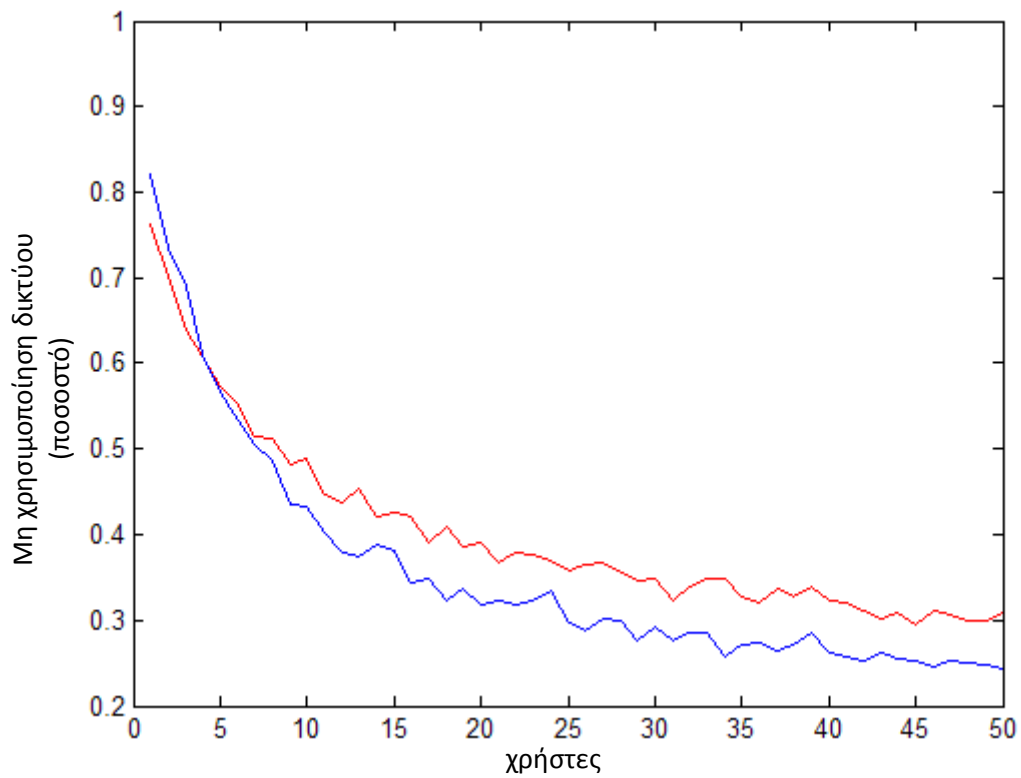
Σχήμα 6.10 Μέσος αριθμός αιτήσεων που ικανοποιήθηκαν για 24 χρονοσχισμές και 23 φέρουσες συχνότητες



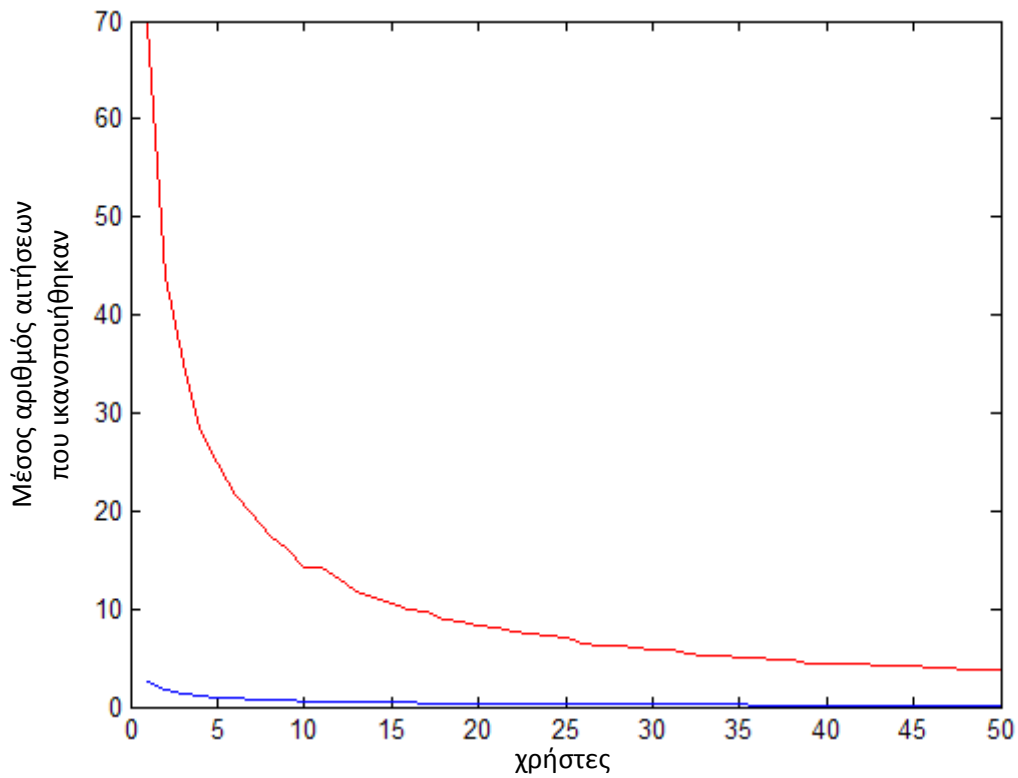
Σχήμα 6.11 Μη χρησιμοποίηση του δικτύου για 64 χρονοσχισμές και 9 φέρουσες συχνότητες



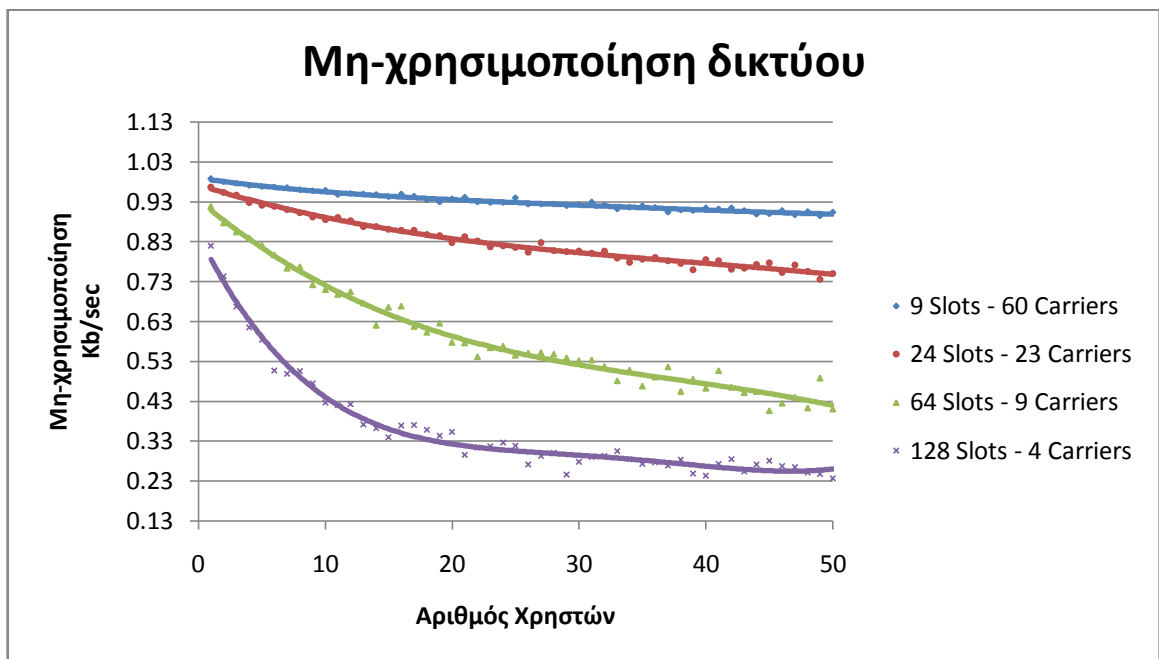
Σχήμα 6.12 Μέσος αριθμός αιτήσεων που ικανοποιήθηκαν για 64 χρονοσχιμές και 9 φέρουσες συχνότητες



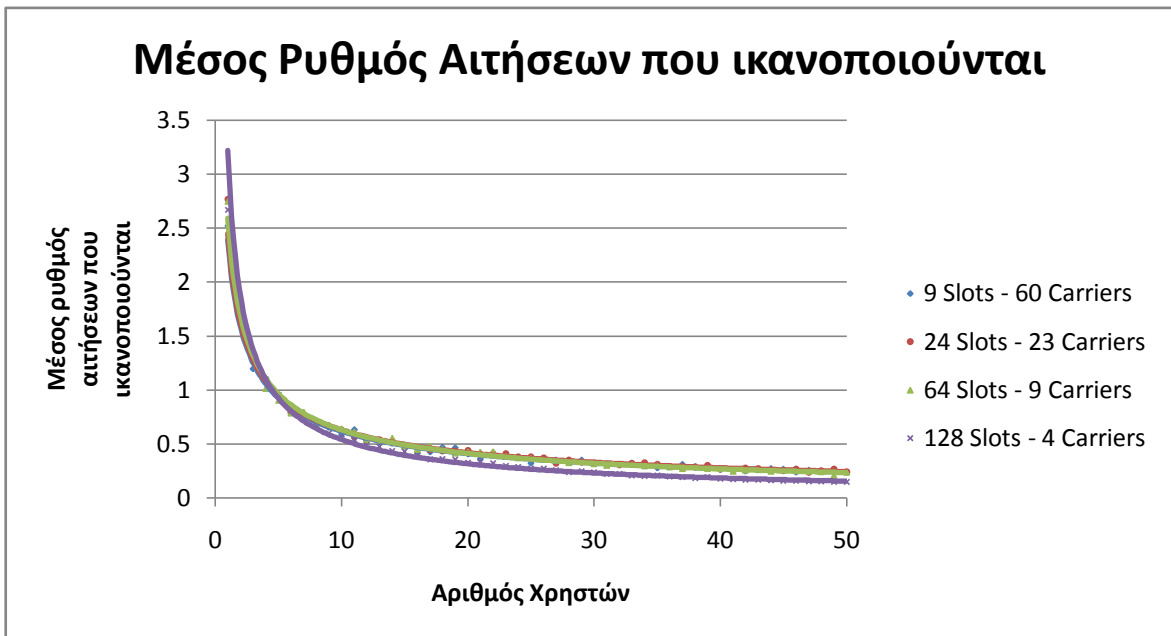
Σχήμα 6.13 Μη χρησιμοποίηση του δικτύου για 128 χρονοσχιμές και 4 φέρουσες συχνότητες



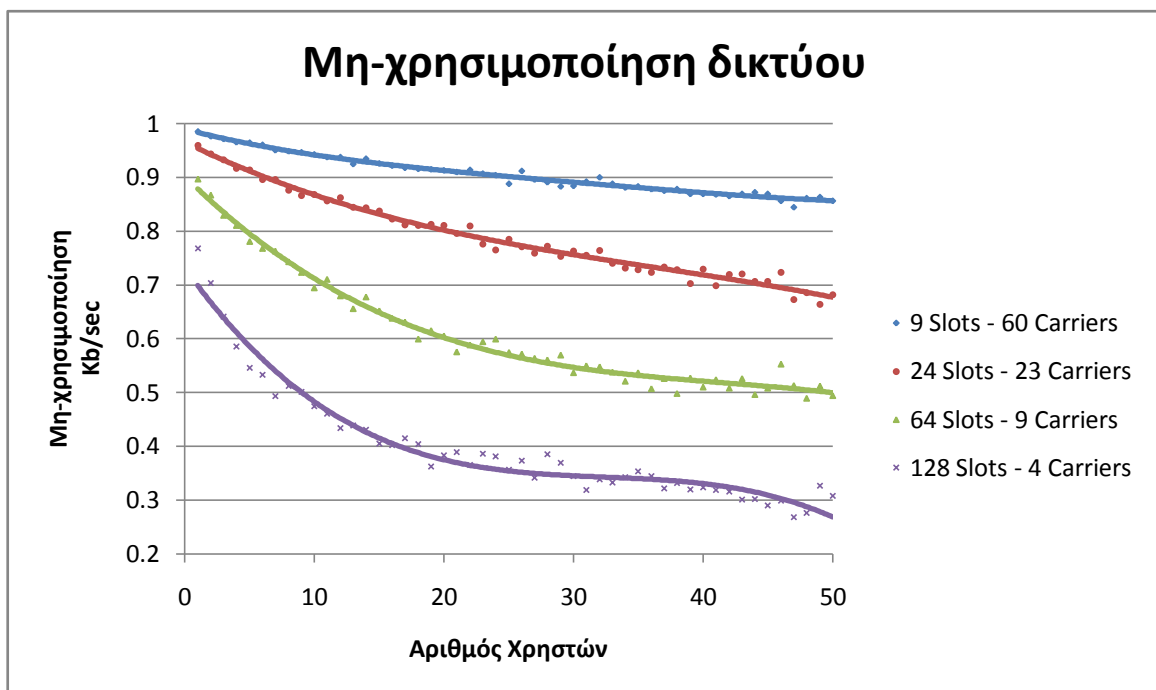
Σχήμα 6.14 Μέσος αριθμός αιτήσεων που ικανοποιήθηκαν για 128 χρονοσχιμές και 4 φέρουσες συχνότητες



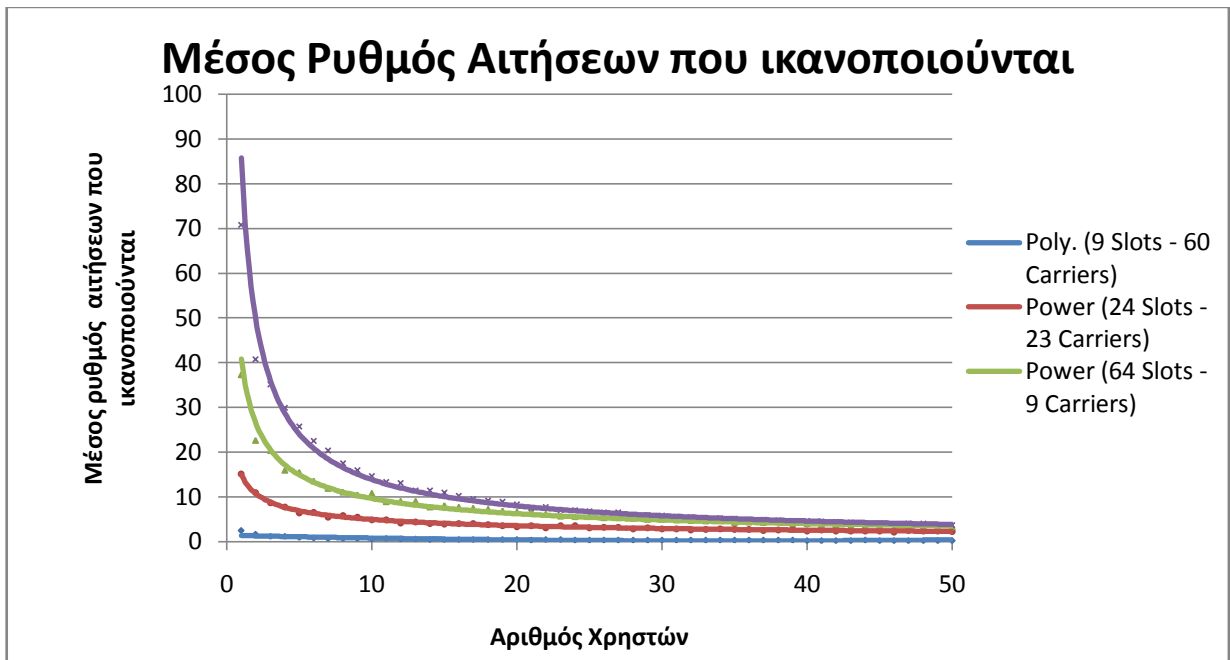
Σχήμα 6.15 Συγκεντρωτικό διάγραμμα μη χρησιμοποίησης δικτύου για τους τέσσερις τύπους σύνθεσης των πλαισίων MF-TDMA για ομοιόμορφη πηγή



Σχήμα 6.16 Συγκεντρωτικό διάγραμμα μέσου αριθμού αιτήσεων που ικανοποιούνται για τους τέσσερις τύπους σύνθεσης των πλαισίων MF-TDMA για ομοιόμορφη πηγή



Σχήμα 6.17 Συγκεντρωτικό διάγραμμα μη χρησιμοποίησης δικτύου για τους τέσσερις τύπους σύνθεσης των πλαισίων MF-TDMA για πηγή Self – Similar



Σχήμα 6.18 Συγκεντρικό διάγραμμα μέσου αριθμού αιτήσεων που ικανοποιούνται για τους τέσσερις τύπους σύνθεσης των πλαισίων MF-TDMA για πηγή Self – Similar



### 6.5.1 Σχόλια και παρατηρήσεις

Καταρχήν πρέπει να εξηγηθούν οι απότομες αυξομειώσεις στις καμπύλες των γραφικών παραστάσεων, ειδικά σε αυτές της μη χρησιμοποίησης του δικτύου. Οι αυξομειώσεις αυτές οφείλονται στον σχετικά μικρό αριθμό επαναλήψεων του αλγορίθμου best-fit. Ο αριθμός επαναλήψεων που έχει επιλεγεί για την προσομοίωση είναι 10, καθώς πρέπει να είναι επαρκώς μικρός, ώστε να μη μεγαλώνει πολύ η πολυπλοκότητα του συνολικού αλγορίθμου του προγράμματος εκχώρησης.

Σε σχέση με τα σχήματα που δείχνουν τη μη χρησιμοποίηση του δικτύου (6.7, 6.9, 6.11, 6.13, 6.15 και 6.17) έχουν να παρατηρούνται τα εξής:

- Όταν το δίκτυο δέχεται αιτήσεις από λίγους χρήστες, το ποσοστό μη χρησιμοποίησης του δικτύου είναι πολύ μεγάλο, πλησιάζοντας το 100%. Μειώνεται με την αύξηση των χρηστών και, κατά συνέπεια, των αιτήσεων καταγισμών κίνησης που δέχεται το δίκτυο.
- Η διαφορά που υπάρχει στις καμπύλες μη χρησιμοποίησης για ομοιόμορφη πηγή κίνησης (uniform) και πηγή Self-Similar (SS) κίνησης δείχνει ακριβώς την ανάγκη για ακριβέστερη αναπαράσταση της κίνησης διαδικτύου με στόχο τη σχεδίαση του δικτύου βέλτιστης αποδοτικότητας. Αυτό φαίνεται από το γεγονός ότι αν λαμβάναμε υπόψη τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την ομοιόμορφη πηγή κίνησης, θα είχαμε λανθασμένη αντίληψη για τις δυνατότητες του δικτύου και λανθασμένη ανάθεση των πόρων του δικτύου στους χρήστες, καθώς από τη σύγκριση των καμπυλών φαίνεται ότι η ομοιόμορφη πηγή εμφανίζει ως επί το πλείστον μεγαλύτερα ποσοστά μη-χρησιμοποίησης από την SS πηγή.
- Η διαφορά που υπάρχει ανάμεσα στις καμπύλες μη χρησιμοποίησης για τις διάφορες συνθέσεις πλαισίων του MF-TDMA (ζεύγη χρονοσχισμών – φερουσών συχνοτήτων) δείχνει τη διαφορά στην απόδοση του δικτύου για τις διάφορες συνθέσεις. Φαίνεται ότι και στις δυο περιπτώσεις πηγών κίνησης, η σύνθεση πλαισίων από 128 χρονοσχισμές και 4 φέρουσες συχνότητες είναι η βέλτιστη για τις ανάγκες εξυπηρέτησης του δορυφορικού δικτύου. Σχετικά καλή απόδοση έχει επίσης και η σύνθεση πλαισίων από 64 χρονοσχισμές και 9 φέρουσες συχνότητες, ενώ τα χειρότερα αποτελέσματα εμφανίζουν οι συνθέσεις 9 χρονοσχισμών – 60 συχνοτήτων και 24 χρονοσχισμών – 23 συχνοτήτων.

Σε σχέση με τα σχήματα που απεικονίζουν το μέσο αριθμό αιτήσεων που ικανοποιούνται ανά χρήστη (6.8, 6.10, 6.12, 6.14, 6.16 και 5.18) παρατηρούνται τα εξής:

- Όταν το δίκτυο δέχεται αιτήσεις από λίγους χρήστες, ο αριθμός αιτήσεων ανά χρήστη που τελικά ικανοποιούνται μέσα σε ένα τυχαίο πλαίσιο είναι μεγάλος, καθώς ο κάθε χρήστης εμφανίζει μεγάλη πιθανότητα να εξυπηρετηθεί μέσα στο συγκεκριμένο πλαίσιο, αφού το δίκτυο λειτουργεί στο ελάχιστο ποσοστό χρησιμοποίησής του (αντίστοιχα μέγιστο ποσοστό μη χρησιμοποίησης), πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχει διαθέσιμο εύρος ζώνης να εκχωρηθεί σε όποιον χρήστη το ζητήσει. Ο αριθμός αιτήσεων ανά χρήστη μειώνεται με την αύξηση των χρηστών και κατά συνέπεια των αιτήσεων εκρήξεων κίνησης που δέχεται το δίκτυο, καθώς περισσότεροι χρήστες συνεπάγονται μικρότερο διαθέσιμο προς εκχώρηση εύρος ζώνης, άρα και μικρότερη πιθανότητα ικανοποίησης των αιτήσεών τους.
- Η μεγάλη διαφορά που υπάρχει ανάμεσα στις καμπύλες αιτήσεων που ικανοποιήθηκαν ανά χρήστη για ομοιόμορφη πηγή κίνησης (uniform) και πηγή Self-Similar (SS) κίνησης, δείχνει εντονότερα την ανάγκη για ακριβέστερη αναπαράσταση της κίνησης διαδικτύου για την επίτευξη του σχεδιασμού του δικτύου βέλτιστης αποδοτικότητας. Αυτό φαίνεται από το γεγονός ότι αν λαμβάναμε υπόψη τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την πηγή ομοιόμορφης κίνησης, θα είχαμε λανθασμένη αντίληψη για τις δυνατότητες του δικτύου και λανθασμένη ανάθεση των πόρων του δικτύου στους χρήστες, καθώς από τη σύγκριση των καμπυλών φαίνεται ότι η ομοιόμορφη πηγή εμφανίζει πολύ μικρότερα αποτελέσματα εξυπηρέτησης ανά χρήστη σε σύγκριση με τα μεγαλύτερα αποτελέσματα που λαμβάνονται από την προσομοίωση για την SS πηγή.

- Η μικρή αλλά ουσιαστική διαφορά που υπάρχει στις καμπύλες αιτήσεων που ικανοποιήθηκαν ανά χρήστη για τις διάφορες συνθέσεις πλαισίων του MF-TDMA (ζεύγη Χρονοσχισμών – Φερουσών συχνοτήτων) στην περίπτωση SS πηγής κίνησης δείχνει τη διαφορά στην απόδοση του δικτύου για τις διάφορες συνθέσεις. Φαίνεται ότι στην περίπτωση ομοιόμορφης πηγής κίνησης η σύνθεση πλαισίων παίζει πολύ μικρό ρόλο στην εξυπηρέτηση των χρηστών του δικτύου. Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση SS πηγής κίνησης, οι διαφορές μεταξύ των καμπυλών για τις διάφορες συνθέσεις πλαισίων μεγαλώνει. Από το συγκριτικό γράφημα 6.17 βλέπουμε ότι από ένα πλήθος χρηστών και πέρα (περί το 35) οι καμπύλες εμφανίζουν σύγκλιση τιμών (ελάχιστη τιμή εξυπηρέτησης). Η καμπύλη που περιγράφει τη σύνθεση πλαισίων από 128 χρονοσχισμές και 4 φέρουσες συχνότητες είναι η βέλτιστη, με μικρή διαφορά, για τις ανάγκες εξυπηρέτησης του δορυφορικού δικτύου. Καλή απόδοση έχει επίσης και η σύνθεση πλαισίων από 64 χρονοσχισμές και 9 φέρουσες συχνότητες, ενώ τα χειρότερα αποτελέσματα εμφανίζουν οι συνθέσεις 9 χρονοσχισμών – 60 συχνοτήτων και 24 χρονοσχισμών – 23 συχνοτήτων.

Από ό,τι φαίνεται, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το μέσο αριθμό αιτήσεων που ικανοποιήθηκαν συμφωνούν ποιοτικά με τα αποτελέσματα για τη μη χρησιμοποίηση δικτύου, ότι δηλαδή η σύνθεση πλαισίων από 128 χρονοσχισμές και 4 φέρουσες συχνότητες θα αποφέρει τη βέλτιστη απόδοση στο δίκτυο. Επιπλέον, παρατηρήθηκαν καλύτερες επιδόσεις για το δίκτυο με την αύξηση του αριθμού των χρονοσχισμών και την ταυτόχρονη μείωση του αριθμού των καναλιών συχνοτήτων. Κάτι τέτοιο ήταν αναμενόμενο, καθώς αυξάνοντας τον αριθμό χρονοσχισμών, προκύπτει μεγαλύτερη κατάτμηση στο διαθέσιμο εύρος ζώνης και, συνεπώς, δικαιότερο καταμερισμό των διαθέσιμων πόρων στους χρήστες .

## 6.5.2 Σύνοψη και τελικά συμπεράσματα

Στόχος της διπλωματικής αυτής εργασίας ήταν η περιγραφή των σημαντικότερων κατασκευαστικών χαρακτηριστικών που μπορούν να αξιοποιηθούν για τη βέλτιστη σχεδίαση ενός δορυφορικού δικτύου Τερματικών Πολύ Μικρού Ανοίγματος (VSAT), ακολουθώντας τις προδιαγραφές που περιγράφονται στη διακήρυξη του έργου ΔΟΡΥ της Ελληνικής Κυβέρνησης. Όπως έχει προαναφερθεί, ο σχεδιασμός κάθε δορυφορικού δικτύου αποβλέπει στη βέλτιστη χρησιμοποίηση της διαθέσιμης χωρητικότητας και τη μεγιστοποίηση του υποστηριζόμενου αριθμού χρηστών με παράλληλη ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους.

Αρχικά υπολογίστηκαν οι σημαντικές παράμετροι των δορυφορικών ζεύξεων και καταστρώθηκε ο Πίνακας Ισοζυγίου Ισχύος. Στους Πίνακες 3.4 και 3.5 παρουσιάζονται αναλυτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ΔΟΡΥ και περιγράφονται πλήρως οι περιορισμοί αλλά και οι δυνατότητες του δικτύου. Στη συνέχεια προσδιορίστηκε και προσομοιώθηκε η κίνηση διαδικτύου (IP traffic). Η κίνηση αυτή, όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4, εμφανίζει ιδιότητες αυτό-όμοιων (SS) διαδικασιών, είναι εκρηκτική και μη προβλέψιμη. Για τη βέλτιστη χρησιμοποίηση όμως της χωρητικότητας του δικτύου απαιτείται η ενσωμάτωση μιας τεχνολογίας πολλαπλής προσπέλασης. Όπως είναι γνωστό, το σχήμα πολλαπλής προσπέλασης που υιοθετείται από τα περισσότερα δορυφορικά δίκτυα VSAT που ακολουθούν το πρότυπο DVB-RCS είναι το MF-TDMA.

Το δίκτυο δέχεται αιτήσεις από τους χρήστες που περιμένουν να εξυπηρετηθούν και αφού εγκατασταθεί η σύνδεση των τερματικών με τον κεντρικό σταθμό, η μεταφορά δεδομένων δημιουργεί εκρήξεις SS κίνησης. Με την υιοθέτηση του σχήματος MF-TDMA, το πρόβλημα εκχώρησης του διαθέσιμου εύρους ζώνης στους χρήστες του δικτύου ανάγεται στο πρόβλημα ανάθεσης του κατάλληλου αριθμού χρονοσχισμών. Για την επίλυση του προβλήματος αυτού, πρέπει ο αριθμός των χρονοσχισμών να ικανοποιεί τις απαιτήσεις σε Ποσοστό Λαθών.

Αρχικά γίνεται προσομοίωση της κίνησης IP με τη χρήση πηγής ON/OFF, η οποία ακολουθεί την κατανομή Pareto. Στην προσομοίωση εκχώρησης χρονοσχισμών χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος Best-fit, με σκοπό να μεγιστοποιηθεί η χρησιμοποίηση του Πλάνου TBTP του MF-TDMA, δηλαδή το ποσοστό των χρονοσχισμών που έχουν εκχωρηθεί να γίνεται ελάχιστο.

Η προσομοίωση έγινε για όλους τους συνδυασμούς χρονοσχισμών – συχνοτήτων (9-60, 24-23, 64-9 και 128-4). Ως μέτρα απόδοσης του δικτύου DVB-RCS επιλέχθηκαν το ποσοστό μη χρησιμοποίησης και ο μέσος αριθμός αιτήσεων που ικανοποιούνται μέσα στα χρονικά πλαίσια μιας συγκεκριμένης χρονοσχισμής. Τα γραφικά αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι το δίκτυο εμφανίζει καλύτερη απόδοση για μεγαλύτερο αριθμό χρονοσχισμών, πράγμα που ήταν αναμενόμενο, καθώς για ένα μεγάλο αριθμό χρηστών το εύρος ζώνης διαμοιράζεται δικαιότερα ανάμεσα στους αιτούμενους χρήστες. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν τελικά ότι το MF-TDMA αποδίδει τα βέλτιστα για το δίκτυο, όταν η κίνηση εκχωρείται σε 128 χρονοσχισμές τεσσάρων καναλιών συχνοτήτων. Τέλος, τα προγράμματα προσομοίωσης, με ενσωμάτωση των τεχνικών χαρακτηριστικών του δικτύου ΔΟΡΥ, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην έρευνα για τον καλύτερο σχεδιασμό του.

## 6.6 Βιβλιογραφία

- [1] "The Mathworks - MATLAB and Simulink for Technical Computing". from <http://www.mathworks.com/> , The Mathworks Inc. ( September 2007).
- [2] "Stochastic simulation using MATLAB. Retrieved September 2007", from Department of Mathematics: <http://www.math.uu.se/research/telecom/software>, Upsalla University (September 2007)
- [3] J.Walrand, " Δίκτυα Επικοινωνιών", Μετάφραση από τον Μ.Αναγνώστου, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα [1997]
- [4] L.Guo, M.Crovella, I.Matta, "How does TCP generate Pseudo-Self-Similarity?", IEEE, [2001]