



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**Το Νέο Δορυφορικό Πρότυπο Εκπομπής
DVB-S2: Θέματα Ενθυλάκωσης, Σηματοδοσίας και Συμβατότητας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ηλίας Γ. Τσαγκλής

Επιβλέπων: Παναγιώτης Κωττής

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2006



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**Το Νέο Δορυφορικό Πρότυπο Εκπομπής
DVB-S2: Θέματα Ενθυλάκωσης, Σηματοδοσίας και Συμβατότητας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ηλίας Γ. Τσαγκλής

Επιβλέπων: Παναγιώτης Κωττής

.....
Π. Κωττής
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Χ. Καγάλης
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ι. Κανελλόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2006

.....
Ηλίας Γ. Τσαγκλής

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

Copyright © Ηλίας Γ. Τσαγκλής, 2006

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.

Ευχαριστήριο Σημείωμα

Ολοκληρώνοντας την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας και τις προπτυχιακές μου σπουδές στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών θα ήθελα εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους υπήρξαν στήριγμα στην προσπάθειά μου αυτή.

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας Καθηγητή ΕΜΠ κ. Π. Κωττή για την επίβλεψη της παρούσας εργασίας, αλλά και για το σπουδαίο διδακτικό του έργο καθ' όλη τη διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υπεύθυνο φοιτητή, υποψήφιο διδάκτορα Παντελή Αράπογλου για την άψογη συνεργασία που είχαμε. Οι χρήσιμες υποδείξεις του και οι γνώσεις του πάνω στο αντικείμενο έπαιξαν καταλυτικό ρόλο στη διεξαγωγή της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη συμπαράστασή τους σε όλες μου τις προσπάθειες, αλλά και όσους από τους καθηγητές του ΕΜΠ συνέβαλαν στη διαμόρφωση του γνωστικού μου υποβάθρου.

Το Νέο Δορυφορικό Πρότυπο Εκπομπής

DVB-S2: Θέματα Ενθυλάκωσης, Σηματοδοσίας και Συμβατότητας

Περίληψη

Σκοπός της συγγραφής της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του νέου δορυφορικού προτύπου εκπομπής με ονομασία DVB-S2. Το DVB-S2 αποτελεί τη δεύτερη γενιά προτύπων δορυφορικής μετάδοσης διαδεχόμενο το πολύ επιτυχημένο DVB-S (Digital Video Broadcasting – Satellite), που χρησιμοποιείται σήμερα από τους περισσότερους δορυφορικούς παρόχους υπηρεσιών. Με το DVB-S2 επιτυγχάνονται καλύτερες επιδόσεις αναφορικά με το ρυθμό μετάδοσης και είναι δυνατή η εισαγωγή νέων, καινοτόμων εφαρμογών.

Αρχικά πραγματοποιείται μια εισαγωγή στις δορυφορικές επικοινωνίες. Εξετάζονται οι δυσμενείς επιδράσεις της ατμόσφαιρας και μελετώνται διάφορες τεχνικές άμβλυνσης των διαλείψεων. Επίσης, παρουσιάζονται ορισμένες σύγχρονες εφαρμογές των δορυφορικών συστημάτων.

Στη συνέχεια αναλύονται τα δορυφορικά πρότυπα DVB-S και DVB-S2, παρουσιάζονται λεπτομερώς οι αρχιτεκτονικές μετάδοσής τους και εξετάζεται η συμβατότητά τους. Καταλυτικό ρόλο στην υλοποίηση του νέου προτύπου διαδραματίζει η υιοθέτηση της τεχνικής Προσαρμοστικής Κωδικοποίησης και Διαμόρφωσης (Adaptive Coding and Modulation, ACM). Η σύγκριση των δυο προτύπων δείχνει μια σημαντική βελτίωση της απόδοσης του συστήματος όταν χρησιμοποιείται το DVB-S2.

Σημαντικό τμήμα της εργασίας αποτελεί η μελέτη της ενθυλάκωσης πακέτων IP στα συστήματα ACM DVB-S2 και στα πλαίσιά της εξετάζονται τα πρωτόκολλα ενθυλάκωσης MPE και ULE. Αφού προηγηθεί θεωρητική και αριθμητική ανάλυση της απόδοσης ενθυλάκωσης ανά επίπεδο, με χρήση του λογισμικού πακέτου Matlab μελετώνται διάφορα σενάρια ενθυλάκωσης που πιθανόν να αντιμετωπίσει ένα σύστημα DVB-S2, καθώς και η ολική απόδοση ενθυλάκωσης.

Επιπλέον, παρουσιάζονται διάφορες υλοποιήσεις με βάση το πρωτόκολλο DVB-S2 και μελετάται η αρχιτεκτονική του συστήματος για κάθε μια από αυτές. Η παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με αναφορά και σύντομη ανάλυση κάποιων νέων, καινοτόμων υπηρεσιών που αναμένεται να διαδοθούν ευρύτατα τα προσεχή έτη.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Ραδιοσυχνότητες, Δυνατότητες επεξεργασίας επί του δορυφόρου, Ποσοστό εσφαλμένων ψηφίων, Πιθανότητα εσφαλμένου ψηφίου, Διαλείψεις, Διαμόρφωση φάσης, Διαφορική λήψη, Εκπομπή ψηφιακού βίντεο, Προσαρμοστική κωδικοποίηση και διαμόρφωση, Ενθυλάκωση, Ευρυεκπομπή, Πολυπλεξία MPEG, Λόγος σήματος προς θόρυβο, Ποιότητα υπηρεσίας

The New Satellite Broadcasting Protocol DVB-S2: Encapsulation, Signaling and Compatibility Issues

Abstract

The purpose of the present diploma thesis is an overall presentation and study of the new satellite broadcasting protocol, DVB-S2. DVB-S2 constitutes the second generation of satellite broadcasting protocols and is the successor of the very successful first generation protocol DVB-S (Digital Video Broadcasting – Satellite), which is nowadays used by the majority of the satellite service providers. DVB-S2 exhibits an improved performance in terms of transmission rate and it facilitates the implementation of new, pioneering applications.

In the first part of the thesis, an introduction on satellite communications is carried out. Among others, the aggravating atmospheric effects and the relevant mitigation are outlined. Furthermore, a number of modern satellite oriented services are presented.

Afterwards, an analysis of the satellite standards DVB-S and DVB-S2 follows. The structural design of the transmission system is presented in detail and the compatibility of the two standards is inspected. The use of the Adaptive Coding and Modulation (ACM) technique plays a crucial role in the implementation of the new standard. A comparison of the two systems reveals a significant increase in the efficiency of system when DVB-S2 is adopted.

A substantial part of this work concerns the study of the IP packets encapsulation over ACM DVB-S2 systems. In this context, MPE and ULE encapsulation protocols are discussed. After the theoretical and numerical analysis of the encapsulation efficiency (per layer) is completed, some common scenarios of a DVB-S2 system, as well as the total encapsulation efficiency, are examined using the Matlab software.

Moreover, various implementations based on the DVB-S2 protocol are presented and the architectures of the corresponding systems are studied. The present diploma thesis is concluded after presenting a brief analysis on some new, pioneering services which are expected to become very popular in the following years.

KEY WORDS: Radiofrequencies, On board processing (OBP), Bit Error Ratio (BER), Bit Error Probability (BEP), Fading, Phase Shift Keying (PSK), Diversity, Digital Video Broadcasting (DVB), Encapsulation, Broadcast, MPEG Multiplexing, Signal to noise ratio (SNR), Quality of Service (QoS)

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ 17

1.1 Γενικά 17

1.2 Τι είναι δορυφόρος - Είδη τροχιών 18

1.3 Δομή ενός δορυφορικού συστήματος 20

1.3.1 Διαστημικό τμήμα (space segment) 21

1.3.2 Επίγειο τμήμα (ground segment) 23

1.4 Δορυφορικό ραδιοφάσμα 23

1.5 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί της χρήσης υψηλών συχνοτήτων 26

1.6 Δυσμενείς επιδράσεις της ατμόσφαιρας 28

1.7 Τεχνικές άμβλυνσης των διαλείψεων 30

1.7.1 Τεχνικές ελέγχου της ισχύος 32

1.7.2 Τεχνικές προσαρμοστικής μετάδοσης 34

1.7.3 Σχήματα διαφορικής προστασίας 35

1.8 Εφαρμογές και περιορισμοί των συστημάτων δορυφορικών επικοινωνιών 40

1.8.1 Εφαρμογές τηλεόρασης, βίντεο και ήχου 41

1.8.2 Σταθερή τηλεφωνία 44

1.8.3 Υπηρεσίες δεδομένων και δικτύων ευρείας ζώνης 45

1.8.4 Υπηρεσίες κινητών τηλεπικοινωνιών 51

1.8.5 Μειονεκτήματα και περιορισμοί 53

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΤΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ DVB-S ΚΑΙ DVB-S2 55

2.1 MPEG και DVB 55

2.2 Εισαγωγή στο DVB-S 57

2.3 Βασικές έννοιες του DVB-S 59

2.3.1 Απαιτήσεις των συστημάτων DVB-S και DVB-DSNG

2.3.2 Συνθήκες μετάδοσης στο δορυφορικό κανάλι και βελτιστοποίηση μετάδοσης 60

2.3.3 Αρχιτεκτονική μετάδοσης 60

2.3.4 Δομή του πλαισίου DVB-S 61

2.3.5 Τυχαιοποίηση των ψηφίων	62
2.3.6 Κωδικοποίηση για προστασία από σφάλματα	63
2.3.7 Είδη ψηφιακής διαμόρφωσης	64
2.4 Ευελιξία και απόδοση του συστήματος DVB-S	64
2.4.1 Ρυθμός μετάδοσης σε σχέση με εύρος ζώνης αναμεταδότη	64
2.4.2 Σηματοθορυβικός λόγος ως προς ποσοστό λανθασμένων ψηφίων	67
2.5 Εισαγωγή στο DVB-S2	68
2.6 Αρχιτεκτονική μετάδοσης του συστήματος DVB-S2	69
2.6.1 Κωδικοποίηση	71
2.6.2 Διαμόρφωση	72
2.7 Δομή πλαισίου στο DVB-S2	73
2.7.1 Πλαισίωση φυσικού στρώματος	73
2.7.2 Πλαισίωση στρώματος βασικής ζώνης	74
2.8 Χρήση προσαρμοστικής κωδικοποίησης και διαμόρφωσης	75
2.9 Συμβατότητα με τα συστήματα DVB-S	78
2.10 Σύγκριση απόδοσης συστημάτων DVB-S και DVB-S2	79

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΝΘΥΛΑΚΩΣΗ ΠΑΚΕΤΩΝ IP ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ACM DVB-S2	82
3.1 Εισαγωγή	82
3.2 Ανάλυση της ενθυλάκωσης	82
3.3 Η ενθυλάκωση MPE	85
3.4 Η ενθυλάκωση ULE	87
3.5 Σύγκριση ενθυλακώσεων MPE και ULE	90
3.6 Θεωρητική ανάλυση της απόδοσης ενθυλάκωσης	91
3.6.1 Απόδοση ενθυλάκωσης MPEG (MPEG encapsulation efficiency)	93
3.6.2 Απόδοση ενθυλάκωσης της προσαρμογής ροής εισόδου (Mode and Stream Encapsulation efficiency)	94
3.6.3 Απόδοση πλαισίωσης (Framing efficiency)	95
3.7 Αριθμητική ανάλυση της απόδοσης ενθυλάκωσης ανά επίπεδο	97
3.7.1 Απόδοση ενθυλάκωσης MPEG-2 (MPEG-2 encapsulation efficiency)	97
3.7.2 Απόδοση της προσαρμογής ροής εισόδου (Mode and Stream Encapsulation efficiency)	100
3.7.3 Απόδοση πλαισίωσης (Framing efficiency)	102

3.8 Αριθμητικά αποτελέσματα απόδοσης ενθυλάκωσης ανά επίπεδο	103
3.8.1 Απόδοση ενθυλάκωσης MPEG-2 (MPEG-2 encapsulation efficiency)	103
3.8.2 Απόδοση της προσαρμογής ροής εισόδου (Mode and Stream Encapsulation efficiency)	105
3.8.3 Απόδοση πλαισίωσης (Framing efficiency)	111
3.8.4 Ολική απόδοση ενθυλάκωσης (Total encapsulation efficiency)	112

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ DVB-S2

4.1 Εισαγωγή	116
4.2 Εκπομπή ψηφιακού τηλεοπτικού σήματος με σταθερή κωδικοποίηση και διαμόρφωση (CCM Digital TV broadcasting)	119
4.3 Εκπομπή ψηφιακού τηλεοπτικού σήματος Κανονικής και Υψηλής Ευκρίνειας (SDTV and HDTV broadcasting)	121
4.4 Διανομή πολλαπλών ρευμάτων μεταφοράς σε επίγειους αναμεταδότες (Distribution of multiple TS multiplexes to DTT transmitters)	123
4.5 Υπηρεσίες συλλογής ειδήσεων με χρήση προσαρμοστικής κωδικοποίησης και διαμόρφωσης (DSNG over ACM)	125
4.6 Υπηρεσίες εκπομπής IP σε μοναδικό χρήστη (IP unicast services)	127
4.6.1 Πρόσβαση ευρείας ζώνης στο διαδίκτυο (Broadband Internet access)	132
4.6.2 Πρόσβαση σε ενδοδίκτυο (Intranet access)	133
4.6.3 Λήψη βίντεο κατόπιν ζήτησης (Video on Demand, VoD)	133
4.6.4 Μετάδοση φωνής πάνω από IP (VoIP)	134
4.7 Εκπομπή προς πολλαπλούς χρήστες (Multicasting)	137
4.7.1 Υπηρεσία πολυδιάσκεψης (IP multiconference)	137
4.7.2 Ροή κινούμενης εικόνας και ήχου (Video and audio streaming)	138
4.7.3 Διασύνδεση τοπικών δικτύων (LAN interconnection)	139

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1°

1.1 Γεωμετρία σχήματος διπλής διαφορικής λήψης θέσης	38
1.2 Γεωμετρία σχήματος διπλής διαφορικής λήψης τροχιάς	39
1.3 Παροχή πρόσβασης στο διαδίκτυο μέσω δορυφόρου	47
1.4 Δίκτυα VSAT σε τοπολογία αστέρα	48
1.5 Δίκτυο VSAT σε τοπολογία πλέγματος	48
1.6 Μονόδρομη σύνδεση στο διαδίκτυο μέσω δορυφόρου	49
1.7 Αμφίδρομη σύνδεση στο διαδίκτυο μέσω δορυφόρου	49

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°

2.1 Το σύστημα DVB για δορυφορική ψηφιακή τηλεόραση	61
2.2 Δομή πολυπλεξίας και μετάδοσης	62
2.3 Υποβάθμιση του Eb/No εξαιτίας των περιορισμών στο εύρος ζώνης του Αναμεταδότη (BW)	66
2.4 Λειτουργικό μπλοκ διάγραμμα του συστήματος DVB-S2	69
2.5 Οι τέσσερις πιθανοί αστερισμοί για τη διαμόρφωση	73
2.6 Λειτουργικό διάγραμμα μιας DVB-S2 ACM ζεύξης	77
2.7 Τα πλαίσια φυσικού επιπέδου αλλάζουν προστασία κατά τη διάρκεια διάλειψης λόγω βροχής	78
2.8 Απαιτούμενος CNR λόγος σε σχέση με τη φασματική απόδοση	80
2.9 Παραδείγματα του Ru σε σχέση με τον απαιτούμενο CNR για δορυφόρο σε διάταξη απλού φέροντος ανά αναμεταδότη	81

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3°

3.1 Η αρχιτεκτονική διεπαφών του DVB-S2 που χρησιμοποιεί ACM	83
3.2 Επικεφαλίδα MPE	86
3.3 Ελάχιστη επικεφαλίδα ULE	88
3.4 ULE με και χωρίς πακετάρισμα	89
3.5 Απόδοση ενθυλάκωσης για μετάδοση IP πάνω από MPEG ως συνάρτηση του μεγέθους των πακέτων IP (σε bytes)	104
3.6 Απόδοση ενθυλάκωσης για την περίπτωση ενός πακέτου IP ανά (κανονικό) πλαίσιο	106

3.7 Απόδοση ενθυλάκωσης για την περίπτωση ενός πακέτου IP ανά (σύντομο) πλαίσιο	107
3.8 Εξάρτηση της απόδοσης ενθυλάκωσης από το ρυθμό κωδικοποίησης (single packet)	107
3.9 Απόδοση ενθυλάκωσης στο επίπεδο mode and stream adaptation ως συνάρτηση του code rate (περίπτωση normal FECFRAME)	108
3.10 Απόδοση ενθυλάκωσης στο επίπεδο mode and stream adaptation ως συνάρτηση του code rate (περίπτωση short FECFRAME)	109
3.11 Απόδοση ενθυλάκωσης στο επίπεδο mode and stream adaptation ως συνάρτηση του μήκους πακέτων IP (περίπτωση normal FECFRAME)	110
3.12 Σύγκριση ολικής απόδοσης ενθυλάκωσης και απόδοσης DVB-S2 (normal FECFRAME)	112
3.13 Σύγκριση ολικής απόδοσης ενθυλάκωσης και απόδοσης DVB-S2 όταν επιτρέπεται concatenation	113
3.14 Σύγκριση ολικής απόδοσης και απόδοσης DVB-S2, όταν δεν επιτρέπεται και όταν επιτρέπεται το concatenation	114

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

4.1 Ωφέλιμοι ρυθμοί μετάδοσης συναρτήσει του ρυθμού κωδικοποίησης του συνελκτικού κωδικοποιητή	120
4.2 Διάταξη συστήματος DVB-S2 για την εκπομπή SDTV και HDTV με χρήση VCM	122
4.3 Διάταξη συστήματος DVB-S2 για διανομή πολλαπλών σημάτων DTT μέσω δορυφόρου	125
4.4 Σχήματα μετάδοσης και λήψης (απλό ρεύμα μεταφοράς TS, ομοιόμορφη προστασία για μεγάλα χρονικά διαστήματα)	126
4.5 Παράδειγμα υπηρεσιών IP με χρήση ζεύξης DVB-S2 ACM	128
4.6 Εκπομπή IP προς μοναδικό χρήστη (IP unicasting) και χρήση τεχνικής ACM (περίπτωση πολλαπλών ρευμάτων εισόδου με ομοιόμορφη προστασία ανά ρεύμα)	131

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

1.1	Δορυφορικές ζώνες συχνότητων και αντίστοιχες υπηρεσίες	25
2.1	Απόδοση δορυφορικού DVB συστήματος για διάφορες λειτουργίες	68
3.1	Παράμετροι κωδικοποίησης για κανονικό πλαίσιο FECFRAME (64800 bits)	101
3.2	Παράμετροι κωδικοποίησης για σύντομο πλαίσιο FECFRAME (16400 bits)	101
3.3	Απόδοση πλαισίωσης για διάφορα σχήματα διαμόρφωσης	111
3.4	Ολική απόδοση ενθυλάκωσης συναρτήσει του ποσοστού payload occupancy	115

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών ο χώρος των τηλεπικοινωνιών γνώρισε αλματώδη ανάπτυξη σε παγκόσμια κλίμακα. Κυριότερη αιτία ήταν η διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση των χρηστών για τις προσφερόμενες τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες και η απαίτηση της αγοράς για συνεχή βελτίωση των υπηρεσιών αυτών. Ταυτόχρονα, η τεχνολογική έρευνα στον τομέα των τηλεπικοινωνιών, αλλά και σε συναφείς τομείς, οδήγησε στην εισαγωγή καινοτόμων και πρωτοποριακών υπηρεσιών, για τις οποίες δεν είχε εκδηλωθεί ενδιαφέρον από το κοινό μέχρι τότε, αλλά κατάφεραν να γίνουν στοιχείο της καθημερινής ζωής. Η πρόκληση που αντιμετωπίζει ο κλάδος των τηλεπικοινωνιών τα τελευταία χρόνια είναι η εξυπηρέτηση της ζήτησης για ολοένα και μεγαλύτερο εύρος ζώνης, γεγονός που οδηγεί στην ανάγκη ανάπτυξης δικτύων μεγαλύτερης χωρητικότητας.

Τα δίκτυα δορυφορικών τηλεπικοινωνιών αποτελούν πλέον αναπόσπαστο κομμάτι των περισσότερων βασικών τηλεπικοινωνιακών δικτύων παροχής υπηρεσιών. Η χρήση δορυφόρων σε αυτά οφείλεται κυρίως στο ότι έχουν τη μοναδική ικανότητα να παρέχουν κάλυψη σε ευρείες γεωγραφικές περιοχές. Η προκύπτουσα, λοιπόν, διασύνδεση μεταξύ των διαφόρων τηλεπικοινωνιακών δικτύων προσφέρει τη δυνατότητα παροχής μιας σειράς από εφαρμογές, όπως οι κινητές τηλεπικοινωνίες, η εκπομπή τηλεόρασης και ραδιοφώνου απευθείας στο χρήστη, η δημιουργία συνδέσεων από άκρο σε άκρο για τους τελικούς χρήστες κ.α. Στο μικρό χρονικό διάστημα της εμπορικής εκμετάλλευσής τους, οι δορυφορικές επικοινωνίες έχουν προοδεύσει σημαντικά, αλλά οι εγγενείς αρχές τους παραμένουν ίδιες. Οι εφαρμογές τους επεκτείνονται σε διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες, τόσο επαγγελματικές όσο και ψυχαγωγικές.

Η σπουδαία ερευνητική προσπάθεια που έχει καταβληθεί τις τελευταίες δεκαετίες οδήγησε στη βελτίωση όλων των τομέων της τεχνολογίας, επομένως και εκείνων που αφορούν τα δορυφορικά συστήματα. Έτσι, οι ενεργειακές δυνατότητες των δορυφόρων έχουν αυξηθεί σημαντικά, η απόδοση των δορυφορικών και των επίγειων κεραιών έχει βελτιωθεί λόγω χρήσης υψηλότερων συχνοτήτων, ενώ η διάρκεια ζωής των διαστημικών

σταθμών έφτασε τα 12-15 έτη λόγω βελτίωσης των χρησιμοποιούμενων υλικών και των συναφών τεχνολογιών. Παράλληλα, η τεχνολογία που αφορά τους επίγειους σταθμούς βελτιώθηκε σε μεγάλο βαθμό, επιτρέποντας τη μείωση του κόστους αλλά και των διαστάσεων του σταθμού και δίνοντας τη δυνατότητα για παροχή υπηρεσιών απευθείας στις εγκαταστάσεις του χρήστη (Direct-to-Home, DTH).

Τα τελευταία χρόνια, τα συστήματα δορυφορικών τηλεπικοινωνιών έχουν αρχίσει να αντιμετωπίζουν έντονο ανταγωνισμό από τα συστήματα οπτικών ινών για επικοινωνίες σημείου-προς-σημείο (point-to-point). Στις περισσότερες αναπτυγμένες χώρες προτιμάται η λύση των ενσύρματων συστημάτων για τις υπηρεσίες κορμού, κάτι που οδηγεί στη δημιουργία ενός πυκνού επίγειου δικτύου επικοινωνιών. Έτσι, για τη διατήρηση της ανταγωνιστικότητάς τους, ήταν αναγκαία η ανάπτυξη διάφορων νέων τεχνικών. Η ανάπτυξη της δορυφορικής τεχνολογίας συνεχίζεται με βασικό άξονα την παροχή μοναδικών υπηρεσιών, πολλές από τις οποίες θα αναλυθούν στη συνέχεια. Ταυτόχρονα, τα δορυφορικά συστήματα χρησιμοποιούνται συχνά για να συμπληρώσουν και να ενισχύσουν την κάλυψη που παρέχουν τα υπόλοιπα επίγεια δίκτυα, κυρίως σε απομονωμένες περιοχές. Είναι λοιπόν σχεδόν σίγουρο ότι και στο προσεχές μέλλον οι δορυφόροι θα συνεχίσουν να κατέχουν εξέχοντα ρόλο στις τηλεπικοινωνίες.

1.2 ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΔΟΥΡΥΦΟΡΟΣ – ΕΙΔΗ ΤΡΟΧΙΩΝ

Δορυφόρος ονομάζεται κάθε ουράνιο σώμα που βρίσκεται σε τροχιά γύρω από ένα μεγαλύτερο σώμα. Η περιφορά γύρω από αυτό γίνεται με περιοδικό τρόπο ως αποτέλεσμα της βαρυτικής έλξης και η τροχιά μπορεί να είναι κυκλική ή ελλειπτική. Μετά την έναρξη της ανθρώπινης δραστηριότητας στο διάστημα υπάρχει διάκριση μεταξύ φυσικών δορυφόρων, όπως η σελήνη, και τεχνητών. Εντούτοις, ο όρος δορυφόρος χρησιμοποιείται πλέον κυρίως για να περιγράψει δορυφόρους κατασκευασμένους από τον άνθρωπο, οι οποίοι εκτοξεύονται ώστε να εκτελέσουν κάποια χρήσιμη αποστολή.

Γεωσύγχρονος (geosynchronous) ονομάζεται ο δορυφόρος του οποίου η ταχύτητα τροχιάς ισούται με την ταχύτητα περιστροφής της γης. Επομένως, η περίοδος περιστροφής του είναι ίση με την περίοδο περιστροφής της γης (δηλαδή ίση με $T \cong 23h,56 \text{ min},4.1 \text{ sec}$). Η τροχιά στην οποία κινείται ένας τέτοιος δορυφόρος ονομάζεται γεωσύγχρονη. Μια κυκλική γεωσύγχρονη τροχιά έχει ακτίνα περίπου ίση με 35.786 km από την επιφάνεια της

γης. Στην ειδική περίπτωση που ένας γεωσύγχρονος δορυφόρος βρίσκεται ακριβώς πάνω από τον ισημερινό, ονομάζεται γεωστατικός (geostationary) δορυφόρος και η αντίστοιχη τροχιά γεωστατική (Geostatic Earth Orbit, GEO). Ένας γεωστατικός δορυφόρος φαίνεται να βρίσκεται σε σταθερή θέση ως προς έναν ακίνητο παρατηρητή στη γη, δηλαδή διατηρεί την ίδια θέση σε σχέση με την επιφάνεια της γης.

Η γεωστατική τροχιά είναι ιδιαίτερα βολική προκειμένου για τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές, καθώς η σκόπευση από τις επίγειες κεραίες προς το δορυφόρο είναι σταθερή. Επομένως, μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς την ανάγκη για ακριβό εξοπλισμό παρακολούθησης της κίνησης του δορυφόρου. Επίσης, ένας τηλεπικοινωνιακός δορυφόρος σε γεωστατική τροχιά καλύπτει περίπου το ένα τρίτο της επιφάνειας της γης. Για να καταστεί λοιπόν δυνατή η παγκόσμια επικοινωνία, απαιτείται η τοποθέτηση μόλις τριών δορυφόρων σε αυτή την τροχιά. Άλλα πλεονεκτήματα των γεωστατικών δορυφόρων είναι η ελαχιστοποίηση του φαινομένου ολίσθησης συχνότητας (Doppler) και η δυνατότητα πρόβλεψης της παρεμβολής από και προς άλλα συστήματα ραδιοσυχνοτήτων, λόγω της σταθερής τους γεωμετρίας.

Εντούτοις, οι γεωστατικοί δορυφόροι παρουσιάζουν αρκετά σημαντικά εγγενή μειονεκτήματα. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι η απόσβεση που εισάγεται στο ραδιοδίαυλο και η καθυστέρηση διάδοσης που υφίσταται το σήμα εξαιτίας της τεράστιας απόστασης (περίπου 37,000Km). Το πρώτο οδηγεί σε μείωση της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών. Το δεύτερο δυσχεραίνει τις εφαρμογές που εμφανίζουν ευαισθησία στην καθυστέρηση, ενώ κατά τη διεξαγωγή τηλεφωνικών κλήσεων εισάγει μια καθυστέρηση στον ήχο, η οποία είναι ενοχλητική για το χρήστη. Ένας άλλος σημαντικός περιορισμός είναι η αδυναμία των γεωστατικών δορυφόρων να παρέχουν επαρκή κάλυψη σε περιοχές της γης με γεωγραφικό πλάτος μεγαλύτερο από περίπου $\pm 76^\circ$, δηλαδή περιοχών που βρίσκονται κοντά στους πόλους. Επιπλέον, η εκτόξευση δορυφόρων σε γεωστατική τροχιά προϋποθέτει υψηλό κόστος και κίνδυνο απώλειας του δορυφόρου. Βέβαια, για την πλειοψηφία των εφαρμογών, τα πλεονεκτήματα υπερκεράζουν τα μειονεκτήματα, επομένως η γεωστατική τροχιά χρησιμοποιείται για τα περισσότερα υπάρχοντα δορυφορικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα.

Η προσπάθεια αντιμετώπισης των μειονεκτημάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω οδήγησε στη χρήση εναλλακτικών τροχιών. Άλλες δημοφιλείς τροχιές στις οποίες κινούνται δορυφόροι είναι [Maral & Bousquet, 1998], [Richharia, 1999]:

- **Ελλειπτικές:** Οι τροχιές αυτές είναι κεκλιμένες σε σχέση με το επίπεδο του ισημερινού και δίνουν τη δυνατότητα στον αντίστοιχο δορυφόρο να καλύπτει περιοχές υψηλού γεωγραφικού πλάτους για μεγάλο ποσοστό της περιόδου περιστροφής, καθώς αυτός διέρχεται από το απόγειο της τροχιάς του. Οι δορυφόροι σε μια τέτοια τροχιά αντιμετωπίζουν εξίσου το πρόβλημα της υψηλής καθυστέρησης διάδοσης, ενώ εδώ πρέπει να ληφθεί υπόψη και η σημαντική επίδραση του φαινομένου Doppler.
- **Μεσαίες (Medium Earth Orbits, MEO):** Το ύψος των τροχιών αυτών κυμαίνεται στα 5000-12000km με κλίση περίπου 50° . Μπορούν να παρέχουν πραγματική παγκόσμια κάλυψη, αλλά για να καταστεί αυτό δυνατό απαιτείται ένα σύμπλεγμα (“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.
- **Χαμηλές (Low Earth Orbits, LEO):** Το ύψος των τροχιών αυτών είναι μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα (500-900km) και η κλίση τους περίπου 90° . Μπορούν και αυτές να παρέχουν παγκόσμια κάλυψη και διεθνείς επικοινωνίες σε πραγματικό χρόνο, αλλά για το σκοπό αυτό απαιτείται ένας αστερισμός αρκετών δεκάδων δορυφόρων. 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 προβλήματα του υψηλού κόστους και της πολύπλοκης σχεδίασης. Επιπλέον, η μεγάλη ταχύτητα των δορυφόρων δυσχεραίνει την κατάσταση και επιφέρει ταχεία εξάντληση των συστημάτων τροφοδοσίας τους, μειώνοντας έτσι σημαντικά τη διάρκεια ζωής τους.

1.3 ΔΟΜΗ ΕΝΟΣ ΔΟΥΡΥΦΟΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Ένα τυπικό δορυφορικό σύστημα αποτελείται από δυο τμήματα: το διαστημικό και το επίγειο τμήμα. Τα χαρακτηριστικά κάθε τμήματος εξαρτώνται από το είδος των υπηρεσιών

που παρέχει το σύστημα (σταθερή ή κινητή υπηρεσία, απευθείας εκπομπής κτλ). Η συνολική διαδρομή την οποία πρέπει να διανύσουν τα ραδιοκύματα από την πηγή μέχρι τον προορισμό μπορεί να χωριστεί σε δυο επιμέρους ζεύξεις: στη ζεύξη επίγειου σταθμού - δορυφόρου (ή προς τα άνω ζεύξη, uplink) και στη ζεύξη δορυφόρου - επίγειου σταθμού (ή προς τα κάτω ζεύξη, downlink). Η ποιότητα της ραδιοζεύξης καθορίζεται κυρίως από το λόγο φέροντος προς θόρυβο (carrier to noise ratio, CNR). Η επίδοση της συνολικής ζεύξης, δηλαδή από σταθμό σε σταθμό, αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα για τη σχεδίαση του συστήματος και καθορίζεται από την ποιότητα των δυο επιμέρους ζεύξεων.

1.3.1 Διαστημικό τμήμα (Space segment)

Οι δορυφόροι είναι δυνατόν να χρησιμοποιούνται για μια πληθώρα εφαρμογών, αλλά η δομή και η εσωτερική τους οργάνωση είναι κοινή σε όλες τις περιπτώσεις. Το βασικό στοιχείο είναι η πλατφόρμα (platform ή bus), η οποία φιλοξενεί το ωφέλιμο φορτίο (payload) και όλο τον απαραίτητο εξοπλισμό για τη λειτουργία του δορυφόρου. Το ωφέλιμο φορτίο αποτελείται από τις κεραίες λήψης και εκπομπής και όλο τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό που συντελεί στη μετάδοση των σημάτων. Η πλατφόρμα μπορεί να περιλαμβάνει συστήματα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, ελέγχου της θερμοκρασίας, προώθησης και αλλαγής της τροχιάς, καθώς και τον εξοπλισμό γενικότερου ελέγχου του δορυφόρου.

Γενικά, ο δορυφόρος έχει διπλό ρόλο. Αφενός, να ενισχύσει τα λαμβανόμενα φέροντα σήματα για επαναμετάδοση στην προς τα κάτω ζεύξη. Η ισχύς φέροντος στην είσοδο ενός δορυφορικού δέκτη είναι της τάξης των 100pW έως 1nW. Αντίστοιχα, στην έξοδο του ενισχυτή η ισχύς φέροντος είναι της τάξης των 10 έως 100W. Επομένως, το κέρδος ισχύος είναι της τάξης των 100 έως 130dB. Αφετέρου, να αλλάξει τη συχνότητα του φέροντος ώστε να αποφευχθεί η εκ νέου είσοδος στο δέκτη μέρους της μεταδιδόμενης ισχύος. Η απορριπτική ικανότητα των φίλτρων εισόδου σε συνδυασμό με τα κέρδη των κεραιών λήψης και εκπομπής εξασφαλίζει μια “απομόνωση” της τάξης των 150dB [Maral & Bousquet, 1998]. Τα ανωτέρω ισχύουν για τους λεγόμενους διαφανείς (transparent) δορυφόρους, οι οποίοι αποτελούν προς το παρόν την πλειοψηφία των δορυφόρων σε λειτουργία.

Για να ολοκληρώσει την αποστολή του, ένας δορυφόρος μπορεί να λειτουργήσει ως αναμεταδότης. Η απαραίτητη μεταβολή στη συχνότητα επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ενός μετατροπέα συχνότητας. Ανάλογα με τις λειτουργίες που λαμβάνουν χώρα στον δορυφόρο, υπάρχει διάκριση στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Διαφανείς (transparent) δορυφόροι: Ένας τέτοιος δορυφόρος απλά μετατρέπει τη συχνότητα άνω ζεύξης σε μια κατάλληλη συχνότητα κάτω ζεύξης χωρίς οποιαδήποτε επεξεργασία του σήματος βασικής ζώνης. Φυσικά, πραγματοποιείται και η απαραίτητη ενίσχυση του φέροντος σήματος πριν εκπεμφθεί.
- Αναγεννητικοί (regenerative) δορυφόροι: Ανήκουν σε μια νέα γενιά δορυφόρων οι οποίοι είναι εξοπλισμένοι με αποδιαμορφωτές. Έτσι, εκτός από τις κλασικές διαδικασίες της ενίσχυσης και της μετατροπής συχνότητας, είναι πλέον δυνατή η επεξεργασία του σήματος βασικής ζώνης και η εκ νέου διαμόρφωσή του.
- Δορυφόροι με δυνατότητες επεξεργασίας (On-Board Processing, OBP): Οι δορυφόροι αυτοί διαθέτουν ενσωματωμένη ευφυΐα, γεγονός που επιτρέπει πολλές επιπλέον λειτουργίες, όπως πολυπλεξία, ανάθεση πόρων, αλλαγή του σχήματος διαμόρφωσης/κωδικοποίησης, δρομολόγηση, σηματοδότηση κ.α.

Μέσω της OBP είναι δυνατή η παροχή υπηρεσιών προσανατολισμένων στο χρήστη (user oriented services), όπως η εκπομπή σε πολλαπλούς χρήστες (multicast) ή σε μοναδικό χρήστη (unicast), το TCP/IP και υπηρεσίες σημείου προς σημείο (point-to-point) ή σημείου προς πολλαπλά σημεία (point-to-multipoint) κατ' απαίτηση (on demand). Σημειώνεται ότι το Πρωτόκολλο Ελέγχου Μεταφοράς (Transmission Control Protocol, TCP) και το Πρωτόκολλο Διαδικτύου (Internet Protocol, IP) χρησιμοποιούνται για την αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων μεταξύ διεργασιών σε ένα δίκτυο.

Στους αναγεννητικούς αναμεταδότες, τα σήματα βασικής ζώνης, τα οποία έχουν διαμορφώσει το φέρον σήμα άνω ζεύξης, είναι πλέον διαθέσιμα στην έξοδο του αποδιαμορφωτή για περαιτέρω επεξεργασία. Στη συνέχεια και αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία επεξεργασίας τους (π.χ. αποθήκευση, ανίχνευση και διόρθωση λαθών), τα σήματα αυτά διαμορφώνουν το φέρον σήμα κάτω ζεύξης. Επομένως, η απαιτούμενη αλλαγή συχνότητας από το uplink στο downlink, η οποία στην περίπτωση των απλών δορυφόρων επιτυγχάνεται με τη μίξη του σήματος με έναν τοπικό ταλαντωτή ραδιοσυχνοτήτων, γίνεται στους αναγεννητικούς δορυφόρους με τη διαμόρφωση ενός εντελώς νέου φέροντος πριν την επαναμετάδοση [Maral & Bousquet, 1998].

Με τον τρόπο αυτό η άνω και η κάτω ζεύξη είναι δυνατόν να βελτιστοποιηθούν ανεξάρτητα καθιστώντας το σύστημα περισσότερο αποδοτικό. Επίσης, οι αναγεννητικοί δορυφόροι μπορούν να αντιμετωπίσουν υψηλότερα επίπεδα παρεμβολών, μειώνουν την πολυπλοκότητα των επίγειων σταθμών, αφού μέρος της επεξεργασίας του σήματος γίνεται

στο διαστημικό τμήμα (on board processing) και τέλος μειώνουν σημαντικά τις απαιτήσεις σε σχέση με τους σταθμούς μετάδοσης και λήψης. Όλα τα παραπάνω οδηγούν τελικά σε ελάττωση του κόστους των σταθμών.

1.3.2 Επίγειο τμήμα (ground segment)

Το επίγειο τμήμα αποτελείται από τον αντίστοιχο επίγειο σταθμό (earth station). Ένας επίγειος σταθμός περιλαμβάνει, γενικά, μια κεραία καθώς και τα τμήματα λήψης και μετάδοσης. Επίσης, περιλαμβάνει όλο τον απαραίτητο εξοπλισμό για τη διασύνδεση με το επίγειο δίκτυο. Σημαντικές παράμετροι για κάθε επίγειο σταθμό είναι το μέγεθος των χρησιμοποιούμενων κεραιών και η γωνία ανύψωσης. Σημειώνεται ότι η γωνία ανύψωσης είναι η γωνία που σχηματίζεται από την ευθεία που ενώνει το δορυφόρο με τον επίγειο σταθμό, και την εφαπτόμενη στην επιφάνεια της γης στο σημείο όπου είναι τοποθετημένος ο τελευταίος. Τα χαρακτηριστικά του επίγειου τμήματος εξαρτώνται από το είδος της παρεχόμενης υπηρεσίας, τα οποία αναλύονται παρακάτω.

1.4 ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟ ΡΑΔΙΟΦΑΣΜΑ

Το ραδιοφάσμα ή φάσμα των ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequencies, RF) αποτελεί έναν περιορισμένο φυσικό πόρο, ο οποίος χρησιμοποιείται σε διάφορες τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές για την επικοινωνία μεταξύ απομακρυσμένων σημείων. Εξαιτίας της ποικιλίας των ασύρματων υπηρεσιών (επίγειων και δορυφορικών) και του τεράστιου αριθμού χρηστών, ο πόρος αυτός βρίσκεται πλέον σε ανεπάρκεια και η αξία του αυξάνει διαρκώς. Επομένως, είναι κρίσιμη η σωστή διαχείριση και εκχώρησή του, έτσι ώστε να γίνεται βέλτιστη χρησιμοποίηση από όλες τις σχετιζόμενες τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες. Για το σκοπό αυτό, αλλά και για να γίνει δυνατή η συνύπαρξη των ασύρματων συστημάτων με απρόσκοπτο τρόπο χωρίς να παρεμβάλλουν μεταξύ τους, υπεύθυνη για την ανάθεση των συχνοτήτων σε παγκόσμια κλίμακα είναι η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunications Union, ITU) και ειδικότερα το τμήμα ραδιοεπικοινωνιών (radiocommunications sector) που αυτή διαθέτει, με όνομα ITU-R. Η ITU-R διαχειρίζεται τη χρήση του ραδιοφάσματος, εκχωρεί συχνότητες για κάθε υπηρεσία και καθορίζει τις διαδικασίες για τη χρήση των ραδιοσυχνοτήτων σύμφωνα με τις απαιτήσεις των διαφόρων

υπηρεσιών και περιοχών. Ακολουθούν η διαφοροποίηση των υπηρεσιών και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε περίπτωσης:

- Σταθερή υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Fixed Satellite Service, FSS): Στην περίπτωση αυτή το επίγειο τμήμα αποτελείται από σταθερούς επίγειους σταθμούς διαφόρων τύπων. Το μέγεθος και τα χαρακτηριστικά αυτών εξαρτώνται από το είδος της εκάστοτε εφαρμογής. Κάθε επίγειος σταθμός διασυνδέεται με τον ενδιαφερόμενο χρήστη είτε απευθείας είτε μέσω του Δημόσιου Τηλεφωνικού Μεταγωγικού Δικτύου (Public Switched Telephone Network, PSTN).
- Κινητή υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Mobile Satellite Service, MSS): Το επίγειο τμήμα στην περίπτωση αυτή αποτελείται από κινητά τερματικά διαφόρων τύπων, τα οποία είναι συνδεδεμένα με τα σταθερά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα μέσω δορυφόρου. Οι χρήστες κινητών υπηρεσιών χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: θαλάσσιους, αεροναυτικούς και επίγειους.
- Υπηρεσία ευρυεκπομπής μέσω δορυφόρου (Broadcast Satellite Service, BSS): Υπηρεσία στην οποία σήματα εκπεμπόμενα από διαστημικούς σταθμούς προορίζονται για λήψη από όλους τους χρήστες στην περιοχή κάλυψης, με κυριότερες εφαρμογές τη μετάδοση τηλεόρασης και ραδιοφώνου.
- Υπηρεσία απευθείας ευρυεκπομπής μέσω δορυφόρου (Direct Broadcast Satellite Service, DBSS): Στην υπηρεσία αυτή γίνεται μετάδοση προγραμμάτων από ένα μεγάλο επίγειο σταθμό, που παίζει το ρόλο της πύλης (gateway), προς διάφορα διασκορπισμένα τερματικά μέσω ενός δορυφόρου υψηλής ισχύος.

Οι εφαρμογές που βασίζονται σε δορυφορικές επικοινωνίες αφορούν, μεταξύ άλλων, το πεδίο της μετεωρολογίας, της ναυσιπλοΐας, της αστρονομίας, της διαχείρισης των φυσικών πόρων για τη γεωργία και τη δασονομία, ενώ φυσικά υπάρχουν και στρατιωτικές εφαρμογές. Η ITU έχει κατηγοριοποιήσει τις υπηρεσίες αυτές και έχει θέσει τους γενικούς κανόνες για το σχεδιασμό και τη λειτουργία κάθε δορυφορικής υπηρεσίας. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι βασικές κατηγορίες τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών που παρέχονται από δορυφορικά συστήματα, καθώς και οι ζώνες συχνοτήτων που αυτές καταλαμβάνουν (καθορισμένες από το Διεθνή Κανονισμό Ραδιοεπικοινωνιών) [Elbert, 1997]:

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)
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 ευρυεκπομπής μέσω δορυφόρου (Broadcast Satellite Service, BSS)
K-ζώνη	18 GHz	26.5 GHz	Σταθερή Υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Fixed Satellite Service, FSS)
			Υπηρεσία ευρυεκπομπής μέσω δορυφόρου (Broadcast Satellite Service, BSS)
Ka-ζώνη	26.5 GHz	30 GHz	Σταθερή Υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Fixed Satellite Service, FSS)

			Υπηρεσία ευρυεκπομπής μέσω δορυφόρου (Broadcast Satellite Service, BSS)
--	--	--	---

Πίνακας 1.1 - Δορυφορικές ζώνες συχνοτήτων και αντίστοιχες υπηρεσίες

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί το γεγονός της χρήσης διαφορετικών συχνοτήτων για τη ζεύξη γης-δορυφόρου και της ζεύξης δορυφόρου-γης για όλες τις ζώνες, κάτι που γίνεται φανερό και από τον παραπάνω πίνακα. Μάλιστα, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων η χαμηλότερη συχνότητα αποδίδεται στη δεύτερη ζεύξη. Αυτό συμβαίνει για δυο κυρίως λόγους. Πρώτον, για να αποφευχθούν οι παρεμβολές ανάμεσα στους δύο δυνατούς τρόπους λειτουργίας του δορυφόρου (ως πομπού και ως δέκτη) και δεύτερον για να προφυλαχθεί η προς τα κάτω ζεύξη από τις μεγαλύτερες αποσβέσεις που συνεπάγεται η διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε υψηλότερες συχνότητες. Στη συνέχεια θα γίνει εκτενέστερη ανάλυση του θέματος.

1.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΥΨΗΛΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ

Στα πρώτα χρόνια ζωής των δορυφορικών υπηρεσιών υπήρχε άφθονο φάσμα, που περιοριζόταν μόνο από φυσικές ή οικονομικές αιτίες. Αργότερα, η διάθεση εύρους ζώνης αποτέλεσε σημείο έντονου ανταγωνισμού ανάμεσα στις διάφορες υπηρεσίες επικοινωνιών. Οι παρεχόμενες δορυφορικές υπηρεσίες γίνονται όλο και πιο απαιτητικές, καθώς πλέον απαιτείται μετάδοση ήχου, εικόνας, βίντεο και δεδομένων. Παραδείγματα τέτοιων υπηρεσιών είναι η τηλεδιάσκεψη, η μετάδοση κινούμενης εικόνας κατ' απαίτηση (Video on Demand, VoD) και η ευρυζωνική πρόσβαση στο διαδίκτυο (Broadband Internet access). Για την ενσωμάτωση τέτοιων εφαρμογών απαιτείται η ραγδαία αύξηση των διαθέσιμων πόρων για τα συστήματα μετάδοσης. Επιπλέον, λόγω της αύξησης του συνολικού αριθμού χρηστών, αλλά και της ανάγκης για εξυπηρέτηση πολλών χρηστών ταυτόχρονα, είναι απαραίτητη η περαιτέρω αύξηση του εύρους ζώνης λειτουργίας του συστήματος. Για να μπορέσουν οι δορυφορικές επικοινωνίες να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις αυτών των συνθηκών, ακολούθησαν μια πολιτική σταδιακής αύξησης των συχνοτήτων λειτουργίας.

Οι πρώτοι δορυφόροι έκαναν χρήση της ζώνης C, αλλά στη συνέχεια έγινε στροφή προς τις ζώνες Ku (12/14GHz) και Ka (20/30GHz) κυρίως για τα δορυφορικά συστήματα εμπορικής χρήσης. Ταυτόχρονα η χρήση ζωνών συχνοτήτων υψηλότερων από τα 10GHz, όπως αυτές των 20/30GHz, έδωσε λύση στο οξύ πρόβλημα της συμφόρησης συχνοτήτων που ανέκυψε στις ζώνες L, S και C, που είναι πλέον κορεσμένες από τον μεγάλο αριθμό δορυφόρων που τις χρησιμοποιεί. Επίσης, δόθηκε λύση στο πρόβλημα των περιορισμένων διαθέσιμων θέσεων στη γεωστατική τροχιά, επί της οποίας έχει ήδη τοποθετηθεί μεγάλος αριθμός δορυφόρων. Η εξέλιξη της τεχνολογίας και η διαρκής αύξηση της ζήτησης για εύρος ζώνης είναι πιθανό να οδηγήσει τελικά στη χρήση συχνοτήτων άνω των 40/50GHz και γενικά σε συχνότητες EHF (Extremely High Frequencies).

Τα πλεονεκτήματα που απορρέουν από τη χρήση τόσο υψηλών συχνοτήτων έχουν να κάνουν κυρίως με την αύξηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης για κάθε είδους εφαρμογή. Σημαντικό πλεονέκτημα της λειτουργίας σε υψηλότερες συχνότητες είναι η αποφυγή παρεμβολής με τις επίγειες μικροκυματικές ζεύξεις. Οι τελευταίες λειτουργούν εν γένει σε συχνότητες κάτω των 10GHz. Επίσης, η χρήση υψηλών συχνοτήτων καθιστά δυνατή τη χρήση κεραιών μεγαλύτερης κατευθυντικότητας και μικρότερου μεγέθους (μικρότερης διαμέτρου). Το γεγονός αυτό αυξάνει την εμπορική ανταγωνιστικότητα των δορυφορικών επικοινωνιών, καθώς οι μικρές και φθηνές κεραιές λήψης είναι ιδιαίτερα ελκυστικές για τους χρήστες.

Η μετάβαση, όμως, των δορυφορικών συστημάτων σε υψηλότερες συχνότητες λειτουργίας συνοδεύεται από την εμφάνιση νέων περιορισμών. Η λειτουργία σε υψηλότερη συχνότητα απαιτεί την κατασκευή υψηλής ποιότητας ηλεκτρονικών κυκλωμάτων με βελτιωμένα χαρακτηριστικά λειτουργίας. Έτσι, απαιτείται εξελιγμένος εξοπλισμός (π.χ. για RF ενισχυτές και ζωνοπερατά φίλτρα) για τη διαχείριση και μορφοποίηση των υψίσυχων σημάτων. Ταυτόχρονα, η αύξηση του εύρους ζώνης έχει δυσμενή επίδραση αναφορικά με το σηματοθορυβικό λόγο του τηλεπικοινωνιακού συστήματος, αφού η ισχύς του θερμικού θορύβου είναι ευθέως ανάλογη του εύρους ζώνης. Επομένως, είναι αναγκαία η προσεκτική σχεδίαση του δορυφορικού συστήματος και τα ηλεκτρονικά αυτά συστήματα πρέπει να χαρακτηρίζονται από μικρή ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου.

Αναφορά πρέπει να γίνει στις απώλειες ελευθέρου χώρου, οι οποίες εισάγουν το μεγαλύτερο μέρος της εξασθένησης του σήματος κατά τη διάδοσή του. Όπως είναι γνωστό, η εξασθένηση της ισχύος του σήματος είναι ανάλογη του τετραγώνου της συχνότητας, επομένως οι υψηλές συχνότητες οδηγούν σε σημαντική υποβάθμιση του

σήματος. Για συχνότητες λειτουργίας άνω των 10GHz ο καθοριστικότερος παράγοντας εξασθένησης, εκτός βέβαια των απωλειών ελευθέρου χώρου, είναι οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις. Έτσι, κυρίως για περιοχές λειτουργίας μεταξύ των 10GHz και των 30GHz γίνεται διάκριση της λειτουργίας της ζεύξης υπό συνθήκες “καθαρού ουρανού” (clear sky operation) ή υπό συνθήκες διαλαίψεων, όπως επεξηγείται παρακάτω.

Τέλος, η ζώνη συχνοτήτων στην οποία λειτουργεί ένα δορυφορικό σύστημα διαδραματίζει βαρύνοντα ρόλο στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του καναλιού και έχει σημαντικές επιπτώσεις στο δορυφορικό σήμα κατά τη μετάδοσή του μέσω της ατμόσφαιρας. Ανάλογα, με τη χρησιμοποιούμενη ζώνη λαμβάνουν χώρα διαφορετικά φαινόμενα διάδοσης, τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη διαδικασία της σχεδίασης του συστήματος. Τα φαινόμενα αυτά θα αναλυθούν στην επόμενη ενότητα.

1.6 ΔΥΣΜΕΝΕΙΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ

Το μέσο διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων κατά τη διάδοση του δορυφορικού σήματος είναι η ατμόσφαιρα. Η ατμόσφαιρα της γης αποτελεί ένα ανομοιογενές και απορροφητικό μέσο, το οποίο δημιουργεί ένα αντίξοο περιβάλλον διάδοσης. Τα σχετικά φαινόμενα δημιουργούνται κυρίως στην τροπόσφαιρα και την ιονόσφαιρα. Τα ιονοσφαιρικά φαινόμενα επιδρούν κυρίως σε συστήματα με συχνότητα λειτουργίας κάτω από 3GHz, ενώ τα τροποσφαιρικά φαινόμενα επηρεάζουν αρνητικά συστήματα που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 3GHz. Εφόσον η πλειοψηφία των σύγχρονων δορυφορικών συστημάτων λειτουργεί σε συχνότητες άνω των 3GHz, και συνηθέστερα άνω των 10GHz, τα τροποσφαιρικά φαινόμενα είναι εκείνα που επικρατούν.

Η τροπόσφαιρα θεωρείται ότι είναι η περιοχή της ατμόσφαιρας που είναι πλησίον της γήινης επιφάνειας (το εγγύτερο στρώμα της ατμόσφαιρας) και εκτείνεται μέχρι το ύψος των 10km περίπου. Πιο συγκεκριμένα, το ύψος της τροπόσφαιρας είναι 6km για τις περιοχές των πόλων και φθάνει μέχρι τα 18km στον ισημερινό. Στην τροπόσφαιρα λαμβάνουν χώρα μεταβολές του δείκτη διάθλασης, της πίεσης και της υγρασίας, καθώς επίσης εμφανίζονται νέφη και υδρομετεωρίτες (βροχή, χιόνι, χαλάζι), οι οποίοι επηρεάζουν σημαντικά τη διάδοση των ραδιοσυχνοτήτων [Κανελλόπουλος, 2001]. Τα σημαντικότερα τροποσφαιρικά φαινόμενα που επηρεάζουν τα συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών για συχνότητες άνω των 10GHz συνοψίζονται ακολούθως [Panagopoulos et al., 2004]:

- Απόσβεση (attenuation) ή διαλείψεις (fading) λόγω υδρομετεωριτών: Κατά τη διάδοση μέσα από βροχή, χιόνι, χαλάζι ή σταγονίδια πάγου, τα ραδιοκύματα υποφέρουν από απώλεια ισχύος λόγω σκέδασης από τους υδρομετεωρίτες. Η απώλεια αυτή ονομάζεται απόσβεση (ή εξασθένηση). Ενώ η σκέδαση των υδρομετεωριτών είναι ο κύριος περιοριστικός παράγοντας στη ζώνη EHF (>30GHz), η απορρόφηση από τους υδρομετεωρίτες είναι το κυρίαρχο φαινόμενο απώλειας ισχύος στο φασματικό μέρος μεταξύ των 10GHz και 30GHz. Η συνδυασμένη επίδραση της σκέδασης και της απορρόφησης από τους υδρομετεωρίτες έχει ως αποτέλεσμα απώλεια ισχύος ανάλογη (σε dB) του τετραγώνου της συχνότητας. Το γεγονός αυτό αποτελεί το βασικό μειονέκτημα της λειτουργίας σε ζώνες συχνοτήτων όπως η Ku, η Ka και η V. Αναφορικά με τα δορυφορικά συστήματα, το βάθος των διαλείψεων λόγω βροχής εξαρτάται επίσης από τη γωνία ανύψωσης και την πόλωση. Καθώς η απόσβεση λόγω βροχής εξαρτάται δυσμενώς από το ρυθμό της βροχόπτωσης και τη διακύμανση του μεγέθους των σταγόνων της βροχής, οι τροπικές και υποτροπικές περιοχές επηρεάζονται σε μεγαλύτερο βαθμό από το συγκεκριμένο παράγοντα.
- Απορρόφηση από αέρια (gaseous absorption): Εκτός από την απορρόφηση από τους υδρομετεωρίτες, η απορρόφηση από αέρια, κυρίως από το οξυγόνο και τους υδρατμούς, συμβάλλει επίσης στη συνολική απόσβεση των ραδιοκυμάτων, ειδικά για την περίπτωση μικρών γωνιών ανύψωσης. Εντούτοις, η συμβολή της απορρόφησης των αερίων στη συνολική εξασθένηση είναι μικρή συγκρινόμενη με την απόσβεση λόγω βροχής. Οι υδρατμοί είναι ο κύριος παράγοντας για την απορρόφηση από αέρια σε ένα εύρος συχνοτήτων λίγο κάτω από τα 30GHz εξαιτίας της μέγιστης απορρόφησης των υδρατμών στα 22.5GHz. Επιπλέον, άλλα μέγιστα προκύπτουν στα 183GHz και τα 320GHz για τους υδρατμούς, και τα 60GHz και 119GHz για το οξυγόνο. Οι συχνότητες όμως αυτές δεν ενδιαφέρουν στην παρούσα μελέτη. Η εξασθένηση εξαιτίας της απορρόφησης από το οξυγόνο παρουσιάζει μια σχεδόν αμετάβλητη συμπεριφορά σε διάφορες κλιματικές συνθήκες, ενώ η εξασθένηση λόγω των υδρατμών εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την υγρασία της περιοχής.
- Αποπόλωση του σήματος (signal depolarization): Η ανομοιόμορφη στροφή φάσης και εξασθένηση που προκαλούν οι μη σφαιρικοί σκεδαστές (π.χ. οι σταγόνες της βροχής και οι κρύσταλλοι πάγου) προκαλούν αποπόλωση του σήματος. Το φαινόμενο αυτό δεν επηρεάζει δορυφορικά συστήματα που χρησιμοποιούν απλή

πόλωση. Εντούτοις, η επίδρασή του γίνεται σημαντική για συστήματα που υιοθετούν την τεχνική της αναχρησιμοποίησης συχνότητας (frequency reuse), τεχνική που συνίσταται στη μετάδοση δυο ορθογώνια πολωμένων σημάτων στην ίδια φέρουσα συχνότητα, με σκοπό τη βέλτιστη χρήση του RF φάσματος. Τότε έχει ως αποτέλεσμα την παρεμβολή μεταξύ των δυο ορθογώνιων συνιστωσών, δηλαδή μέρος της μεταδιδόμενης ισχύος της μια πόλωσης παρεμβάλλει στην ορθογώνια της. Το φαινόμενο γίνεται έντονο για συχνότητες λειτουργίας άνω των 10GHz.

- Τροποσφαιρικοί σπινθηρισμοί (tropospheric scintillations): Διαφοροποιήσεις στο μέγεθος και το προφίλ (τα χαρακτηριστικά) του δείκτη διάθλασης στο στρώμα της τροπόσφαιρας οδηγούν σε διακυμάνσεις του πλάτους των ραδιοκυμάτων, γνωστές ως σπινθηρισμοί. Αυτές οι διακυμάνσεις αυξάνουν με τη συχνότητα και εξαρτώνται από το μήκος της διαδρομής, ενώ μειώνονται με το εύρος δέσμης των κεραιών. Οι διακυμάνσεις στο πλάτος συνοδεύονται επίσης από διακύμανση στη φάση του σήματος. Η συμπεριφορά τους προβλέπεται πολύ δύσκολα και για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται κυρίως εμπειρικές σχέσεις.

Τέλος, κατά τη διάδοση των κυμάτων λαμβάνουν χώρα και άλλα φαινόμενα, λιγότερο σημαντικά. Σε αυτά ανήκει η απόσβεση λόγω νεφώσεων (cloud attenuation), η οποία οφείλεται στην περιεκτικότητα των νεφών σε υγρασία, και η απόσβεση του στρώματος τήξης (melting layer attenuation). Το στρώμα αυτό βρίσκεται σε συγκεκριμένο ύψος από την επιφάνεια του εδάφους και είναι το σημείο στο οποίο το χιόνι και ο πάγος μετατρέπονται σε βροχή.

Συνοψίζοντας, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η χρήση της ατμόσφαιρας ως μέσο διάδοσης των ραδιοκυμάτων εισάγει πληθώρα φαινομένων, τα οποία υποβαθμίζουν το μεταδιδόμενο σήμα. Μάλιστα, η συχνότητα των 10GHz μπορεί να θεωρηθεί ως σημείο καμπής κάτω από το οποίο οι ατμοσφαιρικές συνθήκες για τη διάδοση κυμάτων χαρακτηρίζονται ως περισσότερο ευνοϊκές. Αντίθετα, για μεγαλύτερες συχνότητες οι συνθήκες διάδοσης γίνονται ιδιαίτερα δυσχερείς και τα σήματα παρουσιάζουν μεγάλες αποσβέσεις, βαθιές διαλείψεις και είναι ευαίσθητα σε αποπόλωση. Η βροχή μειώνει την ποιότητα των δορυφορικών ζεύξεων, ενώ τα προβλήματα γίνονται πολύ έντονα στις περιπτώσεις παροξυσμικής βροχής (δηλαδή καταιγίδας), οι οποίες είναι συχνές στις τροπικές περιοχές. Για όλους τους παραπάνω λόγους, ένα σημαντικό κομμάτι της έρευνας στρέφεται στην εύρεση διαφόρων τεχνικών άμβλυνσης των διαλείψεων.

1.7 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΜΒΛΥΝΣΗΣ ΤΩΝ ΔΙΑΛΕΙΨΕΩΝ

Η πλειοψηφία των ατμοσφαιρικών φαινομένων που συζητήθηκαν στην προηγούμενη ενότητα παρουσιάζουν στοχαστική συμπεριφορά τόσο ως προς το χρόνο όσο και ως προς το χώρο. Επομένως, διαφέρουν από όλους τους άλλους ντετερμινιστικούς παράγοντες, όπως οι απώλειες ελευθέρου χώρου, που επηρεάζουν τη δορυφορική ζεύξη κάτω από συνθήκες καθαρού ουρανού. Εφόσον οι εξασθενήσεις λόγω διάδοσης έχουν ουσιαστική επίδραση μόνο για ποσοστό λιγότερο του 1% κατά τη διάρκεια ενός χρόνου, το κέρδος του συστήματος πρέπει να ενισχυθεί με ένα επιπρόσθετο περιθώριο διαλείψεων. Η επιλογή του περιθωρίου αυτού αποτελεί αντικείμενο προσεκτικής σχεδίασης, ώστε να ικανοποιούνται οι επιθυμητές προδιαγραφές διαθεσιμότητας (availability) του συστήματος και ποιότητας υπηρεσιών (Quality of Service, QoS). Σημειώνεται ότι η απώλεια ελευθέρου χώρου, που είναι η ελάχιστη δυνατή απόσβεση την οποία αναμένεται να έχει οποιαδήποτε ασύρματη ζεύξη, συχνά λαμβάνεται ως στάθμη αναφοράς για τη συνολική απώλεια διάδοσης.

Αρχικά εξετάζονται διάφορα βασικά μεγέθη ενός συστήματος ψηφιακών επικοινωνιών. Ο ρυθμός μετάδοσης της ψηφιακής πληροφορίας R (Bit Rate) περιγράφει την ταχύτητα μετάδοσης δυαδικών ψηφίων σε bits/sec. Εφόσον χρησιμοποιείται το δυαδικό σύστημα, οι δυνατές τιμές των ψηφίων πληροφορίας είναι 0 και 1. Σφάλμα προκύπτει στην περίπτωση που στο δέκτη αναγνωρίζεται ότι έχει σταλεί 0, ενώ στην πραγματικότητα έχει σταλεί 1, ή το αντίστροφο. Έτσι, προκύπτει το ποσοστό εσφαλμένων ψηφίων (Bit Error Ratio, BER), ένα μέγεθος πολύ κρίσιμο για την ποιότητα του συστήματος. Συναφής με το προηγούμενο μέγεθος είναι η πιθανότητα λήψης εσφαλμένου ψηφίου (Bit Error Probability, BEP). Η διαφορά των δυο μεγεθών έγκειται στο γεγονός ότι η BEP εκτιμάται κατά τη σχεδίαση του συστήματος, ενώ το BER μετράται στην έξοδο του δέκτη κατά τη λειτουργία του συστήματος [Καψάλης & Κωττής, 2003].

Για ένα δορυφορικό σύστημα, η διαθεσιμότητα ορίζεται ως το ποσοστό του χρόνου (για ένα έτος) κατά τη διάρκεια του οποίου το BER είναι μικρότερο από μια συγκεκριμένη τιμή κατωφλίου, κάτω από την οποία το σύστημα χάνει την ικανότητα να προσφέρει υπηρεσίες στους χρήστες του. Το σύστημα τίθεται στην περίπτωση αυτή εκτός λειτουργίας (outage), καθώς χάνεται ο συγχρονισμός στο δέκτη. Ως περιθώριο διαλείψεων (fade margin) ορίζεται η διαφορά σε dB μεταξύ της απόσβεσης που προκαλείται από την πτώση υδρομετεωριτών και οδηγεί σε διακοπή λειτουργίας, και της απόσβεσης κάτω από

συνθήκες καθαρού ουρανού. Σημειώνεται ότι η τιμή της απόσβεσης υπό συνθήκες καθαρού ουρανού προκύπτει από το άθροισμα όλων των παραγόντων που συνεισφέρουν στην απόσβεση της δορυφορικής ζεύξης, πλην της απόσβεσης λόγω τροποσφαιρικής διάδοσης (κυρίως της βροχοπτώσης), και για δεδομένη δορυφορική ζεύξη είναι μία σχεδόν σταθερή ποσότητα. Υποθέτοντας συνθήκες καθαρού ουρανού, το ποσοστό που το σύστημα τίθεται εκτός λειτουργίας είναι συνήθως ιδιαίτερα χαμηλό. Αντίθετα, για δορυφορικά συστήματα που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10GHz και σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από ισχυρές βροχοπτώσεις, η ταυτόχρονη παρουσία διαφόρων μηχανισμών απόσβεσης είναι ιδιαίτερα πιθανή και έτσι απαιτείται μεγάλο περιθώριο διαλείψεων. Επομένως, είναι επιτακτική η εισαγωγή τεχνικών άμβλυνσης των διαλείψεων (Fade Mitigation Techniques, FMT), ώστε να είναι δυνατή η λειτουργία για μικρότερα περιθώρια διαλείψεων.

Ανάλογα με τις διαφορετικές προσεγγίσεις σχεδίασης που αφορούν τη μετρίαση των διαλείψεων που οφείλονται στη διάδοση μέσω της ατμόσφαιρας, οι τεχνικών άμβλυνσης των διαλείψεων μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες ακολούθως [Panagopoulos et al., 2004]:

- Τεχνικές ελέγχου της ισχύος
- Τεχνικές προσαρμοστικής μετάδοσης
- Σχήματα διαφορικής προστασίας

1.7.1 Τεχνικές ελέγχου της ισχύος

Σε γενικές γραμμές η τεχνική αυτή συνίσταται στην αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος είτε από τους επίγειους σταθμούς είτε από τους δορυφόρους, ώστε να αντισταθμισθούν οι απώλειες που εισάγουν οι κάθε είδους διαλείψεις. Η Ενεργώς Ισοτροπικά Ακτινοβολούμενη Ισχύς (Effective Isotropic Radiated Power, EIRP) αποτελεί το γινόμενο της εκπεμπόμενης ισχύος με το κέρδος της κεραίας και εκφράζεται συνήθως σε dBw. Επομένως, έλεγχος της EIRP είναι δυνατός με τη μεταβολή είτε της εκπεμπόμενης ισχύος είτε του κέρδους της κεραίας. Η ρύθμιση της ισχύος μπορεί να πραγματοποιηθεί: α) στον επίγειο σταθμό, οπότε προκύπτει η περίπτωση Ελέγχου Ισχύος της προς τα Άνω Ζεύξης (Up Link Power Control, ULPC), β) στο δορυφόρο, οπότε προκύπτει η περίπτωση Ελέγχου Ισχύος της προς τα Κάτω Ζεύξης (Down Link Power Control, DLPC). Επιπρόσθετα, είναι δυνατή και η ρύθμιση του κέρδους της κεραίας επί του δορυφόρου, μια τεχνική που ονομάζεται μορφοποίηση διαγράμματος ακτινοβολίας κεραίας (Spot Beam Shaping, SBS)

και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτικός τρόπος ελέγχου της EIRP. Ακολουθεί εξέταση των μεθόδων αυτών ξεχωριστά:

- Έλεγχος Ισχύος της προς τα Άνω Ζεύξης: Ο έλεγχος ισχύος της προς τα άνω ζεύξης επιτυγχάνεται με τη ρύθμιση της εκπεμπόμενης ισχύος ενός επίγειου σταθμού. Σκοπός της τεχνικής είναι η διατήρηση της πυκνότητας ισχύος στην είσοδο του δορυφόρου πάνω από ένα συγκεκριμένο επίπεδο. Η αντίστοιχη ρύθμιση του ενισχυτή υψηλής ισχύος (High Power Amplifier, HPA) στον επίγειο σταθμό βασίζεται μόνο σε μετρήσεις της απόσβεσης, χωρίς να καταφεύγει σε οποιοδήποτε είδος ανάδρασης (feedback) με το δέκτη. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στη αρχή του ανοικτού βρόχου (open loop). Βέβαια, ο επίγειος σταθμός είναι τότε σε θέση να γνωρίζει μόνο την απόσβεση στην προς τα κάτω ζεύξη, οπότε με αναγωγή των αποτελεσμάτων στην υψηλότερη συχνότητα, μπορεί να προβλέψει τις τιμές για την προς τα άνω ζεύξη. Ένα πιθανό πρόβλημα στο ULPC είναι η παρεμβολή γειτονικού καναλιού (adjacent channel interference), η οποία συμβαίνει όταν μέρος της ενέργειας του δορυφορικού σήματος πέφτει σε παρακείμενα κανάλια. Αυτό συμβαίνει διότι κατά την ανίχνευση μιας βαθιάς διάλειψης στο κανάλι, το περιθώριο ισχύος στην έξοδο του ενισχυτή (output back-off, OBO) μειώνεται, ώστε να αντισταθμιστούν οι απώλειες στο uplink. Σημειώνεται ότι το OBO είναι το περιθώριο ισχύος, συνήθως σε dB, μεταξύ του σημείου λειτουργίας και του σημείου κορεσμού του ενισχυτή. Όταν αυτό μειώνεται, δηλαδή ο ενισχυτής πλησιάζει προς τον κόρο, προκύπτουν δυσμενείς επιπτώσεις στο σήμα λόγω λειτουργίας στη μη γραμμική περιοχή. Ένα άλλο πρόβλημα του ULPC είναι η παρεμβολή γειτονικών δορυφόρων (adjacent satellite interference), η οποία αντιστοιχεί στην παρεμβολή προς γειτονικό δορυφόρο. Ο μεγάλος αριθμός γεωστατικών δορυφόρων έχει οδηγήσει σε συμφόρηση της αντίστοιχης τροχιάς και έτσι επιβάλλεται οι δορυφόροι GEO να τίθενται σε γωνιακές αποστάσεις 2-3°. Επομένως μια αύξηση στη μεταδιδόμενη ισχύ των επίγειων σταθμών μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη λειτουργία γειτονικών δορυφόρων.
- Έλεγχος Ισχύος της προς τα Κάτω Ζεύξης: Ο έλεγχος ισχύος της κάτω ζεύξης επιτυγχάνεται με αύξηση της ισχύος εκπομπής του δορυφόρου. Σε αντίθεση με την τεχνική ULPC, η υλοποίηση της DLPC είναι δύσκολη εξαιτίας των περιορισμών στο μέγεθος, το βάρος και την τεχνολογία του δορυφόρου, αλλά και της περιορισμένης δυνατότητας ελέγχου της λειτουργίας του. Συγκεκριμένα, το

μέγεθος και το βάρος των δορυφόρων περιορίζουν τη χρήση των ενισχυτών οδεύοντος κύματος (Traveling Wave Tube Amplifier, TWTA), οι οποίοι πρέπει να λειτουργούν με μικρό OBO. Στο DLPC παρουσιάζεται και το πρόβλημα των παρεμβολών ενδοδιαμόρφωσης (intermodulation interference), εξαιτίας της μη γραμμικής ενίσχυσης των πολλαπλών φερόντων σημάτων.

- Spot Beam Shaping: Όταν η περιοχή κάλυψης ενός γεωστατικού δορυφόρου περιορίζεται σε μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή, τότε μιλάμε για κάλυψη με “σημειακές δέσμες” (spot beams). Αυτό γίνεται για τη βελτίωση της EIRP του δορυφόρου και προκειμένου να χρησιμοποιείται με αποδοτικό τρόπο το φάσμα. Προφανώς, μια σημειακή δέσμη παράγει υψηλότερες τιμές EIRP δορυφόρου σε σύγκριση με μια καθολική, καθώς η μείωση του εύρους δέσμης της κεραίας αυξάνει το κέρδος της. Η τεχνική SBS συνίσταται στην κατάλληλη διαμόρφωση του διαγράμματος ακτινοβολίας της δορυφορικής κεραίας, ώστε η ισχύς που λαμβάνεται στο έδαφος να παραμένει περίπου σταθερή, ακόμη και κάτω από συνθήκες βροχόπτωσης. Γενικότερα, η τεχνική SBS αποτελεί υποσύστημα των δυνατοτήτων OBP που πιθανόν διαθέτει ο δορυφόρος.

1.7.2 Τεχνικές προσαρμοστικής μετάδοσης

Οι τεχνικές που ανήκουν στη συγκεκριμένη κατηγορία βασίζονται στην κατάλληλη επιλογή κυματομορφής από τους κόμβους του δορυφορικού δικτύου, δηλαδή το δορυφόρο και τους επίγειους σταθμούς, ανάλογα με την ποιότητα της ζεύξης. Η δυνατότητα επεξεργασίας σήματος είναι διαθέσιμη στους περισσότερους επίγειους σταθμούς του δικτύου, επομένως οι τεχνικές αυτές ονομάζονται τεχνικές “κοινών πόρων” (resource-shared). Μπορούν να ταξινομηθούν περαιτέρω στις ακόλουθες υποκατηγορίες:

- Προσαρμοστική Κωδικοποίηση (Adaptive Coding, AC): Η κωδικοποίηση υιοθετείται από τα δορυφορικά συστήματα για ανίχνευση και διόρθωση λανθασμένων ψηφίων και υλοποιείται με την εισαγωγή πλεοναζόντων (redundancy) ψηφίων στο σήμα πληροφορίας. Καθώς ο αριθμός των πλεοναζόντων ψηφίων αυξάνει, η πιθανότητα σφάλματος μειώνεται, αλλά την ίδια στιγμή αυξάνει και το απαιτούμενο εύρος ζώνης. Αυτό συνεπάγεται μια ανταλλαγή (trade-off) μεταξύ εύρους ζώνης και ισχύος, για δεδομένη πιθανότητα σφάλματος. Στις εφαρμογές δορυφορικών επικοινωνιών η διαδικασία της αποκωδικοποίησης πραγματοποιείται στο δέκτη χωρίς να χρειάζεται κάποιο είδος ανάδρασης από τον

πομπό. Αυτός ο τύπος κωδικοποίησης ονομάζεται FEC (Forward Error Correction) και επιτρέπει τη δυνατότητα αυτόματης διόρθωσης σφαλμάτων. Η αρχική σχεδίαση κωδίκων διόρθωσης σφαλμάτων αφορούσε τυχαία κατανεμημένα σφάλματα, δηλαδή σφάλματα που προέρχονταν από την επίδραση του θερμικού θορύβου. Όμως, η λειτουργία των σύγχρονων δορυφορικών ζεύξεων σε συχνότητες πάνω από 10GHz έχει να αντιμετωπίσει σφάλματα που δεν είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, αλλά εμφανίζουν παροξυσμικό χαρακτήρα (burst). Επομένως, η διαθεσιμότητα μιας δορυφορικής ζεύξης μπορεί να διατηρηθεί με την κατάλληλη μεταβολή του ρυθμού κωδικοποίησης, ώστε να γίνεται πιο ανθεκτική στους “καταιγισμούς σφαλμάτων”. Στις περιπτώσεις που η ζεύξη υποφέρει από σημαντική εξασθένηση λόγω διάδοσης, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν πιο αποδοτικά σχήματα κωδικοποίησης, που προέρχονται από τους λεγόμενους αλυσιδωτούς ή συνδεδεμένους κώδικες (concatenated codes). Οι αλυσιδωτοί κώδικες προκύπτουν από τους κατάλληλους συνδυασμούς δυο απλούστερων ειδών κώδικα, τους συμπαγείς κώδικες (block codes) και τους συνελκτικούς κώδικες (convolutional codes). Μια πρόσφατη εξέλιξη στον τομέα της κωδικοποίησης είναι οι παράλληλοι αλυσιδωτοί συνελκτικοί κώδικες, γνωστοί ως κώδικες turbo.

- Προσαρμοστική Διαμόρφωση (Adaptive Modulation, AM): Η προσαρμοστική διαμόρφωση μειώνει το λόγο της ενέργειας ψηφίου προς τη φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου (E_b / N_o) που απαιτείται για την επίτευξη μιας δεδομένης BER. Αυτό καθίσταται δυνατό με τη μείωση της φασματικής απόδοσης (μετρούμενη σε bps/Hz) όταν ο λόγος ισχύος φέροντος προς θόρυβο (Carrier-to-Noise Ratio, CNR) στην είσοδο του αποδιαμορφωτή μειώνεται εξαιτίας των φαινομένων διάδοσης. Έτσι, στις περιπτώσεις έντονης βροχόπτωσης, η τεχνική αυτή ανταλλάσσει φασματική απόδοση για τις ανάγκες της ισχύος. Το πλέον διαδεδομένο σχήμα διαμόρφωσης στις δορυφορικές επικοινωνίες είναι η διαμόρφωση φάσης (Phase Shift Keying, PSK). Συχνά όμως απαιτείται η μετάδοση περισσότερων ψηφίων ανά δευτερόλεπτο για δεδομένο εύρος ζώνης ραδιοσυχνοτήτων, δηλαδή μεγαλύτερη φασματική απόδοση. Για το σκοπό αυτό επιλέγονται σχήματα υψηλότερης τάξης, όπως QPSK, 8-PSK, 16-PSK και 64-PSK, οι οποίες οδηγούν αντίστοιχα σε 4,8,16 και 64 καταστάσεις για τη φάση του σήματος. Είναι δυνατή η ταυτόχρονη μεταβολή της φάσης και του πλάτους του φέροντος, οπότε προκύπτει η ορθογώνια διαμόρφωση πλάτους (Quadrature Amplitude Modulation, QAM). Σε γενικές

γραμμές, όσο αυξάνει η τάξη μιας διαμόρφωσης σχήματος M-PSK ή M-QAM, η φασματική απόδοση του συστήματος αυξάνει, αλλά η δορυφορική ζεύξη γίνεται περισσότερο επιρρεπής σε σφάλματα. Συνοψίζοντας, η προσαρμοστική διαμόρφωση χρησιμοποιεί σχήματα διαμόρφωσης με υψηλή απόδοση (π.χ. 16-PSK, 64-PSK ή 256-QAM) για συνθήκες καθαρού ουρανού με σκοπό τη βελτιστοποίηση της διέλευσης και πιο ανθεκτικά σχήματα (π.χ. BPSK και QPSK) κάτω από συνθήκες έντονων μετεωρολογικών φαινομένων για διατήρηση του ποσοστού διαθεσιμότητας.

- Μείωση Ρυθμού Δεδομένων (Data Rate Reduction, DRR): Αυτή η τεχνική επεξεργασίας του σήματος έγκειται στη μείωση του ρυθμού δεδομένων πληροφορίας όταν το σύστημα ελέγχου που παρακολουθεί την κατάσταση του καναλιού προβλέπει κάποια πιθανή βαθιά διάλειαση. Βέβαια, η εφαρμογή της DRR εξαρτάται από το είδος της υπηρεσίας και το κατά πόσο η υπηρεσία αυτή επιδέχεται μείωση του ρυθμού μετάδοσης της πληροφορίας. Στις περιπτώσεις που η ζεύξη υφίσταται διαλείψεις, η τεχνική DRR έχει ως αποτέλεσμα μόνο τη μείωση του απαιτούμενου λόγου CNR και παρουσιάζει το πλεονέκτημα της δίκαιης κατανομής πόρων του συστήματος σε όλους τους χρήστες.

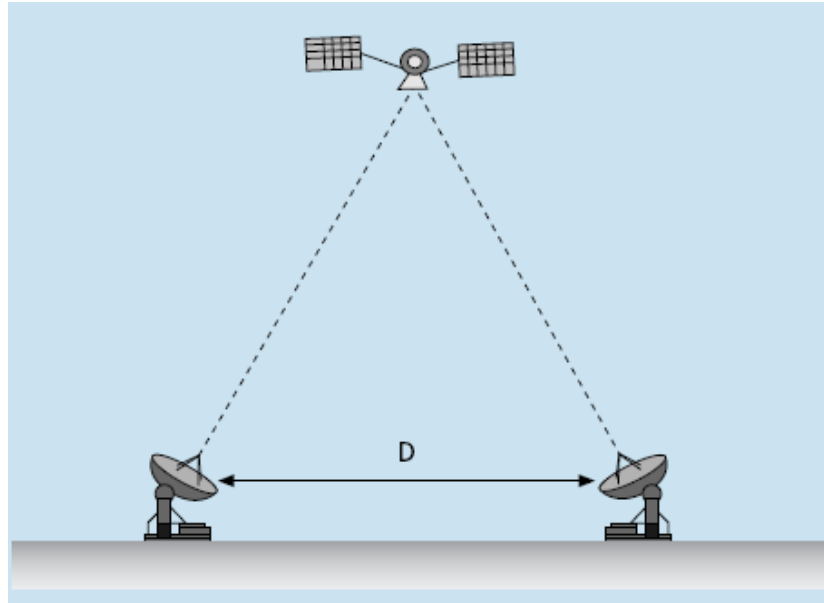
1.7.3 Σχήματα διαφορικής προστασίας

Τα σχήματα διαφορικής προστασίας είναι αντίμετρα προσανατολισμένα στην αντιμετώπιση των διαλείψεων λόγω βροχής, με απώτερο σκοπό τη λειτουργία της ζεύξης ακόμα και κάτω από τις άσχημες αυτές συνθήκες. Αποτελούν τις πιο αποδοτικές τεχνικές άμβλυνσης των διαλείψεων, εφόσον η απόσβεση λόγω βροχής είναι ο κυριότερος παράγοντας μείωσης της διαθεσιμότητας και της απόδοσης των δορυφορικών ζεύξεων που λειτουργούν πάνω από τα 10GHz.

Υπάρχουν δυο κύριες παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της απόδοσης της διαφορικής προστασίας. Η πρώτη είναι το διαφορικό κέρδος G (diversity gain) και ορίζεται ως η διαφορά (σε dB) μεταξύ της απόσβεσης σε λειτουργία απλής λήψης και της απόσβεσης σε λειτουργία διαφορικής λήψης, για την ίδια πιθανότητα λάθους ή για το ίδιο ποσοστό επί τοις εκατό του συνολικού χρόνου. Η δεύτερη είναι το διαφορικό πλεονέκτημα I (diversity improvement) που ορίζεται ως ο λόγος της πιθανότητας της υπέρβασης ενός συγκεκριμένου βάρους διάλειασης με απλή λήψη του σήματος προς την αντίστοιχη πιθανότητα για λήψη από περισσότερους σταθμούς. Θεωρητικά τα μεγέθη G και I είναι ισοδύναμα. Στην πράξη όμως, η προσέγγιση της επίδοσης ενός σχήματος

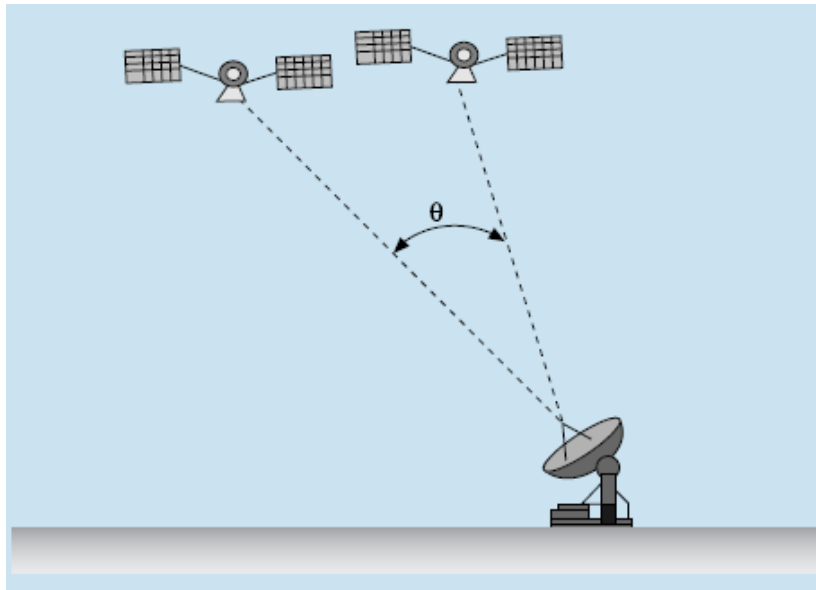
διαφορικής λήψης μέσω του διαφορικού πλεονεκτήματος, εμπεριέχει μεγαλύτερη ανακρίβεια λόγω πειραματικών δυσκολιών κατά τον υπολογισμό του. Τα σχήματα διαφορικής προστασίας διακρίνονται στις ακόλουθες επιμέρους κατηγορίες:

- Διαφορική λήψη θέσης (Site Diversity, SD): Η διαφορική λήψη θέσης (Σχήμα 1.1), γνωστή και ως διαφορική λήψη χώρου, εκμεταλλεύεται την ανομοιογένεια της βροχής και χρησιμοποιεί την αποσυσχέτιση των αποσβέσεων δυο σημάτων τα οποία ακολουθούν διαφορετικές διαδρομές. Αν το σήμα λαμβάνεται από πολλαπλές διαδρομές, είναι αρκετά πιθανό ότι μόνο σε μια από τις διαφορετικές εκδοχές του θα έχει συμβεί κάποια βαθιά διάλειψη, με τις υπόλοιπες να έχουν επηρεαστεί σε μικρότερο βαθμό. Η διαφορική λήψη θέσης εκμεταλλεύεται λοιπόν τα χαρακτηριστικά της βροχής με τη χρήση είτε δυο (διπλή διαφορική λήψη) είτε τριών (τριπλή διαφορική λήψη) επίγειων σταθμών. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ότι η πιθανότητα απόσβεσης που θα συμβεί ταυτόχρονα στις εναλλακτικές διαδρομές είναι σημαντικά μικρότερη από την αντίστοιχη πιθανότητα απόσβεσης που θα προκύψει για κάθε μια από τις διαδρομές ξεχωριστά. Για να λειτουργήσει η τεχνική αυτή απαιτείται οι σηματοθορυβικοί λόγοι που λαμβάνονται από τους επίγειους σταθμούς να υποβάλλονται διαρκώς σε σύγκριση. Έτσι, τα σήματα που λαμβάνονται από τους επίγειους σταθμούς αποστέλλονται σε ένα κεντρικό σταθμό, όπου επεξεργάζονται περαιτέρω με βάση συγκεκριμένα κριτήρια και στόχο τη βελτίωση του λόγου ισχύος φέροντος προς θόρυβο CNR. Είναι φανερό, λοιπόν, ότι για τη διαφορική λήψη θέσης είναι απαραίτητη η επικοινωνία μεταξύ των επίγειων σταθμών, επικοινωνία που επιτυγχάνεται με ενσύρματο ή ασύρματο τρόπο σε μια χαμηλότερη συχνότητα που δεν επηρεάζεται από τη βροχή. Ο πιο σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει το διαφορικό κέρδος της τεχνικής αυτής είναι η απόσταση D μεταξύ των επίγειων σταθμών. Με μεγάλες τιμές της απόστασης αυτής είναι δυνατή η παράκαμψη της έντονης βροχόπτωσης και η επίτευξη υψηλών τιμών διαφορικού κέρδους, που συνήθως είναι οι μεγαλύτερες ανάμεσα σε όλες τις τεχνικές άμβλυνσης των διαλείψεων.



Σχήμα 1.1 – Γεωμετρία σχήματος διπλής διαφορικής λήψης θέσης

- Διαφορική λήψη τροχιάς (Orbit Diversity, OD): Παρά το γεγονός ότι η διαφορική λήψη θέσης μπορεί να θεωρηθεί ως το πιο αποτελεσματικό σχήμα διαφορικής λήψης από τεχνική σκοπιά, θα πρέπει να επανεξεταστεί η αποδοτικότητά της ως προς το κόστος, καθώς απαιτεί την εγκατάσταση τουλάχιστον δυο επίγειων σταθμών μαζί με μια επίγεια σύνδεση. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη της διαφορικής λήψης τροχιάς OD (Σχήμα 1.2) ή διαφορικής λήψης δορυφόρου (satellite diversity), η οποία επιτρέπει στους επίγειους σταθμούς να επιλέγουν μεταξύ πολλαπλών δορυφόρων. Υιοθετείται και εδώ η στρατηγική των διαφορετικών διαδρομών, επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για σταθερές υπηρεσίες μέσω δορυφόρου. Επιτυγχάνεται με την ενεργοποίηση ενός καναλιού από ένα δεύτερο δορυφόρο, γωνιακά μετατοπισμένο ως προς τον κύριο δορυφόρο που συνήθως χρησιμοποιείται από το σύστημα. Η κύρια γεωμετρική παράμετρος που επηρεάζει την απόδοση της τεχνικής αυτής είναι η γωνιακή απόσταση θ μεταξύ των δορυφόρων. Πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής αποτελεί και το γεγονός ότι δεν είναι αναγκαία η διασύνδεση των δυο σταθμών στο διάστημα. Σημειώνεται όμως ότι η αποσυσχέτιση της απόσβεσης της βροχής που επιτυγχάνεται με χρήση της διαφορικής λήψης τροχιάς είναι μικρότερη από την αντίστοιχη που επιτυγχάνεται με χρήση της διαφορικής λήψης θέσης.



Σχήμα 1.2 - Γεωμετρία σχήματος διπλής διαφορικής λήψης τροχιάς

- Διαφορική λήψη συχνότητας (Frequency Diversity, FD): Η διαφορική λήψη συχνότητας εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι όταν το σήμα μεταδίδεται ταυτόχρονα σε δυο φέρουσες συχνότητες, η συσχέτιση των διαλείψεων στα σήματα που λαμβάνονται είναι μικρή. Στην πράξη, η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται στις δορυφορικές επικοινωνίες με ελαφρώς διαφορετικό τρόπο. Γενικά, καθώς αυξάνει η συχνότητα λειτουργίας, η δορυφορική ζεύξη υποφέρει περισσότερο από φαινόμενα όπως είναι οι σπινθηρισμοί, η αποπόλωση, η απόσβεση κ.α. λόγω της πτώσης υδρομετεωριτών. Το κρίσιμο κατώφλι είναι αυτό της συχνότητας των 10GHz, κάτω από την οποία, όπως έχει αναφερθεί, η διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων πραγματοποιείται υπό ευνοϊκότερες συνθήκες όσον αφορά στους ατμοσφαιρικούς μηχανισμούς διάδοσης. Επομένως, η δυνατότητα λειτουργίας των σύγχρονων δορυφόρων σε πολλές διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, επιτρέπει τη χρήση χαμηλότερων ζωνών συχνοτήτων στις περιπτώσεις όπου εμφανίζονται βαθιές διαλείψεις. Οι δορυφόροι που εκτοξεύονται τα τελευταία χρόνια διαθέτουν πολυάριθμους διασυνδεδεμένους αναμεταδότες, οι οποίοι λειτουργούν σε περισσότερες ζώνες συχνοτήτων. Η τεχνική λοιπόν της διαφορικής λήψης συχνότητας υιοθετεί τη χρήση ζωνών υψηλών συχνοτήτων (Ka ή EHF) κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας και μεταπηδά σε ζώνες χαμηλότερων συχνοτήτων (C ή Ku) όταν η απόσβεση λόγω βροχής υπερβαίνει ένα δοσμένο κατώφλι. Για την υλοποίηση της τεχνικής αυτής δεν απαιτείται επιπλέον

εξοπλισμός όσον αφορά στο διαστημικό τμήμα του δορυφορικού συστήματος, αλλά κάθε επίγειος σταθμός πρέπει να εξοπλιστεί με συγκεκριμένο RF υλικό, καθώς και μια επιπλέον κεραία, με προφανή συνέπεια την πρόσθετη σημαντική οικονομική επιβάρυνση. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της μεγάλης απόστασης στο φάσμα των συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται κατά την εφεδρική λειτουργία (κανάλια χαμηλότερων συχνοτήτων) από αυτές της κανονικής λειτουργίας. Ένα άλλο μειονέκτημα της μεθόδου έχει να κάνει με την κατανομή των συχνοτήτων. Συγκεκριμένα, στη ζώνη 20/30GHz είναι διαθέσιμο μεγάλο εύρος ζώνης, ενώ σε χαμηλότερες συχνότητες η χωρητικότητα είναι περιορισμένη, οπότε πρέπει να αποκλειστούν υπηρεσίες με μεγάλες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης.

Όπως γίνεται φανερό από τα παραπάνω, οι τεχνικές διαφορικής λήψης θέσης και διαφορικής λήψης τροχιάς εκμεταλλεύονται τη χωρική δομή του μέσου της βροχής, ενώ η διαφορική λήψη συχνότητας βασίζεται στη φασματική εξάρτηση της βροχής. Τέλος, επισημαίνεται ότι για την επιλογή της τεχνικής που θα χρησιμοποιηθεί λαμβάνεται υπόψη και η αντίστοιχη οικονομική δαπάνη και όχι μόνο η πιθανή βελτίωση που θα επιτευχθεί στην απόδοση της ζεύξης.

1.8 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των συστημάτων δορυφορικών επικοινωνιών είναι το μεγάλο εύρος εφαρμογών που μπορούν να υποστηρίξουν και η πληθώρα των υπηρεσιών που μπορούν να προσφέρουν. Το γεγονός αυτό αποτελεί ένα σημαντικό όπλο απέναντι στον ολοένα αυξανόμενο ανταγωνισμό που υφίσταται σήμερα στον τομέα των τηλεπικοινωνιών και δίνει τη δυνατότητα για περαιτέρω επέκταση και ανάπτυξη των συστημάτων αυτών. Τα συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών διαφέρουν από τα αντίστοιχα επίγεια σε μια προφανή, αλλά πολύ σημαντική πτυχή. Ο πομπός δεν βρίσκεται πλέον στο έδαφος, αλλά στο διάστημα, επομένως είναι σε θέση να εξυπηρετεί τις ανάγκες μια πολύ μεγάλης γεωγραφικής περιοχής. Επίσης, οι διάφορες υπηρεσίες μπορούν να εγκατασταθούν άμεσα, εφόσον η κάλυψη είναι διαθέσιμη για όλους από τη στιγμή που ξεκινά η μετάδοση. Τέλος, ακόμη και οι χρήστες που βρίσκονται σε πολύ απομακρυσμένες θέσεις απολαμβάνουν την ίδια ποιότητα υπηρεσιών με οποιοδήποτε άλλο χρήστη στην

περιοχή κάλυψης. Οι δορυφόροι, λοιπόν, δεν περιορίζονται από εθνικά όρια παρέχοντας τη δυνατότητα για πραγματικά διεθνείς υπηρεσίες.

Η επανάσταση των νέων τεχνολογιών οδήγησε στην ανάπτυξη νέων εφαρμογών και την παροχή καινοτόμων υπηρεσιών μέσω των δορυφορικών συστημάτων. Τα σύγχρονα δορυφορικά συστήματα μπορούν να καλύψουν ταυτόχρονα διάφορες περιοχές με χρήση πολλαπλών σημειακών δεσμών (multiple spot beams), παρέχοντας σε κάθε περιοχή υψηλά επίπεδα υπηρεσιών. Παράλληλα, οι δορυφόροι τελευταίας τεχνολογίας έχουν τη δυνατότητα επεξεργασίας επί του ίδιου του δορυφόρου (OBP), γεγονός που επιτρέπει λειτουργίες πολυπλεξίας, δρομολόγησης και άλλων. Έτσι, η χρήση OBP τεχνικών αφενός οδηγεί σε σημαντική βελτίωση των ήδη υφιστάμενων υπηρεσιών και αφετέρου ανοίγει το δρόμο για μια εντελώς νέα γενιά δορυφορικών υπηρεσιών.

Στη συνέχεια ακολουθεί ανάλυση των βασικότερων εφαρμογών των δορυφορικών επικοινωνιών, τόσο των παραδοσιακών όσο και κάποιων πιο σύγχρονων, οι οποίες αναμένεται να εδραιωθούν στο προσεχές μέλλον. Η παρουσίαση που ακολουθεί βασίζεται στην ακόλουθη ταξινόμηση:

- 1) Εφαρμογές τηλεόρασης, βίντεο και ήχου
- 2) Σταθερή τηλεφωνία
- 3) Υπηρεσίες δεδομένων και δικτύων ευρείας ζώνης
- 4) Υπηρεσίες κινητών τηλεπικοινωνιών

1.8.1 Εφαρμογές τηλεόρασης, βίντεο και ήχου

Η δημοφιλέστερη χρήση των δορυφόρων είναι η μετάδοση τηλεοπτικών προγραμμάτων. Η σημασία της δορυφορικής μετάδοσης είναι τεράστια, αφού εκατομμύρια συνδρομητές σε όλο τον κόσμο έχουν τη δυνατότητα να λαμβάνουν μεγάλο αριθμό τηλεοπτικών και ραδιοφωνικών προγραμμάτων με ελάχιστο κόστος και χρήση φθηνού και εύχρηστου εξοπλισμού. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι παροχής δορυφορικής τηλεόρασης, ανάλογα με τις ανάγκες και τους σκοπούς των παρόχων ή των χρηστών. Με βάση τον τρόπο χρέωσης για την παροχή της υπηρεσίας και το ρόλο του δορυφόρου σε αυτή, προκύπτει η ακόλουθη κατηγοριοποίηση [Elbert, 1997]:

- Ευρυεκπομπή Τηλεοπτικού Σήματος μέσω της Ατμόσφαιρας (Over-the-air TV Broadcasting): Ο τρόπος αυτός αποτελεί πλέον πρότυπο για τη μετάδοση τηλεοπτικών προγραμμάτων με χρήση των ζωνών συχνοτήτων VHF (30 έως 300MHz) και UHF (300 έως 3,000MHz). Η μετάδοση γίνεται με χρήση τοπικών

πομπών, ώστε να καλυφθεί μια πόλη ή περιοχή. Ο ρόλος του δορυφόρου στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι να μεταφέρει το σήμα του δικτύου από ένα κεντρικό στούντιο σε πολλαπλούς επίγειους σταθμούς λήψης, καθένας από τους οποίους συνδέεται με έναν τοπικό πομπό. Η μέθοδος αυτή έχει ονομαστεί διανομή (TV distribution) ή εκ νέου ευρυεκπομπή (TV rebroadcast) τηλεοπτικού σήματος. Στην περίπτωση που ο επίγειος σταθμός διαθέτει εξοπλισμό uplink μετάδοσης, μπορεί να μεταδώσει σήμα πίσω στο κεντρικό στούντιο. Τα έσοδα για τις λειτουργίες τοπικής μετάδοσης προέρχονται από δυο πιθανές πηγές, τις διαφημίσεις και τους δημόσιους φόρους.

- Καλωδιακή Τηλεόραση (Cable TV, CATV): Η καλωδιακή τηλεόραση ξεκίνησε για να υποστηρίξει την τοπική λήψη αγροτικών περιοχών, αλλά γρήγορα καθιερώθηκε ως η κυρίαρχη δύναμη σε πολλές χώρες. Ήταν η πρώτη μέθοδος παροχής μιας ευρείας γκάμας προγραμμάτων υπό τον άμεσο έλεγχο του παρόχου της υπηρεσίας. Το τηλεοπτικό σήμα διανέμεται στον τελικό χρήστη μέσω ομοαξονικού καλωδίου, όπως μαρτυρά και το όνομα της τεχνικής. Αφετηρία είναι ένας κεντρικός κόμβος συνδεδεμένος με δορυφορικούς δέκτες, ενώ το σήμα στην πορεία υπόκειται σε διαδοχικές ενισχύσεις. Ο βασικός τρόπος χρηματοδότησης εδώ είναι οι μηνιαίες συνδρομές που πληρώνουν οι χρήστες της υπηρεσίας.
- Απευθείας-στην-Οικία του χρήστη (Direct-to-Home TV, DTHTV): Η τεχνική αυτή αποτελεί το τελευταίο βήμα του δορυφορικού δικτύου τηλεόρασης. Ταυτόχρονα είναι η μοναδική περίπτωση διανομής τηλεοπτικού σήματος όπου χρησιμοποιείται απευθείας ζεύξη του δορυφόρου με το χρήστη, χωρίς να μεσολαβεί δίκτυο άλλης μορφής ανάμεσά τους. Μέσω των δυνατοτήτων κάλυψης μεγάλων περιοχών στο έδαφος που διαθέτει ένας δορυφόρος GEO μπορεί να εκπέμψει το ίδιο σήμα σε όλη την έκταση μίας χώρας με χαμηλό κόστος ανά χρήστη. Η μεγάλη διάδοση της τεχνικής αυτής βασίστηκε στη μείωση του μεγέθους των κεραιών λήψης. Οι κεραιές έγιναν μικρότερες επομένως το κόστος τους μειώθηκε, η εγκατάστασή τους είναι πλέον ευκολότερη, η παρουσία τους έγινε πιο διακριτική, ενώ σημαντικό είναι το γεγονός ότι πολλαπλοί χρήστες μπορούν να μοιράζονται την ίδια κεραία. Η χρήση διαφόρων τεχνικών ψηφιακής συμπίεσης οδήγησε σε πολλαπλασιασμό της χωρητικότητας, άρα και διεύρυνση των προγραμμάτων από τα οποία μπορούν να επιλέξουν οι χρήστες.

Το επόμενο βήμα στις εφαρμογές τηλεόρασης είναι η παροχή διαδραστικής ψηφιακής τηλεόρασης (interactive digital TV). Μέσω της εκπομπής ψηφιακής τηλεόρασης είναι δυνατή η παροχή υπηρεσιών βίντεο, ήχου και δεδομένων στους χρήστες χωρίς την ανάγκη ύπαρξης πολύπλοκων υποδομών. Έτσι, παρέχονται νέες δυνατότητες τόσο στο καταναλωτικό κοινό όσο και στους παρόχους των τηλεοπτικών προγραμμάτων. Παράλληλα, είναι πλέον εφικτή η μετάδοση προγραμμάτων από παρόχους που βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές ή διαθέτουν εξοπλισμό περιορισμένης κλίμακας. Με χρήση δορυφορικών τερματικών χαμηλού κόστους συνεισφέρουν τα δικά τους τηλεοπτικά προγράμματα στα υπάρχοντα δίκτυα ψηφιακής τηλεόρασης, παρέχοντας υπηρεσίες οι οποίες διατίθενται ανάλογα με τη ζήτηση (on-demand). Τα τερματικά που χρησιμοποιούνται από τους παρόχους για την εκπομπή του σήματος προς το δορυφόρο ονομάζονται RCSTs (DVB-RCS Terminals). Το DVB-RCS (Digital Video Broadcasting – Return Channel via Satellite) αποτελεί την υπάρχουσα προδιαγραφή για την παροχή καναλιών στα δορυφορικά δίκτυα με σκοπό την επικοινωνία με τερματικά σταθερής θέσης. Στη συνέχεια το σήμα αναμεταδίδεται από το δορυφόρο σε κάποιο άλλο RCST. Μέσω αυτού το τηλεοπτικό περιεχόμενο διανέμεται στα υπάρχοντα τερματικά των χρηστών, που ονομάζονται set-top-boxes (STB). Αυτά είναι συσκευές που συνδέουν την τηλεόραση και μια εξωτερική πηγή σήματος, μετατρέποντας το σήμα σε περιεχόμενο που εμφανίζεται στην οθόνη. Στην περίπτωση που εξετάζεται, το εξωτερικό σήμα προέρχεται από τη δορυφορική κεραία λήψης. Οι δορυφόροι με δυνατότητα επεξεργασίας OBP παρέχουν υπηρεσίες που δίνουν τη δυνατότητα στους τελικούς χρήστες να επικοινωνούν με τους παρόχους των προγραμμάτων και επιτρέπουν στους θεατές να αλληλεπιδρούν μέσω του STB με το επιπρόσθετο υλικό που είναι διαθέσιμο.

Μέσω των τερματικών RCSTs είναι δυνατή και η παροχή υπηρεσιών βίντεο κατ' απαίτηση (Video on Demand, VoD). Το βίντεο κατ' απαίτηση είναι μια οπτικοακουστική, αλληλεπιδραστική υπηρεσία, κατά την οποία ο χρήστης ελέγχει από απόσταση έναν εξυπηρετητή ροής (streaming server), εξομοιώνοντας ουσιαστικά τη λειτουργία μιας οικιακής συσκευής βίντεο. Οι χρήστες έχουν τη δυνατότητα να επιλέγουν το περιεχόμενο που επιθυμούν να παρακολουθήσουν μέσα από μια βάση δεδομένων, αλλά και να ελέγχουν την αναπαραγωγή της ροής. Τα STB των πελατών συνδέονται και εδώ με κάποιο RCST τερματικό, το οποίο πραγματοποιεί την επικοινωνία με το δορυφορικό δίκτυο. Σημειώνεται ότι και ο VoD εξυπηρετητής είναι συνδεδεμένος με ένα RCST, ώστε να επικοινωνεί με τον αντίστοιχο δορυφόρο. Στην πλευρά του χρήστη το RCST ελέγχει την IP κίνηση και τη διανέμει κατάλληλα στα διάφορα STB, τα οποία τελικά αποσπών και αποκωδικοποιούν το

βίντεο. Ανάλογη είναι και η μετάδοση ροής βίντεο και ήχου (video and audio streaming). Η υπηρεσία αυτή περιλαμβάνει τη μετάδοση οπτικού και ακουστικού περιεχομένου στους τελικούς χρήστες, οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα να το παρακολουθήσουν χωρίς να είναι απαραίτητη η παραλαβή ολόκληρου του αρχείου.

1.8.2 Σταθερή τηλεφωνία

Με τον όρο σταθερή τηλεφωνία (fixed telephony) εννοείται ότι οι επίγειοι σταθμοί είναι τοποθετημένοι στην ξηρά και εξυπηρετούν σταθερούς χρήστες. Οι εταιρείες παροχής τηλεφωνικών υπηρεσιών χρησιμοποιούν τις δορυφορικές επικοινωνίες για τη διεξαγωγή τηλεφωνικών κλήσεων μεταξύ μεγάλων αποστάσεων, επεκτείνοντας έτσι την ακτίνα δράσης των Δημόσιων Τηλεφωνικών Δικτύων Μεταγωγής (Public Switched Telephone Networks, PSTN). Εξαιτίας όμως της τεράστιας απόστασης δημιουργείται μια καθυστέρηση της τάξης των 250ms που καθιστά αφύσικη τη συνομιλία. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την εξέλιξη των δικτύων οπτικών ινών, περιόρισε τη χρήση των δορυφόρων προς όφελος των επίγειων δικτύων επικοινωνιών. Σε περιοχές όμως όπου δεν είναι εύκολη η εισαγωγή επίγειων τηλεφωνικών δικτύων εξαιτίας της χαμηλής πυκνότητας του πληθυσμού ή της μορφολογίας του εδάφους, χρησιμοποιούνται δορυφόροι για τη σύνδεση του τοπικού τηλεφωνικού κέντρου με το υπόλοιπο δίκτυο. Η τεχνολογία αυτή ονομάζεται διασύνδεση τηλεφωνικών δικτύων κορμού μέσω δορυφόρου (trunk satellite telephone networking) και παρέχει υποστήριξη στα ήδη εγκατεστημένα επίγεια δίκτυα.

Σε αναλογία με το δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο υπάρχουν και τα Δίκτυα Σταθερής Τηλεφωνίας μέσω Δορυφόρου (Fixed Telephony Satellite Networks, FTSN) στα οποία παρέχεται εξυπηρέτηση στατικών χρηστών από επίγειους δορυφορικούς σταθμούς, με τη λειτουργία μεταγωγής των κλήσεων να πραγματοποιείται ψηφιακά από τον δορυφόρο. Η σωστή διασύνδεση ενός δικτύου FTSN με το επίγειο PSTN είναι καθοριστικής σημασίας για την ορθή λειτουργία της υπηρεσίας αυτής. Η ιδέα βασίζεται στη χρήση ενός δορυφορικού δικτύου σαν να ήταν υλοποιημένο με τον κλασικό τρόπο, δηλαδή με χρήση τοπικών βρόχων, μεταγωγέων και κόμβων. Για την περίπτωση του δημόσιου επίγειου δικτύου, ο τοπικός βρόχος συνδρομητή αποτελεί το χαμηλότερο επίπεδο ιεραρχίας, είναι μοναδικός για κάθε συνδρομητή και εκτείνεται τυπικά σε απόσταση μερικών χιλιομέτρων. Με τη χρήση δικτύων FTS είναι δυνατή η επέκταση του τοπικού βρόχου κατά εκατοντάδες χιλιόμετρα. Ενίοτε, οι ζεύξεις του FTSN μπορούν να υλοποιηθούν μέσα στο ίδιο το PSTN, ειδικά σε περιοχές όπου η κατασκευή επίγειων γραμμών είναι ακριβή ή απλά μη πρακτική.

Για τη διάθεση εύρους ζώνης σε δίκτυα σταθερής τηλεφωνίας μέσω δορυφόρου ακολουθούνται δυο διαφορετικές πολιτικές. Στην πρώτη πραγματοποιείται διάθεση εύρους ζώνης ανάλογα με τη ζήτηση (demand assigned bandwidth) και ακολουθείται στην περίπτωση κλήσεων εσωτερικού, βελτιώνοντας τη διαχείριση του φορτίου του δορυφορικού δικτύου. Σε αυτή γίνεται διάθεση μιας συγκεκριμένης συχνότητας σε ένα κανάλι φωνής καθ' όλη τη διάρκεια της κλήσης. Οι χρησιμοποιούμενες συχνότητες ανήκουν στο εύρος ζώνης του αναμεταδότη και η διαχείρισή τους γίνεται μέσω ενός κεντρικού συστήματος ελέγχου του δικτύου. Η λειτουργία αυτή είναι ισοδύναμη με μια τηλεφωνική συνδιαλλαγή σε εθνικό επίπεδο, δηλαδή σαν να είχαμε τη σύνδεση κάθε χρήστη απευθείας στο εθνικό δημόσιο δίκτυο μεταγωγής. Επομένως, το FTSN μπορεί να παρακάμψει ολόκληρο το δημόσιο δίκτυο, εκτός όμως από τη διεθνή “πύλη” (gateway). Στην περίπτωση λοιπόν των διεθνών κλήσεων χρησιμοποιείται η δεύτερη πολιτική, η οποία ονομάζεται προανάθεση εύρους ζώνης (preassigned bandwidth). Συχνά, οι δορυφορικοί αναμεταδότες παίζουν το ρόλο διεθνών πυλών (international gateways) για τη διασύνδεση κλήσεων μεταξύ χωρών και ηπείρων.

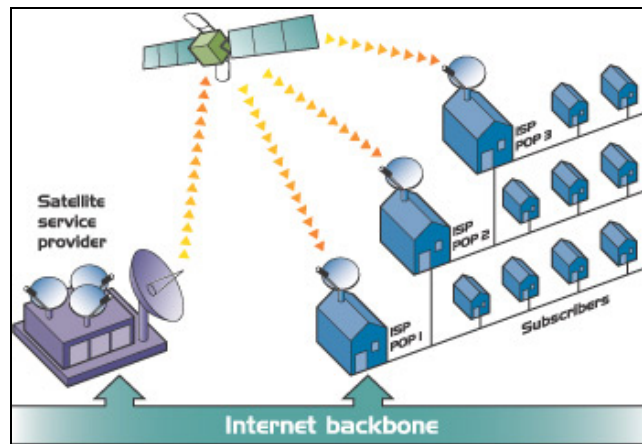
Στις δορυφορικές υπηρεσίες νέας γενιάς, οι οποίες θα παρέχονται από OBP δορυφόρους, ανήκει και η υπηρεσία της IP “πολυδιάσκεψης” (IP multiconference). Η υπηρεσία αυτή θα παρέχει τις ίδιες δυνατότητες επικοινωνίας με την παραδοσιακή τηλεφωνία, αλλά θα περιλαμβάνει και κάποιες υπηρεσίες προστιθέμενης αξίας. Αυτές θα παρέχονται μέσω της εγκατάστασης συνδέσεων πολυμέσων μεταξύ δυο ή περισσότερων χρηστών. Η υπηρεσία της IP διάσκεψης (IP conference) επιτρέπει κλήσεις μεταξύ απλών χρηστών, διασκέψεις και βίντεο-διασκέψεις μεταξύ πολλαπλών χρηστών. Επίσης, περιλαμβάνονται και κλήσεις φωνής από χρήστη σε χρήστη. Για την υπηρεσία αυτή είναι πολύ σημαντική η δυνατότητα της εκπομπής προς πολλαπλούς χρήστες ταυτόχρονα (multicast). Αυτό επιτυγχάνεται με την εισαγωγή της Μονάδας Ελέγχου Πολλαπλών Σημείων (Multipoint Control Unit, MCU) στην οποία συνδέονται όλα τα τερματικά και η οποία αναλαμβάνει τη μετάδοση της πολυπλεγμένης ροής πολυμέσων. Μέσω της εκπομπής προς πολλαπλούς χρήστες μειώνεται η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο που εισάγουν οι αλληλεπιδραστικές εφαρμογές και βελτιώνεται έτσι η ποιότητα υπηρεσίας.

1.8.3 Υπηρεσίες δεδομένων και δικτύων ευρείας ζώνης

Στη σημερινή εποχή η μετάδοση και διανομή οποιουδήποτε ψηφιακού περιεχομένου πραγματοποιείται με παρεμφερή τρόπο. Τα δεδομένα ψηφιοποιούνται και εισάγονται σε πακέτα με τη μορφή δεδομενογραμμάτων (μικρών πακέτων από δεδομένα), ώστε να

μεταφερθούν μέσω κάποιου δικτύου. Στην περίπτωση των δικτύων δορυφορικών επικοινωνιών συμβαίνει κάτι αντίστοιχο. Συνήθως, η μετάδοση δεδομένων δεν υποφέρει από την καθυστέρηση που εισάγεται λόγω μεγάλης διαδρομής. Έτσι, πολλοί διεθνείς και τοπικοί τηλεπικοινωνιακοί φορείς χρησιμοποιούν δορυφορικές ζεύξεις δεδομένων ως συμπλήρωμα των ήδη υπάρχοντων ενσύρματων δικτύων. Ταυτόχρονα, διάφορες πολυεθνικές εταιρείες και διεθνείς οργανισμοί εκμεταλλεύονται τη δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων μέσω δορυφορικών δικτύων, ιδιαίτερα από τη στιγμή που το μέγεθος και το κόστος των τερματικών διαρκώς μειώνονται. Το ευρύ φάσμα εφαρμογών, η κάλυψη τεράστιων γεωγραφικών περιοχών και η διάθεση μεγάλου εύρους ζώνης χωρίς συμβιβασμό στην ποιότητα των υπηρεσιών, καθιστούν τα δορυφορικά δίκτυα όλο και πιο ελκυστικά για το σκοπό αυτό. Οι βασικές κατηγορίες υπηρεσιών που υποστηρίζονται είναι οι ακόλουθες.

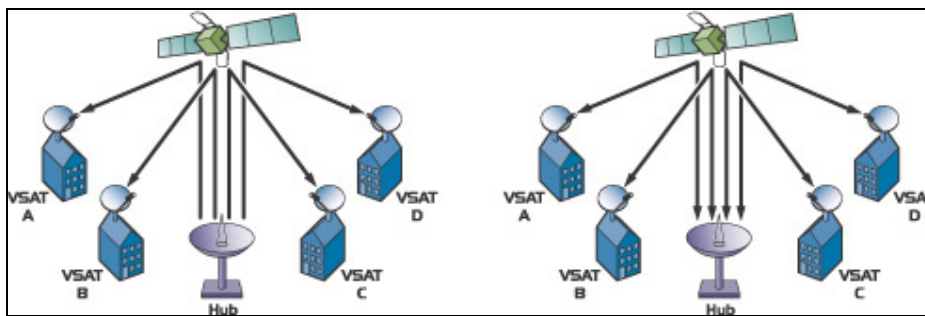
- IP μέσω δορυφόρου για τους παρόχους υπηρεσιών διαδικτύου (ISPs): Στην περίπτωση αυτή οι διάφοροι φορείς παροχής Internet χρησιμοποιούν δορυφορικές ζεύξεις, ώστε να παρακάμψουν τα επίγεια δίκτυα, που συχνά υποφέρουν από συμφόρηση, και να συμπληρώσουν τη συνδεσιμότητα της “ραχοκοκαλιάς” (backbone) του δικτύου. Η προσέγγιση αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι η δορυφορική σύνδεση δεν είναι στην πραγματικότητα μια σύνδεση σημείου προς σημείο (point-to-point) όπως η ενσύρματη σύνδεση, αλλά επιτρέπει την αποστολή προς πολλαπλά σημεία ταυτόχρονα. Έτσι, για περιπτώσεις όπου είναι αναγκαία η παροχή μεγάλου όγκου δεδομένων σε περιοχές που δεν έχουν καλή σύνδεση με το διαδίκτυο, είναι δυνατή η προώθηση της πληροφορίας σε τοπικούς εξυπηρετητές, οι οποίοι ονομάζονται Σημεία Παρουσίας (Points of Presence, PoP). Τα σημεία αυτά λειτουργούν με τη σειρά τους ως πάροχοι διαδικτύου για τους τοπικούς χρήστες ή τις τοπικές κοινότητες χρηστών. Συμπερασματικά, οι δορυφορικές επικοινωνίες μπορούν να υποβοηθήσουν τους τοπικούς εξυπηρετητές, ειδικά όταν δεν υπάρχει αξιόπιστη σύνδεση με το δίκτυο κορμού (backbone) του υπόλοιπου συστήματος.



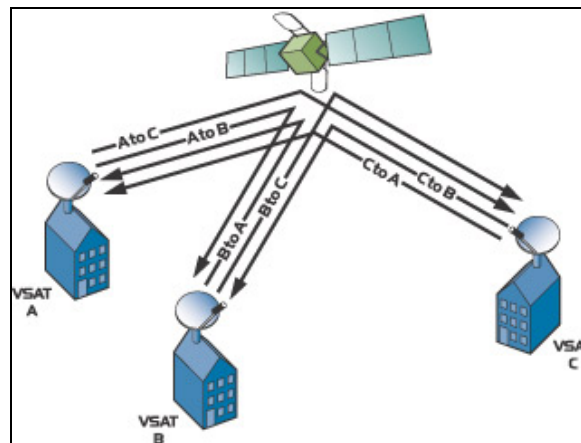
Σχήμα 1.3 – Παροχή πρόσβασης στο διαδίκτυο μέσω δορυφόρου

- Δίκτυα υπολογιστών μέσω VSAT: Μια ιδιαίτερη και διαδεδομένη εφαρμογή μεταφοράς δεδομένων μέσω δορυφόρου είναι τα δίκτυα VSAT. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας, οι επίγειες κεραιές και το μέγεθος του υπόλοιπου εξοπλισμού έχουν μειωθεί σε τέτοιο βαθμό, ώστε τα επίγεια τερματικά να μπορούν να τοποθετηθούν στις εγκαταστάσεις των πελατών. Αυτά ονομάζονται Τερματικά Πολύ Μικρής Επιφάνειας (Very Small Aperture Terminals, VSAT) και συνήθως έχουν διάμετρο μικρότερη από 2 μέτρα. Οι μικροσταθμοί αυτοί έχουν δυνατότητες υποστήριξης εφαρμογών φωνής, δεδομένων και βίντεο, ενώ με απευθείας διασύνδεση πολλών από αυτά μεταξύ τους, είναι δυνατή η παράκαμψη ολόκληρου του δημόσιου δικτύου μεταγωγής. Έτσι, οργανισμοί και επιχειρήσεις με πολλές μακρινές θυγατρικές μπορούν να δημιουργήσουν ένα ιδιωτικό, υψηλής ταχύτητας δορυφορικό ενδοδίκτυο (intranet), το οποίο συνδέει τα κεντρικά με τα διάφορα τοπικά υποκαταστήματα. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι τα VSATs, λόγω του μικρού μεγέθους τους, μπορούν να λειτουργήσουν ως κόμβοι του δικτύου χωρίς να είναι απαραίτητη η ενσύρματη σύνδεση όλων των τμημάτων της επιχείρησης. Τα δίκτυα VSAT παρέχουν αποδοτική επικοινωνία σημείου προς πολλαπλά σημεία (point-to-multipoint), είναι εύκολα στην εγκατάσταση και μπορούν να επεκταθούν με πολύ χαμηλό πρόσθετο κόστος. Προσφέρουν άμεση πρόσβαση, συνεχή και γρήγορη μετάδοση υψηλής ποιότητας, ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για οποιοδήποτε είδος μετάδοσης από δεδομένα μέχρι φωνή, fax και βίντεο. Ακολουθούνται δυο βασικές φιλοσοφίες σχεδίασης τοπικών δικτύων (Local Area Network, LAN) με χρήση VSAT, η πρώτη με τοπολογία αστέρα (star) και η άλλη με τοπολογία πλέγματος (mesh), ενώ πολύ συχνά χρησιμοποιούνται και υβριδικές

(hybrid) τεχνολογίες. Στην τοπολογία αστέρα, που είναι πιο κατάλληλη για συγκεντρωτικές εφαρμογές, ένας κεντρικός επίγειος σταθμός λειτουργεί ως πλήμνη (hub), μέσω της οποίας οι υπόλοιποι απομακρυσμένοι σταθμοί μπορούν να στέλνουν και να λαμβάνουν δεδομένα μεταξύ τους. Η διαδικασία αυτή μπορεί να είναι μονόδρομη ή και αμφίδρομη. Στην περίπτωση συνδεσμολογίας πλέγματος, τα απομακρυσμένα τερματικά έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνούν μεταξύ τους χωρίς τη μεσολάβηση του κεντρικού σταθμού. Η διάταξη αυτή είναι κατάλληλη ιδιαίτερα για μεγάλες εταιρίες, των οποίων οι τοπικές εγκαταστάσεις πρέπει να έρθουν σε επαφή με άλλες περιοχές.



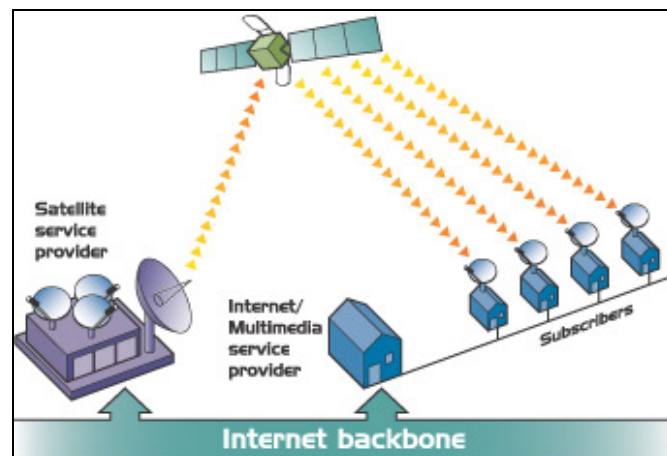
Σχήμα 1.4 – Δίκτυα VSAT σε τοπολογία αστέρα



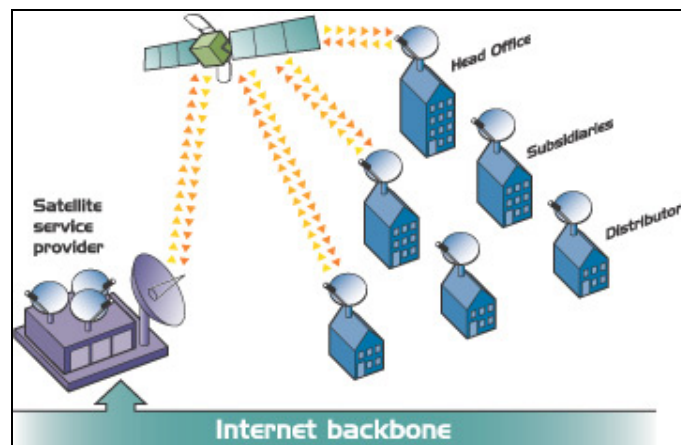
Σχήμα 1.5 – Δίκτυο VSAT σε τοπολογία πλέγματος

- Υπηρεσίες τελικού χρήστη για οικίες ή μικρές επιχειρήσεις (End-user services for home or small office): Η πρόσβαση ευρείας ζώνης θεωρείται συνήθως υπηρεσία προσφερόμενη από σταθερά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Υπηρεσίες όμως ευρείας ζώνης είναι δυνατόν να προσφερθούν σε αποστάσεις μερικών μόνο χιλιομέτρων από τους τοπικούς τηλεφωνικούς κόμβους, με αποτέλεσμα να είναι αδύνατη η παροχή τους σε σπίτια αγροτικών ή απομακρυσμένων περιοχών. Με χρήση του

Internet μέσω δορυφόρου, κάθε χρήστης στην περιοχή κάλυψης μπορεί να απολαμβάνει τις υπηρεσίες αυτές, με την προϋπόθεση ότι διαθέτει τον κατάλληλο εξοπλισμό. Η σύνδεση του δορυφόρου με τους τελικούς χρήστες μπορεί να είναι είτε μονόδρομη, οπότε οι χρήστες απλά λαμβάνουν δεδομένα, είτε αμφίδρομη, οπότε υπάρχει και η δυνατότητα αποστολής δεδομένων. Με το δορυφορικό τρόπο μετάδοσης, ο αριθμός των εν δυνάμει χρηστών που μπορούν να λάβουν και να αποκωδικοποιήσουν δεδομένα μπορεί να ρυθμιστεί σε ένα χρήστη (unicast), σε μια ομάδα χρηστών (multicast) και σε όλους τους χρήστες (broadcast). Για μεταφορά δεδομένων από σημείο σε σημείο, χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο TCP/IP ώστε να αποσταλούν δεδομένα που αφορούν ένα μόνο χρήστη. Για “παραλαβή” (download) αρχείων ή αποστολή “ρεύματος βίντεο” (video stream) από σημείο προς πολλά σημεία, χρησιμοποιείται πολλαπλή διανομή (multicast), οπότε τα δεδομένα από το δορυφόρο μπορούν να αποκωδικοποιηθούν από μια συγκεκριμένη ομάδα χρηστών.



Σχήμα 1.6 – Μονόδρομη σύνδεση στο διαδίκτυο μέσω δορυφόρου



Σχήμα 1.7 - Αμφίδρομη σύνδεση στο διαδίκτυο μέσω δορυφόρου

Τα δορυφορικά συστήματα που βασίζονται στην προδιαγραφή DVB-RCS και υποστηρίζουν επεξεργασία επί του δορυφόρου, παρέχουν βελτιωμένες υπηρεσίες δεδομένων, αλλά και τη δυνατότητα πρόσβασης στο διαδίκτυο σε υψηλές ταχύτητες. Η υπηρεσία “παραλαβής λογισμικού” (software download) είναι μια δορυφορική υπηρεσία δεδομένων που απευθύνεται σε χρήστες ηλεκτρονικών υπολογιστών και στηρίζεται στη μετάδοση σημείου προς πολλαπλά σημεία. Τα περιεχόμενα λαμβάνονται συνεχώς μέσω του δορυφορικού καναλιού, γεγονός που επιτρέπει στους χρήστες να έχουν πρόσβαση στο αντίστοιχο περιεχόμενο χωρίς να βρίσκονται συνδεδεμένοι στο διαδίκτυο. Πρόκειται για μια υπηρεσία σχεδόν κατ’ απαίτηση (near-on-demand) και για την υλοποίησή της απαιτείται ο εξοπλισμός του υπολογιστή με μια DVB-S κάρτα. Το DVB-S (Digital Video Broadcasting – Satellite) αποτελεί την προδιαγραφή για δορυφορική μετάδοση. Για τη δορυφορική ζεύξη ανόδου χρησιμοποιείται το DVB-RCS, ώστε το μεταδιδόμενο λογισμικό να ενθυλακωθεί σε ρεύμα μεταφοράς πακέτων, ενώ για τη ζεύξη καθόδου το DVB-S.

Η πρόσβαση στο διαδίκτυο σε υψηλές ταχύτητες μέσω δορυφόρου είναι η πιο διαδεδομένη λύση για τη σύνδεση περιοχών στις οποίες δεν υπάρχει επίγειο δίκτυο ευρείας ζώνης. Με τη μείωση του κόστους των χρησιμοποιούμενων τερματικών, οι πελάτες θα έχουν τη δυνατότητα της εύκολης και φτηνής πρόσβασης στο διαδίκτυο μέσω του δορυφορικού δικτύου. Οι χρήστες επικοινωνούν με βάση μια συνδεσμολογία πλέγματος, γεγονός που τους επιτρέπει να συνδέονται μεταξύ τους διαμέσου του δορυφόρου με ένα άλμα (single satellite hop). Κάθε χρήστης είναι συνδεδεμένος με μια πύλη (gateway), η οποία αναλαμβάνει την παροχή πρόσβασης σε επίγεια δίκτυα. Στις υπάρχουσες εμπορικές υλοποιήσεις, όπου γίνεται χρήση απλών δορυφόρων, η πύλη αποτελεί τμήμα της πλήμνης. Η χρήση όμως αναγεννητικών δορυφόρων επιτρέπει τη δημιουργία πιο ευέλικτων και πιο οικονομικών σταθμών που θα λειτουργούν ως πύλες. Για να συνδεθεί ένας χρήστης στο διαδίκτυο πρέπει να διαθέτει ένα κατάλληλο τερματικό DVB-RCST, το οποίο θα λειτουργεί ως ο προεπιλεγμένος δρομολογητής (default router) για την περιοχή σύνδεσης με το υπόλοιπο δίκτυο. Η επικοινωνία του χρήστη και της κατάλληλης πύλης υλοποιείται μέσω του δορυφόρου. Οι ζεύξεις ανόδου χρησιμοποιούν το DVB-RCS, ενώ οι ζεύξεις καθόδου χρησιμοποιούν το DVB-S. Η συγκεκριμένη διασύνδεση είναι εφικτή χάρη στη δυνατότητα του αναγεννητικού δορυφόρου για OBP επεξεργασία.

Στα δίκτυα επικοινωνιών γίνεται χρήση του πρωτοκόλλου TCP με σκοπό τον έλεγχο ροής και την προστασία από σφάλματα κατά τη μετάδοση των δεδομένων. Στην περίπτωση δορυφορικών δικτύων η απόδοση του κλασικού TCP υποβαθμίζεται εξαιτίας της

ιδιομορφίας των ζεύξεων, οι οποίες είναι επιρρεπείς στα σφάλματα και εισάγουν σημαντική καθυστέρηση. Για τη βελτίωση της απόδοσης σε επίπεδα παρόμοια με αυτά των επίγειων συστημάτων απαιτείται η εισαγωγή κατάλληλων εξυπηρετητών (Performance Enhancing Proxies, PEP), οι οποίοι συνήθως λειτουργούν σε συνδεσμολογία αστέρα.

Ένας OBP δορυφόρος μπορεί να λειτουργήσει ως ενδιάμεσος κόμβος κατά τη διασύνδεση δικτύων τοπικής περιοχής (Local Area Network, LAN). Η διασύνδεση τοπικών δικτύων μέσω δορυφόρου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συμπλήρωση και την επέκταση των ήδη εγκατεστημένων επίγειων δικτύων. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της κατάλληλης ένωσης ομάδων από δίκτυα ευρείας ζώνης, είτε τοπικών είτε μητροπολιτικών (Metropolitan Area Network, MAN). Τα δίκτυα αυτά συνήθως βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές και η επίγεια σύνδεσή τους κρίνεται ασύμφορη. Σε αυτό το είδος υπηρεσίας διακρίνουμε δυο είδη εγκαταστάσεων. Στις κεντρικές εγκαταστάσεις βρίσκονται εγκατεστημένοι όλοι οι εξυπηρετητές, π.χ. εξυπηρετητές ιστού (Web) ή ηλεκτρονικού ταχυδρομείου (E-mail). Το δεύτερο είδος αποτελούν οι εγκαταστάσεις των χρηστών, που αποκτούν πρόσβαση στους παραπάνω εξυπηρετητές μέσω κατάλληλων RCST τερματικών. Τυπικοί χρήστες της υπηρεσίας αυτής είναι επιχειρήσεις με αντιπροσώπους σε διάφορα σημεία της γης, όπου τα υποκαταστήματα επικοινωνούν με τα κεντρικά γραφεία της εταιρείας μέσω δορυφόρου.

1.8.4 Υπηρεσίες κινητών τηλεπικοινωνιών

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων χρόνων παρατηρείται μια εκρηκτική αύξηση της ζήτησης για κινητές τηλεπικοινωνίες. Η βάση της ζήτησης αυτής είναι η ανάπτυξη της τεχνολογίας των κυψελωτών συστημάτων, η οποία επέτρεψε τη σύνδεση των φορητών κινητών τηλεφώνων με το δημόσιο τηλεφωνικό. Η διαθεσιμότητα υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας σε λογικό και ολοένα μειούμενο κόστος έχει επιφέρει μεγάλη αύξηση του αριθμού συνδρομητών. Η κάλυψη που παρέχουν όμως αυτά περιορίζεται στις πυκνοκατοικημένες περιοχές του ανεπτυγμένου κόσμου. Από την άλλη, οι δορυφόροι έχουν την ικανότητα να προσφέρουν κάλυψη σε μια ευρύτερη περιοχή, όπως σε ωκεανούς ή σε ορεινές περιοχές. Επιπρόσθετα, ένα δορυφορικό σύστημα για κινητές τηλεπικοινωνίες μπορεί να παρέχει πλήρη διεθνή περιαγωγή (roaming) στους κινητούς χρήστες.

Στην κατηγορία των υπηρεσιών κινητών τηλεπικοινωνιών ανήκουν οι εφαρμογές δορυφορικών επικοινωνιών στις οποίες ο σταθμός δεν είναι πλέον σταθερός, όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις, αλλά μπορεί να κινείται (Mobile Satellite Service, MSS). Οι υπηρεσίες MSS καθιερωμένα κάνουν χρήση του φάσματος συχνοτήτων κάτω από τα

3GHz. Η περιοχή αυτή προτιμάται επειδή τα αντίστοιχα κύματα έχουν τη δυνατότητα να διαπερνούν εμπόδια ή να ανακλώνται πάνω τους. Αντίθετα, για συχνότητες άνω των 3GHz, τα κύματα εμποδίζονται εύκολα από φυσικά και τεχνητά εμπόδια. Ο κινητός χρήστης μπορεί να βρίσκεται στην ξηρά, στον αέρα ή στο έδαφος, οπότε προκύπτουν οι ακόλουθες υποκατηγορίες που έχουν θεσπιστεί από την ITU: Κινητή Υπηρεσία Ξηράς μέσω Δορυφόρου (Land Mobile Satellite Service, LMSS), Κινητή Ναυτική Υπηρεσία μέσω Δορυφόρου (Maritime Mobile Satellite Service, MMSS) και Κινητή Αεροναυτική Υπηρεσία μέσω Δορυφόρου (Aeronautical Mobile Satellite Service, AMSS).

Τα πρώτα βήματα των κινητών επικοινωνιών μέσω δορυφόρου έγιναν με χρήση μη γεωστατικών τροχιών και βασίστηκαν σε MEO και LEO συστήματα. Φυσικά, η κάλυψη ολόκληρης της υφηλίου ήταν δυνατή μόνο με τη χρήση “αστερισμών” από δορυφόρους, αυξάνοντας έτσι δραματικά το συνολικό κόστος εγκατάστασης του δικτύου. Χαρακτηριστικότερο παράδειγμα είναι η προσπάθεια της Motorola στον τομέα αυτό με την εκτόξευση 66 LEO δορυφόρων στα τέλη της προηγούμενης δεκαετίας. Το πρόγραμμα ονομαζόταν Iridium, αλλά τελικά απέτυχε και κήρυξε πτώχευση το 1999. Ο βασικός λόγος της αποτυχίας του, εκτός από το υψηλότερο κόστος εισαγωγής, ήταν ο έντονος ανταγωνισμός που δέχθηκε από τα επίγεια μικροκυματικά συστήματα τηλεπικοινωνιών που μέχρι εκείνη τη στιγμή αναπτύσσονταν με αλματώδεις ρυθμούς. Ένα άλλο γνωστό LEO σύστημα για παροχή κινητών τηλεπικοινωνιών είναι το Globalstar, με μικρότερο αριθμό δορυφόρων (48). Το σύστημα αυτό κατάφερε να μετατοπίσει την παρεχόμενη κάλυψη προς τις πυκνοκατοικημένες περιοχές της γης, όπου υπάρχει μεγάλη κίνηση, μακριά δηλαδή από τους πόλους.

Από την άλλη μεριά, υπάρχουν τα συστήματα γεωστατικών δορυφόρων που αρχίζουν τα τελευταία χρόνια να συμμετέχουν και αυτά στην παροχή MSS υπηρεσιών. Βασικό τους πλεονέκτημα είναι η απλότητα της διάταξης των χρησιμοποιούμενων δορυφόρων και ο ιδιαίτερα μικρός τους αριθμός τους. Ένα GEO σύστημα που καλύπτει όλη την υφήλιο, εκτός ίσως από τις περιοχές των πόλων, μπορεί να υλοποιηθεί μόνο με 3 δορυφόρους, ενώ με τη χρήση και ενός τέταρτου επιτυγχάνεται σημαντική εφεδρική ικανότητα. Το κύριο μειονέκτημα των GEO συστημάτων είναι η εισαγωγή μεγάλης καθυστέρησης διάδοσης, η οποία γίνεται ιδιαίτερα αισθητή για υπηρεσίες φωνής. Στην περίπτωση όμως των κινητών τηλεπικοινωνιών η παράμετρος αυτή είναι λιγότερο κρίσιμη, ενώ χρησιμοποιούνται τεχνικές μείωσης του φαινομένου. Το σημαντικότερο σύστημα παροχής κινητών υπηρεσιών μέσω γεωστατικού δορυφόρου είναι το σύστημα Inmarsat.

Το γεγονός ότι οι χρήστες δεν έχουν πλέον σταθερή θέση, αλλά μπορούν να μετακινούνται, εισάγει στη γενικότερη θεώρησή μας νέες παραμέτρους προς εξέταση. Καταρχήν, η ύπαρξη οπτικής επαφής (Line Of Sight, LOS) μεταξύ επίγειου σταθμού και δορυφόρου, η οποία εθεωρείτο δεδομένη στη μέχρι τώρα ανάλυση και αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα, ίσως να μην ισχύει πλέον. Αυτό συμβαίνει επειδή ο χρήστης βρίσκεται σε περιβάλλον με διαρκώς μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά, συνεπώς, το λαμβανόμενο σήμα φτάνει σε αυτόν σοβαρά εξασθενημένο. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται σκίαση (fading). Ταυτόχρονα, παρατηρείται το φαινόμενο των πολλαπλών διόδευσεων (multipath propagation), κατά το οποίο ο χρήστης λαμβάνει πολλές διαφορετικές εκδοχές του σήματος, λόγω ανάκλασης, διάθλασης και σκέδασης κατά τη διαδρομή του. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα αισθητό σε αστικές περιοχές και έχει ως αποτέλεσμα διαλείψεις που εξασθενούν σημαντικά το λαμβανόμενο σήμα. Η χρήση ολοένα και υψηλότερων συχνοτήτων σε δορυφορικές εφαρμογές δυσχεραίνει την κατάσταση αυτή.

1.8.5 Μειονεκτήματα και περιορισμοί

Στο σημείο αυτό, και αφού εξετάστηκαν τα πλεονεκτήματα και οι εφαρμογές, πρέπει να γίνει αναφορά και στα μειονεκτήματα και τους περιορισμούς των δορυφορικών επικοινωνιών, ώστε να σχηματιστεί μια πιο ολοκληρωμένη και εξισορροπημένη άποψη για αυτές. Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα ενός δικτύου δορυφορικών επικοινωνιών είναι το υψηλότερο κόστος που σχετίζεται με την εισαγωγή του. Επομένως, μια σωστά μελετημένη τεχνοοικονομική μελέτη είναι αναγκαία πριν την απόφαση για εισαγωγή ενός τέτοιου συστήματος. Ένα άλλο σημαντικό θέμα προς εξέταση είναι η απώλεια της υπηρεσίας σε μια μεγάλη περιοχή κατά την περίπτωση αποτυχίας ή βλάβης του αντίστοιχου δορυφόρου. Κάτι τέτοιο μπορεί να συμβεί είτε κατά τη διάρκεια της εκτόξευσης είτε κατά την εγκατάσταση στο διάστημα. Ευτυχώς, η αξιοπιστία των προωθητών, αλλά και ολοκληρωμένων δορυφόρων, έχει αυξηθεί σημαντικά φτάνοντας στα επίπεδα του 99%.

Τέλος, ένας βασικότερος περιορισμός, που αφορά κυρίως τους γεωστατικούς δορυφόρους, είναι η καθυστέρηση στη μετάδοση εξαιτίας της τεράστιας διαδρομής διάδοσης. Το πρόβλημα επιδεινώνεται όταν η καθυστέρηση συνοδεύεται από το φαινόμενο της ηχούς (echo), το οποίο προκαλείται από την απουσία προσαρμογής στη διασύνδεση του δορυφορικού και του επίγειου συστήματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι το πρόβλημα της καθυστέρησης αποτελεί εγγενή περιορισμό των συστημάτων δορυφορικών επικοινωνιών και η μεγαλύτερη επίπτωσή του αφορά τους χρήστες τηλεφωνίας, οπότε και γίνεται ιδιαίτερα αισθητή. Αντίθετα, οι υπηρεσίες μετάδοσης δεδομένων δεν είναι ευαίσθητες σε

καθυστερήσεις. Πάντως, η εγκατάσταση δορυφόρων σε χαμηλές τροχιές (LEO) σε συνδυασμό με τη δημιουργία καταπιεστών του φαινομένου της ηχούς (echo suppressors) προσφέρουν ανακούφιση στο πρόβλημα αυτό [Richharia, 1999].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΤΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ DVB-S ΚΑΙ DVB-S2

2.1 MPEG ΚΑΙ DVB

Η μετάδοση σημάτων βίντεο και τηλεόρασης είναι μια από τις σημαντικότερες υπηρεσίες που παρέχουν σήμερα τα δορυφορικά συστήματα. Τα τηλεοπτικά προγράμματα χρησιμοποιούν εύρος ζώνης περίπου 5MHz για τη βασική ζώνη, ενώ οι δορυφορικοί αναμεταδότες έχουν συνήθως εύρος μεταξύ 26 και 72 MHz. Η τεχνολογία συμπίεσης ψηφιακού βίντεο παρέχει τη δυνατότητα μείωσης του απασχολούμενου εύρους ζώνης από κάθε σήμα, ώστε να είναι τελικά εφικτή η μετάδοση πολλαπλών σημάτων ανά αναμεταδότη, χωρίς να υπονομεύεται φυσικά η ποιότητα της εικόνας του ανακτημένου σήματος.

Η ψηφιακή συμπίεση διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο για τη μετάδοση βίντεο στα σύγχρονα συστήματα επικοινωνιών. Τα κύρια πλεονεκτήματα που προέρχονται από τη χρήση της είναι [Elbert, 1997]:

- Ελαχιστοποίηση του απαιτούμενου εύρους ζώνης μετάδοσης, γεγονός που οδηγεί στη μείωση του κόστους στο διαστημικό τμήμα και τη μείωση της ισχύος που απαιτείται για τη μετάδοση σήματος αποδεκτής ποιότητας
- Περισσότερα κανάλια διαθέσιμα ανά δορυφόρο, κάτι που αυξάνει δραματικά την ποικιλία από διαθέσιμα προγράμματα ανά τροχιακή θέση
- Η προοπτική χρήσης ενός κοινού σχήματος για δορυφορική τηλεόραση απευθείας-στην-οικία (Direct-To-Home, DTH), καλωδιακή τηλεόραση και επίγεια εκπομπή
- Υποστήριξη Ψηφιακής Τηλεόρασης Υψηλής Ευκρίνειας (High Definition TeleVision, HDTV), καθώς ο αριθμός ψηφίων ανά δευτερόλεπτο ενός συμπιεσμένου HDTV σήματος είναι μικρότερος από αυτόν που απαιτούνταν παλιότερα για ένα συμβατικό τηλεοπτικό σήμα με ποιότητα ανάλογη των σημάτων εκπομπής

Το κυρίαρχο σχήμα ψηφιακής συμπίεσης σήμερα είναι αυτό που προτάθηκε από την ομάδα MPEG (Motion Picture Experts Group). Η ομάδα MPEG έχει εργασθεί για τη δημιουργία ενός προτύπου συμπίεσης για πλήρως κινούμενη εικόνα, το οποίο κάνει χρήση συμπίεσης κάθε πλαισίου ξεχωριστά (frame-to-frame). Έτσι, είναι τελικά δυνατή η μετάδοση πλήρως κινούμενων εικόνων με όλα τα χρώματα σε χαμηλούς ρυθμούς που φτάνουν το 1.5Mbps. Σημείο κλειδί της όλης διαδικασίας είναι ότι η συμπίεση γίνεται σε πραγματικό χρόνο, χωρίς την ανάγκη για ψηφιακή επεξεργασία από υπερσύγχρονους κεντρικούς υπολογιστές. Από τα διάφορα πρότυπα της MPEG, εκείνο που αντιστοιχεί στην εμπορική ψηφιακή τηλεόραση και θα αποτελέσει αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι το MPEG-2.

Το πρότυπο MPEG-2 είχε ως αφετηρία του το 1992 και γρήγορα έγινε το όχημα για την εισαγωγή του ψηφιακού βίντεο στο ευρύ καταναλωτικό κοινό. Σκοπός του είναι να παρέχει ποιότητα βίντεο με απώλειες, που είναι όμως ισάξια ή καλύτερη από την ποιότητα άλλων προτύπων όπως τα NTSC, PAL, SECAM. Με τον όρο λειτουργία “με απώλειες” (lossy), εννοούμε ότι η πληροφορία του σήματος μεταβάλλεται ελαφρώς λόγω της συμπίεσης, έτσι ώστε στο άκρο της λήψης να μην είναι δυνατή η εξ ολοκλήρου ανάκτηση του σήματος που στάλθηκε. Το γεγονός αυτό έχει βέβαια ως αντίκτυπο τη μείωση της ποιότητας της εικόνας, αλλά σε μικρό βαθμό ώστε η ποιότητα αυτή να γίνεται τελικά αποδεκτή από το θεατή.

Η σημαντικότερη συμβολή του προτύπου MPEG-2 δεν είναι η ίδια η συμπίεση, καθώς αυτή καθιερώθηκε από άλλα σχήματα, όπως το JPEG και το MPEG-1. Η σπουδαιότητά του υφίσταται στο ότι αποτελεί έναν ολοκληρωμένο μηχανισμό μεταφοράς για την πολυπλεξία βίντεο, ήχου και δεδομένων. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της δημιουργίας πακέτων και της Πολυπλεξίας Διαίρεσης Χρόνου (Time Division Multiplexing, TDM), τεχνικές που υιοθετούνται ευρέως από τα σύγχρονα συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών. Μάλιστα, επειδή τα συστήματα μετάδοσης και οι διάφορες εφαρμογές ποικίλλουν, το MPEG-2 παρέχει μια ευρεία γκάμα σχημάτων και υπηρεσιών, ανάλογα με την περίπτωση.

Το Πρόγραμμα Εκπομπής Ψηφιακού Βίντεο (Digital Video Broadcasting, DVB Project) είναι μια κοινοπραξία ανάμεσα σε περίπου 270 κατασκευαστές, εκπομπούς, διαχειριστές δικτύων, εταιρίες ανάπτυξης λογισμικού, ρυθμιστικούς οργανισμούς και άλλους από συνολικά 35 χώρες. Η κοινοπραξία αυτή είναι καθοδηγούμενη από την αντίστοιχη βιομηχανία και αγορά, και έχει αφοσιωθεί στη σχεδίαση παγκόσμιων προτύπων για τη μετάδοση ψηφιακής τηλεόρασης και υπηρεσιών δεδομένων σε όλη την υφήλιο. Το

σύστημα DVB μπορεί να χαρακτηριστεί ως μία πλήρης τεχνολογία για την εκπομπή τηλεόρασης και δεδομένων που βασίστηκε στο πρότυπο MPEG-2. Προσφέρει λοιπόν πλήρη υποστήριξη για κωδικοποιημένο και συμπιεσμένο βίντεο και ήχο, καθώς και κανάλια δεδομένων για μια ποικιλία σχετικών υπηρεσιών πληροφορίας.

2.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ DVB-S

Η οικογένεια προτύπων DVB αποτελείται από μία σειρά προτύπων, καθένα από τα οποία υποστηρίζουν συγκεκριμένα συστήματα και εφαρμογές. Για τη μετάδοση ψηφιακής τηλεόρασης και την ευρυεκπομπή μέσω δορυφόρου, κατάλληλο είναι το σύστημα DVB-S. Το DVB-S αναπτύχθηκε στα πλαίσια του DVB και προτυποποιήθηκε από το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (European Telecommunications Standards Institute, ETSI). Είναι σχεδιασμένο ώστε να παρέχει υπηρεσίες τηλεοπτικών προγραμμάτων απευθείας-στην-οικία του χρήστη για τις υπηρεσίες BSS και FSS. Απευθύνεται σε ολοκληρωμένους αποκωδικοποιητές δέκτη (Integrated Receiver Decoders, IRDs) για καταναλωτές, καθώς και για συστήματα κεραιών συλλογής (SMATV) και σταθμούς καλωδιακής τηλεόρασης. Το DVB-S παρέχει μια ποικιλία λύσεων που είναι κατάλληλες για εύρη ζώνης αναμεταδότη μεταξύ 26 και 72 MHz. Σημειώνεται ότι οι καταστάσεις λειτουργίας του συστήματος επεκτάθηκαν ώστε να καλύπτουν επίσης υπηρεσίες διανομής μέσω δορυφόρου, όπως μεταφορά εικόνας και ακουστικού υλικού μεταξύ τηλεοπτικών στούντιο, ή από απομακρυσμένες περιοχές απευθείας στις εγκαταστάσεις του εκπομπού με σκοπό τη Συλλογή Ψηφιακών Δορυφορικών Ειδήσεων (Digital Satellite News Gathering, DSNG).

Η πρόοδος της ψηφιακής τεχνολογίας στην παραγωγή, μετάδοση και εκπομπή τηλεόρασης μεταβάλλει γρήγορα τις καθιερωμένες έννοιες της εκπομπής. Έτσι, σε ένα τυπικό σύστημα ψηφιακής τηλεόρασης, οι δορυφορικές ζεύξεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν με σκοπό τη διανομή και την εκπομπή υπηρεσιών. Η επιτυχία της σύγχρονης ψηφιακής δορυφορικής εκπομπής στηρίζεται στην προσφορά μιας ποικιλίας από ελκυστικά εμπορικά πακέτα τηλεοπτικών προγραμμάτων που να ικανοποιούν τις απαιτήσεις ποικιλόμορφων ομάδων καταναλωτών. Στα πακέτα αυτά είναι δυνατό να περιλαμβάνονται εφαρμογές συνδρομητικής τηλεόρασης, λήψης πληροφορίας πολυμέσων με σκοπό για παράδειγμα την πλοήγηση, διαδραστικές υπηρεσίες και ηλεκτρονικό εμπόριο. Για την επιτυχημένη εμπορική εκμετάλλευση μιας συγκεκριμένης αγοράς, πρέπει

να λαμβάνονται υπόψη διάφορες κρίσιμες παράμετροι, σημαντικότερες από τις οποίες είναι οι ακόλουθες [Cominetti & Morello, 2000]:

- η τροχιακή θέση του δορυφόρου
- το εύρος ζώνης του αναμεταδότη
- η απαιτούμενη ισχύς
- η γεωγραφική ή πληθυσμιακή κάλυψη
- η διαθεσιμότητα της προσφερόμενης υπηρεσίας
- η ποιότητα της υπηρεσίας
- το πλήθος των προγραμμάτων που είναι διαθέσιμα στους χρήστες

Σημαντικό είναι το γεγονός ότι οι απαιτήσεις ισχύος από το δορυφόρο έχουν καταστεί λιγότερο αυστηρές, χάρη στην πρόοδο των συστημάτων λήψης και την ανάπτυξη της δορυφορικής τεχνολογίας. Έτσι, με βάση την ταχεία εισαγωγή των ψηφιακών τεχνολογιών, ο αριθμός των τηλεοπτικών προγραμμάτων ανά δορυφορικό αναμεταδότη έχει πολλαπλασιαστεί. Για παράδειγμα, εκατοντάδες τηλεοπτικά προγράμματα είναι τώρα διαθέσιμα στην Ευρώπη από τηλεπικοινωνιακούς δορυφόρους μέσης ισχύος πανευρωπαϊκής κάλυψης, είτε απευθείας είτε διαμέσου καλωδιακών δικτύων διανομής. Η αύξηση του αριθμού αυτού δίνει τη δυνατότητα παροχής νέων υπηρεσιών, όπως η ταυτόχρονη μετάδοση ενός μεγάλου αριθμού αγώνων ποδοσφαίρου, λήψη από πολλαπλές κάμερες και διανομή ταινιών “σχεδόν κατόπιν ζήτησης” (near-video-on-demand). Η τελευταία επιτυγχάνεται με την παράλληλη μετάδοση διάφορων αντιγράφων της ίδιας ταινίας μετατοπισμένων στο χρόνο.

Η παγκόσμια επιτυχία των συστημάτων DVB, τα οποία έχουν ήδη υιοθετηθεί και εκτός Ευρώπης εξυπηρετώντας εκατομμύρια οικιακών χρηστών, είναι μια σαφής ένδειξη ότι το DVB αποτελεί μια ολοκληρωμένη λύση όσον αφορά την ψηφιακή εκπομπή σε παγκόσμια κλίμακα. Παρακάτω, αναλύονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των συστημάτων DVB-S και DVB-DSNG μέσω δορυφόρου, μερικά από τα οποία είναι:

- η Ενεργώς Ισοτροπικά Ακτινοβολούμενη Ισχύς (EIRP)
- το εύρος ζώνης αναμεταδότη
- ο καταμερισμός του εύρους ζώνης αναμεταδότη για διαφορετικού τύπου σήματα
- η περιοχή κάλυψης του δορυφόρου
- οι διάμετροι κεραιών εκπομπής και λήψης

2.3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΟΥ DVB-S

2.3.1 Απαιτήσεις των συστημάτων DVB-S και DVB-DSNG

Το πρότυπο DVB-S καθώς και το συγγενές του επαγγελματικό πρότυπο DVB-DSNG έχουν βελτιστοποιηθεί έτσι ώστε να ανταποκρίνονται στις βασικές απαιτήσεις των αντίστοιχων υπηρεσιών. Οι σημαντικότερες απαιτήσεις τις οποίες καλείται να ικανοποιήσει το DVB-S είναι οι ακόλουθες:

- δυνατότητα επιλογής της ποιότητας της εικόνας και του ήχου με ελαστικό τρόπο ώστε να ανταποκρίνεται στις ανάγκες της εκάστοτε υπηρεσίας ή χρήστη
- Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου με ένα απλά διαμορφωμένο ψηφιακό φέρον, κάτι που επιτρέπει τη μετάδοση πολλαπλών καναλιών ανά φέρον (Multiple Channels Per Carrier, MCPC)
- βέλτιστη εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης αναμεταδότη
- ευέλικτη χρήση της χωρητικότητας μετάδοσης
- λειτουργία με μικρές κεραίες λήψης (π.χ. 60cm)
- EIRP από το δορυφόρο κοντά στα 51dBW
- ψηφιακός δέκτης (IRD) σε προσιτή τιμή

Για το επαγγελματικό σύστημα DVB-DSNG έχουν καθορισθεί ελαφρώς διαφορετικές απαιτήσεις. Το DVB-DSNG αποτελεί την καταλληλότερη λύση για την απόκτηση ειδήσεων από το εγχώριο και το διεθνές περιβάλλον σε πραγματικό χρόνο (real-time), απαραίτητη προϋπόθεση για εμπορική επιτυχία στο έντονα ανταγωνιστικό περιβάλλον πληροφόρησης των καταναλωτών. Το σύστημα αυτό εμπλέκει τερματικά για την προς τα άνω ζεύξη με μικρό βάρος και κεραίες μειωμένου μεγέθους (π.χ. 90-150cm). Επίσης, επιτρέπει την ταχεία εγκατάσταση συνδέσεων μεταξύ εξωτερικών βαν εκπομπής και των τηλεοπτικών στούντιο. Σημειώνεται ότι η μετάδοση DSNG συνήθως μεταφέρει ένα μοναδικό τηλεοπτικό πρόγραμμα μέσω ενός μοναδικού καναλιού ανά φέρον (Single Channel Per Carrier, SCPC). Για το λόγο αυτό, η προσπέλαση του δορυφορικού αναμεταδότη γίνεται με Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Συχνότητας (Frequency Division Multiple Access, FDMA). Άλλες απαιτήσεις που χαρακτηρίζουν το DSNG σύστημα είναι η ποιότητα εικόνας της διανομής και η ανάγκη για άμεση εγκατάσταση της δορυφορικής σύνδεσης. Σε αντίθεση με το DVB-S, οι προδιαγραφές κόστους για το δέκτη είναι λιγότερο αυστηρές.

2.3.2 Συνθήκες μετάδοσης στο δορυφορικό κανάλι και βελτιστοποίηση μετάδοσης

Το κύριο χαρακτηριστικό ενός συστήματος μετάδοσης DVB είναι η αποδοτική λειτουργία του σε δορυφορικά κανάλια που επηρεάζονται από θόρυβο, παρεμβολές, παραμορφώσεις, αλλά και έντονη απόσβεση κατά τη διάδοση, κυρίως λόγω βροχής. Σημειώνεται ότι το δορυφορικό κανάλι, σε αντίθεση με την επίγεια εκπομπή και τα ενσύρματα κανάλια, είναι βασικά μη γραμμικό, ευρείας ζώνης και περιορισμένης ισχύος. Η μη γραμμικότητα οφείλεται στα χαρακτηριστικά πλάτους και φάσης του ενισχυτή του δορυφόρου (Traveling Wave Tube Amplifier, TWTA), γεγονός που έχει αντίκτυπο στη συνολική επίδοση του συστήματος. Ο on-board ενισχυτής λειτουργεί συχνά κοντά στον κορεσμό, δηλαδή με χαμηλό περιθώριο ισχύος εξόδου. Σκοπός είναι η μεγιστοποίηση της απόδοσης ισχύος του συστήματος, ενώ το τίμημα για αυτό είναι κυρίως η παραμόρφωση που υφίστανται οι κυματομορφές των σημάτων, αλλά και η αναγέννηση των πλευρικών λοβών του φάσματος ισχύος.

Η μετάδοση τηλεοπτικών προγραμμάτων μέσω του δορυφορικού συστήματος DVB έχει βελτιστοποιηθεί με χρήση προσομοιώσεων και δοκιμών στο εργαστήριο. Η βελτιστοποίηση αυτή απαιτεί προσεκτική εκτίμηση αρκετών τεχνικών παραμέτρων:

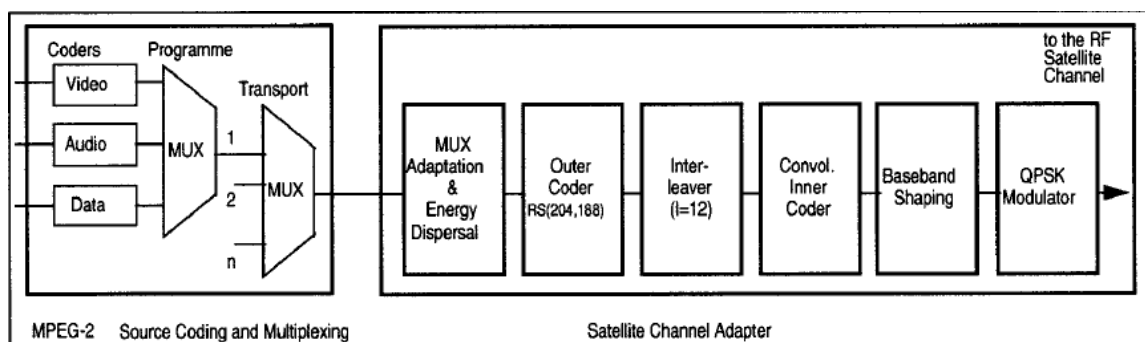
- απαιτούμενος ρυθμός ψηφίων ανά τηλεοπτικό πρόγραμμα ώστε να παρέχονται διάφορα επίπεδα ποιότητας της εικόνας, από συμβατική τηλεόραση μέχρι Τηλεόραση Υψηλής Ευκρίνειας (HDTV)
- απαιτήσεις απόδοσης σε όρους λόγου φέροντος προς θόρυβο (CNR) και Ποσοστού Λανθασμένων Ψηφίων (BER)
- κατάλληλες τεχνικές διαμόρφωσης και κωδικοποίησης καναλιού και αποδοτική χρήση της χωρητικότητας μετάδοσης

2.3.3 Αρχιτεκτονική μετάδοσης

Το σύστημα DVB-S ακολουθεί μια διαστρωματωμένη αρχιτεκτονική μετάδοσης, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1. Στο πρώτο βασικό επίπεδο πραγματοποιείται κωδικοποίηση πηγής (source coding) και πολυπλεξία (multiplexing) μέσω του πρωτοκόλλου MPEG-2. Στο δεύτερο επίπεδο γίνεται η προετοιμασία και η προσαρμογή του πολυπλεγμένου σήματος προκειμένου για μετάδοση μέσω του δορυφορικού καναλιού. Η σωστή σχεδίαση του “προσαρμογέα καναλιού” (channel adapter) διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο για την αποδοτική και αξιόπιστη μετάδοση ψηφιακών τηλεοπτικών σημάτων. Με βάση τη συγκεκριμένη αρχιτεκτονική μετάδοσης επιτυγχάνεται από το

σύστημα σημαντικός βαθμός ευελιξίας, η οποία επιτρέπει την ανταλλαγή μεταξύ φασματικής απόδοσης και απόδοσης ισχύος. Η φασματική απόδοση αφορά τη δυνατότητα μετάδοσης υψηλού ρυθμού χρήσιμων bit, ενώ η απόδοση ισχύος αφορά τη δυνατότητα λειτουργίας με χαμηλό απαιτούμενο σηματοθορυβικό λόγο. Η επιλογή ανάμεσα στις δυο γίνεται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του δορυφόρου, τις απαιτήσεις της εκάστοτε υπηρεσίας, καθώς και τις συνθήκες μετάδοσης.

Πρώτο βήμα της διαδικασίας μετάδοσης είναι η πλαισίωση, η οποία είναι βασισμένη στο πρότυπο MPEG. Έτσι, κωδικοποιητές τριών διαφορετικών ειδών τροφοδοτούν τους πολυπλέκτες με ροές βίντεο, ήχου και δεδομένων. Οι πολυπλεγμένες ροές ψηφίων τοποθετούνται σε πακέτα ωφέλιμου φορτίου (payload) σταθερού μεγέθους. Ακολουθεί τυχαιοποίηση του περιεχομένου του πακέτου, ώστε να επιτευχθεί διασπορά της ενέργειας του σήματος. Στα πλαίσια της προστασίας από σφάλματα, τα ψηφία υφίστανται κωδικοποίηση από έναν εξωτερικό κώδικα, με τον Reed-Solomon (RS) να είναι ο πιο συνηθισμένος. Στη συνέχεια εφαρμόζεται μια διαδικασία που ονομάζεται διαδικασία παρεμβολής (interleaving process). Σε αυτή, τα ψηφία αναδιατάσσονται με συγκεκριμένο τρόπο, ώστε να μειωθεί η επίδραση των μπλοκ σφαλμάτων στη δορυφορική ζεύξη. Κατόπιν τα ψηφία διέρχονται από ένα συνελκτικό (convolutional) εσωτερικό κώδικα, στον οποίο ο ρυθμός κωδικοποίησης μπορεί να μεταβάλλεται ώστε να ανταποκρίνεται στις ανάγκες της κάθε υπηρεσίας. Το τελευταίο στάδιο αφορά το φυσικό επίπεδο, όπου γίνεται ψηφιακή διαμόρφωση ενός φέροντος από την ακολουθία των ψηφίων, με το σχήμα QPSK να προτιμάται [Cominetti & Morello, 2000].

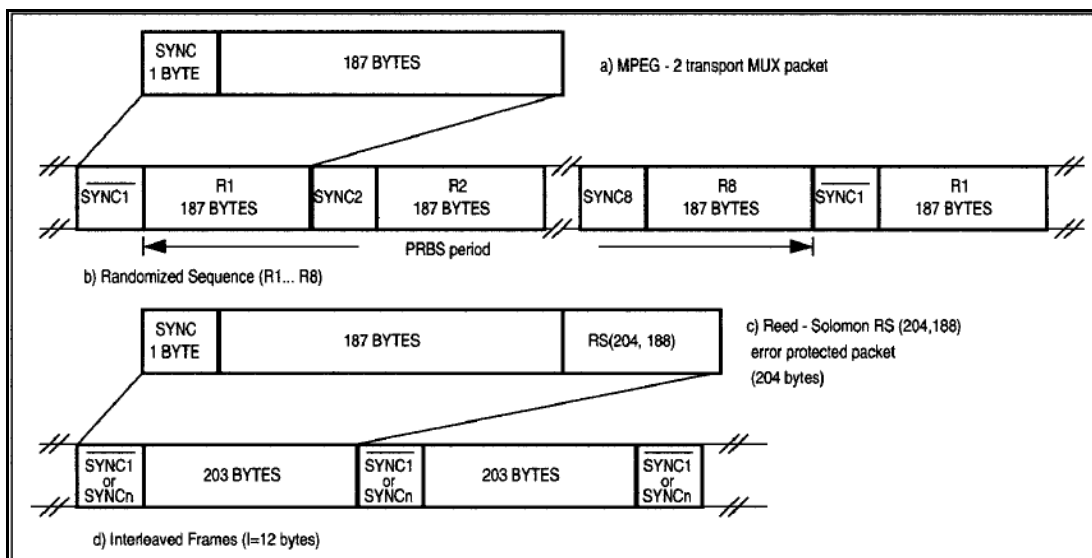


Σχήμα 2.1 - Το σύστημα DVB για δορυφορική ψηφιακή τηλεόραση

2.3.4 Δομή του πλαισίου DVB-S

Η δομή του πλαισίου των συστημάτων DVB-S και DVB-DSNG, όπως αυτή παρουσιάζεται στο ακόλουθο Σχήμα 2.2, βασίζεται στη πολυπλεξία MPEG-2. Η

πολυπλεξία επιτρέπει τη συγχώνευση ενός μεγάλου αριθμού υπηρεσιών βίντεο, ήχου και δεδομένων σε ένα απλό ρεύμα μεταφοράς (single transport stream). Τα πακέτα μεταφοράς έχουν σταθερό μέγεθος ίσο με 188 bytes, στο οποίο περιλαμβάνεται 1 byte συγχρονισμού (sync), 3 bytes επικεφαλίδας που περιέχουν τα Αναγνωριστικά Πακέτου (Packet Identifiers, PID) και 184 χρήσιμα bytes. Στις επικεφαλίδες των πακέτων δεν έχει συμπεριληφθεί κάποιο πεδίο για προστασία από σφάλματα. Επομένως απαιτείται ένα ανθεκτικό “στρώμα προσαρμογής καναλιού” (channel adaptation layer), ικανό να παρέχει στον αποπολυπλέκτη ένα ρεύμα δεδομένων χωρίς σφάλματα. Σκοπός του στρώματος προσαρμογής είναι η διαχείριση των εισερχόμενων πακέτων και η μεταβίβασή τους σε κατώτερα στρώματα του δικτύου προς μετάδοση. Ανάμεσα στις υπηρεσίες που παρέχει είναι και η διαχείριση των σφαλμάτων μετάδοσης, αλλά και ο έλεγχος ροής από άκρο σε άκρο. Τελικός στόχος του στρώματος προσαρμογής είναι η αποστολή των δεδομένων στην πλευρά του δέκτη με όσο το δυνατόν λιγότερα σφάλματα.



Σχήμα 2.2 - Δομή πολυπλεξίας και μετάδοσης

2.3.5 Τυχαιοποίηση των ψηφίων

Στην έξοδο του MPEG-2 πολυπλέκτη και πριν τη μετάδοσή τους τα δεδομένα τυχαιοποιούνται ψηφίο προς ψηφίο. Η τυχαιοποίηση υλοποιείται μέσω κατάλληλης συσκευής (scrambler ή randomizer), η οποία αντιστρέφει τα ψηφία με βάση κάποιο συγκεκριμένο μοτίβο. Η Ψευδοτυχαία Δυναδική Ακολουθία (Pseudo-Random Binary Sequence, PRBS) που προκύπτει, συγχρονίζεται με βάση ένα πλαίσιο από οκτώ MPEG-2 πακέτα (βλ. Σχήμα 2.2(b)). Τα όρια της ακολουθίας αυτής καθορίζονται από δυο

ανεστραμμένα bytes συγχρονισμού (SYNC 1). Το τελικό αποτέλεσμα είναι η ανεξαρτητοποίηση του φάσματος από τα μεταδιδόμενα δεδομένα. Η αντίστροφη διαδικασία στην πλευρά του δέκτη επαναφέρει τα ψηφία στην αρχική τους μορφή. Η διαδικασία αυτή, που οδηγεί σε διασπορά της ενέργειας του σήματος, πραγματοποιείται στα πλαίσια της συμμόρφωσης με τους κανονισμούς ραδιοσυχνοτήτων για την κατάληψη του φάσματος. Επίσης, διευκολύνει την αποκατάσταση του χρονισμού στο δέκτη, οπότε ο τελευταίος είναι σε θέση να αναπαράγει ευκολότερα και με μεγαλύτερη αξιοπιστία τα δεδομένα της πηγής.

2.3.6 Κωδικοποίηση για προστασία από σφάλματα

Τα τυχαιοποιημένα πακέτα που προκύπτουν από το προηγούμενο στάδιο κωδικοποιούνται από μια μειωμένη (shortened) εκδοχή του Reed-Solomon κώδικα, την RS(204,188). Ο κώδικας αυτός προσθέτει 16 πλεονάζοντα (redundancy) bytes στα αρχικά 188 bytes, επομένως κάθε κωδικοποιημένο πακέτο αποτελείται πλέον από 204 bytes συνολικά (βλ. Σχήμα 2.2(c)). Η διορθωτική ικανότητα του συγκεκριμένου κώδικα είναι $T=8$ bytes. Όμως, όπως έχει σημειωθεί, τα σφάλματα στην έξοδο του αποκωδικοποιητή δεν είναι στατιστικά ανεξάρτητα. Αντίθετα, εμφανίζονται σε ομάδες (bursts) υπερβαίνοντας τη διορθωτική ικανότητα του RS κώδικα, οδηγώντας έτσι σε μη διορθώσιμα ή και μη ανιχνεύσιμα σφάλματα. Για να βελτιωθεί λοιπόν η ικανότητα διόρθωσης σφαλμάτων σε ομάδες του RS κώδικα, εφαρμόζεται συνελκτική παρεμβολή (convolutional interleaving). Γενικά, η παρεμβολή είναι μια διαδικασία που περιορίζει τις συνέπειες των σφαλμάτων που παρουσιάζονται στο κανάλι ραδιοσυχνοτήτων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση έχει βάθος $I=12$ bytes (βλ. Σχήμα 2.2(d)). Υλοποιείται με τη χρήση 12 παράλληλων στοιχείων μνήμης (καταχωρητές, registers) με διαφορετικά μήκη, τα οποία εισάγουν σταθερή καθυστέρηση. Το πλαίσιο που προκύπτει από τη διαδικασία της παρεμβολής αποτελείται από κωδικοποιημένα πακέτα, τα οποία επικαλύπτονται μεταξύ τους. Η οριοθέτηση γίνεται με bytes συγχρονισμού MPEG-2, ενώ η περιοδικότητα των 204 bytes διατηρείται. Τέλος, ο RS κώδικας συνδέεται με κάποιον άλλο συνελκτικό εσωτερικό κώδικα. Στην πλευρά του δέκτη πραγματοποιείται η αντίστροφη διαδικασία. Σημειώνεται ότι ο συνελκτικός κώδικας έχει τη δυνατότητα να προσαρμόζεται ευέλικτα σε διαφορετικούς ρυθμούς κωδικοποίησης ($1/2$, $2/3$, $3/4$, $5/6$), επιτρέποντας έτσι τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος για δεδομένο εύρος ζώνης δορυφορικού αναμεταδότη, αλλά και την ικανοποίηση διαφορετικών απαιτήσεων ανάλογα με την παρεχόμενη υπηρεσία.

2.3.7 Είδη ψηφιακής διαμόρφωσης

Το τελευταίο στάδιο επεξεργασίας πριν την εκπομπή του σήματος στο δορυφορικό κανάλι λαμβάνει χώρα στο φυσικό επίπεδο και αφορά την ψηφιακή διαμόρφωση του κωδικοποιημένου σήματος. Αναφορικά με το κατάλληλο σχήμα διαμόρφωσης, οι διαμορφώσεις χαμηλής τάξης, π.χ. QPSK και 8PSK, διαθέτουν σχεδόν σταθερή περιβάλλουσα. Επομένως δεν επηρεάζονται εύκολα από πιθανές μη γραμμικότητες κατά τη μετάδοση. Για το λόγο αυτό θεωρούνται κατάλληλες για λειτουργία του (μη γραμμικού) δορυφορικού ενισχυτή κοντά στον κόρο. Από την άλλη μεριά, τα σχήματα υψηλότερης τάξης, π.χ. 16QAM, προσφέρουν το πλεονέκτημα της καλύτερης φασματικής απόδοσης και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές πολλαπλών φερόντων. Η χρήση τους όμως απαιτεί τη λειτουργία σε σχεδόν γραμμικά δορυφορικά κανάλια, ενώ ο δορυφορικός ενισχυτής θα πρέπει να λειτουργεί με μεγάλο περιθώριο ισχύος εξόδου.

Στην περίπτωση ψηφιακών υπηρεσιών DTH για το ευρύ κοινό, πραγματοποιείται μετάδοση ενός φέροντος ανά αναμεταδότη και ο ενισχυτής λειτουργεί κοντά στον κορεσμό με σκοπό τη μέγιστη απόδοση ισχύος. Επομένως, οι εφαρμογές DTH αντιμετωπίζουν σημαντικές μη γραμμικές παραμορφώσεις, για την αντιμετώπιση των οποίων υιοθετείται η διαμόρφωση QPSK. Σε εφαρμογές DSNG, μέρος του εύρους ζώνης του αναμεταδότη, δηλαδή μια θυρίδα συχνότητας (frequency slot), διατίθεται σε κάθε ένα από τα μεταδιδόμενα σήματα. Για την προσπέλαση δηλαδή του αναμεταδότη χρησιμοποιείται πολυπλεξία FDM. Προκειμένου να μειωθεί η επίδραση του θορύβου ενδοδιαμόρφωσης που εισάγεται από γειτονικά κανάλια που απασχολούν τον ίδιο αναμεταδότη, ο ενισχυτής TWTA πρέπει να λειτουργεί αρκετά κάτω από το σημείο κορεσμού. Έτσι, το επαγγελματικό DVB-DSNG σύστημα, εκτός από τη λειτουργία QPSK του DVB-S συστήματος, προαιρετικά περιλαμβάνει 8PSK και 16QAM διαμορφώσεις, με σκοπό να αντιμετωπίσει απαιτήσεις υψηλότερης φασματικής απόδοσης. Το κόστος από τη χρήση των σχημάτων αυτών είναι η μειωμένη προστασία του συστήματος ενάντια σε παρεμβολές και θόρυβο.

2.4 ΕΥΕΛΙΞΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ DVB-S

2.4.1 Ρυθμός μετάδοσης σε σχέση με το εύρος ζώνης αναμεταδότη

Όπως γίνεται αντιληπτό από τα παραπάνω, η ευελιξία του δορυφορικού συστήματος DVB είναι ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του. Χάρη σε αυτή είναι δυνατή η επιλογή του σχήματος διαμόρφωσης, του ρυθμού συμβόλων και του ποσοστού κωδικοποίησης για κάθε περίπτωση ξεχωριστά. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται βελτιστοποίηση της απόδοσης της δορυφορικής ζεύξης, τόσο ως προς την κατάληψη φάσματος όσο και ως προς τις απαιτήσεις ισχύος.

Η συσχέτιση του ρυθμού μετάδοσης που επιτυγχάνεται και του απαιτούμενου εύρους ζώνης γίνεται με τη βοήθεια της έννοιας της φασματικής απόδοσης. Η φασματική απόδοση ορίζεται από το λόγο BW/R_s , όπου BW είναι το εύρος ζώνης 3dB του αναμεταδότη και R_s ο ρυθμός μετάδοσης των συμβόλων. Μείωση του λόγου BW/R_s σημαίνει ότι ο ρυθμός συμβόλων αυξάνει και συνεπώς αυξάνει η χωρητικότητα που είναι διαθέσιμη για τη μετάδοση προγραμμάτων. Βέβαια, υπάρχει ένα κατώτατο όριο για την τιμή του BW/R_s , το οποίο επιβάλλεται από τη μέγιστη αποδεκτή παραμόρφωση που εισάγεται λόγω των δορυφορικών φίλτρων. Η συγκεκριμένη παραμόρφωση είναι προϊόν της διασυμβολικής παρεμβολής (Inter Symbol Interference, ISI) και παρατηρείται όταν συμβαίνει επικάλυψη διαδοχικών συμβόλων, καθιστώντας την αναγνώρισή τους από το δέκτη δύσκολη ή και αδύνατη.

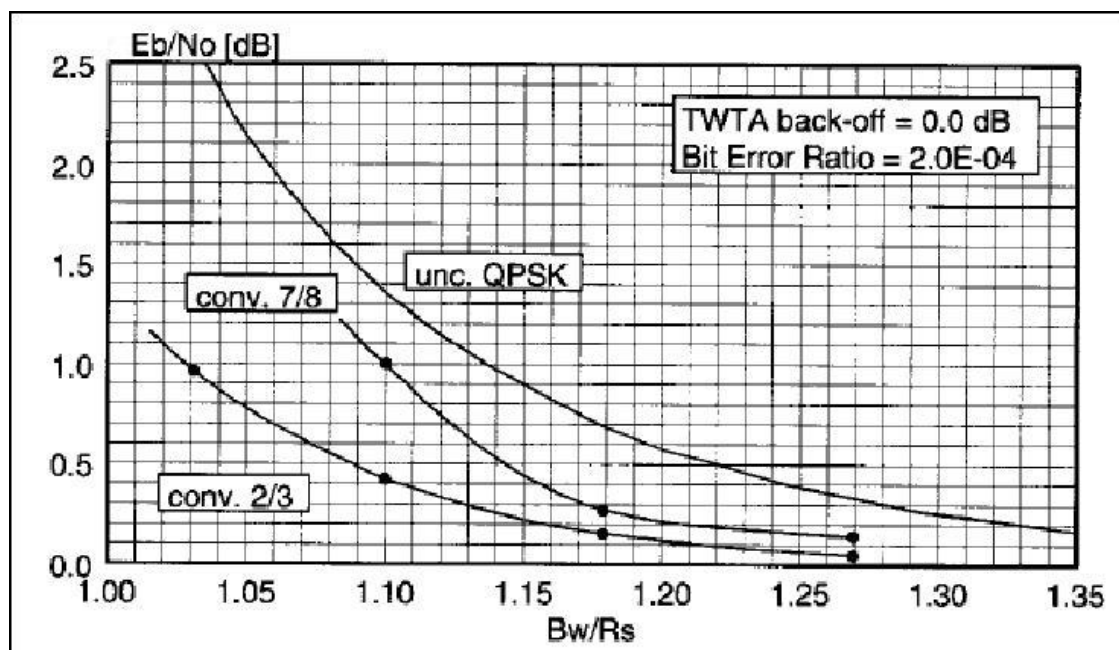
Στην περίπτωση διατάξεων μοναδικού φέροντος ανά αναμεταδότη, είναι δυνατή η αντιστοίχιση του ρυθμού μετάδοσης συμβόλων R_s σε ένα δεδομένο εύρος ζώνης αναμεταδότη BW . Μέσω κατάλληλης αντιστοίχισης των παραπάνω επιτυγχάνεται η μέγιστη χωρητικότητα μετάδοσης. Φυσικά, η χωρητικότητα που επιλέγεται πρέπει να λαμβάνει υπόψη την αποδεκτή εξασθένιση σήματος λόγω των περιορισμών του καναλιού. Για διατάξεις πολλαπλών φερόντων με χρήση πολυπλεξίας FDM, ο ρυθμός συμβόλων R_s αντιστοιχίζεται στη θυρίδα συχνότητας BS που ανατίθεται στην κάθε υπηρεσία. Με τον τρόπο αυτό, οδηγούμαστε πάλι σε βελτιστοποίηση της χωρητικότητας, ενώ η αμοιβαία παρεμβολή μεταξύ γειτονικών φερόντων διατηρείται σε αποδεκτό επίπεδο.

Λόγω της χρήσης κωδικοποίησης στο DVB-S πρέπει να γίνει διάκριση μεταξύ του συνολικού ρυθμού μετάδοσης συμβόλων R_s και του ρυθμού μετάδοσης χρησιμων συμβόλων R_u . Η πηγή πληροφορίας παρέχει k ψηφία πληροφορίας, ενώ ο κωδικοποιητής προσθέτει $(n-k)$ πλεονάζοντα ψηφία, έτσι ώστε η προς μετάδοση κωδικοποιημένη λέξη να περιλαμβάνει n ψηφία [Καψάλης & Κωττής, 1997]. Γίνεται φανερό ότι οι δυο ρυθμοί συνδέονται μεταξύ τους σύμφωνα με τη σχέση $R_s = R_u * (n/k)$. Το R_s αντιστοιχεί στο εύρος ζώνης 3dB του σήματος μετά την κωδικοποίηση και τη διαμόρφωση, ενώ η ποσότητα $R_s * (1+\alpha)$ αντιστοιχεί στο συνολικό εύρος ζώνης του σήματος μετά το διαμορφωτή. Ο

συντελεστής α ονομάζεται συντελεστής roll-off της διαμόρφωσης και αποτελεί μέτρο της διεύρυνσης του φάσματος του σήματος.

Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων μετάδοσης υιοθετούνται λόγοι BW/R_s ή BS/R_s ίσοι με την ποσότητα $\eta=1+\alpha$ (προκειμένου για διαμόρφωση QPSK). Όσο στενότερος είναι ο συντελεστής roll-off, δηλαδή όσο μικρότερη είναι η τιμή του α , τόσο υψηλότεροι ρυθμοί μπορούν να επιτευχθούν. Η υιοθέτηση χαμηλών τιμών $1+\alpha$ (π.χ. $BS/R_s=1.25$ που συνδέεται με $\alpha=0.25$) γίνεται με στόχο την καλύτερη εκμετάλλευση του φάσματος, επιτρέποντας μικρή επικάλυψη των διαμορφωμένων σημάτων στο πεδίο της συχνότητας.

Για να γίνουν τα παραπάνω πιο κατανοητά, παρατίθεται το Σχήμα 2.3 στο οποίο παρουσιάζονται παραδείγματα της επιπρόσθετης τιμής του λόγου E_b/N_0 που απαιτείται για τη μείωση της ποσότητας BW/R_s . Σημειώνεται ότι E_b είναι η ενέργεια δυαδικού ψηφίου και N_0 είναι η μονόπλευρη φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου. Η αύξηση στο λόγο E_b/N_0 οφείλεται στον περιορισμένο εύρος ζώνης του αναμεταδότη. Τα αποτελέσματα έχουν προκύψει από προσομοιώσεις σε υπολογιστή και αφορούν ποσοστό εσφαλμένων ψηφίων $BER = 2 \cdot 10^{-4}$. Σημειώνεται ότι το ποσοστό $BER = 2 \cdot 10^{-4}$ (το οποίο μετράται μετά την αποκωδικοποίηση) αποτελεί τη στάθμη αναφοράς στα συστήματα DVB. Η στάθμη των 0dB στο Σχήμα 2.3 αποτελεί την τιμή αναφοράς και αναφέρεται στην ιδανική περίπτωση όπου δεν υπάρχει περιορισμός στο εύρος ζώνης ($BW = \infty$) και ο ενισχυτής TWTA λειτουργεί στον κορεσμό, δηλαδή ισχύει $OBO=0dB$. Υπενθυμίζεται ότι η ποσότητα OBO (Output Back Off) ονομάζεται περιθώριο ισχύος στην έξοδο του ενισχυτή και ισούται με το περιθώριο ισχύος, συνήθως σε dB, μεταξύ του σημείου λειτουργίας και του σημείου κορεσμού του ενισχυτή. Αντίστοιχα, η ποσότητα IBO (Input Back Off) ονομάζεται περιθώριο ισχύος στην είσοδο του ενισχυτή και ισούται με το περιθώριο ισχύος, συνήθως σε dB, μεταξύ της ισχύος στην είσοδο του ενισχυτή και της ισχύος εισόδου που οδηγεί τον ενισχυτή στον κόρο. Στο διάγραμμα πραγματοποιείται σύγκριση των περιπτώσεων με εσωτερική κωδικοποίηση 2/3 και 7/8 σε σχέση με την περίπτωση που χρησιμοποιείται QPSK χωρίς κωδικοποίηση.



Σχήμα 2.3 - Υποβάθμιση του E_b/N_0 εξαιτίας των περιορισμών στο εύρος ζώνης του αναμεταδότη (BW)

2.4.2 Σηματοθορυβικός λόγος ως προς το ποσοστό λανθασμένων ψηφίων

Ο θόρυβος του δορυφορικού καναλιού αποτελεί μια από τις βασικότερες αιτίες υποβάθμισης της απόδοσης του συστήματος. Η ευαισθησία ενός δορυφορικού συστήματος στο θόρυβο μετάδοσης εκφράζεται με το λόγο E_b/N_0 που απαιτείται ώστε να επιτυγχάνεται μια συγκεκριμένη στάθμη BER. Τα DVB συστήματα σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούν προδιαγραφές που να αντιστοιχούν σε ποσοστό λανθασμένων ψηφίων στην έξοδο του αποκωδικοποιητή περίπου ίσο με $2 \cdot 10^{-4}$. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε ένα ποσοστό λανθασμένων bytes μεταξύ $7 \cdot 10^{-4}$ και $2 \cdot 10^{-3}$ ανάλογα με το σχήμα κωδικοποίησης. Σημειώνεται ότι οι εκτιμήσεις αυτές λαμβάνουν υπόψη μόνο το στάσιμο θόρυβο και ιδανική αποδιαμόρφωση. Αντίθετα, οι επιδράσεις του θορύβου φάσης και η αστάθεια στην ανάκτηση του φέροντος είναι δυνατόν να παράγουν μη διορθώσιμα σφάλματα κατά ομάδες.

Στον Πίνακα 2.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι απαιτήσεις απόδοσης του συστήματος ως προς το λόγο E_b/N_0 ώστε να επιτυγχάνεται ποσοστό $BER = 2 \cdot 10^{-4}$. Εξετάζονται διάφοροι συνδυασμοί σχήματος διαμόρφωσης και ρυθμού εσωτερικής κωδικοποίησης. Οι τιμές του E_b/N_0 αναφέρονται στο ρυθμό χρήσιμων ψηφίων R_u πριν την κωδικοποίηση RS. Ως γνωστόν, κατά τη χρήση των διαμορφώσεων QPSK, 8PSK και 16QAM εκπέμπονται 2, 3 και 4 ψηφία ανά σύμβολο. Εξαιτίας όμως της χρήσης

κωδικοποίησης (τα ωφέλιμα ψηφία αποτελούν μέρος των συνολικά μεταδιδόμενων ψηφίων) και της μικρής διεύρυνσης του φάσματος, οι τιμές των ψηφίων ανά σύμβολο παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις από τις προαναφερθείσες τιμές. Το γεγονός αυτό απεικονίζεται στην τρίτη στήλη του πίνακα. Όπως ήταν αναμενόμενο, προκύπτει ότι η διαμόρφωση 8PSK 8/9, λόγω της σταθερής της περιβάλλουσας, είναι κατάλληλη για δορυφορικούς αναμεταδότες κοντά στον κορεσμό, ενώ η 16QAM 3/4 προσφέρει καλύτερη φασματική απόδοση όταν ο αναμεταδότης λειτουργεί στη γραμμική περιοχή σε διατάξεις FDMA [Cominetti & Morello, 2000].

Πίνακας 2.1 - Απόδοση δορυφορικού DVB συστήματος για διαφορετικές λειτουργίες

Σύστημα	Διαμόρφωση	Ρυθμός εσωτερικής κωδικοποίησης	Φασματική απόδοση (ψηφία/σύμβολο)	Απαιτούμενος Eb/No (dB) για $BER = 2 \cdot 10^{-4}$
DVB-S και DVB-DSNG	QPSK	1/2	0.92	4.5
		2/3	1.23	5.0
		3/4	1.38	5.5
		5/6	1.53	6.0
		7/8	1.61	6.4
DVB-DSNG (προαιρετικά)	8PSK	2/3	1.84	6.9
		5/6	2.30	8.9
		8/9	2.46	9.4
DVB-DSNG (προαιρετικά)	16QAM	3/4	2.76	9.0
		7/8	3.22	10.7

2.5 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ DVB-S2

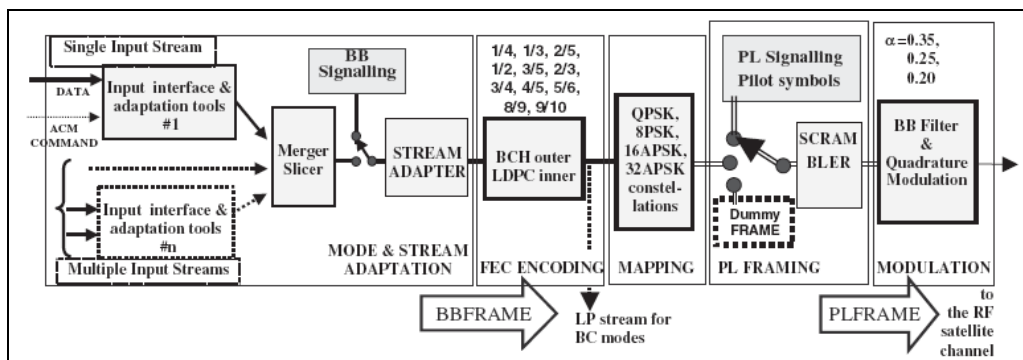
Το DVB-S2 αποτελεί τη δεύτερης γενιάς προτύπων δορυφορικής μετάδοσης στα πλαίσια του προγράμματος DVB. Αποτελεί εξέλιξη του προτύπου DVB-S της προηγούμενης ενότητας, το οποίο χρησιμοποιείται σήμερα από τους περισσότερους δορυφορικούς παρόχους υπηρεσιών σε παγκόσμια κλίμακα.. Κάτω από τις ίδιες συνθήκες μετάδοσης το DVB-S2 επιτυγχάνει αύξηση της χωρητικότητας μετάδοσης έως και τριάντα τοις εκατό σε σχέση με το DVB-S. Η σχεδιάσή του είναι τέτοια που επιτρέπει την εξυπηρέτηση πολλαπλών ευρυζωνικών δορυφορικών εφαρμογών: Εφαρμογές τηλεόρασης

Κανονικής και Υψηλής Ευκρίνειας (SDTV, HDTV), αλληλεπιδραστικές υπηρεσίες για καταναλωτικές εφαρμογές, όπως η πρόσβαση στο διαδίκτυο, επαγγελματικές εφαρμογές, όπως η Ψηφιακή Τηλεόραση και η Συλλογή Ειδήσεων (DSNG), η διανομή τηλεοπτικού σήματος σε επίγειους πομπούς και η διανομή ψηφιακών δεδομένων. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι προσφέρει συμβατότητα με την προηγούμενη έκδοση του προτύπου, επιτρέποντας στις υπάρχουσες υπηρεσίες DVB-S και τα αντίστοιχα τερματικά STB να συνεχίζουν να λειτουργούν απρόσκοπτα. Το πρότυπο DVB-S2 έχει βασιστεί σε τρεις σημαντικές έννοιες [Morello & Reimers, 2004]:

- βέλτιστη απόδοση μετάδοσης
- απόλυτη ευελιξία
- όσο το δυνατόν μικρότερη πολυπλοκότητα δέκτη

Το γεγονός ότι το DVB-S2 εφαρμόζεται και σε υπάρχοντες δορυφορικούς αναμεταδότες με πληθώρα χαρακτηριστικών μετάδοσης και για διάφορους συνδυασμούς φασματικής απόδοσης και απαιτήσεων σηματοθρομβικού λόγου, μαρτυρά τη σημαντική του ευελιξία και πρακτικότητα. Επιπλέον, δεν περιορίζεται σε κωδικοποίηση βίντεο και ήχου MPEG-2, αλλά είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να χειρίζεται μια ποικιλία πρωτοκόλλων ήχου, βίντεο και δεδομένων. Ανάμεσα σε αυτά συμπεριλαμβάνονται και σχήματα που βρίσκονται σε στάδιο προτυποποίησης για μελλοντικές εφαρμογές DVB. Το DVB-S2 προσαρμόζεται σε οποιοδήποτε τύπο ροής εισόδου δεδομένων, όπως είναι η συνεχής ροή bit, απλά ή πολλαπλά Ρεύματα Μεταφοράς MPEG (Transport Streams, TS), πακέτα IP, καθώς και πακέτα του πρωτοκόλλου Ασύγχρονου Τρόπου Μεταφοράς (Asynchronous Transfer Mode, ATM). Το γεγονός αυτό περιορίζει και την ανάγκη δημιουργίας ενός νέου προτύπου στο μέλλον.

2.6 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ DVB-S2



Σχήμα 2.4 - Λειτουργικό μπλοκ διάγραμμα του συστήματος DVB-S2

Το σύστημα DVB-S2 ακολουθεί μια διαστρωματωμένη αρχιτεκτονική μετάδοσης, η οποία μπορεί να αναλυθεί σε μια ακολουθία λειτουργικών μπλοκ (Σχήμα 2.4). Το πρώτο στη σειρά μπλοκ, το οποίο προσδιορίζεται ως Προσαρμογή Ροής Εισόδου (Mode And Stream Adaptation), εξαρτάται από την εξυπηρετούμενη εφαρμογή και αποτελεί τη διεπαφή προς κάθε ρεύμα εισόδου. Οι ακολουθίες εισόδου μπορεί να είναι απλά ή πολλαπλά ρεύματα μεταφοράς, με χρήση πακέτων ή σε συνεχή ροή. Παράλληλα, το μπλοκ Προσαρμογής Ροής Εισόδου διαθέτει διάφορα προαιρετικά εργαλεία για τη λειτουργία της Προσαρμοστικής Κωδικοποίησης και Διαμόρφωσης (Adaptive Coding and Modulation, ACM). Επιπλέον, στην περίπτωση πολλαπλών εισόδων, παρέχει συγχώνευση (merging) όλων των ρευμάτων εισόδου σε ένα απλό μεταδιδόμενο σήμα, και στη συνέχεια τεμαχισμό (slicing) αυτού σε μπλοκ κωδικοποιημένα κατά FEC. Τα τελευταία αποτελούνται από ψηφία που έχουν συγκεντρωθεί από μια θύρα εισόδου, προκειμένου να μεταδοθούν με κοινό τρόπο όσον αφορά την κωδικοποίηση FEC και τη διαμόρφωση. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα πλαίσιο βασικής ζώνης (Base Band Frame, BBFRAME). Όμως, είναι πιθανό τα προς μετάδοση δεδομένα χρήστη να μην επαρκούν για τη συμπλήρωση του πλαισίου. Στην περίπτωση αυτή ακολουθείται μια διαδικασία προσθήκης bit (padding), ώστε να συμπληρωθεί πλήρως το BBFRAME.

Ακολουθεί η διαδικασία της κωδικοποίησης FEC, η οποία πραγματοποιείται διαδοχικά από τον εξωτερικό κωδικοποιητή BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem) κώδικα και τον εσωτερικό κωδικοποιητή LDPC (Low Density Parity Check) κώδικα. Ο κώδικας BCH είναι ένας κυκλικός κώδικας πολλαπλών επιπέδων και μεταβλητού μήκους, ενώ οι κώδικες LDPC χρησιμοποιούν αραιούς πίνακες ελέγχου ισοτιμίας. Ανάλογα με την εφαρμογή, τα κωδικοποιημένα μπλοκ κατά FEC (πλαίσια FEC) έχουν μήκος 64800 ή 16200 bits. Όταν χρησιμοποιείται ACM ή Μεταβλητή Κωδικοποίηση και Διαμόρφωση (Variable Coding and Modulation, VCM), οι λειτουργίες κωδικοποίησης και διαμόρφωσης είναι σταθερές για ένα συγκεκριμένο πλαίσιο, αλλά μπορεί να μεταβάλλονται σε διαφορετικά πλαίσια. Επόμενο βήμα είναι η επιλογή της κατάλληλης διαμόρφωσης με εισαγωγή των ψηφίων στις φάσεις του αστερισμού, ανάλογα με την εφαρμογή. Η διαδικασία αυτή ακολουθείται από το σχηματισμό του πλαισίου φυσικού στρώματος (Physical Layer, PL). Μέσω αυτής παρέχεται η εισαγωγή επικεφαλίδας PL και προαιρετικών πιλοτικών συμβόλων PL (με απώλεια χωρητικότητας 2.4%), ενώ τα ψηφία τίθενται σε τυχαία σειρά (scrambling) για διασπορά ενέργειας. Όταν δεν υπάρχουν δεδομένα προς μετάδοση, εφαρμόζεται προαιρετικά η εισαγωγή πλαισίων PL χωρίς πληροφορία (dummy). Τελευταίο στάδιο πριν

τη μετάδοση του σήματος στο δορυφορικό κανάλι είναι το φιλτράρισμα βασικής ζώνης και η ορθογώνια (quadrature) διαμόρφωση. Αυτές παράγουν το τελικό σήμα ραδιοσυχνότητας που εκπέμπεται. Στις επόμενες παραγράφους αναλύονται περαιτέρω οι σημαντικότερες από τις λειτουργίες που επιτελούνται κατά τη μετάδοση σήματος σε DVB-S2 σύστημα.

2.6.1 Κωδικοποίηση

Για να επιτευχθεί από το σύστημα η βέλτιστη απόδοση, το πρότυπο DVB-S2 επωφελείται από τις σύγχρονες εξελίξεις όσον αφορά την κωδικοποίηση καναλιού και τη διαμόρφωση. Αναφορικά με τη χρήση κωδικοποίησης για τη διόρθωση σφαλμάτων, υιοθετείται η τεχνική FEC. Η τεχνική αυτή επιτρέπει την αποκωδικοποίηση στο δέκτη χωρίς να είναι απαραίτητη οποιαδήποτε πληροφορία από τον πομπό. Ως αποτέλεσμα μιας σειράς εργαστηριακών εξομοιώσεων για την εύρεση του πλέον αποδοτικού κώδικα, επιλέχθηκε τελικά μια οικογένεια από απλούς μπλοκ κώδικες με πολύ περιορισμένη αλγεβρική δομή. Οι κώδικες αυτοί είναι οι κώδικες Ελέγχου Ισοτιμίας Χαμηλής Πυκνότητας (Low Density Parity Check, LDPC). Οι LDPC κώδικες χρησιμοποιούν αναδρομικές τεχνικές αποκωδικοποίησης και τα κύρια χαρακτηριστικά τους είναι:

- το πολύ μεγάλο μήκος των μπλοκ (64800 bits για το κανονικό πλαίσιο και 16200 bits για το μικρότερο πλαίσιο)
- ο τεράστιος αριθμός επαναλήψεων για την αποκωδικοποίηση (περίπου 50), με τη δομή του κώδικα να παρουσιάζει αρκετές περιοδικότητες, οι οποίες ευνοούν την υλοποίηση ενός παράλληλου αποκωδικοποιητή
- η παρουσία ενός συνδεδεμένου εξωτερικού κώδικα BCH (χωρίς παρεμβολή ψηφίων), ο οποίος χρησιμοποιήθηκε από τους σχεδιαστές ως μια χαμηλού κόστους λύση απέναντι σε σφάλματα που παρατηρούνται σε υψηλούς CNR λόγους

Στο DVB-S2 είναι δυνατή η χρήση δυο ειδών μπλοκ με μήκος 64800 ή 16200 bits. Η επιλογή αυτή υπαγορεύτηκε από δυο αντικρουόμενες ανάγκες. Τα μπλοκ μεγάλου μήκους βελτιώνουν το σηματοθορυβικό λόγο που επιτυγχάνεται, αλλά ταυτόχρονα αυξάνουν τη καθυστέρηση της διαδικασίας διαμόρφωσης και αποδιαμόρφωσης από άκρο σε άκρο. Επομένως, για εφαρμογές όπου η καθυστέρηση δεν είναι ιδιαίτερα κρίσιμη, όπως για παράδειγμα η ευρυεκπομπή, ενδείκνυται η χρήση μεγάλων πλαισίων. Αντίθετα, για

αλληλεπιδραστικές εφαρμογές, όπου οι καθυστερήσεις πρέπει να διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα, τα μικρά πλαίσια είναι πιο αποδοτικά.

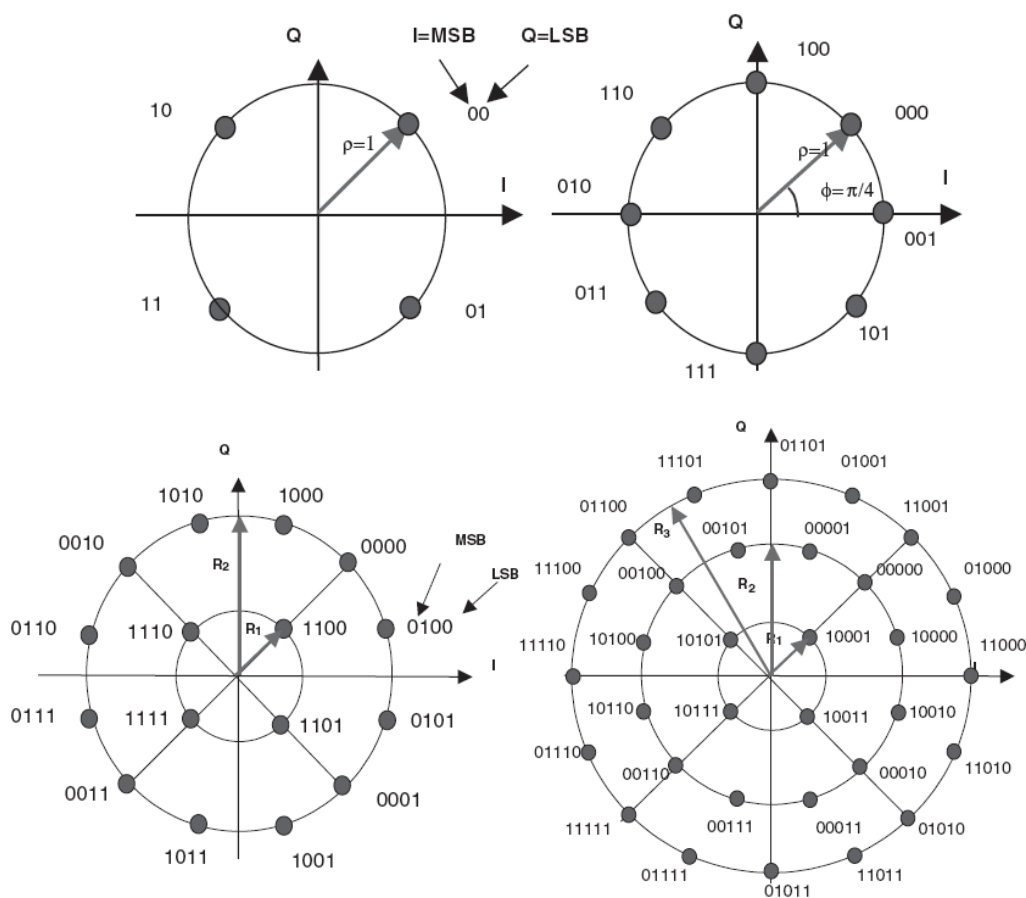
Η εγγενής ευελιξία του DVB-S2 επιτρέπει την ικανοποίηση μιας μεγάλης ποικιλίας απαιτήσεων. Ανάλογα λοιπόν με την επιλεγμένη διαμόρφωση και τις απαιτήσεις του συστήματος, μπορούν να επιλεγούν ρυθμοί κωδικοποίησης ίσοι με $1/2, 1/4, 1/3, 2/5, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9$ και $9/10$. Οι χαμηλοί ρυθμοί κωδικοποίησης, δηλαδή $1/2, 1/4, 1/3$ και $2/5$, έχουν εισαχθεί ώστε να επιτρέπουν τη λειτουργία του συστήματος κάτω από εξαιρετικά άσχημες συνθήκες ζεύξης. Έτσι, σε συνδυασμό με τη χρήση QPSK διαμόρφωσης, το σύστημα είναι σε θέση να λειτουργεί κανονικά, ακόμη και όταν η στάθμη του σήματος είναι κάτω από τη στάθμη του θορύβου. Χωρίς τη χρήση κωδικοποίησης, η πτώση της στάθμης του σήματος κάτω από τη στάθμη του θορύβου θα καθιστούσε αδύνατη τη λήψη σωστής απόφασης για τα ψηφία πληροφορίας στο δέκτη και θα οδηγούσε σε διακοπή της λειτουργίας του συστήματος.

2.6.2 Διαμόρφωση

Για τη μετάδοση των ψηφίων πληροφορίας μέσω του δορυφορικού καναλιού υπάρχει η δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε τέσσερις αστερισμούς διαμόρφωσης (βλ. Σχήμα 2.5) [Morello & Reimers, 2004]. Όπως έχει αναφερθεί, οι διαμορφώσεις QPSK και 8PSK διαθέτουν σταθερή περιβάλλουσα, επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μη γραμμικούς δορυφορικούς αναμεταδότες που λειτουργούν κοντά στον κορεσμό. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές ευρυεκπομπής, επιτυγχάνοντας υψηλή απόδοση ισχύος. Από την άλλη, τεχνικές ανώτερης τάξεως, όπως 16APSK και 32APSK, είναι ευαίσθητες σε πιθανές μη γραμμικότητες. Έτσι, απαιτούν ένα υψηλότερο επίπεδο CNR, καθώς και την ελαχιστοποίηση της μη γραμμικότητας του αναμεταδότη. Οι τεχνικές αυτές υπερέχουν ως προς την φασματική απόδοση και προσανατολίζονται κυρίως για επαγγελματικές εφαρμογές. Σημειώνεται ότι οι αστερισμοί 16APSK και 32APSK έχουν βελτιστοποιηθεί έτσι ώστε να λειτουργούν σε ένα μη γραμμικό αναμεταδότη τοποθετώντας τα σημεία σε κύκλους, όπως φαίνεται και στο αντίστοιχο σχήμα.

Επιλέγοντας κατάλληλα τον αστερισμό διαμόρφωσης και τα ποσοστά κωδικοποίησης, είναι δυνατό να επιτευχθούν φασματικές αποδόσεις από 0.5 έως 4.5 bit ανά σύμβολο. Οι επιλογές γίνονται ανάλογα με τις δυνατότητες και τους περιορισμούς του χρησιμοποιούμενου δορυφορικού αναμεταδότη. Αναφορικά με την τιμή του συντελεστή roll-off, ο οποίος καθορίζει το σχήμα και τη διεύρυνση του φάσματος, υπάρχουν τρεις δυνατότητες. Στο DVB-S2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τιμή $\alpha=0.35$, κάτι που συμβαίνει

και με το DVB-S. Όμως, υπάρχουν και δυο άλλες δυνατές τιμές, για $\alpha=0.25$ ή 0.20 , οι οποίες παρέχουν αυστηρότερο περιορισμό του σχήματος του εύρους ζώνης.



Σχήμα 2.5 - Οι τέσσερις πιθανοί αστερισμοί για τη διαμόρφωση

2.7 ΔΟΜΗ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΣΤΟ DVB-S2

Για το σύστημα DVB-S2 η διαδικασία της πλαισίωσης υλοποιείται σε δυο διαφορετικά επίπεδα. Το πρώτο εδρεύει στο φυσικό επίπεδο, μεταφέροντας λίγα bits σηματοδοσίας στα οποία παρέχεται υψηλή ασφάλεια. Το δεύτερο περιλαμβάνεται στο επίπεδο της βασικής ζώνης, μεταφέροντας μια ποικιλία από bits σηματοδοσίας, κάτι που επιτρέπει τη μέγιστη ευελιξία κατά την προσαρμογή του σήματος εισόδου.

2.7.1 Πλαισίωση φυσικού στρώματος

Κατά τη διαδικασία της αποδιαμόρφωσης και της αποκωδικοποίησης FEC, ο δέκτης πρέπει να συγχρονίζεται και να ανιχνεύει τις παραμέτρους της διαμόρφωσης και της

κωδικοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν από τον πομπό. Αυτός είναι ο σημαντικότερος σκοπός της πλαισίωσης φυσικού επιπέδου, μέσω της οποίας παρέχεται συγχρονισμός και σηματοδοσία στο φυσικό επίπεδο. Ο συγχρονισμός του δέκτη επιτυγχάνεται με την ανάκτηση του φέροντος και της φάσης, καθώς και με συγχρονισμό των πλαισίων. Μέσα σε ένα πλαίσιο η διαμόρφωση και το σχήμα της κωδικοποίησης είναι ομογενή, αλλά είναι δυνατόν να μεταβάλλονται σε διαδοχικά πλαίσια όταν χρησιμοποιείται μεταβλητή κωδικοποίηση και διαμόρφωση (VCM). Σημειώνεται ότι η δομή πλαισίωσης φυσικού επιπέδου είναι ανεξάρτητη της εφαρμογής.

Κάθε πλαίσιο PL αποτελείται από:

- ένα ωφέλιμο φορτίο των 64800 bits (κανονικό πλαίσιο FEC) ή 16200 bits (σύντομο πλαίσιο FEC), το οποίο παράγεται από την κωδικοποίηση των bits του χρήστη σύμφωνα με το επιλεγμένο σχήμα FEC, επομένως το ωφέλιμο φορτίο αντιστοιχεί σε ένα μπλοκ του συνδυασμένου κώδικα LDPC/BCH
- μια Επικεφαλίδα PL, η οποία περιέχει πληροφορία συγχρονισμού και σηματοδοσίας, δηλαδή τον τύπο της διαμόρφωσης, το ρυθμό κωδικοποίησης, το μήκος πλαισίου και την παρουσία ή απουσία κάποιων πιλοτικών συμβόλων, τα οποία συχνά χρησιμοποιούνται για διευκόλυνση του συγχρονισμού

Η Επικεφαλίδα PL στο DVB-S2 αποτελείται πάντα από 90 σύμβολα και το ωφέλιμο φορτίο αποτελείται από ένα ακέραιο πολλαπλάσιο των 90 συμβόλων (εξαιρώντας τα πιλοτικά σύμβολα). Σημειώνεται ότι η επικεφαλίδα PL αποκωδικοποιείται πρώτη από το δέκτη. Για το λόγο αυτό, δεν προστατεύεται από το ισχυρό σχήμα κωδικοποίησης LDPC/BCH. Εξαιτίας όμως της σπουδαιότητάς της, η επικεφαλίδα πρέπει να αποκωδικοποιείται ορθά ακόμη και κάτω από τις χειρότερες δυνατές συνθήκες της ζεύξης. Επομένως, οι σχεδιαστές επέλεξαν για αυτή ένα πολύ χαμηλό ρυθμό κωδικοποίησης (7/64), κατάλληλο για αποκωδικοποίηση μέσω ενός συσχετιστή. Ταυτόχρονα, ελαχιστοποιήθηκε ο αριθμός των bit σηματοδοσίας, ώστε να μειωθεί η πολυπλοκότητα της αποκωδικοποίησης και η απώλεια αποδοτικότητας.

2.7.2 Πλαισίωση στρώματος βασικής ζώνης

Το δεύτερο επίπεδο δομής πλαισίωσης, αυτό της βασικής ζώνης, επιτρέπει μια πιο ολοκληρωμένη λειτουργικότητα σηματοδοσίας, ώστε να ρυθμιστεί ο δέκτης σύμφωνα με τις διάφορες εφαρμογές, οι οποίες μπορεί να περιλαμβάνουν:

- απλά ή πολλαπλά ρεύματα εισόδου
- ρεύματα γενικής χρήσης ή ρεύματα μεταφοράς

- Σταθερή Κωδικοποίηση και Διαμόρφωση (Constant Coding and Modulation, CCM) ή Προσαρμοστική Κωδικοποίηση και Διαμόρφωση (ACM)

Η επικεφαλίδα βασικής ζώνης έχει μέγεθος 80 bits και τοποθετείται μπροστά από το πεδίο δεδομένων. Σκοπός της είναι να γνωστοποιήσει στο δέκτη το σχήμα της ροής εισόδου και την κατάλληλη λειτουργία για την προσαρμογή του. Παρά το μεγάλο πλήθος των ψηφίων σηματοδοσίας στην επικεφαλίδα (80), δεν θυσιάζεται η αποδοτικότητα της μετάδοσης ούτε η ανοχή έναντι του θορύβου. Η επικεφαλίδα BB μεταφέρει και επιπλέον πληροφορίες σηματοδοσίας, όπως:

- χαρακτηρισμό των ρευμάτων εισόδου του διαμορφωτή
- περιγραφή της θέσης και των χαρακτηριστικών των πακέτων χρήστη
- ένδειξη της παρουσίας πρόσθετων bit στο μεταδιδόμενο BBFRAME
- σήμανση της ενεργοποίησης ορισμένων επιλογών, όπως είναι η συνάρτηση διαγραφής των μηδενικών πακέτων και η συνάρτηση συγχρονισμού της ροής εισόδου
- ένδειξη για το σχήμα διαμόρφωσης που έχει επιλεγεί

2.8 ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΗΣ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Στα προηγούμενα περιγράφηκε η αρχιτεκτονική μετάδοσης που ακολουθείται στα συστήματα DVB-S2 και έγινε φανερή η σπουδαιότητα των λειτουργιών κωδικοποίησης και διαμόρφωσης. Τα συστήματα δορυφορικής μετάδοσης νέας γενιάς έχουν τη δυνατότητα χρήσης μιας ισχυρής τεχνικής που ονομάζεται Προσαρμοστική Κωδικοποίηση και Διαμόρφωση (Adaptive Coding and Modulation, ACM). Η τεχνική αυτή επιτρέπει την περαιτέρω αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος, με αποδοτική εκμετάλλευση των πόρων του αναμεταδότη και τελικά βοηθά στην επίτευξη ακόμα μεγαλύτερου κέρδους σε σχέση με τα DVB-S συστήματα. Για αλληλεπιδραστικές υπηρεσίες γίνεται χρήση ACM στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, ενώ για επαγγελματικές υπηρεσίες και DSNG η παρουσία της είναι προαιρετική.

Στην περίπτωση υπηρεσιών ευρυεκπομπής, τα δορυφορικά συστήματα υιοθετούν σχήματα σταθερού ρυθμού κωδικοποίησης και διαμόρφωσης, καθώς είναι σχεδιασμένα να αντιμετωπίζουν τις χειρότερες δυνατές συνθήκες της ζεύξης. Επομένως, για υπηρεσίες αυτού του είδους, που απευθύνονται σε πληθώρα χρηστών, είναι πολύ δύσκολη η εξοικονόμηση ισχύος και φάσματος. Από την άλλη μεριά, στην περίπτωση δικτύων

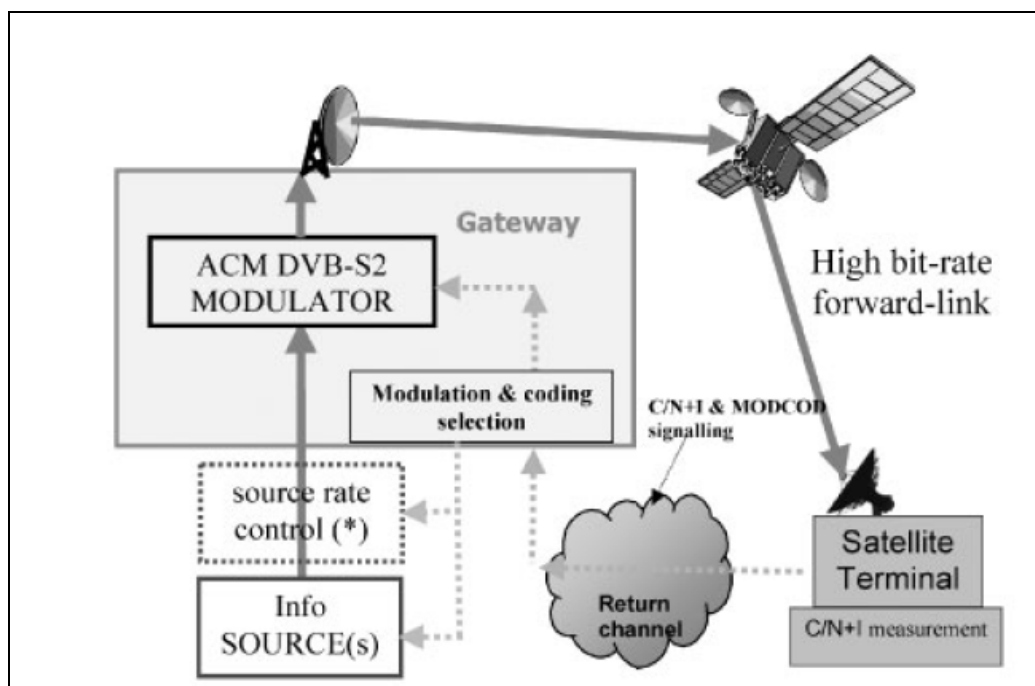
εκπομπής σε μοναδικό χρήστη (unicasting) όπου χρησιμοποιούνται ζεύξεις σημείου προς σημείο, η παραπάνω μέθοδος δεν είναι βέλτιστη. Η φύση των ζεύξεων αυτών καθιστά δυνατή την εκμετάλλευση της χωρικής ανομοιογένειας που εμφανίζουν οι συνθήκες διάδοσης για τους διάφορους χρήστες. Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται με κατάλληλη προσαρμογή του ρυθμού κωδικοποίησης και του σχήματος διαμόρφωσης (χρήση ACM) στις ανάγκες του κάθε χρήστη ξεχωριστά. Με τον τρόπο αυτό δεν υπάρχει πλέον σταθερό περιθώριο διαλείψεων, άρα σημειώνεται αποδοτικότερη εκμετάλλευση των πόρων του συστήματος [Rinaldo et al., 2004]. Πιο συγκεκριμένα, για την κάλυψη των περιοχών που αντιμετωπίζουν αντίξοες συνθήκες μετάδοσης, χρησιμοποιείται το απαιτούμενο περιθώριο διαλείψεων, έτσι ώστε να μην προκύψει διακοπή της λειτουργίας. Αντίθετα, για τους χρήστες εκείνους που βρίσκονται υπό ευνοϊκές συνθήκες μετάδοσης, το σύστημα έχει τη δυνατότητα να μειώνει την ισχύ εκπομπής ή ισοδύναμα να αυξάνει το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, εξοικονομώντας ισχύ και εύρος ζώνης αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι κατά την εξέταση των συνθηκών διάδοσης για συστήματα που χρησιμοποιούν ACM, εκτός από το θόρυβο λαμβάνονται υπόψη και οι πιθανές παρεμβολές που εισάγονται στο κανάλι. Επομένως, ορίζεται ένα νέο μέγεθος, ο λόγος σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο (Carrier to Noise and Interference Ratio, CNIR).

Μια δορυφορική ζεύξη που κάνει χρήση ACM (βλ. Σχήμα 2.6) αποτελείται από τον Κεντρικό Σταθμό ACM (Gateway, GW), τον DVB-S2 ACM διαμορφωτή (modulator), τον επίγειο σταθμό της προς τα άνω ζεύξης, το δορυφόρο και το Δορυφορικό Τερματικό λήψης (Satellite Terminal, ST), το οποίο είναι συνδεδεμένο στον ACM GW μέσω ενός καναλιού επιστροφής [Morello & Reimers, 2004]. Υποθέτοντας ότι το διαθέσιμο εύρος ζώνης του αναμεταδότη είναι σταθερό, ο DVB-S2 ACM διαμορφωτής θα λειτουργεί με σταθερό ρυθμό συμβόλων. Η Προσαρμοστική Κωδικοποίηση και Διαμόρφωση ουσιαστικά υλοποιείται από το διαμορφωτή DVB-S2, ο οποίος εκπέμπει μια ακολουθία από πλαίσια φυσικού στρώματος. Τα πλαίσια PL πολυπλέκονται με διαίρεση χρόνου TDM. Όπως έχει αναφερθεί, το σχήμα κωδικοποίησης και διαμόρφωσης παραμένει σταθερό μέσα σε ένα πλαίσιο, αλλά είναι δυνατόν να μεταβάλλεται από πλαίσιο σε πλαίσιο. Η δυνατότητα μεταβολής των σχημάτων αυτών σύμφωνα με τις επικρατούσες συνθήκες διάδοσης αποτελεί τον πυρήνα της τεχνικής ACM. Έτσι, ακόμα και κάτω από συνθήκες έντονων διαλείψεων, για παράδειγμα λόγω βροχόπτωσης, εξασφαλίζεται η συνέπεια της υπηρεσίας. Οι απαραίτητες ενέργειες για τη διατήρηση της ποιότητα υπηρεσίας (Quality-of-Service, QoS) είναι η μείωση του ρυθμού μετάδοσης του χρήστη, η αύξηση των πλεοναζόντων

ψηφίων της κωδικοποίησης FEC και η υιοθέτηση σχήματος διαμόρφωσης χαμηλότερης τάξης, άρα μεγαλύτερης ευρωστίας.

Η παραπάνω διαδικασία υλοποιείται σύμφωνα με τα ακόλουθα βήματα:

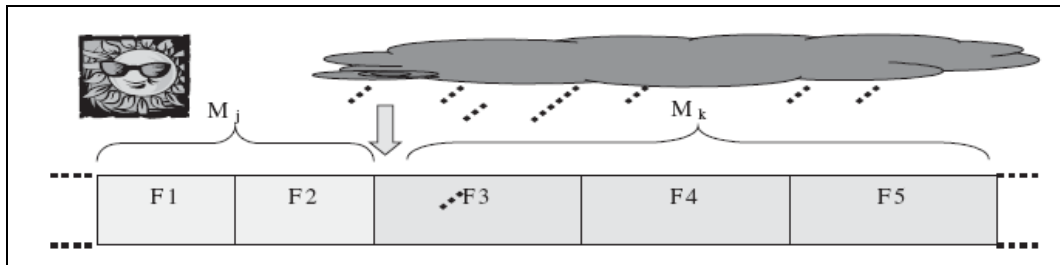
- κάθε ST μετρά την κατάσταση του καναλιού (διαθέσιμο CNIR) και το αναφέρει μέσω του καναλιού επιστροφής στο σταθμό GW
- οι αναφορές του ST λαμβάνονται υπόψη από τον GW για την επιλογή του επιπέδου προστασίας για τα πακέτα δεδομένων που προορίζονται για το συγκεκριμένο ST
- προκειμένου να αποφευχθεί η υπερχειλίση πληροφορίας στους καταχωρητές (buffers) του σταθμού κατά τη διάρκεια των διαλείψεων, θα έπρεπε να υλοποιηθεί ένας μηχανισμός ελέγχου του ρυθμού μετάδοσης από το χρήστη, ο οποίος θα προσαρμόζει την προσφερόμενη κίνηση στη διαθέσιμη χωρητικότητα καναλιού



Σχήμα 2.6 - Μπλοκ διάγραμμα μιας ζεύξης DVB-S2 ACM

Ο σταθμός GW μπορεί να προσαρμόζει το επίπεδο ασφάλειας που παρέχεται στα δεδομένα των διαφόρων χρηστών με δυο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι απευθείας μέσω της εντολής ACM (βλ. μπλοκ διάγραμμα στο Σχήμα 2.4). Ο δεύτερος είναι με τον τεμαχισμό των δεδομένων χρήστη σε διάφορες ροές, μια για κάθε απαιτούμενο επίπεδο ασφάλειας. Κάθε μια από αυτές τις ροές τροφοδοτείται σε μια διαφορετική είσοδο του διαμορφωτή DVB-S2 και ο τελευταίος εφαρμόζει ένα σταθερό επίπεδο ασφαλείας σε κάθε ροή εισόδου, ανάλογα με τις απαιτήσεις ασφαλείας της. Έτσι, όταν οι συνθήκες διάδοσης

μεταβάλλονται (βλ. βέλος στο Σχήμα 2.7), η προστασία για τα πλαίσια του φυσικού στρώματος F_i μεταβάλλεται από M_j σε M_k , ώστε να εξασφαλισθεί η αδιάκοπη παροχή υπηρεσίας.



Σχήμα 2.7 - Τα πλαίσια φυσικού επιπέδου αλλάζουν προστασία κατά τη διάρκεια διάλειψης λόγω βροχής

2.9 ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ ΜΕ ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ DVB-S

Η προτυποποίηση του DVB-S ολοκληρώθηκε το 1993 και έκτοτε αποτελεί το πλέον διαδεδομένο πρότυπο για δορυφορική μετάδοση. Τα πλεονεκτήματά του και κυρίως η ευελιξία της λειτουργίας του οδήγησαν στην υιοθέτηση του από την πλειοψηφία των δορυφορικών αναμεταδοτών ανά την υφήλιο. Το DVB-S2, η προδιαγραφή δεύτερης γενιάς για δορυφορική μετάδοση, έρχεται να αντικαταστήσει το DVB-S παρέχοντας νέες δυνατότητες. Ο μεγάλος όμως αριθμός των δεκτών DVB-S που είναι ήδη εγκατεστημένοι καθιστά πολύ δύσκολη τη σκέψη της πλήρους αντικατάστασης των τερματικών πρώτης γενιάς από εκείνα του DVB-S2. Για το λόγο αυτό, απαιτείται συμβατότητα με τα συστήματα της προηγούμενης γενιάς, η οποία θα επιτρέψει στους DVB-S δέκτες να συνεχίσουν να λειτουργούν. Ταυτόχρονα, οι νέοι, προηγμένοι δέκτες θα απολαμβάνουν επιπλέον χωρητικότητα και νέες υπηρεσίες. Στο τέλος της μεταβατικής περιόδου και όταν όλοι οι δέκτες θα έχουν αναβαθμιστεί σύμφωνα με το πρότυπο DVB-S2, δεν θα είναι πλέον απαραίτητη η συμβατότητα με παλαιά τερματικά, αφού το σύνολο των χρηστών θα μπορεί να αξιοποιεί πλήρως τις δυνατότητες του DVB-S2.

Στο DVB-S2 έχει προβλεφθεί η συνύπαρξη δεκτών παλιάς και νέας γενιάς, έτσι έχουν καθοριστεί προαιρετικές λειτουργίες συμβατότητας προς τα πίσω (Backwards Compatible, BC). Οι λειτουργίες αυτές συνίστανται στην αποστολή δυο ρευμάτων μεταφοράς από ένα απλό δορυφορικό κανάλι. Το πρώτο ρεύμα ονομάζεται Υψηλής Προτεραιότητας (High Priority, HP) και είναι συμβατό τόσο με το DVB-S όσο και με το DVB-S2. Το δεύτερο

καλείται Χαμηλής Προτεραιότητας (Low Priority, LP) και είναι συμβατό αποκλειστικά με δέκτες DVB-S2. Η συμβατότητα μπορεί να υλοποιηθεί σύμφωνα με τις δυο ακόλουθες προσεγγίσεις [Morello & Reimers, 2004]:

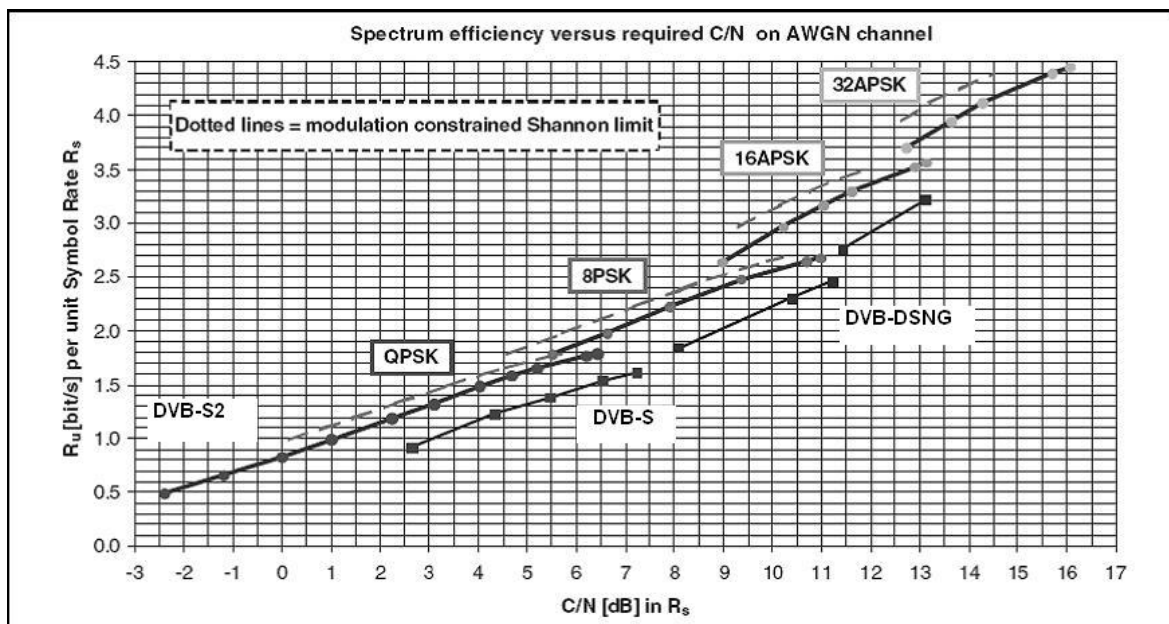
- Με υιοθέτηση διαστρωματωμένων διαμορφώσεων. Στην περίπτωση αυτή τα σήματα DVB-S2 και DVB-S συνδυάζονται ασύγχρονα σε ένα κοινό κανάλι ραδιοσυχνοτήτων, με το DVB-S σήμα να μεταδίδεται σε σημαντικά υψηλότερο επίπεδο ισχύος από το DVB-S2. Εφόσον το RF σήμα υπόκειται σε μεγάλες μεταβολές περιβάλλουσας, πρέπει να μεταδίδεται μέσω ενός σχεδόν γραμμικού αναμεταδότη, που απέχει από τον κορεσμό. Εναλλακτικά, για την καλύτερη εκμετάλλευση των δορυφορικών πόρων όσον αφορά την ισχύ, τα σήματα HP και LP μπορούν να μεταδοθούν ανεξάρτητα στην άνω ζεύξη και να ενισχυθούν το καθένα από έναν ανεξάρτητο δορυφορικό ενισχυτή που βρίσκεται κοντά στον κορεσμό. Τα σήματα που παράγονται συνδυάζονται τότε προς μετάδοση από το κανάλι κάτω ζεύξης.
- Με χρήση ιεραρχικής διαμόρφωσης, όπου τα δυο ρεύματα μεταφοράς HP και LP συνδυάζονται συγχρόνως και με μια μη ομοιόμορφη διαμόρφωση 8PSK. Εφόσον το παραγόμενο σήμα έχει σχεδόν σταθερή περιβάλλουσα, μπορεί να μεταδοθεί μέσω ενός απλού αναμεταδότη που οδηγείται κοντά στον κορεσμό. Αυτή η λύση περιλαμβάνεται στο πρότυπο DVB-S2 ως προαιρετική επιλογή.

2.10 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ DVB-S ΚΑΙ DVB-S2

Στην ενότητα αυτή εξετάζονται οι διαφορές ανάμεσα στα πρότυπα DVB-S και DVB-S2, ενώ πραγματοποιείται και σύγκριση της απόδοσης των δυο προτύπων. Μια σημαντική διαφορά παρατηρείται κατά τη διαδικασία της πλαισίωσης. Στο πρότυπο DVB-S τα πακέτα έχουν σταθερό μέγεθος ίσο με 188 bytes και σε αυτό περιλαμβάνονται 1 byte για συγχρονισμό, 3 bytes επικεφαλίδας και 184 χρήσιμα bytes. Αντίθετα, στο DVB-S2 τα πλαίσια αποτελούνται από μια επικεφαλίδα των 90 συμβόλων και ένα ωφέλιμο φορτίο ίσο με 64800 bits (ισοδύναμα 8100 bytes, αφού 1 byte αποτελείται από 8 bits) ή 16200 bits (ισοδύναμα 2025 bytes). Κατά τη διαδικασία της αποκωδικοποίησης στο δέκτη, ο αποκωδικοποιητής του DVB-S και του DVB-DSNG λαμβάνει αποφάσεις σε μπλοκ μόνο των 100 συμβόλων χωρίς επαναλήψεις. Στην περίπτωση όμως του DVB-S2, η απόφαση

λαμβάνεται ύστερα από ένα μεγάλο αριθμό επαναλήψεων (περίπου 50), ενώ ο κώδικας Reed-Solomon (RS) χρησιμοποιεί για το σκοπό αυτό μπλοκ μεγέθους περίπου 1600 bits με συντελεστή παρεμβολής 12. Τέλος, αναφορικά με το συντελεστή διαμόρφωσης roll-off, στο πρότυπο DVB-S χρησιμοποιείται η τιμή $\alpha=0.35$. Στο DVB-S2, εκτός από την τιμή αυτή, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν και άλλες τιμές, για $\alpha=0.25$ ή 0.20 . Κάτι τέτοιο επιτρέπει τον αυστηρότερο περιορισμό του σχήματος του εύρους ζώνης, αλλά και την επίτευξη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης.

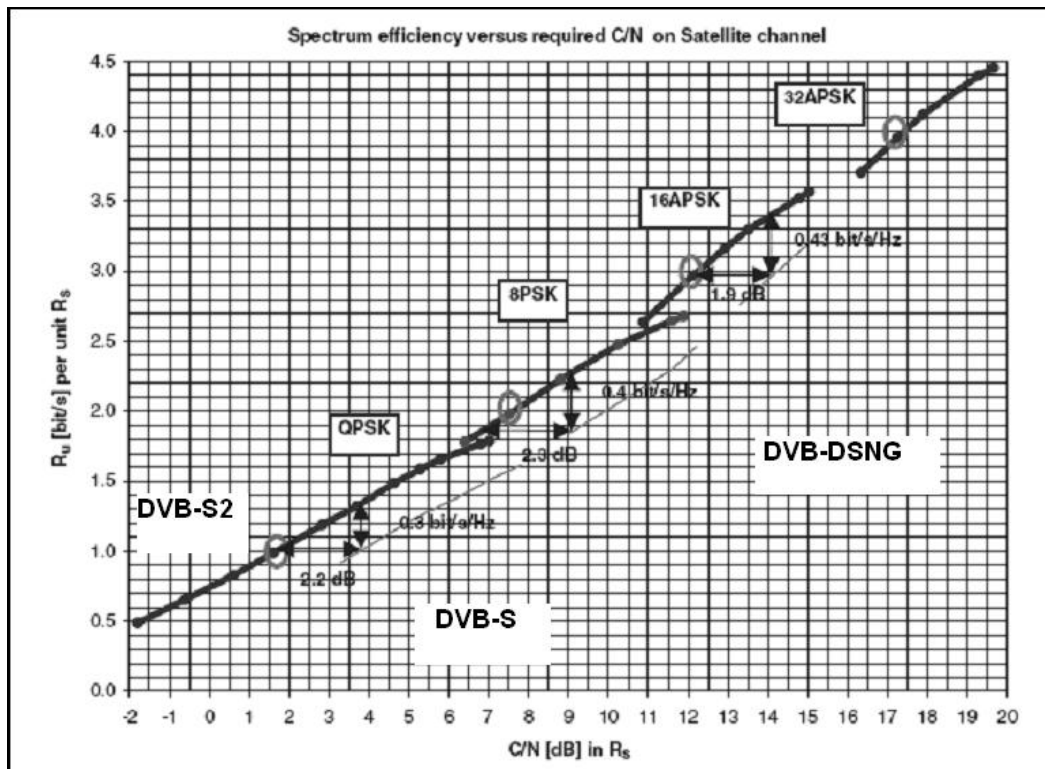
Στη συνέχεια γίνεται μια συγκριτική ανάλυση της απόδοσης του συστήματος DVB-S2 με το σύστημα DVB-S. Τα αποτελέσματα της επίδοσης των συστημάτων προέκυψαν από εξομοιώσεις υπολογιστή και αφορούν τον απαιτούμενο λόγο CNR σε σχέση με την φασματική απόδοση. Για τις προσομοιώσεις υποτέθηκε ιδανική αποδιαμόρφωση, κανάλι που επιβαρύνεται από προσθετικό λευκό θόρυβο Gauss (Additive White Gaussian Noise, AWGN) και ρυθμός εσφαλμένων πακέτων ίσος με 10^{-7} . Το Σχήμα 2.8 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των εξομοιώσεων. Ανάλογα με τον επιλεγμένο ρυθμό κωδικοποίησης και τον αστερισμό της διαμόρφωσης, το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει σε λόγους φέροντος προς θόρυβο από -2.4dB χρησιμοποιώντας QPSK 1/4, έως 16dB χρησιμοποιώντας 32QPSK 9/10. Αναφορικά με τη σύγκριση των δυο προτύπων, για AWGN το αποτέλεσμα της χρήσης DVB-S2 είναι τυπικά μια αύξηση χωρητικότητας κατά 20-35% σε σχέση με το DVB-S και το DVB-DSNG για τις ίδιες συνθήκες μετάδοσης. Εναλλακτικά, το κέρδος είναι 2.0-2.5dB ισχυρότερη λήψη για την ίδια φασματική απόδοση.



Σχήμα 2.8 - Απαιτούμενος λόγος CNR σε σχέση με τη φασματική απόδοση

Σημειώνεται ότι οι τιμές της απόδοσης για το σύστημα DVB-S2 απεικονίζονται στο σχήμα με τις συνεχείς μαύρες γραμμές και τους κύκλους, ενώ οι τιμές για το DVB-S και το DVB-DSNG με τα τετράγωνα.

Στη συνέχεια εξετάζεται η επίδοση του DVB-S2 σε σύγκριση με το DVB-S και το DVB-DSNG για μετάδοση από δορυφορικό κανάλι. Η μελέτη αφορά, όπως και πριν, τον απαιτούμενο CNR λόγο σε σχέση με τη φασματική απόδοση. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9, για δοσμένη φασματική απόδοση, το DVB-S2 επιτυγχάνει ένα κέρδος της τάξης των 2-2.5 dB σε σχέση με τα DVB-S και DVB-DSNG, επιβεβαιώνοντας τα αποτελέσματα για το AWGN. Ομοίως, για δοσμένο σηματοθορυβικό λόγο, το κέρδος που επιτυγχάνεται από το DVB-S2 ως προς τη χωρητικότητα είναι περίπου 0.3-0.4 bit/s/Hz. Σημειώνεται ότι οι καταστάσεις μετάδοσης που υποδεικνύονται στο διάγραμμα από τους κύκλους προσομοιώνονται πλήρως, ενώ οι υπόλοιπες περιπτώσεις έχουν υπολογιστεί με εκτιμήσεις. Συγκρινόμενες με τις προσομοιώσεις για AWGN, οι καμπύλες προσομοίωσης για μετάδοση σε δορυφορικό κανάλι για 16APSK και 32APSK είναι πιο ευθυγραμμισμένες με τις καμπύλες QPSK και 8PSK. Αυτό οφείλεται στον περιορισμό του πλάτους του μη γραμμικού ενισχυτή TWTA.



Σχήμα 2.9 - Παραδείγματα του R_u σε σχέση με τον απαιτούμενο CNR για δορυφόρο, σε διάταξη απλού φέροντος ανά αναμεταδότη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΝΘΥΛΑΚΩΣΗ ΠΑΚΕΤΩΝ IP ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ACM DVB-S2

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

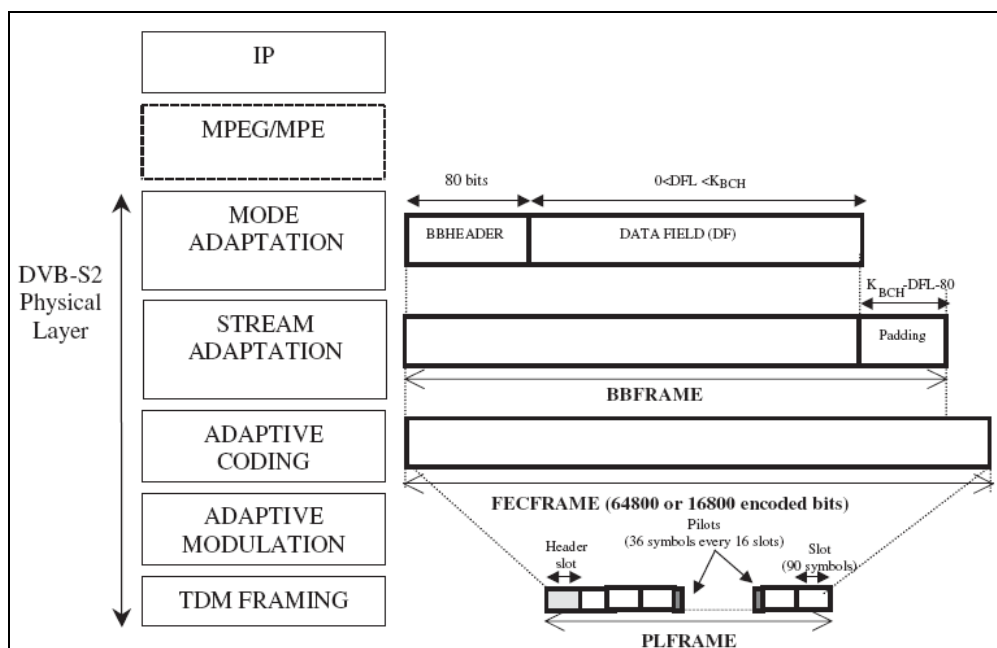
Στο προηγούμενο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε εκτενής περιγραφή του προτύπου δορυφορικής μετάδοσης DVB-S2, οπότε έγινε φανερή η σπουδαιότητα της χρήσης Προσαρμοστικής Κωδικοποίησης και Διαμόρφωσης (ACM) για την αποδοτική και ευέλικτη λειτουργία των αντίστοιχων συστημάτων. Επίσης, εξετάστηκε η αρχιτεκτονική μετάδοσης, η οποία στηρίζεται εν μέρει στην πολυπλεξία MPEG. Μια από τις σημαντικότερες εφαρμογές του συνδυασμού DVB και MPEG είναι η παροχή υπηρεσιών πρωτοκόλλου διαδικτύου (Internet Protocol, IP), ιδιαίτερα σε περιοχές με ελλιπή επίγεια υποδομή. Είναι, δηλαδή, δυνατή η μεταφορά πακέτων IP πάνω από DVB. Γενικά, το πρωτόκολλο IP έχει τη δυνατότητα να διασυνδέει πολλαπλά και ανομοιογενή δίκτυα με το διαδίκτυο. Επομένως, το δίκτυο DVB-S2 μπορεί να θεωρηθεί ένα ακόμη δίκτυο πρόσβασης, προσφέροντας προσαρμογή στο επίπεδο του φυσικού στρώματος.

Η διαδικασία με την οποία είναι εφικτή η μεταφορά πακέτων IP πάνω από DVB ονομάζεται ενθυλάκωση (encapsulation). Συγκεκριμένα, όταν ένα πακέτο IP εισέρχεται (εξέρχεται) σε (από) ένα συγκεκριμένο δίκτυο πρόσβασης, είναι δυνατόν να ενσωματωθεί σε ένα πακέτο τοπικού δικτύου. Έτσι, το πακέτο IP αυτό αποκτά μια επιπρόσθετη επικεφαλίδα (overhead) και έχει αποκλειστικά τοπική σημασία, με την έννοια ότι αναγνωρίζεται ως έγκυρο μόνο μέσα στο τοπικό αυτό δίκτυο. Το πακέτο του DVB-S2 ονομάζεται τότε BBFRAME (όταν αποτελείται από ψηφία πληροφορίας) ή FECFRAME (μετά την κωδικοποίηση).

3.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΝΘΥΛΑΚΩΣΗΣ

Μέσω της ενθυλάκωσης λοιπόν, τα συστήματα DVB αποκτούν τη δυνατότητα μετάδοσης πακέτων δεδομένων. Σε γενικές γραμμές, ακολουθείται μια διαστρωματωμένη

αρχιτεκτονική από το επίπεδο δικτύου (επίπεδο IP) ως το επίπεδο του φυσικού στρώματος (μεταδιδόμενο σήμα) σύμφωνα με το ακόλουθο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1 - Η αρχιτεκτονική διεπαφών του DVB-S2 που χρησιμοποιεί ACM

Το πολυπλεγμένο σήμα μεταφοράς MPEG-2 μεταφέρει δεδομένα από πρωτόκολλα υψηλότερου επιπέδου σε πακέτα Ρεύματος Μεταφοράς (Transport Stream, TS) συνολικού μήκους 188 bytes, εκ των οποίων 4 bytes καταλαμβάνονται από την αντίστοιχη επικεφαλίδα. Το ελάχιστο μήκος επικεφαλίδα χρησιμοποιείται για σκοπούς σηματοδότησης και δρομολόγησης. Αποτελείται από τον Ενδείκτη Πακέτου (Packet Identifier, PID) μήκους 13 bit και τον Ενδείκτη που προσδιορίζει την Αρχή του Ωφέλιμου Φορτίου (Payload Unit Start Indicator, PUSI) με μήκος 1 bit. Κάθε ενδείκτης PID προσδιορίζει ένα λογικό κανάλι, ενώ ο ενδείκτης PUSI επισημαίνει την αρχή του ωφέλιμου φορτίου επόμενου επιπέδου, η οποία βρίσκεται στο σημείο του πακέτου TS όπου το αντίστοιχο ψηφίο έχει τεθεί ίσο με 1. Στο MPEG-2, χρησιμοποιούνται βασικά τα ακόλουθα δυο πρωτόκολλα: το αποκαλούμενο Πακεταρισμένο Πρωταρχικό Ρεύμα (Packetized Elementary Stream, PES) για ήχο, βίντεο και βοηθητικά δεδομένα, και το πρωτόκολλο Πληροφορίας Υπηρεσιών - Συγκεκριμένης Πληροφορίας Προγράμματος (Service Information - Program Specific Information, SI-PSI) για τμήματα πινάκων (table sections). [Collini-Nocker & Fairhurst, 2003].

Τα πακέτα δεδομένων έχουν γενικά μεταβλητό μέγεθος, για παράδειγμα στο IPv4 (έκδοση 4) έχουν μέγεθος μέχρι 64 Kbytes, ενώ στο IPv6 ακόμα μεγαλύτερο. Επομένως, τα περισσότερα πακέτα IP απαιτούν τεμαχισμό (fragmentation), ενώ απαιτείται επίσης μια διαδικασία αλληλουχίας (concatenation), ώστε τελικά να επιτευχθεί αποδοτική ενθυλάκωση. Η ενθυλάκωση IP πάνω από MPEG πραγματοποιείται συνήθως μέσω της Ενθυλάκωσης Πολλαπλών Πρωτοκόλλων (Multi Protocol Encapsulation, MPE), η οποία επιτρέπει την αλληλουχία πακέτων IP. Από την άλλη πλευρά, το DVB-S2 επιτρέπει και την απευθείας ενθυλάκωση πακέτων IP χωρίς να παρεμβάλλεται το MPE. Σημειώνεται ότι σε αντίθεση με το πρότυπο DVB-S, η δεύτερη γενιά της προδιαγραφής υποστηρίζει διάφορα ρεύματα εισόδου. Έτσι, ενώ το DVB-S βασιζόταν μόνο σε ρεύματα μεταφοράς (Transport Stream, TS) MPEG, το DVB-S2 επιτρέπει και μια δεύτερη δυνατότητα, το αποκαλούμενο γενικό ρεύμα (Generic Stream) είτε πακεταρισμένο (με σταθερό μήκος πακέτων) είτε συνεχές (με μεταβλητό μήκος πακέτων). Όταν επιλέγεται αυτή η δεύτερη διάταξη, οι κανόνες του ρεύματος μεταφοράς MPEG δεν ισχύουν. Αντιθέτως, ως εναλλακτική για την ενθυλάκωση MPE είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά πρωτόκολλα ενθυλάκωσης με βελτιωμένη απόδοση.

Επομένως, οι δυο διαφορετικές προσεγγίσεις είναι:

- Ενθυλάκωση MPEG/MPE
- Μετάδοση βασισμένη σε πακέτα MPEG TS

Γενικά, η διαδικασία της ενθυλάκωσης απαιτεί τη διαίρεση του εισερχόμενου ρεύματος δεδομένων IP σε Μονάδες Δεδομένων Υποδικτύου (Sub Network Data Units, SNDU). Οι μεγάλες μονάδες SNDU πρέπει να τεμαχίζονται και να ενθυλακώνονται σε πολλαπλά πακέτα MPEG-2 TS, τα οποία ανήκουν στο ίδιο λογικό κανάλι TS. Συνήθως, το μέγεθος των SNDU είναι τέτοιο που δεν αντιστοιχεί σε έναν ακέραιο αριθμό από πακέτα TS. Επομένως, το τμήμα του ωφέλιμου φορτίου που δε χρησιμοποιείται μπορεί να αγνοηθεί στο δέκτη, αφού πρώτα έχουν προστεθεί σε αυτό bytes τα οποία δεν περιέχουν πληροφορία (padding bytes), ώσπου να συμπληρωθεί πλήρως το αντίστοιχο πακέτο. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται παραγέμισμα. Όπως είναι φανερό, κάτι τέτοιο μειώνει σημαντικά την απόδοση της ενθυλάκωσης.

Εναλλακτικά, είναι δυνατή η χρήση της διαδικασίας αλληλουχίας (concatenation) των SNDU ώστε να αποφεύγεται το παραγέμισμα. Κατά τη διαδικασία του concatenation, στο σημείο εντός του πακέτου TS όπου τελειώνει μια μονάδα SNDU, ξεκινάει η επόμενη SNDU. Συγκεκριμένα, αν υπάρχει διαθέσιμη μια ακόμη SNDU, η συσκευή ενθυλάκωσης (encapsulator) τη χρησιμοποιεί για να συμπληρώσει τον κενό χώρο στο ωφέλιμο φορτίο

του πακέτου TS. Επίσης, ο encapsulator θέτει τον ενδείκτη PUSI του πρώτου πακέτου TS στο ένα. Με τον τρόπο αυτό το ψηφίο PUSI χρησιμοποιείται ως ένδειξη της αρχής μιας νέας SNDU, η οποία είναι δυνατόν να αναγνωρισθεί από το δέκτη αθροίζοντας το μήκος των προηγούμενων SNDU. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει διαθέσιμη κάποια άλλη μονάδα SNDU, ο υπόλοιπος χώρος στο ωφέλιμο φορτίο του πακέτου TS συμπληρώνεται με μη χρήσιμα δεδομένα, δηλαδή χρησιμοποιείται και εδώ η τεχνική του padding. Στην ακόλουθη ενότητα πραγματοποιείται εκτενέστερη ανάλυση της ενθυλάκωσης MPE.

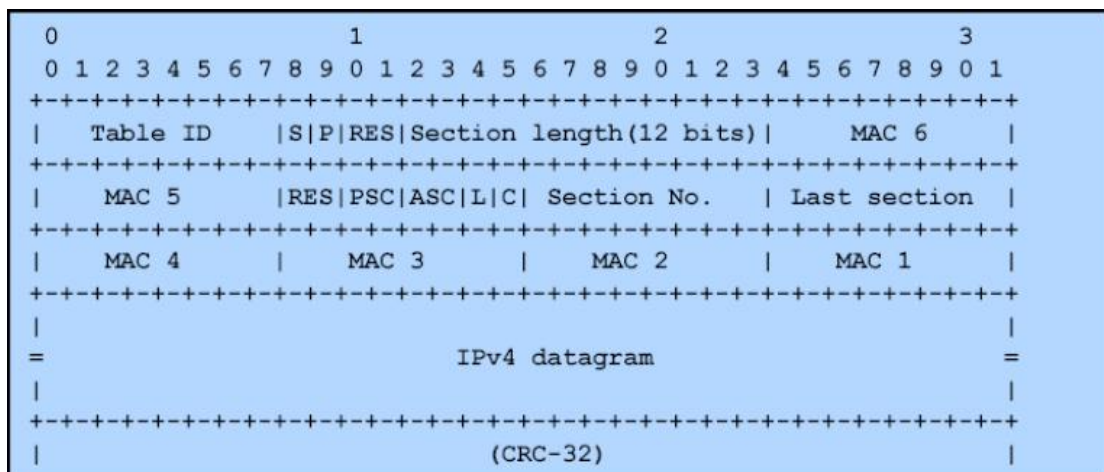
3.3 Η ΕΝΘΥΛΑΚΩΣΗ MPE

Η Ενθυλάκωση Πολλαπλών Πρωτοκόλλων (Multi Protocol Encapsulation, MPE), που προτάθηκε το 1996, αποτελεί σήμερα το καθιερωμένο πρότυπο για τη μεταφορά IP πάνω από MPEG. Μέσω αυτής, τα συστήματα DVB αποκτούν τη δυνατότητα μετάδοσης πακέτων δεδομένων πάνω από ρεύματα μεταφοράς MPEG, αυξάνοντας έτσι την ποικιλία των υπηρεσιών που μπορούν να παρέχουν.

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, κατά τη διαδικασία της ενθυλάκωσης πραγματοποιείται χωρισμός του ρεύματος IP σε μονάδες SNDU. Η επικεφαλίδα μιας τέτοιας μονάδας περιλαμβάνει 2 bytes για το πεδίο μήκους (length field), 2 για το πεδίο που καθορίζει τον τύπο (type field) και 4 για το πεδίο CRC. Κάθε SNDU ενθυλακώνεται σε μια ακολουθία από πακέτα ρεύματος μεταφοράς MPEG, τα οποία ανήκουν στο ίδιο λογικό κανάλι TS. Το πακέτο TS αποτελείται από το ωφέλιμο φορτίο μήκους 184 bytes και μια επικεφαλίδα MPEG-2 μήκους 4 bytes [Castro et al., 2004]. Στην επικεφαλίδα MPEG περιέχεται ένας Ενδείκτης Πακέτου (PID) μήκους 13 bits, προκειμένου να προσδιορίζεται μοναδικά το κάθε κανάλι TS. Στην περίπτωση χρήσης της μεθόδου αλληλουχίας, ο encapsulator θα πρέπει να συμπληρώνει τον κενό χώρο στο ωφέλιμο φορτίο του πακέτου TS με μια άλλη SNDU, αν υπάρχει κάποια διαθέσιμη. Για να επισημανθεί η θέση της αρχής ενός τμήματος, χρησιμοποιείται ο ενδείκτης PUSI. Έτσι, σε κάθε πακέτο TS όπου το αντίστοιχο ψηφίο PUSI είναι ενεργό εισάγεται ένα πεδίο Δείκτη (Pointer field) μήκους 1 byte. Αυτό καθορίζει την απόσταση (offset) από την αρχή του αντίστοιχου πακέτου της SNDU, δηλαδή ουσιαστικά επισημαίνει τη θέση του πρώτου byte της SNDU μέσα στο ωφέλιμο φορτίο του πακέτου TS [Collini-Nocker & Fairhurst, 2003]. Το πακέτο TS στο οποίο περιλαμβάνεται το τελευταίο byte της SNDU πρέπει να μεταφέρει ένα πεδίο

προσαρμογής των 4 bytes και τα δυο ψηφία του Πεδίου Ελέγχου Προσαρμογής (Adaptation Field Control, AFC) στην επικεφαλίδα MPEG πρέπει επομένως να τεθούν ίσα με τη μονάδα. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει κάποια διαθέσιμη SNDU, ο υπόλοιπος χώρος στο ωφέλιμο φορτίο του πακέτου TS πρέπει να συμπληρωθεί με padding bits.

Στο Σχήμα 3.2 που ακολουθεί απεικονίζεται η επικεφαλίδα MPE για το πρωτόκολλο IPv4, χωρίς όμως να εμφανίζεται το πεδίο Δείκτη. Στην επικεφαλίδα περιλαμβάνεται ένα πεδίο μήκους και υποχρεωτικά η διεύθυνση MAC (Medium Access Control) του προορισμού, ώστε να εξασφαλιστεί ταυτοποίηση της διεύθυνσης (addressing) των πακέτων και φιλτράρισμα στο δέκτη. Σημειώνεται ότι η διεύθυνση MAC αναφέρεται σε ένα υπόστρωμα του στρώματος ζεύξης δεδομένων. Αυτό ονομάζεται Υπόστρωμα Ελέγχου Προσπέλασης στο Μέσο Μετάδοσης και ουσιαστικά αποτελεί ένα σύνολο πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται για να καθορισθεί η σειρά χρήσης ενός διαύλου πολλαπλής προσπέλασης.



Σχήμα 3.2 – Επικεφαλίδα MPE

Ο αριθμός πεδίων της επικεφαλίδας είναι επίσης ένας παράγοντας προσδιορισμού των διαδικασιών και του κώδικα που απαιτείται για την επανασυναρμολόγηση (reassembly) ενός συγκεκριμένου πακέτου στην πλευρά του δέκτη. Η επικεφαλίδα MPE διαθέτει 18 πεδία και περισσότερα στην περίπτωση που χρησιμοποιείται LLC/SNAP. Το πρωτόκολλο Ελέγχου Λογικής Ζεύξης (Logical Link Control, LLC) είναι ένα επιπρόσθετο πρωτόκολλο επιπέδου ζεύξης δεδομένων (data link), το οποίο λειτουργεί πάνω από το πρωτόκολλο MAC. Στην περίπτωση που το LLC μεταφέρει πακέτα IP, προστίθεται και μια επικεφαλίδα Πρωτοκόλλου Πρόσβασης Υποδικτύου (Sub Network Access Protocol, SNAP). Γενικά, οι

επικεφαλίδες LLC/SNAP χρησιμοποιούνται με σκοπό την πολυπλεξία διαφόρων πρωτοκόλλων στο επίπεδο ζεύξης. Στην περίπτωση της ενθυλάκωσης MPE, μια επιπρόσθετη επικεφαλίδα LLC/SNAP υιοθετείται προαιρετικά με σκοπό τη διάκριση του τύπου της εκάστοτε SNDU. Ακόμη, στην επικεφαλίδα MPE χρησιμοποιείται ένα πεδίο Μήκους Τμήματος (Section Length), που έχει μέγεθος 12 bit, επομένως περιορίζει το μέγιστο μήκος του τμήματος στα 4Kbytes (2^{12}). Θεωρητικά και σύμφωνα με το πρότυπο MPEG-2, η ενθυλάκωση MPE θα μπορούσε να υποστηρίξει μονάδες SNDU αυθαίρετου μήκους, διασκορπισμένες σε μεγάλο αριθμό τμημάτων. Κάτι τέτοιο θα ήταν δυνατό επισημαίνοντας εκείνα που ανήκουν σε μια SNDU με βάση τον αριθμό Τμήματος (Section No.) και το πεδίο Τελευταίου Τμήματος (Last Section). Εντούτοις, κάτι τέτοιο δεν υλοποιείται ευρέως [Collini-Nocker & Fairhurst, 2003].

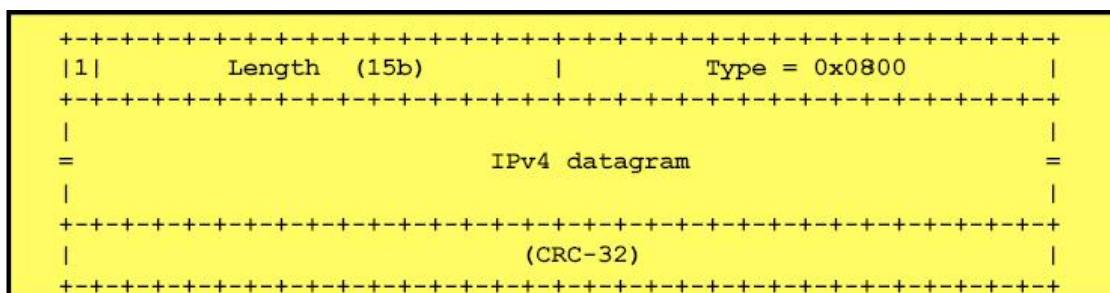
3.4 Η ΕΝΘΥΛΑΚΩΣΗ ULE

Ο τελικός στόχος κάθε είδους ενθυλάκωσης πακέτων IP πάνω από μια ζεύξη DVB είναι η επίτευξη υψηλής απόδοσης αναφορικά με τη χρησιμοποιούμενη επικεφαλίδα και τη διαδικασία επεξεργασίας της, αλλά και με το πόσο ευέλικτα υποστηρίζονται τα πρωτόκολλα ανώτερων στρωμάτων. Στην περίπτωση όμως της ενθυλάκωσης MPE, η επικεφαλίδα που χρησιμοποιείται αποτελείται από μεγάλο αριθμό byte, ενώ πολλά από τα πεδία της είτε χρησιμοποιούνται προαιρετικά είτε δεν έχουν σαφή ρόλο. Επίσης, σε πολλές περιπτώσεις είναι αναγκαία η ύπαρξη σημαντικής επιπρόσθετης επιβάρυνσης στην επικεφαλίδα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η προσθήκη του πεδίου LLC/SNAP και μιας επικεφαλίδας, της οποίας ο ρόλος είναι να καθιστά δυνατή τη λειτουργία μιας γέφυρας (bridge) σε ένα δίκτυο DVB με δομή πλέγματος. Ακόμη, παρά την προσεκτική σχεδίασή της, η ενθυλάκωση MPE δεν ταιριάζει απόλυτα σε δίκτυα δεδομένων IP, ιδιαίτερα στην περίπτωση εκπομπής IP προς πολλαπλά σημεία (multicasting), ενώ για να γίνει δυνατή η υποστήριξη του πρωτοκόλλου IPv6 απαιτείται επιπρόσθετη επεξεργασία της επικεφαλίδας.

Προκειμένου να ξεπεραστούν τα προαναφερθέντα μειονεκτήματα της ενθυλάκωσης MPE, ξεκίνησαν εργασίες από την IETF (Internet Engineering Task Force) με σκοπό τη δημιουργία μιας λιγότερο απαιτητικής διαδικασίας ενθυλάκωσης. Έτσι, προέκυψε η αντίστοιχη ομάδα εργασίας IETF ipdnb, η οποία προτείνει τη χρήση μιας νέας,

“ελαφρύτερης” ενθυλάκωσης, που ονομάζεται Εξαιρετικά Ελαφριά Ενθυλάκωση (Ultra Light Encapsulation, ULE). Η ULE παρουσιάζει ακόμα μεγαλύτερη ευελιξία σε σχέση με την MPE, ενώ κάποιες πρώτες δοκιμές έδειξαν ότι επιτυγχάνει τουλάχιστον ίδιες επιδόσεις με αυτή. Ταυτόχρονα, αποτελεί την ενδεδειγμένη λύση για μεταφορά πακέτων IP multicasting, αλλά και πακέτων IPv6 [Collini-Nocker & Fairhurst, 2003].

Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα της ULE είναι το μικρότερο μήκος της ελάχιστης δυνατής επικεφαλίδας (βλ. Σχήμα 3.3) μέσω της χρήσης μικρότερου αριθμού πεδίων. Το γεγονός αυτό βελτιώνει σημαντικά την απόδοση επεξεργασίας από λογισμικό. Όπως φαίνεται, υπάρχει μια διαφορά 8 bytes ανά SNDU ανάμεσα στην ελάχιστη επικεφαλίδα MPE (12 bytes) σε σχέση με την ελάχιστη επικεφαλίδα ULE (4 bytes). Η διαφορά αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική στην περίπτωση SNDU μικρού μεγέθους, όπως για παράδειγμα τα πακέτα επιβεβαίωσης ACK (acknowledgments) που χρησιμοποιούνται από το TCP. Στην ULE έχει αποφευχθεί η υποχρεωτική παρουσία μιας διεύθυνσης ζεύξης προορισμού (MAC), η οποία χρησιμοποιείται στην MPE, προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση εκπομπής του IP προς πολλαπλούς χρήστες και προς ένα μοναδικό χρήστη. Έτσι, όταν απαιτείται προσδιορισμός της διεύθυνσης (addressing) στο δέκτη, η ULE εισάγει μια πρόσθετη διεύθυνση για το Σημείο Σύνδεσης του Δικτύου (Network Point of Attachment, NPA) μήκους 6 bytes. Η παρουσία του πεδίου αυτού επισημαίνεται από το ψηφίο D (D-bit), το πρώτο ψηφίο στην επικεφαλίδα ULE. Τελικά, το πλήθος των πεδίων επικεφαλίδας κατά την ενθυλάκωση ULE μειώνεται, από 18 στην MPE, σε 3 (ή 4 όταν υπάρχει η διεύθυνση NPA).

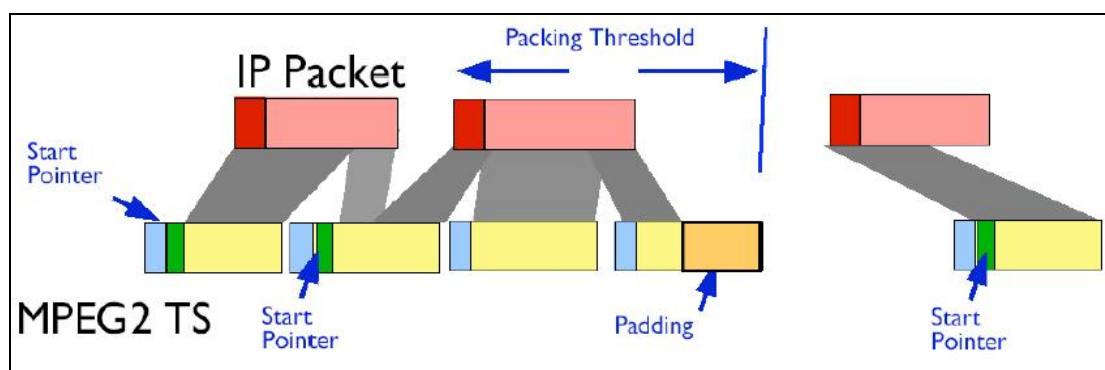


Σχήμα 3.3 – Ελάχιστη επικεφαλίδα ULE

Όπως ήδη αναφέρθηκε, ο τύπος της SNDU στην MPE προσδιορίζεται από την επιπρόσθετη επικεφαλίδα LLC/SNAP. Αντίστοιχα, στην περίπτωση της ULE για το σκοπό αυτό διατίθεται ένα πεδίο Τύπου (Type field). Το πεδίο Τύπου είναι ανάλογο με το πεδίο Επόμενης Κεφαλίδας (Next Header) του IPv6 και μέσω αυτού επιτυγχάνεται η αλληλουχία

των επικεφαλίδων. Σημειώνεται ότι το πεδίο Next Header του IPv6 καθορίζει το πρωτόκολλο στο οποίο θα παραδοθούν τα περιεχόμενα ενός συγκεκριμένου δεδομενογράμματος (IP datagram). Προκειμένου να επιτραπεί η χρήση επιπλέον υπηρεσιών όπως η κρυπτογράφηση, η τεχνική FEC κτλ., έχουν προταθεί διάφορες επικεφαλίδες επέκτασης (extension headers).

Κατά αναλογία με το πεδίο Μήκους Τμήματος της MPE, η ULE εισάγει ένα πεδίο Μήκους (Length field). Με βάση το πεδίο αυτό, ο δέκτης είναι σε θέση να αναγνωρίσει το μέγεθος κάθε μονάδος, άρα και να παραλείψει κάποια SNDU. Εφόσον το πεδίο Length αποτελείται από 15 ψηφία, το μέγεθος των SNDU περιορίζεται στα 32Kbytes (2^{15}), σε αντίθεση με τα 4Kbytes της MPE. Το μεγάλο μέγεθος ορισμένων SNDU επιτάσσει και εδώ τον τεμαχισμό τους σε πακέτα TS. Στην περίπτωση μερικής συμπλήρωσης ενός πακέτου, αυτό παραγεμίζεται κατά τα γνωστά. Όπως και στην MPE, η ULE υποστηρίζει την πλαισίωση με βάση το πεδίο Δείκτη Αρχής (Start Pointer). Σε αντίθεση όμως με την MPE, η ULE περιγράφει ρητά τη διαδικασία πλαισίωσης και εξετάζει τη χρήση ενός Κατωφλίου Λήξης της Χρονικής διάρκειας πακεταρίσματος (Packing Threshold time-out), το οποίο τίθεται σε ισχύ όταν ο encapsulator δεν έχει άλλες SNDU προς επεξεργασία. Μια συσκευή ενθυλάκωσης ULE που δε λαμβάνει δεδομένα για ένα χρονικό διάστημα μέχρι τη λήξη της μέγιστης χρονικής διάρκειας (time-out), συμπληρώνει το υπόλοιπο τμήμα του πακέτου TS με bytes παραγεμίσματος, εξασφαλίζοντας έτσι την έγκαιρη μετάδοση [Collini-Nocker & Fairhurst, 2003].



Σχήμα 3.4 – ULE με και χωρίς πακετάρισμα

3.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΝΘΥΛΑΚΩΣΕΩΝ MPE ΚΑΙ ULE

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι διαφορές ανάμεσα στα δυο είδη ενθυλάκωσης, MPE και ULE, και επιχειρείται σύγκριση μεταξύ τους. Οι βασικότερες διαφορές ανάμεσα στα δυο είδη ενθυλάκωσης εντοπίζονται στη δομή της επικεφαλίδας που υιοθετείται από την κάθε μια. Στην περίπτωση της MPE η αντίστοιχη επικεφαλίδα περιλαμβάνει τουλάχιστον 18 πεδία. Σε αυτά συμπεριλαμβάνεται υποχρεωτικά η διεύθυνση MAC του προορισμού, ώστε να πραγματοποιηθεί ταυτοποίηση της διεύθυνσης στο δέκτη, καθώς και ένα πεδίο που δείχνει το μήκος (Length field). Προαιρετικά, ενσωματώνεται μια επιπρόσθετη επικεφαλίδα LLC/SNAP με σκοπό τη διάκριση του τύπου της SNDU, αυξάνοντας έτσι τον αριθμό των πεδίων. Γενικά, η επικεφαλίδα κατά την ενθυλάκωση MPE αποτελείται από μεγάλο αριθμό bytes, ενώ η σχεδίαση των αντίστοιχων πεδίων δεν είναι ιδιαίτερα εύχρηστη. Αποτέλεσμα όλων αυτών είναι η επιπρόσθετη επιβάρυνση με μεγάλο αριθμό μη χρήσιμων ψηφίων και τελικά η μείωση της ευελιξίας του συστήματος.

Αντίθετα με την MPE, η ενθυλάκωση ULE χρησιμοποιεί επικεφαλίδες με σημαντικά μικρότερο μέγεθος και πολύ λιγότερα πεδία. Συγκεκριμένα, υπάρχει μια διαφορά 8 bytes ανά SNDU ανάμεσα στην ελάχιστη επικεφαλίδα MPE (12 bytes) και την ελάχιστη επικεφαλίδα ULE (4 bytes). Η διαφορά αυτή προκαλεί σημαντική μείωση της απόδοσης της MPE σε σχέση με την ULE, ειδικά στην περίπτωση χρήσης μικρών SNDU. Αναφορικά με τον τρόπο διάκρισης της εκάστοτε μονάδας SNDU, στην ενθυλάκωση ULE υπάρχει για το σκοπό αυτό ένα πεδίο τύπου (Type field). Ένα άλλο σημαντικό πεδίο της επικεφαλίδας ULE είναι το πεδίο Μήκους (Length field) που αποτελείται από 15 bits, περιορίζοντας έτσι το μέγιστο μήκος των SNDU στα 32Kbytes. Ένα αντίστοιχο πεδίο υπάρχει και στην MPE. Ονομάζεται πεδίο Μήκους Τμήματος (Section Length) και έχει μέγεθος 12 bits, επομένως το μέγιστο μήκος του τμήματος περιορίζεται στα 4Kbytes.

Με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης μετάδοσης στην ULE έχει καταργηθεί το υποχρεωτικό πεδίο με τη διεύθυνσης ζεύξης προορισμού (MAC) που υπάρχει στην MPE. Όταν απαιτείται ρητά ο προσδιορισμός της διεύθυνσης του δέκτη, χρησιμοποιείται ένα επιπλέον πεδίο μήκους 6 bytes. Το πεδίο αυτό περιέχει τη διεύθυνση για το Σημείο Σύνδεσης του Δικτύου (Network Point of Attachment, NPA). Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται το πρώτο ψηφίο της επικεφαλίδας ULE, που ονομάζεται D-ψηφίο (D-bit), για να επισημανθεί η παρουσία ή απουσία του συγκεκριμένου πεδίου. Τελικά, η ULE αποτελεί την ενδεδειγμένη λύση για μεταφορά πακέτων IP multicasting, αλλά και πακέτων πρωτοκόλλου διαδικτύου IPv6.

Όπως έχει αναφερθεί, κατά τη διαδικασία της ενθυλάκωσης είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί από τις συσκευές ενθυλάκωσης τόσο ο μηχανισμός προσθήκης ψηφίων (padding) όσο και ο μηχανισμός της αλληλουχίας (concatenation). Στην περίπτωση της ενθυλάκωσης MPE είναι δυνατή η χρήση concatenation, αλλά ο προεπιλεγμένος (default) μηχανισμός είναι αυτός του padding. Αντίθετα, στην ULE είναι δεσμευτική η υποστήριξη και του padding, αλλά και της concatenation από τους δέκτες. Ταυτόχρονα, η ULE είναι δυνατόν να χρησιμοποιεί ένα Κατώφλι Λήξης της Χρονικής διάρκειας πακεταρίσματος (Packing Threshold time-out). Με βάση το κατώφλι αυτό, η συσκευή ενθυλάκωσης που δε λαμβάνει δεδομένα εισόδου προς μετάδοση για χρονική διάρκεια ίση με το time-out θα συμπληρώνει το υπόλοιπο τμήμα του πακέτου TS με bytes παραγεμίσματος. Το γεγονός αυτό εξασφαλίζει έγκαιρη μετάδοση. Τελικά, οι διαφοροποιήσεις της ULE οδηγούν σε μεγαλύτερη ευελιξία του συστήματος και υψηλότερη διαπερατότητα (throughput).

3.6 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΕΝΘΥΛΑΚΩΣΗΣ

Προκειμένου να υπολογιστεί η απόδοση ενθυλάκωσης των πακέτων IP, προτείνεται μια μέθοδος με βάση την αντίστοιχη διαστρωματωμένη αρχιτεκτονική που παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα. Συγκεκριμένα, η απόδοση ενθυλάκωσης για το επίπεδο i υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση

$$\psi_i(\eta, L) = \frac{\text{ψηφία ωφέλιμου φορτίου (επίπεδο } i)}{\text{συνολικά ψηφία που μεταδίδονται (επίπεδο } i)} \quad (3.1)$$

Προφανώς η απόδοση είναι διαφορετική για το κάθε στρώμα, ενώ η τελική τιμή της εξαρτάται από τη φασματική απόδοση η και το μήκος L των πακέτων IP σε κάθε επίπεδο ξεχωριστά. Σημειώνεται ότι το πακέτο προς ενθυλάκωση στο i -οστό επίπεδο είναι εκείνο που παραδίδεται από το επίπεδο $(i-1)$.

Με βάση τη διαστρωματωμένη αρχιτεκτονική είναι δυνατή η διάκριση της διαδικασίας ανάμεσα στην ενθυλάκωση που λαμβάνει χώρα έξω από το υποσύστημα DVB-S2 και την ενθυλάκωση που πραγματοποιείται μέσα σε αυτό, επομένως η συνολική απόδοση εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση

$$\psi_{\text{tot}}(\eta_{\text{COD}}, \eta_{\text{MOD}}, L_{\text{IP}}, L) = \psi_{\text{MPEG}}(L_{\text{IP}}) \cdot \psi_{\text{DVB-S2}}(\eta_{\text{COD}}, \eta_{\text{MOD}}, L) \quad (3.2)$$

Στην παραπάνω σχέση η_{COD} είναι ο ρυθμός κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται από τον εσωτερικό κωδικοποιητή LDPC, ενώ η_{MOD} είναι η φασματική απόδοση που επιτυγχάνεται από τη συγκεκριμένη διαμόρφωση, δηλαδή ο αριθμός των bits που μεταφέρει κάθε μεταδιδόμενο σύμβολο, που επιτυγχάνεται από τις δυνατές διαμορφώσεις που καθορίζονται για το DVB-S2 (βλ. Κεφάλαιο 2). Επίσης, η ενθυλάκωση MPEG εξαρτάται από το μήκος του πακέτου IP (L_{IP}), ενώ η απόδοση DVB-S2 εξαρτάται γενικά από το μέγεθος του πακέτου (L) που εισέρχεται στο υποσύστημα ACM DVB-S2. Στην περίπτωση που τα πακέτα IP ενθυλακώνονται απευθείας στο DVB-S2, δηλαδή δεν παρεμβάλλεται το πρωτόκολλο MPEG/MPE, ισχύει $L_{IP} = L$ και η απόδοση της ενθυλάκωσης MPEG ισούται με τη μονάδα.

Η διαδικασία της ενθυλάκωσης που πραγματοποιείται μέσα στο υποσύστημα DVB-S2 υλοποιείται σε δυο διαφορετικά στάδια. Επομένως, η αντίστοιχη απόδοση μπορεί να εκφρασθεί από την ακόλουθη σχέση

$$\boxed{\psi_{DVB-S2}(\eta_{COD}, \eta_{MOD}, L) = \psi_{MS}(\eta_{COD}, L) \cdot \psi_{frag}(\eta_{MOD})} \quad (3.3)$$

Το πρώτο στάδιο λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της Προσαρμογής Ροής Εισόδου (Mode and Stream Adaptation). Το ρεύμα εισόδου προσαρμόζεται στο μπλοκ εισόδου του κωδικοποιητή, επομένως η απόδοση εξαρτάται από το χρησιμοποιούμενο ρυθμό κωδικοποίησης, δηλαδή είναι $\psi_{MS} = \psi_{MS}(\eta_{COD}, L)$. Το δεύτερο στάδιο πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια της πλαισίωσης και στην περίπτωση αυτή η απόδοση εξαρτάται μόνο από τη διαμόρφωση που υιοθετείται, δηλαδή είναι συνάρτηση της φασματικής απόδοσης και ισχύει $\psi_{frag} = \psi_{frag}(\eta_{MOD})$. Η απόδοση στο στάδιο αυτό εξαρτάται μόνο από τη διαμόρφωση, καθώς το πλαίσιο FECFRAME αποτελείται ήδη από κωδικοποιημένα ψηφία και άρα είναι ανεξάρτητο από το ρυθμό κωδικοποίησης. Επίσης, η απόδοση πλαισίωσης δεν εξαρτάται ούτε από το μήκος πακέτου, εφόσον η επικεφαλίδα που εισάγεται κατά τη διαδικασία της πλαισίωσης (με πιλοτικά σύμβολα, πληροφορία σηματοδότησης κτλ) εξαρτάται μόνο από τα διαμορφωμένα σύμβολα, τα οποία παράγονται ανάλογα με τη διαμόρφωση των κωδικοποιημένων ψηφίων. Επομένως η απόδοση πλαισίωσης υπολογίζεται απλά ως ο λόγος των συμβόλων πληροφορίας προς τα συνολικά σύμβολα που μεταδίδονται [Castro et al., 2004].

Με βάση τις δυο προηγούμενες σχέσεις, δηλαδή θεωρώντας διάκριση σε τρία στρώματα ενθυλάκωσης (ένα σε περίπτωση εφαρμογής MPEG και δύο εντός του ίδιου του DVB-S2), η συνολική απόδοση μπορεί να γραφεί ως γινόμενο τριών παραγόντων:

$$\boxed{\psi_{tot}(\eta_{COD}, \eta_{MOD}, L_{IP}, L) = \psi_{MPEG}(L_{IP}) \cdot \psi_{MS}(\eta_{COD}, L) \cdot \psi_{frag}(L, \eta_{MOD})} \quad (3.4)$$

Στη συνέχεια εξετάζεται η απόδοση των τριών στρωμάτων ξεχωριστά.

3.6.1 Απόδοση ενθυλάκωσης MPEG (MPEG Encapsulation efficiency)

Η ενθυλάκωση MPEG είναι μια από τις δυνατές μορφές ενθυλάκωσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η απόδοση $\psi_{MPEG}(L_{IP})$ ισούται με τη μονάδα στην περίπτωση που τα πακέτα IP ενθυλακώνονται απευθείας στο DVB-S2. Η ενθυλάκωση IP πάνω από MPEG πραγματοποιείται μέσω της ενθυλάκωσης MPE, η οποία επιτρέπει την αλληλουχία πακέτων IP. Για τη μεταφορά δεδομένων πάνω από ρεύματα μεταφοράς MPEG σε δίκτυα DVB, η MPE παρέχει ένα μηχανισμό που χρησιμοποιεί το επίπεδο ελέγχου (control plane) του MPEG-2, το οποίο βασίζεται στο DSM-CC [Rinaldo et al., 2004]. Το DSM-CC (Digital Storage Media Command and Control) αποτελεί ένα ειδικό πρωτόκολλο για τη δημιουργία καναλιών ελέγχου που αφορούν τα ρεύματα δεδομένων MPEG-2. Χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της λήψης κινούμενης εικόνας, υιοθετώντας το μοντέλο πελάτη/εξυπηρετητή (client/server). Υπενθυμίζεται ότι εναλλακτικά υπάρχει διαθέσιμο το νέο πρότυπο ULE προκειμένου για αποδοτικότερη ενθυλάκωση, τα τμήματα του οποίου περιγράφηκαν αναλυτικά στην προηγούμενη ενότητα. Η ULE χαρακτηρίζεται ως ελαφριά υπό την έννοια της δέσμευσης λιγότερων πόρων του συστήματος και είναι πιο ευέλικτη σε σχέση με την MPE. Μετρήσεις που έγιναν αποδεικνύουν ότι το νέο είδος ενθυλάκωσης μπορεί να προσφέρει αυξημένη απόδοση και επομένως καλύτερη διέλευση (throughput) του συστήματος.

Όπως είναι φανερό από τα προηγούμενα, η απόδοση ενθυλάκωσης MPEG, άρα και η συνολική απόδοση ενθυλάκωσης, αποτελεί συνάρτηση του μήκους L_{IP} των πακέτων IP. Επομένως, για το υπολογισμό της μέσης απόδοσης απαιτείται η θεώρηση όλων των πιθανών τιμών που μπορεί να λάβει το μήκος του πακέτου IP, από την ελάχιστη τιμή του L_{min} , μέχρι τη μέγιστη L_{max} . Επίσης, είναι απαραίτητη η γνώση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας $p(L)$ του μεγέθους του πακέτου. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, προκύπτει τελικά ότι η μέση απόδοση ενθυλάκωσης MPEG είναι ίση με:

$$\bar{\psi}_{MPEG} = \sum_{L_{\min}}^{L_{\max}} \psi_{MPEG}(L_{IP}) p(L_{IP}) \quad (3.5)$$

Λαμβάνοντας υπόψη και το γεγονός ότι η απόδοση πλαισίωσης δεν εξαρτάται από το μήκος των πακέτων IP, προκύπτει η μέση τιμή της ολικής απόδοσης:

$$\bar{\psi}_{tot}(\eta_{COD}, \eta_{MOD}) = \psi_{frag}(\eta_{MOD}) \cdot \sum_{L_{\min}}^{L_{\max}} \psi_{MS}(\eta_{COD}, L) p(L) \cdot \sum_{L_{\min}}^{L_{\max}} \psi_{MPEG}(L_{IP}) p(L_{IP}) \quad (3.6)$$

Στην παραπάνω σχέση τα L_{\min} και L_{\max} της απόδοσης ψ_{MS} αφορούν την ελάχιστη και μέγιστη τιμή αντίστοιχα των πακέτων εισόδου στο στάδιο αυτό.

3.6.2 Απόδοση ενθυλάκωσης της προσαρμογής ροής εισόδου (Mode & Stream Encapsulation efficiency)

Η ποσότητα $\psi_{MS}(\eta_{COD}, L)$ περιλαμβάνει την απόδοση ενθυλάκωσης τόσο της προσαρμογής λειτουργίας (mode adaptation) όσο και της προσαρμογής ροής (stream adaptation). Το πεδίο δεδομένων (data field) αποτελείται από DFL (Data Field Length) bits, όπου ισχύει $K_{BCH} - 80 \geq DFL \geq 0$. Με K_{BCH} συμβολίζεται το μήκος του μπλοκ στην είσοδο του εξωτερικού μπλοκ κωδικοποιητή BCH. Το μήκος αυτό εξαρτάται από το μήκος του FECFRAME (κανονικό ή σύντομο πλαίσιο) και από το ρυθμό κωδικοποίησης, ενώ τα 80 bits αφορούν το μήκος της επικεφαλίδας BBHEADER που προστίθεται. Εδώ, προκύπτει επομένως μια μικρή απώλεια αποδοτικότητας εξαιτίας της επικεφαλίδας, η οποία καταλαμβάνει 80 από τα συνολικά K_{BCH} bits (βλ. Σχήμα 3.1).

Επίσης, η ποσότητα $\psi_{MS}(\eta_{COD}, L)$ περιλαμβάνει την απώλεια εξαιτίας του πεδίου παραγεμίσματος (padding field). Συχνά, το πεδίο δεδομένων δεν είναι πλήρες και για να συμπληρωθεί ο σταθερός αριθμός των K_{BCH} bits του BBFRAME, είναι απαραίτητη η προσθήκη ψηφίων παραγεμίσματος. Αυτό συμβαίνει και στις περιπτώσεις όπου τα διαθέσιμα δεδομένα χρήστη δεν είναι αρκετά για την συμπλήρωση του BBFRAME. Τότε δημιουργούνται και μεταδίδονται πλαστά πλαίσια (dummy frames). Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται πολυπλεξία πακέτων από διαφορετικούς χρήστες στο ίδιο πεδίο δεδομένων, η απώλεια εξαρτάται από το ποσοστό συμπλήρωσης του πακέτου με καθαρά

ωφέλιμο φορτίο. Στην περίπτωση όμως που ενθυλακώνεται ένα και μόνο πακέτο, η προαναφερθείσα απώλεια εξαρτάται από το μήκος του πακέτου εισόδου. Το μήκος του πακέτου εισόδου ισούται με $L=(\text{μήκος πακέτου IP})$ για απευθείας ενθυλάκωση πακέτων IP στο BBFRAME, και με 188 bytes όταν τα δεδομένα IP ενθυλακώνονται πρώτα σε πακέτα MPEG [Rinaldo et al., 2004].

Όπως γίνεται αντιληπτό, προκειμένου να επιτευχθεί σημαντική απόδοση στο επίπεδο προσαρμογής ρεύματος, η εκάστοτε διαδικασία ενθυλάκωσης πρέπει να πολυπλέκει μεγάλο αριθμό πακέτων IP από διαφορετικούς χρήστες στο ίδιο FECFRAME. Κάτι τέτοιο ελαχιστοποιεί τις απώλειες λόγω padding. Σημειώνεται ότι η πολυπλεξία των χρηστών είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με δυο διαφορετικούς τρόπους. Είτε σύμφωνα με τη διεύθυνση προορισμού (destination address, PID) είτε σύμφωνα με τις απαιτήσεις του φυσικού στρώματος. Στην πρώτη περίπτωση είναι δυνατή η εφαρμογή του πρωτοκόλλου MPE αυξάνοντας, έτσι, την απόδοση ενθυλάκωσης MPEG. Στη δεύτερη περίπτωση, το πρωτόκολλο MPE θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για το συντονισμό του PID και του φυσικού στρώματος [Castro et al., 2004].

3.6.3 Απόδοση πλαισίωσης (Framing Efficiency)

Μετά τη δημιουργία του, κάθε πλαίσιο BBFRAME εισάγεται στον κωδικοποιητή FEC, ο οποίος αποτελείται διαδοχικά από τον εξωτερικό κωδικοποιητή BCH και τον εσωτερικό κωδικοποιητή LDPC. Έπειτα, εφαρμόζεται το κατάλληλο σχήμα διαμόρφωσης από τα διαθέσιμα (QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK). Υπενθυμίζεται ότι κατά τη χρήση της τεχνικής ACM είναι δυνατόν το σχήμα κωδικοποίησης και διαμόρφωσης να διαφέρει από πλαίσιο σε πλαίσιο. Ακολουθεί το στάδιο της πλαισίωσης, όπου τα διαμορφωμένα σύμβολα εισάγονται σε μια συνηθισμένη δομή πλαισίωσης φυσικού επιπέδου.

Η απόδοση πλαισίωσης $\psi_{\text{framing}}(\eta)$ δεν εξαρτάται από το μήκος των πακέτων IP, αλλά μόνο από τη φασματική απόδοση του εκάστοτε σχήματος διαμόρφωσης. Γενικά, καθορίζεται από το αντίστοιχο πρότυπο, αλλά είναι πολύ υψηλή (πάνω από 97%) για όλες τις διατάξεις φυσικού στρώματος. Ο υπολογισμός της συνήθως γίνεται θεωρώντας το λόγο των συμβόλων πληροφορίας προς τα συνολικά μεταδιδόμενα σύμβολα:

$$\psi_{\text{framing}}(\eta) = \frac{\text{σύμβολα πληροφορίας } (\eta)}{\text{συνολικά σύμβολα που μεταδίδονται } (\eta)} \quad (3.7)$$

Η πλαισίωση φυσικού επιπέδου χρησιμοποιεί μια οργάνωση σε μονάδες σταθερού μήκους 90 συμβόλων (symbols), οι οποίες καλούνται σχισμές (slots). Το τελικό μεταδιδόμενο πλαίσιο ονομάζεται Πλαίσιο Φυσικού Επιπέδου (Physical Layer Frame, PLFRAME) και προκύπτει έπειτα από την προσθήκη της αντίστοιχης επικεφαλίδας PLHEADER. Η επικεφαλίδα PLHEADER καταλαμβάνει ακριβώς μια σχισμή και μεταφέρει την πληροφορία που σχετίζεται με τον τύπο του πλαισίου και το σχήμα του φυσικού επιπέδου (physical layer mode).

Στην περίπτωση συστημάτων που χρησιμοποιούν ACM, είναι δυνατή η εισαγωγή πιλοτικών συμβόλων (pilot symbols) στα πλαίσια του φυσικού στρώματος. Η παρουσία τους διευκολύνει το συγχρονισμό στο δέκτη και την εκτίμηση της κατάστασης του καναλιού. Πιο συγκεκριμένα, τα πιλοτικά σύμβολα επιτρέπουν την ανάκτηση φέροντος χωρίς να είναι γνωστά τα δεδομένα του πλαισίου. Η εισαγωγή πιλοτικών συμβόλων στο σήμα DVB-S2 είναι προαιρετική, αλλά η εναλλαγή της χρήσης τους από πλαίσιο σε πλαίσιο δεν επιτρέπεται. Τα πιλοτικά σύμβολα εισάγονται σε 36 σύμβολα κάθε 16 σχισμές. Συμβολίζοντας με $S = S(\eta_{MOD})$ τον αριθμό των σχισμών που χρησιμοποιούνται για τη δοσμένη φασματική απόδοση και λαμβάνοντας υπόψη τα 36 πιλοτικά σύμβολα, η προηγούμενη σχέση για την απόδοση πλαισίωσης λαμβάνει τη μορφή

$$\Psi_{\text{framing}}(\eta_{MOD}) = \frac{90 \times S}{90 \times S + 90 + 36 \times \text{int}[(S-1)/16]} \quad (3.8)$$

Ο όρος $90 \times S$ που βρίσκεται στον αριθμητή συμβολίζει το συνολικό πλήθος των συμβόλων πληροφορίας, οργανωμένα ανά 90 σχισμές. Ο παρονομαστής αναπαριστά το συνολικό πλήθος των συμβόλων που μεταδίδονται, τα οποία αποτελούνται από τα σύμβολα πληροφορίας ($90 \times S$ σύμβολα), την επικεφαλίδα μιας σχισμής (90 σύμβολα) και τα πιλοτικά σύμβολα ($36 \times \text{int}[(S-1)/16]$). Τα πιλοτικά σύμβολα εισάγονται σε μπλοκ των 36 κάθε 16 σχισμές. Επομένως, ο όρος $\text{int}[(S-1)/16]$ εκφράζει το πόσες φορές (σε ακέραιο αριθμό) πραγματοποιείται εισαγωγή μπλοκ των 36 συμβόλων. Τέλος, η ύπαρξη της ποσότητας $(S-1)$ οφείλεται στη θέση του pilot block ανάλογα με το αν συμπίπτει ή όχι με το PLHEADER.

3.7 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΕΝΘΥΛΑΚΩΣΗΣ ΑΝΑ ΕΠΙΠΕΔΟ

3.7.1 Απόδοση ενθυλάκωσης MPEG-2 (MPEG-2 Encapsulation efficiency)

Για τον υπολογισμό της απόδοσης ενθυλάκωσης στο επίπεδο αυτό εξετάζονται οι ακόλουθες δυο περιπτώσεις:

- Όταν τα πακέτα IP ενθυλακώνονται απευθείας στο DVB-S, δηλαδή όταν έχουμε γενικό ρεύμα (generic IP stream), η απόδοση ισούται με τη μονάδα ($\psi_{MPEG}(L_{IP})=1$)
- Όταν έχουμε ενθυλάκωση MPEG/MPE, τα πακέτα IP χωρίζονται σε μονάδες SNDU όπως περιγράφηκε παραπάνω

Για τον υπολογισμό της απόδοσης στη δεύτερη περίπτωση υποθέτουμε L_{IP} το μήκος των πακέτων IP, με τυπικές τιμές από 1 έως 1500 bytes. Αναφορικά με το πλήθος των πακέτων ενός συγκεκριμένου μήκους, έχει παρατηρηθεί ότι ένα μεγάλο ποσοστό πακέτων αντιπροσωπεύει ένα μικρό ποσοστό του συνολικού όγκου, γεγονός που υποδηλώνει ότι τα μικρά πακέτα είναι τα πολυπληθέστερα. Πιο συγκεκριμένα, τα πακέτα με μήκος ~40, ~500 και 1500 bytes αποτελούν το 60% του συνολικού πλήθους των πακέτων και το 70% του συνολικού όγκου [Castro et al., 2004]. Το γεγονός αυτό είναι απόρροια της υλοποίησης του πρωτοκόλλου TCP/IP. Όπως έχει αναφερθεί το πρωτόκολλο TCP/IP χρησιμοποιείται για την αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων μεταξύ διεργασιών σε ένα δίκτυο. Το πρωτόκολλο IP προσφέρει υπηρεσίες βέλτιστης προσπάθειας (best effort), δηλαδή δεν εγγυάται ότι τα πακέτα θα φτάσουν επιτυχώς στο δέκτη. Όμως, η συμμετοχή του πρωτοκόλλου TCP εξασφαλίζει τη σωστή και αξιόπιστη μεταφορά των δεδομένων. Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται με χρήση πακέτων επιβεβαίωσης (acknowledgments ή ACKs) και τμημάτων ελέγχου (control segments), τα οποία αποτελούν τα μικρά πακέτα μήκους ~40 bytes. Τα πακέτα μεσαίου μήκους (~500 bytes) προκύπτουν στην περίπτωση που το TCP/IP υλοποιείται χωρίς να γίνεται χρήση του πρωτοκόλλου Path MTU Discovery. Ο όρος Μέγιστη Μονάδα Μεταφοράς (Maximum Transfer Unit, MTU) αναφέρεται στη μέγιστη ποσότητα δεδομένων που μπορεί να μεταφέρει ένα πακέτο επιπέδου ζεύξης. Στην περίπτωση που δε χρησιμοποιείται το παραπάνω πρωτόκολλο, ο παραλήπτης δε λαμβάνει υπόψη το μέγιστο μέγεθος πακέτου που είναι επιτρεπτό για τη διαδρομή μέχρι το δέκτη. Επομένως, το μέγεθος πακέτου τίθεται σε μια προεπιλεγμένη τιμή, η οποία ισούται με 512 bytes. Τέλος, τα πακέτα μήκους 1500 bytes είναι χαρακτηριστικά της χρήσης Ethernet κατά τη διασύνδεση τοπικών δικτύων.

Για κάθε SNDU που χρησιμοποιείται, προστίθενται συνολικά 8 bytes (2 για το πεδίο μήκους, 2 για το πεδίο τύπου και 4 για το πεδίο CRC). Τα $(L_{IP} + 8)$ bytes που προκύπτουν ενθυλακώνονται σε πακέτα MPEG TS ωφέλιμου μήκους 184 bytes. Υπενθυμίζεται ότι στα TS packets ενσωματώνεται και μια επικεφαλίδα των 4 bytes, ώστε να αποκτήσουν τελικά συνολικό μέγεθος 188 bytes. Στην περίπτωση που το μήκος του πακέτου IP είναι τέτοιο ώστε να ισχύει $L_{IP} + 8 > 184 \Rightarrow L_{IP} > (184 - 8)$, η αντίστοιχη SNDU τεμαχίζεται (fragmentation) ώστε να μπορεί να εισαχθεί σε κάποιο αριθμό πακέτων TS. Υποθέτουμε τώρα ότι ισχύει $L_{IP} + 8 < 184 \Rightarrow L_{IP} < (184 - 8)$, οπότε ο αριθμός των πακέτων IP θα είναι ίσος με τον αριθμό των SNDU. Ανάλογα με το αν επιτρέπεται ή όχι η διαδικασία αλληλουχίας (concatenation) των μονάδων SNDU, διακρίνονται τα ακόλουθα ενδεχόμενα:

- Δεν επιτρέπεται το concatenation, επομένως σε κάθε TS packet τοποθετείται μόνο μια SNDU, ενώ το υπόλοιπο τμήμα συμπληρώνεται με padding bits. Προφανώς, κάτι τέτοιο μειώνει σημαντικά την απόδοση της ενθυλάκωσης, ειδικά για μικρά μήκη πακέτου L_{IP} .
- Επιτρέπεται το concatenation, επομένως σε κάθε TS packet τοποθετούνται περισσότερες από μια SNDU, εάν υπάρχουν διαθέσιμες. Κάθε μια από τις SNDU ξεκινά εκεί που τελειώνει η προηγούμενη, με τον ενδείκτη PUSI να χρησιμοποιείται για να επισημαίνει τη θέση της αρχής κάθε τμήματος.

Για τον υπολογισμό της απόδοσης ενθυλάκωσης MPEG/MPE απαιτείται διαφορετική αντιμετώπιση για κάθε περίπτωση, ανάλογα με το αν επιτρέπεται ή όχι ο μηχανισμός της αλληλουχίας των μονάδων SNDU (και εδώ εξετάζεται η ενθυλάκωση MPEG/MPE, για generic IP η απόδοση είναι 1).

➤ **Δεν επιτρέπεται το concatenation**

- Ισχύει $L_{IP} + 8 < 184 \Rightarrow L_{IP} < (184 - 8)$

Στην περίπτωση αυτή σε κάθε πακέτο TS μήκους 188 bytes ενθυλακώνεται μόνο ένα πακέτο IP μήκους L_{IP} bytes, επομένως η απόδοση είναι

$$\psi_{MPEG} = \frac{\text{μήκος}_{IP_packet}}{\text{μήκος}_{TS_packet}} \Rightarrow \psi_{MPEG} = \frac{L_{IP}}{188} \quad (3.9)$$

➤ Ισχύει $L_{IP} + 8 > 184 \Rightarrow L_{IP} > (184 - 8)$

Στην περίπτωση αυτή αν είναι #IP ο αριθμός των πακέτων IP, ίδιος με τον αριθμό των μονάδων SNDU (#IP=#SNDU), ο αριθμός των πακέτων TS που απαιτείται για τη μετάδοση μιας SNDU δίνεται από τη σχέση

$$\# TS_{SNDU} = \left\lceil \frac{L+8}{184} \right\rceil \quad (3.10)$$

αφού το μήκος κάθε SNDU είναι (L+8) bytes και ενσωματώνεται σε πακέτα MPEG-2 TS ωφέλιμου μήκους 184 bytes. Επομένως, ο συνολικός αριθμός των πακέτων TS είναι

$$\# TS = (\# TS_{SNDU}) \cdot (\# SNDU) \quad (3.11)$$

Ο συνολικός αριθμός των δεδομένων χρήστη που μεταδίδονται είναι (#IP × L_{IP}), ενώ τα συνολικά bytes που μεταδίδονται είναι το γινόμενο του πλήθους των πακέτων TS επί το μέγεθος κάθε τέτοιου πακέτου, δηλαδή 188 bytes. Τελικά, η απόδοση στην περίπτωση αυτή δίνεται από τη σχέση

$$\psi_{MPEG} = \frac{\text{bytes χρήστη}}{\text{συνολικά bytes}} \Rightarrow \psi_{MPEG} = \frac{\# IP \times L_{IP}}{\# TS \times 188} \quad (3.12)$$

➤ **Επιτρέπεται το concatenation**

Στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι αδιάφορο το αν ισχύει $L_{IP} + 8 < 184$ ή όχι, εφόσον όλα τα πακέτα TS γεμίζουν με μια ή περισσότερες SNDU, εκτός από το τελευταίο. Αν είναι #IP ο αριθμός των πακέτων IP μήκους L_{IP} , ο αριθμός των μονάδων SNDU είναι ο ίδιος (#IP=#SNDU), ενώ το μήκος κάθε μιας είναι κατά τα γνωστά ίσο με ($L_{IP} + 8$) bytes. Το συνολικό μέγεθος των μονάδων που πρέπει να μεταδοθούν προκύπτει από το ακόλουθο γινόμενο:

$$L_{SNDU} = (\# SNDU) \cdot (L_{IP} + 8) \quad (3.13)$$

Όλα αυτά τα δεδομένα θα ενθυλακωθούν σε πακέτα TS (μήκους 184 bytes) με τις μονάδες SNDU να τοποθετούνται διαδοχικά, επομένως ο αριθμός των πακέτων TS που απαιτούνται για τη μετάδοση αυτή είναι

$$\#TS = \left\lceil \frac{L_{SNDU}}{184} \right\rceil \quad (3.14)$$

Ο συνολικός αριθμός των δεδομένων χρήστη που μεταδίδονται είναι ($\#IP \times L_{IP}$), ενώ τα συνολικά bytes που μεταδίδονται είναι το γινόμενο του πλήθους των πακέτων TS επί το μέγεθος κάθε τέτοιου πακέτου, δηλαδή 188 bytes. Τελικά, η απόδοση στην περίπτωση αυτή δίνεται από τη σχέση

$$\psi_{MPEG} = \frac{\text{bytes χρήστη}}{\text{συνολικά bytes}} \Rightarrow \psi_{MPEG} = \frac{\#IP \times L_{IP}}{\#TS \times 188} \quad (3.15)$$

3.7.2 Απόδοση της προσαρμογής ροής εισόδου (Mode & Stream Encapsulation efficiency)

Στο επίπεδο αυτό πραγματοποιείται εισαγωγή των πακέτων χρήστη (user packets) στο Πεδίο Δεδομένων (data field) ενός BBFRAME. Τα user packets είναι δυνατόν να έχουν μήκος ίδιο με αυτό των πακέτων IP ($L=IP$ packet length), όταν χρησιμοποιείται απευθείας εισαγωγή του πακέτου IP στο BBFRAME του DVB (περίπτωση generic IP), ή να έχουν μήκος $L=188$ bytes, όταν χρησιμοποιείται ενθυλάκωση MPEG/MPE. Μπροστά από το data field ενσωματώνεται η επικεφαλίδα BBHEADER μήκους 80 bits, ώστε το τελικό μέγεθος να είναι K_{BCH} bits. Ακολουθεί η διαδικασία της κωδικοποίησης, οπότε τα K_{BCH} bits εισέρχονται στον εξωτερικό κωδικοποιητή BCH, στην έξοδο του οποίου το συνολικό μέγεθος του κάθε πλαισίου είναι N_{BCH} bits. Αμέσως μετά ακολουθεί ο εσωτερικός κωδικοποιητής LDPC, άρα είναι δυνατόν να θεωρηθεί ότι τα κωδικοποιημένα ψηφία από τον εξωτερικό κωδικοποιητή λειτουργούν ως τα μη κωδικοποιημένα ψηφία στην είσοδο του εσωτερικού κωδικοποιητή, δηλαδή $N_{BCH} = k_{LDPC}$. Σημειώνεται ότι τα ακωδικοποίητα και κωδικοποιημένα ψηφία συμβολίζονται αντίστοιχα με κεφαλαία (K, N) στον εξωτερικό κωδικοποιητή και με πεζά (k, n) στον εσωτερικό κωδικοποιητή. Όπως έχει αναφερθεί, είναι δυνατόν να υπάρχουν κανονικά (normal) ή σύντομα (short) πλαίσια, επομένως το τελικό FECFRAME μετά τη διαδικασία των δυο κωδικοποιήσεων θα έχει μήκος $n_{LDPC}=64800$ ή 16200 bits, αντίστοιχα.

Ακολουθούν δυο πίνακες με τις παραμέτρους κωδικοποίησης, ανάλογα με το ρυθμό κωδικοποίησης και το μήκος του πλαισίου FEC. Η πρώτη στήλη αντιστοιχεί στο χρησιμοποιούμενο ρυθμό κωδικοποίησης LDPC. Ενδεικτικά, η πρώτη γραμμή αναφέρεται στο ρυθμό κωδικοποίησης 1/4. Στη δεύτερη στήλη παραθέτονται οι αντίστοιχες τιμές για τα απαιτούμενα ακωδικοποίητα ψηφία K_{BCH} bits, στα οποία συμπεριλαμβάνεται η επικεφαλίδα των 80 bits. Για κωδικοποίηση 1/4 και χρήση κανονικού πλαισίου απαιτούνται 16008 bits. Ακολουθεί η στήλη με τα κωδικοποιημένα από τον εξωτερικό κωδικοποιητή BCH ψηφία, τα οποία τροφοδοτούν τον εσωτερικό κωδικοποιητή LDPC. Οι τιμές της προκύπτουν ως το γινόμενο του ρυθμού κωδικοποίησης με το τελικό μήκος του πλαισίου FECFRAME. Έτσι, ισχύει $64800 \cdot (1/4) = 16200$. Στην περίπτωση σύντομου πλαισίου χρησιμοποιείται αντίστοιχα ο ενεργός ρυθμός κωδικοποίησης (Effective LDPC rate). Η επόμενη στήλη παραθέτει τον αριθμό των σφαλμάτων που είναι δυνατόν να διορθωθούν (π.χ. $t=12$), ενώ στην τελευταία στήλη αναγράφεται το μήκος του FECFRAME που χρησιμοποιείται (π.χ. 64800 bits).

Πίνακας 3.1 - Παράμετροι κωδικοποίησης για κανονικό πλαίσιο FECFRAME (64800 bits)

coding parameters (for normal FECFRAME $n_{ldpc} = 64\ 800$)

LDPC code	BCH Uncoded Block K_{bch}	BCH coded block N_{bch} LDPC Uncoded Block k_{ldpc}	BCH t-error correction	LDPC Coded Block n_{ldpc}
1/4	16 008	16 200	12	64 800
1/3	21 408	21 600	12	64 800
2/5	25 728	25 920	12	64 800
1/2	32 208	32 400	12	64 800
3/5	38 688	38 880	12	64 800
2/3	43 040	43 200	10	64 800
3/4	48 408	48 600	12	64 800
4/5	51 648	51 840	12	64 800
5/6	53 840	54 000	10	64 800
8/9	57 472	57 600	8	64 800
9/10	58 192	58 320	8	64 800

Πίνακας 3.2 - Παράμετροι κωδικοποίησης για σύντομο πλαίσιο FECFRAME (16200 bits)

coding parameters (for short FECFRAME $n_{ldpc} = 16\ 200$)

LDPC Code identifier	BCH Uncoded Block K_{bch}	BCH coded block N_{bch} LDPC Uncoded Block k_{ldpc}	BCH t-error correction	Effective LDPC Rate $k_{ldpc}/16\ 200$	LDPC Coded Block n_{ldpc}
1/4	3 072	3 240	12	1/5	16 200
1/3	5 232	5 400	12	1/3	16 200
2/5	6 312	6 480	12	2/5	16 200
1/2	7 032	7 200	12	4/9	16 200
3/5	9 552	9 720	12	3/5	16 200
2/3	10 632	10 800	12	2/3	16 200
3/4	11 712	11 880	12	11/15	16 200
4/5	12 432	12 600	12	7/9	16 200
5/6	13 152	13 320	12	37/45	16 200
8/9	14 232	14 400	12	8/9	16 200
9/10	NA	NA	NA	NA	NA

Για τον υπολογισμό της απόδοσης στην περίπτωση ρεύματος IP ακολουθείται η αντίστροφη πορεία. Συγκεκριμένα, με βάση το μήκος του χρησιμοποιούμενου πλαισίου FECFRAME και το ρυθμό κωδικοποίησης LDPC rate, προσδιορίζεται ο αριθμός K_{BCH} των μη κωδικοποιημένων bits ανατρέχοντας στον κατάλληλο πίνακα. Στη συνέχεια αφαιρούνται 80 bits, τα οποία αντιστοιχούν στη BBHEADER, ώστε να προσδιορισθεί το ωφέλιμο μήκος του πλαισίου, έστω K'_{BCH} . Στη συνέχεια, ανάλογα με το μήκος του πακέτου IP, έστω L, υπολογίζεται ο αριθμός των πακέτων IP που χωρούν στο ωφέλιμο αυτό μήκος σύμφωνα με τη σχέση:

$$\# IP = \left\lfloor \frac{L}{K'_{BCH}} \right\rfloor \quad (3.16)$$

Γνωρίζοντας τον αριθμό πακέτων IP ανά πλαίσιο, η απόδοση του επιπέδου αυτού προσδιορίζεται απλά από την ακόλουθη σχέση:

$$\psi_{MS}(\eta_{COD}, L) = \frac{\# IP \times L}{K_{BCH}} \quad (3.17)$$

3.7.3 Απόδοση πλαισίωσης (Framing efficiency)

Η απόδοση πλαισίωσης $\psi_{framing}(\eta_{MOD})$ εξαρτάται μόνο από τη φασματική απόδοση της χρησιμοποιούμενης διαμόρφωσης και όχι από το μήκος του πακέτου IP. Ως γνωστόν, για τις διαμορφώσεις ανώτερης τάξης κάθε μεταδιδόμενο σύμβολο αντιστοιχεί σε περισσότερα από ένα ψηφία. Για παράδειγμα ισχύει

Διαμόρφωση	Αριθμός Ψηφίων ανά Σύμβολο ($\log_2 M$)	Τάξη Διαμόρφωσης
QPSK	2 bits/symbol	M=4
8PSK	3 bits/symbol	M=8
16APSK	4 bits/symbol	M=16
32APSK	5 bits/symbol	M=32

Μετά τη διαμόρφωση τα σύμβολα ομαδοποιούνται σε συνολικά S σχισμές των 90 συμβόλων, σχηματίζοντας έτσι το πλαίσιο φυσικού επιπέδου (PLFRAME). Σε κάθε PLFRAME προστίθεται μια επικεφαλίδα PLHEADER του ενός slot. Ο αριθμός των

συμβόλων, άρα και των slots, ανά PLFRAME καθορίζεται από τη διαμόρφωση και το μήκος του FECFRAME, όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί. Γνωρίζοντας τον αριθμό των συμβόλων ανά πλαίσιο PLFRAME, ο αριθμός των slots σε κάθε ένα από αυτά προκύπτει διαιρώντας δια 90. Υπενθυμίζεται ότι εισάγονται και 36 πιλοτικά σύμβολα (pilot block) με σκοπό την ευκολότερη ανάκτηση του φέροντος

Διαμόρφωση	Μήκος Πλαισίου PLFRAME (symbols)	
	short FECFRAME (16200bits)	normal FECFRAME (64800bits)
QPSK	16200/2 = 8100	64800/2 = 32400
8PSK	16200/3 = 5400	64800/3 = 21600
16APSK	16200/4 = 4050	64800/4 = 16200
32APSK	16200/5 = 3240	64800/5 = 12960

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, η απόδοση πλαισίωσης δίνεται από τη σχέση:

$$\psi_{\text{framing}}(\eta_{MOD}) = \frac{90 \times S}{90 \times S + 90 + 36 \times \text{int}[(S-1)/16]} \quad (3.18)$$

όπου το (S-1) οφείλεται στη θέση του pilot block ανάλογα με το αν συμπίπτει ή όχι με το PLHEADER. Γενικά, επιτυγχάνονται υψηλές τιμές απόδοσης (πάνω από 97%) για όλες τις διατάξεις φυσικού στρώματος.

3.8 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΕΝΘΥΛΑΚΩΣΗΣ ΑΝΑ ΕΠΙΠΕΔΟ

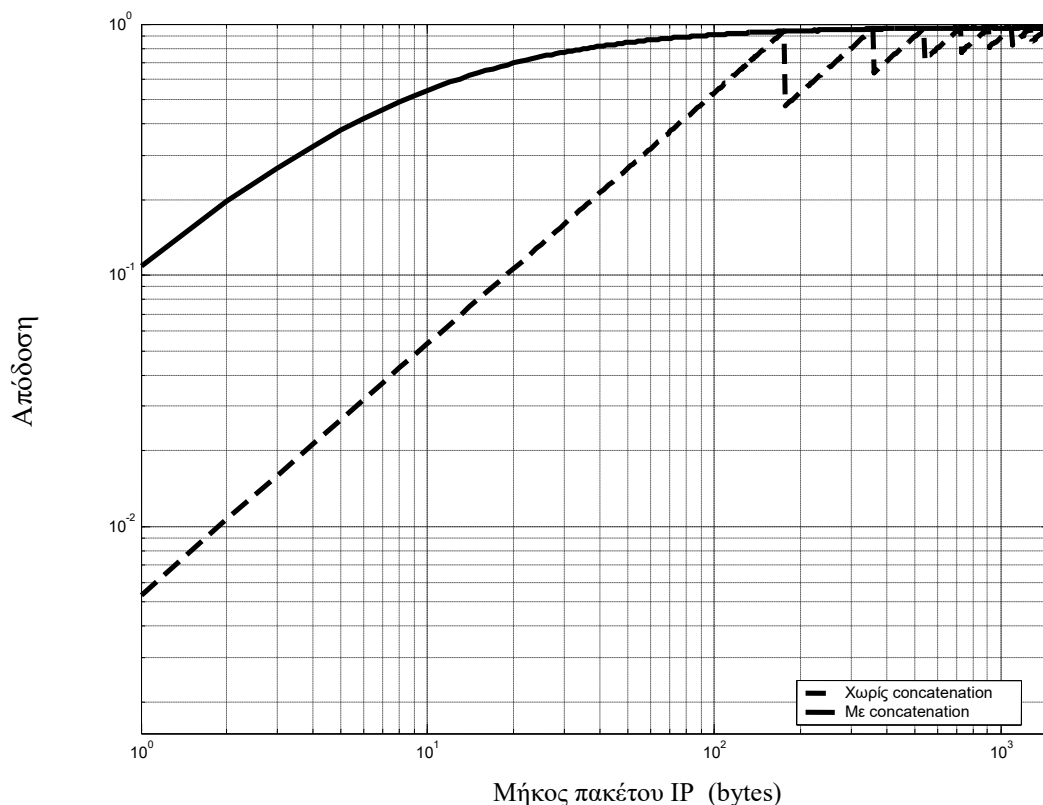
Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται διάφορα πειραματικά αποτελέσματα της απόδοσης ενθυλάκωσης, με βάση την ανάλυση που προηγήθηκε. Τα δεδομένα προέκυψαν από προσομοιώσεις στο λογισμικό πακέτο Matlab και αφορούν την απόδοση ενθυλάκωσης σε κάθε επίπεδο, αλλά και την ολική απόδοση.

3.8.1 Απόδοση ενθυλάκωσης MPEG-2 (MPEG-2 Encapsulation efficiency)

Στο επίπεδο αυτό, σημαντική είναι η εξέταση της απόδοσης ενθυλάκωσης ως συνάρτηση του μήκους L_{IP} των πακέτων IP, διακρίνοντας περιπτώσεις ανάλογα με το αν

επιτρέπεται ή όχι το concatenation. Γενικά, όταν το μήκος L_{IP} είναι σημαντικά μικρότερο από το μήκος του πακέτου TS (188 bytes), η απόδοση ενθυλάκωσης είναι μικρή, ειδικά για την περίπτωση όπου δεν επιτρέπεται concatenation (δηλαδή ενθυλακώνεται μόνο ένα πακέτο IP ανά πακέτο TS).

Στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζεται η από κοινού γραφική παράσταση της απόδοσης ενθυλάκωσης πακέτων IP πάνω από MPEG με χρήση concatenation και μη. Η περίπτωση αυτή αφορά ενθυλάκωση MPEG/MPE, ενώ υπενθυμίζεται ότι για generic stream IP η απόδοση είναι ίση με τη μονάδα. Για τους δυο άξονες έχει χρησιμοποιηθεί λογαριθμική κλίμακα, ενώ για το μέγεθος των πακέτων IP θεωρήθηκαν τυπικές τιμές από 1 έως 1500 bytes. Όπως φαίνεται, υψηλές τιμές απόδοσης επιτυγχάνονται για μεγέθη πακέτων πάνω από 100 bytes. Παράλληλα, είναι φανερή η υπεροχή του μηχανισμού της αλληλουχίας πακέτων (concatenation) σε σχέση με την απλή χρήση padding για όλα τα μεγέθη πακέτων.



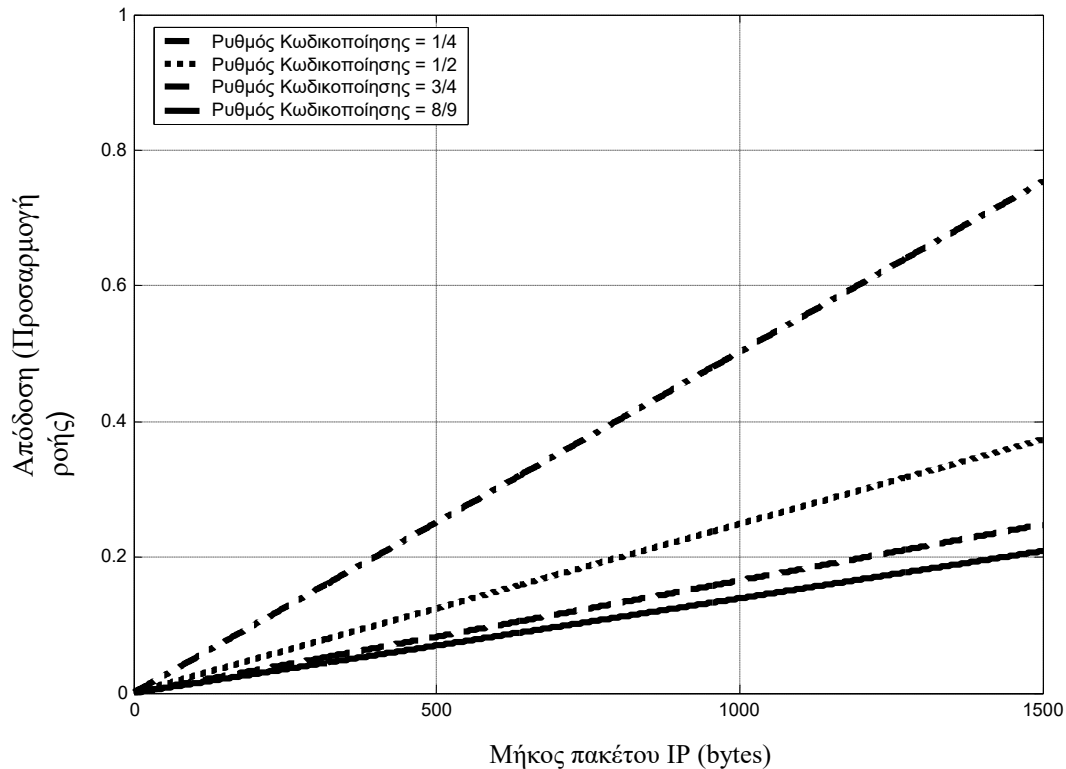
Σχήμα 3.5 - Απόδοση ενθυλάκωσης για μετάδοση IP πάνω από MPEG ως συνάρτηση του μεγέθους των πακέτων IP (σε bytes)

3.8.2 Απόδοση της προσαρμογής ροής εισόδου (Mode & Stream Encapsulation efficiency)

Στο επίπεδο αυτό είναι δυνατή η μελέτη της εξάρτησης της απόδοσης από το μέγεθος των πακέτων εισόδου. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση δεδομένων απλού (generic) ρεύματος IP, δηλαδή χωρίς MPEG. Αρχικά εξετάζεται η περίπτωση ενθυλάκωσης ενός μόνο πακέτου (single IP) σε κάθε πλαίσιο για διάφορες τιμές του ρυθμού κωδικοποίησης. Με βάση την τιμή του code rate και ανάλογα με το αν χρησιμοποιείται normal ή short FECFRAME, προκύπτει ο αριθμός των K_{BCH} bits, ο οποίος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απόδοσης. Στο ακόλουθο Σχήμα 3.6 παρουσιάζεται η απόδοση για τυπικά μήκη πακέτου, όταν χρησιμοποιούνται κανονικά πλαίσια και γίνεται η σύγκριση για διάφορους ρυθμούς κωδικοποίησης. Παράλληλα, στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζεται η αντίστοιχη απόδοση όταν χρησιμοποιούνται σύντομα πλαίσια. Είναι φανερό ότι η απόδοση είναι ευθέως ανάλογη του μήκους των πακέτων, εφόσον έχει υποθεθεί ότι ενθυλακώνεται μόνο ένα πακέτο κάθε φορά. Όσο μεγαλύτερο το μήκος του πακέτου, τόσο περισσότερα είναι τα δεδομένα χρήστη που μεταδίδονται και άρα τόσο πιο αποδοτική είναι η ενθυλάκωση.

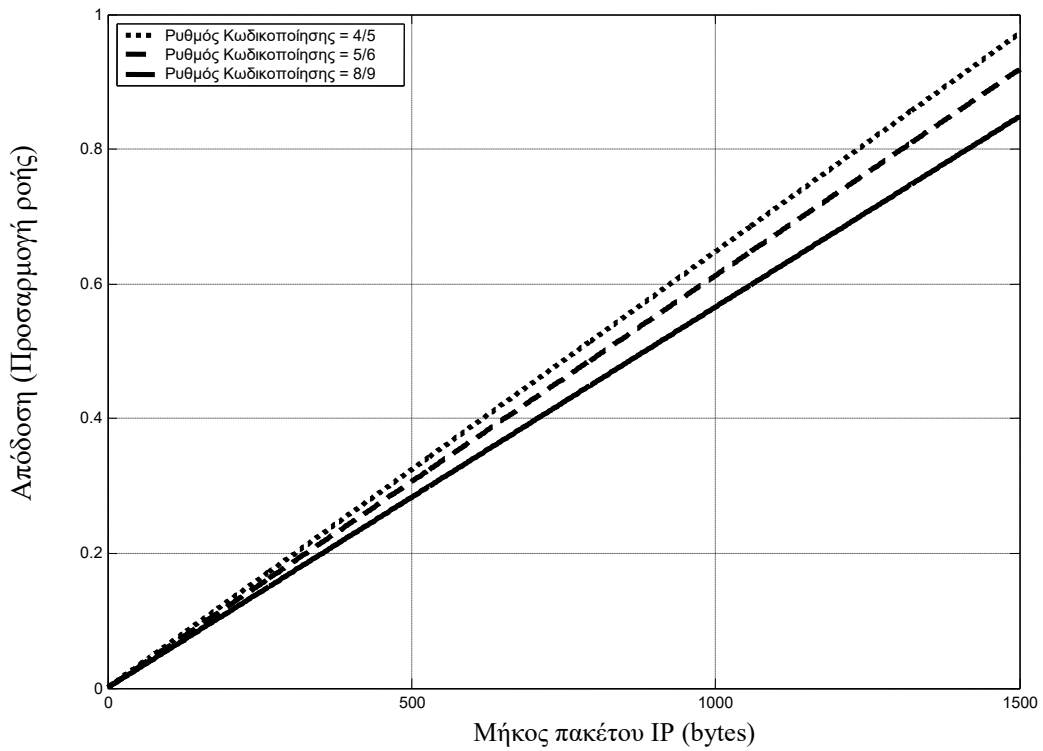
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εξάρτηση της απόδοσης από το ρυθμό κωδικοποίησης, για συγκεκριμένο μήκος πακέτου. Καθώς αυξάνει η τιμή του ρυθμού κωδικοποίησης, δηλαδή καθώς αυξάνεται ο αριθμός των ψηφίων πληροφορίας στην κωδικοποιημένη λέξη, παρατηρείται το φαινομενικά παράδοξο ότι, για συγκεκριμένο μήκος πακέτων, η απόδοση ενθυλάκωσης μειώνεται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η αύξηση του ρυθμού κωδικοποίησης συνεπάγεται και τη χρήση περισσότερων μη κωδικοποιημένων ψηφίων, K_{BCH} bits, όπως φαίνεται στους παραπάνω πίνακες. Για παράδειγμα, ο ρυθμός κωδικοποίησης 1/4 απαιτεί 16008 bits, ενώ για ρυθμό 8/9 χρησιμοποιούνται 57472 bits. Εφόσον όμως στα Σχήματα 3.6 και 3.7 εξετάζεται η ενθυλάκωση ενός μόνο πακέτου σε κάθε πλαίσιο, δεν υπάρχουν διαθέσιμα επιπλέον ψηφία πληροφορίας ώστε να αντισταθμίζεται και να αιτιολογείται η παρουσία περισσότερων ψηφίων K_{BCH} . Δηλαδή αυξάνει το μέγεθος του χρησιμοποιούμενου πεδίου δεδομένων (data field), χωρίς όμως αυτό να συμπληρώνεται με δεδομένα χρήστη, οπότε ο κενός χώρος παραμένει ανεκμετάλλευτος. Επομένως, είναι φανερό ότι όσο περισσότερα είναι τα K_{BCH} bits που χρησιμοποιούνται για συγκεκριμένο μήκος πακέτου, τόσο μεγαλύτερη είναι η απώλεια στην απόδοση ενθυλάκωσης. Μέσω του παραδείγματος αυτού υπογραμμίζεται και πάλι η ανάγκη πολυπλεξίας πολλαπλών πακέτων IP από διαφορετικούς χρήστες στο ίδιο πλαίσιο FECFRAME. Η πολυπλεξία επιτρέπει την ελαχιστοποίηση των απωλειών

λόγω παραγεμίσματος και άρα την επίτευξη υψηλότερης απόδοσης ενθυλάκωσης. Συμπερασματικά, βασική επιδίωξη της σχεδίασης του συστήματος πρέπει να είναι η πολυπλεξία πολλαπλών ροών δεδομένων από διάφορους χρήστες, όποτε φυσικά είναι αυτό δυνατό, δηλαδή όποτε οι χρήστες προσφέρουν δεδομένα προς μετάδοση.

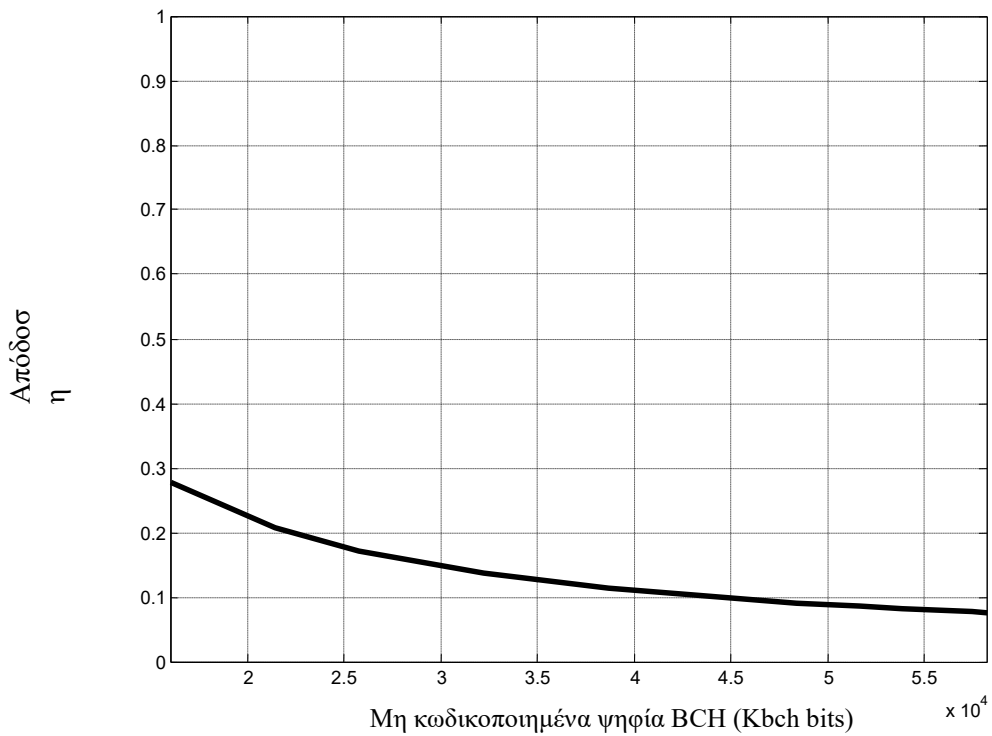


Σχήμα 3.6 - Απόδοση ενθυλάκωσης για την περίπτωση ενός πακέτου IP ανά (κανονικό) πλαίσιο

Η εξάρτηση της απόδοσης ενθυλάκωσης από το ρυθμό κωδικοποίησης στο επίπεδο προσαρμογής είναι περισσότερο εμφανής στο Σχήμα 3.8. Εκεί φαίνεται η γραφική παράσταση της απόδοσης συναρτήσει του αριθμού των K_{BCH} bits, δηλαδή ουσιαστικά του ρυθμού κωδικοποίησης. Η συγκεκριμένη περίπτωση αφορά χρήση πλαισίων FECFRAME κανονικού μήκους (64800 bits) με σταθερό μέγεθος πακέτων IP ίσο με 552 bytes. Το εύρος τιμών για το μπλοκ K_{BCH} είναι 16008 έως 58192 bits, που αντιστοιχεί σε εύρος τιμών από 1/4 έως 9/10 για το code rate. Όπως επισημάνθηκε και παραπάνω, παρατηρείται μείωση της απόδοσης καθώς αυξάνεται ο ρυθμός κωδικοποίησης.

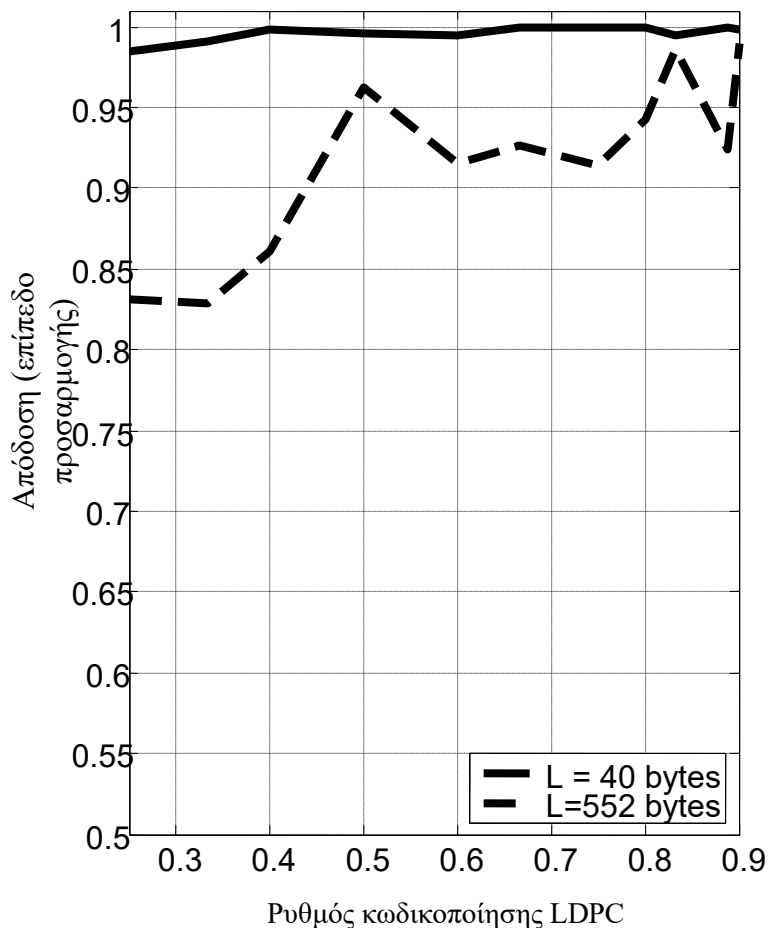


Σχήμα 3.7 - Απόδοση ενθυλάκωσης για την περίπτωση ενός πακέτου IP ανά (σύντομο) πλαίσιο

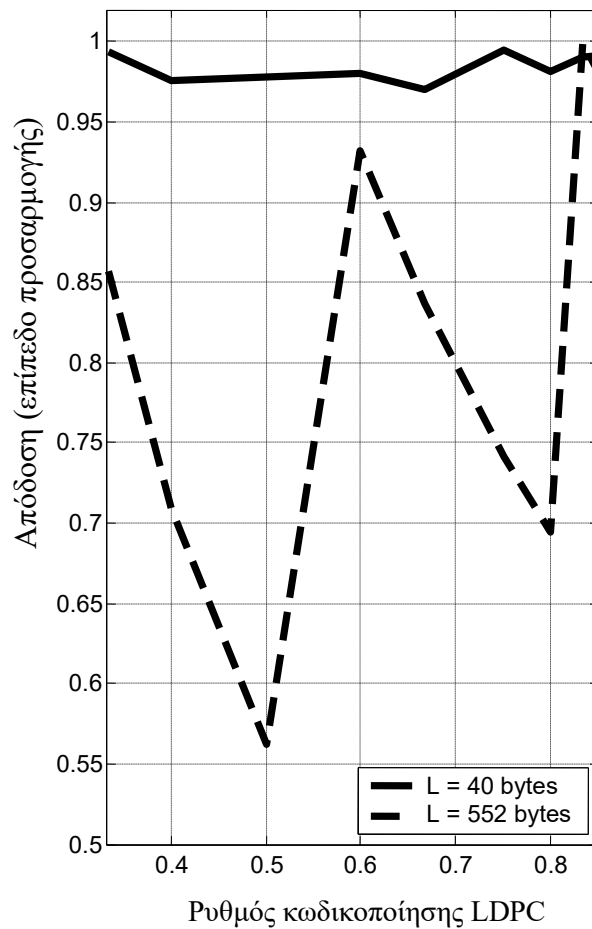


Σχήμα 3.8 - Εξάρτηση της απόδοσης ενθυλάκωσης από το ρυθμό κωδικοποίησης (single packet)

Επόμενο βήμα είναι η μελέτη της περίπτωσης όπου χρησιμοποιείται ενθυλάκωση περισσότερων του ενός πακέτων IP σε κάθε πλαίσιο. Συγκεκριμένα εξετάζεται η απόδοση ενθυλάκωσης ως συνάρτηση του χρησιμοποιούμενου ρυθμού κωδικοποίησης για δεδομένο μέγεθος πακέτου IP. Οι περιπτώσεις normal και short FECFRAME αντιμετωπίζονται ξεχωριστά, όπως φαίνεται στα Σχήματα 3.9 και 3.10 αντίστοιχα. Από τις γραφικές αυτές παραστάσεις είναι φανερό ότι η χρήση πλαισίων normal FECFRAME είναι περισσότερο αποδοτική, ειδικά για τις περιπτώσει πακέτων μεγάλου μήκους. Ένα ακόμη αρνητικό στοιχείο της χρήσης σύντομων πλαισίων είναι η μεγάλη διαφοροποίηση της απόδοσης καθώς μεταβάλλεται η τιμή του ρυθμού κωδικοποίησης.



Σχήμα 3.9 - Απόδοση ενθυλάκωσης στο επίπεδο mode and stream adaptation ως συνάρτηση του code rate (περίπτωση normal FECFRAME)

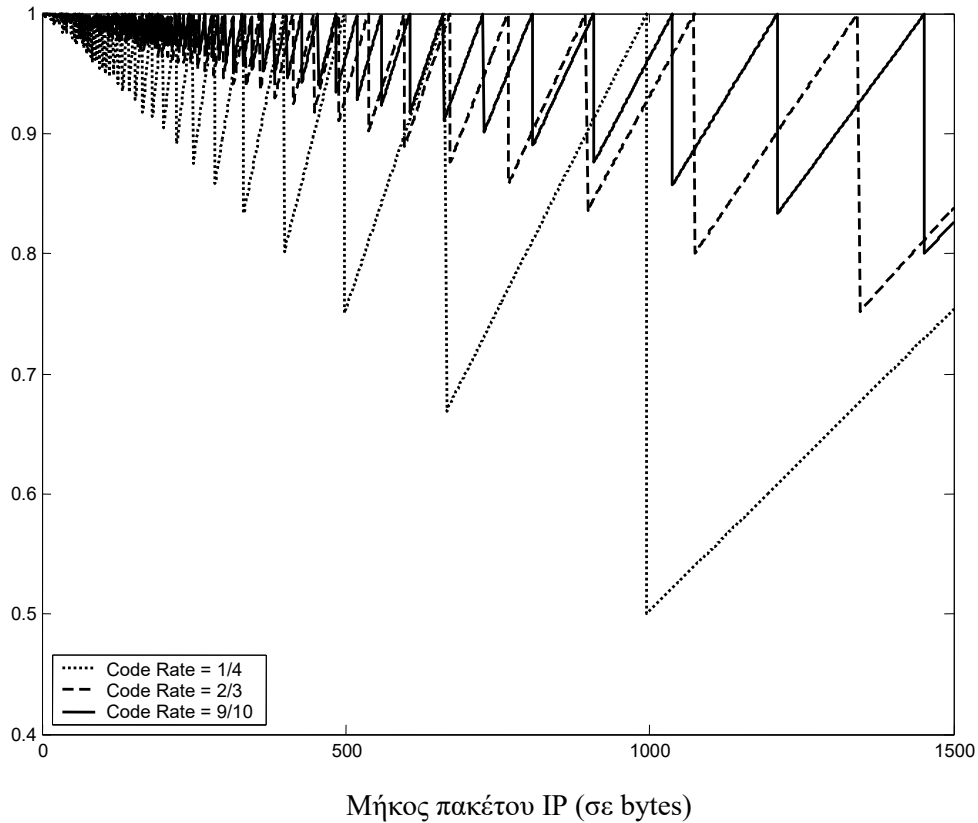


Σχήμα 3.10 - Απόδοση ενθυλάκωσης στο επίπεδο mode and stream adaptation ως συνάρτηση του code rate (περίπτωση short FECFRAME)

Από τις δυο προηγούμενες γραφικές παραστάσεις, γίνεται φανερό ότι, για ορισμένα εύρη τιμών του ρυθμού κωδικοποίησης παρατηρείται πτώση της απόδοσης, ενώ μετά από κάποια συγκεκριμένη τιμή του, σημειώνεται σημαντική βελτίωση της. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο για την περίπτωση πακέτων με σχετικά μεγάλο μέγεθος, π.χ. με $L=552$ bytes. Καθώς αυξάνεται ο ρυθμός κωδικοποίησης, χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερα ψηφία K_{BCH} . Η αύξηση αυτή είναι κλιμακωτή, όπως φαίνεται και από τις τιμές των αντίστοιχών πινάκων. Τα bits όμως αυτά δε συμπληρώνονται από ακέραιο αριθμό πακέτων, αλλά στον κενό χώρο που προκύπτει τοποθετούνται μη ωφέλιμα δεδομένα. Έτσι, παρατηρείται συνεχής μείωση της απόδοσης και μάλιστα, όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος των πακέτων, τόσο σημαντικότερο είναι και η μείωση αυτή. Εντούτοις, όταν ο αυξανόμενος ρυθμός κωδικοποίησης ξεπεράσει κάποια συγκεκριμένη τιμή, θα είναι

δυνατόν να χωρέσει ένα ακόμα πακέτο L (ακέραιος πάντα αριθμός) στον αντίστοιχο πεδίο των K_{BCH} bits. Το γεγονός αυτό εκτοξεύει αυτόματα την τιμή της απόδοσης, αιτιολογώντας την απότομη αύξηση της απόδοσης. Στα πακέτα μικρού μήκους το φαινόμενο αυτό δεν είναι ιδιαίτερα φανερό, καθώς υπάρχει μεγάλος αριθμός πακέτων που τοποθετούνται στο πεδίο και οι διαφοροποιήσεις δεν είναι έντονες. Αντίθετα, στην περίπτωση μεγαλύτερων πακέτων, χωρούν λίγα από αυτά στο πεδίο δεδομένων, οπότε μια αύξηση του αριθμού τους κατά 1 πακέτο οδηγεί σε σημαντική αύξηση της απόδοσης.

Παραμένοντας στη μελέτη του επιπέδου προσαρμογής ροής εισόδου, εξετάζουμε την απόδοση ως συνάρτηση του μεγέθους των πακέτων IP, για συγκεκριμένο ρυθμό κωδικοποίησης. Έτσι, στο Σχήμα 3.11 παρουσιάζεται η απόδοση ενθυλάκωσης για εύρος πακέτων από 1 έως 1500 bytes. Για τη γραφική παράσταση έχει υποθεθεί χρήση normal FECFRAME, ενώ εξετάζονται τρεις διαφορετικές τιμές για το code rate. Η διαφορά της συγκεκριμένης περίπτωσης με αυτή που παρουσιάζεται στα Σχήματα 3.6 και 3.7 είναι ότι εδώ επιτρέπεται η ενθυλάκωση περισσότερων του ενός πακέτων IP. Έτσι, ο χώρος που χάνεται λόγω παραγεμίσματος είναι σημαντικά μικρότερος, γεγονός που οδηγεί σε μεγάλη αύξηση της απόδοσης, ειδικά για πακέτα μικρού μήκους. Είναι εμφανές ότι η απόδοση παρουσιάζει μια κλιμακωτή εξάρτηση από το μήκος του πακέτου, ενώ ταυτόχρονα παρατηρείται μια μικρή, αλλά αισθητή μείωση καθώς αυξάνει το μήκος. Η τελευταία παρατήρηση είναι λογική, καθώς όσο μικρότερα είναι τα πακέτα, τόσο περισσότερα από αυτά μπορούν να ενσωματωθούν στο εκάστοτε data field και άρα τόσο λιγότερος χώρος χάνεται ως padding. Αντίθετα, όπως επισημάνθηκε παραπάνω, στην περίπτωση ενθυλάκωσης μοναδικού πακέτου IP, η απόδοση ενθυλάκωσης μειώνεται καθώς αυξάνει ο ρυθμός κωδικοποίησης. Δηλαδή παρατηρείται μείωση της απόδοσης καθώς αυξάνει ο αριθμός των ψηφίων KBCH που απαιτείται για το κάθε πλαίσιο.



Σχήμα 3.11 - Απόδοση ενθυλάκωσης στο επίπεδο mode and stream adaptation ως συνάρτηση του μήκους πακέτων IP (περίπτωση normal FECFRAME)

3.8.3 Απόδοση πλαισίωσης (Framing efficiency)

Στο επίπεδο πλαισίωσης εξετάζεται η απόδοση ως συνάρτηση της τάξης της χρησιμοποιούμενης διαμόρφωσης, δηλαδή της φασματικής απόδοσης κάθε σχήματος. Στον ακόλουθο Πίνακα 3.3, παρουσιάζονται οι τιμές της απόδοσης πλαισίωσης για τα πιο συνηθισμένα σχήματα διαμόρφωσης. Εν γένει, καθώς αυξάνει η τάξη της διαμόρφωσης, μειώνεται η framing efficiency.

Πίνακας 3.3 - Απόδοση πλαισίωσης για διάφορα σχήματα διαμόρφωσης

η_{MOD} (bits/s/Hz)	$\psi_{framing}(\eta_{MOD})$	
	Normal FECFRAME	Short FECFRAME
2 (QPSK)	97.35	96.77
3 (8PSK)	97.32	96.46
4 (16APSK)	97.09	96.15
5 (32APSK)	97.17	95.24

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα του πίνακα, η εξάρτηση της απόδοσης ενθυλάκωσης από τη χρησιμοποιούμενη διαμόρφωση είναι σχετικά χαμηλή, για συγκεκριμένο μήκος πλαισίου FECFRAME. Επομένως, η εξάρτηση από τη φασματική απόδοση είναι δυνατόν να αγνοηθεί, οπότε η ολική απόδοση ενθυλάκωσης υπολογίζεται προσεγγιστικά από τη σχέση [Castro et al., 2004]

$$\psi_{tot}(\eta_{COD}, L_{IP}, L) = \psi_{MPEG}(L_{IP}) \cdot \psi_{DVB-S2}(\eta_{COD}, L) = \psi_{MPEG}(L_{IP}) \cdot \psi_{MS}(\eta_{COD}, L) \quad (3.19)$$

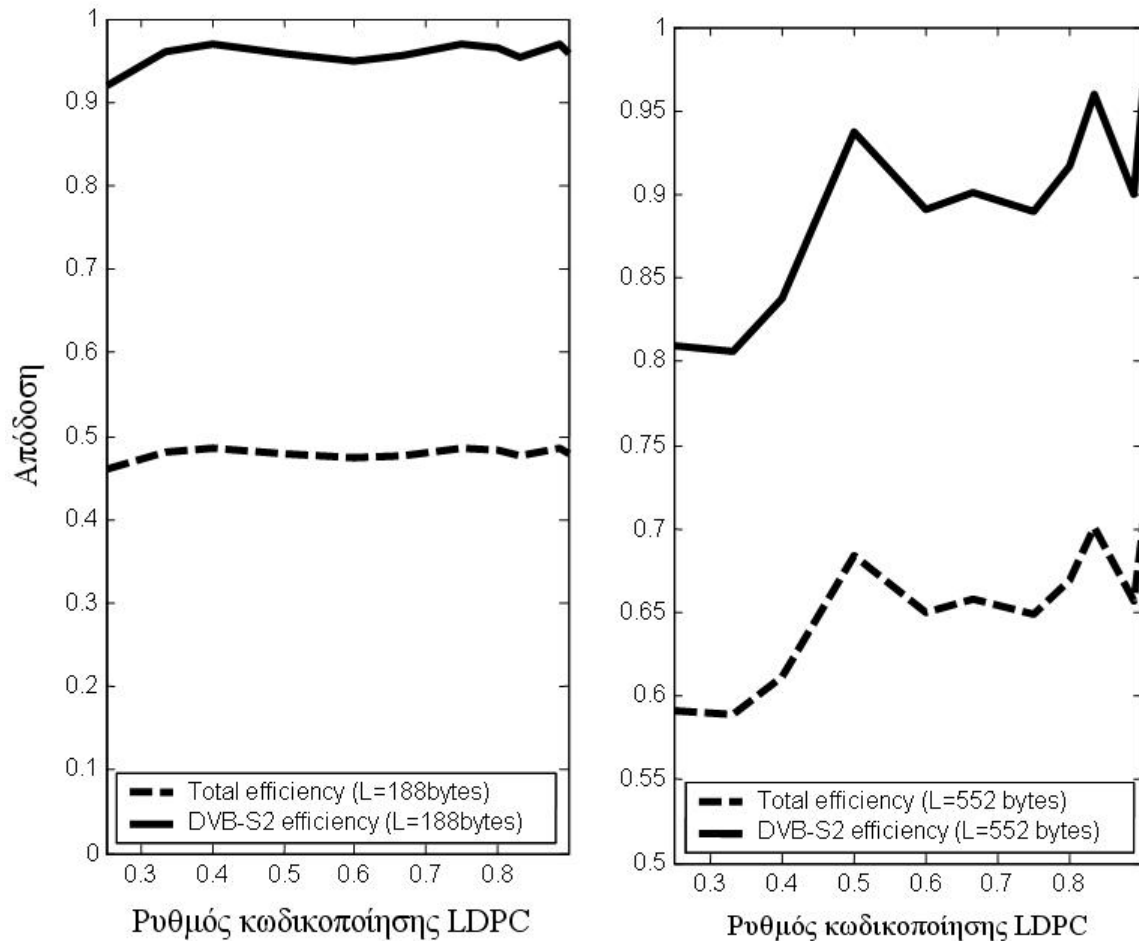
3.8.4 Ολική απόδοση ενθυλάκωσης (Total encapsulation efficiency)

Έπειτα από την εξέταση της απόδοσης κάθε επιπέδου ξεχωριστά, απομένει η μελέτη της ολικής απόδοσης ενθυλάκωσης. Είναι φανερό ότι η τελική τιμή της απόδοσης προκύπτει ως το γινόμενο των τριών επιμέρους αποδόσεων για κάθε στρώμα. Για τη μελέτη της ολικής απόδοσης πρέπει να ληφθεί υπόψη ένας σημαντικός αριθμός υποπεριπτώσεων, εφόσον είναι δυνατοί διάφοροι συνδυασμοί για τις περιπτώσεις κάθε επιπέδου. Για παράδειγμα, είναι πιθανό να χρησιμοποιείται απευθείας ενθυλάκωση των πακέτων IP στο DVB-S2 ή να χρησιμοποιείται ενθυλάκωση MPEG/MPE, να επιτρέπεται ο μηχανισμός της αλληλουχίας πακέτων ή όχι κτλ.

Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας είναι η πληρότητα του ωφέλιμου φορτίου (payload occupancy), ένα μέγεθος που ουσιαστικά ισούται με το ποσοστό του χρόνου κατά το οποίο υπάρχει διαθέσιμη πληροφορία προς μετάδοση. Στην περίπτωση που η είσοδος δεν τροφοδοτείται με δεδομένα χρήστη για κάποιο χρονικό διάστημα, το μεταδιδόμενο πακέτο συμπληρώνεται με πλαστά πλαίσια (dummy frames). Το γεγονός αυτό έχει φυσικά αρνητικό αντίκτυπο στην ολική απόδοση ενθυλάκωσης. Σημειώνεται ότι αν για payload occupancy ίσο με 100% η ολική απόδοση είναι ψ_{tot} , όταν το ποσοστό διαθεσιμότητας πληροφορίας μειωθεί σε α (%), η ολική απόδοση μειώνεται κατά το ίδιο ποσοστό και λαμβάνει την τιμή $\alpha \cdot \psi_{tot}$.

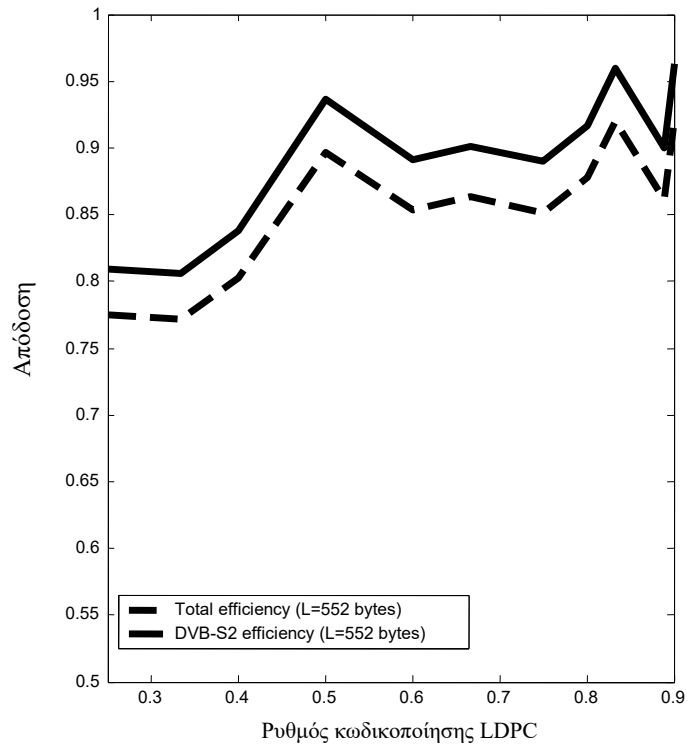
Αρχικά, εξετάζεται η περίπτωση ενθυλάκωσης MPEG/MPE, όταν δεν επιτρέπεται το concatenation. Στο Σχήμα 3.12 παρουσιάζονται συγκριτικά η ολική απόδοση ενθυλάκωσης και η απόδοση ενθυλάκωσης DVB-S2 για δυο διαφορετικά μήκη πακέτων ($L=40$ και 552 bytes) με χρήση normal FECFRAME. Όπως ήταν αναμενόμενο, η συνολική απόδοση υπολείπεται της απόδοσης DVB-S2, εξαιτίας του επιπέδου MPEG. Ειδικά για την περίπτωση μικρών πακέτων, η ολική απόδοση δε λαμβάνει υψηλές τιμές, περίπου 50%, ενώ για μεγαλύτερες τιμές πακέτων είναι δυνατόν να φτάσει σε τιμές από 60% έως 70%. Η

αύξηση της απόδοσης για μήκος $L=552$ bytes σε σχέση με το μήκος $L=188$ bytes οφείλεται στο γεγονός ότι αυξάνεται αντίστοιχα και η ψ_{MPEG} . Το γεγονός της βελτίωσης της απόδοσης του σταδίου MPEG όταν χρησιμοποιείται μεγαλύτερο μήκος πακέτων είχε επισημανθεί στην αντίστοιχη ανάλυση (βλ. Σχήμα 3.5).

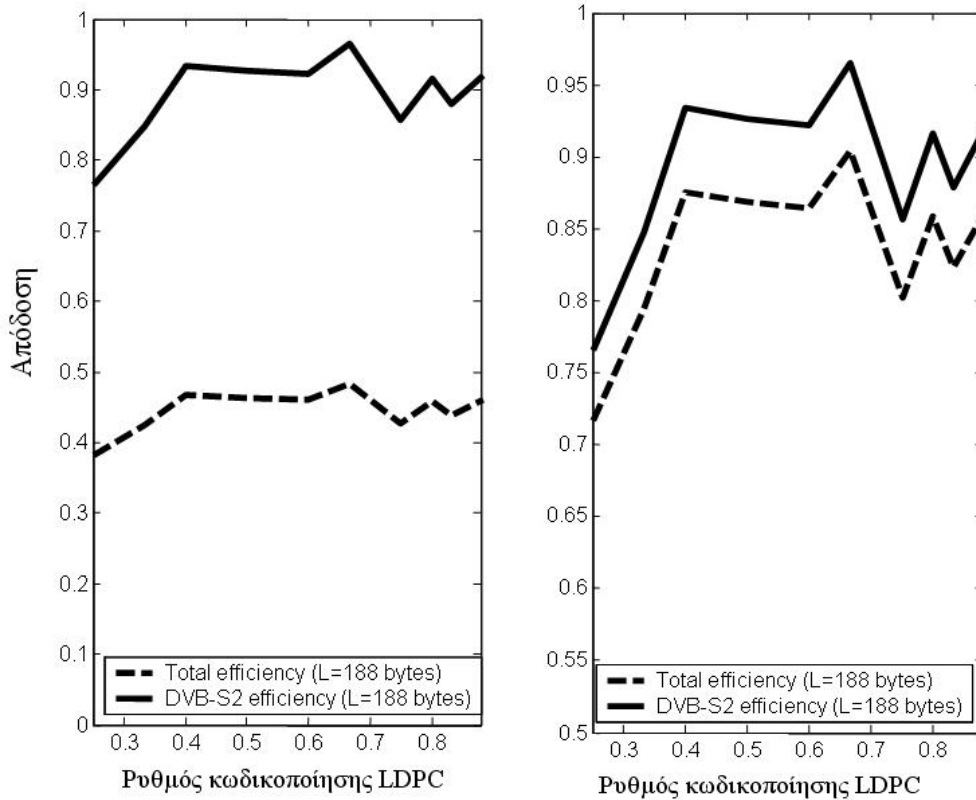


Σχήμα 3.12 - Σύγκριση ολικής απόδοσης ενθυλάκωσης και απόδοσης DVB-S2 (normal FECFRAME)

Σημειώνεται ότι στην περίπτωση που επιτρέπεται η αλληλουχία μονάδων SNDU παρατηρείται μια σημαντική βελτίωση στην ολική απόδοση ενθυλάκωσης που φτάνει μέχρι και 15% (για μήκος πακέτων $L=552$ bytes, βλ. Σχήμα 3.13). Παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν και για την περίπτωση χρήσης πλαισίων short FECFRAME, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.14. Και εδώ παρατηρείται σημαντική αύξηση της ολικής απόδοσης όταν χρησιμοποιείται concatenation.



Σχήμα 3.13 - Σύγκριση ολικής απόδοσης ενθυλάκωσης και απόδοσης DVB-S2 όταν επιτρέπεται concatenation



Σχήμα 3.14 - Σύγκριση ολικής απόδοσης και απόδοσης DVB-S2, όταν δεν επιτρέπεται και όταν επιτρέπεται το concatenation

Στη συνέχεια ακολουθεί ο υπολογισμός της ολικής απόδοσης ενθυλάκωσης ως συνάρτηση του ποσοστού payload occupancy. Εξετάζονται διάφορα δυνατά ενδεχόμενα, όπως η απευθείας εισαγωγή των πακέτων IP (IP directly) σε DVB-S2 (generic IP stream) ή η χρήση ενθυλάκωσης MPEG/MPE, είτε όταν επιτρέπεται η συνένωση πακέτων είτε όχι. Με τον τρόπο αυτό προέκυψε ο Πίνακας 3.4 ο οποίος περιέχει κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα για τις τιμές που λαμβάνει η ολική απόδοση ενθυλάκωσης κατά τις προηγούμενες περιπτώσεις. Για την προσομοίωση που αφορούσε στα normal πλαίσια θεωρήθηκε μήκος πακέτου ίσο με 552 bytes, ρυθμός κωδικοποίησης ίσος με 9/10 και διαμόρφωση QPSK. Αντίστοιχα, για τα short πλαίσια θεωρήθηκε μήκος πακέτου ίσο με 188 bytes, ρυθμός κωδικοποίησης ίσος με 3/5 και διαμόρφωση QPSK.

Πίνακας 3.4 – Ολική απόδοση ενθυλάκωσης συναρτήσει του ποσοστού payload occupancy

	IP directly			MPE, Concatenation			MPE, no Concatenation		
	Full	50%	20%	Full	50%	20%	Full	50%	20%
Normal FECFRAME (64800 bits)	0.962	0.481	0.192	0.921	0.461	0.184	0.702	0.351	0.140
Short FECFRAME (16200 bits)	0.922	0.461	0.184	0.864	0.432	0.173	0.461	0.231	0.092

Όπως ήταν αναμενόμενο, οι μεγαλύτερες τιμές της ολικής απόδοσης επιτυγχάνονται στην περίπτωση απευθείας ενθυλάκωσης των πακέτων IP στα DVB-S2 πλαίσια, εφόσον η απόδοση τότε είναι $\psi_{MPEG}(L_{IP})=1$. Είναι εμφανής επίσης η βελτίωση της απόδοσης όταν χρησιμοποιείται ο μηχανισμός της αλληλουχίας των πακέτων. Τέλος, για να είναι σε θέση το σύστημα να επιτύχει υψηλές τιμές απόδοσης πρέπει να τροφοδοτείται συνεχώς με πακέτα χρήστη προς μετάδοση. Πρέπει δηλαδή οι απομονωτές (buffers) στον πομπό να προσφέρουν αδιαλείπτως δεδομένα προς μετάδοση έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το padding.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΥΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ DVB-S2

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις προηγούμενες ενότητες έγινε περιγραφή και σύγκριση των δορυφορικών προτύπων DVB-S και DVB-S2, αλλά και αναλυτική μελέτη της διαδικασίας ενθυλάκωσης πακέτων IP σε συστήματα DVB-S2. Επίσης, επισημάνθηκε η σπουδαιότητα της υιοθέτησης της τεχνικής ACM σε συνδυασμό με τη χρήση δορυφόρων με δυνατότητες on-board επεξεργασίας. Περαιτέρω ώθηση στην ανάπτυξη των ασύρματων επικοινωνιών γενικότερα, αλλά και των δορυφορικών επικοινωνιών ειδικότερα, έγινε δυνατή με την εμφάνιση της προσαρμογής του φυσικού επιπέδου (physical layer adaptation) ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο κανάλι και στο σύστημα. Η προσαρμογή αυτή οδηγεί σε αύξηση της απόδοσης του συστήματος, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει την υλοποίηση νέων, πιο απαιτητικών εφαρμογών.

Σημαντικό στοιχείο για την εισαγωγή νέας γενιάς εφαρμογών και υπηρεσιών είναι η αυξημένη απόδοση, σε ποσοστό 30% περίπου, που προσφέρει η χρήση του DVB-S2 σε σχέση με τον προκάτοχό του, το DVB-S. Το νέο πρότυπο έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να συνδυάζει τη λειτουργικότητα τόσο του DVB-S, για εφαρμογές απευθείας-στην-οικία του χρήστη, όσο και του DVB-DSNG, για επαγγελματικές εφαρμογές. Με τον τρόπο αυτό διευρύνεται η ποικιλία των εφαρμογών που υποστηρίζονται από το DVB-S2. Ορισμένες από τις σπουδαιότερες υπηρεσίες, από εμπορικής σκοπιάς, που προσφέρονται από το σύστημα DVB-S2 είναι οι εξής [ETSI EN 302 307, 2005]:

- Υπηρεσίες Ευρυεκπομπής (Broadcast Services): Οι υπηρεσίες ευρυεκπομπής παρέχονται σήμερα σε εκατομμύρια δέκτες IRD μέσω του αρχικού προτύπου DVB-S. Όμως, η αυξημένη ευελιξία του DVB-S2, που επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης ACM, θα επιτρέπει στο μέλλον διάφορα επίπεδα προστασίας από τις δυσμενείς συνθήκες στο κανάλι, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε υπηρεσίας. Παράδειγμα αποτελεί η ανθεκτική υπηρεσία μετάδοσης τηλεοπτικού σήματος Κανονικής Ευκρίνειας και η λιγότερο ανθεκτική Τηλεόραση Υψηλής Ευκρίνειας.

Σημειώνεται ότι υπάρχουν Υπηρεσίες Ευρυεκπομπής συμβατές με παλαιότερες γενιές του προτύπου (Backwards Compatible Broadcast Services, BC-BS), οι οποίες ενισχύουν τη διαλειτουργικότητα με τους αποκωδικοποιητές DVB-S. Ταυτόχρονα υπάρχουν και ορισμένες πιο εξελιγμένες υπηρεσίες, οι οποίες δεν είναι συμβατές με την προηγούμενη γενιά (Non Backwards Compatible Broadcast Services, NBC-BS), αλλά εκμεταλλεύονται σε μεγαλύτερο βαθμό τις δυνατότητες της νέας προδιαγραφής. Οι νέοι δέκτες DVB-S2 έχουν αυξημένες δυνατότητες ως προς τη χωρητικότητα και μπορούν να αντιμετωπίσουν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης για υπηρεσίες ευρυεκπομπής.

- Αλληλεπιδραστικές Υπηρεσίες (Interactive Services): Οι αλληλεπιδραστικές υπηρεσίες έχουν σχεδιαστεί προκειμένου να χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με το κανάλι επιστροφής (Return Channel, RC), όπως αυτό προδιαγράφεται από το πρότυπο DVB. Για παράδειγμα χρησιμοποιούνται με τα πρότυπα RC-PSTN και RCS, τα οποία αφορούν κανάλια επιστροφής μέσω του δημόσιου τηλεφωνικού δικτύου και μέσω δορυφόρου αντίστοιχα. Όπως έχουμε προαναφέρει, το DVB-S2 είναι δυνατόν να λειτουργεί τόσο με σταθερή (CCM) όσο και με προσαρμοστική (ACM) κωδικοποίηση και διαμόρφωση. Η τεχνική ACM είναι δυνατόν να υλοποιηθεί με δυο τρόπους λειτουργίας. Στον αποκεντρωμένο τρόπο λειτουργίας (decentralized mode), κάθε τερματικό δέκτη αποκτά τη δυνατότητα να ελέγχει το επίπεδο προστασίας για την κίνηση που απευθύνεται σε αυτό. Αντίθετα, στο συγκεντρωτικό τρόπο λειτουργίας (centralized mode), το επίπεδο προστασίας για κάθε τερματικό καθορίζεται από τον κεντρικό σταθμό (gateway station). Μέσω του καναλιού επιστροφής δημιουργείται ένας βρόχος ανάδρασης (feedback) ανάμεσα στο δορυφόρο, τα τερματικά των χρηστών και τον κεντρικό σταθμό. Οι υπηρεσίες δεδομένων της κατηγορίας αυτής υλοποιούνται με τη χρήση Ρεύματος Μεταφοράς TS (απλού ή πολλαπλού) ή με τη χρήση Γενικού (Generic) Ρεύματος (απλού ή πολλαπλού). Από τις σπουδαιότερες υπηρεσίες της κατηγορίας αυτής είναι η πρόσβαση στο διαδίκτυο (Internet access).
- Συμβολή Ψηφιακής Τηλεόρασης (Digital Television Contribution, DTVC) και Συλλογή Ψηφιακών Δορυφορικών Ειδήσεων (Digital Satellite News Gathering, DSNG): Οι υπηρεσίες DTVC/DSNG στηρίζονται στο εμπορικό πρότυπο DVB-DSNG, διευκολύνοντας τη μετάδοση απλών ή πολλαπλών ρευμάτων μεταφοράς

MPEG για επικοινωνίες σημείου προς σημείο ή σημείου προς πολλαπλά σημεία. Γενικά, δεν προορίζονται για λήψη από το ευρύ κοινό, αλλά αφορούν τη σύνδεση σταθερών ή κινητών σταθμών άνω ζεύξης και σταθμών λήψης. Για παράδειγμα, ένα κινητό συνεργείο που βρίσκεται σε εξωτερικούς χώρους είναι δυνατόν να επικοινωνεί με το κεντρικό τηλεοπτικό στούντιο χρησιμοποιώντας δορυφορικές ζεύξεις. Οι υπηρεσίες αυτές υλοποιούνται με απλά ή πολλαπλά ρεύματα μεταφοράς MPEG και είναι δυνατή η χρήση τόσο CCM όσο και ACM. Στη συγκεκριμένη κατηγορία υπηρεσιών συμπεριλαμβάνονται και οι υπηρεσίες διανομής τηλεοπτικού περιεχομένου σε επίγειους αναμεταδότες, οι οποίοι με τη σειρά τους μετατρέπουν το τηλεοπτικό σήμα σε συχνότητες VHF/UHF για τηλεοπτική χρήση.

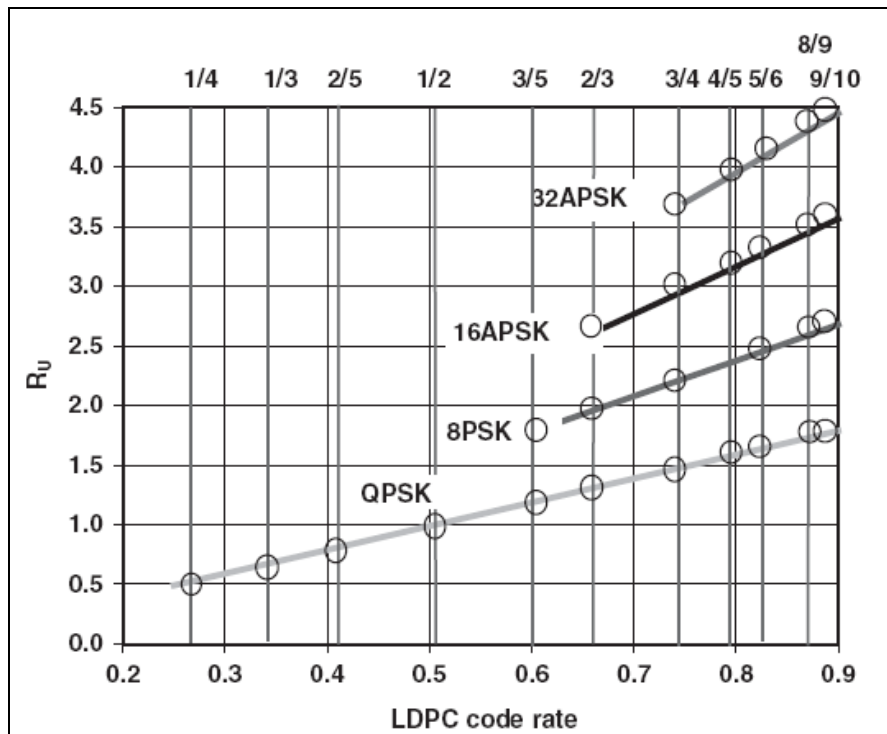
- Άλλες Επαγγελματικές Υπηρεσίες (Professional Services, PS): Η κατηγορία αυτή αφορά κυρίως αλληλεπιδραστικές υπηρεσίες προς την κεντρική εγκατάσταση μιας εταιρείας για την εξυπηρέτηση επαγγελματικών σκοπών. Μέσω της κεντρικής εγκατάστασης πραγματοποιείται στη συνέχεια εκ νέου διανομή των υπηρεσιών προς άλλα μέσα ή προς τους τελικούς χρήστες. Οι ζεύξεις που χρησιμοποιούνται είναι σημείου προς σημείο ή σημείου προς πολλαπλά σημεία και τα αντίστοιχα συστήματα παρέχουν τη δυνατότητα χρήσης οποιασδήποτε τεχνικής κωδικοποίησης και διαμόρφωσης (CCM, VCM ή ACM). Στις υπηρεσίες αυτές περιλαμβάνονται για παράδειγμα η Διανομή Δεδομένων (Data Content Distribution) και η Υπηρεσία Κορμού Διαδικτύου (Internet Trunking Service, ITS). Συγκεκριμένα, μέσω της υπηρεσίας ITS δίνεται η δυνατότητα στους διάφορους τηλεπικοινωνιακούς φορείς και τους παρόχους υπηρεσιών διαδικτύου να επεκτείνουν τις δραστηριότητές τους σε απομονωμένες περιοχές, οι οποίες δεν είναι δυνατό να καλυφθούν οικονομικά με άλλα ενσύρματα ή ασύρματα συστήματα. Οι περιοχές αυτές μπορούν πλέον με τη βοήθεια του DVB-S2 να αποκτήσουν άμεση πρόσβαση στο διαδίκτυο σε υψηλές ταχύτητες και να απολαμβάνουν το ίδιο επίπεδο υπηρεσιών με τις αστικές περιοχές, όπου η υποδομή του δικτύου είναι σαφώς ανώτερη.

Στη συνέχεια ακολουθεί ανάλυση κάποιων από τις σπουδαιότερες νέες εφαρμογές που στηρίζονται στο DVB-S2 και αναμένεται να διαδοθούν ευρύτατα τα προσεχή έτη.

4.2 ΕΚΠΟΜΠΗ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΤΗΛΕΟΠΤΙΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΗ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ (CCM DIGITAL TV BROADCASTING)

Η εκπομπή ψηφιακής τηλεόρασης είναι η πιο διαδεδομένη υπηρεσία που παρέχουν τα δορυφορικά δίκτυα σήμερα. Μέσω αυτής είναι δυνατή η παροχή κινούμενης εικόνας (βίντεο), ήχου και άλλων δεδομένων με στόχο ένα μεγάλο εύρος χρηστών, χωρίς να είναι απαραίτητη η παρουσία πολύπλοκης υποδομής. Η υπηρεσία αυτή περιλαμβάνεται και στο κλασικό πρότυπο DVB-S και στο επαγγελματικό DVB-DSNG. Επομένως, στην ενότητα αυτή θα δοθεί μεγαλύτερη έμφαση στη μελέτη του ρυθμού μετάδοσης και των απαιτήσεων ως προς το σηματοθορυβικό λόγο, αλλά και τη βελτίωση της απόδοσης που επιτυγχάνεται μέσω του DVB-S2. Η συγκεκριμένη υπηρεσία υλοποιείται από τα συστήματα αυτά με χρήση της τεχνικής Σταθερής Κωδικοποίησης και Διαμόρφωσης (Constant Coding and Modulation, CCM). Επομένως, όλα μεταδιδόμενα σήματα μεταδίδονται με το ίδιο επίπεδο προστασίας από σφάλματα.

Τα συστήματα DVB-S2 μπορούν να λειτουργήσουν σε διατάξεις που χρησιμοποιούν πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (FDM), είτε με απλό φέρον ανά αναμεταδότη (Single Carrier Per Transponder, SCPT) είτε με πολλαπλά φέροντα ανά αναμεταδότη (Multiple Carrier Per Transponder, MCPT). Όπως έχει αναφερθεί, ο ρυθμός μετάδοσης συμβόλων R_s μπορεί να αντιστοιχηθεί στο δεδομένο εύρος ζώνης BW του αναμεταδότη (απλό φέρον) ή στη θυρίδα συχνότητας BS (πολλαπλά φέροντα). Σημειώνεται ότι θυρίδα συχνότητας ονομάζεται το τμήμα του συνολικού εύρους ζώνης που ανατίθεται στην εκάστοτε υπηρεσία. Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζονται παραδείγματα του ωφέλιμου ρυθμού μετάδοσης συμβόλων R_u που επιτυγχάνεται από το σύστημα ως συνάρτηση του ρυθμού εσωτερικής κωδικοποίησης LDPC. Για τα συγκεκριμένα παραδείγματα έχει χρησιμοποιηθεί CCM, πλαίσια FECFRAME κανονικού μήκους (64800 bits), ενώ δεν υπήρξε εισαγωγή ψηφίων παραγεμίσματος ούτε πιλοτικών συμβόλων. Όπως είναι φανερό, η αύξηση του ρυθμού κωδικοποίησης, δηλαδή η χρήση περισσότερων ψηφίων χρήστη για συγκεκριμένο αριθμό ψηφίων, οδηγεί σε αύξηση του ωφέλιμου ρυθμού μετάδοσης και άρα της απόδοσης του συστήματος. Παράλληλα, η υιοθέτηση σχημάτων διαμόρφωσης υψηλής τάξης (π.χ. 16APSK ή 32APSK) επιτρέπει τη μετάδοση με μεγαλύτερους ρυθμούς, υπό την προϋπόθεση φυσικά ότι οι συνθήκες στο κανάλι είναι οι κατάλληλες.



Σχήμα 4.1 - Ωφέλιμοι ρυθμοί μετάδοσης συναρτήσει του ρυθμού κωδικοποίησης του συνελκτικού κωδικοποιητή

Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση των απαιτήσεων των συστημάτων DVB-S και DVB-S2 ως προς τον απαιτούμενο σηματοθορυβικό λόγο του συστήματος και ισοδύναμα της φασματικής απόδοσης που επιτυγχάνει καθένα από αυτά. Γενικά, το κέρδος ισχύος του DVB-S2 σε σχέση με το πρότυπο της προηγούμενης γενιάς ανέρχεται στα 2-2.5dB, για συγκεκριμένη φασματική απόδοση. Ισοδύναμα, υποθέτοντας δεδομένο σηματοθορυβικό λόγο για τα δύο συστήματα, το κέρδος που επιτυγχάνεται από τη χρήση του DVB-S2 προς τη φασματική απόδοση φτάνει τα 0.3-0.4 bit/s/Hz [Morello & Reimers, 2004]. Τέλος, υπενθυμίζεται ότι οι διαμορφώσεις με σχεδόν σταθερή περιβάλλουσα, όπως οι QPSK και 8PSK, είναι ιδιαίτερα αποδοτικές ως προς την ισχύ, εφόσον μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με ενισχυτές που λειτουργούν κοντά στον κορεσμό. Από την άλλη, οι διαμορφώσεις ανώτερης τάξης, όπως οι 16APSK ή 32APSK, είναι πιο ευαίσθητες στις μη γραμμικές παραμορφώσεις, επομένως απαιτούν τη χρήση γραμμικών ενισχυτών. Το πλεονέκτημά τους όμως έγκειται στο ότι επιτυγχάνουν καλύτερες αποδόσεις ως προς τη φασματική απόδοση. Παρατηρείται δηλαδή μια ανταλλαγή (trade-off) μεταξύ εύρους ζώνης (ρυθμού μετάδοσης) και ισχύος.

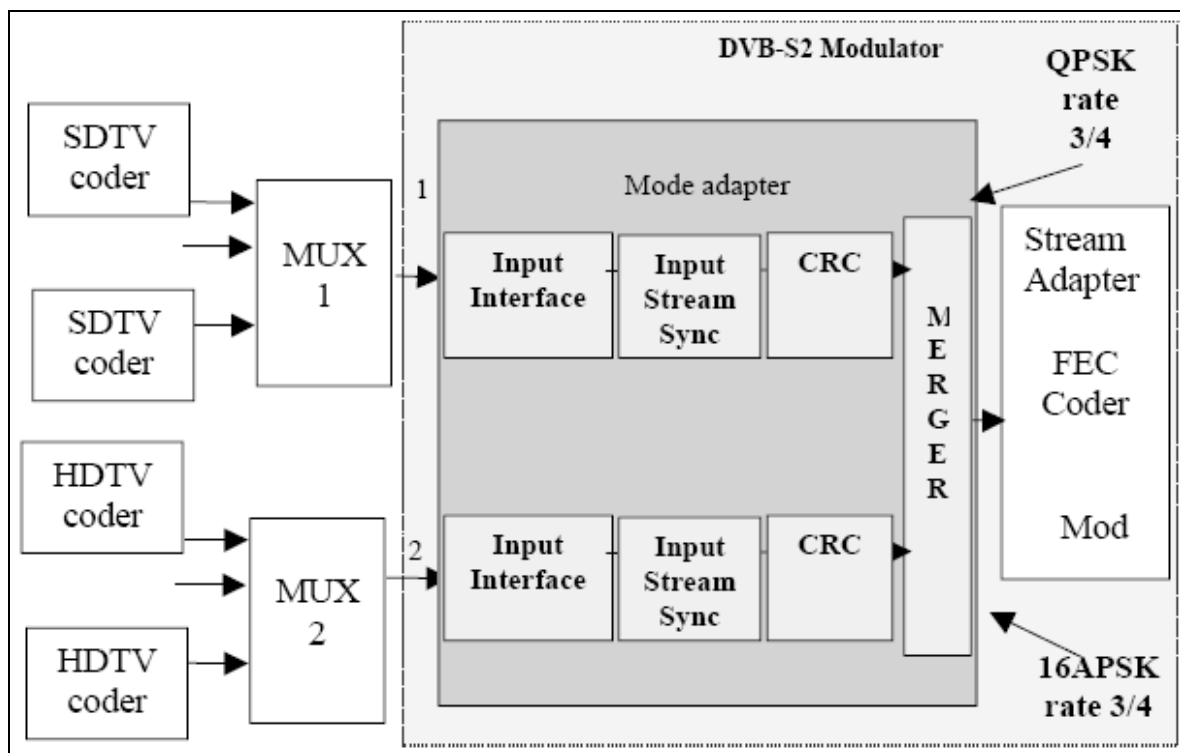
4.3 ΕΚΠΟΜΠΗ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΤΗΛΕΟΠΤΙΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΨΗΛΗΣ ΕΥΚΡΙΝΕΙΑΣ (SDTV AND HDTV BROADCASTING)

Η εκπομπή τηλεοπτικού σήματος μέσω δορυφόρου αφορά σήμερα τόσο την Τηλεόραση Κανονικής Ευκρίνειας (Standard Definition Television, SDTV) όσο και την Τηλεόραση Υψηλής Ευκρίνειας (High Definition Television, HDTV). Η τελευταία αναφέρεται στη μετάδοση τηλεοπτικών σημάτων μεγαλύτερης ανάλυσης από αυτά που χρησιμοποιούνται στα παραδοσιακά σχήματα όπως το NTSC, το SECAM και το PAL. Όπως είναι φανερό, μια υψηλής ανάλυσης πηγή θα έχει μεγαλύτερες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης και ρυθμό μετάδοσης προκειμένου να είναι εφικτή η μετάδοση του σήματος χωρίς απώλεια της ποιότητας. Οι απαιτήσεις αυτές ικανοποιούνται από την υιοθέτηση του νέου προτύπου DVB-S2.

Για τη παροχή υπηρεσιών εκπομπής HDTV, αλλά και SDTV, τα συστήματα DVB-S2 χρησιμοποιούν διαφορετικά επίπεδα προστασίας από σφάλματα στα διάφορα σήματα πολυπλεξίας. Χρησιμοποιείται δηλαδή η τεχνική της Μεταβλητής Κωδικοποίησης και Διαμόρφωσης (Variable Coding and Modulation, VCM). Η τεχνική VCM παρουσιάζει ομοιότητες με την ACM, καθώς και οι δυο χρησιμοποιούν ένα εύρος τιμών για το ρυθμό κωδικοποίησης. Η διαφορά τους έγκειται στο γεγονός ότι η VCM υιοθετεί διαφορετικούς ρυθμούς για τις διάφορες υπηρεσίες με το ρυθμό κάθε υπηρεσίας να παραμένει σταθερός, ενώ η ACM αναπροσαρμόζει το ρυθμό κάθε υπηρεσίας με βάση τις συνθήκες που επικρατούν στο κανάλι. Γενικά, η λειτουργικότητα της τεχνικής VCM σε συνδυασμό με κάποιο κανάλι επιστροφής RC επιτρέπει την εφαρμογή της ACM. Η μετάδοση των σημάτων πραγματοποιείται μέσω πολλαπλών ρευμάτων μεταφοράς TS. Για παράδειγμα, μια τυπική εφαρμογή αυτής είναι η ευρυεκπομπή ενός πολυπλεγμένου σήματος SDTV, το οποίο διαθέτει υψηλή προστασία, και ενός σήματος HDTV με χαμηλότερη προστασία. Σημειώνεται ότι στα συστήματα DVB-S2 δεν υπάρχει η δυνατότητα διαφοροποίησης του επιπέδου προστασίας μέσα στο ίδιο ρεύμα μεταφοράς TS.

Στο ακόλουθο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται από τη σκοπιά του πομπού η αντίστοιχη διάταξη με την οποία σχηματίζεται το πολυπλεγμένο σήμα που μόλις περιγράφηκε. Για το παράδειγμα αυτό υποτίθεται ρυθμός μετάδοσης συμβόλων 27.5Mbaud και χρήση διαμορφώσεων 8PSK 3/4 για τα σήματα HDTV και QPSK 2/3 για τα σήματα SDTV. Δηλαδή για το σήμα HDTV χρησιμοποιείται διαμόρφωση υψηλότερης τάξης και υψηλότερος ρυθμός κωδικοποίησης σε σχέση με το σήμα SDTV. Το γεγονός αυτό

συνεπάγεται ότι η αντίστοιχη προστασία είναι χαμηλότερη για το σήμα HDTV, αλλά είναι δυνατή η μετάδοσή του με υψηλότερους ρυθμούς ψηφίων, ώστε να ικανοποιηθούν οι μεγαλύτερες απαιτήσεις του σε χωρητικότητα. Επίσης, για την υλοποίηση της συγκεκριμένης διάταξης χρησιμοποιούνται πολλαπλά ρεύματα μεταφοράς και η τεχνική VCM. Ο συντελεστής roll-off είναι ίσος με 0.25, ενώ δεν προστίθενται ψηφία παραγεμίσματος. Τέλος, χρησιμοποιούνται πλαίσια FECFRAME κανονικού μήκους (64800 bits), ενώ εισάγονται και τα απαραίτητα πιλοτικά σύμβολα. Στην περίπτωση αυτή θα είναι τελικώς διαθέσιμα 40Mbit/s για δυο προγράμματα HDTV και 12Mbit/s για δυο προγράμματα SDTV. Η διαφορά στις απαιτήσεις του σηματοθορυβικού λόγου θα ανέρχεται περίπου στα 5dB με 5.5dB [ETSI EN 302 307, 2005].



Σχήμα 4.2 – Διάταξη συστήματος DVB-S2 για την εκπομπή SDTV και HDTV με χρήση VCM

Σημειώνεται ότι εκτός από το κλασικό σχήμα MPEG-2, είναι δυνατή η χρήση και διαφόρων άλλων τεχνικών κωδικοποίησης κινούμενης εικόνας. Τα συστήματα DVB-S2 επωφελούνται λοιπόν από τη χρήση νέων, ανεπτυγμένων τεχνικών κωδικοποίησης βίντεο (Advanced Video Coding, AVC). Η προσφορά των τεχνικών αυτών έγκειται στη μείωση του απαιτούμενου εύρους ζώνης, ενώ οι σημαντικότερες είναι οι ακόλουθες:

- MPEG-4: Αποτελεί μέρος της οικογένειας των διεθνών προτύπων με ονομασία MPEG (Motion Pictures Experts Group) και χρησιμοποιείται κυρίως για τη συμπίεση ψηφιακών δεδομένων εικόνας και ήχου [www.mpeg.org].
- H.264 ή MPEG-4 Part 10: Το πρότυπο αυτό χρησιμοποιείται για την κωδικοποίηση ψηφιακού βίντεο και επιτυγχάνει υψηλό ποσοστό συμπίεσης δεδομένων. Είναι αποτέλεσμα της συνεργασίας της ομάδας MPEG με την αντίστοιχη ομάδα της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (ITU-T Video Coding Experts Group, VCEG) [www.apple.com/mpeg4].
- WM9 (Windows Media): Αποτελεί τη σειρά κωδικοποιητών βίντεο και ήχου της Microsoft με δυνατότητες μετάδοσης ροής οπτικοακουστικού περιεχομένου σε οποιοδήποτε δίκτυο [www.microsoft.com].

Ο συνδυασμός DVB-S2 και κωδικοποίησης AVC επιτρέπει τη μετάδοση μεγάλου αριθμού καναλιών SDTV ανά αναμεταδότη (από 21 μέχρι και 26). Παράλληλα ευνοεί και την εισαγωγή νέων υπηρεσιών HDTV με ικανοποιητικό αριθμό προγραμμάτων ανά αναμεταδότη (από 5 μέχρι 6). Το αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η σημαντική μείωση του κόστους ανά κανάλι του αναμεταδότη αναφορικά με τη χωρητικότητα μετάδοσης του δορυφόρου.

4.4 ΔΙΑΝΟΜΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΕ ΕΠΙΓΕΙΟΥΣ ΑΝΑΜΕΤΑΔΟΤΕΣ (DISTRIBUTION OF MULTIPLE TS MULTIPLEXES TO DTT TRANSMITTERS)

Μια από τις νέες δυνατότητες που διαθέτει το πρότυπο DVB-S2 είναι η διανομή τηλεοπτικών σημάτων σε επίγειους σταθμούς, οι οποίοι αναλαμβάνουν στη συνέχεια την αναμετάδοση του περιεχομένου. Η Επίγεια Ψηφιακή Τηλεόραση (Digital Terrestrial Television, DTT), η οποία πραγματοποιεί δυναμική είσοδο σε πολλές χώρες παγκοσμίως, αφορά τη διανομή ρευμάτων MPEG στους ψηφιακούς επίγειους πομπούς. Τα υπάρχοντα συστήματα βασίζονται στο DVB-S, επιτρέποντας τη μετάδοση ενός απλού ρεύματος MPEG ανά φέρον. Επομένως, για τη μετάδοση η πολυπλεγμένων ρευμάτων MPEG, απαιτούνται συνολικά η φέροντα ανά αναμεταδότη. Το γεγονός αυτό αποτελεί σπατάλη πόρων και εισαγωγή επιπρόσθετου κόστους, αφού είναι υποχρεωτική η χρήση ενός ενισχυτή ισχύος με μεγάλο περιθώριο ισχύος εξόδου ή εναλλακτικά η χρήση η

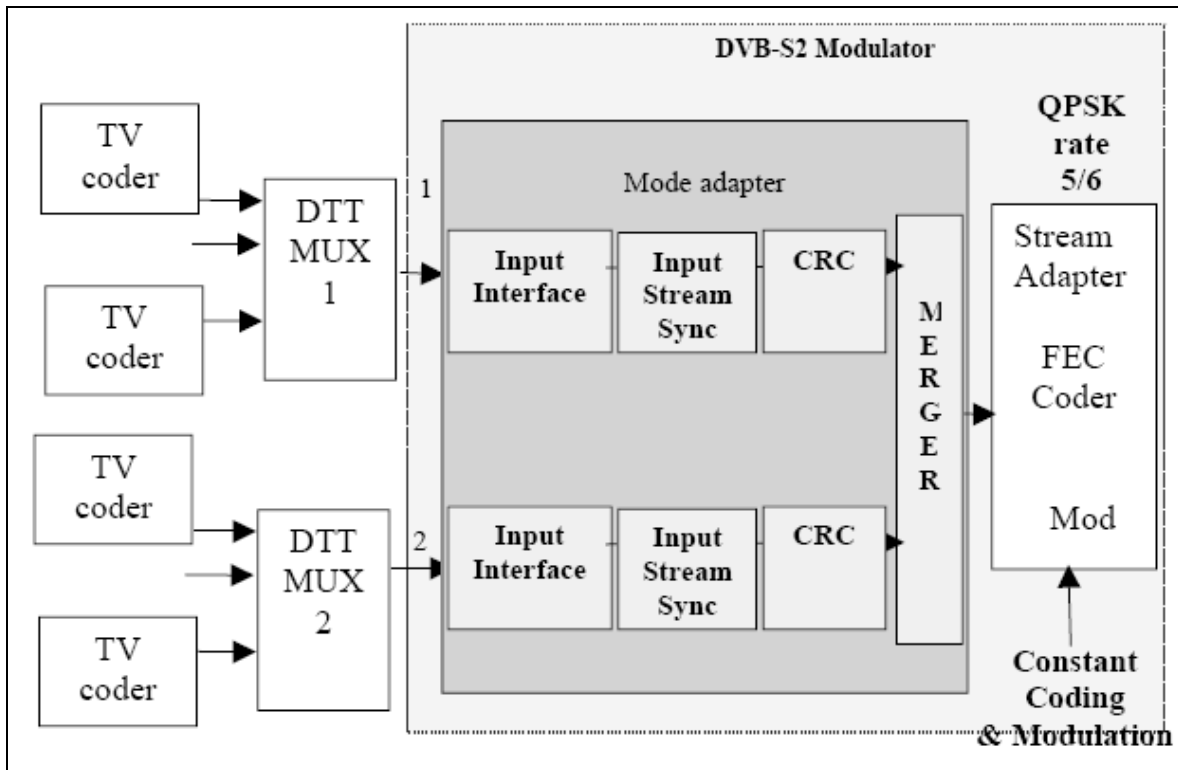
διαφορετικών αναμεταδοτών. Αντιθέτως, η υιοθέτηση του προτύπου DVB-S2 επιτρέπει τη διανομή πολλαπλών πολυπλεγμένων ρευμάτων MPEG στους επίγειους ψηφιακούς πομπούς χωρίς περιορισμούς ισχύος. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται διάταξη απλού φέροντος ανά αναμεταδότη, συνεπώς επιτυγχάνεται βελτιστοποίηση της απόδοσης ισχύος, αφού ο ενισχυτής μπορεί να οδηγηθεί πλέον στον κορεσμό. Σημειώνεται ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση υιοθετείται η τεχνική CCM και όχι η προσαρμοστική ACM, καθώς οι διάφοροι επίγειοι σταθμοί πρέπει να λαμβάνουν σήματα της ίδιας ισχύος.

Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται η διάταξη ενός συστήματος DVB-S2 από την πλευρά του πομπού για τη διανομή πολλαπλών πολυπλεγμένων ρευμάτων μέσω δορυφόρου. Υποθέτοντας τη χρήση αναμεταδότη με εύρος ζώνης $BW=36\text{MHz}$ και συντελεστή $\alpha=0.20$, προκύπτει ότι είναι δυνατή η μετάδοση συμβόλων με ρυθμό 30Mbaud . Υπενθυμίζεται ότι ο συντελεστής α ονομάζεται συντελεστής roll-off της διαμόρφωσης και αποτελεί μέτρο της διεύρυνσης του φάσματος του σήματος μετά τη διαμόρφωσή του. Προκύπτει ότι προκειμένου να μεταδοθούν δυο πολυπλεγμένα DTT σήματα στα 24Mbit/s το καθένα, απαιτείται φασματική απόδοση ίση με 1.6bit/s/Hz . Η απόδοση αυτή αντιστοιχεί σε διαμόρφωση σχήματος QPSK και ρυθμό κωδικοποίησης $5/6$ [Morello & Reimers, 2004]. Η τιμή της φασματικής απόδοσης προκύπτει ως εξής:

- Τα δύο σήματα DTT απαιτούν συνολικά $2 \times 24 = 48\text{Mbit/s}$, ο οποίος είναι και ο ωφέλιμος ρυθμός μετάδοσης.
- Εφόσον χρησιμοποιείται κωδικοποίηση $5/6$, ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης ψηφίων είναι ίσος με $48 \times \frac{6}{5} = 57.6\text{Mbit/s}$.
- Η φασματική απόδοση ορίζεται ως ο λόγος του ρυθμού μετάδοσης προς το απαιτούμενο εύρος ζώνης άρα η τιμή της είναι τελικά ίση με

$$\eta = \frac{57.6\text{Mbit/s}}{36\text{MHz}} \Rightarrow \eta = 1.6\text{bit/s/Hz}$$

Για την ίδια υλοποίηση, ο απαιτούμενος σηματοθορυβικός λόγος θα ήταν περίπου 6dB στα 30MHz εύρους ζώνης. Στην αντίστοιχη περίπτωση ενός συστήματος DVB-DSNG με χρήση $8\text{PSK } 2/3$ και ανάθεση δυο φερόντων σημάτων στα 36MHz με πολυπλεξία FDM, θα ήταν δυνατή η μετάδοση συμβόλων με ρυθμό 13.3Mbaud , σημαντικά χαμηλότερο από αυτόν του DVB-S2. Τέλος, ο απαιτούμενος σηματοθορυβικός λόγος στο δέκτη θα ήταν υψηλότερος και θα έφτανε τα 9dB .



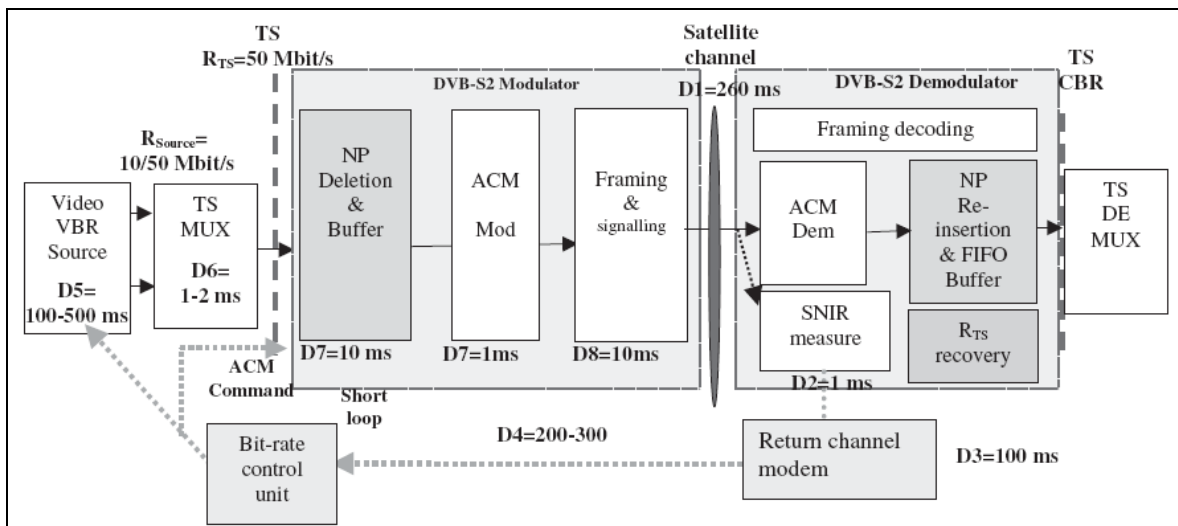
Σχήμα 4.3 - Διάταξη συστήματος DVB-S2 για διανομή πολλαπλών σημάτων DTT μέσω δορυφόρου

4.5 ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΕΙΔΗΣΕΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΗΣ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ (DSNG OVER ACM)

Οι υπηρεσίες DSNG απαιτούν την παρουσία ζεύξεων διανομής τηλεοπτικού σήματος σημείου προς σημείο ή σημείου προς πολλαπλά σημεία, όπου ένα απλό ρεύμα μεταφοράς TS μεταδίδεται σε έναν μοναδικό ή σε αρκετούς επίγειους σταθμούς αντίστοιχα. Για υπηρεσίες αυτού του είδους, η υιοθέτηση της τεχνικής ACM είναι δυνατόν να επιφέρει σημαντική αύξηση της απόδοσης του συστήματος. Στην περίπτωση αυτή, η προστασία των πακέτων TS θα πρέπει να παρακολουθεί τις μεταβολές του λόγου σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή $C/(N+I)$ στο δορυφορικό κανάλι στην περιοχή λήψης. Επομένως, στην περίπτωση αλλαγής των συνθηκών διάδοσης, έπεται και η μεταβολή του επιπέδου προστασίας από σφάλματα των πλαισίων φυσικού επιπέδου PLFRAME. Σημειώνεται ότι είναι αναγκαία η χρήση κωδικοποιητή μεταβλητού ρυθμού ψηφίων (Variable Bit Rate, VBR), ώστε να αποφεύγεται η υπερχειλίση του ρεύματος δεδομένων (stream overflow) στις περιπτώσεις που η διέλευση του καναλιού μειώνεται.

Το αντίστοιχο σύστημα DVB-S2, που φαίνεται στο Σχήμα 4.4, λειτουργεί σύμφωνα με την ακόλουθη διαδικασία [ETSI EN 302 307, 2005]:

- 1) Η μονάδα ελέγχου του ρυθμού μετάδοσης διατηρεί το μεταβλητό ρυθμό ψηφίων της πηγής στο μέγιστο επίπεδο που είναι συμβατό με τις πραγματικές συνθήκες του καναλιού εκφρασμένες με το λόγο $C/(N+I)$. Παράλληλα, καθορίζει τη λειτουργία μετάδοσης του διαμορφωτή (modulator) DVB-S2 μέσω της θύρας εισόδου “ACM command”.
- 2) Ο ρυθμός μετάδοσης TS τίθεται στο μέγιστο επίπεδο που επιτρέπει λήψη “σχεδόν χωρίς σφάλματα” (Quasi Error Free, QEF) υπό συνθήκες καθαρού ουρανού. Ο πολυπλέκτης TS εισάγει κενά πακέτα (Null Packets, NP) ώστε να εξασφαλιστεί ο σταθερός ρυθμός μετάδοσης R_{TS} .
- 3) Τα κενά πακέτα διαγράφονται στον Προσαρμογέα Λειτουργίας (Mode Adapter), έτσι ώστε ο πραγματικός ρυθμός στο κανάλι να αντιστοιχεί στο ρυθμό μετάδοσης της πηγής. Τα πακέτα που διαγράφηκαν, σηματοδοτούνται με τη χρήση του DNP (Deleted Null Packet) byte.
- 4) Ο δέκτης, χρησιμοποιώντας τα DNP bytes, εισάγει εκ νέου τα κενά πακέτα στην αρχική τους θέση. Τέλος, πραγματοποιείται επανεκκίνηση του ρολογιού του ρεύματος μεταφοράς, ώστε να σηματοδοτηθεί ο νέος κύκλος μετάδοσης.



Σχήμα 4.4 - Σχήματα μετάδοσης και λήψης (απλό ρεύμα μεταφοράς TS, ομοιόμορφη προστασία για μεγάλα χρονικά διαστήματα)

Στην περίπτωση που παρουσιαστεί μια γρήγορη διάλειψη (fast fading) στο κανάλι, το σύστημα πρέπει να προσαρμόσει κατάλληλα τη λειτουργία του. Σημειώνεται ότι όταν συμβαίνει μια γρήγορη διάλειψη, οι μεταβολές στο κανάλι είναι πιο γρήγορες από τις αντίστοιχες μεταβολές του σήματος βασικής ζώνης. Αρχικά, η μονάδα ελέγχου του ρυθμού μετάδοσης επιβάλλει στον κωδικοποιητή της πηγής μείωση του ρυθμού ψηφίων. Μόνο μετά από την ολοκλήρωση της εντολής αυτής (δηλαδή περίπου 100 έως 500ms αργότερα), θα πραγματοποιηθεί η αντίστοιχη μείωση του ρυθμού στο διαμορφωτή DVB-S2, μέσω της εντολής “ACM command”. Ένα μειονέκτημα της συγκεκριμένης διάταξης είναι η ενσωμάτωση των καθυστερήσεων του κωδικοποιητή βίντεο και του πολυπλέκτη (D5 και D6 στο σχήμα αντίστοιχα) στο βρόχο του συστήματος, με αποτέλεσμα τον κίνδυνο να έχουμε διακοπή της λειτουργίας του συστήματος κάτω από συνθήκες γρήγορων διαλείψεων. Προκειμένου να αντιμετωπισθεί αυτή η σημαντική επιπρόσθετη καθυστέρηση, η εντολή “ACM command” είναι δυνατόν να δοθεί απευθείας στο διαμορφωτή. Στην περίπτωση όμως αυτή είναι αναγκαία η παρουσία μεγάλων απομονωτών στα υποσυστήματα του διαμορφωτή και του αποδιαμορφωτή, ώστε να αποφευχθούν απώλειες πακέτων.

4.6 ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ IP ΣΕ ΜΟΝΑΔΙΚΟ ΧΡΗΣΤΗ (IP UNICAST SERVICES)

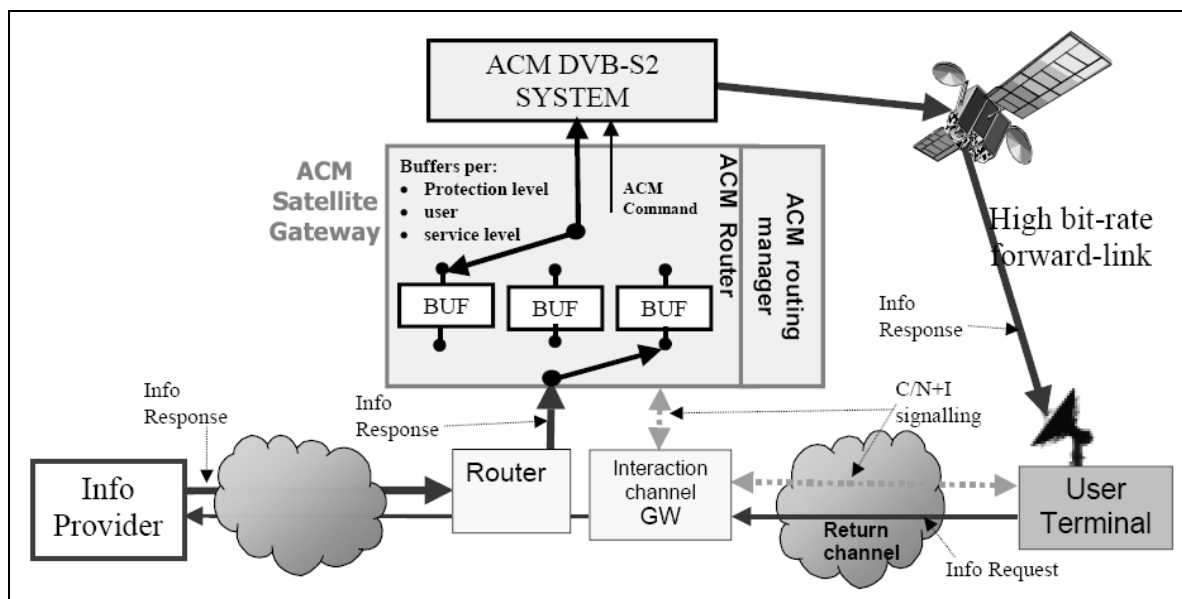
Οι υπηρεσίες εκπομπής σε μοναδικό χρήστη (unicasting) αποτελούν μια από τις σπουδαιότερες κατηγορίες υπηρεσιών που απολαμβάνουν τις δυνατότητες του νέου προτύπου DVB-S2. Μάλιστα, όταν το DVB-S2 χρησιμοποιείται για διαδραστικές υπηρεσίες σημείου-προς-σημείο, όπως το IP unicasting, το κέρδος του σε σχέση με το DVB-S είναι ακόμη μεγαλύτερο. Όπως γίνεται φανερό από την ονομασία τους, οι υπηρεσίες αυτές παρέχονται σε επίπεδο κάθε χρήστη ξεχωριστά (user-by-user basis). Επομένως, σε κάθε διαφορετικό χρήστη είναι δυνατόν να παρέχεται διαφορετικό επίπεδο υπηρεσιών, δηλαδή η προστασία από σφάλματα που υιοθετείται δεν είναι ομοιόμορφη (non-uniform). Όπως αναμενόταν, καταλυτικό ρόλο διαδραματίζει η τεχνική ACM. Το πρότυπο DVB-S2 περιλαμβάνει διάφορες διατάξεις για την υλοποίηση της τεχνικής ACM σε συστήματα εκπομπής προς μοναδικό χρήστη. Συγκεκριμένα, η λειτουργία της ACM καθίσταται εφικτή με βάση τις ακόλουθες δυο διεπαφές εισόδου του διαμορφωτή DVB-S2:

- ένα απλό γενικό (generic) ρεύμα δεδομένων και η εντολή “ACM command”
- πολλαπλά ρεύματα δεδομένων, είτε μεταφοράς (transport) είτε γενικά

Η επιλογή ανάμεσα στις δυο παραπάνω εναλλακτικές διατάξεις έχει σημαντική επίδραση στον καθορισμό της αρχιτεκτονικής του συστήματος και συνεπώς στην ολική απόδοση του συστήματος. Μερικές παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή είναι η δρομολόγηση, η προσωρινή αποθήκευση και η επεξεργασία των δεδομένων, καθώς και η γενικότερη στρατηγική μετάδοσης. Περισσότερες λεπτομέρειες για τις διεπαφές αυτές δίνονται παρακάτω.

Στο ακόλουθο Σχήμα 4.5 παρουσιάζονται οι πιθανές ανταλλαγές πληροφορίας ανάμεσα στο τερματικό χρήστη (user terminal), το Δορυφορικό Κεντρικό Σταθμό (Satellite Gateway) και τον πάροχο πληροφοριών (information provider) κατά τη διάρκεια μιας συνόδου (session) στο διαδίκτυο μέσω δορυφόρου. Η σύνοδος αυτή κάνει χρήση της εμπρόσθιας ζεύξης υψηλού ρυθμού (high bit-rate forward link) μεταξύ του δορυφόρου και του τερματικού. Η επικοινωνία μπορεί να αφορά κάποια αίτηση πληροφοριών (info request) ή κάποια απάντηση πληροφοριών (info response). Οι διαδραστικές υπηρεσίες προς μοναδικό χρήστη είναι δυνατόν να εκμεταλλεύονται τα πλεονεκτήματα που παρέχουν οι εξής λειτουργίες:

- μη ομοιόμορφη προστασία από λάθη (χρήση ACM)
- διαφοροποιημένα επίπεδα υπηρεσιών (π.χ. προτεραιότητα στις ουρές αναμονής)



Σχήμα 4.5 – Παράδειγμα υπηρεσιών IP με χρήση ζεύξης DVB-S2 ACM

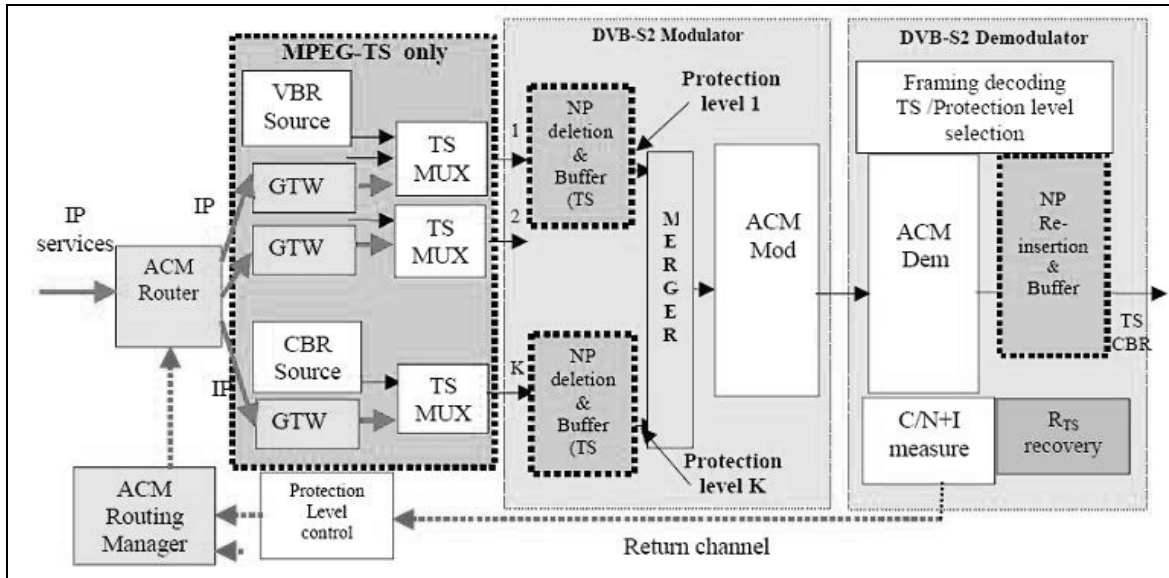
Το τερματικό χρήστη είναι δυνατόν να διαπραγματεύεται με το Διαχειριστή Δρομολόγησης ACM (ACM routing manager) τις λεπτομέρειες της συνόδου που εγκαθιδρύεται. Ανάλογα με την εκάστοτε συμφωνία, ο δρομολογητής ACM (ACM router) είναι δυνατόν να διαχωρίζει τα πακέτα IP με κριτήριο το ζητούμενο επίπεδο υπηρεσιών, την απαιτούμενη προστασία από σφάλματα ή το χρήστη προέλευσης. Σημειώνεται ότι η αθροιστική κίνηση εισόδου όλων των επιπέδων προστασίας δεν πρέπει να υπερβαίνει τη διαθέσιμη χωρητικότητα του καναλιού. Η απαίτηση αυτή αναφέρεται στη μέση κίνηση (average traffic) εισόδου. Αντίθετα, η κίνηση αιχμής (peak traffic) είναι δυνατόν να ξεπερνά προσωρινά τη διαθέσιμη χωρητικότητα. Το γεγονός βέβαια αυτό πρέπει να βρίσκεται πάντα σε συμφωνία με την αποθηκευτική ικανότητα της εισόδου (ύπαρξη ικανοποιητικού αριθμού απομονωτών), αλλά και τις απαιτήσεις της κάθε υπηρεσίας αναφορικά με τη μέγιστη επιτρεπτή καθυστέρηση (εξυπηρέτηση υπηρεσιών ανεκτικών ως προς την καθυστέρηση).

Για να ικανοποιείται η παραπάνω απαίτηση όταν η συνολικά προσφερόμενη κίνηση ξεπερνά τη χωρητικότητα του καναλιού, είναι δυνατόν να υλοποιηθούν διάφορες τεχνικές. Για παράδειγμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί έλεγχος προτεραιότητας στο δίκτυο. Ο έλεγχος προτεραιότητας ποσοτικοποιεί το επίπεδο υπηρεσίας που παρέχεται σε κάθε χρήστη (Quality of Service, QoS) και μπορεί να αφορά το πεδίο του χρόνου (πόσο μπορεί να καθυστερήσει ένα πακέτο στον απομονωτή) ή το πεδίο του χώρου (αν επιτρέπεται η αποβολή του πακέτου σε περίπτωση συμφόρησης). Με βάση τον έλεγχο αυτό, τα πακέτα IP χαμηλής προτεραιότητας είναι δυνατόν να καθυστερούν ή ακόμη και να απορρίπτονται υπέρ των πακέτων υψηλής προτεραιότητας. Εναλλακτικά, μπορεί να υιοθετηθεί έλεγχος του ρυθμού ψηφίων προς τους χρήστες και μείωση αυτού για τους χρήστες εκείνους που λειτουργούν υπό άσχημες συνθήκες λήψης. Επομένως, αν οι καθυστερήσεις στο βρόχο ελέγχου είναι τέτοιες που δεν επιτρέπουν λήψη χωρίς σφάλματα σε συνθήκες γρήγορων διαλείψεων, είναι αναγκαία η εκχώρηση προτεραιοτήτων στις διάφορες υπηρεσίες. Οι υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (real time), όπως η ροή βίντεο και ήχου (video/audio streaming), καταλαμβάνουν το τμήμα μετάδοσης με την υψηλότερη προτεραιότητα. Αντίθετα, οι υπηρεσίες βέλτιστης προσπάθειας (best effort), που δεν εγγυώνται κάποιο επίπεδο υπηρεσίας, θεωρούνται χαμηλής προτεραιότητας και είναι δυνατόν να εκμεταλλεύονται την υψηλότερη απόδοση που προσφέρει η χρήση ACM.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η διεπαφή του δρομολογητή ACM με το διαμορφωτή DVB-S2 είναι δυνατόν να υλοποιηθεί με έναν από τους ακόλουθους τρόπους:

- 1) Μέσω ενός απλού γενικού ρεύματος (single generic stream) στην είσοδο και της εντολής “ACM command”. Στην περίπτωση αυτή ο δρομολογητής είναι ανεξάρτητος από το διαμορφωτή και μπορεί να ακολουθήσει οποιαδήποτε πολιτική δρομολόγησης. Ο διαμορφωτής μεταδίδει αμέσως τα δεδομένα χρήστη σύμφωνα με την εντολή ACM γεγονός που επιτρέπει την ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων στο βρόχο.
- 2) Μέσω πολλαπλών ρευμάτων είτε μεταφοράς είτε γενικά (multiple transport or generic streams), ένα για κάθε επίπεδο προστασίας. Στην περίπτωση αυτή δε χρειάζεται η “ACM command”, ενώ η συσκευή συγχώνευσης των ρευμάτων (merger) αναλαμβάνει την υλοποίηση μέρους της λειτουργικότητας του δρομολογητή ACM.

Η περίπτωση των πολλαπλών ρευμάτων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6. Ο δρομολογητής ACM διαχωρίζει τα πακέτα χρήστη ανάλογα με την προτεραιότητά τους (επίπεδο υπηρεσίας) και το απαιτούμενο επίπεδο προστασίας, και τα αποστέλλει στις πολλαπλές διεπαφές εισόδου του συστήματος DVB-S2. Σε κάθε ρεύμα ανατίθεται ένα δεδομένο επίπεδο προστασίας, επομένως κάθε ρεύμα εισόδου συγκεντρώνει την κίνηση όλων των χρηστών που χρειάζονται το συγκεκριμένο επίπεδο προστασίας. Η συσκευή merger εφαρμόζει συνήθως κυκλική επιλογή (round robin) των απομονωτών TS και μεταδίδει στο διαμορφωτή ACM ένα μπλοκ δεδομένων από τους παραπάνω χρήστες, το οποίο θα συμπληρώσει μερικώς ή πλήρως ένα πλαίσιο φυσικού επιπέδου PLFRAME. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ως ένα βαθμό και η επιθυμητή πολυπλεξία χρηστών που οδηγεί τελικά σε αύξηση της απόδοσης του συστήματος. Στην περίπτωση κίνησης αιχμής, είναι πιθανόν η κυκλική επιλογή να μην είναι η βέλτιστη, οπότε είναι πιθανή η υιοθέτηση άλλων πολιτικών προτεραιότητας [Morello & Reimers, 2004].



Σχήμα 4.6 - Εκπομπή IP προς μοναδικό χρήστη (IP unicast) και γρήση τεχνικής ACM (περίπτωση πολλαπλών ρευμάτων εισόδου με ομοιόμορφη προστασία ανά ρεύμα)

Οι διάστικτες γραμμές του σχήματος αναφέρονται στην ειδική περίπτωση που οι υπηρεσίες IP παρέχονται πάνω από MPEG-TS, περίπτωση που εξετάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αφού γίνει διαχωρισμός των ροών ανάλογα με το αν προέρχονται από πηγή σταθερού (Constant Bit Rate, CBR) ή μεταβλητού (VBR) ρυθμού, τα πακέτα IP ενθυλακώνονται σε πακέτα ρεύματος μεταφοράς TS με βάση το πρωτόκολλο ενθυλάκωσης MPE. Στην περίπτωση αυτή, πραγματοποιείται σύνδεση K gateways με K πολυπλέκτες TS, ώστε να είναι δυνατή η τροφοδότηση K ρευμάτων εισόδου DVB-S2, ένα για κάθε επίπεδο προστασίας. Επίσης, σε κάθε τμήμα εφαρμόζεται διαγραφή των κενών πακέτων (NP deletion), ώστε να μειωθεί ο ρυθμός μετάδοσης ψηφίων. Μετά την εκ νέου εισαγωγή των κενών πακέτων στο υποσύστημα του αποδιαμορφωτή (DVB-S2 demodulator), το αποκωδικοποιημένο ρεύμα TS αποτελεί πλέον ένα έγκυρο ρεύμα TS και είναι έτοιμο προς μετάδοση με σταθερό ρυθμό ψηφίων.

Μερικές από τις εφαρμογές της υπηρεσίας εκπομπής προς μοναδικό χρήστη είναι η πρόσβαση στο διαδίκτυο μέσω δορυφόρου, η λήψη βίντεο κατόπιν ζήτησης, η μετάδοση φωνής πάνω από IP κ.α. Στις ακόλουθες ενότητες περιγράφονται κάποιες από τις εφαρμογές αυτές.

4.6.1 Πρόσβαση ευρείας ζώνης στο διαδίκτυο (Broadband Internet access)

Όπως έχει αναφερθεί, η πρόσβαση στο διαδίκτυο μέσω δορυφόρου είναι μια αποδοτική λύση για την παροχή υπηρεσιών Internet σε περιοχές με μικρή επίγεια υποδομή. Μάλιστα, με την εξέλιξη της τεχνολογίας των δορυφορικών συστημάτων είναι πλέον δυνατή η σύνδεση με υψηλές ταχύτητες, γεγονός που επιτρέπει στους αντίστοιχους χρήστες να απολαμβάνουν επίπεδο υπηρεσιών ισάξιο με εκείνο που προσφέρουν τα επίγεια δίκτυα ευρείας ζώνης. Στη διάδοση της συγκεκριμένης λύσης συντελεί και η διαρκής μείωση στο κόστος και το μέγεθος των τερματικών, τα οποία γίνονται όλο και πιο ελκυστικά στους καταναλωτές. Με τα τερματικά αυτά, οι καταναλωτές έχουν εύκολη και γρήγορη πρόσβαση στις διάφορες δορυφορικές υπηρεσίες, συνήθως μέσω δικτύων σε συνδεσμολογία πλέγματος. Επίσης, αποκτούν τη δυνατότητα να επικοινωνούν μεταξύ τους πολύ γρήγορα, αφού μεσολαβεί μόνο ένα άλμα προς το δορυφόρο.

Απαραίτητη προϋπόθεση για να αποκτήσει ένας καταναλωτής πρόσβαση στο διαδίκτυο είναι η σύνδεσή του με ένα κεντρικό σταθμό, ο οποίος διαδραματίζει το ρόλο της πύλης (gateway) μεταξύ του χρήστη και του υπόλοιπου δικτύου. Γενικότερα, μια Πύλη Αναγεννητικού Δορυφόρου (Regenerative Satellite Gateway, RSGW) πραγματοποιεί τη διασύνδεση μεταξύ του δορυφορικού δικτύου και των επίγειων δικτύων (π.χ. PSTN, IDSN, Internet). Ο κεντρικός αυτός σταθμός είναι υπεύθυνος για την πρόσβαση στο υπόλοιπο διαδίκτυο, αλλά και την παροχή των ανάλογων υπηρεσιών. Η επικοινωνία του κάθε χρήστη με την πύλη πραγματοποιείται μέσω δορυφόρου. Η διασύνδεση μεταξύ του χρήστη, του δορυφόρου και της πύλης υλοποιείται με την κατάλληλη συνεργασία των πρωτοκόλλων DVB-RCS και DVB-S2. Συγκεκριμένα, οι ζεύξεις ανόδου χρησιμοποιούν το DVB-RCS, ενώ οι ζεύξεις καθόδου χρησιμοποιούν το DVB-S2. Υπενθυμίζεται ότι το DVB-RCS (Digital Video Broadcasting – Return Channel via Satellite) αποτελεί την υπάρχουσα προδιαγραφή για την παροχή καναλιών στα δορυφορικά δίκτυα με σκοπό την επικοινωνία με τερματικά σταθερής θέσης.

Όπως είναι φανερό, οι χρήστες της συγκεκριμένης υπηρεσίας πρέπει να είναι εφοδιασμένοι με κατάλληλα τερματικά, τα οποία ονομάζονται RCST (RCS Terminals). Τα τερματικά DVB-RCST αποτελούν τη διεπαφή ανάμεσα στους εξωτερικούς χρήστες και το υπόλοιπο σύστημα. Πιο συγκεκριμένα, αναλαμβάνουν το ρόλο του προεπιλεγμένου δρομολογητή (default router) για το υποδίκτυο κάθε χρήστη. Σημειώνεται ότι τα τερματικά RCST είναι δυνατόν να λειτουργούν τόσο με διαφανείς δορυφόρους όσο και με δορυφόρους με δυνατότητες επεξεργασίας OBP. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και

σε άλλες υπηρεσίες εκτός από την παροχή πρόσβασης στο διαδίκτυο [Esguevillas et al, 2004].

4.6.2 Πρόσβαση σε ενδοδίκτυο (Intranet access)

Με χρήση του πρωτοκόλλου DVB-S2 είναι δυνατή η δημιουργία Εικονικών Ιδιωτικών Δικτύων (Virtual Private Networks, VPN) μέσω δορυφόρου, τα οποία ονομάζονται Εικονικά Δορυφορικά Δίκτυα (Virtual Satellite Networks, VSN). Γενικά, τα εικονικά δίκτυα αφορούν τη δημιουργία ενός δικτύου επικοινωνιών, π.χ. για τις ανάγκες μιας εταιρείας, το οποίο χρησιμοποιεί το δημόσιο δίκτυο για την εγκατάσταση των συνδέσεων. Στην περίπτωση αυτή η κίνηση VPN μεταφέρεται μέσω του δημόσιου δικτύου, όπως το διαδίκτυο, χωρίς το τελευταίο να γνωρίζει την ύπαρξη του εικονικού δικτύου. Με κατάλληλη χρήση ενός VSN και της πύλης gateway είναι δυνατή η σύνδεση ενός τερματικού, όχι μόνο με το διαδίκτυο, αλλά και με ιδιωτικά ενδοδίκτυα (Intranets). Έτσι, ένας εργαζόμενος μπορεί από την οικία του να αποκτήσει πρόσβαση στο δίκτυο της εταιρείας στην οποία εργάζεται.

Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην περίπτωση που κανένα από τα τερματικά RCST δεν έχει πρόσβαση στο διαδίκτυο ή σε κάποιο ενδοδίκτυο. Η υλοποίηση ενός δικτύου VPN μέσω δορυφόρου είναι αρκετά δύσκολη, εξαιτίας της καθυστέρησης που εισάγεται κατά τη μετάδοση από τα τερματικά προς το δορυφόρο. Η υπηρεσία πρόσβασης σε ενδοδίκτυο προϋποθέτει τη διασύνδεση της πύλης RSGW με το επίγειο δίκτυο ενός τηλεπικοινωνιακού παρόχου (π.χ. μέσω μισθωμένης γραμμής). Μέσω αυτή παρέχεται διασύνδεση ανάμεσα στα υποδίκτυα των χρηστών στις απομακρυσμένες περιοχές (π.χ. κάποιο υποκατάστημα) και το εταιρικό ενδοδίκτυο (π.χ. στα κεντρικά γραφεία). Οι εφαρμογές της συγκεκριμένης υπηρεσίας είναι δυνατόν να ποικίλλουν από τις πιο απλές, όπως η ανάγνωση σελίδων στον παγκόσμιο ιστό (web browsing), μέχρι τις πιο απαιτητικές, που απαιτούν εγγυημένες τιμές για το ρυθμό μετάδοσης και την καθυστέρηση, όπως η ροή πολυμέσων (multimedia streaming) [Vallejo & Moreno, 2004].

4.6.3 Λήψη βίντεο κατόπιν ζήτησης (Video on Demand, VoD)

Η υπηρεσία VoD είναι μια οπτικοακουστική υπηρεσία στην οποία ο χρήστης έχει τον έλεγχο ενός εξυπηρετητή ροής (streaming server), από τον οποίο μπορεί να λαμβάνει κινούμενη εικόνα κατόπιν απαίτησής του. Γενικά, τα συστήματα VoD επιτρέπουν στους χρήστες να επιλέγουν και να παρακολουθούν τηλεοπτικό περιεχόμενο ως ένα είδος διαδραστικής τηλεόρασης. Υπάρχει η δυνατότητα “ροής του περιεχομένου”, όπου ο

χρήστη παρακολουθεί το βίντεο καθώς συνεχίζεται η λήψη του, και η δυνατότητα παρακολούθησης του αφού ολοκληρωθεί η λήψη. Τα συστήματα της υπηρεσίας αυτής εξομοιώνουν τη λειτουργία μιας οικιακής συσκευής αναπαραγωγής βίντεο. Έτσι, οι χρήστες μπορούν να σταματούν και να επανεκκινούν την αναπαραγωγή κατά βούληση, αλλά και να μεταβαίνουν άμεσα σε οποιοδήποτε σημείο της ταινίας. Η επιλογή από τους χρήστες πραγματοποιείται ανάμεσα σε μια μεγάλη ποικιλία τηλεοπτικού περιεχομένου.

Όπως είναι φανερό, η υπηρεσία VoD είναι ιδιαίτερα απαιτητική ως προς το εύρος ζώνης, επομένως προϋποθέτει σωστή σχεδίαση του συστήματος. Επιπλέον, εισάγει σημαντικές απαιτήσεις ως προς τον έλεγχο του συγχρονισμού των συσκευών, των καναλιών εκπομπής προς κάθε χρήστη και της πρόσβασης στον εξυπηρετητή. Για να έχουν πρόσβαση στην υπηρεσία αυτή, οι ενδιαφερόμενοι χρήστες πρέπει να είναι εφοδιασμένοι με τερματικά RCST, αλλά και με set-top-boxes (STB). Υπενθυμίζεται ότι τα STBs είναι συσκευές που συνδέουν την τηλεόραση με μια εξωτερική πηγή σήματος, μετατρέποντας το σήμα σε περιεχόμενο που εμφανίζεται στην οθόνη. Τέλος, σημειώνεται ότι τα ρεύματα ήχου και εικόνας μεταδίδονται ενθυλακωμένα σε πακέτα IP. Η κίνηση IP καταλήγει στα STBs, τα οποία είναι υπεύθυνα για την αποθυλάκωση και την αποκωδικοποίηση της κινούμενης εικόνας.

4.6.4 Μετάδοση φωνής πάνω από IP (VoIP)

Η υπηρεσία μετάδοσης φωνής πάνω από πακέτα πρωτοκόλλου διαδικτύου (Voice over Internet Protocol, VoIP) αφορά τη δρομολόγηση τηλεφωνικών συνδιαλέξεων πάνω από δίκτυα που βασίζονται στο πρωτόκολλο IP. Στο προηγούμενο κεφάλαιο εξετάστηκε η μετάδοση πακέτων IP πάνω από DVB-S2. Επομένως, τα δορυφορικά συστήματα που χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο DVB-S2 είναι σε θέση να παρέχουν υπηρεσίες VoIP. Όμως, από το πρωτόκολλο IP απουσιάζει κάποιος μηχανισμός που να εξασφαλίζει ποιότητα υπηρεσιών. Επομένως, οι υλοποιήσεις φωνής πάνω από IP αντιμετωπίζουν προβλήματα αναφορικά με την καθυστέρηση των πακέτων, αλλά και τις μεταβολές που παρουσιάζουν οι καθυστερήσεις μεταξύ των πακέτων (jitter). Τα προβλήματα αυτά γίνονται ακόμη πιο έντονα όταν η υπηρεσία παρέχεται μέσω δορυφορικών δικτύων. Σημειώνεται πάντως ότι σε ροές δεδομένων που παράγονται από εφαρμογές VoIP είναι δυνατόν να ανατεθεί υψηλή προτεραιότητα, ώστε να εξασφαλίζεται έστω και μερικώς κάποιο αποδεκτό επίπεδο υπηρεσιών.

4.7 ΕΚΠΟΜΠΗ ΠΡΟΣ ΠΟΛΛΑΠΛΟΥΣ ΧΡΗΣΤΕΣ (MULTICASTING)

Η ιδέα της πολυεκπομπής (multicasting) αφορά την αποστολή πακέτων από έναν αποστολέα σε πολλαπλούς δέκτες με μια μόνο λειτουργία αποστολής. Δηλαδή είναι δυνατή η μετάδοση δεδομένων προς πολλαπλούς χρήστες ταυτόχρονα. Κάτι τέτοιο οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση εύρους ζώνης σε σχέση με την κλασική μετάδοση μέσω της διαδικασίας unicast, δηλαδή της μετάδοσης προς μοναδικό χρήστη. Κατά την τελευταία, είναι δυνατή η μετάδοση μηνύματος πολλαπλούς κόμβους, αφού όμως προηγηθεί αντιγραφή του μηνύματος σε κάθε κόμβο. Για το λόγο αυτό, η πολυεκπομπή γίνεται όλο και πιο διαδεδομένη σε δίκτυα που βασίζονται στο πρωτόκολλο διαδικτύου. Οι δορυφόροι που έχουν τη δυνατότητα επεξεργασίας OBP και πιο συγκεκριμένα τη δυνατότητα κάλυψης με σημειακές δέσμες (spot beams), μπορούν να παρέχουν αποδοτικό multicasting και να υλοποιήσουν νέες, σύγχρονες υπηρεσίες. Στις υπηρεσίες αυτές ανήκουν για παράδειγμα η πολυδιάσκεψη, η ροή πολυμέσων κ.α.

Η υπηρεσία πολυεκπομπής πρωτοκόλλου διαδικτύου (IP multicast service) που παρέχουν τα δορυφορικά συστήματα DVB-S2 εκμεταλλεύεται τη δυνατότητα επεξεργασίας επί του δορυφόρου με τον ακόλουθο τρόπο. Στην προς τα άνω ζεύξη μεταδίδεται ένα απλό σήμα πολυεκπομπής, το οποίο μετατρέπεται σε πολλαπλά σήματα στην προς τα κάτω ζεύξη, πολυπλεγμένα στο χρόνο με χρήση TDM. Με βάση τη συνδεσμολογία που υιοθετείται για το σύστημα προκύπτει η ακόλουθη διάκριση [Vallejo & Moreno, 2004]:

- Υπηρεσία Πολυεκπομπής σε Συνδεσμολογία Αστέρα (Star Multicast Service): Στην περίπτωση αυτή, μετά από αίτημα κάποιου χρήστη της υπηρεσίας, πραγματοποιείται μετάδοση ροής IP από την πηγή του multicast προς το επίγειο δίκτυο. Για το σκοπό αυτό απαιτείται μια πύλη (RSGW) που θα αποτελέσει τη διεπαφή μεταξύ δορυφορικού και επίγειου δικτύου.
- Υπηρεσία Πολυεκπομπής σε Συνδεσμολογία Πλέγματος (Mesh Multicast Service): Στη συγκεκριμένη περίπτωση εγκαθίσταται σύνδεση απευθείας μεταξύ των ενδιαφερόμενων χρηστών και δεν απαιτείται η παρουσία κάποιας πύλης που να παίζει το ρόλο του κεντρικού σταθμού.

Οι απαιτούμενες συνδέσεις απλού σημείου προς πολλαπλά σημεία πραγματοποιούνται με χρήση του ίδιου πρωτοκόλλου επιπέδου ζεύξης δεδομένων που υιοθετείται κατά την

εκπομπή προς μοναδικό χρήστη. Για τον προσδιορισμό των απαιτούμενων λογικών καναλιών στο δίκτυο χρησιμοποιείται ένας ενδείκτης πακέτου (PID) ρεύματος μεταφοράς MPEG2-TS. Πιο συγκεκριμένα, σε επίπεδο VSN καθορίζεται ένα εύρος τιμών για τους ενδείκτες PID και ανατίθενται σε αυτούς διάφορες IP διευθύνσεις πολυεκπομπής. Όταν ένας χρήστης προσπαθήσει να συμμετάσχει σε μια ομάδα πολυεκπομπής του τοπικού δικτύου, το αντίστοιχο τερματικό RCST πραγματοποιεί αποκωδικοποίηση του ενδείκτη PID και ανάλογα με τη διεύθυνση IP του πακέτου λαμβάνει ή απορρίπτει το πακέτο.

Στα δίκτυα που βασίζονται στο πρωτόκολλο διαδικτύου για την υλοποίηση της λειτουργίας πολυεκπομπής χρησιμοποιείται το Πρωτόκολλο Διαχείρισης Ομάδων Διαδικτύου (Internet Group Management Protocol, IGMP). Με τη βοήθεια του IGMP το τερματικό ενός χρήστη ενημερώνει τον απευθείας συνδεδεμένο δρομολογητή (router) για την πρόθεσή του να συνδεθεί σε μια συγκεκριμένη ομάδα πολυεκπομπής (multicast group) [Kurose & Ross, 2003]. Στην περίπτωση δορυφορικών δικτύων το ρόλο του δρομολογητή IGMP αναλαμβάνουν τα τερματικά RCST. Σημειώνεται ότι η πρόθεσή του χρήστη υποδηλώνεται από μια αίτηση (query) συμμετοχής.

Για να είναι δυνατή η παροχή υπηρεσιών πολυεκπομπής από δορυφορικά συστήματα πρέπει ο μεταγωγέας (switch) επί του δορυφόρου (on-board) να διαθέτει δυνατότητες multicast. Στην περίπτωση αυτή ο αντίστοιχος on-board επεξεργαστής παρουσιάζει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- δυνατότητα πολυεκπομπής σε διάταξη αστέρα ή πλέγματος, όπως αυτές περιγράφηκαν παραπάνω
- κατάλληλη προσαρμογή του πρωτοκόλλου IGMP ώστε να ανταποκρίνεται στις ιδιαιτερότητες των δορυφορικών δικτύων
- εφαρμογή πρωτοκόλλων ασφαλείας για την πολυεκπομπή
- δυνατότητα συνεργασίας με άλλα δίκτυα πολυεκπομπής
- υποστήριξη Ποιότητας Υπηρεσιών (QoS)

Προκειμένου να εξασφαλιστεί από το σύστημα η υψηλή απόδοση της υπηρεσίας, συνήθως χρησιμοποιείται η ακόλουθη τεχνική. Ο on-board επεξεργαστής παρακολουθεί τις διάφορες αιτήσεις IGMP και στη συνέχεια δημιουργεί μια λίστα από ομάδες πολυεκπομπής. Στη λίστα αυτή καταγράφεται ποιες σημειακές δέσμες σχετίζονται με ποιες ομάδες. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα Πίνακας Δεσμών Πολυεκπομπής (Multicast

Beams Table, MBT) μέσω του οποίου πραγματοποιείται συσχέτιση των δεσμών, των ομάδων πολυεκπομπής και των πηγής κίνησης multicast [Filali & Dabbous, 2004].

Οι ενδιαφερόμενοι αποστολείς και παραλήπτες ενεργοποιούν το πρωτόκολλο IGMP στις διεπαφές μεταξύ του τερματικού τους και της δορυφορικής ζεύξης. Οι αιτήσεις και αναφορές που χρησιμοποιεί το IGMP μεταδίδονται μέσω ζεύξεων που θυμίζουν δίκτυα ευρυεκπομπής (broadcast) και στις οποίες κάθε δέσμη συνδέει αποστολείς και παραλήπτες. Πιο συγκεκριμένα, οι αναφορές IGMP που στέλνονται από έναν αποστολέα μεταδίδονται μέσω της προς τα άνω ζεύξης σε όλους τους παραλήπτες που καλύπτονται από την ίδια σημειακή δέσμη. Όταν ο επεξεργαστής λαμβάνει μια αναφορά εξετάζει το είδος της, προσδιορίζει τη δέσμη στην οποία ανήκει ο αποστολέας της αναφοράς και τέλος ενημερώνει τον πίνακα MBT. Στην περίπτωση που ο επεξεργαστής παραλάβει ένα πακέτο πολυεκπομπής με προορισμό μια συγκεκριμένη ομάδα δεκτών, αρκεί μόνο να ανατρέξει στον πίνακα MBT και μέσω αυτού προσδιορίζει άμεσα τη σημειακή δέσμη από την οποία καλύπτεται η ενδιαφερόμενη ομάδα. Με βάση την παραπάνω προσέγγιση, τα δορυφορικά συστήματα νέας γενιάς αποκτούν δυνατότητα πολυεκπομπής μέσω μιας ευέλικτης και δυναμικής διαδικασίας. Επιπλέον, καθίσταται δυνατή η διασύνδεσή τους με το υπόλοιπο διαδίκτυο με αδιαφανή για τους χρήστες τρόπο.

Στη συνέχεια περιγράφονται ορισμένες εφαρμογές των δορυφορικών συστημάτων DVB-S2 που κάνουν χρήση της δυνατότητας πολυεκπομπής, όπως η πολυδιάσκεψη IP και η ροή πολυμέσων.

4.7.1 Υπηρεσία πολυδιάσκεψης (IP multiconference)

Η έννοια της πολυδιάσκεψης (multiconference) αφορά την αλληλεπίδραση πολλαπλών χρηστών ταυτόχρονα και αποτελεί το επόμενο βήμα στην υπηρεσία της βίντεο-διάσκεψης (video conference), η οποία επιτρέπει την αμφίδρομη επικοινωνία ανάμεσα σε δυο χρήστες. Οι υπηρεσίες πολυδιάσκεψης δεν παρέχουν μόνο τις κλασικές δυνατότητες επικοινωνίας της παραδοσιακής τηλεφωνίας, αλλά θα επιτρέπουν και κλήσεις μεταξύ απλών χρηστών με χρήση VoIP, διασκέψεις και βίντεο-διασκέψεις μεταξύ πολλαπλών χρηστών, καθώς και τη μετάδοση πολυμέσων μεταξύ των χρηστών. Η υλοποίησή της υπηρεσίας βασίζεται σε δίκτυα που χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο IP, επομένως είναι δυνατή και η χρήση συστημάτων DVB-S2 με δορυφόρους OBP. Πιο συγκεκριμένα, για την άνω ζεύξη χρησιμοποιείται το κλασικό πρωτόκολλο DVB-RCS, ενώ για την κάτω ζεύξη υιοθετείται το πρότυπο DVB-S2.

Η παρουσία δορυφορικών ζεύξεων εισάγει ως γνωστόν σημαντικές καθυστερήσεις στο σύστημα. Επομένως, η αμφίδρομη αποστολή εικόνας και ήχου με unicast από το ένα τερματικό στο άλλο μέσω ενός κεντρικού σταθμού είναι χρονοβόρα, καθώς απαιτεί τη μετάδοση σήματος στο δορυφορικό κανάλι δυο φορές. Όπως είναι φανερό, κάτι τέτοιο αποτελεί μη αποδοτική λύση στην περίπτωση που στην διάσκεψη εμπλέκονται περισσότερα από δυο τερματικά. Για την υλοποίηση λοιπόν της υπηρεσίας πολυδιάσκεψης υιοθετείται η διαδικασία της πολυεκπομπής, δηλαδή της εκπομπής προς πολλαπλούς χρήστες ταυτόχρονα. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η Μονάδα Ελέγχου Πολλαπλών Σημείων (Multipoint Control Unit, MCU). Στις διάφορες μονάδες MCU του συστήματος είναι συνδεδεμένα όλα τα τερματικά, τα οποία αποστέλλουν με unicast τις ροές δεδομένων τους. Κάθε MCU συγκεντρώνει όλες τις ροές από τα συνδεδεμένα με αυτή τερματικά και δημιουργεί μια συνολική ροή η οποία αποστέλλεται με multicast στις υπόλοιπες MCU [Esguevillas et al, 2004]. Οι τελευταίες αναλαμβάνουν τη μετάδοση της ροής προς τα τερματικά που συμμετέχουν στην αντίστοιχη ομάδα πολυεκπομπής. Τα οφέλη της υλοποίησης αυτής είναι πολλαπλά. Αφενός μειώνονται οι απαιτήσεις σε εύρος ζώνης και ελαχιστοποιούνται οι καθυστερήσεις από άκρο σε άκρο και αφετέρου απλοποιούνται τα τερματικά των χρηστών, για τα οποία δεν υπάρχει η ανάγκη για ενσωμάτωση δυνατοτήτων πολυπλεξίας και μεταγωγής.

4.7.2 Ροή κινούμενης εικόνας και ήχου (Video and audio streaming)

Η ροή βίντεο και ήχου αποτελεί μια υπηρεσία μετάδοσης ακουστικού και οπτικού περιεχομένου τα οποία οι τελικοί χρήστες έχουν τη δυνατότητα να παρακολουθούν χωρίς να απαιτείται η πλήρης λήψη των αντίστοιχων αρχείων. Γενικά, η έννοια της ροής πολυμέσων (streaming media) αφορά τη μετάδοση βίντεο, ήχου ή/και δεδομένων που αναπαράγονται και επεξεργάζονται ενώ συνεχίζεται η αποστολή τους. Παρουσιάζει δηλαδή αρκετές ομοιότητες με την υπηρεσία VoD. Η εγγενής διαφορά τους είναι ότι η ροή αυτή δεν επιτρέπει την αλληλεπίδραση με το χρήστη. Με βάση το γεγονός αυτό, η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (end-to-end latency) δεν αποτελεί καθοριστικό παράγοντα και καθυστερήσεις μερικών δευτερολέπτων είναι τελικά αποδεκτές. Η βασική ιδέα της ροής βίντεο είναι ο τεμαχισμός του περιεχομένου σε επιμέρους τμήματα και η διαδοχική μετάδοση των τμημάτων αυτών. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με την αποκωδικοποίηση και την αναπαραγωγή των τμημάτων κατά τη λήψη καθενός από αυτά, χωρίς να απαιτείται η λήψη ολόκληρου του περιεχομένου.

Στα δίκτυα που βασίζονται στη μεταγωγή πακέτου (packet switched networks), όπως τα δίκτυα IP, τα διάφορα πακέτα δεδομένων είναι πιθανόν να φτάνουν στο δέκτη εκτός σειράς ή με κάποια καθυστέρηση, ενώ σημειώνονται και απώλειες ορισμένων εξ αυτών. Επομένως, η παροχή κάποιου συγκεκριμένου επιπέδου υπηρεσιών (QoS) από το αντίστοιχο δορυφορικό DVB-S2 σύστημα είναι δυνατόν να διευκολύνει τη ροή βίντεο. Ο όρος Ποιότητα Υπηρεσιών (Quality of Service, QoS) αναφέρεται στην πιθανότητα το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο να ικανοποιεί κάποιες συγκεκριμένες προδιαγραφές αναφορικά με την κίνηση σε αυτό. Οι παράμετροι που καθορίζουν την επίτευξη ή όχι του εκάστοτε QoS είναι το πλήθος των χαμένων πακέτων, η καθυστέρηση που εμφανίζεται, η εκτός σειράς παράδοση, η μεταβλητή σχετική καθυστέρηση των πακέτων (jitter) και το ποσοστό των εσφαλμένων πακέτων. Η ποιότητα υπηρεσιών του δορυφορικού δικτύου εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά (προφίλ) της κίνησης τόσο του ολικού συστήματος όσο και της κίνησης του τερματικού RCST. Για να εξασφαλιστεί ποιότητα υπηρεσιών από το κάθε RCST χρησιμοποιείται, εκτός από την εξασφάλιση υψηλής διέλευσης (throughput), και καθορισμός προτεραιοτήτων της κίνησης. Δηλαδή σε κάθε κανάλι τα πακέτα κατηγοριοποιούνται σε δυο κλάσεις και προωθούνται στους αντίστοιχους απομονωτές ανάλογα με το επίπεδο προτεραιότητάς τους (χαμηλό ή υψηλό). Η υποστήριξη QoS από το δορυφορικό σύστημα είναι δυνατόν να διευκολύνει τη ροή βίντεο. Συγκεκριμένα, στα δεδομένα κινούμενης εικόνας, που είναι ευαίσθητα σε καθυστέρηση, ανατίθεται μεγαλύτερη προτεραιότητα απ' ό,τι σε άλλες μορφές δεδομένων, ενώ συχνά χρησιμοποιείται και καθορισμός προτεραιοτήτων ανάμεσα στις διάφορες μορφές δεδομένων βίντεο.

4.7.3 Διασύνδεση τοπικών δικτύων (LAN interconnection)

Οι δορυφόροι με δυνατότητα επεξεργασίας OBP είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για τη διασύνδεση τοπικών δικτύων (Local Area Networks, LAN) που βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές. Επίσης, είναι δυνατόν να συντελέσουν στην επέκταση των ήδη εγκατεστημένων επίγειων δικτύων ή να βοηθούν στην αντιμετώπιση της συμφόρησης που συχνά παρατηρείται σε αυτά. Στις παραπάνω περιπτώσεις, όπου η επίγεια σύνδεση κρίνεται ασύμφορη, ο δορυφόρος λειτουργεί ως ενδιάμεσος κόμβος και η διασύνδεση πραγματοποιείται σε επίπεδο δικτύου (επίπεδο 3) με χρήση του πρωτοκόλλου IP. Ένας τρόπος υλοποίησης είναι η παροχή συνδεσιμότητας ανάμεσα στα εικονικά δορυφορικά δίκτυα VSN και το δορυφόρο χρησιμοποιώντας μόνο ένα άλμα (one satellite hop). Τα VSN του συστήματος αποκτούν δυνατότητες εκπομπής προς μοναδικό χρήστη (unicast) και

πολυεκπομπής (multicast), ενώ εξασφαλίζεται και η μεταξύ τους απομόνωση. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι η συνδεσιμότητα που παρέχεται είναι δυνατόν να εγκαθίσταται μόνιμα και όχι μόνο κατόπιν αιτήσεως. Η πιο διαδεδομένη εφαρμογή της υπηρεσίας αυτής αφορά τη σύνδεση των κεντρικών γραφείων μιας εταιρείας με τις διάφορες εταιρικές εγκαταστάσεις ανά τον κόσμο. Με τον τρόπο αυτό, τα υποκαταστήματα της εταιρείας αποκτούν δυνατότητα πρόσβασης στο διαδίκτυο, περιήγηση στον παγκόσμιο ιστό και υπηρεσίες ηλεκτρονικού ταχυδρομείου. Σημειώνεται ότι οι αντίστοιχοι εξυπηρετητές (proxy, web, e-mail servers) βρίσκονται στα κεντρικά γραφεία.

Στο σημείο αυτό πρέπει να εξεταστεί μια εγγενής αδυναμία των δορυφορικών συστημάτων κατά την παροχή της συγκεκριμένης υπηρεσίας. Γενικά, οι χρήστες των τοπικών δικτύων επιθυμούν την εξασφάλιση ποιότητας υπηρεσιών από το δίκτυό τους και υποστήριξη διαφόρων πρωτοκόλλων, όπως το TCP/IP, από αυτά. Ιδανικά, δεν πρέπει να γίνεται φανερό στους χρήστες αν τα δεδομένα που αποστέλλουν και λαμβάνουν μεταφέρονται μέσω ενός τοπικού δικτύου, ενός επίγειου δικτύου μεγαλύτερης γεωγραφικής έκτασης ή ενός δορυφορικού δικτύου. Πρέπει δηλαδή η δομή του συνολικού δικτύου να είναι αδιαφανής σε αυτούς. Όπως όμως έχει αναφερθεί, το TCP/IP είναι ιδανικό για επίγεια δίκτυα, τα οποία χαρακτηρίζονται από μικρές καθυστερήσεις και χαμηλούς ρυθμούς λαθών, αλλά αντιμετωπίζει δυσκολίες όταν χρησιμοποιείται σε δίκτυα στα οποία περιλαμβάνονται δορυφορικές ζεύξεις. Το γεγονός αυτό δημιουργεί την ανάγκη προσεκτικής μελέτης του δορυφορικού συστήματος. Σημειώνεται ότι η χρήση “αστερισμών” από δορυφόρους χαμηλής τροχιάς (LEO) επιτυγχάνει τα καλύτερα αποτελέσματα αναφορικά με την υπηρεσία αυτή, κυρίως λόγω των μικρών καθυστερήσεων που παρουσιάζουν οι δορυφόροι LEO [Freund & Schorcht, 1995].

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ

AC	Adaptive Coding Προσαρμοστική κωδικοποίηση
ACM	Adaptive Coding and Modulation Προσαρμοστική κωδικοποίηση και διαμόρφωση
AFC	Adaptation Field Control Πεδίο ελέγχου προσαρμογής
AM	Adaptive Modulation Προσαρμοστική διαμόρφωση
AMSS	Aeronautical Mobile Satellite Service Κινητή αεροναυτική υπηρεσία μέσω δορυφόρου
ATM	Asynchronous Transfer Mode Ασύγχρονος τρόπος μεταφοράς
AVC	Advanced Video Coding Αναφέρεται στις ανεπτυγμένες τεχνικές κωδικοποίησης βίντεο
AWGN	Additive White Gaussian Noise Προσθετικός λευκός θόρυβος Gauss
BBFRAME	Base Band Frame Πλαίσιο βασικής ζώνης
BBHEADER	Base Band Header Επικεφαλίδα πλαισίου βασικής ζώνης
BC	Backwards Compatible Αναφέρεται στις λειτουργίες οι οποίες είναι συμβατές με το δορυφορικό πρότυπο προηγούμενης γενιάς (DVB-S)
BC-BC	Backwards Compatible Broadcast Services Αναφέρεται στις υπηρεσίες ευρυεκπομπής οι οποίες είναι συμβατές με παλαιότερες γενιές του προτύπου DVB-S
BCH	Bose-Chaundhuri-Hocquenghem Αναφέρεται στον αντίστοιχο κώδικα (εξωτερικής) κωδικοποίησης
BEP	Bit Error Probability Πιθανότητα εσφαλμένου ψηφίου
BER	Bit Error Ratio Ποσοστό εσφαλμένων ψηφίων (ως προς το συνολικό πλήθος των ψηφίων που μεταδόθηκαν)

BS	Bandwidth Slot Θυρίδα συχνότητας
BSS	Broadcast Satellite Service Υπηρεσία ευρυεκπομπής μέσω δορυφόρου
BW	BandWidth Αναφέρεται στο εύρος ζώνης (του αναμεταδότη)
CATV	Cable TeleVision Καλωδιακή Τηλεόραση
CBR	Constant Bit Rate Σταθερός ρυθμός ψηφίων
CCM	Constant Coding and Modulation Σταθερή κωδικοποίηση και διαμόρφωση
CNIR	Carrier to Noise and Interference Ratio Λόγος σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο
CNR	Carrier to Noise Ratio Λόγος φέροντος προς θόρυβο
CRC	Cyclic Redundancy Code Κώδικας κυκλικού πλεονασμού
DBSS	Direct Broadcast Satellite Service Υπηρεσία απευθείας ευρυεκπομπής μέσω δορυφόρου
DFL	Data Field Length Μήκος πεδίου δεδομένων
DLPC	Down Link Power Control Έλεγχος ισχύος της προς τα κάτω ζεύξης
DNP	Deleted Null Packet Αναφέρεται στο byte που χρησιμοποιείται για να σηματοδοτεί την παρουσία κενών πακέτων
DRR	Data Rate Reduction Μείωση Ρυθμού Δεδομένων
DSM-CC	Digital Storage Media Command and Control Αναφέρεται στο ειδικό πρωτόκολλο για τη δημιουργία καναλιών ελέγχου που αφορούν τα ρεύματα δεδομένων MPEG-2
DSNG	Digital Satellite News Gathering Συλλογή ψηφιακών δορυφορικών ειδήσεων
DTH	Direct To Home Αναφέρεται στις δορυφορικές υπηρεσίες που παρέχονται απευθείας στις

	εγκαταστάσεις του χρήστη
DTHTV	Direct To Home TV Τηλεόραση απευθείας στην οικία του χρήστη
DTT	Digital Terrestrial Television Επίγεια ψηφιακή τηλεόραση
DTVC	Digital Television Contribution Συμβολή ψηφιακής τηλεόρασης
DVB	Digital Video Broadcasting Εκπομπής ψηφιακού βίντεο – Αναφέρεται στο πρόγραμμα που ασχολείται με τη σχεδίαση παγκόσμιων προτύπων για τη μετάδοση ψηφιακής τηλεόρασης και υπηρεσιών δεδομένων
EHF	Extremely High Frequencies Αναφέρεται στη ζώνη συχνοτήτων από 30 έως 300 GHz
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power Ενεργώς ισοτροπικά ακτινοβολούμενη ισχύς
ETSI	European Telecommunications Standards Institute Ευρωπαϊκό ινστιτούτο τηλεπικοινωνιακών προτύπων
FD	Frequency Diversity Διαφορική λήψη συχνότητας
FDMA	Frequency Division Multiple Access Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας
FEC	Forward Error Correction Αναφέρεται στον τύπο κωδικοποίησης που πραγματοποιείται στο δέκτη χωρίς να χρειάζεται κάποιο είδος ανάδρασης από τον πομπό
FMT	Fade Mitigation Techniques Τεχνικών άμβλυνσης των διαλείψεων
FSS	Fixed Satellite Service Σταθερή υπηρεσία μέσω δορυφόρου
FTSN	Fixed Telephony Satellite Network Δίκτυο σταθερής τηλεφωνίας μέσω δορυφόρου
GEO	Geostatic Earth Orbit Γεωστατική τροχιά (δορυφόρου)
GW	GateWay Αναφέρεται στον κεντρικό σταθμό ενός δορυφορικού συστήματος
HDTV	High Definition TeleVision Τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας

HP	High Priority Υψηλή προτεραιότητα
HPA	High Power Amplifier Ενισχυτής υψηλής ισχύος
IBO	Input Back Off Περιθώριο ισχύος στην είσοδο (ενισχυτή)
IGMP	Internet Group Management Protocol Πρωτόκολλο διαχείρισης ομάδων διαδικτύου
IP	Internet Protocol Πρωτόκολλο Διαδικτύου
IRD	Integrated Receiver Decoder Ολοκληρωμένος αποκωδικοποιητής-δέκτης
ISI	Inter Symbol Interference Διασυμβολική παρεμβολή
ISP	Internet Services Provider Πάροχος υπηρεσιών διαδικτύου
ITS	Internet Trunking Service Υπηρεσία κορμού διαδικτύου
ITU	International Telecommunications Union Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών
ITU-R	ITU – Radiocommunications Το τμήμα ραδιοεπικοινωνιών της ITU
LAN	Local Area Network Τοπικό δίκτυο
LDPC	Low Density Parity Check Αναφέρεται στον κώδικα ελέγχου ισοτιμίας χαμηλής πυκνότητας
LEO	Low Earth Orbit Χαμηλή τροχιά (δορυφόρου)
LLC	Logical Link Control Αναφέρεται στο πρωτόκολλο ελέγχου λογικής ζεύξης
LMSS	Land Mobile Satellite Service Κινητή υπηρεσία ξηράς μέσω δορυφόρου
LOS	Line Of Sight Αναφέρεται στην ύπαρξη οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη
LP	Low Priority Χαμηλή προτεραιότητα

MAC	Medium Access Control Αναφέρεται στο υπόστρωμα ελέγχου προσπέλασης στο μέσο μετάδοσης
MAN	Metropolitan Area Network Μητροπολιτικό δίκτυο
MBT	Multicast Beams Table Πίνακας δεσμών πολυεκπομπής
MCPC	Multiple Channels Per Carrier Πολλαπλά κανάλια ανά φέρον
MCPT	Multiple Carrier Per Transponder Πολλαπλά φέροντα ανά αναμεταδότη
MCU	Multipoint Control Unit Μονάδα ελέγχου πολλαπλών σημείων
MEO	Medium Earth Orbit Μεσαία τροχιά (δορυφόρου)
MMSS	Maritime Mobile Satellite Service Κινητή ναυτική υπηρεσία μέσω δορυφόρου
MPE	Multi Protocol Encapsulation Ενθυλάκωσης πολλαπλών πρωτοκόλλων
MPEG	Motion Picture Experts Group Αναφέρεται στην ομάδα που ασχολείται με τη δημιουργία προτύπων που χρησιμοποιούνται στη συμπίεση βίντεο, ήχου κτλ
MSS	Mobile Satellite Service Κινητή υπηρεσία μέσω δορυφόρου
MTU	Maximum Transfer Unit Μέγιστη μονάδα μεταφοράς
NBC-BC	Non Backwards Compatible Broadcast Services Αναφέρεται στις υπηρεσίες ευρυεκπομπής οι οποίες δεν είναι συμβατές με παλαιότερες γενιές του προτύπου DVB-S
NP	Null Packets Κενά πακέτα
NPA	Network Point of Attachment Σημείο σύνδεσης του δικτύου
OBO	Output Back-Off Περιθώριο ισχύος στην έξοδο (ενισχυτή)
OBP	On-Board Processing Αναφέρεται σε δορυφόρους με δυνατότητες επεξεργασίας

OD	Orbit Diversity Διαφορική λήψη τροχιάς
PEP	Performance Enhancing Proxy Αναφέρεται στον εξυπηρετητή που χρησιμοποιείται σε δορυφορικό δίκτυο, το οποίο παρέχει πρόσβαση στο διαδίκτυο, με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος
PES	Packetized Elementary Stream Πακεταρισμένο Πρωταρχικό Ρεύμα
PID	Packet Identifier Αναγνωριστικό πακέτου
PL	Physical Layer Φυσικό στρώμα
PLFRAME	Physical Layer Frame Πλαίσιο φυσικού επιπέδου
PLHEADER	Physical Layer Header Επικεφαλίδα πλαισίου φυσικού επιπέδου
PoP	Points of Presence Σημεία παρουσίας
PRBS	Pseudo-Random Binary Sequence Ψευδοτυχαία δυαδική ακολουθία
PS	Professional Services Επαγγελματικές υπηρεσίες
PSK	Phase Shift Keying Διαμόρφωση φάσης
PSTN	Public Switched Telephone Network Δημόσιων τηλεφωνικό δίκτυο μεταγωγής
PUSI	Payload Unit Start Indicator Ενδείκτη που προσδιορίζει την αρχή του ωφέλιμου φορτίου
QAM	Quadrature Amplitude Modulation Ορθογώνια διαμόρφωση πλάτους
QEF	Quasi Error Free Αναφέρεται στην περίπτωση λήψης με πολύ μικρό ποσοστό BER, δηλαδή “σχεδόν χωρίς σφάλματα”
QoS	Quality of Service Ποιότητα Υπηρεσιών
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying

	Ορθογώνια διαμόρφωση φάσης
RCS	Return Channel via Satellite Αναφέρεται στο κανάλι επιστροφής μέσω δορυφόρου με σκοπό την επικοινωνία με τερματικά σταθερής θέσης
RCST	RCS Terminals Αναφέρεται στα τερματικά που χρησιμοποιούνται από τους παρόχους ή τους χρήστες για επικοινωνία τύπου RCS
RS	Reed-Solomon Αναφέρεται στον αντίστοιχο κώδικα (εξωτερικής) κωδικοποίησης
RSGW	Regenerative Satellite GateWay Αναφέρεται στην πύλη που χρησιμοποιείται σαν κεντρικός σταθμός στην περίπτωση αναγεννητικού δορυφόρου
SBS	Spot Beam Shaping Αναφέρεται στην τεχνική μορφοποίησης του διαγράμματος ακτινοβολίας κεραίας
SCPC	Single Channel Per Carrier Μοναδικό κανάλι ανά φέρον
SCPT	Single Carrier Per Transponder Απλό φέρον ανά αναμεταδότη
SD	Site Diversity Διαφορική λήψη θέσης
SDTV	Standard Definition TeleVision Τηλεόραση κανονικής ευκρίνειας
SI-PSI	Service Information - Program Specific Information Αναφέρεται στο πρωτόκολλο Πληροφορίας Υπηρεσιών - Συγκεκριμένης Πληροφορίας Προγράμματος
SMATV	Smart Antenna TeleVision Αναφέρεται στα συστήματα κεραιών συλλογής
SNAP	Sub Network Access Protocol Πρωτόκολλο πρόσβασης υποδικτύου
SNDU	Sub Network Data Unit Μονάδα δεδομένων υποδικτύου
ST	Satellite Terminal Δορυφορικό τερματικό λήψης
STB	Set Top Box Αναφέρεται στη συσκευή που συνδέει την τηλεόραση και μια εξωτερική πηγή σήματος, μετατρέποντας το σήμα σε περιεχόμενο που εμφανίζεται στην οθόνη

TCP	Transmission Control Protocol Πρωτόκολλο Ελέγχου Μεταφοράς
TDM	Time Division Multiplexing Πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου
TDMA	Time Division Multiple Access Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου
TS	Transport Stream Ρεύμα μεταφοράς
TWTA	Traveling Wave Tube Amplifier Ενισχυτής οδεύοντος κύματος
ULE	Ultra Light Encapsulation Εξαιρετικά ελαφριά ενθυλάκωση
ULPC	Up Link Power Control Έλεγχος ισχύος της προς τα άνω ζεύξης
VBR	Variable Bit Rate Μεταβλητός ρυθμός ψηφίων
VCM	Variable Coding and Modulation Μεταβλητή κωδικοποίηση και διαμόρφωση
VoD	Video on Demand Αναφέρεται στην υπηρεσία μετάδοσης κινούμενης εικόνας (βίντεο) κατόπιν ζήτησης
VoIP	Voice over Internet Protocol Αναφέρεται στην υπηρεσία μετάδοσης φωνής πάνω από πακέτα πρωτοκόλλου διαδικτύου
VPN	Virtual Private Network Εικονικό ιδιωτικό δίκτυο
VSAT	Very Small Aperture Terminal Τερματικό πολύ μικρής επιφανείας
VSN	Virtual Satellite Network Εικονικό δορυφορικό δίκτυο
WM	Windows Media Αναφέρεται στη σειρά κωδικοποιητών βίντεο/ήχου της Microsoft

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξένη Βιβλιογραφία

COLLINI-NOCKER B. and FAIRHURST G., [2003], “ULE versus MPE as an IP over DVB encapsulation”, IETF work in progress

COMINETTI A. and MORELLO A., [2000], “Digital video broadcasting over satellite (DVB-S): a system for broadcasting and contribution applications”, International journal of satellite communications, Vol. 18, p.393-410

ELBERT B., [1997], “The Satellite Communication Applications Handbook”, Artech House

ESGUEVILLAS A., GARCIA C., GIJON J, CRUICKSHANK H., IYENGAR and SUN Z., [2004], “Multimedia services over DVB-RCS OBP satellite systems”, EU Information Society Technologies SATLIFE project, IST-1-507675

ETSI EN 302 307, [2005], “Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications”, European Telecommunications Standards Institute

FILALI F. and DABBOUS W., [2004], “Issues on the IP multicast service behaviour over the next-generation satellite-terrestrial hybrid networks”

FREUND U. and SCHORCHT G., [1995], “LAN interconnection systems using LEO and GEO satellites – A simulation study”

KUROSE J. and ROSS K., [2003], “Computer networking: a top-down approach featuring the internet”, 2nd edition, Pearson Education, Inc.

MARAL G. and BOUSQUET, [1998], “Satellite communications systems : systems, techniques and technology”, 3rd edition, John Wiley & Sons

MORELLO A. and REIMERS U., [2004], “DVB-S2, the second generation standard for satellite broadcasting and unicasting”, International journal of satellite communications and networking, Vol.22, 249-268

PANAGOPOULOS A.D., ARAPOGLOU P-D.M. and COTTIS P.G. [2004], “Satellite communications at Ku, Ka and V bands: Propagation impairments and mitigation techniques”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol.6, No.3

RICHHARIA M., [1999], “Satellite communications systems : design principles”, 2nd edition, McMillan

RINALDO R., VAZQUEZ-CASTRO M. A. and MORELLO A., [2004], “DVB-S2 ACM modes for IP and MPEG unicast applications”, International journal of satellite communications and networking, Vol.22, p.367-399

VALLEJO F. and MORENO I., [2004], “New broadband services over a regenerative DVB-RCS satellite platform”

VAZQUEZ-CASTRO M. A., CARDOSO A. and RINALDO R., [2004], “Encapsulation and Framing Efficiency of DVB-S2 Satellite Systems”, IEEE

WEBSITES

www.mpeg.org

www.apple.com/mpeg4

www.microsoft.com

Ελληνική Βιβλιογραφία

ΚΑΝΕΛΛΟΠΟΥΛΟΣ Ι.Δ., [2003], Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων σε Γήινο Περιβάλλον, Εκδόσεις Τζιόλα

ΚΑΨΑΛΗΣ Χ. και ΚΩΤΤΗΣ Π., [2003], Δορυφορικές Επικοινωνίες, Εκδόσεις Τζιόλα