



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΠΑΡΕΧΟΜΕΝΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ
ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΠΛΑΤΦΟΡΜΩΝ
ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΤΥΠΟΥ DVB-S2**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σοφράς Ν. Βασίλειος

Τσόπελας Π. Ανδρέας

Επιβλέπων: Φ. Κωνσταντίνου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2008



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΠΑΡΕΧΟΜΕΝΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ
ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΠΛΑΤΦΟΡΜΩΝ
ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΤΥΠΟΥ DVB-S2**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σοφράς Ν. Βασίλειος

Τσόπελας Π. Ανδρέας

Επιβλέπων: Φ. Κωνσταντίνου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 14^η Ιουλίου 2008

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

.....
Ν. Ουζούνογλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Α. Παναγόπουλος
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2008

.....

Σοφράς Ν. Βασίλειος

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

Τσόπελας Π. Ανδρέας

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

Copyright © Σοφράς Ν. Βασίλειος, Τσόπελας Π. Ανδρέας, 2008

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. Η αναφορά των ονομάτων των συγγραφέων θα αποτελούσε για αυτούς μια χαρά. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

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

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον Καθηγητή μας **Φίλιππο Κωνσταντίνου** για τη δυνατότητα που μας έδωσε να εκπονήσουμε την παρούσα διπλωματική εργασία σε έναν ενδιαφέρον τομέα των τηλεπικοινωνιών. Επίσης, ευχαριστούμε τον υποψήφιο διδάκτορα **Χαράλαμφο Πήτα** για την βοήθεια και τις πολύτιμες παρατηρήσεις του κατά τη συγγραφή της διπλωματικής μας εργασίας και τον **Ιωάννη Κανόνη** για την πολύτιμη βοήθεια του κατά τη διάρκεια υλοποίησης του προσομοιωτή. Τέλος θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τους γονείς μας για την στήριξη τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μας, τα αδέρφια μας και τους φίλους μας για την υλική και ψυχολογική βοήθεια που μας προσέφεραν. Χωρίς τη συνεισφορά όλων των παραπάνω, δε θα ήταν εφικτή η πραγματοποίηση αυτής της εργασίας.

Αντρέας Τσόπελας

Βασίλης Σοφράς

Αθήνα, Ιούλιος 2008

Περίληψη

Σκοπός της αναχείρας διπλωματικής εργασίας είναι να παρουσιαστεί το ευρύ φάσμα εφαρμογών που προσφέρουν τα Δίκτυα Στρατοσφαιρικών Πλατφορμών (HAP Networks). Παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα έναντι των δορυφορικών και επίγειων συστημάτων και αναλύονται οι τεχνολογίες/πρότυπα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μετάδοση πληροφοριών. Επικεντρωθήκαμε στην ανάλυση του προτύπου DVB-S2, και στον τρόπο υποστήριξης υπηρεσιών διαδικτύου (IP services), πλέον των κλασικών Broadcast υπηρεσιών.

Σημαντικός παράγοντας της αξιολόγησης αυτών των πλεονεκτημάτων, είναι ο χαρακτηρισμός δεικτών επίδοσης Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS) σε δυνητικά σενάρια τηλεπικοινωνιακής κίνησης πραγματικού χρόνου. Κεντρική οντότητα αποτελεί το προσαρμοστικό σύστημα διαχείρισης πόρων που υποστηρίζει την Ποιότητα Υπηρεσίας και περιλαμβάνει τις βαθμίδες: Σύστημα Αναμονής, Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων και Έλεγχος Συμφόρησης.

Για την διερεύνηση αυτών των εννοιών, υλοποιήθηκε, με χρήση του περιβάλλοντος OPNET Modeler, πλήρως παραμετροποιημένος προσομοιωτής συστήματος βασισμένος στο πρότυπο DVB-S2, δίνοντας έμφαση κυρίως στο κομμάτι της χρονοδρομολόγησης πακέτων και πλαισίων του προτύπου. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων εξηχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα.

Λέξεις κλειδιά: Στρατοσφαιρική Πλατφόρμα, αρχιτεκτονικές δικτύου, κινητικότητα, DVB-S2, DVB-RCS, δρομολόγηση προσαρμοστικής κωδικοποίησης και διαμόρφωσης, ποιότητα υπηρεσίας, ευρυζωνική πρόσβαση σε υπηρεσίες IP, τηλεοπτικό σήμα κανονικής και υψηλής ευκρίνειας, ευρυεκπομπή, μονοεκπομπή, , dnb-s2 διαμορφωτής, έλεγχος αποδοχής κλήσεων, έλεγχος συμφόρησης.

Abstract

The purpose of this diploma dissertation is the presentation of the wide range of applications available, that High Altitude Platforms networks (HAP networks) can provide. HAP Networks have many advantages against satellites and terrestrial systems and there are also many supporting technologies/standards for the data transmission. We focused on the analysis of the new standard DVB-S2 and the possible ways that DVB-S2 can support IP services, except from the classical Broadcast services.

A crucial evaluation factor of these advantages is the key performance indicators of Quality of Service applying to possible traffic-mix scenarios. The central control unit is an adaptive radio resource management system which supports QoS and contains three main mechanisms : Queueing System, Call Admission Control and Congestion Control.

For the inquiry of these means, a discrete event simulator based on DVB-S2 standard was developed by using OPNET Modeler. Emphasis was given to packet and frame scheduling. Thanks to the results analysis, useful conclusions were exported.

Key words: High Altitude Platforms (HAP), network architecture, mobility, Digital Video Broadcast (DVB-S2, DVB-RCS), IP services, Adaptive Coding Modulation (ACM) Routing Manager, Quality of Service (QoS), SDTV, HDTV, broadband internet, unicasting, multicasting, call admission control, congestion control, DVB-S2 modulator

Ευρετήριο Περιεχομένων

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	16
1. ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΕΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΕΣ	18
1.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	18
1.2. ΔΟΥΡΥΦΟΡΙΚΑ, ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΕΠΙΓΕΙΑ ΚΑΙ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	20
1.2.1. <i>Η Εξέλιξη Των Δορυφορικών Επικοινωνιών Και Η Γέννηση Των Στρατοσφαιρικών Συστημάτων</i>	20
1.2.2. <i>Σύγκριση Δορυφορικών και Στρατοσφαιρικών Συστημάτων</i>	21
1.2.3. <i>Σύγκριση Επίγειων Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων και Στρατοσφαιρικών Συστημάτων HAPS</i>	24
1.3. ΤΥΠΟΙ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΠΛΑΤΦΟΡΜΩΝ	29
1.4. ΖΩΝΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΓΙΑ ΠΑΡΟΧΗ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΑΠΟ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ	31
1.5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 1 ^{ΟΥ} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	34
2. ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ	34
2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	34
2.2. ΔΙΑΔΟΣΗ	35
2.2.1. <i>Διαλείψεις Που Οφείλονται Στην Εξασθένηση Των Η/Μ Κυμάτων Λόγω Ατμοσφαιρικών Κατακρημνίσεων</i>	35
2.2.2. <i>Απώλειες Τροπόσφαιρας</i>	38
2.2.3. <i>Εξασθένηση Λόγω Νέφωσης</i>	40
2.2.4. <i>Αποπόλωση Σήματος</i>	41
2.2.5. <i>Τροποσφαιρικοί Σπινθηρισμοί</i>	43
2.2.6. <i>Σύνοψη Απωλειών Διάδοσης</i>	44
2.2.7. <i>Ολίσθηση Doppler</i>	45
2.3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΝΑΛΙΟΥ	47
2.3.1. <i>Μοντέλο Δυο Καταστάσεων</i>	47
2.3.2. <i>Μοντέλο Τριών Καταστάσεων</i>	52
2.3.2.i. Κατανομή καταστάσεων	54
2.4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΚΥΨΕΛΩΝ.....	56
2.4.1. <i>Εισαγωγή</i>	56
2.4.2. <i>Αναλυτικός Υπολογισμός CIR</i>	59
2.4.2.i. <i>Διάρθρωση Κυψελοειδούς Συστήματος</i>	60
2.4.2.ii. <i>Ισχύς Φέροντος</i>	61
2.4.2.iii. <i>Ισχύς Παρεμβολής</i>	62
2.4.3. <i>Διαφορική λήψη περιοχής (site diversity)</i>	65
2.5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 2 ^{ΟΥ} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	68
3. ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΚΤΥΟΥ	69
3.1. ΥΠΟΨΗΦΙΕΣ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ HAP ΑΠΟ ΤΗΝ ΆΠΟΨΗ ΤΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	69
3.2. ΠΙΘΑΝΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΔΙΚΤΥΩΝ	71
3.2.1. <i>Τοπολογίες Δικτύων</i>	71
3.2.2. <i>Περιπτώσεις Απλού και Πολλαπλών HAPs</i>	72
3.2.2.i. <i>Σενάριο Μονής HAP πλατφόρμας</i>	73
3.2.2.ii. <i>Σενάριο Πολλαπλών HAP πλατφορμών</i>	73
3.2.3. <i>Προτεινόμενα Μοντέλα Αναφοράς της Αρχιτεκτονικής Δικτύου</i>	74
3.2.3.i. <i>Μοντέλο Αναφοράς για Αρχιτεκτονική Μονού HAP</i>	74
3.2.3.ii. <i>Μοντέλο Αναφοράς για Αρχιτεκτονική Πολλαπλών HAPs</i>	75
3.3. ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ HAPS.....	76
3.3.1. <i>Θέματα Μακροκινητικότητας</i>	76
3.3.2. <i>Θέματα Μικροκινητικότητας</i>	78
3.4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 3 ^{ΟΥ} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	80
4. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΙΚΤΥΟΥ	80
4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	81
4.2. Το ΠΡΟΤΥΠΟ DVB-S2	81

4.2.1. MPEG και DVB.....	81
4.2.2. Εισαγωγή στο DVB-S.....	82
4.2.2.i. Απαιτήσεις Των Συστημάτων DVB-S.....	84
4.2.2.ii. Αρχιτεκτονική Μετάδοσης.....	84
4.2.2.iii. Δομή Του Πλαισίου DVB-S.....	85
4.2.2.iv. Τυχοποίηση Των Ψηφίων.....	86
4.2.2.v. Κωδικοποίηση Για Προστασία Από Σφάλματα.....	86
4.2.2.vi. Είδη Ψηφιακής Διαμόρφωσης.....	87
4.2.2.vii. Ρυθμός Μετάδοσης Σε Σχέση Με Το Εύρος Ζώνης Αναμεταδότη.....	87
4.2.2.viii. Σηματοθορυβικός Λόγος Ως Προς Ποσοστό Λανθασμένων Ψηφίων.....	89
4.2.3. Εισαγωγή στο DVB-S2.....	90
4.2.3.i. Αρχιτεκτονική Μετάδοσης Του Συστήματος DVB-S2.....	91
4.2.3.ii. Κωδικοποίηση.....	92
4.2.3.iii. Διαμόρφωση.....	93
4.2.4. Δομή Πλαισίου Στο DVB-S2.....	94
4.2.4.i. Πλαισίωση Φυσικού Στρώματος.....	94
4.2.4.ii. Πλαισίωση Στρώματος Βασικής Ζώνης.....	95
4.2.5. Χρήση Προσαρμοστικής Κωδικοποίησης και Διαμόρφωσης.....	96
4.2.6. Συμβατότητα Με Τα Συστήματα DVB-S.....	96
4.2.7. Σύγκριση Απόδοσης Συστημάτων DVB-S Και DVB-S2.....	97
4.2.8. Ενθυλάκωση Πακέτων IP Σε Συστήματα ACM DVB-S2.....	99
4.2.8.i. Ανάλυση Της Ενθυλάκωσης.....	100
4.2.8.ii. Η Ενθυλάκωση MPE.....	102
4.2.8.iii. Η Ενθυλάκωση ULE.....	103
4.2.8.iv. Σύγκριση Ενθυλακώσεων MPE Και ULE.....	105
4.3. DVB-RCS.....	106
4.3.1. DVB Με Κανάλι Επιστροφής Μέσω Δορυφόρου.....	106
4.3.2. Διαδικασίες Προτυποποίησης Του DVB-RCS.....	107
4.3.3. Περιεχόμενα Της Προδιαγραφής Του DVB-RCS.....	107
4.3.4. Συμπεράσματα.....	110
4.4. ΆΛΛΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ.....	110
4.4.1. WCDMA-UMTS.....	110
4.4.2. WiMAX/WiFi.....	113
4.5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 4 ^{ΟΥ} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	115
5. QOS.....	116
5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	116
5.2. ΘΕΜΕΛΙΑ ΤΟΥ QOS.....	116
5.3. ΒΑΣΙΚΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ QOS.....	117
5.3.1. Επίπεδο Ελέγχου.....	117
5.3.2. Επίπεδο Δεδομένων.....	118
5.3.3. Επίπεδο Διαχείρισης.....	119
5.4. ΔΕΙΚΤΕΣ QOS.....	119
5.4.1. Δείκτες Ποιότητας Σταθερών Ευρυζωνικών Υπηρεσιών.....	119
5.4.1.i. Τεχνικοί δείκτες για δίκτυα IP ανεξαρτήτου παρεχόμενων υπηρεσιών.....	120
Απόκλιση Καθυστέρησης (IP Delay Variation - IPDV).....	121
Λόγος απώλειας πακέτων (IP packet loss ratio – IPLR).....	121
Διαθεσιμότητα Υπηρεσίας (Service Availability).....	121
5.4.1.ii. Τεχνικοί δείκτες για δίκτυα IP προσανατολισμένοι ανά υπηρεσία.....	122
Καθυστέρηση (Delay).....	122
5.4.2. Δείκτες Ποιότητας Υπηρεσιών Συστημάτων Κινητών Επικοινωνιών.....	124
5.4.2.i. Δείκτες ανεξάρτητοι της υπηρεσίας.....	124
5.5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 5 ^{ΟΥ} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	128
6. ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ.....	129
6.1. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΙΝΗΣΗΣ.....	130
6.2. ΣΕΝΑΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΣΕ HAPS.....	131
6.2.1. Ευρυζωνική Πρόσβαση στο Internet.....	132
6.2.2. Ευρυζωνική Πρόσβαση στο Intranet Εταιρειών.....	133
6.2.3. Βιντεοδιάσκεψη.....	134
6.2.4. Ψυχαγωγία.....	134
6.2.5. Τηλεμάθηση.....	135
6.2.6. Τηλεϊατρική.....	136

6.2.7. Επικοινωνίες σε Περιοχές Καταστροφών	137
6.2.8. Επικοινωνίες σε Συγκεντρώσεις Κόσμου	137
6.2.9. Επικάλυψη Επίγειων Ζεύξεων για Ανθεκτικότητα (ανάκτηση σφάλματος ζεύξης).....	138
6.2.10. Hot Spot Ασύρματου LAN.....	138
6.2.11. Ασύρματο LAN σε Τρένα και Λεωφορεία (backhaul).....	138
6.2.12. UMTS Σταθμός Βάσης.....	139
6.2.13. Ευρυζωνικότητα Βασισμένη σε Ευρεκπομπή (Broadcast Based Broadband - B3).....	139
6.2.14. Στρατιωτικές Εφαρμογές	140
6.2.15. Εφαρμογές σε Υποανάπτυκτες Χώρες	140
6.3. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ DVB-S2	140
6.3.1. Κατηγορίες Υπηρεσιών DVB-S2	141
6.3.2. Εκπομπή Ψηφιακού Τηλεοπτικού Σήματος με Σταθερή Κωδικοποίηση και Διαμόρφωση (CCM Digital TV Broadcasting).....	143
6.3.3. Εκπομπή Ψηφιακού Τηλεοπτικού Σήματος Κανονικής και Υψηλής Ευκρίνειας (SDTV and HDTV Broadcasting)	144
6.3.4. Διανομή Πολλαπλών Ρευμάτων Μεταφοράς σε Επίγειους Αναμεταδότες (Distribution of Multiple TS Multiplexes to DTT Transmitters)	146
6.3.5. Υπηρεσίες Συλλογής Συλλογής Ειδήσεων με Χρήση Προσαρμοστικής Κωδικοποίησης και Διαμόρφωσης (DSNG Over ACM)	148
6.3.6. Υπηρεσίες Εκπομπής IP σε Μοναδικό Χρήστη (IP Unicast Services).....	150
6.3.7. Εκπομπή Προς Πολλαπλούς Χρήστες (Multicasting).....	153
6.4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 6 ^{ΟΥ} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	155
7. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	156
7.1. ΘΕΩΡΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	156
7.1.1. Ο Ρόλος της Ανάλυσης της Απόδοσης Συστημάτων	156
7.1.2. OPNET Modeler 10.0	157
7.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗ.....	157
7.3. ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ	161
7.3.1. Γενικά.....	161
7.3.2. Χρόνοι Αφιξης και Διάρκεια Συνόδων.....	161
7.3.3. Μοντέλο VoIP.....	162
7.3.4. Μοντέλα VoD, HDTV και SDTV	163
7.3.5. WWW μοντέλο	163
7.3.6. Radio μοντέλο.....	165
7.4. ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗ	165
7.4.1. Κύρια Διεργασία Προσομοίωσης.....	165
7.4.2. Οι Διεργασίες Υπηρεσιών	167
7.4.3. Γεννήτριες Κίνησης	167
7.4.4. Αλγόριθμοι Ελέγχου Κίνησης.....	170
7.4.4.i. Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων (Call Admission Control – CAC).....	171
7.4.4.ii. Έλεγχος Συμφόρησης (Congestion Control - CC)	172
7.4.5. Ο DVB-S2 Διαμορφωτής	174
7.4.5.i. Προδιαγραφές Διαμορφωτή	174
7.4.5.ii. Αλγόριθμος Χρονοδρομολόγησης Πακέτων.....	176
7.4.5.iii. Υλοποίηση Διεργασίας Διαμορφωτή Στον Προσομοιωτή	181
7.4.6. Δέκτες – Receivers.....	182
7.5. ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	184
7.5.1. Μόνο Broadcast Υπηρεσίες	184
7.5.2. Broadcast Υπηρεσίες και IP υπηρεσίες – Load Factor 0.8.....	190
7.6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	201
7.7. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	201
7.8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 7 ^{ΟΥ} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ	202

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Διάδοση, υπό συνθήκες βροχής για επίγεια και στρατοσφαιρική ζεύξη.....	27
Σχήμα 1.2 - μη επανδρωμένα αερόπλοια με ειδικά συστήματα προώθησης και ηλιακές κυψέλες.....	30
Σχήμα 1.3 - Μη επανδρωμένα στρατοσφαιρικά αεροσκάφη.....	30
Σχήμα 1.4 - Επανδρωμένα στρατοσφαιρικά αεροσκάφη	30
Σχήμα 2.1 - Μεταβολή μήκους εντός βροχής συναρτήσει της γωνίας ανύψωσης και του ύψους βροχής	37
Σχήμα 2.2 - Ειδική απόσβεση συναρτήσει της συχνότητας και του ρυθμού βροχόπτωσης.....	37
Σχήμα 2.3 - Απώλειες Λόγω Βροχής ως προς το ποσοστό του συνολικού χρόνου σε δορυφόρο πάνω από την Αθήνα, Ελλάδα (Γωνία Ανύψωσης = 30°, κάθετη πόλωση).....	38
Σχήμα 2.4 – Ειδική απόσβεση A_{go} και A_{gu} λόγω οξυγόνου και υδρατμών:	39
Σχήμα 2.5 - Τιμές εξασθένισης λόγω νέφωσης και ομίχλης για συγκεκριμένο εύρος πιθανοτήτων για τρεις χαρακτηριστικές συχνότητες.....	41
Σχήμα 2.6 - Λήψη ορθογωνίων πολώσεων.....	43
Σχήμα 2.7 - Διασταύρωση πόλωσης(XPD) λόγω βροχής σε dB ως προς το ποσοστό του συνολικού χρόνου για το οποίο υπερβαίνεται αυτή η τιμή για την περιοχή της Αθήνας, Ελλάδα.....	43
Σχήμα 2.8 - Απώλειες που οφείλονται στη βροχή.....	44
Σχήμα 2.9 - Εξάρτηση του φαινομένου Doppler από την γωνία ανύψωσης (0°-90°) για τρεις ενδεικτικές ταχύτητες.....	46
Σχήμα 2.10 - Μοντέλο Καναλιού "Καλή / Κακή Κατάσταση"	51
Σχήμα 2.11 - Μοντέλο Καναλιού Τριών Καταστάσεων.....	54
Σχήμα 2.12 - Γενική όψη της αρχιτεκτονικής ενός συστήματος HAP.....	57
Σχήμα 2.13 - Τυπικά παραδείγματα αποτυπωμάτων πολλαπλών δεσμών που προτείνονται στη σύσταση της ITU-R: α) μοντέλο ελλειπτικής δέσμης (367 δέσμες), β) μοντέλο κυκλικής δέσμης πολλαπλών ζωνών (397 δέσμες).	58
Σχήμα 2.14 - Αποτυπώματα κάλυψης HAP, όπου το dn είναι η απόσταση από το SPP στο κέντρο κάθε κελιού, δ είναι μια γωνική μετατόπιση της Φ_n και r είναι η ακτίνα της κυψέλης.	59
Σχήμα 2.15 - Τυπικό προφίλ κεραίας τύπου patch και η προσέγγιση $ \text{sinc}^3bx $ με $\beta=2.259$ για εύρος $-\pi \leq \phi \leq \pi$	60
Σχήμα 2.16 - Τιμές κέρδους κεραίας για διάφορες τιμές του Φ_n , ανταποκρινόμενο σε διάφορες γωνίες, σχετικές με το SPP σημείο.....	60
Σχήμα 2.17 - Σχηματισμός ενός δικτύου κυψελών.....	61
Σχήμα 2.18 - Μια τρισδιάστατη όψη που δείχνει το κέντρο μιας κυψέλης A και ένα αυθαίρετο σημείο X.....	63
Σχήμα 2.19 - Η απόδοση κεραίας $ \text{sinc}^3bx $. Συνολική κάλυψη εδάφους για ομοδιαυλικές κεραίες με γωνία διαχωρισμού κύριου λοβού 10°. Οι λευκές περιοχές υποδεικνύουν CIR χαμηλότερο των 0dB.....	65
Σχήμα 2.20 - α) Απαιτούμενο όριο απόσβεσης για 99.9% διαθεσιμότητα χρησιμοποιώντας διαφορική λήψη και β) Γεωμετρία διστατικής σκέδασης λόγω βροχής.....	66
Σχήμα 2.21 - CIR οφειλόμενο σε βροχή για μια περιοχή κάλυψης ακτίνας 20 χμ.	67
Σχήμα 3.1 - Συνδεσιμότητα μεταξύ HAPs	72
Σχήμα 3.2 - Γενική άποψη αρχιτεκτονικής δικτύου	75

Σχήμα 3.3 - Προτεινόμενη αρχιτεκτονική δικτύου πολλαπλών HAP	76
Σχήμα 3.4 - Μικροκινητικότητα Μονού και Πολλαπλών HAPs.....	79
Σχήμα 4.1 - Το σύστημα DVB για δορυφορική ψηφιακή τηλεόραση.....	85
Σχήμα 4.2 - Δομή πολυπλεξίας και μετάδοσης.	86
Σχήμα 4.3 - Υποβάθμιση του Eb/No εξαιτίας των περιορισμών στο εύρος ζώνης του αναμεταδότη (BW)	89
Σχήμα 4.4 - Λειτουργικό μπλοκ διάγραμμα του συστήματος DVB-S2.....	91
Σχήμα 4.5 - Οι τέσσερις πιθανοί αστερισμοί για τη διαμόρφωση.....	94
Σχήμα 4.6 - Απαιτούμενος λόγος CNR σε σχέση με τη φασματική απόδοση.....	99
Σχήμα 4.7 - Η αρχιτεκτονική διεπαφών του DVB-S2 που χρησιμοποιεί ACM.....	100
Σχήμα 4.8 - Επικεφαλίδα MPE.....	103
Σχήμα 4.9 - Ελάχιστη επικεφαλίδα ULE.....	104
Σχήμα 4.10 - Γενικό Μοντέλο DVB-RCS.....	108
Σχήμα 4.11 - Απλοποιημένο σχήμα αρχιτεκτονικής δικτύου DVB-RCS.....	109
Σχήμα 6.1 Ωφέλιμοι ρυθμοί μετάδοσης συναρτήσει του ρυθμού κωδικοποίησης του συνελκτικού κωδικοποιητή.....	144
Σχήμα 6.2 Διάταξη συστήματος DVB-S2 για την εκπομπή SDTV και HDTV με χρήση VCM	146
Σχήμα 6.3 Διάταξη συστήματος DVB-S2 για διανομή πολλαπλών σημάτων DTT μέσω δορυφόρου.....	148
Σχήμα 6.4 Σχήματα μετάδοσης και λήψης (απλό ρεύμα μεταφοράς TS, ομοιόμορφη προστασία για μεγάλα χρονικά διαστήματα).....	149
Σχήμα 6.5 Παράδειγμα υπηρεσιών IP με χρήση ζεύξης DVB-S2 ACM.....	151
Σχήμα 6.6 Εκπομπή IP προς μοναδικό χρήστη (IP unicasting) και χρήση τεχνικής ACM (περίπτωση πολλαπλών ρευμάτων εισόδου με ομοιόμορφη προστασία ανά ρεύμα)	153
Σχήμα 7.1 Βασικό σενάριο πάνω στο οποίο βασίστηκε η Προσομοίωση.....	158
Σχήμα 7.2 Διάγραμμα μονάδων προσομοιωτή	160
Σχήμα 7.3 Ροή πακέτων WWW.....	163
Σχήμα 7.4 Κύρια διεργασία – Root	165
Σχήμα 7.5 Τυπική session process.....	167
Σχήμα 7.6 Τυπική dispatcher process τύπου on-off	168
Σχήμα 7.7 Video Dispatcher	170
Σχήμα 7.8 Διεργασίες Ελέγχου Κίνησης	171
Σχήμα 7.9 VoIP dispatcher με Congestion Control.....	172
Σχήμα 7.10 Λειτουργίες DVB-S2 Διαμορφωτή	174
Σχήμα 7.11 Διάγραμμα Αλγορίθμου Χρονοδρομολόγησης Πακέτων και Δημιουργίας BBFRAME	179
Σχήμα 7.12 Παράδειγμα επιλογής πακέτων IP ουρών για διαμόρφωση BBFRAME.....	180
Σχήμα 7.13 Η DVB process.....	181
Σχήμα 7.14 receiver process	182
Σχήμα 7.15 - Μήκος ουράς Broadcast Υπηρεσιών (Στιγμιαίο, Μέσο, κατανομή PDF)	184
Σχήμα 7.16 - Καθυστέρηση μετάδοσης και Jitter πακέτων HDTV υπηρεσίας.....	185
Σχήμα 7.17 - Καθυστέρηση μετάδοσης και Jitter πακέτων SDTV υπηρεσίας.....	185
Σχήμα 7.18 - Καθυστέρηση μετάδοσης και Jitter πακέτων Radio υπηρεσίας.....	186
Σχήμα 7.19 - Ρυθμός μετάδοσης γεννητριών κίνησης σε bps.	187
Σχήμα 7.20 - Ρυθμός μετάδοσης γεννητριών κίνησης σε symbols/sec.	187
Σχήμα 7.21 - Μέση τιμή Μήκους DFL και Padding των BBFRAMES.....	188
Σχήμα 7.22 - Ρυθμοί Μετάδοσης BC FECs και dummy πλαισίων	188
Σχήμα 7.23 - Σύγκριση ωφέλιμου Symbol Rate με συνολικά χρησιμοποιούμενο	189

Σχήμα 7.24 - Μήκος ουράς Broadcast Υπηρεσιών (Στιγμαίο, Μέσο, κατανομή PDF)	191
Σχήμα 7.25 - Μήκος ουράς VoIP Υπηρεσιών (Στιγμαίο, Μέσο, κατανομή PDF).....	191
Σχήμα 7.26 - Μήκος ουράς VoD Υπηρεσιών (Στιγμαίο, Μέσο, κατανομή PDF)	192
Σχήμα 7.27 - Μήκος ουράς WWW Υπηρεσιών (Στιγμαίο, Μέσο, κατανομή PDF).....	192
Σχήμα 7.28 - Πλήθος dropped πακέτων από timeout ουράς	193
Σχήμα 7.29 - Καθυστέρηση μετάδοσης και Jitter πακέτων HDTV υπηρεσίας	193
Σχήμα 7.30 - Καθυστέρηση μετάδοσης και Jitter πακέτων SDTV υπηρεσίας.....	194
Σχήμα 7.31 - Καθυστέρηση μετάδοσης και Jitter πακέτων Radio υπηρεσίας.....	194
Σχήμα 7.32 - Καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων VoD υπηρεσίας.....	195
Σχήμα 7.33 - Jitter πακέτων VoD υπηρεσίας.	195
Σχήμα 7.34 - Καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων VoIP υπηρεσίας.....	196
Σχήμα 7.35 - Jitter πακέτων VoIP υπηρεσίας.....	196
Σχήμα 7.36 - Καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων WWW υπηρεσίας.....	197
Σχήμα 7.37 - Jitter πακέτων WWW υπηρεσίας.....	197
Σχήμα 7.38 - Ρυθμός μετάδοσης γεννητριών κίνησης σε bps.	198
Σχήμα 7.39 - Ρυθμός μετάδοσης γεννητριών κίνησης σε symbols/sec.	198
Σχήμα 7.40 - Μέση τιμή Μήκους DFL και Padding των Broadcast BBFRAMES.....	199
Σχήμα 7.41- Μέση τιμή Μήκους DFL και Padding των IP BBFRAMES	199
Σχήμα 7.42 - Ρυθμοί Μετάδοσης BC FECs, IP FECs και dummy πλαισίων.....	200
Σχήμα 7.43 - Σύγκριση ωφέλιμου Symbol Rate με συνολικά χρησιμοποιούμενο, σε BC και IP πλαίσια	200

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1 - Σύγκριση μεταξύ στρατοσφαιρικών, δορυφορικών και ασύρματων επίγειων συστημάτων.....	28
Πίνακας 2 - Σύγκριση των 3 διαφορετικών τύπων στρατοσφαιρικής πλατφόρμας	31
Πίνακας 3 - Ανάθεση Συχνοτήτων για τα Δίκτυα με τη χρήση Στρατοσφαιρικών Πλατφορμών.....	32
Πίνακας 4 - Μετρήσεις για περιπτώσεις Πόλης και Εθνικής Οδού	50
Πίνακας 5 - Οι τιμές των πιθανοτήτων μετάβασης και των παραμέτρων α , β , γ , σ ορίζονται για διαφορετικά περιβάλλοντα	55
Πίνακας 6 - Τυπικές παράμετροι για ένα HAP σύστημα	67
Πίνακας 7 - Προτεινόμενες εφαρμογές που πιθανώς θα εξυπηρετούνται από HAPs.	70
Πίνακας 8 - Απόδοση δορυφορικού DVB συστήματος για διαφορετικές λειτουργίες.	90
Πίνακας 9 - Τύποι διαμόρφωσης και ρυθμοί μετάδοσης.....	114
Πίνακας 10 Δείκτες προσανατολισμένοι σε Voip και VoD	125
Πίνακας 11 Δείκτες προσανατολισμένοι σε Web Browsing	127
Πίνακας 12 Κατηγορίες Κίνησης.....	130
Πίνακας 13 Χαρακτηριστικά Κίνησης	130
Πίνακας 14 Προδιαγραφές Συστήματος DVB-S2	175
Πίνακας 15 Αντιστοιχία Υπηρεσιών - Διαμορφώσεων	175
Πίνακας 16 - Broadcast Traffic Mix.....	184
Πίνακας 17 - Broadcast Traffic Mix.....	190
Πίνακας 18 - Unicast Traffic Mix.....	190

Πρόλογος

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να παρουσιαστεί το ευρύ φάσμα εφαρμογών και πλεονεκτημάτων που προσφέρουν τα Δίκτυα Στρατοσφαιρικών Πλατφορμών (HAP Networks). Σημαντικός παράγοντας της αξιολόγησης αυτών των πλεονεκτημάτων, είναι το κατά πόσο ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να παρέχει δυνατότητες Ποιότητας Υπηρεσιών (QoS) για λειτουργίες πραγματικού χρόνου. Για την διερεύνηση αυτής της έννοιας, υλοποιήθηκε, με χρήση του εργαλείου OPNET, προσομοιωτής βασισμένος στο πρότυπο DVB-S2, δίνοντας έμφαση κυρίως στο κομμάτι της χρονοδρομολόγησης πακέτων και πλαισίων του προτύπου.

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μία σύντομη ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών που οδήγησαν στις Στρατοσφαιρικές Πλατφόρμες και παρουσιάζονται τα γενικά χαρακτηριστικά και τα πλεονεκτήματά τους σε σχέση με άλλα ανταγωνιστικά συστήματα.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά διάδοσης ενός HAP συστήματος, με αναφορά στους κύριους παράγοντες που προκαλούν διαλείψεις στο κανάλι, αλλά και στο πως μπορούμε να το χαρακτηρίσουμε με βάση το παραδοσιακό μοντέλο δύο καταστάσεων ή το πιο κατάλληλο για την περίπτωση των HAPs μοντέλο τριών καταστάσεων. Τέλος επισημαίνονται οι αρχιτεκτονικές κυψελών που μπορούν να εφαρμοστούν.

Στο Κεφάλαιο 3 διερευνούνται οι διάφορες προτεινόμενες αρχιτεκτονικές και τοπολογίες ενός HAP Network. Παρουσιάζονται επίσης κάποια θέματα μακροκινητικότητας και μικροκινητικότητας σε σχέση με τις κυψέλλες ενός HAP.

Στο Κεφάλαιο 4 αναφέρονται οι τεχνολογίες δικτύου που υποστηρίζονται, αναλύοντας διεξοδικά το πρότυπο DVB-S2, που αποτελεί και τον πυρήνα της προσομοίωσής μας. Η ανάλυση περιλαμβάνει θέματα αρχιτεκτονικής (πλαισίωση, διαμόρφωση, κωδικοποίηση κτλ.) του προτύπου.

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται η επεξήγηση του όρου Ποιότητα Υπηρεσιών (QoS) και στις θεμελιώδεις έννοιες στις οποίες βασίζεται, ενώ αναφέρουμε τα κυριότερα εργαλεία που απαρτίζουν την αρχιτεκτονική του QoS. Τέλος παρουσιάζονται οι Δείκτες Ποιότητας με τους οποίους αξιολογούμε ένα σύστημα, είτε πρόκειται για σταθερές ευρυζωνικές υπηρεσίες, είτε για σύστημα κινητών επικοινωνιών.

Στο Κεφάλαιο 6 ασχολούμαστε με τα δυνατά σενάρια λειτουργίας και υπηρεσιών σε HAP Networks και στη συνέχεια κάνουμε και το ίδιο για πιθανές υπηρεσίες που μπορεί να προσφέρει ένα DVB-S2 σύστημα.

Το Κεφάλαιο 7 αποτελεί το κεφάλαιο της προσομοίωσης. Αναφέρονται κάποια γενικά θέματα περί προσομοίωσης και του εργαλείου OPNET, και συνεχίζουμε με την περιγραφή του συστήματος που θέλουμε να προσομοιωθεί. Αφού παρουσιαστούν τα μοντέλα που παριστάνουν τις γεννήτριες κίνησης που χρησιμοποιήθηκαν, γίνεται περιγραφή της υλοποίησης του συστήματος στο OPNET. Εδώ δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στους αλγόριθμους CAC, Congestion και Χρονοδρομολόγησης πακέτων. Τέλος παραθέτονται τα αποτελέσματα των σεναρίων της προσομοίωσης που έτρεξαν.

Τέλος στο Κεφάλαιο 8 εξάγονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των αποτελεσμάτων του προσομοιωτή και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

1. Στρατοσφαιρικές Πλατφόρμες

1.1. Ιστορική Αναδρομή

Οι σύγχρονοι χρήστες απαιτούν υψηλής χωρητικότητας υπηρεσίες πολυμέσων, πρόσβαση σε internet υψηλών ταχυτήτων, εξελιγμένη ποιότητα επικοινωνίας από και προς κινητά τερματικά. Ο ασύρματος τρόπος μετάδοσης συγκεντρώνει σήμερα το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, καθώς μπορεί να προσφέρει υπηρεσίες ευρείας ζώνης απ' ευθείας στους καταναλωτές. Συστήματα σταθερής ασύρματης πρόσβασης FWA (fixed wireless access) εγκαθίστανται για να παρέχουν τηλεφωνία σε επιχειρήσεις και οικιακούς χρήστες. Ευρυζωνικά ασύρματα συστήματα BWA (broadband wireless access) σχεδιάζονται για να καλύψουν τις ανάγκες multimedia εφαρμογών, σε ρυθμούς τουλάχιστον 2 Mbps, και να υλοποιήσουν το λεγόμενο SOHO (small office / home office). Ο περιορισμός του διατιθέμενου ραδιοφάσματος από τη μια μεριά και ο ραγδαίος πολλαπλασιασμός των χρηστών από την άλλη, καθιστούν αναπόφευκτη τη χρήση κάποιας στρατηγικής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας, που βασίζεται συνήθως πάνω σε μια σταθερή κυψελωτή δομή. Ο κύριος στόχος της αυξημένης χωρητικότητας επιβάλλει τη διαρκή μείωση του μεγέθους των κυψελών, οδηγώντας σε micro/pico -κυψέλες σε περιοχές όπου η πυκνότητα των χρηστών είναι μεγάλη.

Έτσι όμως αυξάνεται ολοένα ο αριθμός των απαιτούμενων σταθμών βάσης, μαζί με το κόστος υλοποίησης του συστήματος. Ταυτόχρονα γεννώνται σοβαρές ανησυχίες για τους πιθανούς κινδύνους υγείας και την επιβάρυνση του περιβάλλοντος από την ακτινοβολία των επίγειων σταθμών. Οι σύγχρονες τάσεις οδηγούν παράλληλα στη χρησιμοποίηση υψηλών συχνοτήτων, που δεν υποφέρουν ακόμα από μεγάλο "συνωστισμό" υπηρεσιών και προσφέρουν σημαντικό εύρος ζώνης. Οι περιοχές των 28 GHz και 38 GHz ή ακόμα υψηλότερες ζώνες είναι διατεθειμένες σε ευρυζωνικές υπηρεσίες, υπηρεσίες LMDS (Local Multipoint Distribution Services) και MVDS (Multipoint Video Distribution Services), που περιλαμβάνουν internet υψηλής ταχύτητας, τηλεφωνία, τηλεόραση, βίντεο υπό αίτηση, εκπομπές ήχου προς το ευρύ κοινό, κλπ.

Ωστόσο τα χιλιοστομετρικά μήκη κύματος που αντιστοιχούν στις παραπάνω συχνότητες έχουν δυο βασικά μειονεκτήματα: (α) απαιτούν διάδοση οπτικής επαφής LOS (line-of-sight) (β) υπόκεινται σε απώλειες λόγω καιρικών φαινομένων, ιδιαίτερες αποσβέσεις λόγω βροχής.

Οι δορυφορικές επικοινωνίες αποτελούν μια λύση στο πρόβλημα διάδοσης οπτικής επαφής και παρέχουν σήμερα πληθώρα υπηρεσιών ευρείας ζώνης σε πολλούς χρήστες. Εν τούτοις η επίδοση των γεωστατικών δορυφόρων (geostationary earth orbit satellites, GEO) περιορίζεται από το μεγάλο ύψος της τροχιάς τους που προκαλεί σημαντική εξασθένηση στο μεταδιδόμενο σήμα. Ο ίδιος παράγοντας συντελεί στην καθυστέρηση διάδοσης των δορυφορικών ζεύξεων, φαινόμενο που επηρεάζει όχι μόνο τη μετάδοση φωνής αλλά και κάποια πρωτόκολλα δεδομένων.

Παράλληλα οι φυσικοί περιορισμοί στις διαστάσεις της κεραίας του δορυφορικού αναμεταδότη οδηγούν σε ένα κατώτατο όριο του μεγέθους των κυψελών που προβάλλονται στη γήινη επιφάνεια, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η βέλτιστη επαναχρησιμοποίηση των συχνοτήτων. Η επικοινωνία μέσω δορυφόρων χαμηλής τροχιάς (low altitude earth orbit satellites, LEO) παρακάμπτει ορισμένους από τους παραπάνω περιορισμούς, ωστόσο υποφέρει από προβλήματα έγκαιρης διαπομπής τόσο μεταξύ των κυψελών όσο και μεταξύ των δορυφόρων. Η ανάγκη ύπαρξης μεγάλου αριθμού δορυφορικών αναμεταδοτών LEO προκειμένου να παρασχεθεί συνεχής κάλυψη σε μια περιοχή αυξάνει σημαντικά την πολυπλοκότητα και το οικονομικό φορτίο και συνεπώς μειώνει την εμπορική επιτυχία μιας τέτοιας λύσης.

Έτσι παραμένει πάντα επίκαιρη η αναζήτηση πρωτοποριακών μεθόδων και νέων τεχνολογιών στον τομέα της ασύρματης μετάδοσης ευρείας ζώνης. Σε μια από τις τελευταίες συνεδριάσεις της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (ITU) προτάθηκε μια καινούργια τεχνολογία για την παροχή τέτοιων υπηρεσιών. Αυτή η καινούργια τεχνολογία έχει την ονομασία «πλατφόρμα μεγάλου ύψους» ή αλλιώς στρατοσφαιρική πλατφόρμα.

Οι στρατοσφαιρικές τηλεπικοινωνιακές πλατφόρμες (High Altitude Platforms, HAPs) αντιπροσωπεύουν μια υβριδική τεχνολογική προσέγγιση στο πρόβλημα της ευρυζωνικής επικοινωνίας, καθώς συνδυάζουν όλα τα πλεονεκτήματα των επίγειων και δορυφορικών συστημάτων. Οι εναέριες πλατφόρμες λειτουργούν σε σχεδόν στατική θέση σε υψόμετρο ανάμεσα στα 15 έως 30 km από την επιφάνεια της γης. Η μοναδική θέση από την οποία λειτουργούν προσφέρει σημαντικό πλεονέκτημα προϋπολογισμού ζεύξης και αμελητέες καθυστερήσεις διάδοσης του ραδιοσήματος σε σύγκριση με τα δορυφορικά συστήματα καθώς και αρκετά μεγαλύτερη περιοχή κάλυψης σε σύγκριση με τα επίγεια συστήματα. Επιπλέον παρέχουν μεγαλύτερου μήκους ζεύξεις σημείο προς σημείο και σημείου προς πολλαπλά σημεία με μικρότερη εξασθένιση βροχής σε σύγκριση με τις επίγειες ζεύξεις. Οι εν λόγω εναέριες πλατφόρμες δρουν ως σταθμοί βάσης ή κόμβοι αναμετάδοσης και είναι τοποθετημένες σε αεροπλάνα ή μπαλόνια, επανδρωμένα ή μη. Είναι ψευδό – γεωστατικές και μπορούν να θεωρηθούν είτε ως κεραίες πολύ μεγάλου ύψους είτε ως δορυφόροι πολύ χαμηλής τροχιάς, προσφέροντας κάλυψη σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές αλλά και σε ευρύτερες γεωγραφικές εκτάσεις.

Τα αερόστατα, στα οποία στηρίζεται κατά ένα μεγάλο ποσοστό η τεχνολογία των HAPs, έχουν ιστορία πολλών αιώνων που ξεκινά από την αρχαία Κίνα. Στη Δύση, τέτοιου είδους μπαλόνια ζεστού αέρα έκαναν την εμφάνισή τους αρχικά στη Γαλλία το 1783. Η ιδέα για τη δημιουργία των HAPs ανήκει στους αδερφούς Montgolfier ενώ στα 1900 ο Γερμανός αξιωματικός Ferdinand Zeppelin ανέπτυξε ένα είδος άκαμπτου αερόστατου, ελαφρύτερου του αέρα και έτσι πραγματοποιήθηκε η πρώτη πτήση αερόπλοιου με κινητήρα, του θρυλικού Zeppelin LZ1. Στις αρχές του 20ου αιώνα αναπτύχθηκε η τεχνολογία των αερόπλοιων ηλίου (He) και το 1932 το πρώτο επανδρωμένο αερόστατο πέταξε ως τη στρατόσφαιρα σε υψόμετρο 16.940m. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι μια πρώιμη μορφή παροχής επικοινωνιών από τη στρατόσφαιρα έλαβε χώρα πριν το 1962 που τέθηκε σε τροχιά ο δορυφόρος Telstar. Μόλις στα 1960, τηλεφωνήματα μεγάλων αποστάσεων έγιναν μέσω της ανάκλασης σημάτων από το Echo, ένα γιγαντιαίο μπαλόνι που είχε σκοπό την παθητική αναμετάδοση εκπομπών από τα εργαστήρια Bell στο Crawford Hill.

Μολονότι η τεχνολογία των αερόστατων δεν είναι καινούργια, η εφαρμογή τους για τηλεπικοινωνιακούς σκοπούς ήταν μέχρι σήμερα ιδιαίτερα περιορισμένη. Οι

βασικότερες δυσκολίες στη χρήση τους προέρχονταν από την αδυναμία σταθερότητας και ικανοποιητικού ελέγχου θέσης για μεγάλες χρονικές περιόδους σε περιβάλλον με ανέμους.

Τα HAPs προβλέπεται να λειτουργήσουν στη στρατόσφαιρα, μεταξύ 15 και 25km πάνω από το έδαφος, υψόμετρο στο οποίο οι ροές των ανέμων είναι συνήθως ήπιες και σταθερές για τις περισσότερες περιοχές της υφελίου. Ο συνδυασμός της εξελισσόμενης τεχνολογίας των αερόπλοιων, (που περιλαμβάνει μεταξύ άλλων βελτιωμένα υλικά κατασκευής και ηλιακές κυψέλες), και της αυξανόμενης ζήτησης για νέες υπηρεσίες καθιστούν τα HAPs μια εφαρμόσιμη και άκρως ελκυστική εναλλακτική πρόταση. Σημαντικές εφαρμογές τους είναι οι υψηλής ταχύτητας και ευρείας ζώνης ψηφιακές επικοινωνίες (interactive video, broadcasting, multimedia), οι κινητές επικοινωνίες, η τηλεπισκόπηση, η παρατήρηση του γήινου περιβάλλοντος και η συλλογή περιβαλλοντικών δεδομένων. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφέρουμε ότι η συστηματική μελέτη γύρω από την τεχνολογία των HAPs ξεκίνησε ουσιαστικά το 1997, όταν οι Goran M.Djuknic, John Freidenfelds και Yuriy Okunev έγραψαν ένα άρθρο με τίτλο “Establishing Wireless Communications Services via High Altitude Aeronautical Platforms: A Concept Whose Time Has Come?». Το άρθρο αυτό, που δημοσιεύτηκε από την IEEE το Σεπτέμβριο του ίδιου έτους, σηματοδότησε την έξαρση του ενδιαφέροντος γύρω από την πρωτοποριακή ιδέα της παροχής τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών από τη στρατόσφαιρα. Έδωσε παράλληλα το έναυσμα για τη διεξαγωγή πλήθους μελετών από την παγκόσμια επιστημονική κοινότητα αλλά και τη διεθνή βιομηχανία, ώστε σταδιακά η ιδέα να γίνει πράξη και να τεθεί σε εφαρμογή.

1.2. Δορυφορικά, Ασύρματα Επίγεια και Στρατοσφαιρικά Συστήματα

1.2.1. Η Εξέλιξη Των Δορυφορικών Επικοινωνιών Και Η Γέννηση Των Στρατοσφαιρικών Συστημάτων

Με την εκτόξευση του πρώτου δορυφόρου, του Sputnik, το 1957 και την είσοδό του σε τροχιά γύρω από την Γη, ξεκίνησε μια σειρά εξελίξεων πάνω στην ανάπτυξη και τον σχεδιασμό των δορυφορικών συστημάτων και των υπηρεσιών που αυτοί παρείχαν, όπως οι υπερατλαντικές και διεθνείς επικοινωνίες, οι υπηρεσίες για στρατιωτικούς σκοπούς και οι υπηρεσίες ψυχαγωγίας και εξερευνήσεων. Η ανάπτυξη των δορυφορικών συστημάτων κορυφώθηκε την περίοδο του Ψυχρού Πολέμου. Για πάνω από τρεις δεκαετίες δαπανήθηκαν τεράστια ποσά, τόσο από την πλευρά των Ηνωμένων Πολιτειών όσο και από την πλευρά της πρώην Σοβιετικής Ένωσης, για βελτίωση και έρευνα πάνω στα δορυφορικά συστήματα, οι περισσότερες των οποίων εστιάζονταν σε εφαρμογές για στρατιωτικού περιεχομένου. Η αβεβαιότητα που επικρατούσε εκείνη την εποχή ώθησε ακόμα περισσότερο την βελτιστοποίηση των συστημάτων αυτών. Το κόστος της όλης επένδυσης, το οποίο ήταν δυσανάλογο με τα πραγματικά οφέλη που προσέφεραν τα δορυφορικά συστήματα, καλυπτόταν από τον φόβο που σκορπούσε η απειλή ενός καταστροφικού πυρηνικού πολέμου. Έτσι, οι

κυβερνήσεις, παγκοσμίως, αναγκάζονταν να δαπανήσουν τεράστια ποσά για την διαφύλαξη της λεπτής ισορροπίας ειρηνικής συμβίωσης.

Με το τέλος της εποχής του Ψυχρού Πολέμου και την πτώση της Σοβιετικής Ένωσης, η παγκόσμια βιομηχανία διαστημικών προγραμμάτων δέχτηκε ένα ισχυρό πλήγμα ως προς την αναγκαιότητά της και σταδιακά έχασε αρκετή από την αδιαμφισβήτητη χρησιμότητά της. Η χρήση των δορυφόρων για στρατιωτικές υπηρεσίες, που ποτέ δεν σταμάτησε, δεν ήταν πλέον πρωταρχική προτεραιότητα και περιορίστηκε αρκετά, με αποτέλεσμα όλο και περισσότερο οι εφαρμογές και οι υπηρεσίες που παρείχαν οι δορυφόροι να στρέφονται για καθαρά τηλεπικοινωνιακούς σκοπούς και υπηρεσίες, όπως είναι η τηλεόραση, η τηλεφωνία, οι περιβαλλοντολογικές μελέτες και η μελέτη του διαστήματος. Παρόλο που η δορυφορική βιομηχανία μετράει ήδη πάνω από τέσσερις δεκαετίες ζωής, οι δυσκολίες που αντιμετωπίζουν οι διαχειριστές των δορυφορικών συστημάτων δεν έχουν εξαιρεθεί πλήρως και ακόμα και σήμερα θεωρείται δύσκολη η επιτυχημένη εγκατάσταση, λειτουργία και η παροχή υπηρεσιών με μεγάλη διαθεσιμότητα, από τα δορυφορικά συστήματα. Επομένως, οι δορυφορικές επικοινωνίες δεν μπορούν να θεωρηθούν σαν μια σίγουρη και αξιόπιστη λύση για παροχή όλων των τύπων υπηρεσιών. Η σκέψη της εισαγωγής στρατοσφαιρικών πλατφορμών, σε ύψη μερικών χιλιάδων μέτρων πάνω από την Γη και η παροχή τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών από αυτές, υπάρχει εδώ και αρκετό καιρό και φαντάζει σαν μια ιδιαίτερα καλή λύση, ειδικά σε περιοχές με υψηλή πυκνότητα χρηστών, όπως μητροπολιτικές πόλεις, αφού είναι δυνατό να προσφέρει υπηρεσίες άμεσα και με επιδόσεις ισάξιες με αυτές των επίγειων δικτύων, ενώ είναι, ταυτόχρονα, αρκετά πιο ευέλικτη και φθηνή επένδυση, με λιγότερους κινδύνους από αυτούς που κρύβουν τα δορυφορικά συστήματα.

1.2.2. Σύγκριση Δορυφορικών και Στρατοσφαιρικών Συστημάτων

Τόσο τα δορυφορικά όσο και τα στρατοσφαιρικά συστήματα έχουν σχεδιασθεί να λειτουργούν σε υψηλές ζώνες συχνότητας, τις μικροκυματικές συχνότητες. Σε αυτές τις συχνότητες είναι απαραίτητο να υπάρχει ζεύξη οπτικής επαφής (LOS, Line of-Sight), απαίτηση που ικανοποιείται και από τα δύο συστήματα, εξαιτίας του μεγάλου ύψους λειτουργίας.

Τα στρατοσφαιρικά συστήματα χρησιμοποιούν την τεχνική διαχωρισμού της περιοχής κάλυψης τους σε μικρότερες περιοχές-κυψέλες, όπως γίνεται και στα δορυφορικά συστήματα. Η μόνη διαφορά είναι ότι σε ένα στρατοσφαιρικό σύστημα η περιοχή κάλυψης του μπορεί να χωρισθεί σε κυψέλες μικρότερης διαμέτρου, απ' ότι σε ένα δορυφορικό σύστημα. Αυτό επιτυγχάνεται γιατί η στρατοσφαιρική πλατφόρμα βρίσκεται σε πολύ μικρότερο ύψος πάνω από την Γη, σε σχέση με ένα δορυφόρο. Με μικρότερη διάμετρο κυψέλης, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη επαναχρησιμοποίηση συχνότητας το στρατοσφαιρικό σύστημα μπορεί να διαχειριστεί πιο αποδοτικά το φάσμα του, ενώ παράλληλα αυτό μπορεί να γίνει χωρίς χρήση τεράστιων διαστάσεων κεραιών, όπως συμβαίνει στα δορυφορικά συστήματα. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε πως η διάμετρος των στρατοσφαιρικών κυψελών κυμαίνεται από 1 έως 10 km, για τους LEO δορυφόρους η αντίστοιχη τιμή είναι 50 km, ενώ η κυψέλη που σχηματίζεται από γεωστατικό δορυφόρο δεν μπορεί να έχει διάμετρο μικρότερη των 400 km.

Εξαιτίας της γεωμετρίας και της αρχιτεκτονικής του συστήματος, οι γωνίες ανύψωσης των επίγειων τερματικών ως προς τις εναέριες πλατφόρμες λαμβάνουν μεγάλες τιμές που συχνά φτάνουν τις 90°. Οι γεωστατικοί δορυφόροι είναι ως επί το πλείστον ορατοί με πολύ μικρότερες γωνίες, επειδή η τροχιά τους περιορίζεται πάνω από τον ισημερινό.

Αξίζει να αναφερθεί ότι εξαιτίας του μεγάλου ύψους τροχιάς των δορυφόρων, τα μεταδιδόμενα σήματα υπόκεινται σε καθυστερήσεις που φτάνουν τα 250 με 300 msec. Οι καθυστερήσεις αυτές είναι απαγορευτικές για ευρυζωνικές interactive εφαρμογές, όπου είναι κρίσιμη η έγκαιρη λήψη των σημάτων. Τα HAPs λειτουργούν πολύ πλησιέστερα στην επιφάνεια της γης με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν αμελητέες καθυστερήσεις διάδοσης της τάξης των 0.35 msec.

Το χαμηλό ύψος της στρατοσφαιρικής πλατφόρμας προσφέρει και άλλο ένα πλεονέκτημα σε σχέση με τα δορυφορικά συστήματα. Οι απώλειες ελευθέρου χώρου είναι ανάλογες του τετραγώνου της απόστασης που διανύει ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

Το σήμα από την πλατφόρμα προς τους επίγειους σταθμούς και αντίστροφα διανύει μικρότερες αποστάσεις, κατά πολλές χιλιάδες χιλιόμετρα. Το περιθώριο της ζεύξης, επομένως, μιας στρατοσφαιρικής ζεύξης είναι περίπου 34 dB καλύτερο, από ότι των δορυφόρων χαμηλής τροχιάς (LEO, Low Earth Orbit) και κατά 66 dB καλύτερο, από ότι των γεωστατικών δορυφόρων (GEO, Geo-stationary Earth Orbit).

Οι μεγάλες απώλειες ελευθέρου χώρου στα δορυφορικά συστήματα καθιστούν απαραίτητη την εκπομπή σε υψηλές στάθμες ισχύος, προκειμένου οι δέκτες να λαμβάνουν ένα ανιχνεύσιμο σήμα. Τα HAPs έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν με ασθενέστερα σήματα.

Επιπλέον, το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας των στρατοσφαιρικών συστημάτων είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με αυτό των δορυφορικών συστημάτων, καθώς δεν απαιτούν μηχανισμό εκτόξευσης, ούτε βαριά επίγεια υποδομή.

Η εκτόξευση ενός δορυφόρου, καθώς και η επιτυχημένη τοποθέτησή του στην επιθυμητή τροχιά εγκυμονούν αρκετούς κινδύνους και πάρα πολλές δυσκολίες και μάλιστα αν ο δορυφόρος τοποθετηθεί σε λάθος τροχιά δεν είναι δυνατόν να γίνουν μεγάλες διορθωτικές κινήσεις για την επαναφορά του στην σωστή τροχιά. Αντίθετα οι στρατοσφαιρικές πλατφόρμες προσφέρουν μεγάλη ευκαμψία κατά την τοποθέτησή τους, εύκολη αλλαγή της θέσης τους και άμεση λειτουργία. Κάνουν χρήση μικρών, φθηνών τερματικών συσκευών ή ακόμα και του συμβατικού επίγειου εξοπλισμού.

Ακόμα χρησιμοποιούν εναέριες κεραιές πολύ μικρότερων διαστάσεων από τα τεράστια παραβολικά κάτοπτρα που κουβαλούν οι δορυφορικοί αναμεταδότες. Τα HAPs επαναφέρονται στη γη αρκετές φορές κατά τη διάρκεια της ζωής τους για έλεγχο, συντήρηση ή επισκευή. Η αναβάθμιση και η συντήρηση των στρατοσφαιρικών πλατφορμών είναι εύκολη υπόθεση, ειδικά στις περιπτώσεις όπου σαν πλατφόρμα χρησιμοποιείται κάποιο αεροπλάνο. Ακόμα και η αντικατάσταση μιας στρατοσφαιρικής πλατφόρμας μπορεί να γίνει σε λίγες ώρες. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η σωστή λειτουργία τους και παράλληλα γίνεται διαρκής αναβάθμιση του ωφέλιμου φορτίου.

Αντίθετα στα δορυφορικά συστήματα η αναβάθμιση τους χρειάζεται σχεδιασμό πολλών μηνών και σε πολλές περιπτώσεις είναι αδύνατη, ενώ η αντικατάσταση τους απαιτεί προσεκτικό και λεπτομερή σχεδιασμό αρκετών ετών.

Επιπλέον τα στρατοσφαιρικά συστήματα είναι συμβατά με τα περισσότερα πρωτόκολλα, όπως το TCP/IP, και δεν υποφέρουν από μεγάλους χρόνους καθυστέρησης, αφού βρίσκονται σε ύψη κατά πολλές χιλιάδες χιλιόμετρα χαμηλότερα από τους δορυφόρους. Η παροχή υπηρεσιών είναι υπόθεση λίγων ωρών, ουσιαστικά όσος χρόνος χρειάζεται μέχρι να φτάσουν στο ύψος της στρατόσφαιρας, αφού δεν απαιτείται να έχει στηθεί από πριν ένας ολόκληρος αστερισμός (constellation) από στρατοσφαιρικές πλατφόρμες, όπως χρειάζεται να γίνει με τους δορυφόρους, προτού αρχίσουν να παρέχουν υπηρεσίες. Αρκεί μια και μόνο πλατφόρμα για την διεξαγωγή των επικοινωνιών.

Οι στρατοσφαιρικές πλατφόρμες χαρακτηρίζονται από προσαρμοστικότητα των υπηρεσιών που παρέχουν. Η δυναμική ανάθεση πόρων και η αναπροσαρμογή των σχημάτων επαναχρησιμοποίησης συχνότητας σε πραγματικό χρόνο καθιστούν τα HAPs ιδανικά για εξυπηρέτηση περιοχών με εναλλασσόμενες απαιτήσεις κίνησης. Συγχρόνως αποτελούν ακόμα ένα συγκριτικό πλεονέκτημα σε σχέση με τα δορυφορικά συστήματα επικοινωνιών.

Αξίζει ακόμη να αναφερθεί ότι τα HAP μπορούν να εστιάσουν την κάλυψή τους ακριβώς στις περιοχές ενδιαφέροντος. Η κάλυψη σε «νεκρές» περιοχές, όπως είναι μεγάλα δάση, ωκεανοί και γενικά περιοχές όπου δεν υπάρχει ανάγκη κάλυψης, μπορεί να αποφευχθεί εύκολα, με τον κατάλληλο σχεδιασμό. Αντίστοιχη δυνατότητα για τα δορυφορικά συστήματα δεν υπάρχει.

Τα στρατοσφαιρικά συστήματα, τέλος, είναι και περισσότερο φιλικά προς το περιβάλλον, αφού όπως είπαμε δεν χρησιμοποιούν πυραύλους εκτόξευσης, ενώ παράλληλά, εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια προκειμένου να κινούνται ή να αιωρούνται στη στρατόσφαιρα.

Υπάρχουν φυσικά και σημεία στα οποία τα HAPs μειονεκτούν συγκρινόμενα με τη γνωστή πλέον και ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία των δορυφόρων. Ένα από αυτά είναι η μικρή διάρκεια ζωής. Η διάρκεια ζωής των HAPs εξαρτάται από το είδος του αεροσκάφους και τα χαρακτηριστικά κατασκευής, ωστόσο στην καλύτερη περίπτωση και με βάση την σημερινή τεχνολογία κατασκευής τους, δεν ξεπερνά τα πέντε χρόνια. Συνεπώς είναι αναγκαία η σχετικά τακτική αντικατάστασή τους. Οι δορυφόροι μπορούν να ταξιδεύουν στο διάστημα για 15 περίπου χρόνια προτού καταστραφούν.

Οι μικρές περιοχές κάλυψης που αντιστοιχούν σε κάθε πλατφόρμα αποτελεί ένα ακόμα συγκριτικό μειονέκτημα. Το ύψος των 35.784 km της γεωστατικής τροχιάς επιτρέπει στους δορυφόρους να καλύπτουν ευρείες περιοχές στη γήινη επιφάνεια.

Για την εξυπηρέτηση μιας τέτοιας έκτασης από τη στρατόσφαιρα απαιτείται μεγάλος αριθμός πλατφορμών. Ειδική μέριμνα πρέπει να ληφθεί για την παροχή ενέργειας στα HAPs σε παρατεταμένες περιόδους σκότους, πιθανώς αποθηκεύοντας εκ των προτέρων ηλιακή ενέργεια σε κατάλληλα στοιχεία. Στους δορυφόρους δεν υφίσταται ενεργειακό ζήτημα.

Τέλος, όπως κάθε νέα τεχνολογία στο ξεκίνημά της, έτσι και τα HAPs αντιμετωπίζουν ένα κλίμα δυσπιστίας και αμφισβήτησης από ένα μέρος της κοινής γνώμης. Ανησυχίες εκφράζονται ακόμα για την ασφάλεια πτήσης των αεροσκαφών και τους κινδύνους από μια ενδεχόμενη πτώση τους. Αξίζει βέβαια να σημειώσουμε πως στη δεκαετία του '60 η τεχνολογία των δορυφόρων πέρασε από το ίδιο στάδιο και χρειάστηκαν κάποια χρόνια λειτουργίας ώσπου να ωριμάσει και να κερδίσει την αποδοχή και την εμπιστοσύνη του κόσμου.

1.2.3. Σύγκριση Επίγειων Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων και Στρατοσφαιρικών Συστημάτων HAPS

Η αναγκαιότητα της χρήσης επίγειων τηλεπικοινωνιακών σταθμών για την παροχή διαφόρων υπηρεσιών, ειδικότερα υπηρεσιών ευρείας ζώνης, οι οποίες απαιτούν υψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων, κρίνεται επιτακτική μέχρι και στη σημερινή εποχή. Ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα των επίγειων σταθμών έναντι των δορυφορικών συστημάτων, είναι η δυνατότητα αυτοί να τροφοδοτούνται με όσο μεγάλα ποσά ισχύος χρειάζονται. Αντίθετα, ο περιορισμός ισχύος των δορυφορικών συστημάτων, αλλά και οι μεγάλοι χρόνοι καθυστέρησης από τους οποίους υποφέρουν οι δορυφορικές ζεύξεις, καθιστούν τα δορυφορικά συστήματα όχι μόνο ακατάλληλα, αλλά και ασύμφορα για την παροχή υπηρεσιών υψηλών απαιτήσεων.

Από την άλλη πλευρά όμως, τα επίγεια ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα παρουσιάζουν κάποια μειονεκτήματα, σε σχέση με τα δορυφορικά συστήματα. Το σημαντικότερο είναι η ανάγκη για χρήση αναμεταδοτών ανά τακτές αποστάσεις λίγων χιλιομέτρων αφού συνήθως λόγω των παρεμβαλλόμενων εμποδίων δεν υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη. Το δορυφορικό σήμα, παρόλο που εξασθενεί σημαντικά από τις απώλειες ελευθέρου χώρου, μιας και οι αποστάσεις από τον δορυφόρο έως την Γη είναι πολύ μεγάλες, στην ουσία δεν επιδέχεται κάποια άλλη σημαντική απώλεια, αφού η διαδρομή μεταξύ του δορυφόρου και του επίγειου δορυφορικού σταθμού είναι ελεύθερη από φυσικά και τεχνητά εμπόδια.

Οι επίγειες ζεύξεις όμως, ιδιαίτερα σε περιοχές με μεγάλους και πυκνούς ορεινούς όγκους και λόγω της καμπυλότητας της γήινης επιφάνειας απαιτούν τη χρήση επαναληπτικών σταθμών, ώστε σε κάθε απλό τμήμα του σύνθετου επίγειου τηλεπικοινωνιακού συστήματος να εξασφαλίζεται η οπτική επαφή. Ένα τέτοιο σύνθετο σύστημα περιέχει οπωσδήποτε δύο τερματικούς σταθμούς και έναν αριθμό επαναληπτών, σε διαστήματα της τάξεως ορισμένων δεκάδων χιλιομέτρων, που ποικίλει ανάλογα με τη συχνότητα λειτουργίας. Ειδικά σε περιοχές με ορεινή μορφολογία εδάφους, όπως είναι και η Ελλάδα, η χρήση αναμεταδοτών γίνεται κάθε 30 km περίπου, στην ευνοϊκότερη περίπτωση. Επομένως κρίνεται αναγκαία η εγκατάσταση αναμεταδοτών ανά τακτά σημεία, κάτι που απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό πράγμα το οποίο, ορισμένες φορές, είναι πολύ δύσκολο να υλοποιηθεί εξαιτίας του ήδη μεγάλου αριθμού εγκατεστημένων αναμεταδοτών. Το πρόβλημα αυτό γίνεται ακόμα περισσότερο οξύ στις μεγάλες πόλεις.

Ένας τρόπος για να πετύχουμε καθαρότητα εμποδίων είναι η ανύψωση των κεραιών στους τερματικούς σταθμούς της ζεύξεως. Αυτή όμως η μέθοδος δεν είναι πρακτική σε πολλές περιπτώσεις, λόγω των εξόδων και των απωλειών που συνεπάγεται μία μακριά γραμμή τροφοδοσίας, επιπρόσθετα δε έχουμε και τα έξοδα κατασκευής του πύργου στήριξης των κεραιών.

Από την παρατήρηση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων μεταξύ των επίγειων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων και των δορυφορικών συστημάτων γίνεται

εύκολα αντιληπτό ότι τα σημαντικά πλεονεκτήματα των δορυφορικών συστημάτων είναι μειονεκτήματα για τα επίγεια συστήματα και το αντίστροφο. Η χρησιμοποίηση επομένως, επίγειων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων και δορυφορικών συστημάτων είναι συμπληρωματική.

Το στρατοσφαιρικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα θα μπορούσε να ειπωθεί πως είναι υβριδικό των επίγειων και των δορυφορικών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Η πλατφόρμα που παρέχει την επικοινωνία βρίσκεται σε μεγάλα ύψη, αρκετά πιο ψηλά από τον ψηλότερο επίγειο σταθμό, άρα ικανοποιεί το κριτήριο για ζεύξη οπτικής επαφής, απουσία εμποδίων, με τους επίγειους τερματικούς σταθμούς του συστήματος. Οι τερματικές στρατοσφαιρικές συσκευές ανάλογα με την περιοχή λειτουργίας τους (UAC, SAC, RAC) ενδέχεται να “βλέπουν” το HAP με το οποίο επικοινωνούν με μια μεγάλη γκάμα γωνιών. Στις αστικές περιοχές οι γωνίες ανύψωσης φτάνουν τις 90°, τιμή που είναι αδύνατο να επιτευχθεί από τις επίγειες μεταδόσεις. Οι μεγάλες γωνίες ανύψωσης εξασφαλίζουν διάδοση οπτικής επαφής στα στρατοσφαιρικά κύματα, που διανύουν μια ως επί το πλείστον χωρίς εμπόδια διαδρομή από την πλατφόρμα ως τα επίγεια τερματικά.

Η κατανομή των λαμβανόμενων σημάτων είναι Rice. Αν αμελήσουμε την επίδραση της βροχής, οι απώλειες ελευθέρου χώρου εξασθενούν τα σήματα ανάλογα προς το τετράγωνο της διανυόμενης απόστασης (ισοδύναμα 20 dB / decade). Από τη άλλη μεριά τα επίγεια μικροκυματικά συστήματα χαρακτηρίζονται από πολυδιαδρομική διάδοση και σκέδαση, ενώ επηρεάζονται δραματικά από τη μορφολογία του εδάφους και τις ανθρώπινες κατασκευές. Εδώ δεν υπάρχει απ’ ευθείας ισχυρή συνιστώσα και τα σήματα λήψης ακολουθούν κατανομή Rayleigh. Η εξασθένηση είναι ανάλογη της τέταρτης δύναμης της απόστασης (ισοδύναμα 40 dB / decade).

Ταυτόχρονα επειδή η πλατφόρμα βρίσκεται αρκετά κοντά στην Γη, πολύ χαμηλότερα από οποιονδήποτε δορυφόρο χαμηλής τροχιάς, οι απώλειες λόγω της διαδρομής που διανύει το σήμα είναι πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες απώλειες ενός δορυφορικού σήματος. Οι στρατοσφαιρικές πλατφόρμες θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν με άλλους δύο τρόπους, είτε ως δορυφόροι εξαιρετικά μικρού ύψους, είτε ως επίγειοι σταθμοί πολύ μεγάλου ύψους. Μια στρατοσφαιρική πλατφόρμα συνδυάζει τα κύρια πλεονεκτήματα των δορυφορικών και των επίγειων σταθμών, ενώ οι τηλεπικοινωνιακές επιδόσεις του συστήματος είναι σχεδόν ισάξιες με εκείνες των επίγειων συστημάτων, αφού μπορούν, όπως θα δούμε στην συνέχεια, να παρέχουν υπηρεσίες ευρείας εκπομπής, οι οποίες απαιτούν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης.

Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για τηλεπικοινωνιακή ασύρματη κάλυψη δημιουργεί προβλήματα στα επίγεια ασύρματα συστήματα, που έχουν να κάνουν με την τοποθέτηση όλο και περισσότερων κεραιών και αναμεταδοτών. Μάλιστα, καθώς η συχνότητα λειτουργίας αυτών των συστημάτων αυξάνει συνεχώς, τόσο πιο μεγάλη γίνεται η ανάγκη τοποθέτησης νέων αναμεταδοτών σε πιο πυκνή διάταξη μεταξύ τους. Το κόστος, επιπλέον, της εγκατάστασης και τοποθέτησης ενός καινούριου σταθμού ή ενός καινούργιο μαστού είναι αρκετά υψηλό, ενώ η τοποθέτηση του απαιτεί προσεκτική μελέτη, μιας και όταν εγκατασταθεί είναι πολύ δύσκολο να μετακινηθεί. Αυτά τα προβλήματα μπορούν να παρακαμφτούν με την χρήση στρατοσφαιρικών πλατφορμών, αφού η εναέρια κάλυψη που θα παρέχει η πλατφόρμα θα παρακάμπτει τις αντιξοότητες των επίγειων καλύψεων.

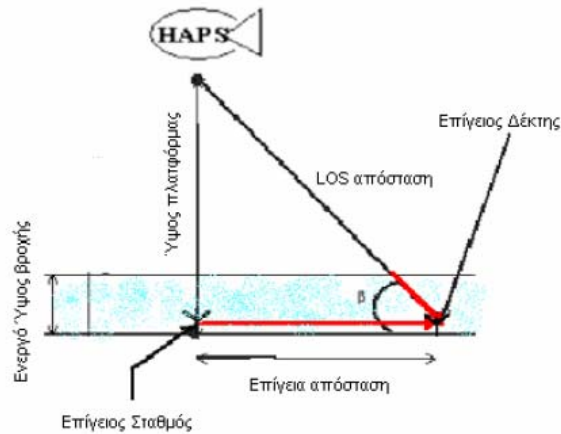
Η παροχή υπηρεσιών είναι δυνατή από ένα και μόνο HAP, που εν συνεχεία μπορεί να επεκταθεί σε δίκτυο πολλών εναέριων σταθμών. Τα στρατοσφαιρικά συστήματα μπορούν να τεθούν γρήγορα και άμεσα σε λειτουργία.

Τα επίγεια τηλεπικοινωνιακά δίκτυα ωστόσο απαιτούν διαδικασίες σχεδιασμού και χρονοβόρων αστικών έργων για την εγκατάσταση επίγεια υποδομής και προϋποθέτουν την ύπαρξη αρκετών σταθμών βάσης προκειμένου να καταστούν λειτουργικά ακόμα και για περιορισμένους χωρικά χρήστες.

Αξίζει ακόμη να αναφερθεί ότι η ύπαρξη στρατοσφαιρικών συστημάτων εξασφαλίζει την ανυπαρξία νεκρών ζωνών. Με τα στρατοσφαιρικά συστήματα είναι εφικτή η παροχή υπηρεσιών σε περιοχές που τα επίγεια συστήματα αδυνατούν να καλύψουν. Τέτοιες είναι οι θαλάσσιες περιοχές αλλά και κάποιες ορεινές ζώνες όπου η συμβατική ραδιοκάλυψη είναι περιορισμένη.

Η χρήση αναμεταδοτών δημιουργεί και αισθητικό πρόβλημα, ειδικότερα στις μεγάλες πόλεις, μεταξύ των οποίων συγκαταλέγεται και η Αθήνα. Η άναρχη τοποθέτηση κεραιών και αντιαισθητικών ιστών γίνεται χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι επιπτώσεις που μπορεί να έχουν στην ψυχική υγεία των ανθρώπων που ζουν κοντά στις κεραίες αυτές. Αρκετές είναι οι περιπτώσεις όπου οι ιστοί των κεραιών βρίσκονται ακόμα και δίπλα σε σχολεία και παιδικές χαρές.

Η επίδραση της βροχής είναι σημαντικός παράγοντας τόσο για τα επίγεια όσο και για τα στρατοσφαιρικά συστήματα. Οι επίγειες μικροκυματικές ζεύξεις ταλαιπωρούνται και από ένα άλλο παράγοντα, που είναι η βροχή. Η εξασθένιση και η αποπόλωση που υφίσταται το σήμα μιας επίγεια ζεύξης είναι πολύ μεγαλύτερη από τις απώλειες που υφίσταται το σήμα μιας στρατοσφαιρικής ζεύξης. Το φαινόμενο της βροχόπτωσης και γενικότερα όλων των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων, δεν μπορεί να εμφανιστεί στην στρατόσφαιρα, αλλά εμφανίζεται μόνο στην τροπόσφαιρα, δηλαδή σε ένα ύψος, κατά μέσο όρο, περίπου έως και 10 km ψηλότερα από την επιφάνεια της Γης. Η εξασθένιση του σήματος που διαδίδεται από έναν επίγειο μικροκυματικό πομπό προς τον αντίστοιχο δέκτη του θα είναι μεγαλύτερη από την εξασθένιση που υφίσταται ένα σήμα που διαδίδεται από μια στρατοσφαιρική πλατφόρμα προς τον ίδιο δέκτη. Αυτό οφείλεται στο ότι το σήμα, που προέρχεται από τον επίγειο πομπό, αν υποθεθεί ότι αυτός βρίσκεται σε απόσταση μεγαλύτερη από 10 km από τον επίγειο δέκτη, θα διανύσει μεγαλύτερη απόσταση μέσα σε περιβάλλον παρουσία βροχής, από ότι το σήμα που ταξιδεύει από την στρατοσφαιρική πλατφόρμα προς τον επίγειο δέκτη. Όσο μεγαλύτερο μήκος διανύει το σήμα παρουσία βροχής, τόσο περισσότερο εξασθενεί, σε σχέση με ένα σήμα που διανύει την ίδια απόσταση, αλλά παρουσία καθαρού ουρανού. Αυτό γίνεται πιο σαφές στο Σχήμα 1.1, όπου φαίνεται καθαρά αυτή η διαφορά στην απόσταση.



Σχήμα 1.1 Διάδοση, υπό συνθήκες βροχής για επίπεδα και στρατοσφαιρική ζεύξη

Η εκτεταμένη χρήση επίγειων τηλεπικοινωνιακών σταθμών, που εκπέμπουν με μεγάλη ισχύ, σε αστικές περιοχές, τα τελευταία χρόνια έχει δημιουργήσει αρκετά ερωτηματικά ως προς την επίπτωση που μπορεί να έχουν οι σταθμοί αυτοί στην υγεία των ανθρώπων. Αρκετές έρευνες γίνονται από διάφορα επιστημονικά και ιατρικά ιδρύματα ως προς την καταλληλότητα και την σύσταση κανόνων ασφαλούς λειτουργίας.

Η ιδέα, επομένως, για την χρήση τηλεπικοινωνιακών πλατφορμών, που θα βρίσκονται σε μεγάλα ύψη, φαίνεται ιδανική για να παρακάμψει όλα τα παραπάνω προβλήματα αφού μία πλατφόρμα έχει τη δυνατότητα να αντικαταστήσει πολλούς τέτοιους σταθμούς, χωρίς η ίδια να επιβαρύνει το περιβάλλον.

Στον πίνακα 1.1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά των τριών συστημάτων και γίνεται η μεταξύ τους σύγκριση.

Πίνακας 1 - Σύγκριση μεταξύ στρατοσφαιρικών, δορυφορικών και ασύρματων επίγειων συστημάτων

	HAPS	Δορυφορικό Σύστημα	Επίγειο Ασύρματο Σύστημα
Καθυστερήση διάδοσης	Χαμηλή	Προκαλεί σημαντική καθυστέρηση στις επικοινωνίες φωνής από γεωστατικούς δορυφόρους	Χαμηλή
Επιπτώσεις στην υγεία από τις εκπομπές	Επίπεδα ισχύος παρόμοια με επίγεια συστήματα (εκτός από μεγάλες περιοχές κάλυψης)	Υψηλής ισχύος τερματικά λόγω μεγάλων απωλειών διάδοσης	Μικρές, χαμηλής ισχύος τερματικά
Αισθητικά θέματα και ανησυχία για την υγεία από τη χρήση πύργων και κεραιών	Οι επίγειοι σταθμοί τοποθετούνται μακριά από κατοικημένες περιοχές	Οι επίγειοι σταθμοί τοποθετούνται μακριά από κατοικημένες περιοχές	Προβλήματα λόγω της ύπαρξης πολλών κεραιών
Χρόνος ανάπτυξης συστήματος	Ευέλικτος σχεδιασμός, μία μόνο πλατφόρμα και η κατάλληλη επίγεια υποστήριξη επαρκούν, το δίκτυο μπορεί σταδιακά να επεκτείνεται	Απαιτείται ο σχεδιασμός ολόκληρου του συστήματος πριν αυτό τεθεί σε λειτουργία	Σταδιακή ανάπτυξη για πλήρη κάλυψη

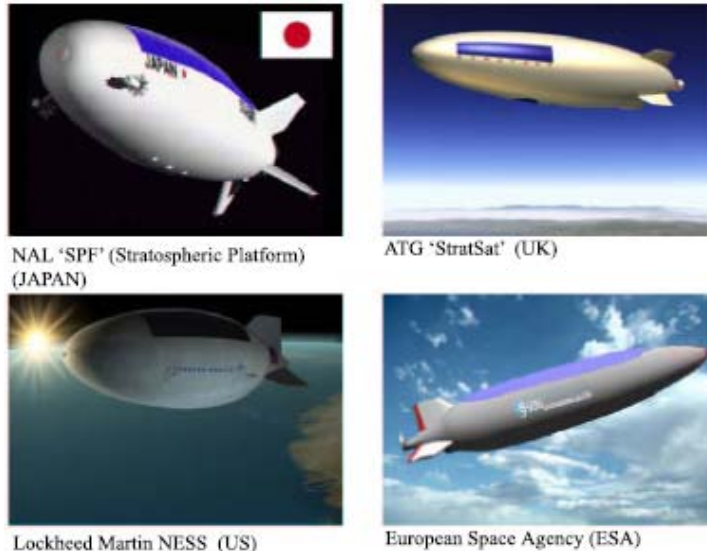
Επέκταση συστήματος	Η χωρητικότητα αυξάνεται με μεταβολή των δεσμών εκπομπής και την προσθήκη πλατφορμών, σχετικά εύκολη αναβάθμιση εξοπλισμού	Η χωρητικότητα αυξάνεται με την προσθήκη δορυφόρων, το υλικό αναβαθμίζεται μόνο με την αντικατάσταση των δορυφόρων	Αύξηση χωρητικότητας με διάσπαση κυψελών, εύκολη αναβάθμιση και επιδιόρθωση εξοπλισμού
Πολυπλοκότητα λόγω κίνησης	Αστάθεια πλατφόρμας	Κίνηση LEO-MEO, ιδιαίτερα σε ζεύξεις μεταξύ δορυφόρων	Κινητά τερματικά

Εύρος γεωγραφικής κάλυψης	έως 200 km ανά πλατφόρμα	έως και το 34% της επιφάνειας της γης από GEO, παγκόσμια κάλυψη για συστήματα LEO και MEO	λίγα χιλιόμετρα ανά σταθμό βάσης
Κάλυψη σε εσωτερικούς χώρους	Πιθανή κάλυψη	Μάλλον αδύνατη	Ικανοποιητική κάλυψη
Διάμετρος κυψέλης	1 έως 10 km	50 km για LEOs, άνω των 400 km για GEOs	0.1 – 1 km
Σκίαση από περιβάλλον διάδοσης	Πρόβλημα μόνο στις χαμηλές γωνίες ανύψωσης	Πρόβλημα μόνο στις χαμηλές γωνίες ανύψωσης	Πρόβλημα στην κάλυψη, χρήση επαναληπτών
Μέγιστος ρυθμός πομπού	25 έως 155 Mbit/s	Έως 2 Mbit/s	Έως 2 Mbit/s
Κόστος	Απροσδιόριστο, πιθανώς άνω των \$50 εκατ.	Άνω των \$200 εκατ. για GEO, δισεκατομμύρια δολάρια για LEO	Κυμαίνεται

1.3. Τύποι Στρατοσφαιρικών πλατφορμών

Τα τελευταία χρόνια οι στρατοσφαιρικές πλατφόρμες που φέρονται ως υποψήφιες για την παροχή τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών θα μπορούσαν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- **μη επανδρωμένα αερόπλοια με ειδικά συστήματα προώθησης και ηλιακές κυψέλες.** Τα αερόπλοια αυτά αναμένεται να έχουν μήκος 100-200 μέτρα με ωφέλιμο φορτίο περίπου 1000-2000 κιλά (Σχήμα 1.2). Στόχος τους είναι να μπορούν να μένουν σε λειτουργία στην στρατόσφαιρα για χρονική περίοδο μέχρι και 5 χρόνια.



Σχήμα 1.2 - μη επανδρωμένα αεροπλοια με ειδικά συστήματα προώθησης και ηλιακές κυψέλες

- **ηλιακά τροφοδοτούμενα μη επανδρωμένα αεροσκάφη**, γνωστά και ως High Altitude Long Endurance Platforms (HALE Platform), με άνοιγμα φτερών έως και 70 μέτρα και ωφέλιμο φορτίο μεταξύ 50-300 κιλά.(Σχήμα 1.3). Στόχος τους είναι να μπορούν να μένουν σε λειτουργία στην στρατόσφαιρα για χρονική περίοδο μέχρι και 6 μήνες.



Σχήμα 1.3 - Μη επανδρωμένα στρατοσφαιρικά αεροσκάφη

- **επανδρωμένα αεροσκάφη** (Σχήμα 1.4), τα οποία έχουν μικρό χρόνο παραμονής (περίπου 8 ώρες) στην στρατόσφαιρα λόγω των περιορισμένων καυσίμων, με ωφέλιμο φορτίο γύρω στα 900 κιλά και την ανάγκη ενός στόλου 3 αεροσκαφών για 24ωρη κάλυψη.



Σχήμα 1.4 - Επανδρωμένα στρατοσφαιρικά αεροσκάφη

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των στρατοσφαιρικών πλατφορμών.

Πίνακας 2 - Σύγκριση των 3 διαφορετικών τύπων στρατοσφαιρικής πλατφόρμας

Μέγεθος	Μη επανδρωμένα αερόπλοια	Ηλιακά τροφοδοτούμενα μη επανδρωμένα αεροσκάφη	Επανδρωμένα αεροσκάφη
Διάσταση	Μήκος 150-200 m	Άνοιγμα 35-70 m	Μήκος 30 m
Πηγή Ισχύος	Ηλιακές κυψέλες/ κυψέλες καυσίμων	Ηλιακές κυψέλες/ κυψέλες καυσίμων	Φυσικό καύσιμο
Φιλικά προς το περιβάλλον	Ναι	Ναι	Όχι
Διάρκεια πτήσης	Εως 5 χρόνια	Εως 6 μήνες	4-8 ώρες
Ωφέλιμο φορτίο	1000-2000 kg	50-300 kg	Εως 2000 kg
Ισχύς εκπομπής	Εως 10 kW	Εως 3 kW	Εως 40 kW
παραδείγματα	Ιαπωνία, Κίνα, Κορέα, ATG, Lockheed Martin Skystation	Helios, Pathfinder Plus, Heliplat	HALO, M-55

1.4. Ζώνες Συχνότητων για Παροχή Υπηρεσιών απο Στρατοσφαιρικά Δίκτυα

Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών και οι ανά τον κόσμο εθνικές τηλεπικοινωνιακές αρχές μετά από εξέταση της τεχνολογίας των συστημάτων με τη χρήση στρατοσφαιρικών πλατφορμών, την κατέταξαν στις υψηλής πυκνότητας σταθερές υπηρεσίες (high density fixed service) και με το πέρας του Παγκοσμίου Συνεδρείου Τηλεπικοινωνιών του 2003 (WRC-03) οι συχνότητες που οριστικοποιήθηκαν για τα συστήματα HAPS είναι στις ζώνες των 2,1 GHz, των 31/28 GHz και των 48/47 GHz.

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι ζώνες συχνότητων στις οποίες μπορούν να παρέχουν σταθερές και κινητές υπηρεσίες τα στρατοσφαιρικά συστήματα ανά περιοχή. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στο γεγονός ότι η ανάπτυξη συστημάτων με τη χρήση στρατοσφαιρικών πλατφορμών σε μια χώρα μπορεί να επηρεάζει διαχειριστές συστημάτων σε γειτονικές χώρες, και ιδιαίτερα όταν πρόκειται για

μικρές χώρες. Αυτό εξηγείται από την θέση της στρατοσφαιρικής πλατφόρμας, από την οποία η ορατή περιοχή μπορεί να περιλαμβάνει και άλλες γειτονικές χώρες.

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3 το νέο τηλεπικοινωνιακό σύστημα μπορεί να παρέχει σταθερές υπηρεσίες στις Ka, V ζώνες συχνοτήτων. Στην V ζώνη έχει ανατεθεί φάσμα 300 MHz σε κάθε κατεύθυνση, ανάθεση της οποίας είναι βασισμένη σε αρχές μη-επιβλαβούς παρεμβολής (δεν πρέπει να προκαλούνται παρεμβολές πάνω από τα επιτρεπτά όρια στις πρωτεύουσες υπηρεσίες) για σταθερές ευρυζωνικές υπηρεσίες (δεδομένα-φωνή-video) καθώς και για υπηρεσίες τηλεμετρίας και ελέγχου πλατφόρμας. Η ανάθεση είναι στις συχνότητες 47.2-47.5 GHz και 47.9-48.2 GHz για όλες τις χώρες. Στις συχνότητες αυτές πρωτεύουσα ανάθεση έχουν οι επίγειες σταθερές και οι σταθερές δορυφορικές υπηρεσίες. Η ανάθεση βασίζεται στην ανακοίνωση 122 της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (“Use of the bands 47.2-47.5 GHz and 47.9-48.2 GHz by high altitude platform stations (HAPS) in the fixed service and by other services,” ITU-R Resolution 122 (Rev.WRC-03). Τα κύρια σημεία που τονίζονται στην ανακοίνωση αυτή είναι τα εξής:

- συστήματα βασισμένα σε στρατοσφαιρικές πλατφόρμες βρίσκονται σε ανάπτυξη σε αρκετές χώρες και ήδη έχουν ανακοινωθεί τέτοια συστήματα στην ITU-R στις ζώνες 47.2-47.5 GHz και 47.9-48.2 GHz.
- τα χαρακτηριστικά συστημάτων με τη χρήση στρατοσφαιρικών για παροχή σταθερών υπηρεσιών περιγράφονται στην αναφορά “Preferred characteristics of systems in the fixed service using high altitude platforms operating in the bands 47.2-47.5 GHz and 47.9-48.2 GHz,” ITU-R Recommendation F.1500.
- η περαιτέρω μελέτη παρεμβολών (διαφορετικά λειτουργικά σενάρια και νέες τεχνικές μείωσης των παρεμβολών) μεταξύ συστημάτων με τη χρήση στρατοσφαιρικών πλατφορμών, γεωστατικών δορυφορικών και επιγείων συστημάτων κρίνεται αναγκαία.
- η μελέτη περιορισμών ισχύος για τους επίγειους σταθμούς που να επιτρέπει την ομαλή συνύπαρξη τους με τους δορυφορικούς δείκτες είναι πρωτεύουσας σημασίας.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάθεση στις ραδιοσυχνότητες γύρω από τα 30 GHz που περιλαμβάνει το εύρος 27.5-28.35 GHz για την λειτουργία της ζευξης στρατόσφαιρα προς Γη, και 31-31.3 GHz για τη λειτουργία της ζεύξης Γη προς στρατόσφαιρα. Η ανάθεση αυτή έχει γίνει για 40 χώρες παγκοσμίως, κυρίως της περιοχής 3, αλλά υπάρχει ζήτηση χρήσης αυτής της ανάθεσης και από άλλες χώρες. Η ανάθεση αυτή βασίζεται στην ανακοίνωση 145 της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (“Potential use of the bands 27.5-28.35 GHz and 31-31.3 GHz by high altitude platform stations (HAPS) in the fixed service,” ITU-R Resolution 145 (Rev.WRC-03). Προς το παρόν η χρήση των συχνοτήτων 27.5-28.35 GHz για την λειτουργία της ζευξης στρατόσφαιρα προς Γη, έχει τον περιορισμό του εύρους ζώνης λειτουργίας των 300 MHz.

Πίνακας 3 - Ανάθεση Συχνοτήτων για τα Δίκτυα με τη χρήση Στρατοσφαιρικών Πλατφορμών.

Ζώνη	Περιοχές	Κατεύθυνση	Υπηρεσίες	Υπηρεσίες που
------	----------	------------	-----------	---------------

Συχνότητες		Ζεύξης		μοιράζεται το φάσμα
47.9-48.2 GHz 47.2-47.5 GHz	Παγκόσμια	Άνω και κάτω ζεύξεις	Σταθερές	Σταθερές, Κινητές Σταθερές Δορυφορικές
31.0-31.3 GHz	40 χώρες παγκοσμίως (Ασία, Αφρική, Περιοχή 2)	Άνω ζεύξη	Σταθερές	Σταθερές, Κινητές Διαστήματος
27.5-28.35 GHz	40 χώρες παγκοσμίως (Ασία, Αφρική, Περιοχή 2)	Κάτω ζεύξη	Σταθερές	Σταθερές, Κινητές Σταθερές Δορυφορικές
1885-1980 GHz 2010-2025 GHz 2110-2160 GHz	Περιοχή 1 και 3	Άνω και κάτω ζεύξεις	IMT-2000	Σταθερές, Κινητές IMT-2000, PCS
1885-1980 GHz 2110-2160 GHz	Περιοχή 2	Άνω και κάτω ζεύξεις	IMT-2000	Σταθερές, Κινητές IMT-2000, PCS

Τα συστήματα με τη χρήση στρατοσφαιρικών πλατφορμών, μπορούν να παρέχουν πέρα από τις υπηρεσίες σε σταθερούς χρήστες, και κινητές υπηρεσίες. Στην ζώνη συχνοτήτων γύρω από τα 2,1 GHz έχει ανατεθεί συνολικό ευρύς 50/60 MHz σαν εναλλακτική λύση των σταθμών βάσης κινητής τηλεφωνίας. Η ανάθεση είναι παγκόσμια με μικρές διαφορές στις συχνότητες λειτουργίας ανά περιοχή. Οι συχνότητες είναι στα 1885-1980 MHz, 2010-2025 MHz και 2110-2170 MHz για τις περιοχές 1 και 3 και στα 1885-1980 MHz και 2110-2160 MHz για την περιοχή 2. Η ανάθεση δεν είναι αποκλειστική ούτε έχει προτεραιότητα έναντι σε άλλες υπηρεσίες που χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες. Ένα Στρατοσφαιρικό Δίκτυο προσφέρει ένα νέο τρόπο παροχής υπηρεσιών με ελάχιστη υποδομή δικτύου, ικανό να εξασφαλίσει μεγάλη περιοχή κάλυψης υψηλής πυκνότητας. Η ανάθεση αυτή βασίζεται στην ανακοίνωση 221 της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (“Use of high altitude platform stations providing IMT-2000 in the bands 1885-1980 MHz, 2010-2025 MHz and 2110-2170 MHz in Regions 1 and 3 and 1885-1980 MHz and 2110-2160 MHz in Region 2,” ITU-R Resolution 221 (Rev.WRC-03)). Τα κύρια σημεία που τονίζονται στην ανακοίνωση αυτή της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών για την ανάθεση των HAPS στις L,S ζώνες συχνοτήτων είναι τα εξής:

- οι στρατοσφαιρικές πλατφόρμες θα μπορούσαν να λειτουργήσουν σαν σταθμοί βάσης ενσωματωμένοι στο επίγειο IMT-2000 δίκτυο,
- στις προαναφερθείσες ζώνες συχνοτήτων βρίσκονται ήδη σε λειτουργία σταθερές και κινητές υπηρεσίες,
- οι σταθμοί HAPS μπορούν να εκπέμπουν στην ζώνη 2110-2170 MHz για τις περιοχές 1 και 3 και 2110-2160 MHz για την περιοχή 2.

Οι τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες που παρέχονται από τα στρατοσφαιρικά συστήματα μπορούν να διακριθούν σε χαμηλού ρυθμού για κινητούς χρήστες και σε υψηλού ρυθμού για σταθερά τερματικά. Λόγω της μεγάλης περιοχής κάλυψης, τα δίκτυα με τη χρήση στρατοσφαιρικών πλατφορμών υπερέρχουν έναντι των επίγειων σε δυο τύπους εφαρμογών :

- **ευρυεκπομπή ή πολυεκπομπή (broadcasting ή multicasting)** στην οποία τα στρατοσφαιρικά συστήματα διατηρούν πολλά από τα πλεονεκτήματα των γεωστατικών δορυφορικών συστημάτων, παρέχοντας ταυτόχρονα τη δυνατότητα για διαδραστικό video και πρόσβαση internet.
- **Παροχή υπηρεσιών σε απομακρυσμένες γεωγραφικά περιοχές**, σε περιοχές με χαμηλό πληθυσμό και εκεί όπου υπάρχει αυξημένη ανάγκη για κινητές επικοινωνίες (νησιά, ωκεανοί, κ.ά.). Το κόστος άνα χρήστη είναι πολύ μεγαλύτερο για τα επίγεια συστήματα στην περίπτωση χαμηλής κίνησης φορτίου και έτσι τα συστήματα με χρήση στρατοσφαιρικών πλατφορμών φαίνεται να υπερέρχουν. Επιπρόσθετα τα συστήματα αυτά παρέχουν εσωτερική κάλυψη με καλή ποιότητα υπηρεσίας και χαμηλό κόστος.

1.5. Βιβλιογραφία 1^ο κεφαλαίου

1. «*Δίκτυα Σταθερών Επικοινωνιών Ευρείας Ζώνης με τη χρήση Στρατοσφαιρικών Πλατφορμών*», 2006 Διδακτορική Διατριβή, Βασίλειος Φ. Μήλας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
2. «*Broadband Communications Via High-Altitude Platforms: A Survey*», 2005 Stylianos Karapantazis And Fotini-Niovi Pavlidou, Aristotle University Of Thessaloniki
3. <http://www.hapcos.org/>
4. <http://www.capanina.org/>

2. Μοντέλα Διάδοσης

2.1. Εισαγωγή

Αυτό το κεφάλαιο σχετίζεται με την διάδοση και μοντελοποίηση του καναλιού των παρεχομένων ευρυζωνικών υπηρεσιών μέσω των στρατοσφαιρικών πλατφορμών (High-Altitude Platforms – HAPs) σε κινητούς χρήστες. Όπως έχουμε δει σε προγενέστερο κεφάλαιο, η ITU έχει εκχωρήσει δυο ζώνες για ευρυζωνικές υπηρεσίες μέσω των HAPs, μια στα 47-48 GHz και μια στα 28-31 GHz. Αυτές οι ζώνες έχουν το πλεονέκτημα έναντι μικρότερων μικροκυματικών συχνοτήτων των λίγων αν όχι καθόλου ήδη παρεχόμενων υπηρεσιών και του μεγάλου εύρους ζώνης και εν δυνάμει να παρέχουν υψηλή χωρητικότητα. Για τον σκοπό αυτής της μελέτης θεωρούμε μόνο την ζώνη στα 28-31 GHz, ωστόσο δεδομένης της ομοιότητας των μηχανισμών

διάδοσης στις δυο ζώνες, τα αποτελέσματα μπορούν εύκολα να επεκταθούν και για τις δυσμενέστερες για την διάδοση συνθήκες στην υψηλότερη ζώνη.

Ένα νέο σενάριο ευρυζωνικής πρόσβασης υψηλής τεχνολογίας μέσω εναέριων στρατοσφαιρικών πλατφορμών, είναι το CAPANINA, μέρος του 6^{ου} προγράμματος, υποστηριζόμενο από την Ευρωπαϊκή Ένωση.

2.2. Διάδοση

Για τις ανάγκες της μοντελοποίησης του καναλιού, θα ξεκινήσουμε με επιδράσεις που επηρεάζουν τη διάδοση για μεγάλα χρονικά διαστήματα, όπως για παράδειγμα οι διαλείψεις που οφείλονται σε ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις, αέρια της τροπόσφαιρας, σύννεφα, αποπόλωση και σπινθηρισμό. Για τέτοιες επιδράσεις μας ενδιαφέρει να προσδιορίσουμε τη μέση διαθεσιμότητα της ζεύξης σε σύνολο μίας μακράς χρονικής περιόδου.

Στη συνέχεια μας ενδιαφέρει να προσδιορίσουμε την επίδραση παραγόντων που προκαλούν ταχείες διαλείψεις στο σήμα. Η ολίσθηση Doppler είναι ένα σημαντικό τέτοιο φαινόμενο το οποίο βρίσκουμε τελικά ότι δεν επηρεάζει ουσιαστικά τη διάδοση του σήματος.

Οι διαλείψεις που οφείλονται σε αλλαγές του περιβάλλοντος λόγω μετακίνησης του τερματικού χρήστη από ανεμπόδιση διάδοση – LOS σε πολυδιαδρομική διάδοση – Multipath fading (λόγω δέντρων, κτιρίων κτλ) μοντελοποιούνται με βάση μοντέλα καναλιών αλλαγής κατάστασης (switched channel model). Αναλύουμε το ήδη διαδεδομένο μοντέλο των δύο καταστάσεων αλλά προσεγγίζουμε και το πιο καινούριο μοντέλο των τριών καταστάσεων.

2.2.1. Διαλείψεις Που Οφείλονται Στην Εξασθένηση Των Η/Μ Κυμάτων Λόγω Ατμοσφαιρικών Κατακρημνίσεων.

Η συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για τη χρησιμοποίηση υψηλών συχνοτήτων, έχει οδηγήσει τα τελευταία χρόνια στην ανάγκη μελέτης της επίδρασης των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων (βροχή, χιόνι, χαλάζι, παγοκρύσταλλοι) στη διάδοση των ραδιοκυμάτων. Τα ρεύματα μετατόπισης που επάγονται στους υδρομετεωρίτες κατά τη διάδοση ενός ραδιοκύματος έχουν ως αποτέλεσμα τη σκέδαση και απορρόφηση μέρους της ενέργειας του κύματος. Η απώλεια ενέργειας που οφείλεται στα προηγούμενα αίτια είναι πολύ σημαντική στις συχνότητες πάνω από 10 GHz. Επιπλέον, η σκέδαση μπορεί να προκαλέσει και φαινόμενα παρεμβολών μεταξύ γειτονικών συστημάτων, κυρίως μεταξύ επίγειων και δορυφορικών ζευξιών.

Σημειώνεται ότι, η σχετική συμβολή των δύο αιτίων (σκέδασης και απορρόφησης) στην τελική εξασθένηση του διαδιδόμενου ραδιοκύματος εξαρτάται από τη σχέση των μεγεθών των υδρομετεωριτών με το μήκος κύματος. Για μήκη κύματος που είναι μεγάλα σε σύγκριση με το μέγεθος της σταγόνας, η εξασθένηση του ραδιοκύματος λόγω απορρόφησης θα υπερτερεί έναντι της σκέδασης. Αντίστροφα, τα μήκη κύματος που αντιστοιχούν στις συχνότητες στις οποίες λειτουργεί ένα στρατοσφαιρικό σύστημα, είναι μικρά σε σύγκριση με τη βροχοσταγόνα, οπότε η σκέδαση θα κυριαρχεί.

Το χιόνι και το χαλάζι έχουν σχετικά μικρότερη επίδραση στα ραδιοκύματα σε σχέση με τη βροχόπτωση. Αυτό συμβαίνει διότι η μιγαδική διηλεκτρική σταθερά του πάγου είναι πολύ μικρότερη σε σύγκριση με αυτή του νερού. Παρόλα αυτά όμως, όταν το χιόνι αρχίζει να λιώνει καθώς πέφτει, οι νιφάδες μπορεί να συγκρατούν νερό υπό μορφή πολύ μεγάλων σταγόνων σε σύγκριση με την κανονική βροχή, και συνεπώς να προκαλούν πολύ μεγαλύτερη σκέδαση ή απόσβεση. Από την άλλη μεριά, οι μικρές σταγόνες που υπάρχουν στα σύννεφα έχουν σχετικά μικρή επίδραση στα ραδιοκύματα για συχνότητες κάτω περίπου από τα 20 GHz, αλλά σε ψηλότερες συχνότητες προκαλούν και αυτές αξιοσημείωτη απόσβεση. Σαν ένα τελικό συμπέρασμα, για τις συχνότητες που αυτή την εποχή κυρίως ενδιαφέρουν τις τηλεπικοινωνίες, οι βροχοπτώσεις έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στις μεταδόσεις. Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα υφίσταται σκέδαση και απορρόφηση εξαιτίας των εν λόγω κατακρημνίσεων, με αποτέλεσμα η εξασθένιση που προκαλείται να είναι πολλαπλάσια από αυτή που εμφανίζεται απουσία βροχής.

Η καλή λειτουργία ενός δορυφορικού συστήματος κατά τη διάρκεια βροχόπτωσης προϋποθέτει επαρκή μελέτη του φαινομένου. Με αυτόν τον τρόπο είναι εφικτός ο σχεδιασμός ενός δορυφορικού συστήματος με περιθώριο ισχύος τέτοιο, ώστε να επιτρέπεται η υπερπήδηση της μέγιστης πρόσθετης απόσβεσης, που προκαλεί η βροχή. Η πρόσθετη αυτή απόσβεση εξαρτάται από τη συχνότητα λειτουργίας, το ύψος βροχόπτωσης και το μήκος της διαδρομής του ραδιοκύματος μέσα στη βροχή.

Το μαθηματικό πρότυπο που χρησιμοποιείται πιο συχνά για την περιγραφή της απόσβεσης που προκαλείται από τη βροχόπτωση είναι το ακόλουθο:

$$A_o \text{ (dB/km)} = a \cdot R^b$$

όπου:

R , το ύψος της βροχόπτωσης (mm/h), που καθορίζεται ανάλογα με τη γεωγραφική θέση ενός τόπου, σύμφωνα με πίνακες που έχει ορίσει η ITU.

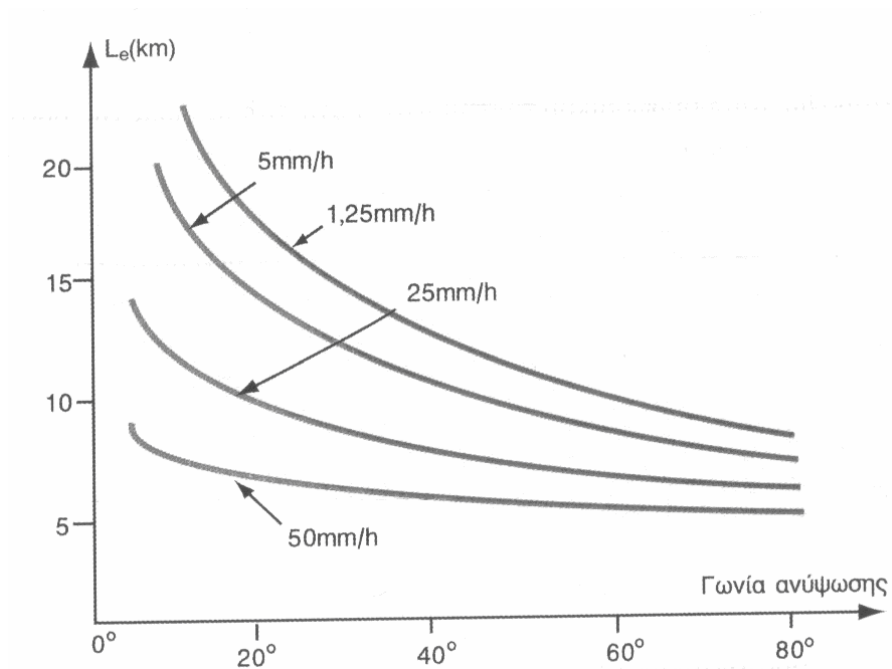
A_o , ειδική απόσβεση,

a, b , παράμετροι που προκύπτουν από εμπειρικά δεδομένα.

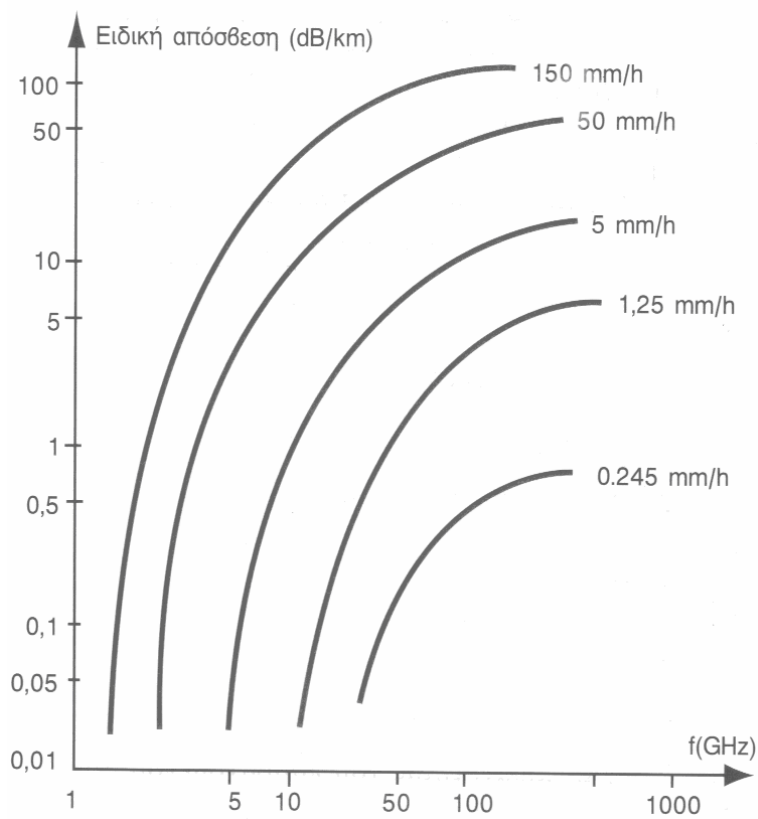
Η συνολική απόσβεση λόγω βροχόπτωσης υπολογίζεται σαν το γινόμενο της ειδικής απόσβεσης, A_o , επί το μέσο μήκος διαδρομής υπό βροχή L_e .

$$A_L = A_o \cdot L_e$$

Εμπειρικά, ο υπολογισμός της απόσβεσης μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια των παρακάτω δύο σχημάτων.

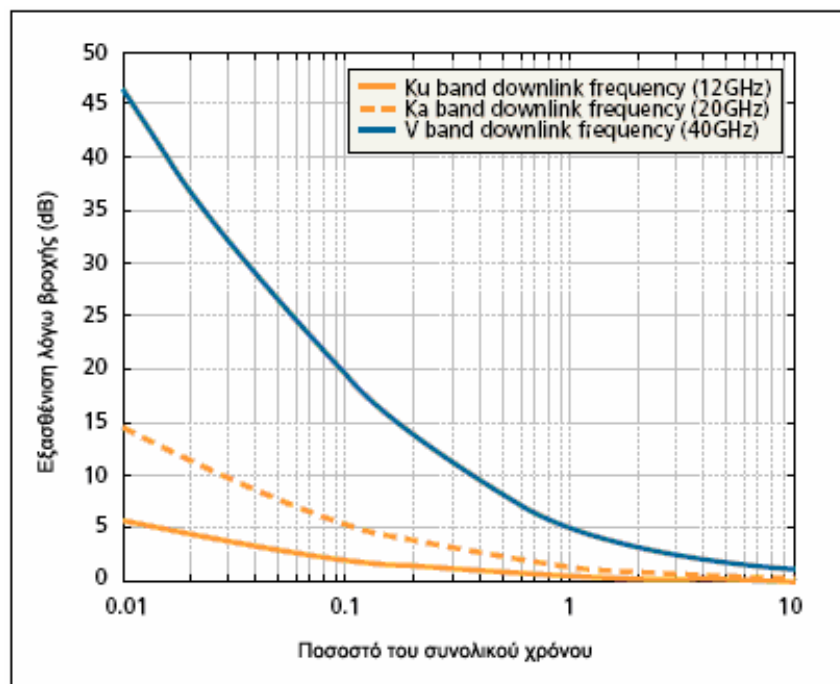


Σχήμα 2.1 - Μεταβολή μήκους εντός βροχής συναρτήσει της γωνίας ανύψωσης και του ύψους βροχής



Σχήμα 2.2 - Ειδική απόσβεση συναρτήσει της συχνότητας και του ρυθμού βροχόπτωσης

Υπάρχουν πλήθος εμπειρικών μοντέλων που προβλέπουν την μέση υποβάθμιση του λαμβανόμενου σήματος σε ετήσια βάση (CCIR, Leitao-Watson, Lin, Morita, Higuti, EXCELL και η σύσταση P.618-7 της ITU), τα οποία όλα αποδίδουν ικανοποιητικά σε παγκόσμια κλίμακα. Η μεθοδολογία που συνήθως ακολουθούμε σε αυτά τα μοντέλα διάδοσης είναι η αναπαράσταση του βάθους διάλειψης με αναφορά τον ελεύθερο χώρο σαν συνάρτηση του ποσοστού του χρόνου που γίνεται υπέρβαση αυτού του βάθους και μας δίνουν τη δυνατότητα να υπολογίζουμε τα περιθώρια στη ισχύ εκπομπής που πρέπει να λάβουμε υπόψη ώστε να έχουμε απώλεια σήματος για χρονικό διάστημα που να μας ικανοποιεί. Για παράδειγμα, στο σχήμα που ακολουθεί έχουμε πρόβλεψη της ετήσιας πιθανότητας υπέρβασης της εξασθένισης λόγω βροχής για διάφορες ζώνες συχνοτήτων που μας ενδιαφέρουν στην κάτω ζεύξη ενός υποθετικού δορυφόρου που λειτουργεί στην Αθήνα.

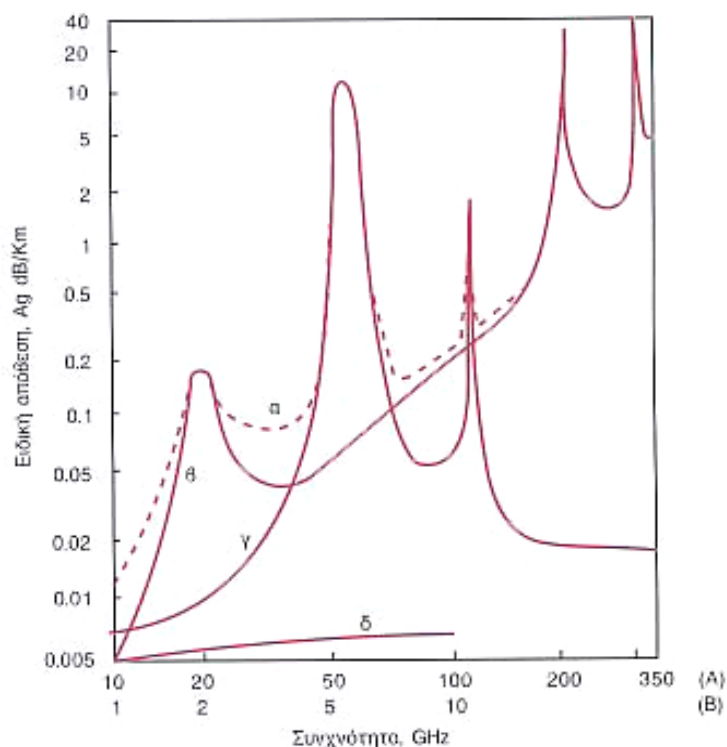


Σχήμα 2.3 - Απώλειες Λόγω Βροχής ως προς το ποσοστό του συνολικού χρόνου σε δορυφόρο πάνω από την Αθήνα, Ελλάδα (Γωνία Ανύψωσης = 30°, κάθετη πόλωση)

2.2.2. Απώλειες Τροπόσφαιρας

Σε συχνότητες γύρω στα 50 GHz, καθώς και σε μεγαλύτερες, η απόσβεση που εισάγεται από τα ατμοσφαιρικά αέρια, υπερβαίνει κατά πολύ την απόσβεση που σχετίζεται ακόμα και με την πιο έντονη βροχόπτωση. Οι κυριότερες ατμοσφαιρικές συνιστώσες που εισάγουν απόσβεση στο διαδιδόμενο σήμα, είναι το οξυγόνο και οι

υδρατμοί, αν και η παρουσία σύνθετων μορίων στους υδρατμούς μπορεί να έχει κάποια επίδραση ακόμη και σε συχνότητες πάνω από 100 GHz. Το οξυγόνο απορροφά ενέργεια από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα εξαιτίας της ηλεκτρικής διπολικής ροπής, ενώ οι υδρατμοί λόγω της μαγνητικής διπολικής ροπής. Η συμβολή στην εξασθένηση από αυτά τα δύο αέρια δείχνεται στο διάγραμμα 4.1, υποθέτοντας κανονικές συνθήκες πίεσης, θερμοκρασίας και υγρασίας.



Σχήμα 2.4 – Ειδική απόσβεση A_{go} και A_{gu} λόγω οξυγόνου και υδρατμών:

Κλίμακα Α : α. $A_{go} + A_{gu}$ για $f > 10$ GHz

β. A_{gu} για $f > 10$ GHz

γ. A_{go} για $f > 10$ GHz

Κλίμακα Β : δ. A_{go} για $f < 10$ GHz

Όπως φαίνεται από το προηγούμενο σχήμα, η απορρόφηση λόγω υδρατμών έχει μέγιστα στις συχνότητες 22.5, 183 και 320 GHz, ενώ η απορρόφηση λόγω οξυγόνου παρουσιάζει ένα αρκετά ευρύ μέγιστο στα 60 GHz και ένα πιο στενό στα 119 GHz.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφέρουμε ότι η απορρόφηση λόγω οξυγόνου σε κάθε ύψος είναι προσεγγιστικά σταθερή με το χρόνο, όπως ακριβώς και η αναλογία του οξυγόνου στην ατμόσφαιρα. Αντίθετα, το περιεχόμενο υδρατμών είναι μία ποσότητα που έντονα διακυμαίνεται με το χρόνο, και ως εκ τούτου η αντίστοιχη απορρόφηση ακολουθεί τον ίδιο νόμο.

Σαν ένα γενικό συμπέρασμα, οι διαλείψεις που οφείλονται στο φαινόμενο της ατμοσφαιρικής απορρόφησης λόγω των αερίων της ατμόσφαιρας (οξυγόνο και υδρατμοί) είναι πολύ σημαντικές και πρέπει να λαμβάνονται πολύ σοβαρά υπ' όψη κατά τη σχεδίαση μίας ζεύξης που λειτουργεί σε συχνότητες άνω των 30 GHz. Για το εν λόγω δορυφορικό σύστημα, αν θεωρήσουμε ότι η πλατφόρμα είναι τοποθετημένη στα 21 km πάνω από το επίπεδο της θάλασσας, οι ελάχιστες ατμοσφαιρικές απώλειες προκύπτουν για τις ζεύξεις με το ελάχιστο δυνατό μήκος, δηλαδή για τις ζεύξεις της πλατφόρμας με τα τερματικά που βρίσκονται στη UAC ζώνη.

Η απόσβεση από τα ατμοσφαιρικά αέρια που εισάγεται συγκεκριμένα για το κανάλι ανάμεσα σε ένα HAP και ένα επίγειο σταθμό βάσης μπορεί να εκτιμηθεί με βάση τις αριθμητικές σχέσεις που δίνονται στη συνέχεια και οι οποίες προσεγγίζουν τις θεωρητικές τιμές. Σε αυτές τις σχέσεις ορίζονται τα:

$A_L(h,\theta)$, $A_M(h,\theta)$, $A_H(h,\theta)$, που αναπαριστούν τις συνολικές απώλειες στην ατμόσφαιρα σε dB για περιοχές που βρίσκονται σε μικρά (εντός 22.5 μοιρών από τον Ισημερινό), μεσαία (μεταξύ 22.5 και 45 μοιρών από τον Ισημερινό) και μεγάλα (45 μοίρες ή περισσότερο από τον Ισημερινό) γεωγραφικά πλάτη, αντίστοιχα.

h και θ , που αναπαριστούν το υψόμετρο του επίγειο σταθμού σε σχέση με τη θάλασσα σε km και τη γωνία ανύψωσης του HAP σε μοίρες, αντίστοιχα. Η στρατοσφαιρική πλατφόρμα θεωρείται πάντα ότι βρίσκεται στο ύψος των 17km. Η προσέγγιση γίνεται για γωνίες ανύψωσης $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$. Για πραγματικές γωνίες ανύψωσης κάτω από 0 μοίρες, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η απόσβεση είναι η ίδια με αυτή για 0 μοίρες.

Στη ζώνη 27.5 - 28.35 GHz, η απόσβεση είναι ελαφρά μικρότερη στις υψηλότερες συχνότητες για μικρά και μεσαία γεωγραφικά πλάτη και στις χαμηλότερες συχνότητες σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη. Για αυτό και οι ακόλουθοι τύποι (που δίνουν την ελάχιστη υπολογιζόμενη απόσβεση) ισχύουν για τα 28.35 GHz στην περίπτωση μικρών και μεσαίων πλατών και για τα 27.5 GHz στην περίπτωση μεγάλων γεωγραφικών πλατών.

$$A_L(h,\theta) = 21.28/[1 + 0.9505\theta + 0.03065\theta^2 + h(0.3381 + 0.4466\theta) + h^2(0.2331 + 0.1169\theta)]$$

$$A_M(h,\theta) = 11.63/[1 + 0.8167\theta + 0.02649\theta^2 + h(0.2688 + 0.4486\theta) + 0.1394 h^2]$$

$$A_H(h,\theta) = 8.77/[1 + 0.8259\theta + h(0.2163 + 0.3037\theta) + 0.1067h^2]$$

Στη ζώνη 31.0 – 31.3 GHz, η απόσβεση είναι μεγαλύτερη σε υψηλότερες και, γι' αυτό, οι ακόλουθοι τύποι δίνουν την απόσβεση στα 31.0 GHz.

$$A_L(h,\theta) = 19.54/[1 + 0.9323\theta + 0.02553\theta^2 + h(0.3416 + 0.4413\theta) + h^2(0.1980 + 0.08016\theta)]$$

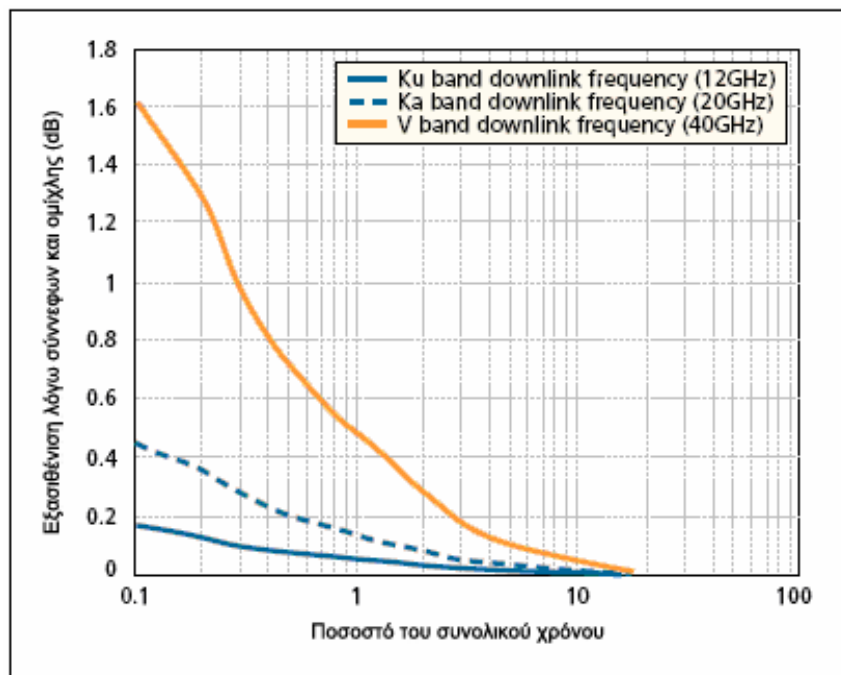
$$A_M(h,\theta) = 11.76/[1 + 0.8137\theta + 0.02033\theta^2 + h(0.2740 + 0.3935\theta) + 0.1203h^2]$$

$$A_H(h,\theta) = 9.52/[1 + 0.8160\theta + h(0.2378 + 0.2722\theta) + 0.08949h^2]$$

Σημαντικές αντίστοιχες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί και στις ζώνες 47.2 – 47.5 και 47.9 – 48.2 GHz και έχουν ληφθεί υπ' όψιν της ITU-R.

2.2.3. Εξασθένιση Λόγω Νέφωσης

Το νερό σε υγρή μορφή που περιέχουν τα σύννεφα είναι η φυσική αιτία της εξασθένησης λόγω νέφωσης. Η ITU-R (P.840-3) αλλά και άλλοι φορείς έχουν αναπτύξει μοντέλα πρόβλεψης γι' αυτόν τον παράγοντα εξασθένησης του σήματος. Το Σχήμα 2.5 απεικονίζει τιμές εξασθένησης λόγω νέφωσης και ομίχλης για συγκεκριμένο εύρος πιθανοτήτων για τρεις χαρακτηριστικές συχνότητες, χρησιμοποιώντας το μοντέλο της ITU-R για να δημιουργήσουμε τις καμπύλες.



Σχήμα 2.5 - Τιμές εξασθένησης λόγω νέφωσης και ομίχλης για συγκεκριμένο εύρος πιθανοτήτων για τρεις χαρακτηριστικές συχνότητες

Επιπλέον της εξασθένησης λόγω νεφών, σε συγκεκριμένο υψόμετρο πάνω από τη γη, κατακρημνίσεις χιονιού και πάγου μετατρέπονται σε κατακρημνίσεις βροχής. Η περιοχή γύρω από αυτό το ύψος είναι το στρώμα τήξης. Σε περιόδους ελαφριάς βροχής και για μικρές γωνίες ανύψωσης, το στρώμα τήξης συνεισφέρει σημαντικά στη συνολική εξασθένηση στο κανάλι, όπως πιστοποιείται από σχετικά μοντέλα.

2.2.4. Αποπόλωση Σήματος

Σε αυτή την παράγραφο θα αναφερθούν ορισμένες βασικές έννοιες που σχετίζονται με την αποπόλωση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που διέρχονται μέσα από βροχή. Το φαινόμενο της αποπόλωσης εξαρτάται άμεσα από τη διάλειαση που υφίσταται το σήμα κατά τη διέλευση του μέσα από βροχή, και πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπ' όψη κατά τη σχεδίαση ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος «αναχρησιμοποίησης συχνότητας». Όπως είναι γνωστό, τα τελευταία χρόνια πολλά τηλεπικοινωνιακά συστήματα (επίγεια και δορυφορικά) χρησιμοποιούν ορθογώνιες πολώσεις στην ίδια φέρουσα συχνότητα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μεγαλύτερη χωρητικότητα στη μετάδοση πληροφορίας. Η τεχνική αυτή αποκαλείται

«αναχρησιμοποίηση συχνότητας» (frequency reuse). Για να είναι όμως αξιόπιστη η μετάδοση πληροφορίας στην περίπτωση αυτή, πρέπει να διατηρείται μια επαρκής απομόνωση μεταξύ των κάθετα πολωμένων καναλιών. Ένας μεγάλος περιοριστικός παράγοντας είναι ακριβώς η ελάττωση αυτής της απομόνωσης, και συνεπώς η παρεμβολή μεταξύ αυτών των καναλιών λόγω διασταύρωσης πόλωσης, που οφείλεται κύρια σε φαινόμενα διάδοσης κατά μήκος της ζεύξης. Η κύρια αιτία για την εισαγωγή αποπόλωσης στο διαδιδόμενο σήμα, ειδικά σε συχνότητες πάνω από 10 GHz, είναι οι ατμοσφαιρικές κατακριμνήσεις κατά μήκος της ζεύξης και ιδιαίτερα οι βροχοπτώσεις.

Οι κυριότεροι παράγοντες του μέσου βροχής που συμβάλλουν στην αποπόλωση του σήματος είναι η μη σφαιρικότητα των σταγονιδίων και η τυχαία γωνία κλίσης αυτών ως προς την κατακόρυφο, η οποία εξαρτάται από την κατεύθυνση του ανέμου στη συγκεκριμένη περιοχή. Για τον υπολογισμό της αποπόλωσης, που εισάγει το φαινόμενο της βροχής, έχουν αναπτυχθεί πολλές θεωρητικές μελέτες και αρκετοί ημιεμπειρικοί τύποι.

Για τη συχνότητα λειτουργίας του υπό μελέτη στρατοσφαιρικού συστήματος, οι απώλειες λόγω αποπόλωσης, έχουν υπολογιστεί ίσες με:

$$L_{UP,DEPOL} \approx 0,5dB$$

Για την ποσοτική περιγραφή της αποπόλωσης του σήματος, θεωρούμε ότι ο πομπός εκπέμπει ταυτόχρονα δύο σήματα α και β με κάθετες γραμμικές πολώσεις.

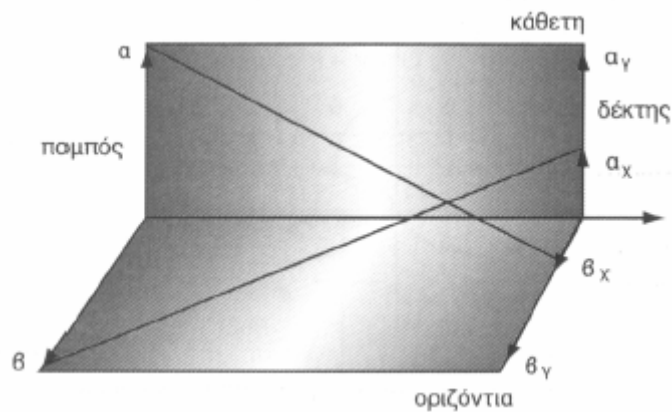
Στο δέκτη λαμβάνονται τα σήματα $\alpha\gamma$ και $\beta\gamma$, τα οποία έχουν την ίδια πόλωση με αυτή των εκπεμπόμενων καθώς και τα $\alpha\chi$ και $\beta\chi$, με κάθετη πόλωση από αυτή της εκπομπής τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Με χρήση αυτών των σημάτων ορίζεται η διασταύρωση πόλωσης XPD και η απομόνωση διασταύρωσης πόλωσης XPI.

$$XPD = 20 \log \frac{\alpha_\gamma}{\alpha_\chi} \quad (dB)$$

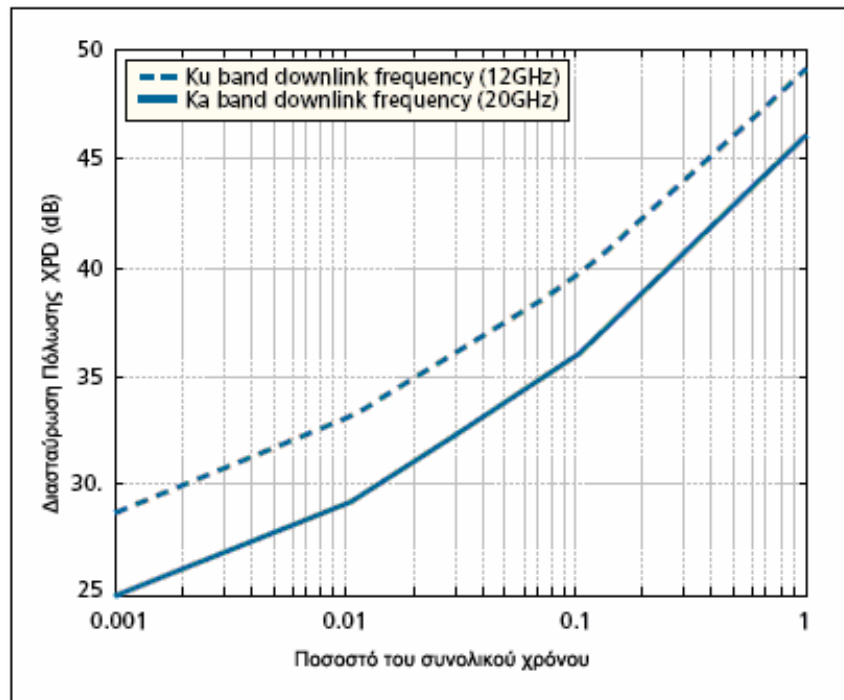
$$XPI = 20 \log \frac{\alpha_\gamma}{\beta_\chi} \quad \text{ή} \quad 20 \log \frac{\beta_\gamma}{\alpha_\chi} \quad (dB)$$

Στην περίπτωση κατά την οποία υπάρχει περίπου κυκλική πόλωση, που χαρακτηρίζεται από την τιμή του αξονικού λόγου AR, η διασταύρωση πόλωσης XPD ορίζεται ως:

$$XPD = 20 \log \left(\frac{AR + 1}{AR - 1} \right) \quad (dB)$$



Σχήμα 2.6 - Λήψη ορθογωνίων πολώσεων

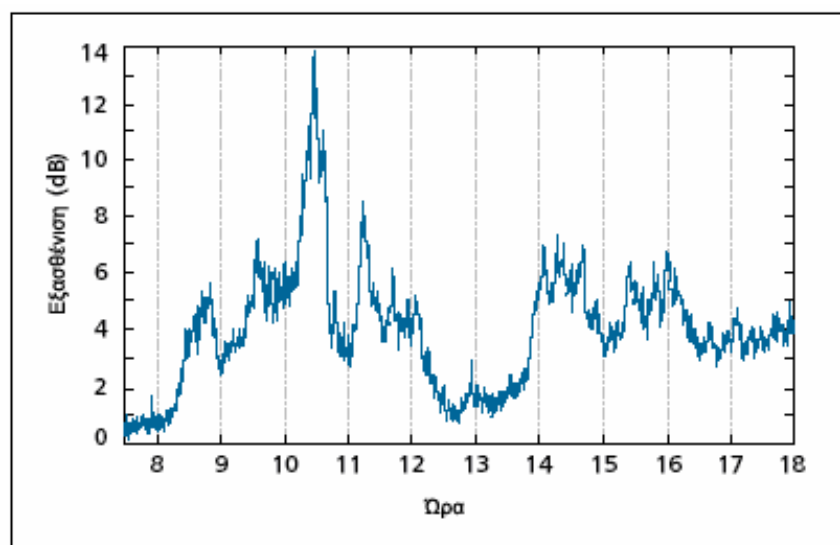


Σχήμα 2.7 - Διασταύρωση πόλωσης(XPD) λόγω βροχής σε dB ως προς το ποσοστό του συνολικού χρόνου για το οποίο υπερβαίνεται αυτή η τιμή για την περιοχή της Αθήνας, Ελλάδα.

2.2.5. Τροποσφαιρικοί Σπινθηρισμοί

Οι μεταβολές στο μέγεθος και το προφίλ της διαθλαστικότητας της τροπόσφαιρας οδηγούν σε διακυμάνσεις του πλάτους του σήματος, οι οποίες καλούνται σπινθηρισμοί. Αυτές οι διακυμάνσεις αυξάνουν για μεγαλύτερες συχνότητες, εξαρτώνται από το μήκος του καναλιού μετάδοσης, ενώ μειώνονται για μικρό εύρος δέσμης του κύριου λοβού της κεραίας. Οι διακυμάνσεις στο πλάτος

συνοδεύονται επίσης και από διακυμάνσεις στη φάση. Γενικά, η επίδραση των απωλειών της βροχής είναι κυρίαρχη στα επικοινωνιακά σήματα. Ωστόσο, για συστήματα χαμηλού περιθωρίου ισχύος που λειτουργούν σε υψηλές συχνότητες και χαμηλές γωνίες ανύψωσης (μικρότερες ή ίσες των 15°), οι σπινθηρισμοί γίνονται ιδιαίτερα σημαντικοί. Για συχνότητες μεγαλύτερες ή ίσες αυτών της Ka ζώνης, οι σπινθηρισμοί συμβάλλουν το ίδιο ή και περισσότερο από τη βροχή στον υπολογισμό της συνολικής απώλειας. Μια τυπική εικόνα των απωλειών που οφείλονται στη βροχή και στο σπινθηρισμό κατά τη διάρκεια μιας ημέρας φαίνεται στο Σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8 - Απώλειες που οφείλονται στη βροχή και στο σπινθηρισμό κατά τη διάρκεια μιας ημέρας.

2.2.6. Σύνοψη Απωλειών Διάδοσης

Παρόλο που τα μοντέλα πρόβλεψης για συγκεκριμένα φαινόμενα που επηρεάζουν τη διάδοση αποδίδουν ικανοποιητικά, η ταυτόχρονη εμφάνιση περισσότερων του ενός τέτοιων φαινομένων, κάτι που είναι πολύ πιθανό σε ζώνες συχνοτήτων από την Ka και πάνω, επιβάλλει τη χρήση μοντέλων πρόβλεψης που λαμβάνουν υπόψη τη συνδυασμένη επίδραση αυτών των παραγόντων εξασθένισης. Το κύριο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι ερευνητές είναι η έκταση της αλληλεξάρτησης των διάφορων παραγόντων εξασθένισης. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι το στρώμα τήξης που σχετίζεται με βροχές μικρής έντασης. Ακόμη η απορρόφηση από τα αέρια της ατμόσφαιρας αυξάνει κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων λόγω της αυξημένης παρουσίας υδρατμών στην ατμόσφαιρα.

Μέχρι πρόσφατα, δύο διαφορετικές προσεγγίσεις πάνω στο θέμα έχουν μελετηθεί. Η πρώτη θεωρεί όλα τα φαινόμενα που προκαλούν εξασθένιση συσχετισμένα, και επομένως η συνολική εξασθένιση υπολογίζεται ως εξής

$$A_{\text{tot}} = A_{O_2} + A_{H_2O} + A_C + A_R + A_{ML} + A_S$$

όπου A_{O_2} , A_{H_2O} , A_C , A_R , A_{ML} και A_S είναι οι απώλειες που οφείλονται σε οξυγόνο, υδρατμούς, σύννεφα, βροχή, στρώμα τήξης και σπινθηρισμό αντίστοιχα.

Η δεύτερη προσέγγιση δέχεται ότι τα φαινόμενα εξασθένισης είναι μερικώς ασυσχέτιστα, οπότε υιοθετείται άθροιση ενεργών τιμών (RMS) και η συνολικές απώλειες είναι

$$A_{tot} = \sqrt{A_{O_2}^2 + A_{H_2O}^2 + A_C^2 + A_R^2 + A_{ML}^2 + A_S^2}$$

Μία συνδυασμένη μέθοδος που αντανακλά την αλληλεξάρτηση των διάφορων παραγόντων εξασθένισης θεωρεί μερικά φαινόμενα διάδοσης ασυσχέτιστα. Η σχετική σχέση που υιοθετείται από την ITU-R είναι η ακόλουθη:

$$A_{tot} = A_{O_2} + A_{H_2O} + \sqrt{(A_C + A_R)^2 + A_S^2}$$

2.2.7. Ολίσθηση Doppler

Το φαινόμενο Doppler οφείλεται στη σχετική κίνηση μεταξύ πομπού και δέκτη και έχει σαν αποτέλεσμα την ολίσθηση της συχνότητας και τελικά την παραμόρφωση της κυματομορφής του διαμορφωμένου σήματος.

Θεωρούμε κινητό τερματικό το οποίο μετακινείται με σταθερή ταχύτητα v μεταξύ των θέσεων X και Y , που απέχουν μεταξύ τους απόσταση d ενώ ταυτόχρονα λαμβάνει σήματα από απομακρυσμένη πηγή S , όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Η διαφορά Δl των διαδρομών από την πηγή S προς τις θέσεις X και Y του κινητού είναι $\Delta l = d \cos \theta = v \Delta t \cos \theta$, όπου Δt ο χρόνος που χρειάζεται το κινητό για να φτάσει από τη θέση X στη θέση Y . Η γωνία θ υποτίθεται ότι είναι ίδια, καθότι η πηγή S είναι πολύ απόμακρη. Η αλλαγή στη φάση του λαμβανόμενου σήματος, λόγω της διαφοράς μήκους των διαδρομών, είναι

$$\Delta \phi = \frac{2\pi \Delta l}{\lambda} = \frac{2\pi v \Delta t}{\lambda} \cos \theta$$

και συνεπώς η φαινομενική ολίσθηση συχνότητας ή ολίσθηση Doppler f_D δίνεται από τη σχέση

$$f_D = \frac{\Delta \phi}{2\pi \Delta t} = \frac{v}{\lambda} \cos \theta \quad (1)$$

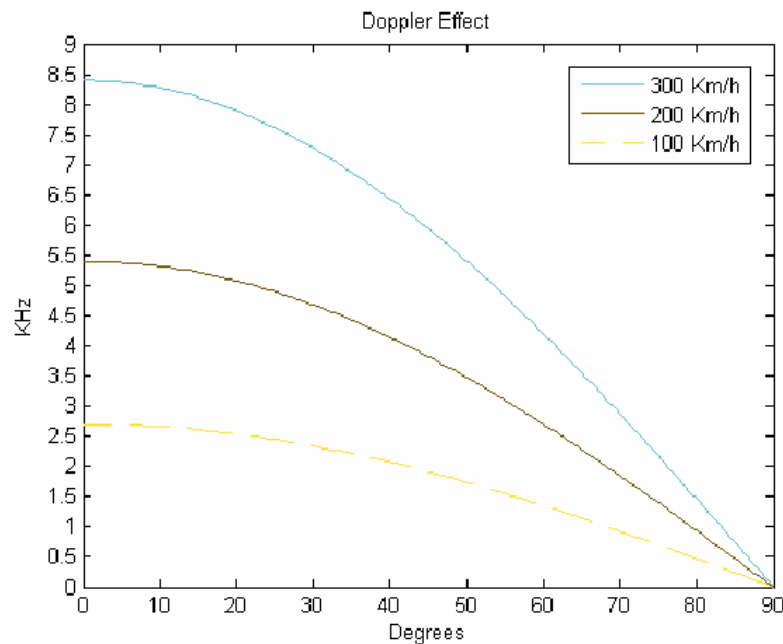
Η εξίσωση αυτή συσχετίζει την ολίσθηση Doppler με την ταχύτητα του κινητού και τη γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης της κίνησης του κινητού και της κατεύθυνσης άφιξης του σήματος. Παρατηρούμε από τη (2.67) ότι, αν το κινητό κινείται προς την κατεύθυνση άφιξης του κύματος η ολίσθηση είναι θετική (δηλαδή, η φαινομενική συχνότητα αυξάνει), και αν το κινητό απομακρύνεται από κατεύθυνση άφιξης του κύματος η ολίσθηση συχνότητας είναι αρνητική (δηλαδή, η φαινομενική συχνότητα ελαττώνεται). Σε σήματα με διαμόρφωση συνεχούς κυματομορφής, οι συνιστώσες

πολ/απλών διαδρομών, που καταφθάνουν από τις διάφορες κατευθύνσεις, συνεισφέρουν στην εξάπλωση Doppler του λαμβανόμενου σήματος, αυξάνοντας έτσι το εύρος ζώνης του.

Στην περίπτωση μας, έστω κινητός χρήστης (μπορούμε να θεωρήσουμε ότι βρίσκεται σε ένα κινούμενο τρένο) που κινείται με ταχύτητα $u=300$ km/h. Η συχνότητα που εξετάζουμε είναι στα $f=30$ GHz. Επίσης, η μικρότερη γωνία ανύψωσης που μπορούμε να θεωρήσουμε είναι στις $\theta=10^\circ$. Έτσι από την σχέση (1) θα έχουμε:

$$f_D = \frac{300 \text{ km/h}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} \cdot \cos \theta = \frac{83.3 \text{ m/s}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} \cdot \cos 10^\circ = 8206.73 \text{ Hz}$$

Παρακάτω ακολουθεί το Σχήμα 2.9 όπου φαίνεται η εξάρτηση του φαινομένου Doppler από την γωνία ανύψωσης (0° - 90°) για τρεις ενδεικτικές ταχύτητες. Παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή της ολίσθησης Doppler είναι για τιμές κοντά σε αυτές του παραδείγματος μας.



Σχήμα 2.9 - Εξάρτηση του φαινομένου Doppler από την γωνία ανύψωσης (0° - 90°) για τρεις ενδεικτικές ταχύτητες

Συνεπώς, εφόσον ασχολούμαστε με συχνότητες της τάξεως των 1010 Hz μια ολίσθηση γύρω στα 7-8 Hz στην χειρότερη περίπτωση, είναι τελείως αμελητέα.

Εκτός από την κίνηση του τερματικού είναι σημαντικό να υπολογίσουμε και την ολίσθηση Doppler που εισάγεται και από την άλλη μεριά της ζεύξης. Από τα φάσματα συχνοτήτων για τους κραδασμούς των Zeppelin (CAPANINA D08), μπορούμε να εξάγουμε την μέγιστη ταχύτητα και τις διάρκειες των κραδασμών για τα HAPs. Η υψηλότερη ταχύτητα λοιπόν είναι της τάξης των 3.2×10^{-3} m/s, ταχύτητα πολύ μικρή για να προκαλέσει το οποιοδήποτε πρόβλημα. Το εύρος των συχνοτήτων Doppler είναι επίσης μικρό λόγω του χαμηλού ρυθμού αλλαγής ταχύτητας των κραδασμών.

Εκτός από τους κραδασμούς, ένα HAP μεταβάλλει και την ταχύτητά του, καθώς κινείται στη προκαθορισμένη κυκλική του διαδρομή. Τυπικά ίχνη πτήσης μπορούν να αναπαρασταθούν από “τροχιές” διαμέτρου 4 km και ταχύτητες μέχρι 200 km/hr, οι οποίες μας δίνουν μέγιστες συχνότητες Doppler στα 4.5 KHz.

Ακόμη μία κεραία στην οροφή ενός τρένου υπόκειται σε ημιοπεριοδικές κινήσεις καθώς το τρένο ταξιδεύει πάνω στις ράγες. Για να υπολογίσουμε μια τάξη μεγέθους των σχετιζόμενων συχνοτήτων Doppler, μπορούμε να θεωρήσουμε τυπικές τιμές $f_r = 0.5$ Hz για τη συχνότητα της ταλάντωσης του τρένου (ένα “κτύπημα” κάθε 2 δευτερόλεπτα) και μετατόπιση 0.1 μέτρων, με μέγιστη ταχύτητα τα 0.31 m/sec, τα οποία δίνουν τελικά συχνότητα Doppler $f_D=1$ Hz, η οποία είναι ασήμαντη.

Το φάσμα Doppler δεν θα πρέπει να απασχολεί, αφού θα είναι πολύ μικρό λόγω της απουσίας ξεχωριστών πολυδιαδρομικών συνιστωσών σε μεγάλη κλίμακα. Αυτό σημαίνει ότι όλες οι πολυδιαδρομικές συνιστώσες ακολουθούν σχεδόν ταυτόσημες διαδρομές και έτσι οι ολισθήσεις Doppler μεταξύ τους θα είναι πολύ μικρές.

2.3. Μοντελοποίηση Καναλιού

2.3.1. Μοντέλο Δυο Καταστάσεων

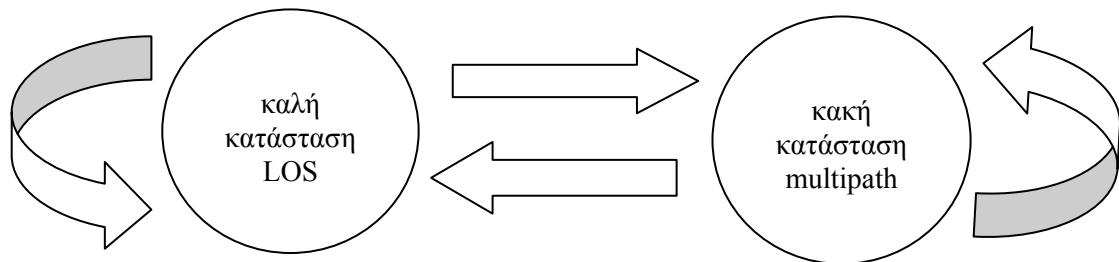
Το στατιστικό μοντέλο που ακόμα και τώρα χρησιμοποιείται στην διεθνή βιβλιογραφία είναι το μοντέλο των δυο καταστάσεων (two-state model). Σε αυτό το μοντέλο έχουμε δυο τυπικά σενάρια, την διάδοση οπτικής επαφής (L.O.S. – line of sight) και την διάδοση μέσω πολλαπλών διαδρομών (multipath).

Στην διάδοση οπτικής επαφής υπάρχει ανεμπόδιση επικοινωνία μεταξύ του πομπού - HAP και του δέκτη και χαρακτηρίζεται από υψηλή ισχύ λήψεως. Η κατανομή που χαρακτηρίζει αυτή την εξασθένιση είναι η Rice και η ίδια εξαρτάται από τον παράγοντα Rice (c – ο λόγος ισχύος απευθείας και πολυδιαδρομικού σήματος).

Στην διάδοση μέσω πολλαπλών διαδρομών έχουμε διάφορα εμπόδια μεταξύ πομπού και δέκτη και έτσι το σήμα μας αντανακλάται, σκεδάζεται και διαχέεται σε πολλές επιφάνειες μέχρι να φτάσει στον προορισμό του με συνέπεια την χαμηλή στάθμη ισχύος λήψης. Η κατανομή που χαρακτηρίζει αυτή την διάδοση είναι η Rayleigh – Lognormal και η ίδια εξαρτάται από την τυπική απόκλιση σ (σε dB) της στάθμης ισχύος καθώς και την μέση ελάττωση της στάθμης ισχύος μ (σε dB).

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό έχουμε δυο καταστάσεις που αντιπροσωπεύουν καλή και κακή διάδοση και η αλλαγή από την μια κατάσταση στην άλλη γίνεται με τη

βοήθεια αλυσίδας Markov η οποία χαρακτηρίζεται από τις μέσες διάρκειες D_g και D_b όταν το κανάλι παραμένει σε καλή ή κακή κατάσταση, αντίστοιχα.



Ο χρονικός παράγοντας της σκίασης, A , αναπαριστά το ποσοστό του χρόνου όταν το κανάλι βρίσκεται στην κακή κατάσταση και δίδεται από την σχέση:

$$A = \frac{D_b}{D_g + D_b}$$

Όταν το κανάλι είναι στην καλή κατάσταση η στιγμιαία λαμβανόμενη ισχύς S ακολουθεί κατανομή Rice με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$p_{Rice} = \frac{r}{\sigma^2} \cdot e^{-[(r^2+s^2)/(2\cdot\sigma^2)]} \cdot I_0\left(\frac{r \cdot S}{\sigma^2}\right)$$

Όπου,

I_0 , η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel μηδενικής τάξης,

σ^2 , η παράμετρος κατανομής που σχετίζεται με τη μέση τιμή

s^2 , η μέση τιμή του απευθείας σήματος

Επίσης ορίζεται ο παράγοντας Rice c , ως ο λόγος μεταξύ της μέσης τιμής της απευθείας μετάδοσης (LOS) και της μέσης τιμής της πολυδιαδρομικής μετάδοσης (multipath) :

$$c = \frac{s^2}{2 \cdot \sigma^2}$$

Όταν το κανάλι είναι στην κακή κατάσταση η στιγμιαία λαμβανόμενη ισχύς S ακολουθεί κατανομή Rayleigh με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας που προκύπτει από την κατανομή Rice για $s=0$:

$$p_{Rayleigh} = \frac{r}{\sigma^2} \cdot e^{-(r^2/2\cdot\sigma^2)}$$

Η δεξιόστροφη αθροιστική κατανομή της Rayleigh θα είναι της μορφής,

$$P_{Rayleigh} = \int_0^r \frac{u}{\sigma^2} \cdot e^{-u^2/2\sigma^2} \cdot du = 1 - e^{-r^2/2\sigma^2}$$

Η ανάπτυξη του μοντέλου για το ραδιοεπικοινωνιακό κανάλι, εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από το περιβάλλον διάδοσης. Για παράδειγμα, σε ένα επίγειο κινητό κανάλι επικοινωνίας ένα όχημα κινούμενο σε μια εθνική οδό, είναι λιγότερο πιθανό να βρίσκεται σε "σκιά" απ' ευθείας σήματος από ένα όχημα κινούμενο μέσα σε πόλη, όπου υπάρχουν εμπόδια πάσης φύσεως. Το μοντέλο που περιγράφεται πιο κάτω, λαμβάνει υπ' όψη τον βαθμό ύπαρξης απ' ευθείας δρόμου σαν παράμετρο και είναι κατάλληλο για την περιγραφή επίγειων δορυφορικών καναλιών.

Ισχύει:

$$P(s) = (1 - A) \cdot P_{RC}(s) + A \cdot \int_0^\infty P_{RY}(s/s_0) \cdot P_{LN}(s_0) \cdot ds_0$$

$P(s)$, είναι η κατανομή πιθανότητας του λαμβανόμενου συνολικού σήματος

A , είναι το ποσοστό, κατά το οποίο ο κινητός σταθμός βρίσκεται σε ηλεκτρομαγνητική σκιά

$P_{RC}(s)$, είναι η κατανομή Rice που περιγράφει το φαινόμενο γρήγορων διαλείψεων στην περίπτωση που υπάρχει απ' ευθείας σήμα

$P_{RY}(s)$, είναι η κατανομή Rayleigh που περιγράφει το φαινόμενο γρήγορων διαλείψεων όταν δεν υπάρχουν συνθήκες απ' ευθείας σήματος

$P_{LN}(s)$, είναι η λογαριθμοκανονική κατανομή, που περιγράφει το φαινόμενο αργών διαλείψεων

s , παριστάνει τη στιγμιαία ισχύ του σήματος και s_0 , είναι η μέση λαμβανόμενη ισχύς.

Υπενθυμίζεται ότι ένα σήμα ακολουθεί τη λογαριθμοκανονική κατανομή όταν ο λογάριθμός του ακολουθεί την κανονική κατανομή, συνεπώς:

$$P_{LN}(s_0) = \frac{1}{\sigma \cdot s_0 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(s_0 - \mu)}{\sigma} \right)^2}$$

με $\mu, \sigma > 0$. Η μέση τιμή και η διακύμανση της κατανομής δίδονται από τις σχέσεις,

$$E(s_0) = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}$$

$$V(s_0) = e^{2\mu + \sigma^2} \cdot (e^{\sigma^2} - 1)$$

Το μοντέλο που περιγράφεται παραπάνω υποθέτει ότι όταν υπάρχει απ' ευθείας σήμα, τότε το λαμβανόμενο σήμα ακολουθεί την κατανομή Rice, ενώ όταν δεν υπάρχει απ' ευθείας σήμα τότε το λαμβανόμενο σήμα ακολουθεί την κατανομή Rayleigh, δοθέντος ότι ο μέσος του ακολουθεί τη λογαριθμοκανονική κατανομή. Η λογαριθμοκανονική κατανομή του μέσου οφείλεται στις αργές μεταβολές της περιβάλλουσας των σημάτων που προκαλούνται από τη βαθμιαία μεταβολή της διαδρομής του σήματος (ανακλάσεις από μακρινά αντικείμενα, όπως λόφοι κλπ).

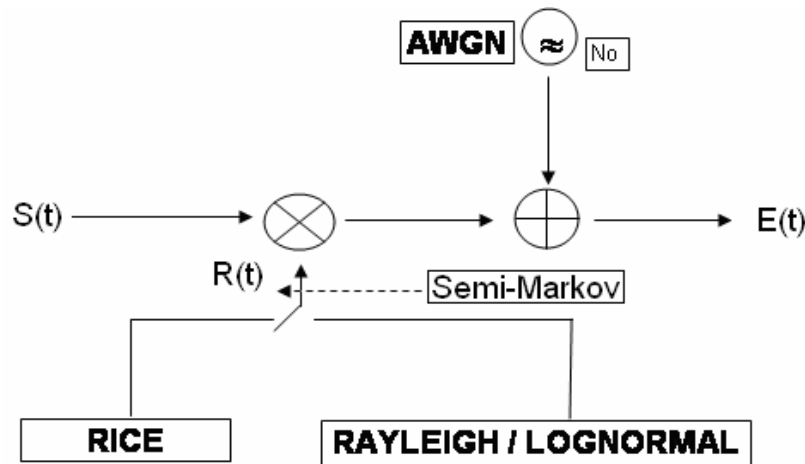
Στον Πίνακα 4 δίδονται μετρήσεις που έχουν ληφθεί σε μια Ευρωπαϊκή πόλη καθώς και σε δρόμο εκτός πόλεως για την κατανομή του λαμβανομένου σήματος (ισχύς λήψεως).

Πίνακας 4 - Μετρήσεις για περιπτώσεις Πόλης και Εθνικής Οδού

Πιθανότητα %	Πόλη	Εθνική Οδός
99,75	<-30dB	-30dB
99	-30dB	-22dB
95	-22dB	-14dB
90	-18dB	-7,5dB
80	-14dB	-2dB
60	-10dB	0 dB

Η πιο σημαντική παράμετρος του καναλιού είναι το ποσοστό της σκίασης, A . Ο παράγοντας $1-A$ είναι το τμήμα του χρόνου κατά την διάρκεια του οποίου η μετάδοση είναι δυνατή και άρα αναπαριστά μια αυστηρή εκτίμηση για την επιτεύξιμη ολική ρυθμοαπόδοση (achievable gross throughput) των ψηφιακών συστημάτων μετάδοσης. Κατά την διάρκεια των περιόδων χωρίς σκίαση, το κανάλι μοντελοποιείται ως Rician κανάλι, με εξασθενητική συμπεριφορά που περιγράφεται με τον παράγοντα c . Μεγάλες τιμές του παράγοντα c δηλώνουν μικρή πολυδιαδρομική εξασθένηση ($c \rightarrow \infty$ για κανάλι Gauss) ως αποτέλεσμα καλών χαρακτηριστικών μετάδοσης. Μικρές τιμές του c αντιστοιχούν σε πολλές διαλείψεις ($c \rightarrow 0$ για κανάλι Rayleigh).

Το Σχήμα 2.10 παρουσιάζει ένα δυναμικό μοντέλο κινητών δορυφορικών επικοινωνιών το οποίο αναπαράγει την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ισχύος του λαμβανομένου σήματος όπως επίσης και την δυναμική συμπεριφορά της διαδικασίας των διαλείψεων και της σκίασης. Το μεταδιδόμενο σήμα $s(t)$ 'επιδεινώνεται' από το διάλειψη $r(t)$ και από τον ποσθητικό θόρυβο Gauss $n(t)$ με φασματική πυκνότητα ισχύος N_0 .



Σχήμα 2.10 - Μοντέλο Καναλιού "Καλή / Κακή Κατάσταση"

Το λαμβανόμενο σήμα είναι :

$$e(t) = s(t) \cdot r(t) + n(t)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η διαδικασία της διάλειψης $r(t)$ η οποία παράγεται από το μοντέλο του καναλιού λαμβάνει μιγαδικές τιμές. Το τμήμα της διάλειψης μπορεί να πολλαπλασιαστεί με το σήμα $s(t)$ όταν το εύρος ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος s είναι μικρό σε σχέση με το εύρος ζώνης συνοχής (coherence bandwidth) της διάλειψης.

Για δοσμένη ταχύτητα v (m/s) και ρυθμό R (bps) , η πιθανότητες μετάβασης p_{gb} και p_{bg} μπορούν να σχετιστούν με την διάρκεια του bit.

Σύμφωνα με το μοντέλο Markov, η μέση διάρκεια της περιόδου καλής (κακής) κατάστασης καναλιού δίνεται από τις σχέσεις

$$D_g \text{ bits} = \frac{1}{p_{gb}} = \frac{R}{u} \cdot D_g m$$

$$D_b \text{ bits} = \frac{1}{p_{bg}} = \frac{R}{u} \cdot D_b m$$

Η πιθανότητα μία καλή (κακή) κατάσταση καναλιού να διαρκέσει περισσότερο από n bits είναι :

$$p_g(>n) = p_{gg}^n$$

$$p_b(>n) = p_{bb}^n$$

Οι πιθανότητες μετάβασης στο μοντέλο Markov μπορούν να εξαχθούν από τις κατανομές πιθανότητας $p_g(>n)$ και $p_b(>n)$:

$$p_{gb} = 1 - p_{gg}$$

$$p_{bg} = 1 - p_{bb}$$

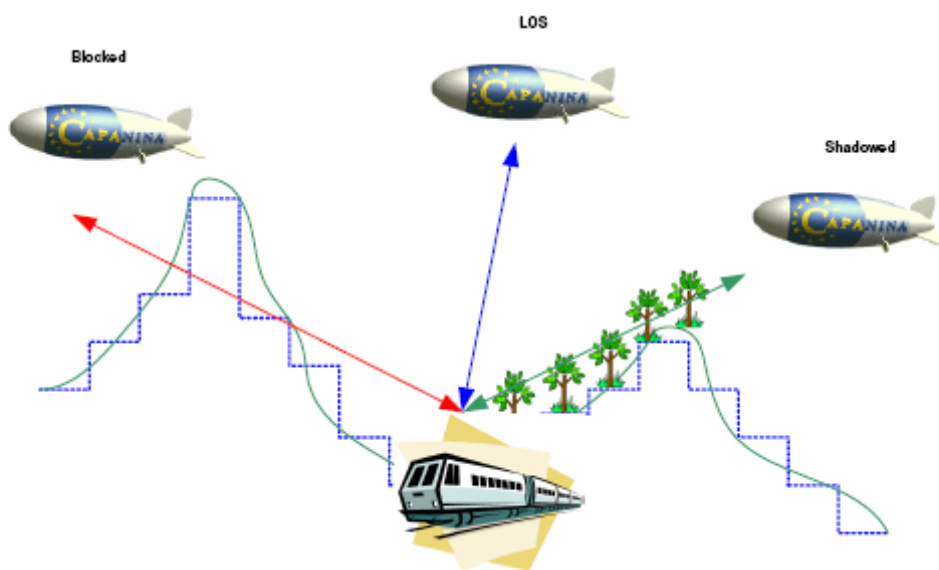
Όπως έχει προαναφερθεί στην αρχική σχέση, το χρονικό τμήμα της σκίασης σχετίζεται με τις διάρκειες D_g και D_b . Οι διάρκειες D_g και D_b που αποτιμώνται από τις κατανομές πιθανότητας $p_g(>n)$ και $p_b(>n)$ συνήθως δεν ικανοποιούν την προηγούμενη σχέση ακριβώς. Έτσι, οι μέσες τιμές υπολογίζονται σύμφωνα τις σχέσεις :

$$\bar{D}_g = \frac{1}{2} \left[D_g + \frac{1-A}{A} D_b \right]$$

$$\bar{D}_b = \frac{1}{2} \left[D_b + \frac{1-A}{A} D_g \right]$$

2.3.2. Μοντέλο Τριών Καταστάσεων

Ένα πιο πρόσφατο στατιστικό μοντέλο που έχει ακολουθηθεί τα τελευταία χρόνια και που ανταποκρίνεται καλύτερα σε ρεαλιστικές συνθήκες είναι το μοντέλο τριών καταστάσεων. Η διαφορά με το προηγούμενο μοντέλο που εξετάσαμε είναι ότι αντί για την κακή κατάσταση, έχουμε δυο νέες καταστάσεις, την ελαφριά σκίαση και την ολική σκίαση. Ας ονομάσουμε αυτές τις καταστάσεις A, B, C και ας προχωρήσουμε στην ανάλυση μας.



- Η κατάσταση A είναι, όπως και πριν, η διάδοση οπτικής επαφής (LOS). Η κατανομή που περιγράφει αυτή την κατάσταση είναι όπως και πριν η

Rician. Μπορούμε να θεωρήσουμε μια τυπική τιμή του παράγοντα Rice για αστικό περιβάλλον (για γωνία ανύψωσης 21°) ίση με $c= 10.6$ dB.

- Η κατάσταση B είναι η διάδοση ελαφριάς σκίασης (slight shadowing). Η κατανομή που περιγράφει αυτή την κατάσταση είναι η Rayleigh – Lognormal.
- Η κατάσταση C είναι η διάδοση ολικής σκίασης. Η κατανομή που περιγράφει αυτή την κατάσταση είναι η Lognormal.

Καθώς μεταβάλλονται οι περιβαλλοντικές συνθήκες, έχουμε και τις αντίστοιχες μεταβάσεις από την μια κατάσταση στην άλλη. Για την παράσταση αυτών των καταστάσεων χρησιμοποιούμε το Μαρκοβιανό μοντέλο πεπερασμένων καταστάσεων. Οι μεταβάσεις αυτές παριστάνονται από ένα πίνακα P, όπου κάθε στοιχείο του P_{ij} αντιπροσωπεύει την πιθανότητα να μεταβεί από την κατάσταση i στην κατάσταση j. Για την περίπτωση των τριών καταστάσεων A, B και C ο πίνακας είναι ο :

$$P = \begin{pmatrix} P_{AA} & P_{AB} & P_{AC} \\ P_{BA} & P_{BB} & P_{BC} \\ P_{CA} & P_{CB} & P_{CC} \end{pmatrix}$$

Το διάνυσμα μόνιμης κατάστασης π υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες των αλυσίδων Markov εκφράζεται από τον τύπο:

$$\pi(I-P)=0$$

$$\pi e=1$$

όπου,

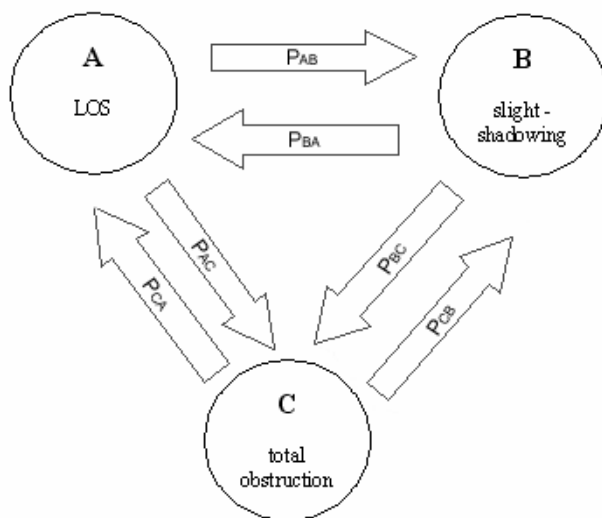
I είναι ο μοναδιαίος πίνακας,

P είναι ο πίνακας μεταβάσεων και

$e=[1 \ 1 \ \dots]^T$.

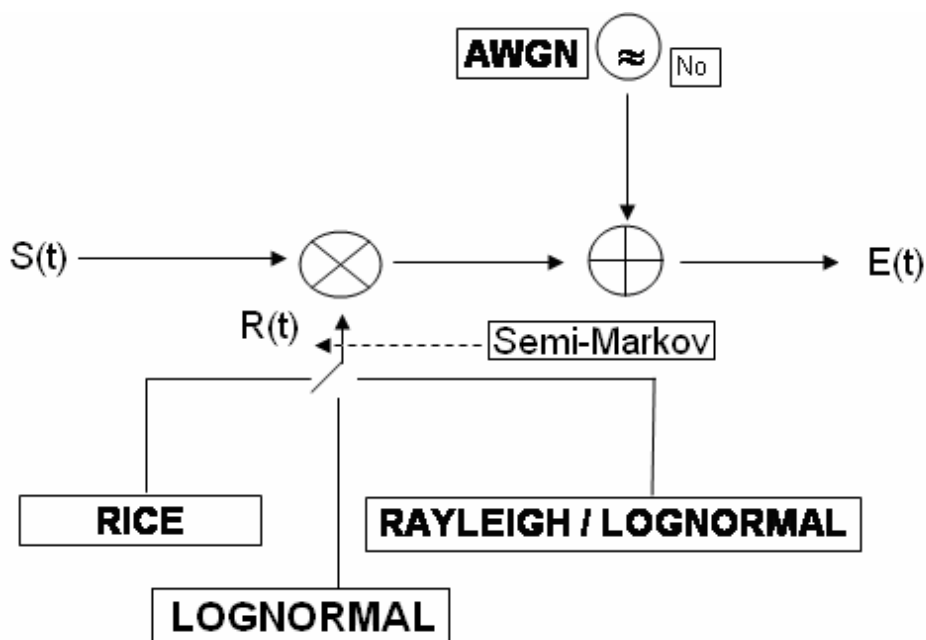
Κάθε στοιχείο π_i αντιπροσωπεύει το ποσοστό του συνολικού χρόνου που η διαδικασία μένει στην κατάσταση i.

$$\pi = (\pi_A \ \pi_B \ \pi_C)$$



Μια semi-Markov διαδικασία είναι μια αλυσίδα Markov όπου η χρονική διάρκεια μεταξύ των μεταβατικών καταστάσεων είναι τυχαία και καθορίζεται από κάποιες κατανομές. Από την διαδικασία Markov ορίζεται μια νέα semi-Markov διαδικασία που περιγράφεται από ένα νέο πίνακα μεταβάσεων r του οποίου οι τιμές ορίζονται από τον τύπο:

$$r_{ij} = \frac{P_{ij}}{1 - P_{ii}} \text{ για } i \neq j \text{ και } r_{ii} = 0$$



Σχήμα 2.11 - Μοντέλο Καναλιού Τριών Καταστάσεων

2.3.2.i. Κατανομή καταστάσεων

Η διάρκεια της κατάστασης A ακολουθεί εκθετική κατανομή:

$$P_A(D \leq d) = 1 - \beta \cdot d^{-\gamma}$$

Όπου οι παράμετροι β και γ είναι συναρτήσεις του επιπέδου της σκίασης και για $d > \beta^{1/\gamma}$. Η διάρκεια των άλλων δυο καταστάσεων ακολουθεί Lognormal κατανομή για τιμές $d > 0.1m$ και εκφράζεται από τον τύπο:

$$P_{B,C}(D \leq d) = \frac{(1 + \operatorname{erf}[\frac{\ln(d) - \ln(a)}{\sqrt{2}\sigma}])}{2}$$

,όπου :

σ είναι η τυπική απόκλιση του $\ln(d)$,

το $\ln(a)$ είναι η μέση τιμή του $\ln(d)$

και η συνάρτηση erf δίνεται από τη Σύσταση της ITU-R P.1057.

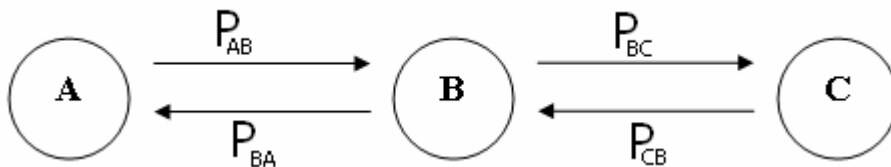
Πίνακας 5 - Οι τιμές των πιθανοτήτων μετάβασης και των παραμέτρων $\alpha, \beta, \gamma, \sigma$ ορίζονται για διαφορετικά περιβάλλοντα

		Περιβάλλοντα			
		Παράμετροι	Προαστικό I	Προαστικό II	Δάσος
Κατάσταση A	β		0.88	0.83	0.60
	γ		0.61	0.66	0.84
Κατάσταση B	α		1.73	1.89	2.05
	σ		1.11	0.93	1.05
Κατάσταση C	α		2.62	3.28	1.55
	σ		0.98	1.04	1.02
P	P_{AB}		1	1	1
	P_{AC}		0	0	0
	P_{BA}		0.65	0.65	0.42
	P_{BC}		0.35	0.35	0.58
	P_{CA}		0	0	0
	P_{CB}		1	1	1

Από τον προηγούμενο πίνακα συνάγεται ότι ο πίνακας μεταβάσεων της semi-Markov αλυσίδας είναι ο :

$$P = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0.65 & 0 & 0.35 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Παρατηρούμε λοιπόν ότι τελικά έχουμε μεταβάσεις μόνο μεταξύ γειτονικών καταστάσεων.

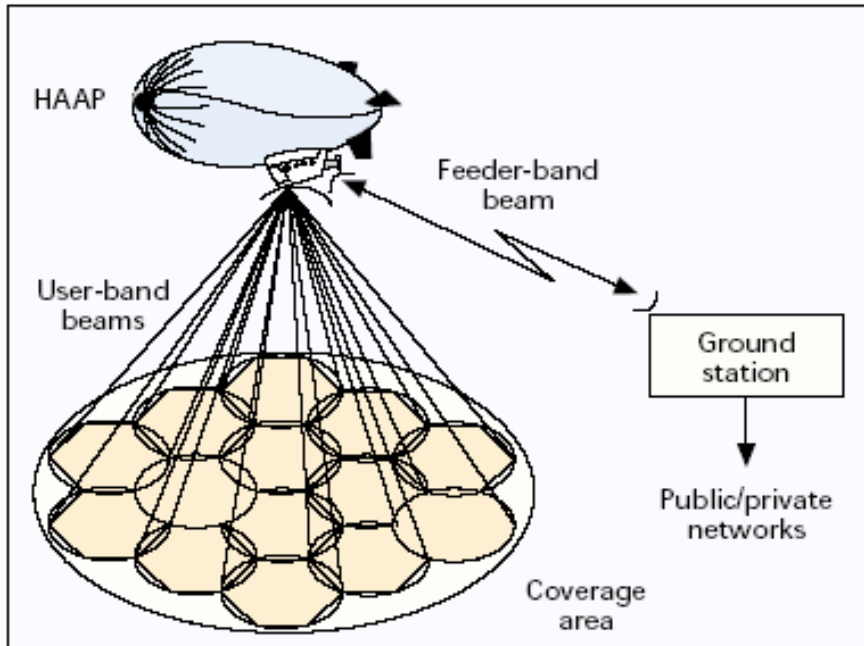


2.4. Μοντελοποίηση Αρχιτεκτονικής Κυψελών

2.4.1. Εισαγωγή

Ως μέρος της μελέτης μας για τα HAPs, είναι χρήσιμο να δούμε διάφορες αρχιτεκτονικές για τις κυψέλες του δικτύου μας, καθώς και τις διαφορές τους στη μοντελοποίηση σε σχέση με ένα επίγειο σύστημα.

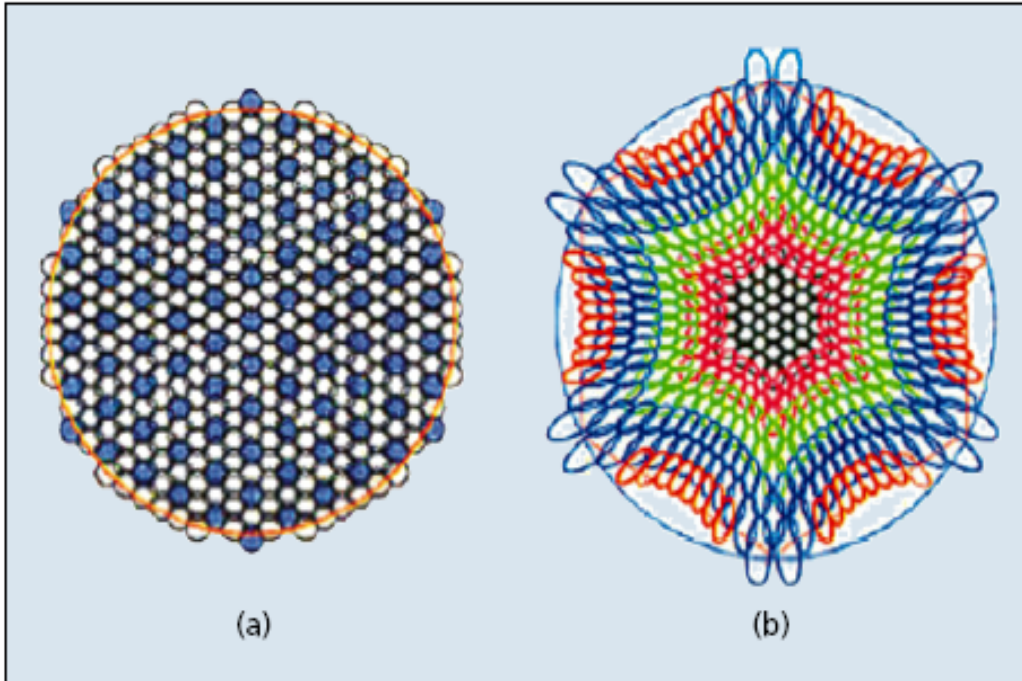
Ξεκινώντας από τα επίγεια συστήματα, ξέρουμε ότι γενικά έχουμε περιορισμούς λόγω των παρεμβολών μεταξύ των κυψελών, τις οποίες παρεμβολές είναι δύσκολο να προβλέψουμε από σημείο σε σημείο. Αυτό οφείλεται στο ότι έχουμε σοβαρές επιδράσεις από τη μορφολογία του εδάφους και από τα κτίρια στην οριζόντια διάδοση. Αντίθετα, η διάδοση που επικρατεί σε ένα σύστημα βασισμένο σε HAPs είναι η διάδοση ελευθέρου χώρου, με όλες τις κυψέλες να εξυπηρετούνται από ένα κοινό σημείο. Παρότι και στα κυψελωτά δίκτυα των HAPs υπάρχουν περιορισμοί λόγω παρεμβολών, τα επίπεδα της παρεμβολής μπορούν να προβλεφθούν (και να ελεγχθούν) με περισσότερη σιγουριά λόγω των καλύτερων συνθηκών διάδοσης.



Σχήμα 2.12 - Γενική όψη της αρχιτεκτονικής ενός συστήματος HAAP

Κάποια από τα επιλεγμένα σενάρια έχουν μελετηθεί λεπτομερώς. Μία από τις απλούστερες προσεγγίσεις είναι να υποθέσουμε κυκλικά συμμετρικές δέσμες ακτινοβολίας από πανομοιότυπες κεραίες οι οποίες να ακτινοβολούν σε κάθε κυψέλη με σταθερή γωνιακή απόσταση η μία από την άλλη. Σε αυτήν την περίπτωση, τα ίχνη των πιο απομακρυσμένων κυψελών γίνονται συνεχώς και πιο ελλειπτικά και οι κυψέλες δεν καλύπτουν τον χώρο αποτελεσματικά. Επιπλέον χρειαζόμαστε όλο και μεγαλύτερα επίπεδα ισχύος εκπομπής όσο αυξάνεται η απόσταση από το έδαφος.

Αντίθετα, έχει βρεθεί ότι μία καλύτερη προσέγγιση είναι το να χρησιμοποιήσουμε μία συμβατική, ενιαία εξαγωνική δομή κυψελών στο έδαφος με το να επιλέξουμε κεραία με τις κατάλληλες ιδιότητες. Αυτό σημαίνει ότι οι δέσμες μας θα είναι ελλειπτικές, ώστε να έχουμε κυκλικό ίχνος στο έδαφος.



Σχήμα 2.13 - Τυπικά παραδείγματα αποτυπωμάτων πολλαπλών δεσμών που προτείνονται στη σύσταση της ITU-R: α) μοντέλο ελλειπτικής δέσμης (367 δέσμες), β) μοντέλο κυκλικής δέσμης πολλαπλών ζωνών (397 δέσμες).

Επίσης επιλέγουμε κατευθυντικότητα τέτοια ώστε να είναι μέγιστη η ακτινοβολή στα όρια της κυψέλης, μία προσέγγιση παρόμοια με αυτή των δορυφόρων όπου η ενεργός επιφάνεια επιλέγεται ώστε να μεγιστοποιείται η ισχύς στα άκρα της γεωγραφικής περιοχής κάλυψης. Σε αυτήν την περίπτωση, ούτε η γωνιακή απόσταση των κεραιών ούτε η κατευθυντικότητα είναι σταθερές, και θα πρέπει να υπολογίζονται για κάθε κυψέλη χωριστά. Ωστόσο η κάλυψη με όρους σήματος προς παρεμβολή (carrier to interference – CIR) έχει βρεθεί ότι είναι καλύτερη σε σχέση με ένα σύστημα κεραιών σταθερής γωνιακής απόστασης. Το CIR υπολογίζεται από τον τύπο:

$$CIR = \frac{P_{\max}}{\sum P_{\text{other}}}$$

Όπου:

P_{\max} είναι η μέγιστη ισχύς της κυψέλης που μας ενδιαφέρει και

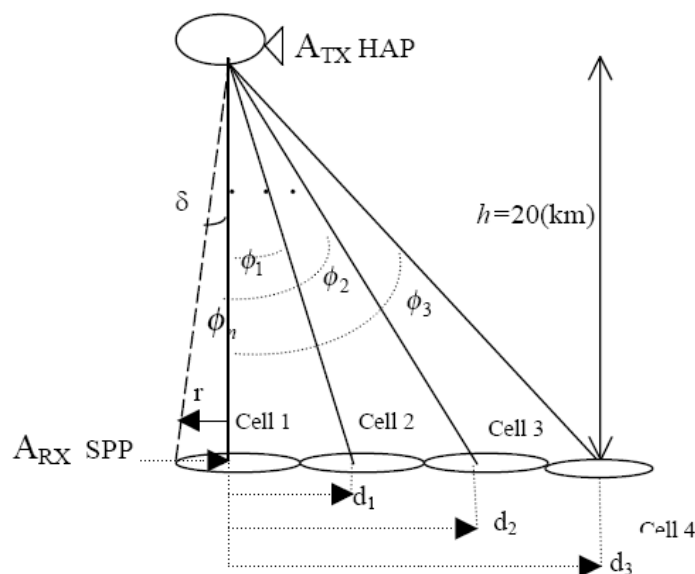
P_{other} είναι η ισχύς της κάθε παρεμβολής από άλλες κεραιές που εκπέμπουν στο ίδιο κανάλι.

Πίνακες δεδομένων της μορφής $\{x, y, CIR\}$ δημιουργούνται για κάθε κανάλι, όπου $\{x, y\}$ είναι οι συντεταγμένες του εδάφους. Ανάλογα με επιλεγμένη

αναλυτικότητα, το μέγεθος αυτών των πινάκων κυμαίνεται στα 10,000 στοιχεία για κάθε δέσμη ακτινοβολίας. Ο αριθμός των κυψελών για κάθε HAP μπορεί να διαφέρει κάθε φορά, με το άνω όριο όμως να κυμαίνεται στην περιοχή των 120 κυψελών. Συγκεκριμένα το πρότυπο που έχει μελετηθεί με τη μεγαλύτερη λεπτομέρεια είναι αυτό της εξαγωνικής κυψελωτής δομής, όπου έχουμε 121 κυψέλες διαμέτρου 6,3 km οι οποίες να καλύπτουν μια περιοχή διαμέτρου 60 km.

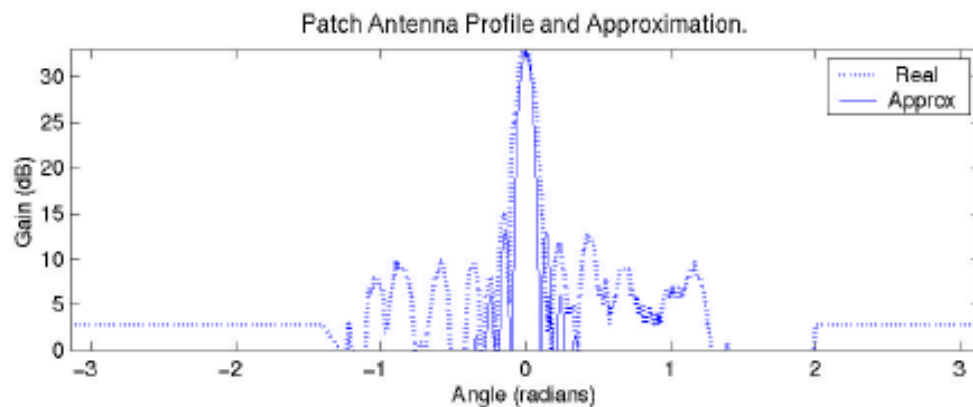
2.4.2. Αναλυτικός Υπολογισμός CIR

Στο επόμενο Σχήμα 2.15, βλέπουμε το HAP με μια σειρά από κεραιές εκπομπής τοποθετημένες με σταθερή μεταξύ τους απόσταση a πάνω στην πλατφόρμα, οι οποίες έχουν μια γωνιακή απόσταση ϕ_n ($= n\alpha$) σε σχέση με το σημείο κάτω από την πλατφόρμα (Sub Platform Point - SPP). Θα υποθέσουμε ότι το προφίλ των κεραιών μας ακολουθεί την συνάρτηση $|\text{sinc}^3 \beta x|$, η οποία και αντιπροσωπεύει αρκετά καλά τη γενική συμπεριφορά των κεραιών που χρησιμοποιούνται στην πραγματικότητα.

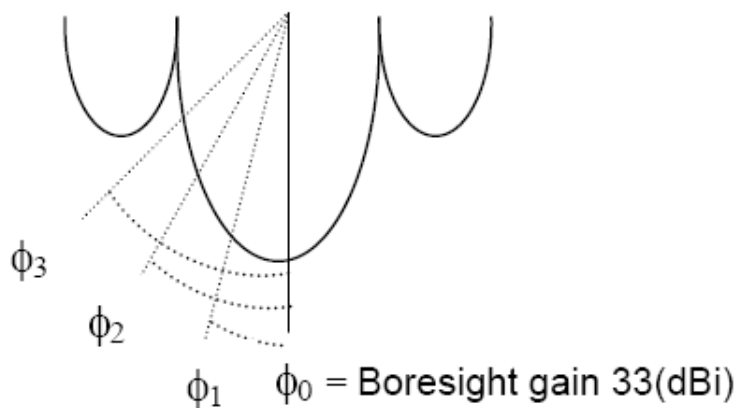


Σχήμα 2.14 - Αποτυπώματα κάλυψης HAP, όπου το d_n είναι η απόσταση από το SPP στο κέντρο κάθε κελιού, δ είναι μια γωνιακή μετατόπιση της Φ_n και r είναι η ακτίνα της κυψέλης.

Στο Σχήμα 2.15 φαίνεται η σχετική καμπύλη εκπομπής καθώς και πώς προσεγγίζει μια πραγματική καμπύλη εκπομπής μιας κεραιάς. Για ένα δέκτη που βρίσκεται στο SPP, οι παρεμβολές που εμφανίζονται οφείλονται στις ομοδιαυλικές κεραιές του HAP και έχουν να κάνουν με τους πλευρικούς λοβούς των κεραιών αλλά δυνητικά και με τον κύριο λοβό. Έχει να κάνει δηλαδή με το κέρδος των παρεμβαλλομένων κεραιών σε γωνία ϕ_n σε σχέση με το SPP, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.16.



Σχήμα 2.15 - Τυπικό προφίλ κεραίας τύπου patch και η προσέγγιση $|\text{sinc}^3 \beta x|$ με $\beta=2.259$ για εύρος $-\pi \leq \phi \leq \pi$.



Σχήμα 2.16 - Τιμές κέρδους κεραίας για διάφορες τιμές του Φ_n , ανταποκρινόμενο σε διάφορες γωνίες, σχετικές με το SPP σημείο.

Έχοντας ορίσει την ϕ_n για τις κεραίες εκπομπής, μπορούμε τώρα να υπολογίσουμε το κέρδος σε αυτές τις γωνίες. Τα κέρδη των κεραιών που παρεμβάλλουν προστίθενται για να μας δώσουν τη συνολική ισχύ παρεμβολής.

2.4.2.i. Διάρθρωση Κυψελοειδούς Συστήματος

Τα Σχήματα 2.14 (άνωψη) και 2.17 (έδαφος) δείχνουν τα κέντρα των κυψελών να απέχουν μεταξύ τους κατά d_n , το οποίο δίνεται από τον τύπο

$$d_n = h \cdot \tan(n \cdot \alpha)$$

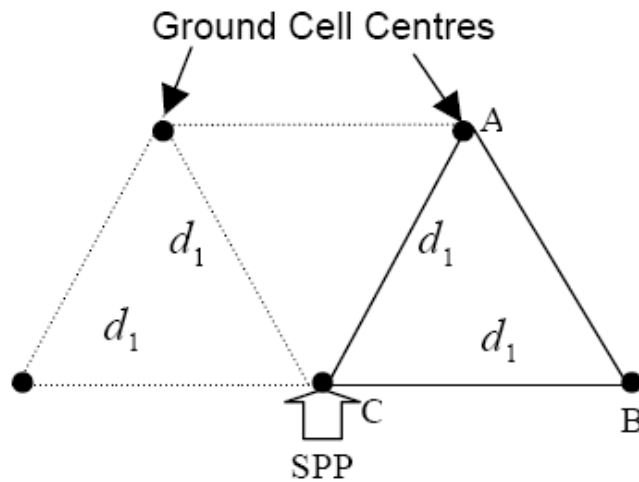
για $n = \{1, 2, \dots\}$ μέχρι τον μέγιστο αριθμό ακτινικών κυψελών.

Υποθέτουμε κυκλικά συμμετρικές δέσμες ακτινοβολίας εστιασμένες στα κέντρα των κυψελών C (SPP) και B (δακτύλιος 2, κυψέλη 1), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.17. Αυτά τα σημεία απέχουν μεταξύ τους d . Έτσι η απόσταση από το κέντρο της επόμενης δέσμης, για μια κυψέλη στον ίδιο δακτύλιο όπως του κέντρου B, ισούται με d_n . Αυτός ο σχηματισμός ισοσκελούς τριγώνου στο έδαφος παράγει το άνυσμα που χρησιμοποιείται στα αποτελέσματα των εξομοιώσεων. Κάνοντας χρήση των τιμών των d_n μπορούμε να προσδιορίσουμε ακριβώς τις χωρικές τιμές των κέντρων των επίγειων κυψελών. Αυτές δίνονται από τις εξισώσεις:

$$y_{i,n} = \sin\left(\frac{360^\circ}{i} \cdot n\right) \cdot d_n$$

$$x_{i,n} = \cos\left(\frac{360^\circ}{i} \cdot n\right) \cdot d_n$$

Όπου $i = \{6, 12, \dots, n + 6\}$, είναι ο αριθμός των κυψελών σε κάθε δακτύλιο, και n είναι ο δείκτης των δακτυλίων.



Σχήμα 2.17 - Σχηματισμός ενός δικτύου κυψελών

2.4.2.ii. Ισχύς Φέροντος

Το CIR στο σημείο SPP είναι προς υπολογισμό. Η λαμβανόμενη ισχύς φέροντος είναι μια συνάρτηση των μεγεθών της ισχύος εκπομπής P_{TX} , των προσδοκούμενων κερδών της κεραίας εκπομπής G_{TX} (είναι σχετική με το σημείο SPP) και της κεραίας

δέκτη G_{RX} , καθώς και τις απώλειες ελευθέρου χώρου-L, (και άλλες σχετικές απώλειες) που είναι γνωστό ότι υπάρχουν στο συγκεκριμένο μονοπάτι διάδοσης. Το σήμα φέροντος για την κυψέλη έχει ένα κέρδος κεραίας μετάδοσης κύριου λοβού ίσο με $G_{TX} = 33 \text{ dBi}$. Η συνολική ισχύς φέροντος PC_{RX} που λαμβάνεται στο σημείο SPP δίνεται από τη σχέση (δεδομένου ότι όλες οι τιμές είναι σε dB) :

$$PC_{RX} = \frac{P_{TX} \cdot G_{RX} \cdot G_{TX}(\phi_o)}{L}$$

2.4.2.iii. Ισχύς Παρεμβολής

Τα σήματα παρεμβολής υποτίθεται ότι λαμβάνονται από την κεραία G_{RX} στο σημείο SPP κατά τη διεύθυνση του κύριου λοβού, καθώς διαδίδονται μέσω του ίδιου μονοπατιού. Το κέρδος της κεραίας εκπομπής G_{TX} υπολογίζεται για γωνίες μετατόπισης Φ_n . Το συνδιάζομενο αποτέλεσμα από παρεμβαλόμενες κεραίες προστίθεται στη συνέχεια για να παραχθεί η ολική ισχύς παρεμβολής στο σημείο SPP. Σε συντεταγμένες δυο διαστάσεων η ισχύς αυτή δίνεται από τον τύπο:

$$PI_{RX_{n-1}} = \frac{P_{TX_{n-1}} \cdot G_{RX} \cdot G_{TX_n}(\phi_{n-1})}{L_{n-1}}$$

για $n = 1, 2, \dots$ έως το μέγιστο αριθμό των κυψελών. Έτσι η ολική ισχύς που λαμβάνεται στο σημείο SPP είναι:

$$PI_{RX} = \sum_{n=2}^N \left(\frac{P_{TX_{n-1}} \cdot G_{RX} \cdot G_{TX}(\phi_{n-1})}{L_{n-1}} \right)$$

για $n = 1, 2, \dots$ έως το μέγιστο αριθμό των κυψελών.

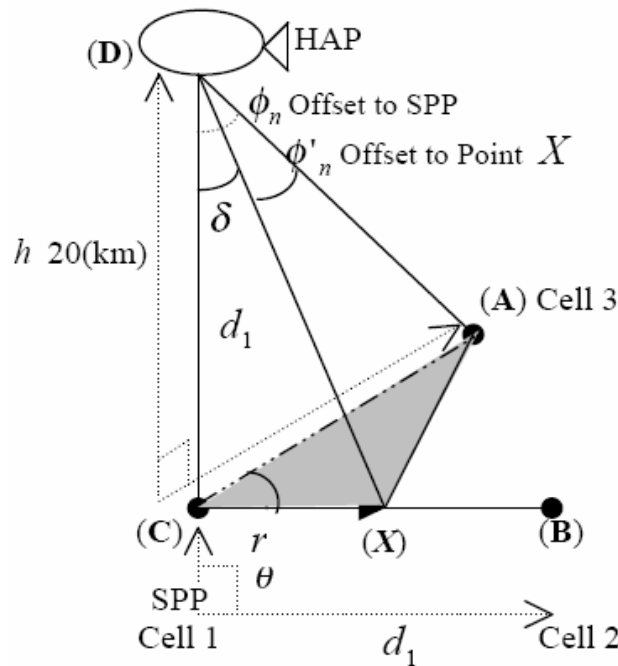
Όλες οι κεραίες εκπομπής βρίσκονται στην ίδια θέση στο HAP και έτσι σε οποιοδήποτε σημείο στο έδαφος προκαλούνται σχεδόν ίδιες απώλειες διάδοσης L. Η εκπεμπόμενη ισχύς P_{TX} σε αυτήν την περίπτωση θεωρείται περίπου ίδια για όλες τις κυψέλες, με όλα τα σήματα να λαμβάνονται στην κατεύθυνση του κυρίου λοβού της κεραίας λήψης $G_{RX}(\Phi_0)$. Αυτοί οι συντελεστές μπορούν να ελαχιστοποιηθούν από τους υπολογισμούς του CIR. Έτσι το φέρον και η ισχύς παρεμβολής στο SPP υπολογίζονται από την εξίσωση:

$$\frac{C}{I} = \frac{PC_{RX}}{PI_{RX}} = \frac{G_{TX}(\phi_o)}{\sum_{n=2}^N G_{TX}(\phi_{n-1})}$$

Υπολογίζουμε τώρα το CIR με τη βοήθεια του Σχήματος 3.3, κατά μήκος της ακτίνας r της κυψέλης 1. Αυτό αντιστοιχεί σε μια μετατόπιση της γωνίας δ , που δίνεται από τον τύπο:

$$\delta = \tan^{-1}\left(\frac{r}{h}\right)$$

Η αρχική γωνία Φ_n της κεραίας εκπομπής του HAP, σχετική με το σημείο SPP, είναι τώρα μετατοπισμένη κατά γωνία δ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.18.



Σχήμα 2.18 - Μια τρισδιάστατη όψη που δείχνει το κέντρο μιας κυψέλης A και ένα αυθαίρετο σημείο X.

Αυτή η μετατόπιση αντιστοιχεί σε μια αλλαγή στο σταθερό τερματικό σημείο X, κατά μήκος της ακτίνας r της κυψέλης. Η νέα αυτή μετατοπισμένη γωνία Φ'_n είναι τώρα σύμφωνη με το σημείο X. Για συντεταγμένες δυο διαστάσεων, αυτό δίνεται από:

$$\phi'_n = \phi_n \pm \delta$$

Όπου $\pm \delta$ εξαρτάται από την ακτινική διεύθυνση από το SPP εως και την κυψέλη που εξετάζουμε.

Έχοντας περιγράψει τιμές του Φ'_n για δυο διαστάσεις, αυτές οι εξισώσεις τροποποιούνται εύκολα σε ένα τρισδιάστατο σύστημα.. Χρησιμοποιώντας τιμές των παραμέτρων Φ'_n , θ και δ και κάνοντας χρήση του κανόνα του συνημιτόνου, μπορούμε να υπολογίσουμε την νέα γωνία Φ'_n που θα ξεκινά από ένα σημείο που θα δείχνει η κεραία στο κέντρο μιας κυψέλης σε ένα αυθαίρετο σημείο X..

Για τιμές του $\delta \neq 0$, το Φ'_n εξαρτάται από την απόσταση r και θ , έτσι είναι πιθανό να έχει διαφορετική τιμή για διάφορες κεραίες εκπομπής. Τα ACX και ADX χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί η γωνία Φ'_n . Για το ACX ο κανόνας του συνημιτόνου χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί το AX, όπου

$$CA = h \cos \delta$$

$$CX = h \tan(\delta)$$

και το θ_n εξαρτάται από την εξεταζόμενη κάθε φορά κυψέλη. Το AX δίνεται από τον τύπο

$$AX = \left((CA)^2 + (CX)^2 \right) - \left(2(CA) \cdot (CX) \cdot \cos(\theta_n) \right)^{0.5}$$

Το $\angle ADX$ τώρα καθορίζεται, για όλες τις κυψέλες, και παράγει τις νέες γωνίες μετατόπισης που είναι σχετικές με το σημείο X. Αυτό δίνεται από τον τύπο:

$$\phi'_n = \cos^{-1} \left(\frac{(DX)^2 + (DA)^2 - (AX)^2}{2 \cdot (DX) \cdot (DA)} \right)$$

Όπου το DX και DA δίνονται από τους τύπους παρακάτω:

$$DX = \left(\frac{h}{\cos(\delta)} \right) = h \cdot \sec(\delta)$$

$$DA = \left(\frac{h}{\cos(\phi_n)} \right) = h \cdot \sec(\phi_n)$$

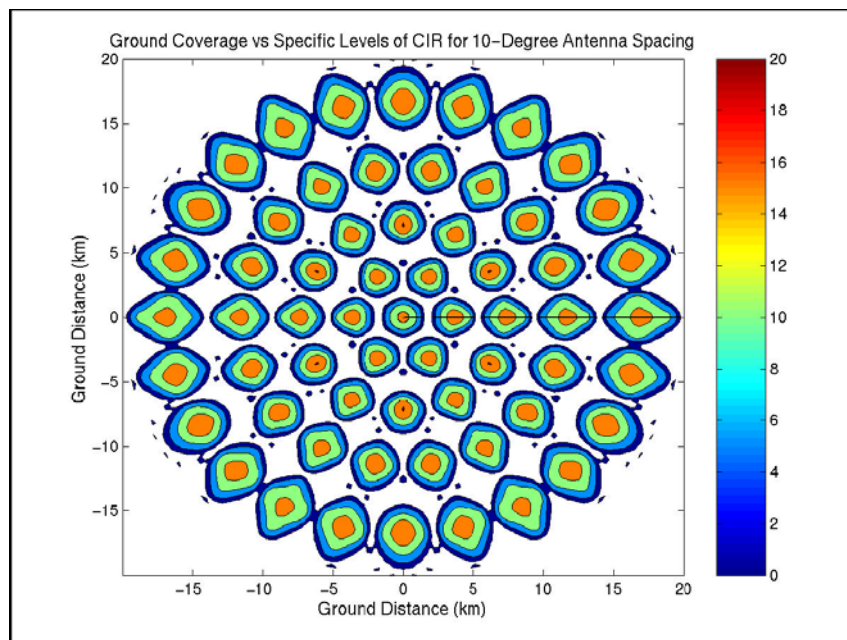
Αντικαθιστώντας τις τιμές των DX, DA και AX στην εξίσωση του AX και απλοποιώντας την έκφραση, το Φ'_n δίνεται από :

$$\phi'_n = \cos^{-1} \left(\cos(\delta) \cdot \cos(\phi_n) + \sin(\delta) \cdot \sin(\phi_n) \cdot \cos(\theta_n) \right)$$

Αντικαθιστώντας το Φ'_n στην παρακάτω εξίσωση έχουμε το νέο CIR, σε ένα αυθαίρετο σημείο X οπουδήποτε στο πεδίο.

$$\frac{C}{I} = \frac{PC_{RX}}{PI_{RX}} = \frac{G_{TX}(\varphi_n)}{\sum_{n=2}^N G_{TX}(\varphi'_{n-1})}$$

Στο Σχήμα 2.19, φαίνεται ότι η κάλυψη επί του εδάφους φαίνεται να εξαρτάται πολύ από το απαιτούμενο επίπεδο του CIR. Στο παράδειγμα αυτό φαίνεται ότι στο κέντρο κάθε δέσμης υπάρχει ψηλότερο CIR απ' ότι στην περιφέρεια της δέσμης. Αυτό οφείλεται στο ότι η απομάκρυνση μακριά από το κέντρο της κυψέλης, ουσιαστικά εισάγει μια γωνιακή μετατόπιση από το φέρον της κεραίας, και έτσι μειώνεται το κέρδος του σήματος σε συνάρτηση με την παρεμβολή.



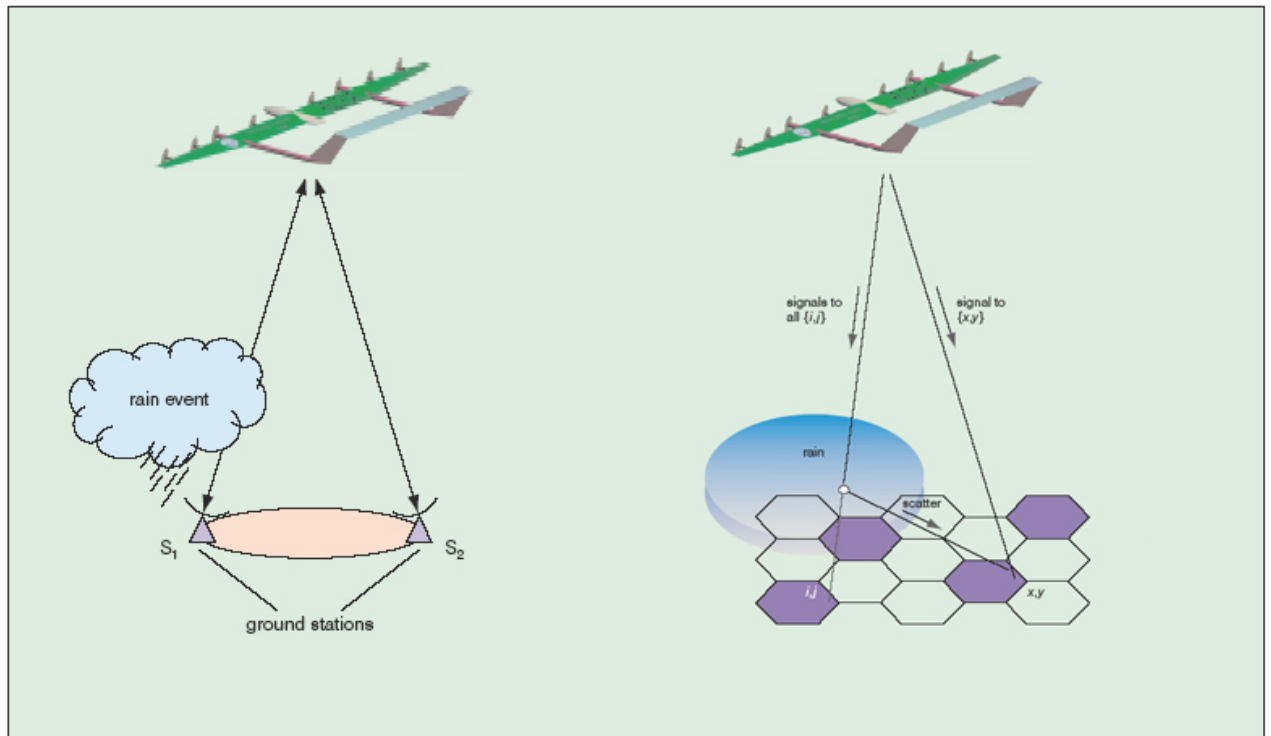
Σχήμα 2.19 - Η απόδοση κεραίας $|\text{sinc}^3bx|$. Συνολική κάλυψη εδάφους για ομοδιαυλικές κεραίες με γωνία διαχωρισμού κύριου λοβού 10° . Οι λευκές περιοχές υποδεικνύουν CIR χαμηλότερο των 0dB.

2.4.3. Διαφορική λήψη περιοχής (site diversity)

Γνωρίζουμε ότι για συχνότητες πάνω από τα 20 GHz η απορρόφηση και η σκέδαση των σημάτων από στοιχεία της ατμόσφαιρας, όπως το οξυγόνο, οι υδρατμοί, τα σύννεφα και η βροχή παίζουν ένα πολύ σημαντικό ρόλο στη διάδοση. Η βροχή συγκεκριμένα προκαλεί πολύ σημαντική εξασθένηση του σήματος.

Επειδή όμως η χωρική έκταση των βροχοπυρήνων περιορίζεται συνήθως σε λίγα χιλιόμετρα, εάν προκύψει έντονη βροχόπτωση σε ένα σημείο S1 είναι μάλλον απίθανο να είναι το ίδιο έντονη η βροχή σε ένα δεύτερο σημείο, S2, λίγα χιλιόμετρα μακριά. Όταν λοιπόν η έντονη βροχόπτωση αποτρέπει την απευθείας ζεύξη του HAP με το S1, έχουμε τη δυνατότητα να ανακατευθύνουμε τα σήματα των HAP από το S1 στο S2. Η ζεύξη στο S1 επιτυγχάνεται μέσω επίγειας σύνδεσης μεταξύ S1 και S2. Στο

σχήμα που ακολουθεί απεικονίζονται οι προβλεπόμενες βελτιώσεις στο περιθώριο σκίασης στα 48 GHz και στα 28 GHz για ποσοστό διαθεσιμότητας ζεύξης 99.9%. Για τοποθεσίες που απέχουν 20 km βλέπουμε ότι το απαιτούμενο περιθώριο απωλειών μειώνεται κατά περίπου 5.5 dB και κατά 2.1 dB στα 48 GHz και στα 28 GHz αντίστοιχα.

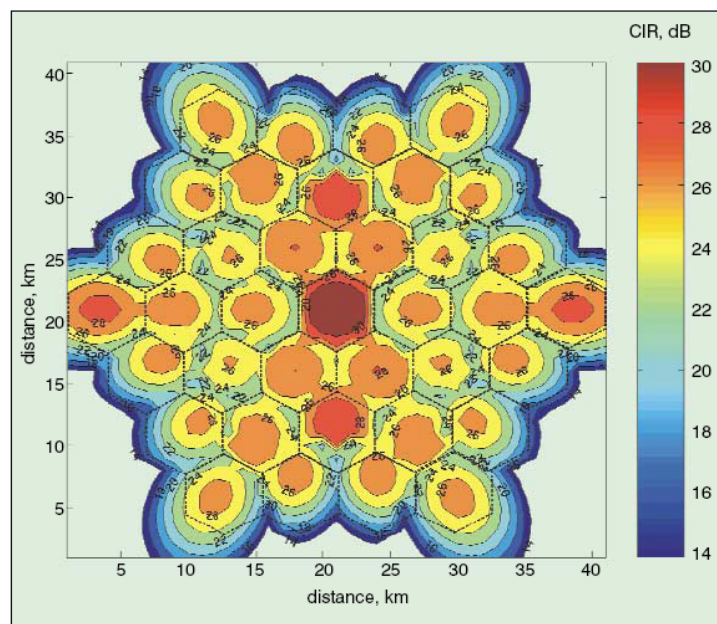


Σχήμα 2.20 - α) Απαιτούμενο όριο απόσβεσης για 99.9% διαθεσιμότητα χρησιμοποιώντας διαφορική λήψη και β) Γεωμετρία διστατικής σκέδασης λόγω βροχής.

Εκτός από το να απορροφούν ακτινοβολία, οι σταγόνες βροχής, οι κρύσταλλοι πάγου και τα σταγονίδια νερού στα σύννεφα μπορούν επίσης να υποβαθμίσουν την απόδοση της ζεύξης με το να προκαλούν σκέδαση της ακτινοβολίας από την κυψέλη προορισμού σε άλλη κυψέλη που δουλεύει στην ίδια συχνότητα. Η γεωμετρία του προβλήματος φαίνεται στο Σχήμα 2.20.α. Η ισχύς της παρεμβολής υπολογίζεται από τον τύπο του διστατικού ραντάρ στις διαδρομές από τον πομπό της ανεπιθύμητης ακτινοβολίας, μέσω κάθε σκεδαστή, στο δέκτη. Επειδή οι φάσεις των σκεδασμένων κυμάτων που φτάνουν στο δέκτη κατανομούνται τυχαία, η ισχύς της παρεμβολής που λαμβάνεται είναι το άθροισμα των ισχύων που φθάνουν στο δέκτη από κάθε σταγόνα ή κρύσταλλο. Έτσι, με μια μέθοδο παρόμοια με αυτή που είδαμε για τις παρεμβολές σε συνθήκες καθαρής ατμόσφαιρας, η περιοχή κάλυψης διαιρείται σε ένα πίνακα σημείων με συντεταγμένες $\{x, y\}$. Σε κάθε σημείο ενδιαφέροντος $\{x, y\}$, η συνολική ισχύς παρεμβολής λόγω βροχής υπολογίζεται από το άθροισμα των ισχύων που διασκορπίζονται από όλα τα άλλα σημεία $\{i, j\}$ προς το σημείο ενδιαφέροντος. Η άθροιση περιλαμβάνει όλες τις ομοδιαυλικές δέσμες εκτός από τη δέσμη που ακτινοβολεί στο σημείο ενδιαφέροντος, και η οποία καθορίζει την ισχύ του σήματος. Μπορούμε πλέον να σχεδιάσουμε ένα χάρτη του CIR, με το να υπολογίζουμε σε κάθε

σημείο το λόγο της ισχύος που λαμβάνεται κατευθείαν από το σήμα προς τη συνολική ισχύ της παρεμβολής από σκέδαση.

Το Σχήμα 2.21 δείχνει το CIR πάνω από 3 κεντρικούς ομόκεντρους δακτυλίους του δικτύου όταν έχουμε βροχή ανατολικά και δυτικά του κέντρου. Το μέτωπο της βροχής έχει ονομαστικό πλάτος 5 km μέσα στο οποίο η βροχή έχει ένταση 12 mm/hr και έξω από αυτό η ένταση της βροχής μειώνεται εκθετικά. Ο αριθμός επαναχρησιμοποίησης συχνότητας στην περίπτωση μας είναι 4. Βλέπουμε ότι γενικά σε σχέση με την περίπτωση καθαρής ατμόσφαιρας, το CIR εδώ μειώνεται πολύ στα άκρα των κυψελών, που είναι αναμενόμενο λόγω της απόσβεσης του σήματος από τη βροχή.



Σχήμα 2.21 - CIR οφειλόμενο σε βροχή για μια περιοχή κάλυψης ακτίνας 20 χμ.

Ωστόσο τα μέγιστα του CIR δεν συμπίπτουν απαραίτητα με τα κέντρα των κυψελών γιατί στις περισσότερες των περιπτώσεων η βροχή δεν κατανέμεται συμμετρικά πάνω από μια κυψέλη. Ήδη έχουν προταθεί στρατηγικές για την αντιμετώπιση των παρεμβολών λόγω βροχής. Παρότι μια αύξηση της ισχύος εκπομπής βοηθάει στην αντιμετώπιση της απόσβεσης λόγω βροχής, δεν ωφελεί ωστόσο στη μείωση των παρεμβολών. Αντίθετα μια αύξηση στον αριθμό των καναλιών που επαναχρησιμοποιούνται μειώνει σημαντικά τις παρεμβολές, με τον να μειώνεται ο αριθμός των γειτονικών ομοδιαυλικών κυψελών. Η προσαρμογή του αριθμού επαναχρησιμοποίησης μπορεί να συμβαίνει δυναμικά μόνο στην περιοχή που επηρεάζεται από βροχή.

Τέλος, στον Πίνακα 6, έχουμε κάποιες χρήσιμες τιμές τυπικών παραμέτρων (Link Budget) για ένα HAP σύστημα για την κατερχόμενη και την ανερχόμενη ζεύξη καθώς και για αστική και προαστική περιοχή.

Πίνακας 6 - Τυπικές παράμετροι για ένα HAP σύστημα

Παράμετροι	Αστική Περιοχή	Προαστιακή Περιοχή
------------	----------------	--------------------

Κατερχόμενη Ζεύξη		
Συχνότητα (GHz)	47.2 - 47.5	47.2 - 47.5
Ισχύς Εκπομπής (dBW)	0	9.7
Κέρδος Κεραίας (dBi)	35	38
Εμβέλεια Διάδοσης (Km)	41.8	79.4
Απώλειες Ελευθέρων Διάδοσης (dB)	158.3	163.9
Απώλειες Ατμόσφαιρας (dB)	2.3	5.2
Εξασθένιση Λόγω Βροχής (dB)	11.2	14.8
Ανερχόμενη Ζεύξη		
Συχνότητα (GHz)	47.8 - 48.2	47.8 - 48.2
Ισχύς Εκπομπής (dBW)	1.7	13.4
Κέρδος Κεραίας (dBi)	46	46
Απώλειες Ελευθέρων Διάδοσης (dB)	158.4	164
Απώλειες Ατμόσφαιρας (dB)	2.8	5.8
Εξασθένιση Λόγω Βροχής (dB)	11.2	14.9
G/T Δέκτης (dB/K)	16.5	16.5

2.5. Βιβλιογραφία 2^{ου} κεφαλαίου

1. «*Mobile link Propagation Aspects, Channel Model and Impairment Mitigation Techniques*», 2005 Deliverable 14, CAPANINA
2. «*Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων σε Γήινο Περιβάλλον*», 2003 Ι.Δ Κανελλόπουλος, Καθηγητής ΕΜΠ, Εκδόσεις Τζιόλα.
3. «*Δορυφορικές Επικοινωνίες*», 2006 Π.Γ Κωπτής Χ.Ν. Καψάλης, Καθηγητές ΕΜΠ, Εκδόσεις Τζιόλα
4. «*Channel model based on semi-Markovian processes. An approach for HAPS systems*» 2004 Jose Luis Cuevas-Ruvz y Jose A. Delgado-Penyn, Universitat Politecnica de Catalunya
5. «*Prediction of Frequency Reuse Behaviour for High Altitude Platforms*» 2000, N. E. Daly, D. Grace, T. C. Tozer, D. A. J. Pearce, A. G. Burr, University of York

6. «*Broadband communications from a high-altitude platform: the European HeliNet programme*» 2001, J. Thornton, D. Grace, C. Spillard, T. Konefal and T. C. Tozer
7. «*High-altitude platforms for wireless communications*» 2001, T. C. Tozer and D. Grace

3. Αρχιτεκτονική Δικτύου

3.1. Υποψήφιες Υπηρεσίες HAP από την Άποψη της Αρχιτεκτονικής Δικτύου.

Η στροφή τα τελευταία χρόνια προς δίκτυα ευρείας ζώνης βασισμένα σε IP έχει ανοίξει το δρόμο για νέες υπηρεσίες, που επωφελούνται από το αυξημένο εύρος ζώνης. Η παροχή ροής video υψηλής ποιότητας, η εικονοδιάσκεψη και τα διαδραστικά παιχνίδια είναι μερικές από τις περιπτώσεις όπου η αφαίρεση των περιορισμών σε εύρος ζώνης, βελτιώνει σημαντικά την εμπειρία του χρήστη.

Επιπλέον, η ευρυζωνική πρόσβαση διευκολύνει την ταυτόχρονη παροχή πολλαπλών υπηρεσιών μέσα από την ίδια σύνδεση.

Αυτή η διευκόλυνση όμως δημιουργεί παράλληλα και νέες προκλήσεις για τα δίκτυα που θα υποστηρίξουν τις νέες αυτές υπηρεσίες. Ο επιχειρηματικός ρόλος των Παρόχων Υπηρεσιών Διαδικτύου (ISPs) αλλάζει, και από απλοί σύνδεσμοι με το δίκτυο θα πρέπει να γίνουν ταυτόχρονα και πάροχοι περιεχομένου (VoD, τηλεόραση, ράδιο κτλ). Επιπλέον καλούνται να παρέχουν αυξημένη λειτουργικότητα στους τοπικούς τους κόμβους πρόσβασης (αποθήκευση, μεταγωγή, δρομολόγηση), ενώ κλειδί για την επιτυχία των νέων δικτύων είναι η υλοποίηση ποιότητας υπηρεσιών (QoS).

Η τεχνολογία πρόσβασης μέσω HAP θα πρέπει να ανταγωνιστεί ή και να συμπληρώσει άλλες αρχιτεκτονικές πρόσβασης, στην προσπάθεια να κατασκευαστεί το «καλύτερο ενοποιημένο δίκτυο IP». Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των HAP είναι εγγενής τους δυνατότητα να παρέχουν υπηρεσίες ευρυεκπομπής και πολυεκπομπής (broadcast/multicast). Ειδικά η υποστήριξη multicast θα παίζει σημαντικό ρόλο, αφού οι περισσότεροι πάροχοι γραμμών DSL δεν επιτρέπουν προς το παρόν κίνηση IP multicast στο δίκτυο κορμού και πρόσβασης. Η υποστήριξη τέτοιας κίνησης από τους πολυπλέκτες DSLAMs απαιτεί μεγάλο κόστος και θα περάσει αρκετός χρόνος μέχρι να δούμε τέτοιες υπηρεσίες από τους παρόχους DSL. Όσον αφορά τις broadcast δυνατότητες των HAP, ο κύριος ρόλος τους θα είναι η εκπομπή περιεχομένου HDTV.

Στον παρακάτω Πίνακα 7 συνοψίζουμε τις προτεινόμενες εφαρμογές που έχουν αναγνωριστεί ως οι πιο κατάλληλες να εξυπηρετούνται από δίκτυα βασισμένα σε HAPs.

Πίνακας 7 - Προτεινόμενες εφαρμογές που πιθανώς θα εξυπηρετούνται από HAPs.

	Οικιακή/ SOHO Ευρυζωνική Πρόσβαση	Ευρυζωνική Σύνδεση Έκτακτων γεγονότων ή Καταστροφών	WiFi σε τρένα και λεωφορεία	Οπισθοζευ- κτική (Backhauling) Υποστήριξη WiFi	Διανομή Περιεχομέ- -νου (Content Distributio n)	Εκπομπή TV και άλλων Μέσων
--	--	--	--	---	--	---

Σχετική Αγορά	<p>Παροχή ευρυζωνικής πρόσβασης στο Internet σε οικίες και μικρά γραφεία (Small Office/Home Office – SOHO)</p>	<p>Παροχή ευρυζωνικής πρόσβασης στο Internet σε έκτακτα γεγονότα (π.χ. συναυλίες, εκδηλώσεις ανοιχτού χώρου) και σε περιοχές πληγείσες από καταστροφές (π.χ. πλημμύρες, σεισμοί, τροχαία δυστυχήματα, φωτιές κτλ.)</p>	<p>Παροχή ευρυζωνικής πρόσβασης στο Internet σε επιβάτες που βρίσκονται μέσα σε τρένα, λεωφορεία κτλ.</p>	<p>Παροχή ζεύξης προς τα πίσω σε WiFi hotspots (π.χ. αεροδρόμια, καφετέριες κτλ.)</p>	<p>Παροχή υπηρεσιών διανομής περιεχομένου βασισμένη σε IP-Multicast στην οικιακή/SO HO αγορά.</p>	<p>Εκπομπή HDTV, Εκπομπή ψηφιακού ραδιοφώνου (DAB), οπτικο-ακουστική κάλυψη γεγονότων (π.χ. αγώνες pay-per-view, συναυλίες κτλ.)</p>
----------------------	--	--	---	---	---	--

3.2. Πιθανά Σενάρια Δικτύων

3.2.1. Τοπολογίες Δικτύων

Ανάλογα με το κομμάτι της αγοράς το οποίο σκοπεύουμε να εξυπηρετήσουμε καθορίζονται και οι διαφορετικές τοπολογίες που θα καλύπτουν τις απαιτήσεις της αρχιτεκτονικής του δικτύου. Μερικές από τις προβλεπόμενες τοπολογίες δικτύων με HAP φαίνονται στο Σχήμα 3.1 και περιλαμβάνουν τις παρακάτω:

- **Δίκτυα Πρόσβασης (Access Network)**

Τα HAPs συνδέουν τους τελικούς χρήστες με το κεντρικό δίκτυο (Core Network). Αυτή είναι η τυπική ρύθμιση δικτύου για ευρυζωνική πρόσβαση στο Internet και σε δίκτυα Intranet. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για υπηρεσίες multicast/broadcast στα τερματικά χρηστών.

- **Διανομή Περιεχομένου(Content Distribution)**

Τα HAPs συνδέονται με παρόχους περιεχομένου μέσω του core network. Το περιεχόμενο (π.χ. τηλεοπτικές εκπομπές, ράδιο, VoD, υπηρεσίες περιεχομένου multicast IP) διανέμεται μέσω των HAPs στα τελικά τερματικά των χρηστών. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, αυτή η τοπολογία μπορεί να θεωρηθεί σαν Δίκτυο Πρόσβασης, με τη διαφορά ότι είναι απαραίτητη μία ζεύξη πολύ υψηλής ταχύτητας από τον παροχέα περιεχομένου στο HAP.

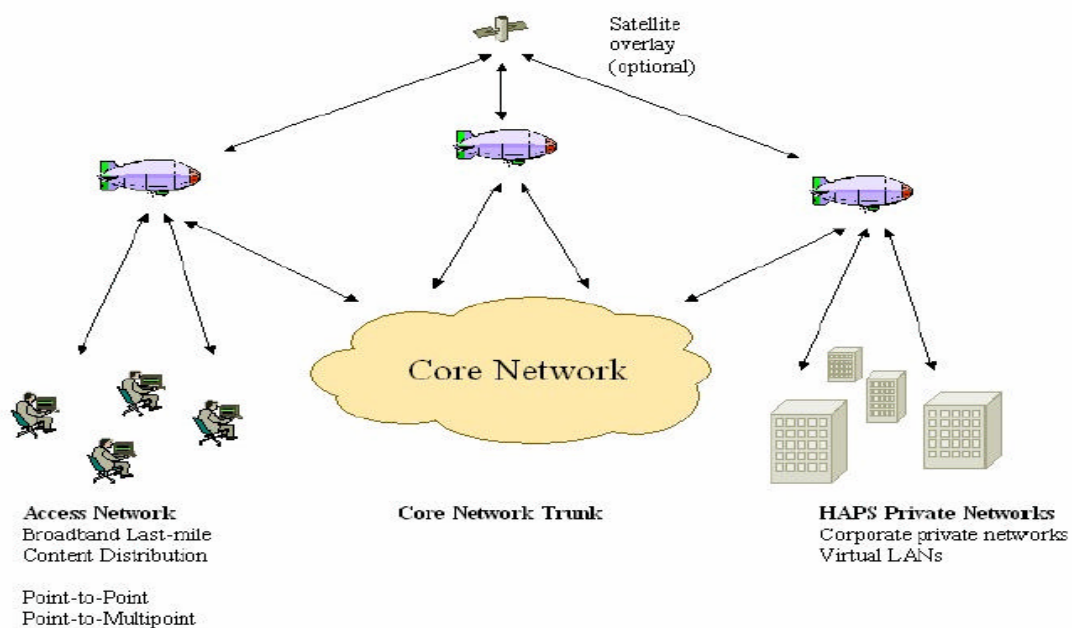
- **Κύκλωμα Δικτύου Πορήνα (Network Trunk)**

Εδώ τα HAPs συνδέουν δύο σημεία μέσα στο Core Network και εξυπηρετούν κομιστές και όχι τελικούς χρήστες (Bearer Services). Ιδιωτικά

κυκλώματα σημείου προς σημείο (bearer links) θα μπορούσαν να αποτελούν μέρος του δικτύου πυρήνα, αλλά και μέρος ενός δικτύου που θα επικαλύπτει το δίκτυο πυρήνα, ώστε να εξασφαλίζουμε πιο ανθεκτικό δίκτυο. Οι συνδέσεις μεταξύ HAP είναι κομμάτι αυτής της τοπολογίας.

- **Ιδιωτικό Δίκτυο HAP**

Το HAP συνδέει 2 ή περισσότερους χρήστες από ένα εικονικό ιδιωτικό δίκτυο (Virtual Private Network), με ή χωρίς απ' ευθείας σύνδεση με το δίκτυο πυρήνα. Κλασική τέτοια χρήση είναι ο συνδυασμός με τερματικά VSAT για παροχή ιδιωτικών δικτύων για π.χ. πιστοποίηση πιστωτικών καρτών στα σημεία πώλησης, διαχείριση μετοχών, οικονομικές και ασφαλιστικές υπηρεσίες.



Σχήμα 3.1 - Συνδεσιμότητα μεταξύ HAPs

3.2.2. Περιπτώσεις Απλού και Πολλαπλών HAPs

Η αρχιτεκτονική δικτύου των HAPs περιγράφεται καλύτερα ως μία αρχιτεκτονική ασύρματης πρόσβασης ευρείας ζώνης (broadband wireless access - BWA) ή σημείο-πολυσημειακής σύνδεσης ευρείας ζώνης (point-to-multipoint - PMP). Δηλαδή έχουμε να κάνουμε με μία ασύρματη τεχνολογία που προσφέρει πρόσβαση ευρείας ζώνης σε πολλούς πελάτες από ένα μόνο ή από πολλαπλά HAPs (σταθμός βάσης στον αέρα). Άλλη μία σχετική ονομασία είναι το τοπικό πολυσημειακό σύστημα διανομής (local multipoint distribution system) LMDS. Παρότι αυτή η ονομασία αναφέρεται σε συγκεκριμένη υπηρεσία με καθορισμένη ζώνη συχνοτήτων στις ΗΠΑ, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και γενικότερα.

Ένα κύριο πλεονέκτημα της πρόσβασης μέσω HAP είναι ότι από τη στιγμή που η στρατοσφαιρική πλατφόρμα είναι στη θέση της, η απαιτούμενη υποδομή που απομένει να υλοποιηθεί, είναι μόνο οι τερματικές μονάδες των πελατών. Αυτό επιτρέπει την παροχή των υπηρεσιών σε μελλοντικούς χρήστες και περιοχές να είναι πολύ απλή υπόθεση. Έτσι τα HAPs μπορούν επιπλέον να χρησιμοποιηθούν για να επεκτείνουν την κάλυψη των επίγειων δικτύων ευρείας ζώνης, όπως δίκτυα οπτικών ινών και ADSL, χωρίς την ανάγκη να εγκατασταθούν υποδομές, όπως σωλήνες καλωδίων ή αδειοδοτήσεις σε γη (εκτός ίσως από τις στέγες κτιρίων όπου θα τοποθετηθεί εξοπλισμός των σταθμών βάσης).

3.2.2.i. Σενάριο Μονής HAP πλατφόρμας

Στο σενάριο του ενός και μόνο HAP, μας παρέχεται η προοπτική δημιουργίας ad-hoc δικτύων για ειδικές περιστάσεις (π.χ. Ολυμπιακοί Αγώνες), ανάληψη από καταστροφές ή άμεση παροχή ευρυζωνικής πρόσβασης σε μεγαλουπόλεις, σε σημεία που η πυκνότητα του πληθυσμού σε μικρή έκταση απαιτεί κάτι τέτοιο.

Οι πελάτες συνδέονται στην «κυψέλη» του HAP (το ίχνος της κεραίας του), η οποία όπως έχουμε δει θα έχει μία τυπική ακτίνα της τάξης των 40 km από τον κεντρικό σταθμό βάσης. Το HAP συνδέονται με το υπόλοιπο δίκτυο χρησιμοποιώντας οπτική ίνα (περίπτωση «δεμένου» αερόστατο) ή με ζεύξη σημείου προς σημείο (αερόπλοια). Ο σταθμός βάσης δρα σαν network hub και παρέχει τις υπηρεσίες στους πελάτες που βρίσκονται σε απ' ευθείας οπτική επαφή με την κεραία του HAP και μέσα στην ακτίνα της κυψέλλης.

Όπως έχουμε δει μπορούμε να χωρίσουμε την περιοχή που καλύπτει το HAP σε μικρότερες υποκυψέλες που αυξάνουν τη συνολική χωρητικότητα που μπορεί να μας προσφέρει η πλατφόρμα. Παράλληλα έχουμε ευελιξία στον τρόπο με τον οποίο κατανέμεται η χωρητικότητα αλλά και το εύρος ζώνης του δικτύου, ενώ μπορούμε να παρέχουμε επιλογές ποιότητας υπηρεσίας. Σε αυτήν την PMP τοπολογία ο σταθμός βάσης στέλνει πληροφορίες προς όλους τους τελικούς χρήστες μέσα στην υποκυψέλη μέσω μίας κοινής ραδιοζεύξης και ο τοπικός εξοπλισμός των πελατών επιλέγει την πληροφορία που απευθύνεται στον καθένα ξεχωριστά.

Το δίκτυο πυρήνα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συνδέει τους επίγειους σταθμούς των HAPs είναι στην πραγματικότητα το ίδιο με αυτό που συνδέει τα DSLAMs στην τεχνολογία ADSL και επομένως οι δύο αυτές τεχνολογίες μπορούν να λειτουργήσουν με συμπληρωματικό τρόπο.

3.2.2.ii. Σενάριο Πολλαπλών HAP πλατφορμών

Η κύρια επιδίωξη της αύξησης του αριθμού των πλατφορμών είναι η παροχή εθνικής ή περιφερειακής ευρυζωνικής κάλυψης, όπου οι διασυνδέσεις μεταξύ των HAPs σχηματίζουν κομμάτι του δικτύου επικάλυψης, με ένα ή περισσότερους σταθμούς-πύλες να παρέχουν την προς τα πίσω σύνδεση με το επίγειο δίκτυο κορμού. Ακόμη, πολλαπλά HAPs μπορούν να αναπτυχθούν στην ατμόσφαιρα για να εξυπηρετήσουν την ίδια περιοχή κάλυψης, έτσι ώστε να αυξήσουμε την χωρητικότητα ανά μονάδα επιφανείας (δηλαδή την απόδοση του εύρους ζώνης).

Άλλοι λόγοι χρήσης της συγκεκριμένης διαμόρφωσης είναι το να παρέχουμε ανθεκτικότητα (εφεδρικά συστήματα) και χωρική διαφοροποίηση στις κεραίες λήψης

των χρηστών, ώστε να έχουμε βελτιωμένη διαθεσιμότητα υπηρεσιών (καλύτερη απ' ευθείας οπτική κάλυψη).

Συνήθως η περιοχή κάλυψης χωρίζεται περαιτέρω σε μικρότερες υποκυψέλες ώστε να έχουμε αύξηση της χωρητικότητας. Αυτή η τεχνική υιοθετείται και στην περίπτωση των πολλαπλών HAPs. Τα πολλαπλά HAPs αυξάνουν την χωρητικότητα με το να εκμεταλλεύονται την κατευθυντικότητα της σταθερής κεραίας του χρήστη, η οποία είναι συνήθως μορφής πιάτου με σχετικά στενό εύρος δέσμης. Αυτό το στενό εύρος δέσμης είναι απαραίτητο ώστε το κέρδος (gain) της κεραίας να επαρκεί για να υποστηρίξει τις απώλειες της ζεύξης, αλλά και για να μειώσουμε τα επίπεδα παρεμβολών από άλλα HAPs που βρίσκονται σε μεγαλύτερη γωνία από τη τον άξονα σκόπευσης της κεραίας του χρήστη.

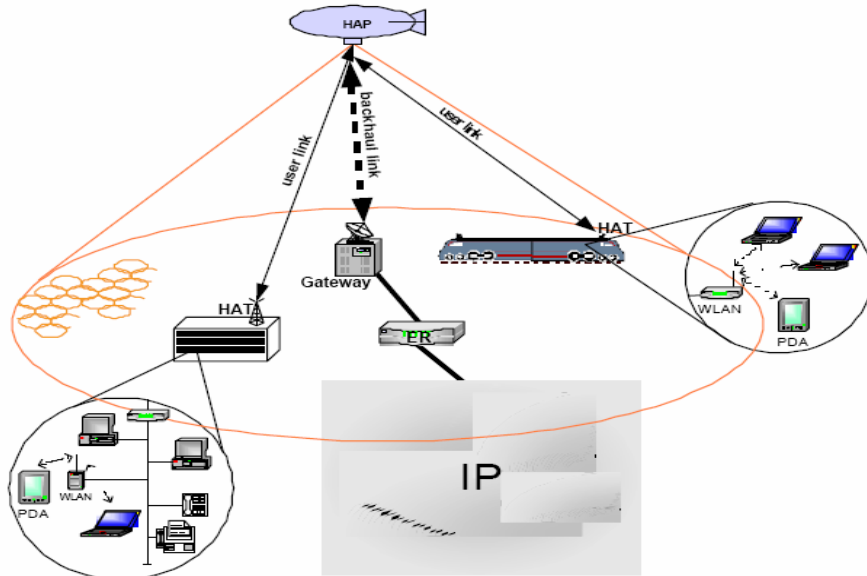
3.2.3. Προτεινόμενα Μοντέλα Αναφοράς της Αρχιτεκτονικής Δικτύου

Ένα δίκτυο HAP μπορεί να χρησιμοποιεί είτε αναγεννητική (regenerative) είτε μη-αναγεννητική (non-regenerative) αρχιτεκτονική:

- Η non-regenerative αρχιτεκτονική, που αναφέρεται συχνά και «bentpipe architecture», δεν τερματίζει κάποιο από τα στρώματα της εναέρια διεπαφής στο HAP. Το HAP απλά μεταφέρει τα σήματα από τις ζεύξεις των χρηστών στις ζεύξεις των παρόχων διαφανώς. Αυτή η υλοποίηση είναι η πιο απλή, αλλά μειώνεται η λειτουργικότητα του συστήματος.
- Η regenerative αρχιτεκτονική είναι η σειρά αρχιτεκτονικών που παρέχουν επιπλέον λειτουργικότητα στα HAPs. Σε αυτές τις αρχιτεκτονικές, μία ή περισσότερες λειτουργίες των στρωμάτων της εναέρια διεπαφής τερματίζονται στο σταθμό του HAP. Έτσι, για παράδειγμα, το HAP μπορεί να χρησιμοποιηθεί για δρομολόγηση (τερματισμός στρώματος δικτύου), μεταγωγή πακέτων για πολλαπλά HAP, αναμετάδοση σήματος, αποθήκευση περιεχομένου κτλ.

3.2.3.i. Μοντέλο Αναφοράς για Αρχιτεκτονική Μονού HAP

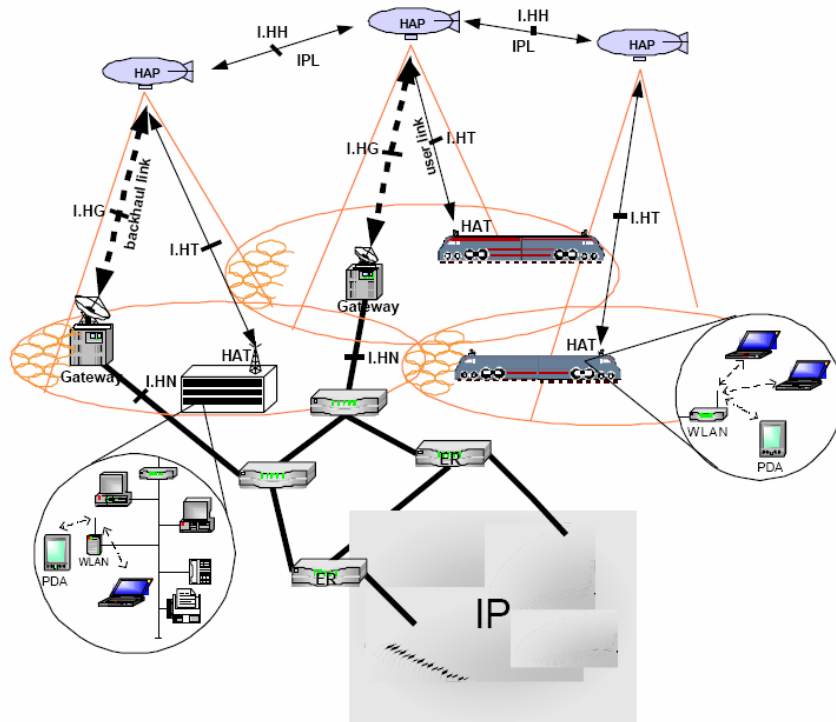
Μία τυπική αρχιτεκτονική δικτύου για παροχή υπηρεσιών βασισμένων σε IP προς σταθερούς χρήστες και τρένα υψηλής ταχύτητας φαίνεται στο σχήμα 2. Αποτελείται από μία μοναδική πλατφόρμα, η οποία έχει backhaul σύνδεση με τον σταθμό πύλη (gateway - GW) που είναι συνδεδεμένος στο Internet. Οι χρήστες συνδέονται μέσω σταθερών ή ασύρματων LANs με το τερματικό σημείο πρόσβασης του HAP (HAP Access Termination - HAT). Η κύρια λειτουργία του HAT είναι η διασυνεργασία μεταξύ του τερματικών των χρηστών, μέσω μίας κοινής διεπαφής (π.χ. μετατροπέας Ethernet), και από την άλλη μεριά προς το HAP, μέσω μιας ασύρματης διεπαφής.



Σχήμα 3.2 - Γενική άποψη αρχιτεκτονικής δικτύου

3.2.3.ii. Μοντέλο Αναφοράς για Αρχιτεκτονική Πολλαπλών HAPs

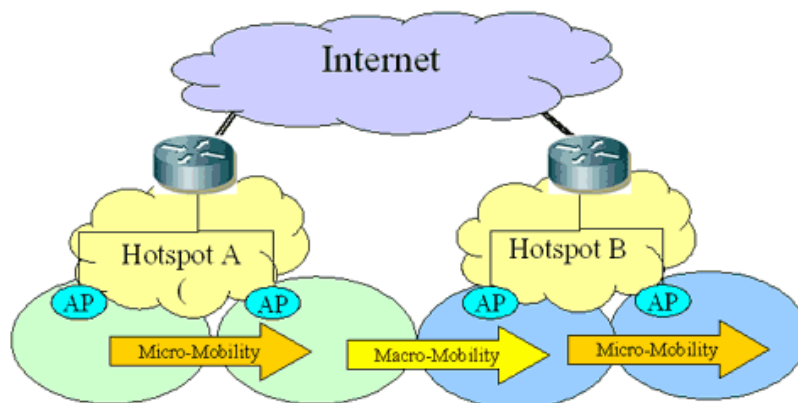
Στην περίπτωση δικτύου με πολλαπλά HAPs υπάρχει ζεύξη μεταξύ των πλατφορμών (Inter-Platform Link – IPL) με την αντίστοιχη διεπαφή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Το IPL μπορεί να είναι RF ή οπτική σύνδεση. Στην περίπτωση των πολλαπλών HAPs, μόνο η regenerative αρχιτεκτονική μπορεί να εφαρμοστεί, αφού χρειαζόμαστε τις κάποιες λειτουργίες (π.χ. της δρομολόγησης) να γίνονται στο HAP, ώστε να εκμεταλλευόμαστε τις δυνατότητες ενός δικτύου με πολλαπλές πλατφόρμες. Επίσης δεν χρειάζεται να έχουμε σύνδεση με τον GW σταθμό από όλα τα HAPs, καθώς μπορεί να έχει ένα HAP πρόσβαση στο επίγειο δίκτυο μέσω γειτονικών HAPs.



Σχήμα 3.3 - Προτεινόμενη αρχιτεκτονική δικτύου πολλαπλών HAP

3.3. Κινητικότητα και HAPs

Η βασική πρόκληση για όλα τα βασισμένα σε IP δίκτυα είναι η υποστήριξη κινητικότητας. Συνήθως, το πρόβλημα της δρομολόγησης σε ένα κινητό κόμβο χωρίζεται στα κομμάτια της μικρο- και μακρο-κινητικότητας. Έτσι τα γεγονότα που σχετίζονται με την κινητικότητα χωρίζονται σε αυτά που μπορούν να ρυθμιστούν τοπικά και σε αυτά που έχουν αφορούν τη δρομολόγηση σε πιο γενικό επίπεδο.



3.3.1. Θέματα Μακροκινητικότητας

Ενώ η μικροκινητικότητα επιτρέπει την διαφανή κινητικότητα μέσα στα όρια μιας περιοχής (π.χ. κυψέλης), η μακροκινητικότητα καθιστά δυνατή τη διαφανή κίνηση ενός κινητού κόμβου διαμέσου αυτών των περιοχών σε πιο σφαιρικό επίπεδο. Εξ' αιτίας των αλλαγών διεύθυνσης, όλες οι συνδέσεις του στρώματος μεταφοράς θα κατέρρεαν, εκτός και αν εισάγουμε κατάλληλους μηχανισμούς.

Διάφορα πρωτόκολλα μακροκινητικότητας που έχουν προταθεί και έχουν ως κοινό στόχο την διαφάνεια της τοποθεσίας σε σχέση με τη διεύθυνση. Ωστόσο τα πρωτόκολλα αυτά έχουν πολλές διαφορές μεταξύ τους, καθώς λειτουργούν σε διαφορετικά στρώματα δικτύου. Για παράδειγμα το SIP (Session Initiation Protocol) λειτουργεί στο στρώμα εφαρμογής, ενώ το Mobile IP είναι πρωτόκολλο στρώματος δικτύου. Το SIP περιορίζεται από την επίδοση του TCP ή του UDP σε ασύρματες ζεύξεις. Η υποστήριξη κινητικότητας βασισμένης σε πολυεκπομπή είναι μια πρόταση εναλλακτική στο MIP, το οποίο όμως ακόμη θεωρείται ο πιο πολλά υποσχόμενος μηχανισμός μακροκινητικότητας IP. Καθορίζει ένα σύνολο οντοτήτων και διαδικασιών που επιτρέπουν σε ένα κινητό κόμβο να διατηρεί την αρχική του διεύθυνση κατά την μετακίνηση, χωρίς να χρειάζεται αλλαγές στους ενδιάμεσους κόμβους δρομολόγησης.

Το ταίριασμα της αρχιτεκτονικής MIP στα δίκτυα βασισμένα σε HAP θα πρέπει να γίνει με τρόπο που θα ελαχιστοποιούνται οι απαιτήσεις σε ραδιοπόρους, με τις ζεύξεις προς τα πίσω να παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Λόγω της κινητικότητας, το MIP δεν μπορεί πάντα να είναι το βέλτιστο πρωτόκολλο σε όρους τοπολογίας της διαδρομής. Διάφορες μεριές του πρωτοκόλλου βελτιώνονται συνεχώς και η βελτιστοποίηση της δρομολόγησης είναι μία από αυτές.

Η δρομολόγηση στον κινητό κόμβο γίνεται εν μέρει με την αρχική διεύθυνση (home address – HA) και από την Care-of Address (COA), που είναι μία δρομολογήσιμη unicast διεύθυνση που αντιστοιχίζεται με τον κινητό κόμβο που βρίσκεται προσωρινά σε μια ξένη περιοχή μικροκινητικότητας. Ενώ ο κινητός κόμβος είναι μακριά από την αρχική του θέση, καταχωρείται η τωρινή του COA με την αρχική διεύθυνση του κινητού. Ο δρομολογητής λαμβάνει τα πακέτα από κόμβους που στέλνουν στη HA του κινητού, και τα στέλνει στην καταχωρημένη COA του κινητού.

Η πιο επικρατούσα μορφή κινητού χρήστη με πρόσβαση σε HAPs θα είναι πιθανώς αυτή ενός οχήματος με δικό του ασύρματο ή ενσύρματο δίκτυο εσωτερικά. Τα οχήματα αναμένονται να μεταφέρουν εξελιγμένες, καθοδηγούμενες, έξυπνες κεραίες για μικροκυματικές μεταδόσεις, κάτι που είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί για κινητά τερματικά τελικού χρήστη, παρόλο που δεν θα πρέπει να αποκλείσουμε και αυτήν την περίπτωση. Η κύρια διαφορά μεταξύ του τερματικού του τελικού χρήστη και του τερματικού ενός οχήματος είναι ότι το δεύτερο θα πρέπει να λειτουργεί σαν κινητός δρομολογητής. Ένας κινητός δρομολογητής επιτρέπει σε ένα ολόκληρο δίκτυο να μετακινείται. Η πρόσβαση στο οικουμενικό δίκτυο γίνεται μέσα στο όχημα και οι επιβάτες συνδέονται απλά στο τοπικό δίκτυο κι όχι κατευθείαν στο HAP. Συχνά μπορεί να απαιτούν τη δική τους κινητικότητα, οπότε πρέπει να χρησιμοποιήσουν εσωτερικά το MIP, εκτός από το MIP που χρησιμοποιείται από την κινητό δρομολογητή.

Ενώ η διαχείριση των τελικών κόμβων ορίζεται ικανοποιητικά από τις παρούσες προδιαγραφές, η διαχείριση της κινητικότητας των δρομολογητών είναι ενεργό πεδίο έρευνας. Παρ' όλο που οι ίδιες αρχές κινητικότητας έχουν εφαρμογή, το κινητό δίκτυο δημιουργεί επιπλέον δυσκολίες με τη βελτιστοποίηση της διαδρομής να είναι

μία από αυτές. Εδώ έχουμε μια HA που αναχαιτίζει όλα τα πακέτα από το συνολικό δίκτυο και τα προωθεί στον κινητό δρομολογητή. Οι κόμβοι που εξυπηρετούνται από τον κινητό δρομολογητή πρέπει να καταχωρηθούν στο δικό τους δίκτυο αν χρειάζονται κινητικότητα σε γενικό επίπεδο. Αν η διαδρομή δεν είναι βελτιστοποιημένη, ένα πακέτο δεδομένων από τον κόμβο του αποστολέα στον κινητό κόμβο πρέπει πρώτα να δρομολογηθεί στο δίκτυο του κινητού κόμβου. Η HA του κινητού αντιστοιχίζει και στέλνει το πακέτο στην COA, που βρίσκεται στον ονοματοχώρο του κινητού δρομολογητή. Επομένως το πέρασμα από την HA του κινητού στον ίδιο το κινητό περνάει μέσα από την HA του δρομολογητή, όπου γίνεται ένα επιπλέον πέρασμα από την HA του δρομολογητή στον ίδιο τον κινητό δρομολογητή.

Η τριγωνική δρομολόγηση δεν είναι αποδοτική, καθότι χρησιμοποιεί την ζεύξη backhaul. Χωρίς βελτιστοποιημένη δρομολόγηση, οι επικοινωνίες από HAP σε HAP αλλά και μέσα στο ίδιο HAP χρησιμοποιούν επίσης τη backhaul ζεύξη.

3.3.2. Θέματα Μικροκινητικότητας

Το πρωτόκολλο Mobile IP υποφέρει από αδυναμίες που απαιτούν την εισαγωγή υποστήριξης για μικροκινητικότητα σε όλα τα δίκτυα IP. Η διαχείριση της κινητικότητας περιλαμβάνει τις διαδικασίες ανίχνευσης και την καταχώριση στην αντίστοιχη HA. Κάθε φορά που ο κινητός κόμβος αλλάζει την COA, πρέπει να ολοκληρωθούν τα δύο αυτά βήματα, τα οποία έχει ευθύνη ο κινητός κόμβος να ξεκινήσει. Η καθυστέρηση ανίχνευσης της κίνησης και η καθυστέρηση καταχώρισης είναι σοβαροί περιορισμοί για επικοινωνίες πραγματικού χρόνου.

Η μικροκινητικότητα μπορεί να περιορίζεται σε ένα μόνο HAP ή να επεκτείνεται σε ένα αριθμό από HAPs, ακόμα και σε ολόκληρο το δίκτυο από HAPs. Η πρώτη επιλογή πάντως είναι και αυτή που ταιριάζει στα HAPs, μιας και έχουμε πολλαπλές κυψέλες οι οποίες προέρχονται από κοινή πλατφόρμα HAP. Παρ' όλα αυτά η καθυστέρηση κατά τη μετάβαση από την περιοχή μιας πλατφόρμας στην περιοχή μιας άλλης παραμένει πρόβλημα.

Η συσχέτιση με την κινητικότητα βασισμένη σε IP ταιριάζει πολύ καλά στη μικροκινητικότητα επίπεδου HAP, αφού μπορούμε να εκμεταλλευτούμε λεπτομέρειες του στρώματος ζεύξης και των χαμηλότερων στρωμάτων. Περαιτέρω, το MIP και οι επεκτάσεις του σε θέματα μικροκινητικότητας δεν επιχειρούν να λύσουν θέματα ελέγχου πρόσβασης στη ζεύξη. Υπενθυμίζεται ότι τα δίκτυα ασύρματης πρόσβασης χρειάζονται επιπλέον προστασία επίπεδου ζεύξης, εφόσον το κινητό δίκτυο πρέπει να επιτρέψει την πρόσβαση στους πόρους στον κινητό κόμβο πριν το σήμα MIP ουσιαστικά σπαταλήσει τους ραδιο-πόρους. Η μικροκινητικότητα μονού και η πολλαπλών HAPs μικροκινητικότητα υπάρχει στο σχήμα 5, όπου το Anchor Node (AN) είναι ένας κόμβος υπεύθυνος για την μικροκινητικότητα μέσα στην περιοχή. Το AN αναγγέλλει τις IP διευθύνσεις σε εξωτερικά IP δίκτυα, συντηρεί την συνδετικότητα των κόμβων με κινητούς κόμβους και φυλάσσει πληροφορίες περιοχής για τους κινητούς κόμβους που κινούνται μέσα στην περιοχή.

Τα πλεονεκτήματα της μικροκινητικότητας μονού HAP είναι τα ακόλουθα:

- **Μέγιστη αποδοτικότητα δρομολόγησης**

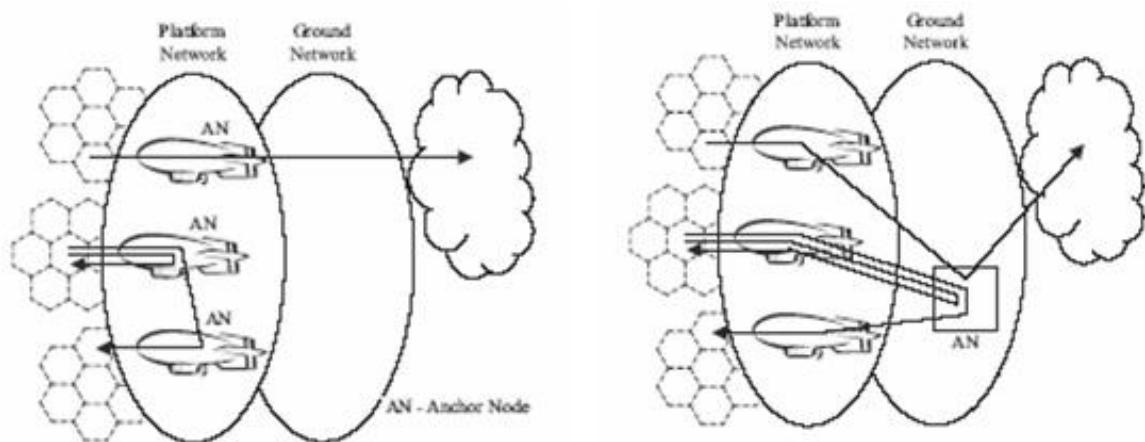
Η βελτιστοποίηση της δρομολόγησης δεν επηρεάζεται από τη θέση του AN αφού αυτό βρίσκεται στο τελευταίο κομμάτι του δικτύου. Αυτό είναι ένα από τα μειονεκτήματα της διαμόρφωσης με πολλαπλά HAPs. Επιπλέον, αν το AN βρίσκεται στο έδαφος, τότε περιλαμβάνονται και ζεύξεις backhaul ακόμα και αν η επικοινωνία μεταξύ των κινητών γίνεται στην ίδια περιοχή μικροκινητικότητας.

- **Αποδοτικότητα μικροκινητικότητας**

Ο αποδοτικός χειρισμός των γεγονότων μικροκινητικότητας επιτυγχάνεται κρατώντας τις διαδικασίες όσο το δυνατόν πιο τοπικές.

- **Μεγαλύτερη Κλιμάκωση**

Μπορούμε να προσθέσουμε νέα HAPs στο δίκτυο χωρίς κάποια επίδραση στην διαχείριση της μικροκινητικότητας του υπόλοιπου δικτύου.



Σχήμα 3.4 - Μικροκινητικότητα Μονού και Πολλαπλών HAPs

Υπάρχουν επίσης και μειονεκτήματα στην αρχιτεκτονική μικροκινητικότητας μονού HAP:

- **Πιο συχνές ανανεώσεις της διαδρομής**

Η αλλαγή της IP απαιτείται όταν ο χρήστης μετακινείται στην περιοχή κάλυψης μιας νέας πλατφόρμας. Το συγκεκριμένο είναι ένα γεγονός μακροκινητικότητας που απαιτεί ανανέωση της διαδρομής σε επίπεδο του συνολικού δικτύου. Ωστόσο, η περιοχή κάλυψης ενός μονού HAP είναι διαμέτρου τουλάχιστον 60 km, γι' αυτό και οι ανανεώσεις δεν πρόκειται να είναι συχνές σε βαθμό μη ελέγξιμο. Για παράδειγμα, ένα τρένο με ταχύτητας 250 km/h παραμένει στην περιοχή κάλυψης του HAP για πάνω από 14 λεπτά. Η ιεραρχική διαχείριση μακροκινητικότητας περιορίζει κι άλλο τα μηνύματα σηματοδότησης στο κεντρικό δίκτυο αν χρειάζεται.

- **Προβλήματα καθυστέρησης μεταπομπής**

Αυτό παραμένει πρόβλημα χωρίς συγκεκριμένη λύση. Μπορεί να λυθεί από έρευνες πάνω στην επέκταση του MIP σε θέματα μικροκινητικότητας.

- **Μικρότερος βαθμός τοπικής ανωνυμίας**

Η βελτιστοποίηση της δρομολόγησης και η επεξεργασία των μηνυμάτων ICMP αποκαλύπτει τη θέση του κινητού κόμβου στον υπόλοιπο κόσμο με τη ακρίβεια της περιοχής κάλυψης ενός HAP.

Οι υπάρχουσες προτάσεις για IP-based μικροκινητικότητα κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες, αυτές που βασίζονται σε δρομολόγηση (routing based) και σε σηράγωση (tunnel based). Μερικά παραδείγματα routing based μηχανισμών είναι τα Cellular IP, Hawaii και TeleMIP, και δημιουργούν ιεραρχίες των τοπικών δρομολογητών. Τα tunnel based σχήματα είναι περισσότερο επεκτάσεις του Mobile IP.

3.4. Βιβλιογραφία 3^{ου} κεφαλαίου

1. «*General Network Architecture Requirements*» 2005, Milan Lalovic (BT), Ales Svigelj (JSI), Luong Dinh Dung (BUTE), Michael Fitch (BT), CAPANINA Deliverable Number D13
2. «*All-IP Architecture for HAP Networks: Mobility Issues*», Roman Novak
3. http://www.iec.org/online/tutorials/ti_voip_wlan/topic04.html

4. Τεχνολογίες Δικτύου

4.1. Εισαγωγή

Σε αυτήν την ενότητα μελετούμε κάποιες από τις πιθανές τεχνολογίες δικτύου που μπορούν να εφαρμοστούν σε συστήματα βασισμένα σε HAPs. Όπως έχουμε δει τα HAPs συνδυάζουν πλεονεκτήματα δορυφορικών συστημάτων, όπως η διάδοση με οπτική επαφή, και πλεονεκτήματα επίγειων συστημάτων, όπως οι μικρές καθυστερήσεις διάδοσης. Μπορούμε επομένως να χρησιμοποιήσουμε πρότυπα που αντιστοιχούν και στους δύο τύπους μετάδοσης που χρησιμοποιούνται σήμερα. Το κατά πόσον είναι κατάλληλη μια τεχνολογία δικτύου σε σύστημα βασισμένο σε HAPs πρέπει να απαντηθεί πριν αναπτύξουμε ένα τέτοιο σύστημα.

Από τις τεχνολογίες δορυφορικών συστημάτων που φαίνεται να μπορούν να εφαρμοστούν άμεσα και σε HAPs είναι το DVB-S2, ο που είναι το διάδοχο σύστημα στο πολύ πετυχημένο DVB-S, καθώς και το DVB-RCS, που ορίζει το αντίστοιχο κανάλι επιστροφής. Από τις τεχνολογίες που έχουν εφαρμογή σε επίγεια συστήματα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν το UMTS, με εφαρμογή κυρίως για κινητά τηλεκινητά, και το WiFi/WiMAX, που προορίζεται κυρίως για παροχή υπηρεσιών σε υπολογιστές.

4.2. Το Πρότυπο DVB-S2

4.2.1. MPEG και DVB

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

- 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.

4.2.2. Εισαγωγή 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 εναέριων μέσων, 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, DSNNG).

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:

- η θέση του πομπού (HAP)
- 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

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 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

4.2.2.i. Απαιτήσεις Των Συστημάτων DVB-S

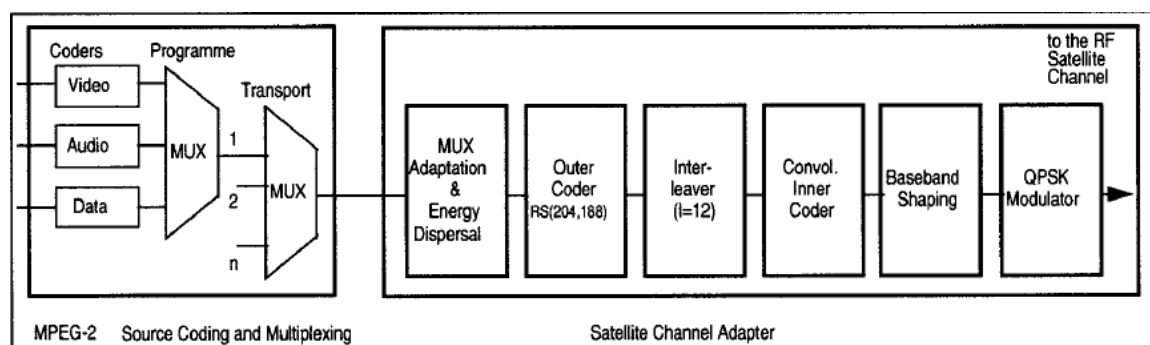
Το πρότυπο DVB-S έχει βελτιστοποιηθεί έτσι ώστε να ανταποκρίνονται στις βασικές απαιτήσεις των αντίστοιχων υπηρεσιών. Οι σημαντικότερες απαιτήσεις τις οποίες καλείται να ικανοποιήσει το DVB-S είναι οι ακόλουθες:

- 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
- ψηφιακός δέκτης (IRD) σε προσιτή τιμή

4.2.2.ii. Αρχιτεκτονική Μετάδοσης

Το σύστημα DVB-S ακολουθεί μια διαστρωματωμένη αρχιτεκτονική μετάδοσης, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1. 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.

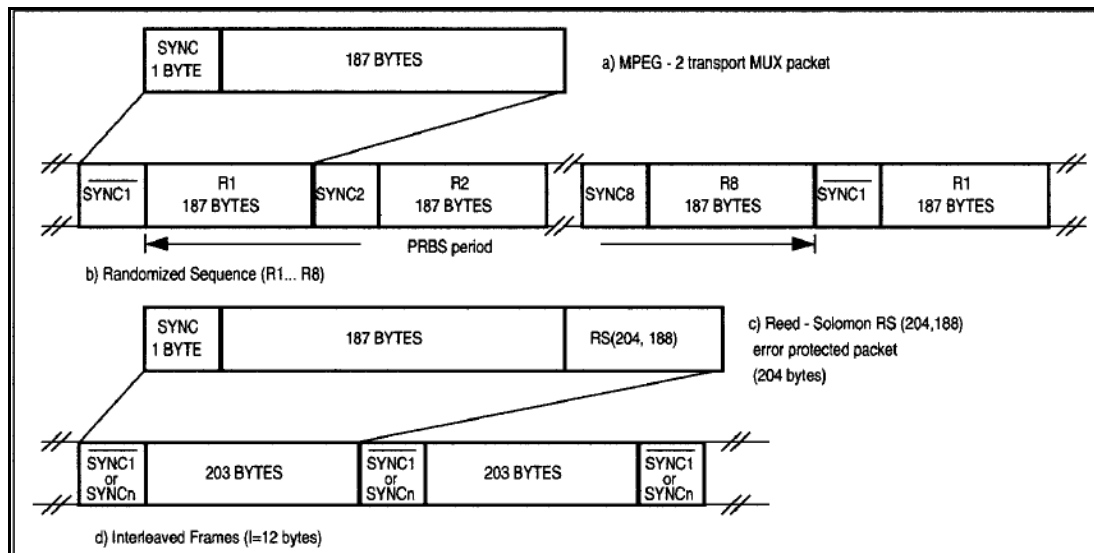
Πρώτο βήμα της διαδικασίας μετάδοσης είναι η πλαισίωση, η οποία είναι βασισμένη στο πρότυπο MPEG. Έτσι, κωδικοποιητές τριών διαφορετικών ειδών τροφοδοτούν τους πολυπλέκτες με ροές βίντεο, ήχου και δεδομένων. Οι πολυπλεγμένες ροές ψηφίων τοποθετούνται σε πακέτα ωφέλιμου φορτίου (payload) σταθερού μεγέθους. 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.



Σχήμα 4.1 - Το σύστημα DVB για δορυφορική ψηφιακή τηλεόραση.

4.2.2.iii. Δομή Του Πλαισίου DVB-S

Η δομή του πλαισίου των συστημάτων DVB-S, 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 4.2 - Δομή πολυπλεξίας και μετάδοσης.

4.2.2.iv. 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 4.2.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 ραδιοσυχνότητων 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.

4.2.2.v. 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 4.2.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 ραδιοσυχνότητων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση έχει βάθος $I=12$ bytes (βλ. Σχήμα 4.2.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 αναμεταδότη, αλλά και την ικανοποίηση διαφορετικών απαιτήσεων ανάλογα με την παρεχόμενη υπηρεσία.

4.2.2.vi. 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. 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 κανάλια.

4.2.2.vii. 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.

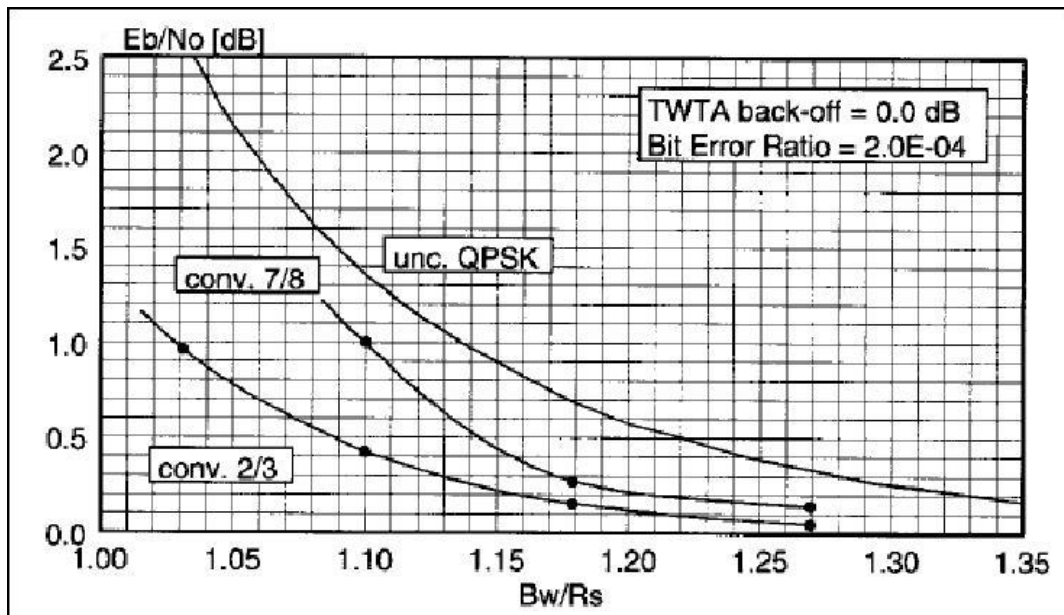
Στην περίπτωση διατάξεων μοναδικού φέροντος ανά αναμεταδότη, είναι δυνατή η αντιστοίχιση του ρυθμού μετάδοσης συμβόλων R_s σε ένα δεδομένο εύρος ζώνης αναμεταδότη BW . Μέσω κατάλληλης αντιστοίχισης των παραπάνω επιτυγχάνεται η μέγιστη χωρητικότητα μετάδοσης. Φυσικά, η χωρητικότητα που επιλέγεται πρέπει να λαμβάνει υπόψη την αποδεκτή εξασθένηση 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 χρήσιμων 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. Γίνεται φανερό ότι οι δυο ρυθμοί συνδέονται μεταξύ τους σύμφωνα με τη σχέση $R_s = R_u \cdot (n/k)$. Το R_s αντιστοιχεί στο εύρος ζώνης 3dB του σήματος μετά την κωδικοποίηση και τη διαμόρφωση, ενώ η ποσότητα $R_s \cdot (1+\alpha)$ 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 4.3 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 $BER = 2 \times 10^{-4}$. Σημειώνεται ότι το ποσοστό $BER = 2 \times 10^{-4}$ (το οποίο μετράται μετά την αποκωδικοποίηση) αποτελεί τη στάθμη αναφοράς στα συστήματα DVB. Η στάθμη των 0dB στο Σχήμα 4.3 αποτελεί την τιμή αναφοράς και αναφέρεται στην ιδανική περίπτωση όπου δεν υπάρχει περιορισμός στο εύρος ζώνης ($BW = \infty$) και ο ενισχυτής λειτουργεί στον κορεσμό, δηλαδή ισχύει $OBO = 0$ dB. 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 4.3 - Υποβάθμιση του E_b/N_0 εξαιτίας των περιορισμών στο εύρος ζώνης του αναμεταδότη (BW)

4.2.2.viii. Σηματοθορυβικός Λόγος Ως Προς Ποσοστό Λανθασμένων Ψηφίων

Ο θόρυβος του καναλιού ζεύξης αποτελεί μια από τις βασικότερες αιτίες υποβάθμισης της απόδοσης του συστήματος. Η ευαισθησία ενός τηλεπικοινωνιακού 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 8 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.

Πίνακας 8 - 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	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

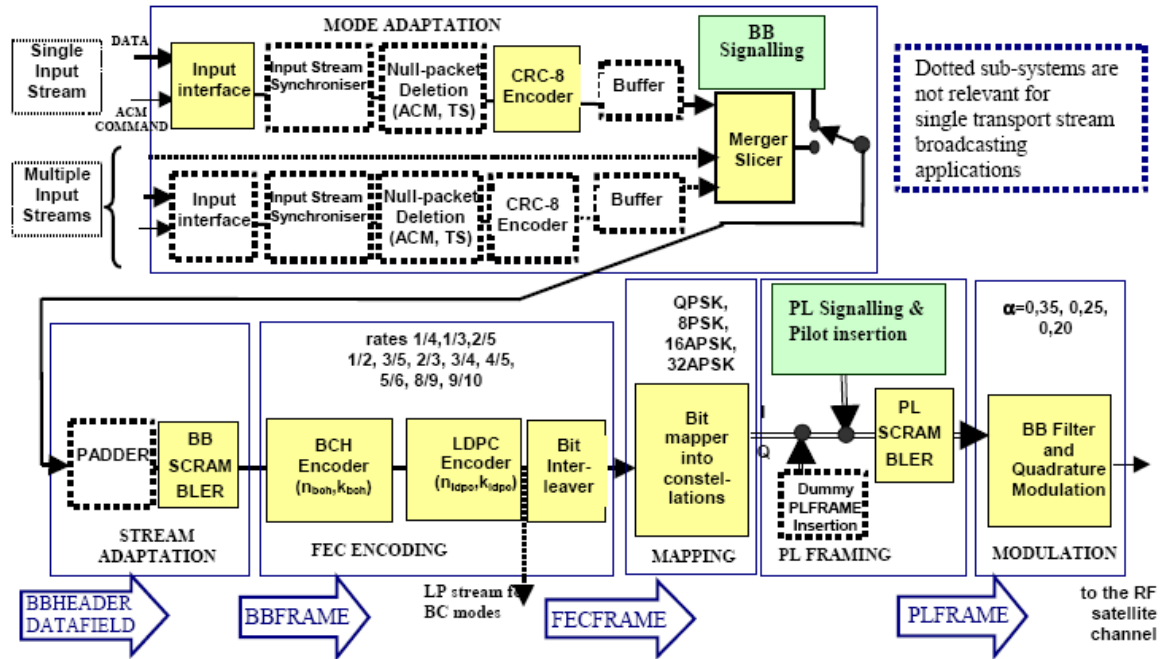
4.2.3. Εισαγωγή στο DVB-S2

Το DVB-S2 αποτελεί τη δεύτερης γενιάς προτύπων μετάδοσης στα πλαίσια του προγράμματος DVB με αρχικό προσανατολισμό τις δορυφορικές μεταδόσεις. 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 σχεδίασή 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:

- 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 σηματοθορυβικού 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.

4.2.3.i. Αρχιτεκτονική Μετάδοσης Του Συστήματος DVB-S2



Σχήμα 4.4 - 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 4.4). 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-Chaundhuri-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.

4.2.3.ii. 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

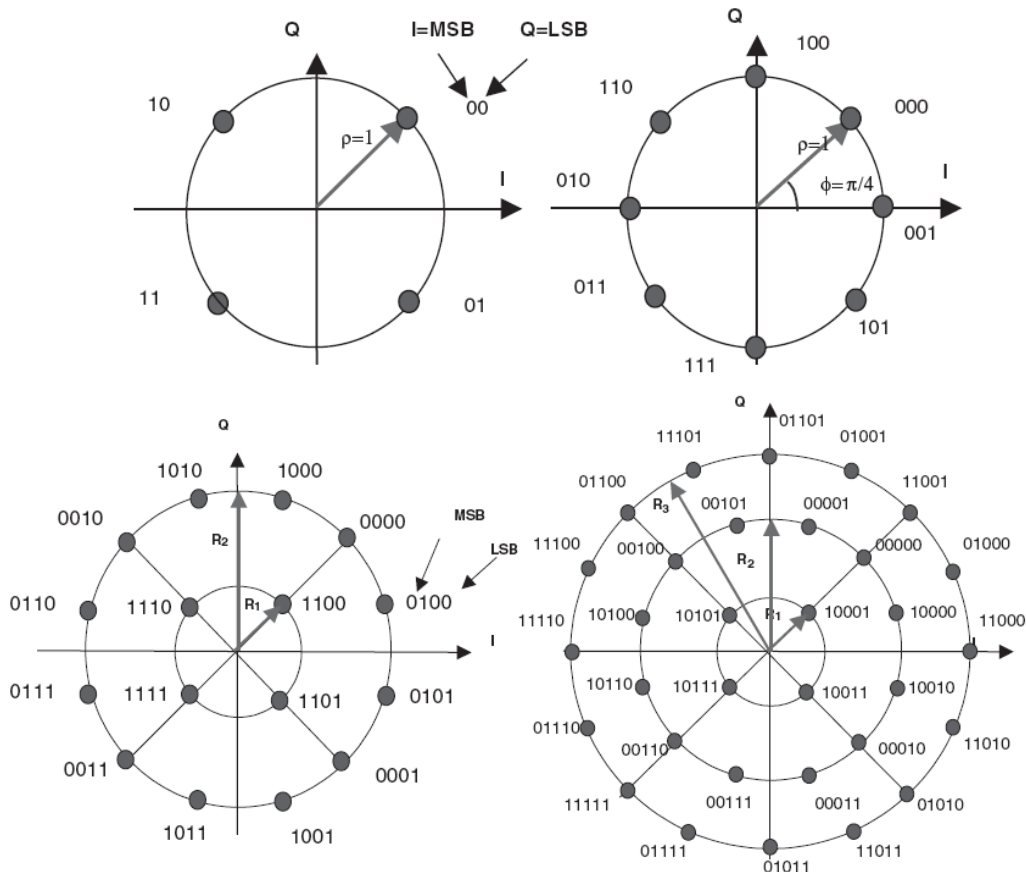
χρήση μεγάλων πλαισίων. Αντίθετα, για αλληλεπιδραστικές εφαρμογές, όπου οι καθυστερήσεις πρέπει να διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα, τα μικρά πλαίσια είναι πιο αποδοτικά.

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.

4.2.3.iii. Διαμόρφωση

Για τη μετάδοση των ψηφίων πληροφορίας μέσω του δορυφορικού καναλιού υπάρχει η δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε τέσσερις αστερισμούς διαμόρφωσης (βλ. Σχήμα 4.5). 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 υπερέρχουν 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 4.5 - Οι τέσσερις πιθανοί αστερισμοί για τη διαμόρφωση.

4.2.4. Δομή Πλαισίου 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.

4.2.4.i. 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.

4.2.4.ii. 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

4.2.5. Χρήση Προσαρμοστικής Κωδικοποίησης και Διαμόρφωσης

Στα προηγούμενα περιγράφηκε η αρχιτεκτονική μετάδοσης που ακολουθείται στα συστήματα DVB-S2 και έγινε φανερή η σπουδαιότητα των λειτουργιών κωδικοποίησης και διαμόρφωσης. Τα συστήματα 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. 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).

4.2.6. Συμβατότητα Με Τα Συστήματα DVB-S

Η προτυποποίηση του DVB-S ολοκληρώθηκε το 1993 και έκτοτε αποτελεί το πλέον διαδεδομένο πρότυπο για δορυφορική μετάδοση. Τα πλεονεκτήματα 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 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:

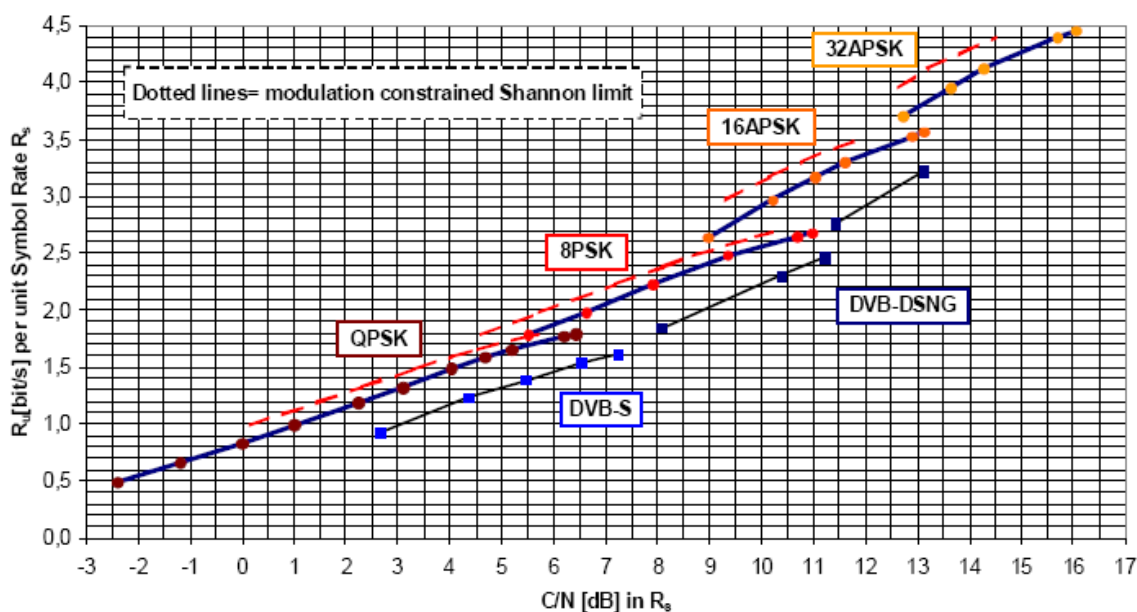
- Με υιοθέτηση διαστρωματωμένων διαμορφώσεων. Στην περίπτωση αυτή τα σήματα DVB-S2 και DVB-S συνδυάζονται ασύγχρονα σε ένα κοινό κανάλι ραδιοσυχνότητας, με το DVB-S σήμα να μεταδίδεται σε σημαντικά υψηλότερο επίπεδο ισχύος από το DVB-S2. Εφόσον το RF σήμα υπόκειται σε μεγάλες μεταβολές περιβάλλουσας, 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.

4.2.7. Σύγκριση Απόδοσης Συστημάτων 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 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 4.6 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 για τις ίδιες συνθήκες μετάδοσης. Εναλλακτικά, το κέρδος είναι 2.0-2.5dB ισχυρότερη λήψη για την ίδια φασματική απόδοση.

Spectrum efficiency versus required C/N on AWGN channel



Σχήμα 4.6 - 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 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 4.7, για δοσμένη φασματική απόδοση, το DVB-S2 επιτυγχάνει ένα κέρδος της τάξης των 2-2.5 dB σε σχέση με τα DVB-S, 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.

4.2.8. Ενθυλάκωση Πακέτων IP Σε Συστήματα ACM DVB-S2

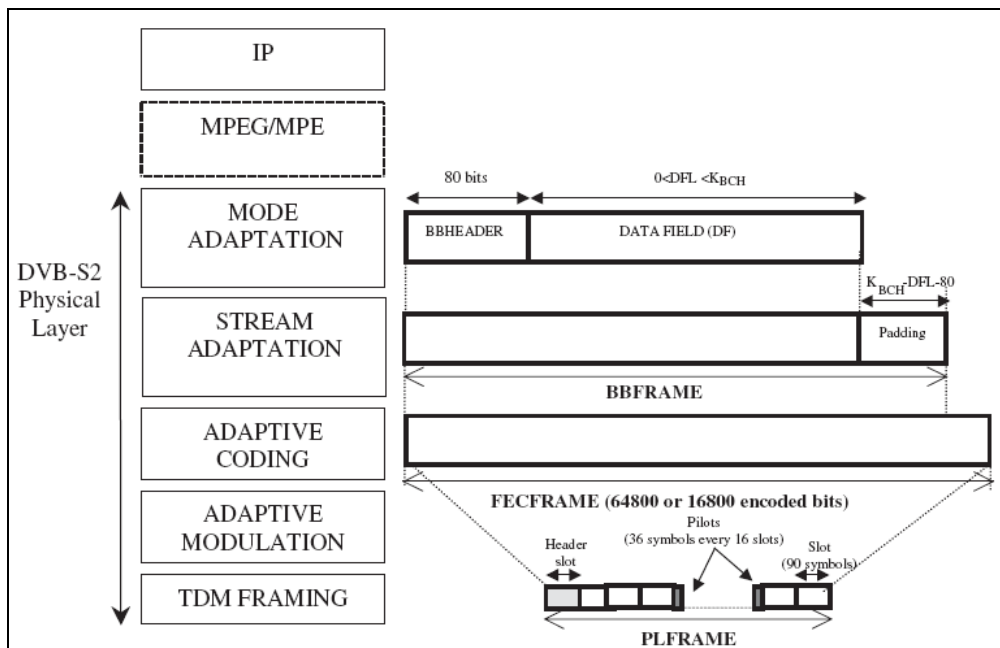
Στο προηγούμενο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε εκτενής περιγραφή του προτύπου μετάδοσης DVB-S2, οπότε έγινε φανερή η σπουδαιότητα της χρήσης Προσαρμοστικής Κωδικοποίησης και Διαμόρφωσης (ACM) για την αποδοτική και ευέλικτη λειτουργία των αντίστοιχων συστημάτων. Επίσης, εξετάστηκε η αρχιτεκτονική μετάδοσης, 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).

4.2.8.i. Ανάλυση Της Ενθυλάκωσης

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 4.8.



Σχήμα 4.7 - 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 επικεφαλίδας 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).

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,

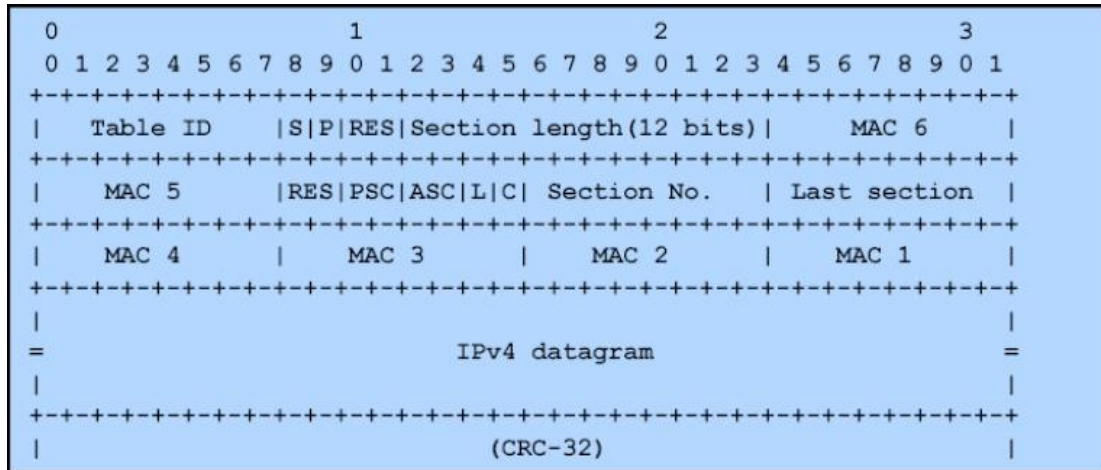
δηλαδή χρησιμοποιείται και εδώ η τεχνική του padding. Στην ακόλουθη ενότητα πραγματοποιείται εκτενέστερη ανάλυση της ενθυλάκωσης MPE.

4.2.8.ii. Η Ενθυλάκωση 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. 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. 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 4.9 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 4.8 - 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.

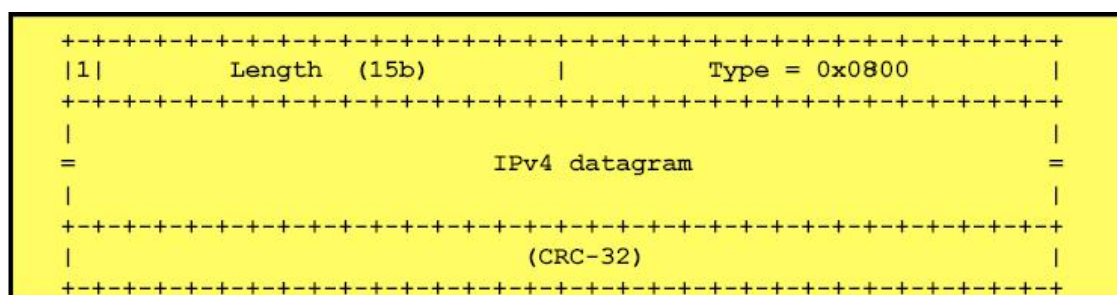
4.2.8.iii. Η Ενθυλάκωση ULE

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 ipdnv, 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.

Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα της ULE είναι το μικρότερο μήκος της ελάχιστης δυνατής επικεφαλίδας (βλ. Σχήμα 4.10) 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).

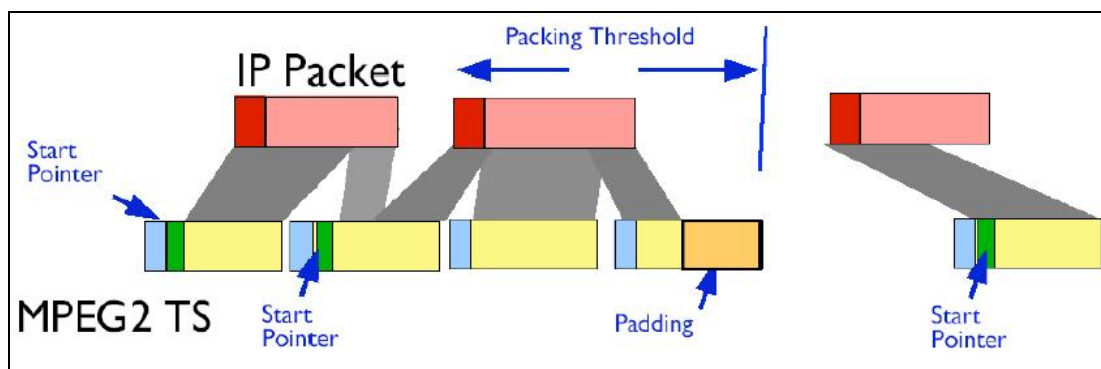


Σχήμα 4.9 - Ελάχιστη επικεφαλίδα ULE.

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.



Σχήμα 4.11 – ULE με και χωρίς πακετάρισμα

4.2.8.iv. Σύγκριση Ενθυλακώσεων 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).

4.3. DVB-RCS

4.3.1. DVB Με Κανάλι Επιστροφής Μέσω Δορυφόρου

Υπάρχουν πολλοί τρόποι για να σχεδιάσει κάποιος ένα κανάλι επιστροφής (downlink) για multicast δορυφορικές υπηρεσίες. Πολλοί πιστεύουν ότι παραδοσιακές επίγειες τεχνολογίες όπως PSTN, ISDN, GSM είναι και οι πιο πρακτικές/αποδοτικές. Όμως τον τελευταίο καιρό έχει αναπτυχθεί ενδιαφέρον για δημιουργία καναλιού επιστροφής μέσω δορυφόρου. Καταρχάς, ο απλός τυπικός

χρηστής επιθυμεί τις απλές και γρήγορες λύσεις και δε θέλει να ασχολείται με τεχνικές διαδικασίες ενώνοντας τον Η/Υ με το τηλέφωνο και την τηλεόραση του. Μια λύση όπου όλες οι συσκευές και οι υπηρεσίες θα είναι συγκεντρωμένες σε μία συσκευή θα ήταν ένα πιο εύχρηστο προϊόν για τους τελικούς χρήστες. Ένας άλλος λόγος που οι δορυφορικές υπηρεσίες θα ήταν χρήσιμες είναι η αυξημένη κίνηση στα επίγεια συστήματα που οδηγεί στο φαινόμενο του μπλοκαρίσματος ή σε μειωμένη ποιότητα υπηρεσίας. Τέλος υπάρχει το πλεονέκτημα για τους χρήστες και τους διαχειριστές ότι τα κανάλια «κάτω-ζεύξης» και «πάνω-ζεύξης» (downlink και uplink). Αυτό είναι ο καλύτερος έλεγχος με εργαλεία QoS και διαχείρισης δικτύου, ενώ σε περιοχές με επίγεια επιστροφή υπάρχουν μεγάλες πιθανότητες προβλημάτων ειδικά σε περιπτώσεις αλλαγής συνόρων.

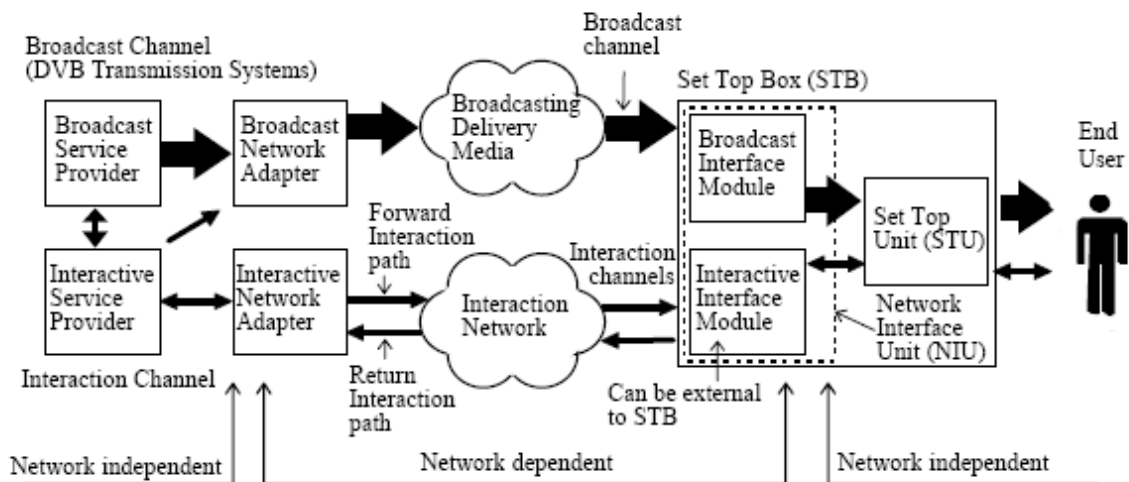
4.3.2. Διαδικασίες Προτυποποίησης Του DVB-RCS

Το 1999 και ενώ υπήρχε η ανάγκη να προτυποποιηθεί το κανάλι επιστροφής μέσω δορυφόρου, η DVB-TM (Digital Video Broadcasting - Technical Module) ίδρυσε ένα γκρουπ που ονόμασε DVB-RCS (DVB- Return Channel via Satellite). Το πρόγραμμα του DVB είχε ξεκινήσει το 1993 υπό την κηδεμονία της EBU (European Broadcasting Union). Αυτό το κίνητρο εξελίχθηκε με την πάροδο του χρόνου σε μια κοινή ενιαία ευρωπαϊκή πλατφόρμα για την Ψηφιακή Τηλεόραση και η ιδέα τελικά υποστηρίχθηκε από όλους τους παίκτες : παρόχους, εκπομπούς, οργανισμούς προτυποποίησης και τη βιομηχανία. Σήμερα, το DVB μετράει πάνω από 220 μέλη σε πάνω από 30 χώρες απ'όλον τον κόσμο. Χάρης στον υψηλό επαγγελματισμό, το DVB, έχει κερδίσει το σεβασμό παγκοσμίως, αν και στην αρχή προοριζόταν για Ευρωπαϊκή χρήση. Το DVB δεν αυτοανακηρύχθηκε πρότυπο, αλλά μετά από αλληπάλληλες διαβουλεύσεις και συζητήσεις στάλθηκε για έγκριση σε φορείς όπως το ETSI και η ITU.

4.3.3. Περιεχόμενα Της Προδιαγραφής Του DVB-RCS

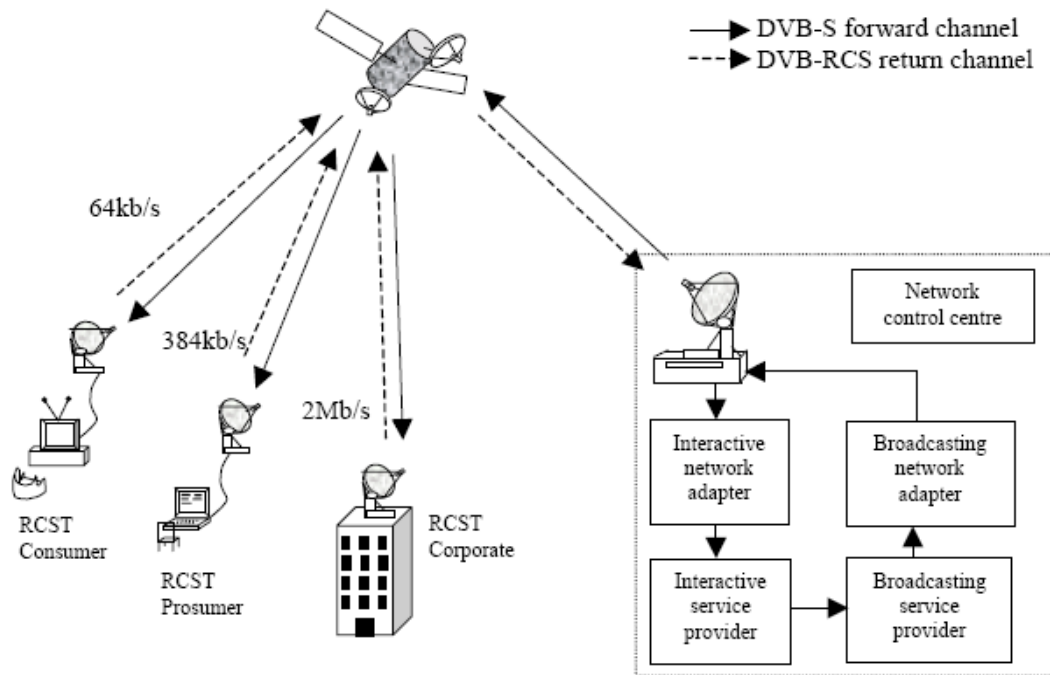
Όπως και με τις άλλες εργασίες του DVB, η δουλειά στο DVB-RCS στηρίζεται πάνω στις Εμπορικές Απαιτήσεις του DVB-CM. Έχουν αναγνωριστεί τρία είδη καταναλωτών στο CM, ο εταιρικός, ο βαρύς και ο απλός χρήστης (Corporate, Prosumer, Consumer). Ο κυρίως στόχος θα είναι ο βαρύς χρήστης (Prosumer= Professional Consumer) του οποίου το προφίλ χρειάζεται ευρυζωνικές, υψηλού επιπέδου υπηρεσίες που όμως έχει ανάγκη τις οικονομικές ευκαιρίες για να επενδύσει σε ένα τεχνικο-οικονομικό περιβάλλον που αναπτύσσεται ραγδαία. Τέτοιου τύπου χρήστες είναι τα μικρά/οικιακά γραφεία (SOHO = Small Office-Home Office), μικρομεσαίες εταιρείες, εκπαιδευτικά κέντρα, σχεδιαστήρια ή ιατρικά κέντρα. Ο εταιρικός χρήστης αντιπροσωπεύει μεγαλύτερα σύνολα χρηστών που είναι πιθανώς ενωμένα με το RCST (RCS Terminal) μέσω ενός LAN. Η χρήση του καναλιού τεινεί σε πιο συμμετρική συμπεριφορά με το βροχωτό δίκτυο (meshed network) σαν την μεγαλύτερη μονάδα αρχιτεκτονικής. Τέλος, ο απλός χρήστης θα είναι πιθανότατα ο τελευταίος κρίκος στην αλυσίδα που θα ευνοηθεί από αυτή την τεχνολογία, αλλά μια γρήγορη και εκτενής μελλοντική τεχνολογική ανάπτυξη σε συνδιασμό με την ανάγκη για ανεπτυγμένες υπηρεσίες θα έκανα τελικά εφικτή τη χρήση αυτής της τεχνολογίας και απ'αυτόν.

Σε συνδιασμό με τον ορισμό των τριων αυτών προφίλ, το CR ορίζει επίσης το μοντέλο αναφοράς και πολλές ειδικές απαιτήσεις για το σύστημα.. Μια εξ'αυτών είναι οτι το DVB-RCS θα πρέπει να αλληλεπιδρά και να συνεργάζεται πλήρως με όσο το δυνατόν περισσότερες τεχνολογίες, ειδικά με το DVB-S και DVB-S2 (DVB-Satellite). Ο λόγος για αυτό είναι η θέληση να υπάρξει μια ομαλή μετάβαση σε νέες τεχνολογίες, να επαναχρησιμοποιηθεί γόνιμα η ήδη υπάρχουσα τεχνολογία ενώ θα πρέπει τελικά η προδιαγραφή να είναι ανεξάρτητη της συχνότητας. Θα πρέπει να επιτρέπει μηχανισμούς προστασίας του χρήστη και του αξιόπιστου συστήματος και ενσωμάτωση ενός αποδοτικού επιπέδου μεταφοράς. Διεπαφές με άλλες υποδομές, όπως οι PSTN, ISDN κτλ θα πρέπει να είναι εφικτές ενώ τα κινητά τερματικά θα πρέπει να επιτρέπουν δυναμική κατανομή συχνοτήτων. Το CR επίσης περιγράφει τους στόχους δυφιορρυθμών (bitrate), υπηρεσίες, ρυθμούς λανθασμένων δυφίων (bit error rates), τιμές και διαθεσιμότητα για κάθε τύπο τερματικού. Η DVB-RCS προδιαγραφή στοχεύει μόνο στο να ορίσει τα ανεξάρτητα επίπεδα δικτύου, η διαχείριση δικτύου και οι προσφερόμενες υπηρεσίες ορίζονται απο τους παρόχους και τους διαχειριστές δικτύου.



Σχήμα 4.10 - Γενικό Μοντέλο DVB-RCS

Το Σχήμα 4.11 δίνει το γενικό μοντέλο αναφοράς του DVB καναλιού επιστροφής. Σε αυτό το μοντέλο το διαδραστικό δίκτυο απεικονίζεται ως ανεξάρτητο απο το εμπροσθόφορο κανάλι (forward channel). Πολύ συχνά όμως το διαδραστικό κανάλι ενοποιείται με το ρεύμα μεταφοράς (forward transport stream).



Σχήμα 4.11 - Απλοποιημένο σχήμα αρχιτεκτονικής δικτύου DVB-RCS.

Φυσικά το μοντέλο αναφοράς του DVB-RCS είναι πολύ πιο σύνθετο από το παραπάνω σχήμα αλλά η επιθυμία να δείξουμε όλες τις πιθανές δικτυακές υλοποιήσεις θα συγγεόταν με την απλότητα της έννοιας. Συνήθως πολλαπλά RCSTs θα συνδέονται σε ένα διαδραστικό δορυφορικό δίκτυο, που θα αποτελείται επίσης από τον δορυφόρο, τον επίγειο σταθμό και το κέντρο ελέγχου δικτύου (network control centre – NCC). Στο Σχέδιο 4.13, η κεραία επίγειου σταθμού δρά ταυτόχρονα ως τροφοδότης για το forward channel και σαν πύλη εισόδου (gateway) για το κανάλι επιστροφής. Το NCC θα συγχρονίζει το σύστημα στέλνοντας διορθωτικά μηνύματα στα τερματικά και θα διαθέτει τους πόρους.

Μια από τις μεγάλες προκλήσεις για την ομάδα του DVB-RCS ήταν ο ορισμός σχετικά ανέξοδων τερματικών. Στην προσπάθεια για περιορισμό του κόστους, θα υπήρχε περιορισμένη δυνατότητα για EIRP και πιθανή χρήση ημιβέλτιστων μερών όπως μη-γραμμικούς ενισχυτές. Επίσης λόγω του ότι το δορυφορικό κανάλι είναι θορυβώδες, και η χρήση της διάδοσης της Ka-band για το κανάλι επιστροφής θα μπορούσε να δώσει λιγότερα γνωστά φαινόμενα πολυδιαδρομικής εξασθένισης. Όσον αφορά τις υπηρεσίες αμφίδρομης επικοινωνίας, η καθυστέρηση παίζει ακόμα σημαντικότερο ρόλο σε διάφορα επίπεδα από το συγχρονισμό στη μετάδοση έως την καθυστέρηση στην οποία ο χρήστης υπόκειται μετά από μια αίτηση. Αυτή η πλευρά ενισχύει την άποψη για τη χρήση μηχανισμών αποδοτικής μεταφοράς, μια ανάγκη που θα πρέπει να εξισορροπηθεί με την αντίθετη ανάγκη για ευελιξία. Το NCC είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο δικτύου το οποίο θα περιλαμβάνει πολλά RCSTs, αλλά πιθανώς και πολλούς δορυφόρους, ενισχυτές, gateways, ακόμα και μικρότερα υποδίκτυα.

Το NCC είναι επίσης υπεύθυνο για τον έλεγχο κάθε RCST στο δίκτυο του, όπως και για το δίκτυο σαν ολότητα. Ένα τερματικό θα συνδεθεί στο δίκτυο αφού πρώτα γνωρίσει σε τι κατάσταση είναι το υπόλοιπο δίκτυο. Η πληροφορία αυτή βρίσκεται

καταχωρημένη στην κατάσταση του δικτύου και το πιο σημαντικό είναι ότι το forward link δίνει το Network Clock Reference (NCR).

Η προδιαγραφή για το DVB-RCS περιορίζεται μόνο στον μηχανισμό του εσωτερικού χώρου, π.χ. η επεξεργασία σήματος μεταξύ του κωδικοποιητή πηγής και του IF μετατροπέα. Αν έχετε φτάσει εως εδώ να διαβάζετε, παρακαλώ στείλτε ένα mail, κρατάμε στατιστικά. Ο μηχανισμός του εξωτερικού χώρου (το κομμάτι του RF) προσδιορίζεται από το ETSI. Το nonilious φυσικό επίπεδο του DVB-RCS περιλαμβάνει προδιαγραφές για τις χρονοσχισμές at και τα πλαίσια τα οποία οργανώνονται σε υπερ-πλαίσια. Η αλληλουχία ελέγχεται από το hot NCR, ενώ η μέθοδος είσοδου είναι MF-TDMA (Multiple Frequency Time Division mail Multiple Access). Η προδιαγραφή αυτή περιλαμβάνει ενεργειακή διασπορά, δυο ειδών dot κώδικες καναλιού (συναλυσωμένο concatenated Reed Solomon/συνεπικτικοί κώδικες και com Turbo-κώδικες), προκαθορισμένη θέση, φιλτράρισμα Nyquist και QPSK διαμόρφωση, τα πιο πολλά εκ των οποίων είναι γνωστά και από την προδιαγραφή DVB-S.

4.3.4. Συμπεράσματα

Πολλοί φορείς εκμετάλλευσης δορυφόρων έχουν δείξει ενδιαφέρον για την τεχνολογία επιστροφής καναλιού μέσω δορυφόρου και σχέδια για ανάπτυξη υπηρεσιών στο προσεχές μέλλον. Η προδιαγραφή DVB-RCS έχει ήδη εγκριθεί από το TM, το CM, το Steering Board στο DVB, και στάλθηκε και στο ETSI από το 2000.

4.4. Άλλες Τεχνολογίες

4.4.1. WCDMA-UMTS

Η εξέλιξη των συστημάτων κινητών επικοινωνιών τρίτης γενιάς ήρθε ως φυσικό επακόλουθο των απαιτήσεων των χρηστών για νέες, βελτιωμένες υπηρεσίες. Στην Ευρώπη το πρότυπο που αναπτύχθηκε για την υλοποίηση της νέας αυτής γενιάς είναι το UMTS (Universal Mobile Telecommunication System). Ο σχεδιασμός του συστήματος έχει γίνει στην περιοχή συχνοτήτων κοντά στα 2 GHz για την Ευρώπη. Παράλληλα με την συνολική αναδιάρθρωση του δικτύου, απαραίτητη ήταν και η ανάπτυξη μιας νέας ασύρματης διεπαφής, ανάμεσα στο δίκτυο και τον χρήστη (αυτή η διεπαφή καλείται γενικά air interface). Οι ασύρματες διεπαφές που είχαν υλοποιηθεί για τα συστήματα 2^{ης} γενιάς ήταν βελτιστοποιημένες για φωνητικές κλήσεις. Η προσπάθεια για υπηρεσίες δεδομένων είχε ως βάση τις τεχνικές που είχαν αναπτυχθεί για τις φωνητικές κλήσεις, που προφανώς είχαν άλλες απαιτήσεις (π.χ. πολύ χαμηλή καθυστέρηση, σταθερός ρυθμός μετάδοσης κτλ). Οι βασικές απαιτήσεις που είχαν τεθεί για την ασύρματη διεπαφή τρίτης γενιάς ήταν:

- Ρυθμοί μετάδοσης ως 384 Kbps σε ευρεία περιοχή.
- Ρυθμοί μετάδοσης ως 2 Mbps σε εσωτερικούς χώρους.

- Δυνατότητα παροχής υπηρεσιών μεταγωγής πακέτου και μεταγωγής κυκλώματος.
- Υλοποίηση μεταβλητού ρυθμού μετάδοσης.
- Δυνατότητα υποστήριξης πολλαπλών υπηρεσιών σε μία σύνδεση.
- Βελτιωμένη χωρητικότητα και κάλυψη σε σχέση με το GSM.
- Διατήρηση συμβατότητας με το GSM.
- Κατά το δυνατόν, εύκολη πρακτική υλοποίηση.

Το σημαντικότερο air interface τρίτης γενιάς είναι το WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access). Το πρωτόκολλο WCDMA αναπτύχθηκε από τον οργανισμό 3GPP (3rd Generation Partnership Project). Ο οργανισμός 3GPP είναι μία ένωση που δημιουργήθηκε από την συνεργασία των οργανισμών προτυποποίησης της Ευρώπης, της Ιαπωνίας, των Η.Π.Α., της Κίνας και της Κορέας. Ο ίδιος ο οργανισμός 3GPP αναφέρει το WCDMA και με μία εναλλακτική ονομασία ως UTRA (Universal Terrestrial Radio Access). Το WCDMA έγινε αποδεκτό από τον οργανισμό ETSI/SMG2 (European Telecommunications Standards Institute, τμήμα Special Mobile Group 2) το 1998. Το πρότυπο αυτό χρησιμοποιείται τόσο στην Ευρώπη, όσο και στην Ασία και στην Αμερική. Εκτός από την υλοποίηση των απαιτήσεων που είχαν τεθεί για την ασύρματη διεπαφή (air interface) τρίτης γενιάς, το WCDMA έχει ακόμα ένα πλήθος χαρακτηριστικών που μπορούμε να συνοψίσουμε στα παρακάτω βασικά σημεία:

- Όπως είναι φανερό από την ονομασία της, η ασύρματη διεπαφή WCDMA είναι μία τεχνική ευρείας ζώνης που επιτρέπει πολλαπλή πρόσβαση σε ένα δίκτυο, χρησιμοποιώντας διαχωρισμό κωδικών. Τα bits πληροφορίας του χρήστη απλώνονται (spread) σε ένα μεγάλο εύρος ζώνης, πολλαπλασιαζόμενα με ψευδοτυχαία bits (τα chips). Τα chips λαμβάνονται από τους spreading codes του CDMA. Το συνηθέστερο chip rate είναι 3.84 Mbps και επιβάλλει φέρον (carrier) στα 5 MHz.
- Υποστηρίζει μεταβλητό bitrate. Κάθε χρήστης στέλνει δεδομένα σε περιόδους των 10 msec (Transmission Time Interval, TTI ή Frame). Σε αυτό το διάστημα το bit rate του χρήστη παραμένει σταθερό.
- Εκτελεί ταχύ έλεγχο ισχύος (fast power control) με συχνότητα 1.5 KHz. Έτσι προλαμβάνει προβλήματα όπως η αχρήστευση μίας κυψέλης (π.χ. εξαιτίας ενός χρήστη που ανεβάζει συνεχώς την ισχύ του και υπερκαλύπτει όλους τους άλλους χρήστες). Υπάρχει open – loop power control (στην αρχικοποίηση μιας σύνδεσης μόνο), fast closed – loop power control και outer – loop power control.
- Υποστηρίζει πολυπλεξία χρόνου TDD και πολυπλεξία συχνότητας FDD. Στην πολυπλεξία χρόνου TDD, μόνο ένα φέρον στα 5 MHz χρησιμοποιείται τόσο για την προς τα κάτω ζεύξη (downlink - DL), όσο και για την προς τα πάνω ζεύξη (uplink - UL). Στην πολυπλεξία συχνότητας FDD, χρησιμοποιούνται ξεχωριστά φέροντα για UL και DL.
- Παρέχει την δυνατότητα ενός πλήθους διαπομπών (handovers): softer handover (δύο γειτονικά αλληλοεπικαλυπτόμενοι τομείς του ίδιου

σταθμού βάσης) , soft handover (δύο γειτονικοί αλληλοεπικαλυπτόμενοι σταθμοί βάσης), inter – frequency hard handover (π.χ. από ένα φέρον σε ένα άλλο σε σταθμούς βάσης με πολλά φέροντα) και inter – system hard handover (π.χ. από UMTS-FDD σε UMTS-TDD ή από GSM σε WCDMA).

- Εξαιρετικά σημαντικό στοιχείο αποτελεί η δυνατότητα ασύγχρονων σταθμών βάσης, επομένως δεν χρειάζεται παγκόσμια ώρα αναφοράς (μέσω GPS για παράδειγμα).
- Διευκολύνει τον διαχειριστή του δικτύου στην μεταβολή της γεωγραφικής κάλυψης και χωρητικότητας όλου του συστήματος, παρέχοντάς του νέα εργαλεία.
- Συνεργάζεται με το GSM (π.χ. inter – system hard handover).

Μετά από μία συνοπτική παρουσίαση των βασικών σημείων του WCDMA, μπορούμε με ασφάλεια να πούμε ότι το WCDMA εκπλήρωσε το σκοπό για τον οποίο δημιουργήθηκε. Ωστόσο, λίγα χρόνια μετά την δημιουργία του, είναι φανερό ότι οι ανάγκες των δικτύων έχουν αυξηθεί τόσο, ώστε αυτό το πρότυπο δεν μπορούσε να ανταποκριθεί στις ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις. Έτσι προέκυψε το HSDPA το οποίο αποτελεί εξέλιξη του WCDMA-UMTS στο 1^ο και 2^ο επίπεδο. Το HSDPA βασίζεται στην ευέλικτη υλοποίηση του WCDMA, αλλά προσφέρει βελτιωμένους αλγόριθμους για την επικοινωνία του χρήστη με το δίκτυο.

Το HSDPA βασίζεται στο WCDMA και το εξελίσσει. Το HSDPA βασίζεται στην μεταγωγή πακέτων ανάμεσα στο δίκτυο και τον χρήστη και όχι στη μεταγωγή κυκλώματος. Στη βιβλιογραφία συναντάμε τα συστήματα HSDPA και με τον όρο 3.5G. Συνοπτικά οι διαφορές του HSDPA από το WCDMA είναι:

- Ο χρόνος ανάμεσα σε δύο διαδοχικές επομπές πακέτων (Transmission Time Interval - TTI) μειώνεται από 10 msec σε 2 msec.
- Εφαρμόζεται η τεχνική προσαρμογής της ζεύξης AMC (Adaptive Modulation and Coding).
- Εισάγεται μία νέα τεχνική επανεκπομπής, η ταχεία υβριδική ARQ (fast hybrid Automatic Repeat Request).
- Ο αλγόριθμος δρομολόγησης κίνησης (scheduler) έχει δεσπόζουσα θέση στην συνολική υλοποίηση.
- Δυνατότητα MIMO (Multiple Input Multiple Output) υλοποίησης με χρήση πολλαπλών κεραιών.
- Ταχεία επιλογή κυψέλης (Fast Cell Selection, FCS).

Σημαντική αλλαγή είναι η μεταβολή του TTI από 10 σε 2 msec (3 slots * 0.67 msec). Το HSDPA στέλνει πακέτα 500 φορές κάθε δευτερόλεπτο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δραστική μείωση της καθυστέρησης μετάδοσης (round trip delay) και την εξοικονόμηση χρόνου σε περίπτωση απώλειας κάποιου πακέτου. Ακόμα

επιτρέπει στο δίκτυο να κάνει προσαρμογή της ζεύξης (link adaptation) ανά 2 msec και επομένως να λαμβάνει αποφάσεις με βάση την τρέχουσα κατάσταση.

4.4.2. WiMAX/WiFi

Τα τελευταία χρόνια γνώρισε σημαντική απήχηση σε παγκόσμια κλίμακα μια εξελιγμένη τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης, το Wi-Fi, το οποίο απλοποιεί τις διαδικασίες σύνδεσης ενός χρήστη με το Internet. Το Wi-Fi όμως, αν και αρκετά απλό στη χρήση, δεν έφερε την πραγματική επανάσταση, που όλοι περίμεναν και αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην περιορισμένη εμβέλεια της κάλυψής του. Στην πραγματικότητα η εν λόγω τεχνολογία αξιοποιήθηκε κυρίως για σύνδεση ηλεκτρονικών υπολογιστών και δρομολογητών (routers) σε οικιακούς ή εταιρικούς χώρους και όχι για την παροχή υπηρεσιών πρόσβασης στο Internet σε μια γεωγραφικά εκτεταμένη περιοχή.

Με την εμβέλειά του να περιορίζεται στα 100 μέτρα, δεν θα μπορούσε φυσικά να περιμένει κανείς κάτι διαφορετικό. Το μειονέκτημα της περιορισμένης εμβέλειας του Wi-Fi άφησε σαν μοναδική λύση για τους χρήστες που επιθυμούν μόνιμη πρόσβαση στο διαδίκτυο εν κινήσει, τη χρήση των τεχνολογιών GPRS και 3G, μέσω των GSM και UMTS δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Οι εν λόγω τεχνολογίες προσφέρουν μεν σταθερή σύνδεση σε κάθε σημείο όπου υπάρχει κάλυψη σήματος από το δίκτυο, κάτι που πρακτικά σημαίνει ότι ο συνδρομητής μπορεί να πλοηγείται στα web sites που τον ενδιαφέρουν, να «κατεβάζει» τα e-mail του και να χρησιμοποιεί οποιαδήποτε άλλη υπηρεσία του Internet ακόμη και στη διάρκεια ενός ταξιδιού από τη μία άκρη μιας χώρας στην άλλη, χωρίς καμία σχεδόν διακοπή της σύνδεσης.

Όμως τόσο το GPRS όσο και το 3G διαθέτουν ένα σημαντικό μειονέκτημα, που κράτησε μειωμένη τη συνδρομητική βάση: τις υψηλές χρεώσεις. Παρόλο που ο χρήστης είναι σε συνεχή σύνδεση με το Internet, χωρίς να υφίσταται χρονοχρέωση, η κοστολόγηση της πρόσβασης γίνεται σύμφωνα με τον όγκο των διακινούμενων δεδομένων. Ενδεικτικά στη χώρα μας, 1 MB δεδομένων που στέλνει ή λαμβάνει ο συνδρομητής GPRS/3G φθάνει να κοστολογείται μέχρι και 5 ευρώ, κάτι που καθιστά απαγορευτική τη χρήση της υπηρεσίας ακόμη και για πλοήγηση σε web sites λίγα λεπτά καθημερινά.

Το 2003 η IEEE υιοθέτησε το πρότυπο 802.16, γνωστό και σαν WiMAX (Worldwide Interoperability of Microwave Access), ώστε να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις για ασύρματη πρόσβαση (με σταθερούς ρυθμούς) ευρείας ζώνης και να αντικαταστήσει το Wi-Fi με τα μειονεκτήματά του. Όπως συμβαίνει με τα πρότυπα της σειράς 802 για ασύρματα τοπικά δίκτυα LAN, έτσι και το 802.16 καθορίζει μια οικογένεια προτύπων με επιλογές για συγκεκριμένες ρυθμίσεις.

Το πρότυπο αυτό σχεδιάστηκε ώστε να λειτουργεί σε μια ευρεία μπάνα συχνοτήτων η οποία εκτείνεται από 2 ως 66 GHz. Υποστηρίζει ταχύτητες μετάδοσης ως και 70Mbps στον αέρα ενώ η πραγματική ταχύτητα στο Ethernet υπολογίζεται στα 50Mbps. Οι αποστάσεις που μπορεί να καλυφθούν ξεπερνούν τα 50Km σε συνθήκες οπτικής επαφής. Μια σημαντική διαφορά του προτύπου IEEE 802.16 σε σχέση με το IEEE 802.11 είναι ότι το πρώτο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε συνθήκες μη οπτικής επαφής φυσικά με ρυθμούς μετάδοσης πολύ χαμηλότερους των 50Mbps. Το WiMAX σχεδιάστηκε κατά βάση ώστε να καλύπτει κυρίως point to multipoint (PTM)

συνδέσεις χωρίς ωστόσο να αποκλείεται και η χρήση του για point to point συνδέσεις. Η διαμόρφωση η οποία χρησιμοποιείται ονομάζεται OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Πρόκειται για μια πολύ ανθεκτική διαμόρφωση σε ότι αφορά το φαινόμενο της πολυδιόδευσης ειδικότερα στις συχνότητες άνω των 2 GHz όπου το πρότυπο χρησιμοποιεί.

Οι ταχύτητες μετάδοσης του προτύπου εξαρτώνται από την εκάστοτε ψηφιακή διαμόρφωση που χρησιμοποιείται. Συνήθεις διαμορφώσεις είναι η 64 QAM, η 16 QAM, η QPSK και η BPSK.

Οι διαμορφώσεις QPSK και BPSK είναι για μακρινούς συνδρομητές, η διαμόρφωση 16 QAM για συνδρομητές που βρίσκονται σε μεσαία απόσταση και η διαμόρφωση QAM 64 για κοντινούς συνδρομητές. Όσο πιο μακριά βρίσκεται ο συνδρομητής από τον σταθμό βάσης, τόσο πιο χαμηλός θα είναι ο ρυθμός μετάδοσης. Συνεπώς οι διαμορφώσεις BPSK και QPSK οι οποίες εξασφαλίζουν μεγάλη κάλυψη του συστήματος (χρησιμοποιούνται για συνδρομητές μακριά από την βάση συστήματος) έχουν τον χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, ενώ η διαμόρφωση 64 QAM έχει τον υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης.

Ο Πίνακας 9 απεικονίζει τους τύπους διαμόρφωσης και κωδικοποίησης σε σχέση με τον ρυθμό μετάδοσης.

Πίνακας 9 - Τύποι διαμόρφωσης και ρυθμοί μετάδοσης.

Διαμόρφωση	FEC Coding Rate	Uncoded Burst Rate (Mbps)	End to End Ρυθμαπόδοση Ethernet (Mbps)
BPSK	1/2	6	5.7
BPSK	1/4	9	8.6
QPSK	1/2	12	11.4
QPSK	1/4	18	17
16QAM	1/2	24	22.4
16QAM	3/4	36	33
64QAM	2/3	48	43.2
64QAM	3/4	54	48.1

Εξαιτίας της μεγάλης ποικιλίας τοπικών κανονισμών, κανένα πλάνο συχνότητας δεν έχει προσδιοριστεί για το standard. Κανένα σήμα δεν μπορεί να εξυπηρετήσει όλες τις περιπτώσεις. Για παράδειγμα, η ζώνη 24.5-26,5 GHz στην Ευρώπη ρυθμίζεται από τις απαιτήσεις CEPT που αφορούν την διπλή αναπαραγωγή και διάταξη στο χώρο. Αυτό δεν ταιριάζει με μια παρόμοια κατανομή φάσματος στην Νότια Αμερική.

4.5. Βιβλιογραφία 4^{ου} κεφαλαίου

1. «*Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications*» 2006, ETSI EN 302-307
2. «DVB-S2, Ready for Lift Off» 2004, Alberto Morello and Vittoria Mignone, RAI, Radiotelevisione Italiana
3. «Encapsulation and Framing Efficiency of DVB-S2 Satellite Systems» 2004, M.A. Vazquez Castro A. Cardoso R. Rinaldo, European Space Agency.
4. «Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for Satellite Distribution Systems; guidelines for the use of EN301 790» 2005, DVB Project Office

[Elbert, 1997]

[Cominetti & Morello, 2000]

[Καψάλης & Κωττής, 1997]

Morello & Reimers

Rinaldo et al., 2004]

[Collini-Nocker & Fairhurst, 2003]

[Castro et al., 2004]

5. QoS

5.1. Εισαγωγή

Ο όρος Ποιότητα Παρεχόμενης Υπηρεσίας (Quality of Service – QoS) αναφέρεται στη δυνατότητα ενός δικτύου να παρέχει καλύτερη εξυπηρέτηση σε επιλεγμένη δικτυακή κίνηση. Η δυνατότητα αυτή παρέχεται πάνω από διάφορες τεχνολογίες του στρώματος ζεύξης αλλά και σε οποιοδήποτε δίκτυο χρησιμοποιεί δρομολόγηση IP (π.χ. πρωτόκολλο DiffServ). Ο κύριος στόχος του QoS είναι να εξασφαλίζει προτεραιότητες, είτε αυτό σημαίνει αφιερωμένο εύρος ζώνης, είτε ελεγχόμενες καθυστερήσεις και διακυμάνσεις αυτών (όπως απαιτούνται από ορισμένες real-time και διαδραστικές εφαρμογές) είτε τέλος λιγότερες απώλειες δεδομένων. Πρέπει να τονιστεί ότι παρέχοντας προτεραιότητα σε μία ή περισσότερες ροές κίνησης, δεν πρέπει να προκαλεί την αποτυχία στις άλλες ροές. Οι τεχνολογίες QoS είναι ένα από τα απαραίτητα στοιχεία πάνω στα οποία θα στηρίζονται οι μελλοντικές εφαρμογές παροχής υπηρεσιών δικτύου.

5.2. Θεμέλια του QoS

Ήδη από την αποδοχή ή όχι μιας κλήσης/αίτησης για δεδομένα (Call Admission Control), έχουμε αποφασίσει πόσες και ποιες ροές δεδομένων μπορεί θεωρητικά να εξυπηρετήσει το δίκτυο μας. Αυτό όμως δεν είναι αρκετό από τη στιγμή που οι περισσότερες ροές δεν είναι σταθερού ρυθμού.

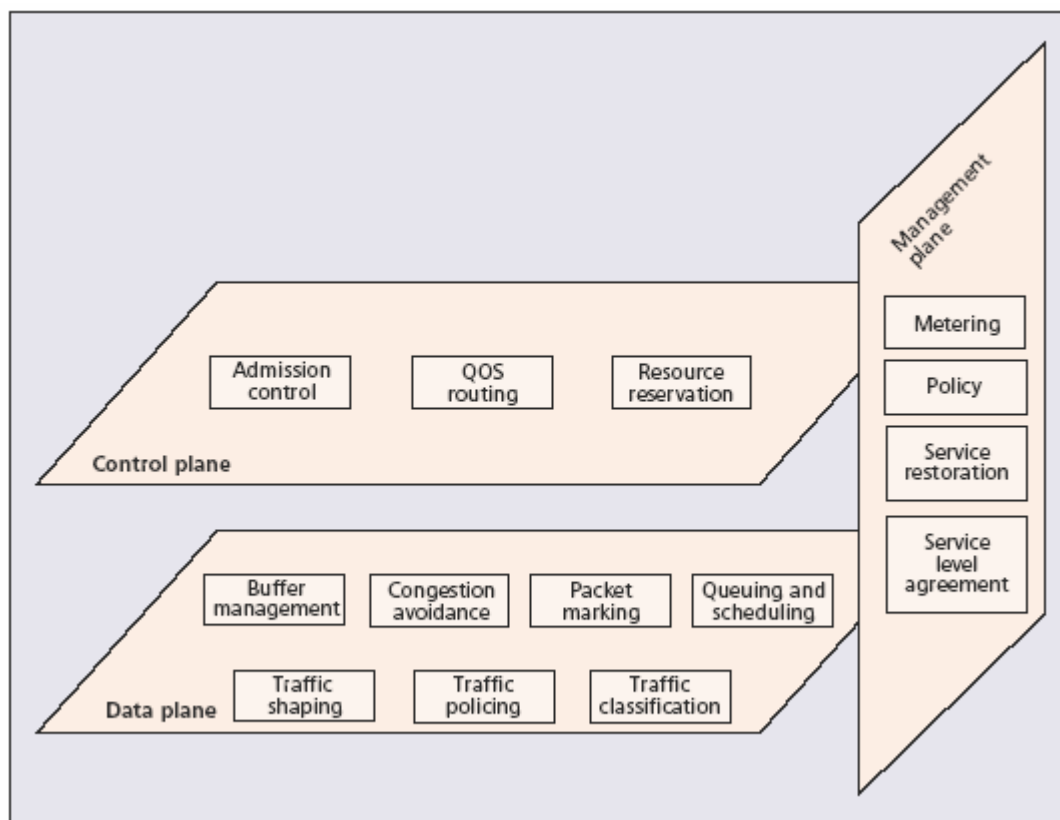
Η βασική ιδέα πίσω από τον όρο QoS είναι το να παρέχουμε καλύτερη εξυπηρέτηση σε ορισμένες ροές. Αυτό γίνεται είτε δίνοντας μεγαλύτερη προτεραιότητα σε μια ροή δεδομένων είτε περιορίζοντας μια άλλη. Χρησιμοποιώντας εργαλεία ελέγχου συμφόρησης (Congestion Control), ανεβάζουμε την προτεραιότητα μιας ροής με το να την τοποθετούμε σε διαφορετικές ουρές αναμονής οι οποίες εξυπηρετούνται με διαφορετικό τρόπο η καθεμία. Τα εργαλεία διαχείρισης ουρών τροποποιούν την προτεραιότητα μιας ουράς με το να απορρίπτουν πακέτα της, πριν ή μετά από άλλες ουρές. Τεχνικές αστυνόμευσης και μορφοποίησης κίνησης δίνουν προτεραιότητα σε μία ροή με το να περιορίζουν την διαμεταγωγή άλλων ροών. Τέλος σε επίπεδο ζεύξης, εργαλεία αποδοτικότητας ζεύξης (Link efficiency tools) περιορίζουν ροές μεγάλου μεγέθους, προτιμώντας μικρότερες ροές.

Τα εργαλεία που αναφέρθηκαν παραπάνω μπορούν να βοηθήσουν στην εξομάλυνση των περισσότερων προβλημάτων συμφόρησης. Παρ' όλα αυτά, πολλές φορές το υπάρχον εύρος ζώνης δεν επαρκεί για να καλύψει την προσφερόμενη κίνηση. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το QoS δεν μπορεί παρά να είναι ημίμετρο. Σε τέτοιες περιπτώσεις μοναδική λύση είναι η αύξηση του εύρους ζώνης.

5.3. Βασική Αρχιτεκτονική QoS

Τα τρία θεμελιώδη κομμάτια που απαρτίζουν την βασική αρχιτεκτονική που χρειαζόμαστε για να εφαρμόσουμε QoS είναι:

- Το επίπεδο ελέγχου, που περιέχει μηχανισμούς ρύθμισης των διαδρομών που ακολουθούν τα δεδομένα. Οι μηχανισμοί αυτοί περιλαμβάνουν την αποδοχή κλήσεων, την QoS δρομολόγηση και την εξασφάλιση πόρων.
- Το επίπεδο δεδομένων, που υλοποιείται σε κάθε στοιχείο του δικτύου ξεχωριστά και διαχειρίζεται κατευθείαν τα δεδομένα. (π.χ. διαχείριση ουρών, έλεγχος συμφόρησης, μορφοποίηση κίνησης κ.ά.)
- Το επίπεδο διαχείρισης, αστυνόμευσης και ανάλυσης της κίνησης ώστε αυτή να ελέγχεται από άκρο σε άκρο.



Σχήμα 5-1 Βασικές δομικές μονάδες του QoS

Παρακάτω θα αναφερθούμε ορισμένα από τα σημαντικότερα κομμάτια αυτής της αρχιτεκτονικής.

5.3.1. Επίπεδο Ελέγχου

- **Αποδοχή Κλήσεων (Admission Control)**

Αυτός ο μηχανισμός ελέγχει την κίνηση που επιτρέπεται να εξυπηρετηθεί από το δίκτυο, κατά προτίμηση με τέτοιο τρόπο που η καινούρια κίνηση να μην προκαλεί υπερφόρτωση στο δίκτυο και υποβάθμιση της ήδη εξυπηρετούμενης κίνησης. Ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων ακολουθεί συνήθως κάποια γενικότερη πολιτική κανόνων του δικτύου.

- **Δρομολόγηση QoS (QoS routing)**

Η δρομολόγηση QoS αφορά την επιλογή της διαδρομής, η οποία ικανοποιεί καλύτερα τις απαιτήσεις ποιότητας που έχουμε θέσει για μια συγκεκριμένη ροή. Η διαδρομή που επιλέγεται δεν είναι πάντα η συντομότερη και απαιτείται πιο πολύπλοκος υπολογισμός καθώς το μέγεθος του δικτύου αυξάνει.

5.3.2. Επίπεδο Δεδομένων

Ο έλεγχος συμφόρησης, η διαχείριση ουρών, η αποδοτικότητα της ζεύξης και η μορφοποίηση κίνησης παρέχουν είναι εργαλεία QoS ξεχωριστά για κάθε στοιχείο του δικτύου.

- **Αναγνώριση και Μαρκάρισμα (Traffic Classification and Packet Marking)**

Τα πακέτα μπορεί να μαρκάρονται ανάλογα με το επίπεδο υπηρεσίας που θα λάβουν. Συνήθως αυτό γίνεται σε ακραίους κόμβους του δικτύου, π.χ. το μαρκάροντας κάποιο πεδίο της IP-header. Αν το μαρκάρισμα γίνεται από το χρήστη, θα πρέπει να ελέγχεται στον δρομολογητή με τον οποίο ο χρήστης συνδέεται. Η μη σύμφωνη κίνηση ενδέχεται να μαρκάρεται με κατάλληλες τιμές, ώστε σε περίπτωση συμφόρησης να απορρίπτεται πρώτη.

- **Έλεγχος Συμφόρησης (Congestion Control)**

Λόγω της εκρηκτικής φύσης τύπων κίνησης όπως το video, η φωνή, μερικές φορές η ποσότητα της κίνησης ξεπερνά τις δυνατότητες της ζεύξης. Τι θα πρέπει να κάνει σε αυτήν την περίπτωση ο διαμεταγωγέας; Να αποθηκεύσει όλα τα δεδομένα σε μία μοναδική ουρά και να τα στείλει με τη σειρά που ήρθαν; Η να τα τοποθετήσει σε διαφορετικές ουρές και να εξυπηρετεί ορισμένες από τις ουρές πιο συχνά; Σε τέτοια ερωτήματα καλούνται να δώσουν απάντηση τα εργαλεία ελέγχου συμφόρησης, με παραδείγματα το Priority Queuing (PQ), Custom Queuing (CQ), Weighted Fair Queuing (WFQ) και το Class-Based Weighted Fair Queuing (CBWFQ).

- **Διαχείριση Ουρών (Buffer Management and Queuing)**

Επειδή οι ουρές δεν έχουν άπειρο μέγεθος, συχνά γεμίζουν και υπερχειλίζουν. Όταν μία ουρά είναι γεμάτη, τα πακέτα που φτάνουν δεν μπορούν να αποθηκευθούν κάπου και έτσι πετιούνται. Αυτό είναι το Tail Drop. Το πρόβλημα σε αυτήν την περίπτωση είναι ότι ο δρομολογητής δεν μπορεί να αποτρέψει την απόρριψη του

πακέτου, ακόμα και αν είναι πακέτο υψηλής προτεραιότητας. Συνεπώς χρειαζόμαστε ένα μηχανισμό που να υλοποιεί τα εξής δύο πράγματα:

1. Να εξασφαλίζει ότι η ουρά δεν γεμίζει, έτσι ώστε να υπάρχει πάντα χώρος για πακέτα υψηλής προτεραιότητας.
2. Να υποστηρίζει κάποια κριτήρια για το πώς θα πετιούνται τα πακέτα χαμηλής προτεραιότητας από τις ουρές.

Παράδειγμα τέτοιου μηχανισμού είναι το Weighted Early Random Detect (WRED)

5.3.3. Επίπεδο Διαχείρισης

Με την QoS διαχείριση καθορίζουμε και αξιολογούμε τις στρατηγικές και τους στόχους που έχουμε θέσει. Συνήθως ακολουθούμε τα παρακάτω βήματα:

Βήμα 1 Καθορισμός των χαρακτηριστικών κίνησης του δικτύου.

Βήμα 2 Εφαρμογή τεχνικών QoS όπως αυτές που περιγράφηκαν παραπάνω

Βήμα 2 Εκτίμηση της απόδοσης του δικτύου, ώστε να ελέγξουμε αν οι στόχοι του QoS έχουν επιτευχθεί.

Χρειάζεται λοιπόν να μετρήσουμε τα χαρακτηριστικά απόδοσης του δικτύου μας βάση κάποιων δεικτών.

5.4. Δείκτες QoS

5.4.1. Δείκτες Ποιότητας Σταθερών Ευρυζωνικών Υπηρεσιών

Οι προτεινόμενοι τεχνικοί δείκτες ποιότητας είναι οι ακόλουθοι :

- i. Τεχνικοί δείκτες για δίκτυα IP ανεξαρτήτου παρεχόμενων υπηρεσιών
 - Μέση Καθυστέρηση μετάδοσης (IPTD – IP Transfer Delay) σε επίπεδο IP
 - Απόκλιση Καθυστέρησης (IPDV – IP Delay Variation) σε επίπεδο IP
 - Απώλεια πληροφορίας (IPLR - IP Loss Ratio) σε επίπεδο IP
 - Διαθεσιμότητα υπηρεσίας / δικτύου σε επίπεδο IP
- ii. Τεχνικοί δείκτες για δίκτυα IP προσανατολισμένοι ανά υπηρεσία
 - Καθυστέρηση μετάδοσης, απόκλιση καθυστέρησης για υπηρεσίες Web - browsing,

- Καθυστέρηση μετάδοσης, απόκλιση καθυστέρησης για υπηρεσίες μεταφοράς αρχείων (Bulk data transfer),
- Καθυστέρηση μετάδοσης, απόκλιση καθυστέρησης για υπηρεσίες ηλεκτρονικού ταχυδρομείου (email)
- Ποσοστό αποτυχίας κλήσεων, χρόνος αποκατάστασης κλήσεων, ποιότητα σύνδεσης ομιλίας για υπηρεσίες VoIP

Δείκτης ποιότητας	Περιγραφή	Είδος μέτρησης
Μέση Καθυστέρηση Μετάδοσης (IP Transfer Delay, IPTD)	Ο μέσος χρόνος που απαιτείται για να μεταδοθούν μέσω του δικτύου IP πακέτα δοκιμής μεταξύ δύο τερματικών σημείων δοκιμής.	Μέσος χρόνος μετάδοσης πακέτων
Απόκλιση Καθυστέρησης (IP Delay Variation, IPDV)	Η απόκλιση καθυστέρησης που υφίστανται τα IP πακέτα για την μετάδοσή τους από ένα κόμβο Α σε ένα κόμβο Β.	Διαφορά της μεγαλύτερης και της μικρότερης καθυστέρησης μετάδοσης πακέτων
Λόγος απώλειας πακέτων (IP packet loss ratio – IPLR)	Το πηλίκο του συνόλου των πακέτων που χάνονται με το συνολικό αριθμό πακέτων που μεταδίδονται	Αριθμός πακέτων που χάνονται/ αριθμό πακέτων που μεταδίδονται
Διαθεσιμότητα Υπηρεσίας	Θεωρείται ότι μία υπηρεσία είναι διαθέσιμη από άκρο σε άκρο όταν ο δείκτης IPLR έχει τιμή μικρότερη από ένα κατώφλι το οποίο διαφοροποιείται ανάλογα με την υπηρεσία	-

5.4.1.i. Τεχνικοί δείκτες για δίκτυα IP ανεξαρτήτου παρεχόμενων υπηρεσιών

Μέση καθυστέρηση μετάδοσης (IP Transfer Delay - IPTD)

Ο δείκτης ορίζεται ως ο μέσος χρόνος που απαιτείται για να μεταδοθούν μέσω του δικτύου IP πακέτα δοκιμής μεταξύ δύο τερματικών σημείων δοκιμής.

Ο δείκτης υπολογίζεται ως εξής:

$$(IPTD)_{mean} = [\sum (A_i - B_i)] / N$$

όπου,

A_i: Ο χρόνος παραλαβής του πακέτου i

B_i: Ο χρόνος μετάδοσης του πακέτου i

N: Ο συνολικός αριθμός των IP δοκιμαστικών πακέτων

Απόκλιση Καθυστέρησης (IP Delay Variation - IPDV)

Η απόκλιση καθυστέρησης υπολογίζεται σύμφωνα με το παράρτημα II του προτύπου ITU-T Y.1541 και υπολογίζεται ως εξής:

$$IPDV = IPDV_{\max} - IPDV_{\min}$$

όπου:

$IPDV_{\max}$: Η μεγαλύτερη καθυστέρηση πακέτου (IPTD) που παρατηρείται εντός του χρονικούδιαστήματος της μέτρησης.

$IPDV_{\min}$: Η μικρότερη καθυστέρηση πακέτου (IPTD) που παρατηρείται εντός του χρονικούδιαστήματος της μέτρησης.

Ο δείκτης εκφράζεται ως το πηλίκο των πακέτων που χάνονται μα τα πακέτα που μεταδίδονται.

Λόγος απώλειας πακέτων (IP packet loss ratio – IPLR)

Ο δείκτης υπολογίζεται ως εξής:

$$IPLR = A/B$$

όπου:

A: Αριθμός πακέτων που χάθηκαν κατά την χρονική διάρκεια της μέτρησης.

B: Συνολικός αριθμός πακέτων που στάλθηκαν κατά την χρονική διάρκεια της μέτρησης.

Ο δείκτης εκφράζεται ως λόγος πακέτων που χάθηκαν με πακέτα που μεταδόθηκαν.

Διαθεσιμότητα Υπηρεσίας (Service Availability)

Ο δείκτης υπολογίζεται με βάση τον δείκτη IPLR και μία υπηρεσία θεωρείται διαθέσιμη από άκρο σε άκρο όταν ο δείκτης IPLR έχει τιμή μικρότερη από ένα κατώφλι (c1) το οποίο διαφοροποιείται ανάλογα με την υπηρεσία.

Για υπηρεσίες κατηγορίας 5 (Class 5) κατά ITU το κατώφλι έχει ορισθεί 0.75 (η υπηρεσία θεωρείται μη διαθέσιμη όταν ο δείκτης ο δείκτης είναι μεγαλύτερος από

0,75 για ένα χρονικό διάστημα 5 λεπτών), ενώ για υπηρεσίες κατηγορίας 0 και 1 οι προτεινόμενες τιμές για το κατώφλι είναι μεταξύ 0,03 και 0,2.

Υπηρεσία	Δείκτες ποιότητας	Περιγραφή	Είδος μέτρησης
Web-browsing (HTML)	Μέση καθυστέρηση προβολής μιας ιστοσελίδας (ITU-T G1010)	Ο χρόνος που απαιτείται για να προβληθεί το περιεχόμενο HTML μιας ιστοσελίδας	Μέσος χρόνος μετάδοσης
Web-browsing (HTML)	Απόκλιση καθυστέρησης προβολής μιας ιστοσελίδας (ITU-T G1010)	Η απόκλιση καθυστέρησης αναφορικά με το χρόνο που απαιτείται για να προβληθεί το περιεχόμενο HTML μιας ιστοσελίδας	Διαφορά της μεγαλύτερης και της μικρότερης καθυστέρησης μετάδοσης
Ηλεκτρονικό Ταχυδρομείο (e-mail)	Μέση καθυστέρηση παραλαβής/αποστολής e-mail (ITU-T G1010)	Ο χρόνος που απαιτείται για να παραληφθεί/αποσταλεί ένα συγκεκριμένο email	Μέσος χρόνος μετάδοσης
Ηλεκτρονικό Ταχυδρομείο (e-mail)	Απόκλιση καθυστέρησης παραλαβής/αποστολής e-mail (ITU-T G1010)	Η απόκλιση καθυστέρησης αναφορικά με το χρόνο που απαιτείται για να παραληφθεί/αποσταλεί ένα email	Διαφορά της μεγαλύτερης και της μικρότερης καθυστέρησης μετάδοσης
Μεταφορά Δεδομένων (Bulk Transfer)	Μέση καθυστέρηση μεταφοράς δεδομένων (bulk transfer) (ITU-T G1010)	Ο χρόνος που απαιτείται για να μεταφερθούν τα δεδομένα	Μέσος χρόνος μετάδοσης
Μεταφορά Δεδομένων (Bulk Transfer)	Απόκλιση καθυστέρησης μεταφοράς δεδομένων (bulk transfer) (ITU-T G1010)	Η απόκλιση καθυστέρησης μετάδοσης δεδομένων	Διαφορά της μεγαλύτερης και της μικρότερης καθυστέρησης μετάδοσης
Υπηρεσίες VoIP	Ποσοστό επιτυχίας κλήσεων VoIP	Λόγος των αποτυχημένων κλήσεων προς το συνολικό αριθμό των αποπειραθέντων κλήσεων σε μια χρονική περίοδο	% εθνικών και διεθνών κλήσεων Αριθμός παρατηρήσεων/διάστημα παρακολούθησης

5.4.1.ii. Τεχνικοί δείκτες για δίκτυα IP προσανατολισμένοι ανά υπηρεσία

Καθυστέρηση (Delay)

Για μετρηση Web-browsing εφαρμογών ο χρόνος καθυστέρησης προβολής μιας ιστοσελίδας ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται από την στιγμή όπου ένας τελικός χρήστης αιτηθεί μία ιστοσελίδα ως το χρόνο που το περιεχόμενο της ιστοσελίδας παρουσιασθεί ολοκληρωμένο στη τερματική συσκευή του τελικού χρήστη. Σημειώνεται ότι σύμφωνα με τη σύσταση της ITU-T G.1010 ο εν λόγω χρόνος καθυστέρησης θα πρέπει να είναι μικρότερος από 4sec για μία ιστοσελίδα συνολικού μεγέθους 10KByte (η εν λόγω ιστοσελίδα θα πρέπει να είναι απλή ιστοσελίδα και δεν θα πρέπει να περιέχει άλλα στοιχεία όπως video κ.ά.).

Για εφαρμογές ηλεκτρονικού ταχυδρομείου (E-mail) ο χρόνος καθυστέρησης παραλαβής/αποστολής ενός email ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για την παραλαβή/αποστολή ενός email από έναν τελικό χρήστη από/προς τον τοπικό email server. Σημειώνεται ότι σύμφωνα με τη σύσταση της ITU-T G.1010 ο εν λόγω χρόνος παραλαβής θα πρέπει να είναι μικρότερος από 4sec για ένα email μεγέθους 10KByte. Η δοκιμή πρόσβασης στο ηλεκτρονικό ταχυδρομείο λαμβάνει χώρα ως προς ένα εξυπηρετητή αναφοράς ηλεκτρονικού ταχυδρομείου. Ένας κύκλος δοκιμής θα πρέπει να περιλαμβάνει upload ενός μηνύματος ηλεκτρονικού ταχυδρομείου χρησιμοποιώντας SMTP και το download χρησιμοποιώντας POP3. Και οι δύο ενέργειες που προαναφέρθηκαν θα πρέπει να αντιπροσωπεύουν τη συμπεριφορά ενός τυπικού τελικού χρήστη. Κατόπιν ενός κύκλου δοκιμής, όλες οι TCP συνδέσεις με το εξυπηρετητή θα πρέπει να διακόπτονται. Η ακεραιότητα του μηνύματος στην εν λόγω δοκιμή είναι σημαντική. Επιπλέον θα δοκιμάζεται η πρόσβαση σε μία web email εφαρμογή (upload και download ενός μηνύματος) η οποία εφαρμογή δεν θα φιλοξενείται σε κάποιον από τους παρόχους οι οποίοι θα είναι υποχρεωμένοι να διεξάγουν τις εν λόγω μετρήσεις (για παράδειγμα Yahoo email ή Google email).

Αφού υπολογισθεί ο χρόνος καθυστέρησης θα υπολογίζεται και ο εκτιμώμενος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων σύμφωνα με το τύπο:

$$\text{Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων} = \frac{\text{όγκος δεδομένων}}{\text{χρόνος καθυστέρησης}}$$

Στις περιπτώσεις όπου υπολογίζεται η μέση καθυστέρηση τότε κατά αντιστοιχία θα υπολογίζεται και ο μέσος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων ο οποίος θα ισούται με το πηλίκο του όγκου δεδομένων προς το μέσο χρόνο καθυστέρησης.

Απόκλιση καθυστέρησης (Delay Variation)

Η απόκλιση καθυστέρησης (delay variation) στο χρόνο παρουσίασης μιας ιστοσελίδας, στην αποστολή / παραλαβή ενός email ή στη μεταφορά ενός αρχείου ανάλογα με τον τύπο υπηρεσίας ορίζεται ως εξής:

$$DV = DV_{\max} - DV_{\min}$$

όπου:

DV_{max} : Η μεγαλύτερη καθυστέρηση (DV) που παρατηρείται εντός του χρονικού διαστήματος της μέτρησης.

DV_{min} : Η μικρότερη καθυστέρηση (DV) που παρατηρείται εντός του χρονικού διαστήματος της μέτρησης.

VoIP και VoD

Ειδικά για τις υπηρεσίες VoIP και VoD ορίζουμε τον παρακάτω δείκτη.

Ποσοστό αποτυχίας κλήσεων

Ο δείκτης αυτός αντιπροσωπεύει τον ρυθμό των επιτυχόντων κλήσεων από την πλευρά του τελικού χρήστη σε ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Το ποσοστό αποτυχίας κλήσεων ορίζεται ως ο λόγος των αποτυχημένων κλήσεων προς τον συνολικό αριθμό των αποπειραθέντων κλήσεων σε μία καθορισμένη χρονική περίοδο.

$$\text{Πιθανότητα αποτυχίας κλήσεων (\%)} = \frac{\text{αριθμός αποτυχημένων κλήσεων}}{\text{συνολικός αριθμός κλήσεων}} * 100$$

Για υπηρεσίες VoIP αποτυχημένη κλήση θεωρείται η απόπειρα κλήσης σε έναν έγκυρο αριθμό, κατάλληλα καλούμενο, η οποία ακολουθείται από τόνο κλήσης, όπου δεν έχει αναγνωριστεί ούτε τόνος κατειλημμένου, ούτε σήμα κλήσης, ούτε σήμα απάντησης στην γραμμή πρόσβασης του καλούμενου τελικού χρήστη μέσα σε χρονικό διάστημα 30 δευτερολέπτων από τη στιγμή, όπου η πληροφορία διεύθυνσης, που απαιτείται για την αποκατάσταση της κλήσης (στην πράξη το τελευταίο ψηφίο του αριθμού του συνδρομητή που καλείται), γίνει δεκτή από το δίκτυο.

5.4.2. Δείκτες Ποιότητας Υπηρεσιών Συστημάτων Κινητών Επικοινωνιών.

Γενικά θα πρέπει να αναφερθεί η βασική ιδιαιτερότητα που έχουν τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών σε σχέση με τα σταθερά, η οποία δεν είναι άλλη από την εξασφάλιση ύπαρξης της διαθεσιμότητας του δικτύου (ραδιοκάλυψη) πριν από τον οποιοδήποτε έλεγχο της ποιότητας της παρεχόμενης υπηρεσίας.

5.4.2.i. Δείκτες ανεξάρτητοι της υπηρεσίας

Η ποιότητα της όποιας παρεχόμενης υπηρεσίας από πλευράς του τελικού χρήστη, ενός συστήματος κινητών επικοινωνιών, καθορίζεται από τα κάτωθι χαρακτηριστικά:

Διατηρησιμότητα υπηρεσίας (service retainability)

Αξιοπιστία υπηρεσίας (service reliability)

Διαθεσιμότητα δικτύου- Ραδιοκάλυψη (network service availability)

Η διαθεσιμότητα ενός δικτύου κινητών επικοινωνιών είναι ο κατεξοχήν παράγοντας για την προσφορά οποιασδήποτε υπηρεσίας μέσω του δικτύου αυτού και εξαρτάται άμεσα από τη ραδιοκάλυψη στο σημείο μέτρησης. Με τον όρο ραδιοκάλυψη μιας γεωγραφικής περιοχής εννοούμε ότι το επίπεδο της έντασης του πεδίου στην εν λόγω περιοχή είναι ίσο ή μεγαλύτερο από μία συγκεκριμένη τιμή (κατώφλι) η οποία εξασφαλίζει την επικοινωνία μεταξύ κινητού τελικού χρήστη και του δικτύου.

Η διαθεσιμότητα του δικτύου προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$\text{Διαθεσιμότητα ραδιοδικτύου (\%)} = \frac{\text{συνολικός αριθμός σημείων μέτρησης που ικανοποιούνται οι παράμετροι ραδιοκάλυψης}}{\text{συνολικός αριθμός σημείων μέτρησης}} * 100$$

Πίνακας 10 Δείκτες προσανατολισμένοι σε VoIP και VoD

Δείκτης Ποιότητας	Περιγραφή
Πιθανότητα εμπλοκής κλήσεων	Η πιθανότητα ένας τελικός χρήστης να μην έχει πρόσβαση στην υπηρεσία εικονοτηλεφωνίας ενώ υπάρχει διαθεσιμότητα του δικτύου.
Πιθανότητα διακοπής κλήσεων	Η πιθανότητα τερματισμού μιας επιτυχημένης προσπάθειας κλήσης για οποιοδήποτε λόγο εκτός από σκόπιμο τερματισμό του καλούντος ή του καλούμενου.
Ποιότητα ήχου	Η ποσοτικοποίηση της «απ'άκρο σ' άκρο» ποιότητας μετάδοσης του ήχου στην υπηρεσία εικονοτηλεφωνίας.
Ποιότητα εικόνας	Η ποσοτικοποίηση της «απ'άκρο σ' άκρο» ποιότητας μετάδοσης της εικόνας στην υπηρεσία εικονοτηλεφωνίας.
Χρόνος εγκατάστασης κλήσεων	Ο χρόνος εγκατάστασης κλήσης είναι ο χρόνος από τη συμπλήρωση της πληροφορίας διεύθυνσης (αριθμός τηλεφώνου) μέχρι τη λήψη ειδοποίησης εγκατάστασης κλήσης (call set-up notification).

Πιθανότητα εμπλοκής κλήσεων (Blocking Error Probability)

Ο δείκτης που αφορά στην εμπλοκή κλήσεων (blocked calls) σε ένα δίκτυο κινητών επικοινωνιών, είναι ο αριθμός των κλήσεων όπου παρουσιάστηκε εμπλοκή, προς το συνολικό αριθμό των κλήσεων, ενώ υπάρχει διαθεσιμότητα του δικτύου

(ικανοποιητική ραδιοκάλυψη). Ποιοτικά ο εν λόγω δείκτης χαρακτηρίζει την προσβασιμότητα στην υπηρεσία φωνής ενός δικτύου.

Η γενικευμένη εξίσωση υπολογισμού του συγκεκριμένου δείκτη είναι η ακόλουθη:

$$\text{Πιθανότητα εμπλοκής κλήσεων (\%)} = \frac{\text{αριθμός κλήσεων όπου υπήρξε εμπλοκή}}{\text{συνολικός αριθμός κλήσεων}} * 100$$

Πιθανότητα διακοπής κλήσης (Drop Call Probability)

Η πιθανότητα διακοπής κλήσης είναι η πιθανότητα τερματισμού μιας επιτυχημένης προσπάθειας κλήσης για οποιοδήποτε λόγο εκτός από σκόπιμο τερματισμό του καλούντος ή του καλούμενου, ενώ υπάρχει διαθεσιμότητα του δικτύου (ικανοποιητική ραδιοκάλυψη).

Η γενικευμένη εξίσωση υπολογισμού του συγκεκριμένου δείκτη είναι η ακόλουθη:

$$\text{Πιθανότητα διακοπής κλήσεων (\%)} = \frac{\text{τερματισμένες χωρίς πρόθεση κλήσεις}}{\text{συνολικός αριθμός κλήσεων}} * 100$$

Για λόγους παρουσίασης και με στόχο την καλύτερη αντίληψη των αποτελεσμάτων από τον τελικό χρήστη, προτείνεται τα αποτελέσματα των παραπάνω δεικτών να παρουσιάζουν την πιθανότητα πρόσβασης αντί της πιθανότητας εμπλοκής.

Η σχέση που συνδέει τους δύο αυτούς δείκτες είναι συμπληρωματική και δίνεται από τον τύπο:

$$\text{Πιθανότητα πρόσβασης στην υπηρεσία(\%)} = (1-\text{Πιθανότητα εμπλοκής της υπηρεσίας})\%$$

Χρόνος εγκατάστασης κλήσης (Call Setup Time)

Ο χρόνος εγκατάστασης κλήσης είναι ο χρόνος από τη συμπλήρωση της πληροφορίας διεύθυνσης (δηλ. τον αριθμό τηλεφώνου) μέχρι τη λήψη ειδοποίησης εγκατάστασης κλήσης (call set-up notification).

Η γενικευμένη εξίσωση υπολογισμού του συγκεκριμένου δείκτη είναι η ακόλουθη:

$$\text{Χρόνος εγκατάστασης κλήσης [s]} = t_{\text{connection established}} - t_{\text{customer presses send button on UE}}$$

Ποιότητα φωνής

Ο συγκεκριμένος δείκτης αντιπροσωπεύει την ποσοτικοποίηση της «απ' άκρο σ' άκρο» παρεχόμενης ποιότητας μετάδοσης της φωνής της υπηρεσίας εικονοτηλεφωνίας. Ο υπολογισμός της ποιότητας φωνής γίνεται σε βάση ολοκληρωμένων κλήσεων (κλήσεις όπου ο τερματισμός τους έγινε από τον τελικό χρήστη).

Η μέτρηση της «απ' άκρο σ' άκρο» ποιότητας γίνεται με χρήση της κλίμακας QOS_LQO, η οποία ποσοτικοποιεί την προσπάθεια που χρειάζεται για να γίνει κατανοητή μια ομιλία κατά τη διάρκεια της κλήσης. Συνεπώς ο δείκτης που αφορά στην ποιότητα φωνής ορίζεται ως:

$$\text{Ποιότητα φωνής σε επίπεδο κλήσης [received A side]} = f(MOS_{LQO})$$

$$\text{Ποιότητα φωνής σε επίπεδο κλήσης [received B side]} = f(MOS_{LQO})$$

Ο δείκτης MOS παίρνει τιμές από 1 έως 5, με 1 να σημαίνει ότι δεν υπήρξε ουσιαστικά επικοινωνία και το 5 ότι η επικοινωνία ήταν άριστη.

Ποιότητα video

Ο συγκεκριμένος δείκτης αντιπροσωπεύει την ποσοτικοποίηση της «απ' άκρο σ' άκρο» παρεχόμενης ποιότητας μετάδοσης του video της υπηρεσίας εικονοτηλεφωνίας. Ο υπολογισμός της ποιότητας video γίνεται σε βάση ολοκληρωμένων κλήσεων (κλήσεις όπου ο τερματισμός τους έγινε από τον τελικό χρήστη).

Η μέτρηση της «απ' άκρο σ' άκρο» ποιότητας γίνεται με χρήση της κλίμακας MOS_VQO, η οποία ποσοτικοποιεί την υποβάθμιση της ποιότητας της μεταδιδόμενης εικόνας κατά την κλήση, σε σχέση με την εικόνα αναφοράς. Συνεπώς ο δείκτης που αφορά στην ποιότητα video ορίζεται ως:

$$\text{Ποιότητα video σε επίπεδο κλήσης [received A side]} = f(MOS_{VQO})$$

$$\text{Ποιότητα video σε επίπεδο κλήσης [received B side]} = f(MOS_{VQO})$$

Ο δείκτης MOS παίρνει τιμές από 1 έως 5, με 1 να σημαίνει ότι δεν υπήρξε ουσιαστικά επικοινωνία και το 5 ότι η επικοινωνία ήταν άριστη.

Πίνακας 11 Δείκτες προσανατολισμένοι σε Web Browsing

Δείκτες ποιότητας	Περιγραφή
Μέσος ρυθμός	Ο μέσος ρυθμός μεταφοράς δεδομένων μετρημένος

μεταφοράς
δεδομένων
Ρυθμός αποτυχίας
μεταφοράς
δεδομένων

καθ' όλη τη διάρκεια της κλήσης, μετά την
επιτυχημένη εγκατάσταση σύνδεσης δεδομένων.

Το ποσοστό των μη ολοκληρωμένων μεταφορών
δεδομένων ως προς τον συνολικό αριθμό προσπαθειών.

Πιθανότητα αποτυχίας μεταφοράς δεδομένων http

Το ποσοστό των μη ολοκληρωμένων προσπαθειών μεταφοράς δεδομένων σε επίπεδο HTTP ως προς τον συνολικό αριθμό προσπαθειών.

Η γενικευμένη εξίσωση υπολογισμού του συγκεκριμένου δείκτη είναι η ακόλουθη:

$$\text{Πιθανότητα αποτυχίας μεταφοράς δεδομένων HTTP (\%)} = \frac{\text{μη ολοκληρωμένες προσπάθειες μεταφοράς δεδομένων HTTP}}{\text{επιτυχώς αρχικοποιημένες προσπάθειες μεταφοράς}}$$

Μέσος ρυθμός δεδομένων HTTP [Kbps]

Ο μέσος ρυθμός μεταφοράς δεδομένων μετρημένος καθ' όλη την διάρκεια της κλήσης, μετά την επιτυχημένη εγκατάσταση σύνδεσης δεδομένων.

Η γενικευμένη εξίσωση υπολογισμού του συγκεκριμένου δείκτη είναι η ακόλουθη:

$$\text{Μέσος ρυθμός δεδομένων HTTP [kbps]} = \frac{\text{όγκος δεδομένων που μεταφέρθηκαν}}{t_{\text{content received}} - t_{\text{dial-up connection initiated}}}$$

5.5. Βιβλιογραφία 5^ο κεφαλαίου

1. «Δημόσια Διαβούλευση αναφορικά με τον καθορισμό των προς μέτρηση παραμέτρων ποιότητας των παρεχόμενων προς το κοινό υπηρεσιών ηλεκτρονικών επικοινωνιών, τον προσδιορισμό του περιεχομένου και της μορφής των προς δημοσίευση πληροφοριών καθώς και του τρόπου και χρόνου δημοσίευσής τους από τους παρόχους ηλεκτρονικών επικοινωνιών» 2007, Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων
2. «*Quality of Service Networking*» Chapter 49 of “Internetworking Technologies Handbook” by CISCO
3. «*Congestion Management Overview*» Chapter from “Cisco IOS Quality of Service Solutions Configuration Guide” by CISCO
4. «*An Architectural Framework for Support of Quality of Service in Packet Networks*» 2003, Hui-Lan Lu and Igor Faynberg, Bell Laboratories/Lucent Technologies

6. Υπηρεσίες

6.1. Κατηγορίες Κίνησης

Η Προδιαγραφή της ETSI για τις κατηγορίες κίνησης καθορίζει ότι μία κατηγορία κίνησης είναι μία γενική έννοια, που αφορά κάθε στάδιο της ροής δεδομένων. Με άλλα λόγια, κάθε κατηγορία ανταποκρίνεται σε χαρακτηριστικά της υπηρεσίας από άκρη σε άκρη. Κάθε κατηγορία κίνησης ορίζεται από ένα σύνολο χαρακτηριστικών.

Για τα HAPs μπορούμε να διακρίνουμε τις τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες κίνησης που φαίνονται στον Πίνακα 12, βασισμένες στις κατηγορίες που αναφέρονται στο TS 123 107 (ETSI), και των οποίων τα χαρακτηριστικά δίνονται στον Πίνακα 13.

Πίνακας 12 Κατηγορίες Κίνησης

Κατηγορία Κίνησης	Προτεινόμενη Χρήση	Παραδείγματα Εφαρμογών
Conversational	Κίνηση συζήτησης πραγματικού χρόνου, με οντότητες που συνομιλούν	Τηλεφωνία, τηλεδιάσκεψη, εικονοτηλεφωνία, chat, παιχνίδια
Streaming	Κίνηση ροής πραγματικού χρόνου, με αποστολή πληροφορίας από μία οντότητα στην άλλη	Εκπομπή εικόνας και ήχου, υπηρεσίες παρακολούθησης
Interactive	Διαδραστική κίνηση σχεδόν πραγματικού χρόνου, με ανάκτηση πληροφορίας από μία οντότητα.	Περιήγηση στο web
Background	Κίνηση υπόβαθρου σχεδόν πραγματικού χρόνου, με αποστολή πληροφορίας από μία οντότητα στην άλλη	E-mail και μεταφορά αρχείων

Πίνακας 13 Χαρακτηριστικά Κίνησης

Κατηγορία Κίνησης	Περιεχόμενο	Γενικά Χαρακτηριστικά Κίνησης
Conversational	Ομιλία, Ήχος, Βίντεο, Δεδομένα, Πολυμέσα	Constant Rate (CR) και Variable Rate (VR) Ευαισθησία σε καθυστέρηση, διακύμανση καθυστέρησης. Περιορισμένη ανοχή σε απώλειες/λάθη πακέτων (ανάλογα με την κωδικοποίηση)
Streaming	Ήχος, Βίντεο, Δεδομένα	Μεταβλητού Ρυθμού, Ανοχή σε καθυστέρηση, Ευαισθησία σε διακύμανση καθυστέρησης, Περιορισμένη ανοχή σε απώλειες/λάθη πακέτων (ανάλογα με την κωδικοποίηση)
Interactive	Δεδομένα	Μεταβλητού Ρυθμού, Ευαισθησία σε καθυστέρηση (όχι όσο η conversational), Ανοχή σε διακύμανση καθυστέρησης, Ευαισθησία σε λάθη/απώλειες
Background	Δεδομένα	Best Effort (BE), Καμία ευαισθησία σε καθυστέρηση,

Κατηγορία Κίνησης	Περιεχόμενο	Γενικά Χαρακτηριστικά Κίνησης
		Ανοχή σε διακύμανση καθυστέρησης (πιο ανεκτικό από Interactive), Ευαισθησία σε λάθη/απώλειες

Ο κύριος παράγοντας διαφοροποίησης μεταξύ των τεσσάρων κατηγοριών κίνησης είναι η ευαισθησία στην καθυστέρηση. Αντίθετα με τους δορυφόρους, όπου έχουμε ουσιαστικά την ίδια δομή κατηγοριών κίνησης, η καθυστέρηση διάδοσης μέσω HAPs είναι μάλλον ασήμαντη. Η Conversational κατηγορία προορίζεται για κίνηση με τη μεγαλύτερη ευαισθησία σε καθυστέρηση ενώ η Background είναι η πιο ανεκτική.

Οι Conversational και Streaming κατηγορίες προορίζονται να υποστηρίξουν ροές κίνηση πραγματικού χρόνου. Οι υπηρεσίες πραγματικού χρόνου με τη μεγαλύτερη ευαισθησία σε καθυστέρηση, όπως η εικονοτηλεφωνία, είναι οι πιο κατάλληλες για την κατηγορία Conversational.

Οι Interactive και Background κατηγορίες είναι κυρίως κατάλληλες στην υποστήριξη παραδοσιακών υπηρεσιών του Internet, όπως τα WWW, E-mail, Telnet και FTP. Λόγω πιο χαλαρών απαιτήσεων σε καθυστέρηση (σε σχέση με τις άλλες δύο κατηγορίες που αναφέραμε προηγουμένως), αυτές οι κατηγορίες κίνησης συνήθως έχουν καλύτερο ρυθμό λαθών, με καλύτερη κωδικοποίηση καναλιού και λιγότερες επανεκπομπές. Η κύρια διαφορά της Interactive κίνησης από την Background είναι ότι η πρώτη χρησιμοποιείται για διαδραστικές εφαρμογές όπως η περιήγηση στο web, ενώ η Background κίνηση προορίζεται για κίνηση που δεν φαίνεται στο προσκήνιο, όπως το κατέβασμα αρχείων. Με το να τοποθετούμε αυτά τα δύο είδη κινήσεων σε διαφορετικές κατηγορίες, βελτιώνουμε την αποκρισιμότητα των interactive υπηρεσιών, αφού οι background υπηρεσίες χρησιμοποιούν πόρους της εκπομπής μόνο όταν δεν τις χρειάζονται άλλες interactive εφαρμογές.

6.2. Σενάρια Λειτουργίας και Υπηρεσιών σε HAPs

Οι δύο κύριες κατηγορίες πιθανής χρήσης των HAPs είναι:

- Η παροχή εφαρμογών/υπηρεσιών σε μικρές και μεσαίες υπηρεσίες (SME – Small to Medium Enterprises) και σε οικιακούς χρήστες, σε μακροχρόνια βάση.
- Η παροχή επικοινωνιών ευρείας ζώνης για βραχυπρόθεσμες εφαρμογές, όπως η αποκατάσταση καταστροφών.

Η αγορά των ευρυζωνικών υπηρεσιών αποτελείται κυρίως από τους τύπους χρηστών:

- Επιχειρήσεις
 - Εταιρικές επιχειρήσεις
 - Επιχειρήσεις SOHO

- Τηλεεργασία
- Οικίες
 - Υπηρεσίες ψυχαγωγίας
 - Υπηρεσίες πληροφόρησης
- Κυβερνήσεις (επίπεδο περιοχής, κράτους και EU)
- Στρατός

Για κάθε μια από τις παραπάνω ομάδες χρηστών μπορούμε να καθορίσουμε μια ομάδα υπηρεσιών, περιλαμβάνοντας σταθερούς όσο και κινητούς χρήστες. Όλες οι πιθανές υπηρεσίες που μπορούν να υποστηριχθούν αναφέρονται παρακάτω:

- Ιδιωτικές συνδέσεις υψηλού ρυθμού σημείο προς σημείο
- Επικοινωνίες σε προσωρινές καταστάσεις (περιοχές καταστροφών, Ολυμπιακοί αγώνες)
- Επικάλυψη επίγειων ζεύξεων για ανθεκτικότητα (ανάκτηση σφάλματος ζεύξης)
- Υποστήριξη (backhaul) σημείου hotspot W-LAN
- W-LAN σε τραίνα και λεοφορεία (backhaul)
- Φωνή
 - Τηλεφωνία
 - Voice over IP
- Διαδίκτυο
 - Ευρυζωνική πρόσβαση σε εφαρμογές και υπηρεσίες του Διαδικτύου
- Μεταφορά Αρχείων (FTP)
- Ψυχαγωγία
 - Εκπομπή Ραδιοφώνου και Τηλεόρασης
 - Video on Demand
 - Παιχνίδια
- Τηλεμάθηση
 - Πανεπιστήμια
 - Σχολεία
 - Επιχειρήσεις
 - Οικίες
- Τηλεϊατρική
 - Ενδονοσοκομειακή Χρήση
 - Σε περιοχές καταστροφών
 - Σε αναπτυσσόμενες χώρες
- Επικοινωνίες για επείγουσες υπηρεσίες σε κινητούς και σταθερούς χρήστες (Αστυνομία, Πυροσβεστική, Ομάδες Διάσωσης, ΕΚΑΒ)
- Υπηρεσίες παρακολούθησης (με βίντεο και υπέρυθρες) και απομακρυσμένου ελέγχου

Μπορούμε τώρα να αναφερθούμε εκτενέστερα σε αυτές τις υπηρεσίες που έχουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον σε σχέση με τις HAP πλατφόρμες.

6.2.1. Ευρυζωνική Πρόσβαση στο Internet

Το ευρυζωνικό Internet είναι μία εφαρμογή κλειδί για επιχειρήσεις και οικιακούς χρήστες.

Οικιακοί Χρήστες

Η αγορά των δραστηριοτήτων μέσω διαδικτύου με ασύμμετρες απαιτήσεις (περιήγηση και κατέβασμα αρχείων), αλλά και για συμμετρικές υπηρεσίες (ανταλλαγή αρχείων με p2p) αναπτύσσεται συνεχώς. Οι υπηρεσίες που προσφέρονται στο μέσο οικιακό χρήστη είναι πολυάριθμες και περιλαμβάνουν:

- E-mail
- Home Banking
- E-shopping
- Υπηρεσίες πληροφοριών και κρατήσεων (π.χ. ξενοδοχεία, κινηματογράφοι)
- Υπηρεσίες Ειδήσεων
- Ψυχαγωγία
- Εγκυκλοπαίδειες
- Κοινωνική Δικτύωση
- Φιλοξενία Ιστοσελίδων

Η εμπειρία πολλών από αυτών των εφαρμογών βελτιώνεται αισθητά από μία ευρυζωνική πρόσβαση, ειδικά σε περιπτώσεις που έχουμε περιεχόμενο σε μορφή βίντεο. Το ADSL βέβαια, με τη χρήση του απλού ζεύγους χαλκού του δικτύου τηλεφωνίας, προσφέρει ήδη πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης σε πολλούς κατοίκους παγκοσμίως. Ωστόσο πολλοί κάτοικοι σε απομακρυσμένες περιοχές ή σε χώρες χωρίς ανάπτυξη των επίγειων δικτύων, είναι πιθανό να αργήσουν να αποκτήσουν ευρυζωνική πρόσβαση με ADSL.

Τα HAPs είναι ανεξάρτητα από τα επίγεια δίκτυα πρόσβασης και έχουν την δυνατότητα να προσφέρουν ταχύτητες συγκρίσιμες ή και μεγαλύτερες από αυτές του ADSL.

Ευρυζωνική Πρόσβαση για SOHO και SME

Το ADSL είναι ήδη διαθέσιμο σε πολλές μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις και οικιακά γραφεία. Ωστόσο:

- Πολλές περιοχές, ειδικά σε επαρχιακές τοποθεσίες, δεν εξυπηρετούνται ακόμα
- Ο ρυθμός μετάδοσης στο ADSL περιορίζεται από την απόσταση του χρήστη από το DSLAM

Τα HAPs, όπως είπαμε και πιο πάνω, έχουν τη δυνατότητα να δώσουν λύση σε αυτά τα προβλήματα.

6.2.2. Ευρυζωνική Πρόσβαση στο Intranet Εταιρειών

Εταιρείες με γραφεία και εγκαταστάσεις διασκορπισμένες σε ξεχωριστές τοποθεσίες, συχνά χρειάζονται μια κοινή πρόσβαση στο ενδοδίκτυο της εταιρείας,

πάντα μέσω κάποιου τείχους προστασίας. Παρόλο που μερικές τοποθεσίες μπορεί να διαθέτουν επίγεια ευρυζωνική πρόσβαση, δεν είναι σίγουρο ότι αυτό θα ισχύει για όλες.

Ακόμα και αν το ADSL είναι διαθέσιμο, πολλές φορές απαιτούνται ταχύτητες μεγαλύτερες από αυτές που προσφέρει. Πιθανές υπηρεσίες είναι:

- E-mail
- Πρόσβαση σε έγγραφα
- Μεταφορά αρχείων (FTP)
- Ανταλλαγή αρχείων
- Κύκλωμα τηλεόρασης

6.2.3. Βιντεοδιάσκεψη

Όπως καθορίζεται στο project HeliNet, η βιντεοδιάσκεψη είναι μία εξειδικευμένη υπηρεσία προσανατολισμένη στις SMEs, και προϋποθέτει downlink ταχύτητας 3 Mbit/s. Υποθέτοντας μία μέγιστη ταχύτητα 18 Mbit/s ανά κυψέλη αφιερωμένη σε βιντεοδιάσκεψη, έχουμε 6 διαθέσιμα κανάλια (δύο δρόμων) ανά κυψέλη.

Ωστόσο η διαθέσιμη χωρητικότητα είναι εξαρτάται πάρα πολύ από τη χρησιμοποιούμενη κωδικοποίηση. Με τους σύγχρονους κωδικοποιητές γίνεται δυνατή η μετάδοση αποδεκτής ποιότητας βίντεο ακόμα και με ταχύτητα ζεύξης π.χ. 384 Kbits/s. Ένας αριθμός παρόχων προσφέρει υπηρεσίες βιντεοδιάσκεψης σε παγκόσμιο επίπεδο, και τα HAPs θα μπορούσαν να αποτελέσουν μέρος αυτής της εφαρμογής.

6.2.4. Ψυχαγωγία

Οι υπηρεσίες ψυχαγωγίας απευθύνονται περισσότερο σε οικιακούς χρήστες, αλλά δεν αποκλείεται η διανομή περιεχομένου και σε πελάτες όπως κινηματογράφοι, δημόσια σπίτια κτλ. Μπορούμε να έχουμε διανομή ψυχαγωγικού περιεχομένου είτε μέσω Internet (Internet Radio, Video streaming), είτε εκτός Internet (διανομή δορυφορικού/επίγειου Ραδιοφώνου/Τηλεόρασης μέσω DVB).

Για τη λήψη των δεδομένων των υπηρεσιών ψυχαγωγίας σε σταθερές εγκαταστάσεις απαιτείται κεραία σε απ' ευθείας οπτική επαφή με το HAP. Ο εξοπλισμός του εσωτερικού χώρου σε αυτήν την περίπτωση θα είναι παρόμοιος με αυτόν που χρησιμοποιείται ήδη για αντίστοιχες δορυφορικές υπηρεσίες.

- **Τηλεόραση και Ραδιόφωνο**

Η τηλεόραση και το ραδιόφωνο είναι βασικά υπηρεσίες ευρυεκπομπής οι οποίες απαιτούν απλά, χαμηλού κόστους τερματικά λήψης. Με τερματικά δύο δρόμων μπορούμε να έχουμε υποστήριξη πιο εξελιγμένων υπηρεσιών όπως διαδραστική τηλεόραση, πρόσβαση στο Internet κτλ.

Το πρότυπο που αυτήν τη στιγμή έχει τη μεγαλύτερη ανάπτυξη στην Ευρώπη είναι το DVB, και συγκεκριμένα το DVB-S2 που απευθύνεται σε δορυφορικές επικοινωνίες. Σε επόμενη ενότητα θα μελετήσουμε αναλυτικά τις διάφορες υπηρεσίες που υποστηρίζει αυτό το πρότυπο καθώς και με ποιο τρόπο. Τα πλεονεκτήματα που μπορεί να φέρει το HAP στην χρήση αυτού του προτύπου είναι οι μικρές καθυστερήσεις διάδοσης, που θα επιτρέψουν την καλύτερη υποστήριξη διαδραστικών εφαρμογών στον τελικό χρήστη. Έτσι υπηρεσίες με σημαντικές απαιτήσεις σε QoS, όπως το VoIP, θα είναι παρέχονται στο χρήστη χωρίς την αγορά επιπλέον εξοπλισμού. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι το μικρότερο ίχνος κάλυψης του HAP, που επιτρέπει την εκπομπή περιεχομένου που απευθύνεται σε μικρότερες περιοχές, σε αντίθεση με το ίχνος των δορυφόρων που καλύπτει τεράστιες εκτάσεις. Επίσης τα HAPs θα μπορούν έτσι να παρέχουν τηλεόραση σε απομονωμένες περιοχές, όπως μικρές χώρες ή νησιωτικά συμπλέγματα. Μία πιθανή αγορά που μπορεί να ευνοηθεί από τα HAPs λοιπόν, είναι αυτή των καναλιών που θα προσφέρουν τηλεόραση τοπικής εμβέλειας, όπως στις Η.Π.Α..

Μία άλλη πιθανή χρήση των HAPs θα είναι η διανομή περιεχομένου σε τοπικούς επίγειους πομπούς, ώστε μετά οι χρήστες να μη χρειάζεται να έχουν κάποιο εξειδικευμένο εξοπλισμό.

- **Video on Demand**

Τα HAPs, με τον καλύτερο προϋπολογισμό ζεύξης και την επαναχρησιμοποίηση συχνότητας, είναι σε καλύτερη θέση να υποστηρίξει συνδέσεις σημείου προς σημείο από τους δορυφόρους. Το VoD έχει τεράστιες προοπτικές ανάπτυξης. Επειδή είναι πάρα πολύ ασύμμετρο όσον αφορά τις απαιτήσεις σε bandwidth, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί κάποιο επίγειο δίκτυο όπως το PSTN για την πραγματοποίηση αιτήσεων, με αποτέλεσμα τη χρήση φθηνών τερματικά μόνο λήψης για την επικοινωνία με το HAP.

Τα προβλήματα που παρουσιάζονται είναι αυτά της επιλογής της θέσης του εξυπηρετητή περιεχομένου και της επίδρασης του μεγάλου όγκου δεδομένων στη backhaul ζεύξη. Επίσης πρέπει να γίνει η επιλογή μεταξύ της ζωντανής παροχής της υπηρεσίας, όπου ο χρήστης ζητάει και βλέπει το περιεχόμενο σε πραγματικό χρόνο, και του κατεβάσματος του περιεχομένου και αποθήκευσης σε κάποιο μέσο αποθήκευσης, απ' όπου ο χρήστης μπορεί να το αναπαράγει αργότερα..

- **Παιχνίδια**

Τα ηλεκτρονικά παιχνίδια μέσω δικτύου παρουσιάζουν όλο και μεγαλύτερη δημοτικότητα. Τα παιχνίδια γίνονται όλο και πιο πολύπλοκα και συνεπώς και πιο απαιτητικά σε ταχύτητα. Ένα χαρακτηριστικό τους είναι ότι δημιουργούν συμμετρική κίνηση και άρα δεν ικανοποιούνται πλήρως από το ADSL (δεν συμβαίνει το ίδιο όμως και με το DSL), ενώ πολλές φορές και οι καθυστερήσεις που εισάγονται δεν είναι αποδεκτές. Τα HAPs πιθανόν να είναι η λύση.

6.2.5. Τηλεμάθηση

Η τηλεμάθηση είναι μια πολύ χρήσιμη υπηρεσία για:

- Πανεπιστήμια

- Σχολεία
- Επιχειρήσεις
- Οικίες

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι τηλεμάθησης, οι ζωντανές συνεδρίες και τα διαδραστικά μαθήματα.

Οι ζωντανές συνεδρίες είναι κατά βάση διαλέξεις που εκπέμπονται ζωντανά σε όλους τους σπουδαστές. Ένα κανάλι επιστροφής παρέχεται ώστε να μπορεί ο σπουδαστής να κάνει ερωτήσεις, να δίνει απαντήσεις σε δοκιμασίες κτλ. Η συγκεκριμένη ανταλλαγή δεδομένων είναι επομένως ασύμμετρη. Η διάλεξη θα στέλνεται από την πηγή, π.χ. το πανεπιστήμιο, είτε κατευθείαν στο HAP και μετά στον χρήστη, είτε μέσω του δικτύου πυρήνα στο HAP, που είναι και το πιο πιθανό σενάριο. Οι σπουδαστές θα λαμβάνουν τη διάλεξη από το HAP μέσω του τερματικού τους και θα επιστρέφουν δεδομένα είτε μέσω του καναλιού επιστροφής του τερματικού τους, είτε και από το υπάρχον επίγειο δίκτυο (PSTN). Οι απαιτήσεις σε ρυθμό μετάδοσης προς το χρήστη θα είναι ανάλογες με αυτές της βιντεοδιάσκεψης, δηλαδή μεταξύ 300 Kb/s και 1 Mb/s, και αρκεί για μετάδοση της κινούμενης εικόνας του λέκτορα και ενός ακίνητου φόντου. Κάποια βοηθήματα, όπως πίνακες, διαφάνειες, φωτογραφίες κτλ χρειάζονται επίσης ένα σημαντικό ίσως κομμάτι εύρους ζώνης. Ο απαραίτητος εξοπλισμός θα περιλαμβάνει πιθανότατα ένα PC συνδεδεμένο με ένα HAP τερματικό. Η επιστροφή από τους χρήστες μπορεί απλά να είναι ήχος, αλλά πολύ χρήσιμο θα είναι να παρεχόταν η σύνδεση με PC ώστε να έχουμε επιστροφή δεδομένων από κείμενα, πίνακες κτλ. Τα HAPs μπορούν να προσφέρουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης στο κανάλι επιστροφής, αλλά ίσως να μην είναι και τόσο εφικτό στον οικιακό χρήστη από οικονομική άποψη.

Τα διαδραστικά μαθήματα είναι μια δομημένη μέθοδος μάθησης όπου ο σπουδαστής ακολουθεί ένα συγκεκριμένη πορεία μαθημάτων που είναι προσαρμοσμένη στις ανάγκες του. Η πρόοδος του ελέγχεται μέσω τεστ, τα αποτελέσματα των οποίων καθορίζουν και την πορεία που θα ακολουθηθεί. Υπάρχουν πολλά παραδείγματα διαδραστικών μαθημάτων στο Internet. Το πλεονέκτημα μιας ευρυζωνικής σύνδεσης είναι ότι αποκτούμε πρόσβαση σε πιο πλούσιο υλικό χωρίς μεγάλες καθυστερήσεις για το κατέβασμα.

Η τηλεμάθηση δίνει σημαντικά κοινωνικά οφέλη, σε πολίτες που δεν μπορούν να παρακολουθήσουν ένα πανεπιστημιακό πρόγραμμα πλήρους χρόνου. Ακόμα δίνει τη δυνατότητα σε πανεπιστήμια να κάνουν διαλέξεις σε άλλους εκπαιδευτικούς οργανισμούς.

6.2.6. Τηλεϊατρική

Η τηλεϊατρική είναι μια εφαρμογή χρήσιμη σε:

- Ενδονοσοκομειακές χρήσεις
- Ιατρεία και δημόσια κέντρα υγείας
- Περιοχές καταστροφών
- Αναπτυσσόμενες χώρες

Και στην περίπτωση της τηλεϊατρικής οι μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται είναι παρόμοιοι με αυτούς της τηλεμάθησης. Μπορούμε να έχουμε την μετάδοση μιας

εγχείρησης ή μιας διάγνωσης σε φοιτητές, ή ένα γιατρό / μία νοσοκόμα σε μία απομακρυσμένη περιοχή να στέλνει ζωντανά εικόνα από ένα ασθενή και να του παρέχονται συμβουλές από ειδικούς, μέσω του καναλιού επιστροφής. Οι πιθανές χρήσεις της τηλεϊατρικής επεκτείνονται σε μεγάλο εύρος. Οι πληροφορίες θα μπορούν να είναι διαθέσιμες είτε μέσω του ιατρικού Intranet, είτε σε πολίτες μέσω του Internet. Άλλωστε τέτοιου είδους πληροφορίες είναι ήδη διαθέσιμες στο Internet, αλλά λόγω κυρίως των βίντεο πολύ υψηλής ποιότητας που απαιτούνται και των οποίων οι ρυθμοί μετάδοσης ξεπερνούν αυτούς της βιντεοδιάσκεψης, οι ευρυζωνικές συνδέσεις μπορούν να παίξουν καταλυτικό ρόλο.

6.2.7. Επικοινωνίες σε Περιοχές Καταστροφών

Τα HAPs μπορούν να αναπτύσσονται άμεσα και επομένως είναι σε θέση να παρέχουν υπηρεσίες υψηλής ποιότητας αστραπιαία σε τοποθεσίες όπου έχει συμβεί μια καταστροφή. Τα HAPs είναι ικανά να παρέχουν μία σειρά από επικοινωνιακές συνδέσεις ανάμεσα σε φορείς όπως πυροσβεστική, αστυνομία, μονάδες διάσωσης και ιατρούς, καθώς και σύνδεση ευρείας ζώνης με το δίκτυο πυρήνα.

Πρέπει να σημειώσουμε ότι στην περίπτωση μιας καταστροφής είναι πολύ πιθανό το υπάρχον δίκτυο επικοινωνιών να έχει καταστραφεί ή να έχει υπερφορτωθεί. Κάτι τέτοιο αποτρέπει την σύνδεση του gateway του HAP με το διεθνές δίκτυο, οπότε είναι πιθανό να χρειαζόμαστε μία σύνδεση HAP με δορυφόρο.

Οι ευρυζωνικές υπηρεσίες που χρειαζόμαστε περιλαμβάνουν Internet/Intranet, τηλεϊατρική, βιντεοδιάσκεψη κτλ., όπου βέβαια είναι προσαρμοσμένες στις ανάγκες μιας καταστροφής. Έτσι μπορεί μία ομάδα διάσωσης, ένα ασθενοφόρο ή η αστυνομία να στέλνει ζωντανό βίντεο σε ένα σταθμό βάσης και να λαμβάνει βοήθεια ως προς το ποιος είναι ο καλύτερος τρόπος να αντιμετωπίσει μια κατάσταση.

6.2.8. Επικοινωνίες σε Συγκεντρώσεις Κόσμου

Τα HAPs μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την καλύτερη υποστήριξη των επικοινωνιών σε ειδικές εκδηλώσεις, οι οποίες χρειάζονται μια προσωρινή επιπλέον υποδομή. Οι προσωρινές μεγάλες συγκεντρώσεις κόσμου προκαλούν συνήθως υπερφόρτωση του υπάρχοντος συστήματος επικοινωνιών και μια καλή λύση για να ελαφρύνουμε την υπερφόρτωση είναι τα HAPs. Παρόλο που τα HAPs αναπτύσσονται στον αέρα αμέσως, πρέπει πάντα να λαμβάνουμε υπόψη και τις ανάγκες στο επίγειο κομμάτι. Συγκεκριμένα, χρειάζεται πρόνοια για το backhaul κομμάτι, που περιλαμβάνει συνήθως μία ραδιοζεύξη μεταξύ του HAP και ενός επίγειου σταθμού βάσης. Όπως έχουμε δει όμως, είναι πιθανή και μια ζεύξη μεταξύ HAP και δορυφόρου και από εκεί με το δίκτυο πυρήνα.

Εκτός από υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας που θα μπορούσαν να προσφέρουν τα HAPs (UMTS), άλλες υπηρεσίες προφανούς χρησιμότητας περιλαμβάνουν το ευρυζωνικό Internet και τις ζεύξεις των M.M.E. (ράδιο και TV).

6.2.9. Επικάλυψη Επίγειων Ζεύξεων για Ανθεκτικότητα (ανάκτηση σφάλματος ζεύξης)

Τα επίγεια δίκτυα έχουν πολλούς κόμβους. Στην περίπτωση που έχουμε την πτώση της ζεύξης ανάμεσα σε δύο κόμβους, μπορούμε να μην έχουμε απώλεια υπηρεσίας μέσω της δρομολόγησης από εναλλακτικούς κόμβους. Αυτόν το ρόλο μπορεί να παίξει ένα HAP, παρέχοντας αντικατάσταση του κυκλώματος στην κατεστραμμένη ζεύξη. Είναι μάλλον απίθανο να έχουμε πτώση περισσότερων του ενός επίγειων καλωδίων ταυτόχρονα, οπότε η χωρητικότητα του HAP δεν χρειάζεται να ξεπερνά τα 155 Mbit/s σε duplex.

Το εύρος ζώνης που κρατάμε εφεδρικά για επικάλυψη του επίγειου δικτύου θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για άλλες υπηρεσίες όταν δεν έχουμε βλάβη στο επικαλυπτόμενο δίκτυο, συμπληρώνοντας το σε σύντομες περιόδους υψηλής κίνησης.

Για παρόμοια χρήση μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και δορυφόρους, με το κύριο πλεονέκτημα των HAPs εδώ να είναι οι πολύ μικρές καθυστερήσεις διάδοσης.

6.2.10. Hot Spot Ασύρματου LAN

Με την ανάπτυξη των WiFi hotspots σε πολλά σημεία σε πόλεις, οι χρήστες έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιούν φορητούς υπολογιστές και PDAs σε δημόσιους χώρους και να έχουν πρόσβαση ασφαλείς συνδέσεις υψηλής ταχύτητας με το Internet. Συνηθισμένοι χώροι με παροχή WiFi είναι αεροδρόμια, σιδηροδρομικοί σταθμοί, κέντρα συνεδριάσεων, ξενοδοχεία και καφετέριες.

Τα HAPs σε αυτήν την περίπτωση μπορούν να παρέχουν τη σύνδεση μεταξύ του σταθμού βάσης και του hotspot του WiFi, όταν η επίγεια σύνδεση δεν είναι εφικτή με οικονομικό τρόπο. Παραδείγματα χώρων που κάτι τέτοιο είναι πιθανό είναι απομακρυσμένες περιοχές, όπως σταθμοί εξυπηρέτησης και καφετέριες σε δρόμους ταχείας κυκλοφορίας. Το HAP λειτουργεί σε αυτήν την περίπτωση ως ιδιωτικό κύκλωμα μεταξύ του ασύρματου LAN και του Internet.

6.2.11. Ασύρματο LAN σε Τρένα και Λεωφορεία (backhaul)

Οι επιβάτες τρένων, ιδιαίτερα αυτοί που κινούνται καθημερινά λόγω δουλειάς, θα μπορούσαν να χρησιμοποιούν αποδοτικά τον χρόνο τους εάν είχαν ευρυζωνική πρόσβαση στο Internet και στο Intranet της εταιρείας τους.

Η ασύρματη πρόσβαση είναι σε πολλές περιπτώσεις εφικτή μέσω κινητών τηλεφώνων, ωστόσο σε πολλές περιπτώσεις η υπηρεσία που παρέχεται δεν είναι ικανοποιητική, λόγω χαμηλών ταχυτήτων και περιορισμένης κάλυψης. Η έλευση των 3G κινητών βελτιώνει την κατάσταση, αλλά και πάλι δεν έχουμε πραγματική ευρυζωνική πρόσβαση και βέβαια τα κενά κάλυψης στο δίκτυο παραμένουν σε πολλές περιοχές.

Μία αγορά που φαίνεται να έχει μέλλον είναι η υποστήριξη ασύρματων LAN στα βαγόνια των τρένων, με στόχο κυρίως τους επιβάτες με φορητό PC που κατευθύνονται στη δουλειά τους, αλλά και με υπηρεσίες broadcast/multicast με video

που θα προβάλλονται σε οθόνες μέσα στο τρένο. Ακόμα θα μπορούσαν να παρέχονται υπηρεσίες ειδικευμένων πληροφοριών στους οδηγούς.

Τα HAPs μπορούν να υποστηρίξουν τα ασύρματα LANs σε τρένα και λεωφορεία με το να παρέχουν την backhaul ζεύξη (δύο δρόμων) με το κεντρικό δίκτυο.

6.2.12. UMTS Σταθμός Βάσης

Μία από τις εφαρμογές με HAPs είναι η απευθείας επικοινωνία του HAP με το κινητό τερματικό ενός χρήστη. Ο ρόλος του HAP είναι να λειτουργεί σαν εναέριος σταθμός βάσης για UMTS (δηλαδή για κινητά 3G). Τα HAPs μπορούν να επεκτείνουν άμεσα την κάλυψη του 3G δικτύου σε περιοχές που η επίγεια προσέγγιση είναι δύσκολη. Ακόμα και σε περιοχές που οι επίγειοι σταθμοί βάσης θεωρούνται πιο οικονομικοί, τα HAPs θα μπορούσαν να παρέχουν μία γρήγορη εφαρμογή των υπηρεσιών, πριν μετακινηθούν σε νέες θέσεις, όταν το επίγειο σύστημα έχει εγκατασταθεί.

Οι υπηρεσίες που θα προσφέρουν τα HAPs σε τερματικά 3G περιλαμβάνουν την τηλεφωνία, εικονοτηλεφωνία, ανταλλαγή φωτογραφιών και άλλων δεδομένων, παιχνίδια, υπηρεσίες ευρυεκπομής, πρόσβαση σε βάσεις δεδομένων κτλ.

Τα HAPs μπορούν να παίζουν είτε το ρόλο ενός διαφανή αναμεταδότη προς τον επίγειο εξοπλισμό του σταθμού βάσης, είτε να έχουν τα ίδια όλον τον απαραίτητο εξοπλισμό. Σε κάθε περίπτωση η παρουσία των HAPs πρέπει να είναι διαφανής και το τερματικό θα πρέπει να λειτουργεί τόσο με HAPs όσο και με το επίγειο σύστημα κάλυψης, δημιουργώντας πιθανώς προβλήματα όσον αφορά τις προδιαγραφές που θα καλύπτουν τα διαφορετικά link-budgets.

6.2.13. Ευρυζωνικότητα Βασισμένη σε Ευρυεκπομή (Broadcast Based Broadband - B3)

Το Broadcast Based Broadband είναι μία προς το παρόν μη υπαρκτή εφαρμογή που μπορεί να εφαρμοστεί και σε HAPs. Ο στόχος είναι η χρήση των εγγενών χαρακτηριστικών broadcast/multicast των HAPs ώστε να έχουμε διανομή διαδικτυακού περιεχομένου με μεγάλη ζήτηση σε όλους τους χρήστες. Τα δεδομένα πολυεκπομής αποθηκεύονται σε ένα κατάλληλο μέσο (σκληρός δίσκος) για μετέπειτα πρόσβαση από τον χρήστη. Ένα πλεονέκτημα του B3 είναι ότι η εμπειρία του χρήστη βελτιώνεται σημαντικά λόγω της άμεσης πρόσβασης στο μέσο αποθήκευσης, ενώ ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι έχουμε καλύτερη χρησιμοποίηση του εύρους ζώνης, αφού μειώνονται τα δεδομένα που αποστέλλονται μεμονωμένα σε χρήστες.

Το B3 δεν είναι προς το παρόν διαθέσιμη εφαρμογή, όχι πριν αντιμετωπιστούν τα παρακάτω προβλήματα:

- Η ανάγκη για ανασχεδιασμό των διαδικτυακών περιεχομένων, αφού οι τωρινοί διαδικτυακοί τύποι δεν προορίζονται για broadcast διανομή και ανάγνωση off-line.

- Προβλήματα σχετικά με την αποδοτική σύλληψη στατιστικών για διαφημίσεις, σε σχέση και με την off-line λειτουργία.
- Η δημιουργία αποδοτικών αλγορίθμων χρήσης της χωρητικότητας της ζεύξης του HAP.
- Ο σχεδιασμός τερματικών χρηστών που θα μπορούν να λαμβάνουν ταυτόχρονα από διαφορετικούς εκπομπούς.
- Πνευματικά δικαιώματα, χρεώσεις και στατιστικά χρήσης.

6.2.14. Στρατιωτικές Εφαρμογές

Οι εφαρμογές με στρατιωτικό προσανατολισμό για HAPs είναι εκτεταμένες και περιλαμβάνουν τηλεπικοινωνίες και εφαρμογές παρακολούθησης όλων των ειδών. Τα AWACS (Airborne Warning and Control System) είναι ένα από τα πρώτα παραδείγματα στρατοσφαιρικής πλατφόρμας. Βέβαια, η περιγραφή στρατιωτικών εφαρμογών είναι πέρα από τις επιδιώξεις και τα ιδανικά αυτής της διπλωματικής.

6.2.15. Εφαρμογές σε Υποανάπτυκτες Χώρες

Όπως με τους δορυφόρους, έτσι και με τα HAPs, η παροχή τηλεπικοινωνιών σε περιοχές με φτωχές υποδομές μπορεί να αποδειχθεί πολύ χρήσιμη. Οι κυβερνήσεις υποανάπτυκτων κρατών μπορεί να προτιμήσουν τις HAP πλατφόρμες σε σχέση με έναν δορυφόρο γιατί:

- Τα HAPs είναι σημαντικά φθηνότερα από τους δορυφόρους, ώστε να είναι προσιτά σε υποανάπτυκτες χώρες, τη στιγμή που οι δορυφόροι είναι εκτός επαφής.
- Μπορούν να πετύχουν καλύτερους προϋπολογισμούς ζεύξης πάνω από περισσότερες περιοχές.
- Δίνουν μεγαλύτερη δυνατότητα χρήσης για αστυνομικούς/ στρατιωτικούς σκοπούς.

Οι υπηρεσίες που θα παρέχονται δεν είναι διαφορετικές από αυτές που έχουν ήδη περιγραφεί (Internet, TV, τηλεϊατρική, τηλεμάθηση κτλ).

6.3. Αναλυτική Παρουσίαση Υπηρεσιών DVB-S2

6.3.1. Κατηγορίες Υπηρεσιών DVB-S2

Σε προηγούμενες ενότητες περιγράψαμε τους τύπους των υπηρεσιών που έχουν πλεονεκτήματα από την χρήση τους μέσω HAPs. Είδαμε ότι ένας από τους πιο σημαντικούς τομείς υπηρεσιών είναι αυτός της ψυχαγωγίας. Θα περιγράψουμε τώρα πώς μέσα από το πρότυπο DVB-S2, του οποίου τη λειτουργία και τα πλεονεκτήματα που προσφέρει περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, μπορούμε να παρέχουμε μια σειρά από τέτοιες υπηρεσίες ψυχαγωγίας, αλλά και πολλά ακόμη είδη υπηρεσιών.

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. 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:

- **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.

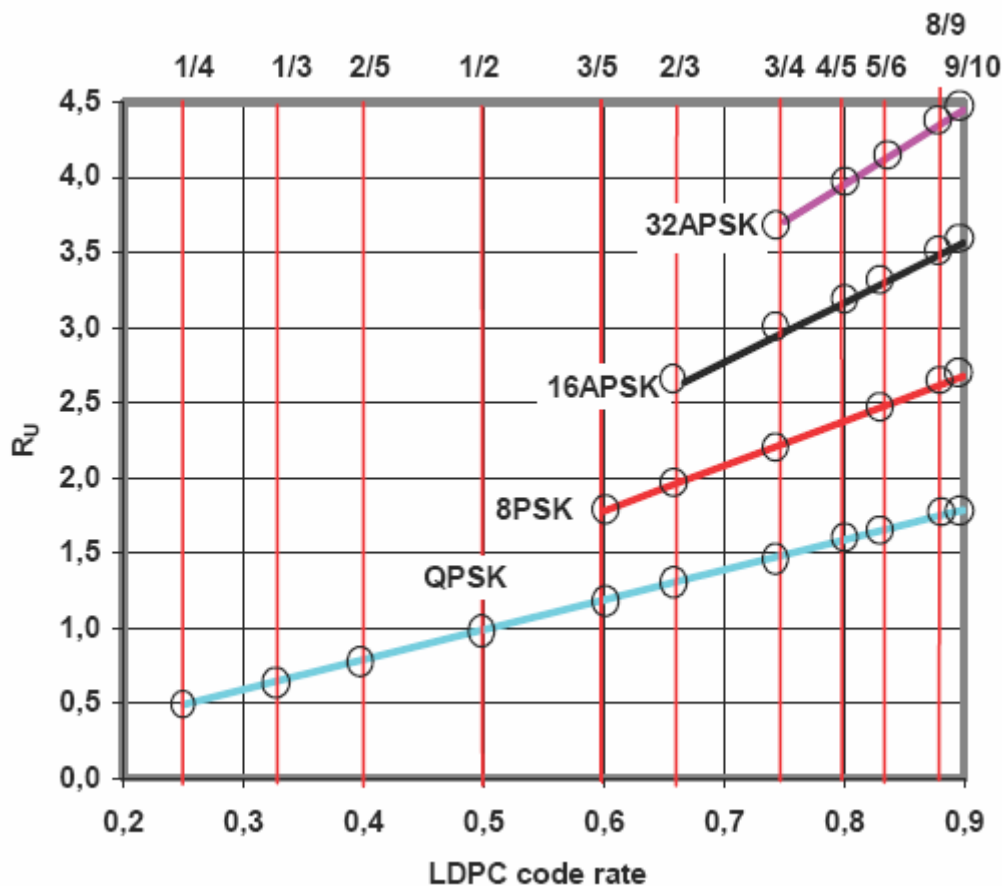
6.3.2. Εκπομπή Ψηφιακού Τηλεοπτικού Σήματος με Σταθερή Κωδικοποίηση και Διαμόρφωση (CCM Digital TV Broadcasting)

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 5.1 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.

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 ως προς τη φασματική απόδοση φτάνει τα 0.3-0.4 bit/s/Hz. 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.



Σχήμα 6.1 Ωφέλιμοι ρυθμοί μετάδοσης συναρτήσει του ρυθμού κωδικοποίησης του συνελκτικού κωδικοποιητή

6.3.3. Εκπομπή Ψηφιακού Τηλεοπτικού Σήματος Κανονικής και Υψηλής Ευκρίνειας (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.

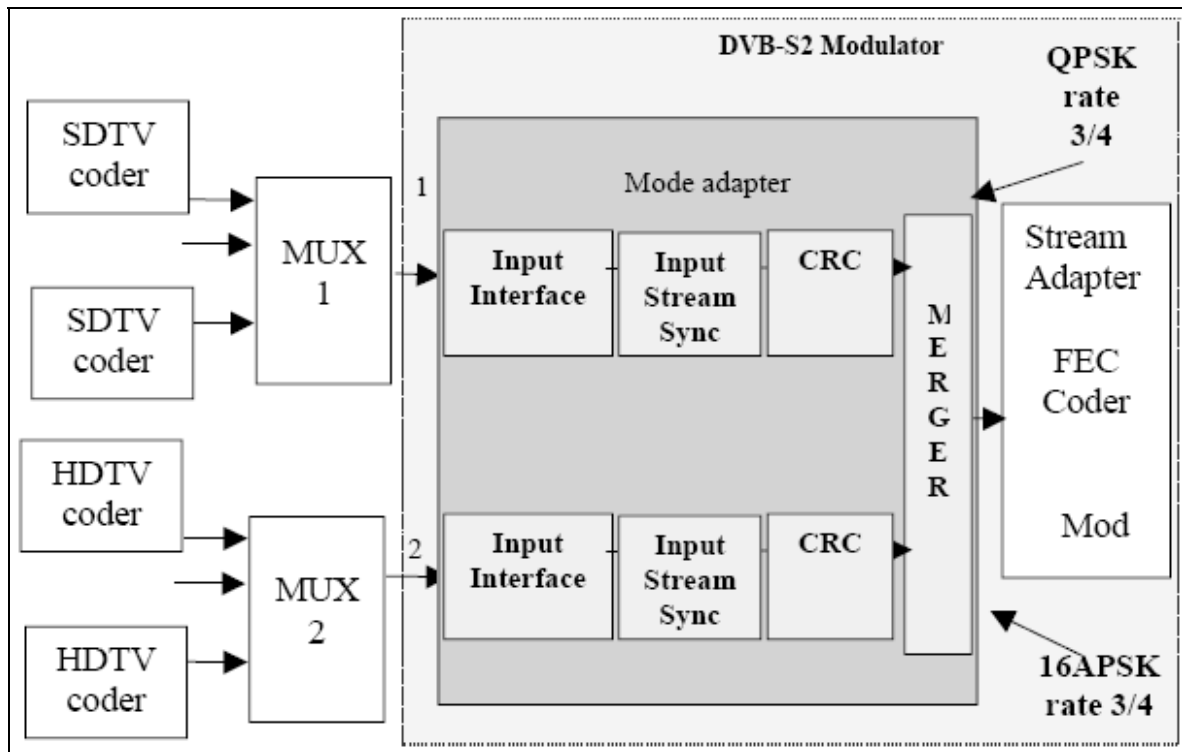
Για τη παροχή υπηρεσιών εκπομπής HDTV, αλλά και SDTV, τα συστήματα DVB-S2 χρησιμοποιούν διαφορετικά επίπεδα προστασίας από σφάλματα στα

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 6.2 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.

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.
- **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).



Σχήμα 6.2 Διάταξη συστήματος DVB-S2 για την εκπομπή SDTV και HDTV με χρήση VCM

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.

6.3.4. Διανομή Πολλαπλών Ρευμάτων Μεταφοράς σε Επίγειους Αναμεταδότες (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 5.3 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 $5/6$. Η τιμή της φασματικής απόδοσης προκύπτει ως εξής:

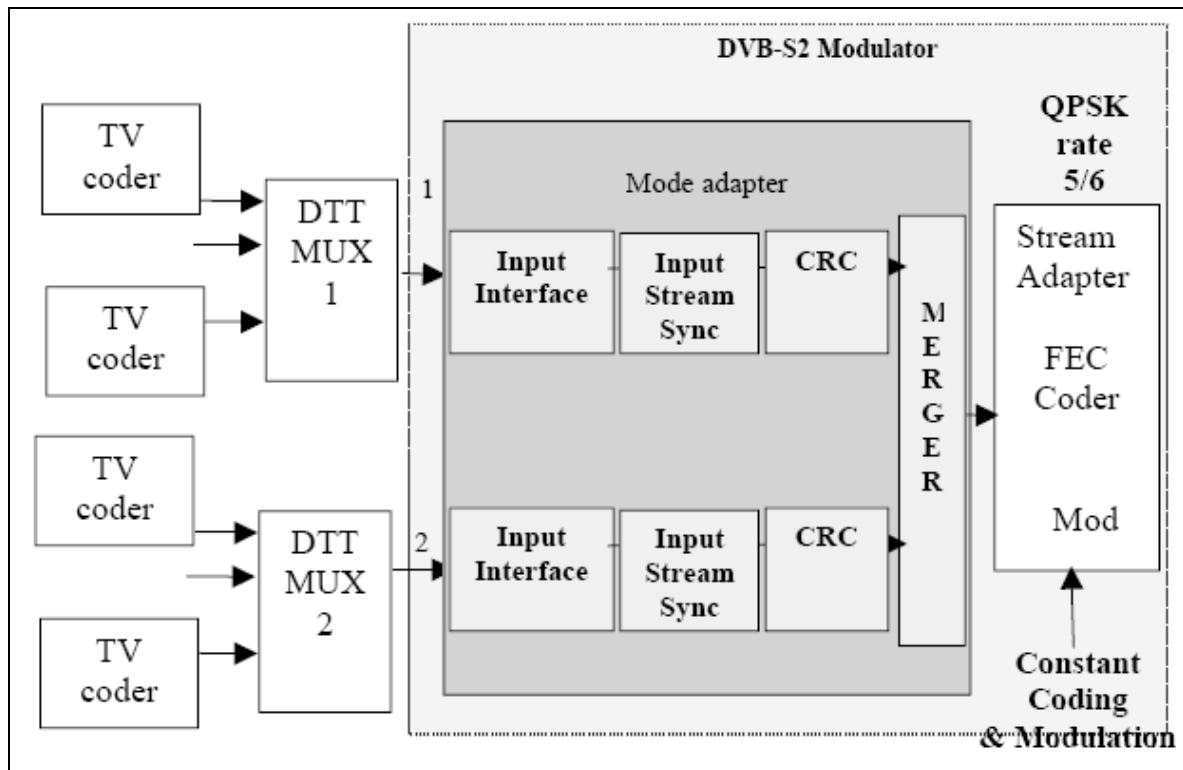
- Τα δύο σήματα DTT απαιτούν συνολικά $2 \times 24 = 48\text{Mbit/s}$, ο οποίος είναι και ο ωφέλιμος ρυθμός μετάδοσης.
- Εφόσον χρησιμοποιείται κωδικοποίηση $5/6$, ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης ψηφίων είναι ίσος με :

$$48 \times \frac{6}{5} = 57.6\text{Mbit/s}.$$

- 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 8PSK $2/3$ 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 6.3 Διάταξη συστήματος DVB-S2 για διανομή πολλαπλών σημάτων DTT μέσω δορυφόρου

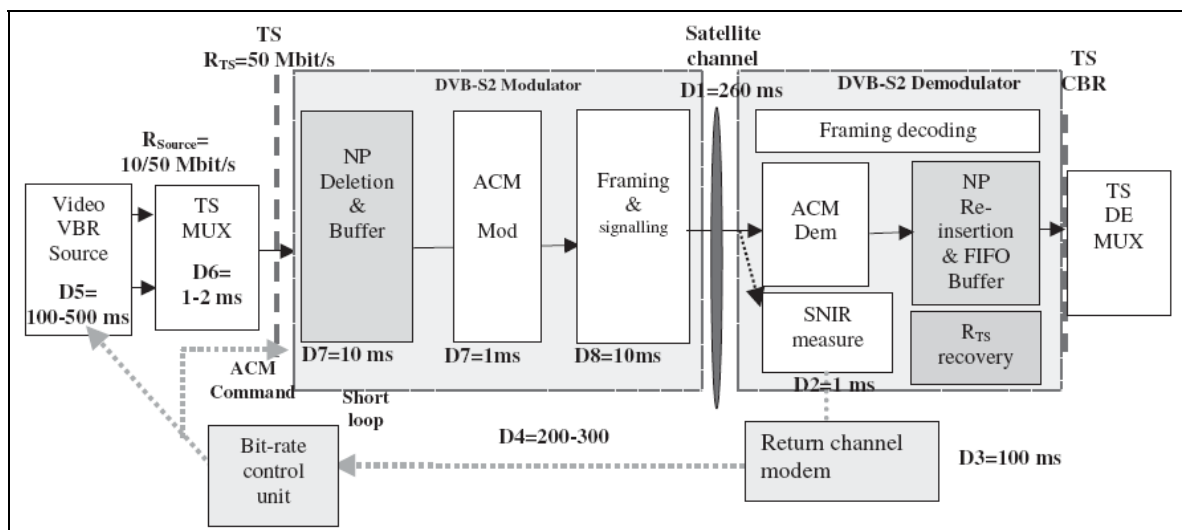
6.3.5. Υπηρεσίες Συλλογής Συλλογής Ειδήσεων με Χρήση Προσαρμοστικής Κωδικοποίησης και Διαμόρφωσης (DSNG Over ACM)

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 5.4, λειτουργεί σύμφωνα με την ακόλουθη διαδικασία:

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

Στην περίπτωση που παρουσιαστεί μια γρήγορη διάλειαση (fast fading) στο κανάλι, το σύστημα πρέπει να προσαρμόσει κατάλληλα τη λειτουργία του. Σημειώνεται ότι όταν συμβαίνει μια γρήγορη διάλειαση, 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 30-60ms αργότερα για στρατοσφαιρικές πλατφόρμες, και 100-500ms για δορυφόρους), 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.

6.3.6. Υπηρεσίες Εκπομπής IP σε Μοναδικό Χρήστη (IP Unicast Services)

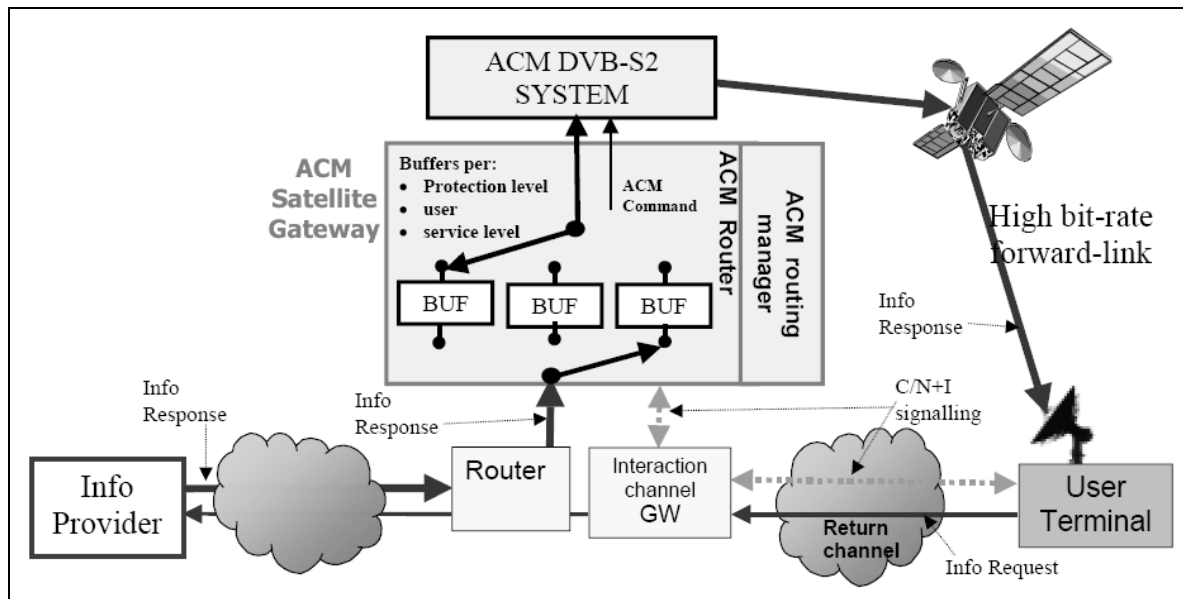
Οι υπηρεσίες εκπομπής σε μοναδικό χρήστη (unicasting) αποτελούν μια από τις σπουδαιότερες κατηγορίες υπηρεσιών που απολαμβάνουν τις δυνατότητες του νέου προτύπου DVB-S2. Μάλιστα, όταν το DVB-S2 χρησιμοποιείται για διαδραστικές υπηρεσίες σημείου-προς-σημείο, όπως το IP unicasting, το κέρδος του σε σχέση 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 6.5 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 6.5 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).

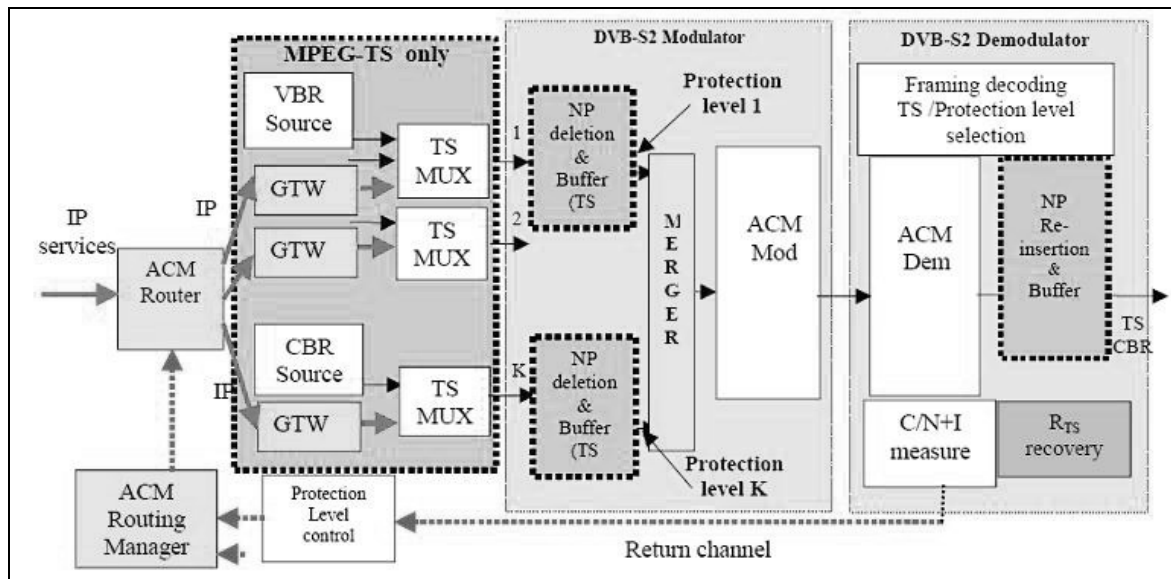
Για να ικανοποιείται η παραπάνω απαίτηση όταν η συνολικά προσφερόμενη κίνηση ξεπερνά τη χωρητικότητα του καναλιού, είναι δυνατόν να υλοποιηθούν διάφορες τεχνικές. Για παράδειγμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί έλεγχος προτεραιότητας στο δίκτυο. Ο έλεγχος προτεραιότητας ποσοτικοποιεί το επίπεδο υπηρεσίας που 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 6.6. 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.



Σχήμα 6.6 Εκπομπή IP προς μοναδικό χρήστη (IP unicast) και χρήση 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.

6.3.7. Εκπομπή Προς Πολλαπλούς Χρήστες (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. Τα HAPs έχουν τη δυνατότητα κάλυψης με σημειακές δέσμες (spot beams), που 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 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:

- **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 στρατοσφαιρικού 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). 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 HAP (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 στρατοσφαιρικών 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.

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 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.

6.4. Βιβλιογραφία 6^{ου} κεφαλαίου

1. «*Applications and Services for Broadband HAP Delivery Including implications on network functionality and interfaces, e.g. for third-party network providers*» 2004, CAPANINA Deliverable Number D01
2. www.mpeg.org
3. www.apple.com/mpeg4
4. «*Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications*» 2006, ETSI EN 302-307

7. Προσομοίωση Συστήματος

7.1. Θεωρία Προσομοίωσης

7.1.1. Ο Ρόλος της Ανάλυσης της Απόδοσης Συστημάτων.

Η ανάγκη για τον υπολογισμό και την πρόβλεψη της απόδοσης των υπολογιστικών συστημάτων (απλοί υπολογιστές, δίκτυα κ.λ.π.) παρουσιάζεται σε όλες τις φάσεις ανάπτυξης και λειτουργίας τους, από το αρχικό στάδιο του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού, μέχρι την καθημερινή χρήση τους.

Στις αρχικές φάσεις σχεδιασμού ενός νέου συστήματος, ο κατασκευαστής συνήθως πρέπει να κάνει δύο ειδών *προβλέψεις*:

1. Πρόβλεψη της φύσης των εφαρμογών και του επιπέδου των *φορτίων εργασίας* (*workloads*) τους. Με τον όρο φορτίο εργασίας, εννοούμε το ύψος των απαιτήσεων εξυπηρέτησης που επιβάλλουν οι εφαρμογές στο σύστημα.
2. Επιλογή μεταξύ εναλλακτικών λύσεων σε ζητήματα αρχιτεκτονικής του νέου συστήματος, βασισμένες στις τεχνολογίες υλικού και λογισμικού που είναι διαθέσιμες την περίοδο του σχεδιασμού. Το κριτήριο επιλογής είναι η σχέση κόστους - απόδοσης.

Η ακρίβεια των προβλέψεων αυτών, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ικανότητα των σχεδιαστών να προσαρμόζουν τα χαρακτηριστικά των επιμέρους τμημάτων στα χαρακτηριστικά απόδοσης του συστήματος ως σύνολο. Η διαδικασία αυτή δεν είναι ούτε απλή ούτε σαφώς καθορισμένη.

Αφού έχουν παρθεί οι αποφάσεις για την αρχιτεκτονική του συστήματος, τα ερωτήματα σε σχέση με την πρόβλεψη και τον υπολογισμό της απόδοσής του γίνονται πιο συγκεκριμένα:

- Ποιά είναι η καλύτερη επιλογή για την οργάνωση του υλικού;
- Ποιές λειτουργίες θα πρέπει να υποστηρίζει το λογισμικό συστήματος;
- Ποιές σχέσεις πρέπει να υπάρχουν μεταξύ των τμημάτων του λογισμικού συστήματος (π.χ. αλγόριθμοι για job scheduling, processor scheduling και storage management) και ποιά είναι η επίπτωσή τους στην απόδοση του συστήματος;

Μετά την ανάπτυξη ενός νέου προϊόντος, ο κατασκευαστής πρέπει να είναι έτοιμος να προβλέψει την απόδοση συγκεκριμένων εφαρμογών και απαιτήσεων των υποψηφίων αγοραστών. Πρέπει δηλαδή να προτείνει το βέλτιστο συνδυασμό και οργάνωση του υλικού και λογισμικού, ώστε να προσφέρει στο χρήστη την καλύτερη δυνατή λύση για τις ανάγκες του. Το προβλεπόμενο "περιβάλλον" του χρήστη πρέπει

να μεταφραστεί σε ένα σύνολο ποσοτικών παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθούν ως είσοδοι στο μοντέλο πρόβλεψης της απόδοσης που θα χρησιμοποιήσει ο κατασκευαστής.

Τέλος, όταν το σύστημα έχει εγκατασταθεί προς χρήση, ο προμηθευτής πρέπει να βεβαιωθεί ότι ικανοποιεί τις προβλέψεις όσον αφορά την απόδοσή του και ότι αξιοποιεί πλήρως τις δυνατότητές του. Η διαδικασία αυτή *ρύθμισης* του συστήματος, βασίζεται παραδοσιακά, κυρίως στη διαίσθηση και στην εμπειρία. Όμως η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των σημερινών συστημάτων έχει επιβάλλει τη χρήση εξειδικευμένων τεχνικών και εργαλείων, όπως τα πακέτα λογισμικού για τη διαχείριση και παρακολούθηση δικτύων κ.α. Τα εργαλεία αυτά βασίζονται σε τεχνικές και μοντέλα που αναπτύχθηκαν κυρίως τα τελευταία είκοσι χρόνια.

7.1.2. OPNET Modeler 10.0

Το εργαλείο που επιλέχτηκε σε αυτή την εργασία είναι το OPNET Modeler 10.0. Το πρόγραμμα αυτό υλοποιεί προσομοίωση διακριτών γεγονότων, δημιουργώντας ένα περιβάλλον τεχνητού λειτουργικού συστήματος στο οποίο κάθε τμήμα του δικτύου καθώς και κάθε χρήστης θεωρείται ως μια ανεξάρτητη διεργασία. Οι διεργασίες αυτές αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με κατάλληλα σήματα διακοπών (interrupt signals) και το τελικό αποτέλεσμα είναι η προσομοίωση της συνολικής συμπεριφοράς του δικτύου. Οι κύριοι λόγοι για τους οποίους επιλέξαμε αυτό το πρόγραμμα είναι οι παρακάτω:

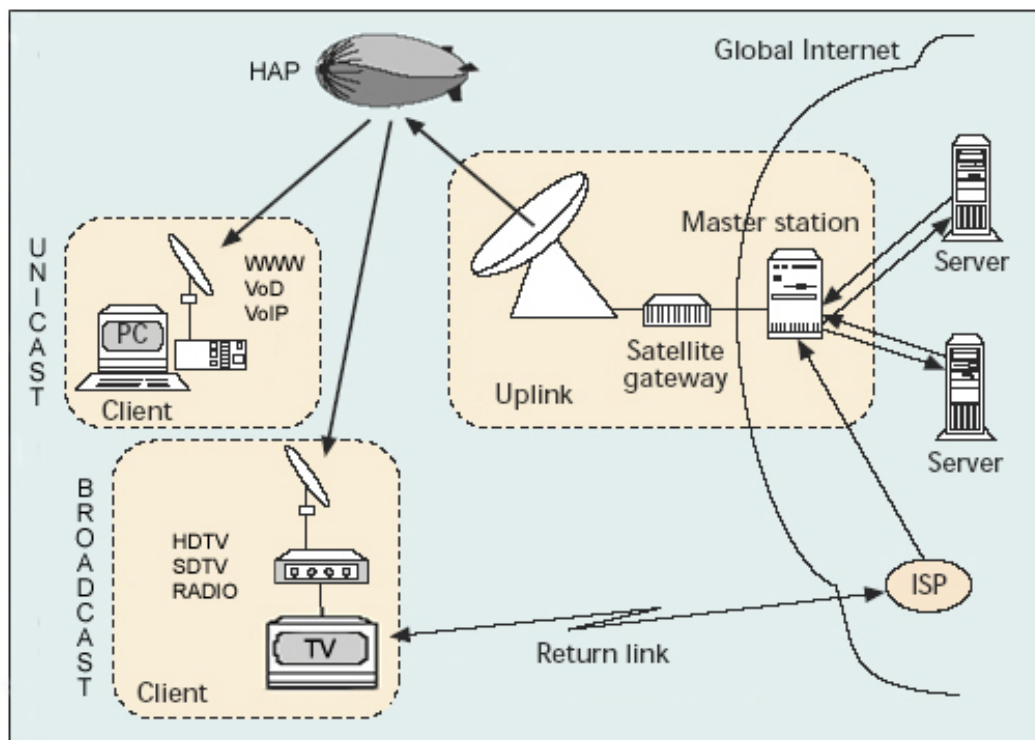
- Το πρόγραμμα OPNET Modeler 10.0 υλοποιεί προσομοίωση διακριτών γεγονότων (discrete event simulation) που είναι κατάλληλη για τις απαιτήσεις της εργασίας μας.
- Το πρόγραμμα OPNET Modeler 10.0 αποτελεί την τελευταία έκδοση ενός ευρέως χρησιμοποιούμενου εμπορικού προϊόντος προσφέροντας ιδιαίτερη αξιοπιστία.
- Ο κώδικας των διεργασιών γράφεται σε γλώσσα C++, στην οποία υπάρχει προηγούμενη εμπειρία.
- Το πρόγραμμα OPNET Modeler 10.0 σαν εμπορικό προϊόν προσφέρει πληθώρα διευκολύνσεων που επιταχύνουν το έργο μας. Τέτοια είναι η αυτόματη συλλογή στατιστικών στοιχείων, η παροχή ειδικών editors για την συγγραφή του κώδικα, η ύπαρξη γραφικού περιβάλλοντος, η εύκολη δημιουργία μενού επιλογών καθώς και η δυνατότητα τεχνικής υποστήριξης από την εταιρεία.
- Το γεγονός ότι οι διεργασίες του OPNET είναι γραμμένες σε γλώσσα C, η οποία βρίσκεται πολύ κοντά στο επίπεδο μηχανής του συστήματος, προσφέρει μεγάλη ταχύτητα προσομοίωσης.

7.2. Περιγραφή Προσομοιωτή

Το σενάριο στο οποίο θα επικεντρωθούμε είναι αυτό του Παροχέα Ψυχαγωγικού Περιεχομένου (Content Distributor), όπου η ομάδα ενδιαφέροντος είναι οι οικιακοί χρήστες αλλά και οι SOHO χρήστες. Στις έως τώρα γνωστές και χρησιμοποιούμενες εφαρμογές διανομής περιεχομένου (π.χ. DVB-S) ο χρήστης απολαμβάνει παραδοσιακού τύπου μη-διαδραστικές δορυφορικές υπηρεσίες, συνήθως τηλεόραση και ραδιόφωνο. Όμως, όπως έχουμε δει, το νέο πρωτόκολλο DVB-S2 μας δίνει νέες δυνατότητες λόγω του αυξημένου bandwidth. Πέρα από το εύρος ζώνης σημαντικό ρόλο παίζει και το γεγονός ότι χρησιμοποιώντας πλατφόρμες HAPs κερδίζουμε σημαντικά σε καθυστέρηση διάδοσης.

Αυτοί οι δυο παράγοντες συμβάλλουν στο να μας επιτρέψουν να εισάγουμε και νέες, διαδραστικές υπηρεσίες, οι οποίες εκμεταλλεύονται το επιπλέον εύρος ζώνης που απομένει από το ολικό μετά από την εκπομπή των Broadcast Services. Τέτοιου τύπου υπηρεσίες μπορούν να είναι το VoIP, το Video on Demand (VoD) και το Web Browsing (www).

Στα πλαίσια της Διπλωματικής Εργασίας αποφασίστηκε να προσομοιωθεί η κάτω ζεύξη (downlink) ενός συστήματος HAP. Βέβαια το κυρίως αντικείμενο της έχει να κάνει με το QoS και την εύρεση τρόπων εκμετάλλευσης του πλεονάζοντος, όπως εξηγήσαμε, εύρους ζώνης. Για την περίπτωση της επάνω ζεύξης (κανάλι επιστροφής) θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για παράδειγμα το πρωτόκολλο DVB-RCS.



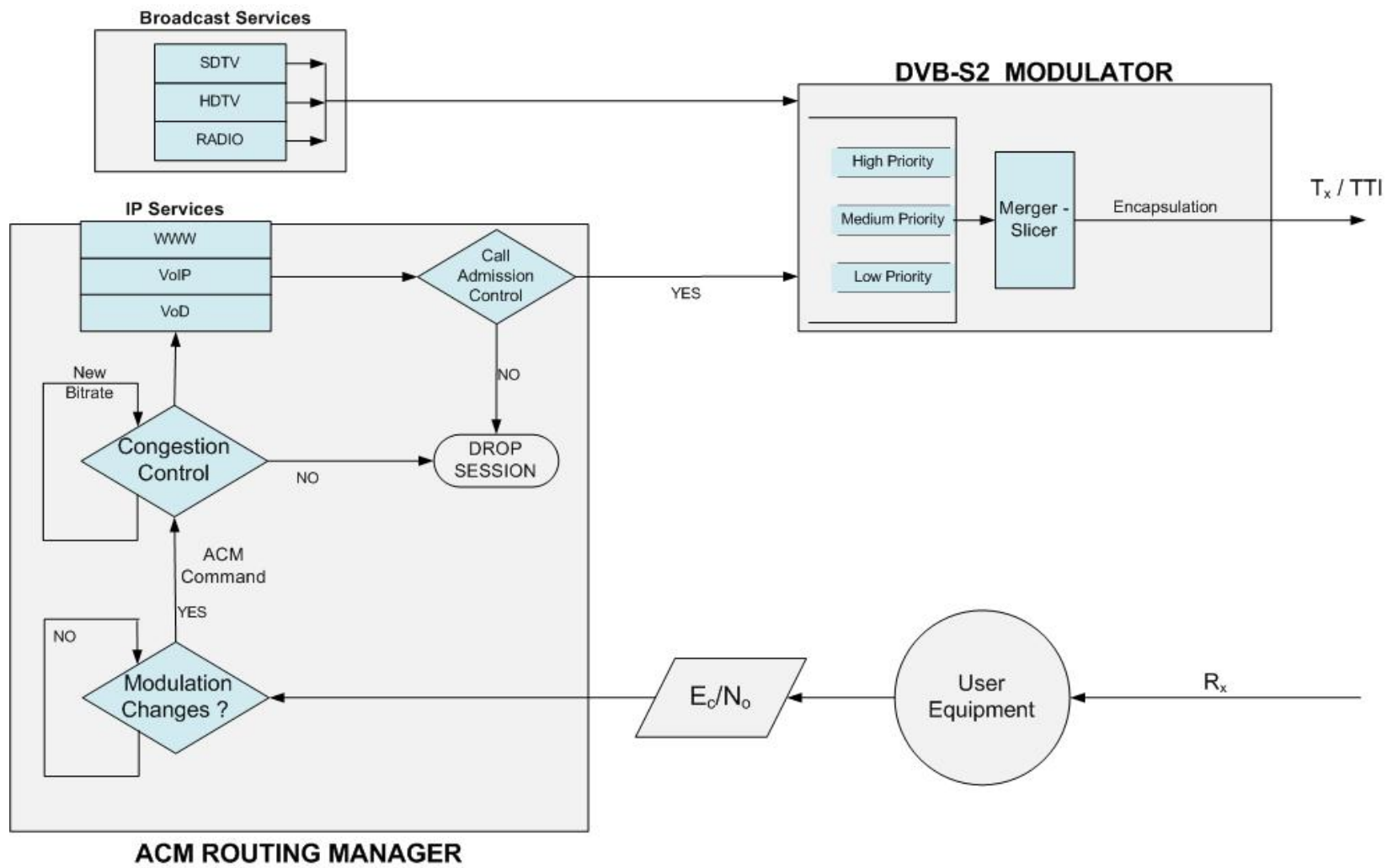
Σχήμα 7.1 Βασικό σενάριο πάνω στο οποίο βασίστηκε η Προσομοίωση.

Στο παραπάνω Σχήμα 7.1 βλέπουμε την βασική ιδέα πάνω στην οποία βασίστηκε η Προσομοίωση αλλά και η ίδια η Εργασία. Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει βασική διαφορά σε σχέση με ένα με δορυφορικό σύστημα έως και το σημείο που η πληροφορία μεταδίδεται από την κεραία εκπομπής προς το HAP. Από εκεί και πέρα η δομή του δικτύου αλλάζει καθώς παρέχονται εκτός από Broadcast και Unicast

υπηρεσίες. Έτσι τα τερματικά που συνδέονται μέσω αποκωδικοποιητών στο δίκτυο μπορεί να είναι μια τηλεόραση (ακόμα και υψηλής ευκρίνειας-HDTV), ένα PC για συνηθισμένη χρήση (www, παρακολούθηση VoD, ράδιοφωνο) καθώς ακόμα και μια τηλεφωνική συσκευή (VoIP). Η διαφοροποίηση μεταξύ των Broadcast και Unicast υπηρεσιών είναι ότι οι πρώτες θα απασχολούν το κανάλι συνεχώς και θα δεσμεύουν πόρους τους συστήματος με περίπου σταθερή τιμή εύρους ζώνης. Από την άλλη, οι Unicast υπηρεσίες δεν δεσμεύουν πόρους εάν δεν υπάρχει ανάγκη και κάτι τέτοιο είναι λογικό και επιθυμητό εφόσον αναφερομαστε σε προσωποποιημένες υπηρεσίες. Έτσι εκμεταλλευόμαστε ανά πάσα στιγμή το αχρησιμοποίητο εύρος ζώνης που δεν εκμεταλλεύονται οι Broadcast υπηρεσίες και το αποδίδουμε στον χρήστη να το εκμεταλλευτεί όπως επιθυμεί αυτός.

Το Σχήμα 7.2 της παρακάτω σελίδας αποτελεί τον πυρήνα του προσομοιωτή μας. Παρατηρούμε ότι χωρίζεται σε διακριτές μονάδες οι οποίες θα αναλυθούν σε επιμέρους υποκεφάλαια:

- Γεννήτριες Broadcast υπηρεσιών (Broadcast Services)
- Γεννήτριες IP υπηρεσιών (IP Services) μαζί με τις αντίστοιχες διεργασίες ελέγχου κίνησης που αντιπροσωπεύουν τον ACM Router ενός DVB-S2 συστήματος.
- Ο Διαμορφωτής των DVB-S2 πλαισίων (DVB-S2 Modulator). Περιλαμβάνει ουρές διαφορετικής προτεραιότητας για την υλοποίηση της QoS υπηρεσίας.
- Τερματικό χρήστη (User Equipment) με βάση το Ec/No του οποίου γίνεται η κωδικοποίηση των πακέτων



Σχήμα 7.2 Διάγραμμα μονάδων προσομοιωτή

7.3. Μοντέλα Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης

7.3.1. Γενικά

Οι Unicast Services για τις οποίες έχουμε μιλήσει μέχρι τώρα ενώ βασίζονται στην κοινή πλατφόρμα που προσφέρει το IP πρωτόκολλο έχουν τελείως διαφορετική συμπεριφορά και απαιτήσεις σε bit rate και καθυστέρηση μετάδοσης. Έτσι θα πρέπει να ορίσουμε τις μεταβλητές παραμετροποίησης τους καθώς και τις στατιστικές κατανομές που ακολουθούν. Ακόμη θα γίνει και μια αναφορά και στις Broadcast Services και στα μοντέλα που ακολουθούν.

7.3.2. Χρόνοι Αφίξης και Διάρκεια Συνόδων

Κύριο χαρακτηριστικό ενός ασύρματου δικτύου είναι η δυναμική συμπεριφορά των χρηστών όσον αφορά την συμμετοχή τους στο συνολικό φορτίο. Χρήστες εισέρχονται στο σύστημα σε τυχαίες χρονικές στιγμές ζητώντας διαφορετικές υπηρεσίες και διαφορετική ποιότητα και εξέρχονται μετά από τυχαίο χρονικό διάστημα. Παρόλη την τυχαιότητά τους, όλα τα παραπάνω μεγέθη ικανοποιούν συγκεκριμένες στατιστικές κατανομές με βάση τις οποίες είναι δυνατή η προσομοίωση της κίνησης σε επίπεδο συνόδου. Τα κύρια αυτά μεγέθη είναι τα εξής:

- Το μέσο bit rate του χρήστη L_{userA} που λαμβάνει την υπηρεσία A.
- Ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών αφίξεων αιτήσεων συνόδων της ίδιας υπηρεσίας A, που ακολουθεί εκθετική κατανομή με μέση τιμή $t_{interarrivalA}$.
- Το συνολικό φορτίο του συστήματος που έχει μέση τιμή L .
- Το ποσοστό συμμετοχής n_A μιας υπηρεσίας A στο συνολικό φορτίο.
- Η διάρκεια της συνόδου ενός χρήστη της συγκεκριμένης υπηρεσίας A, που έχει μέση τιμή t_A . Η διάρκεια συνόδου ανάλογα με τα είδος της υπηρεσίας ακολουθεί (με μέση τιμή t_A):
 - Εκθετική Κατανομή για συνόδους VoIP και video.
 - Γεωμετρική Κατανομή για web browsing (www).

Για να υπολογίσουμε τη μέση τιμή του μεσοδιαστήματος $t_{interarrivalA}$ των αφίξεων συνόδων μιας υπηρεσίας A πρέπει να λάβουμε υπόψη το συνολικό φορτίο L , το ποσοστό συμμετοχής της υπηρεσίας n_A , το μέσο bit rate των χρηστών της υπηρεσίας L_{userA} και την μέση διάρκεια των συνόδων t_A .

Στη συνέχεια με βάση τους τύπους :

$$\left\{ \begin{array}{l} L_A = n_A \cdot L \\ \frac{t_{interarrival_A}}{t_A} = \frac{L_{user_A}}{L_A} \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$t_{interarrival_A} = \frac{L_{user_A} \cdot t_A}{n_A \cdot L}$$

7.3.3. Μοντέλο VoIP

Η κίνηση της προς τα κάτω ζεύξης μιας συνόδου VoIP αποτελείται από μια συνεχόμενη εναλλαγή μεταξύ ενεργών και ανενεργών περιόδων σταθερής διάρκειας. Κατά τη διάρκεια των ενεργών περιόδων εκπέμπονται με σταθερό bit rate πακέτα σταθερού μεγέθους. Η διάρκεια τόσο των ενεργών όσο και των ανενεργών περιόδων είναι πολύ μικρή ώστε να μην υπάρχουν διαλείψεις στην λαμβανόμενη ομιλία. Αν μας δοθούν ως δεδομένα το μέσο bit rate **mean_bitrate** της συνόδου, το μέγεθος των πακέτων **packet_size**, ο παράγοντας δραστηριότητας **activity_factor** και ο χρόνος **t_{off}** της ανενεργού περιόδου μπορούμε να υπολογίσουμε τον χρόνο **t_{on}** της ενεργού περιόδου και τον χρόνο **t_{int}** μεταξύ δύο διαδοχικών εκπομπών πακέτων ως εξής:

$$activity_factor = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \Rightarrow$$

$$t_{on} = \frac{activity_factor}{1 - activity_factor} \cdot t_{off}$$

Επίσης:

$$mean_bitrate \cdot (t_{on} + t_{off}) = on_bitrate \cdot t_{on} \Rightarrow$$

$$on_bitrate = mean_bitrate \cdot \frac{(t_{on} + t_{off})}{t_{on}}$$

οπότε,

$$\frac{packet_size}{t_{int}} = on_bitrate = mean_bitrate \cdot \frac{(t_{on} + t_{off})}{t_{on}} \Rightarrow$$

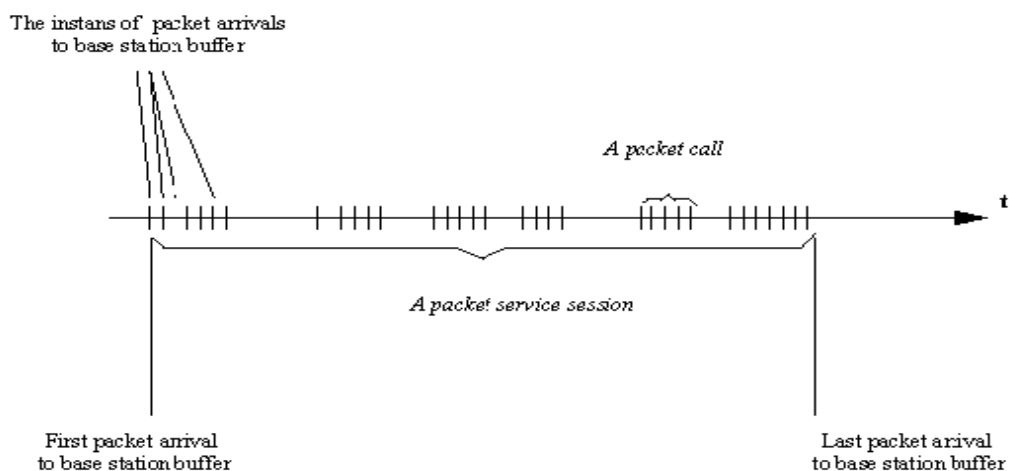
$$t_{\text{int}} = \frac{t_{\text{on}}}{t_{\text{on}} + t_{\text{off}}} \cdot \frac{\text{packet_size}}{\text{mean_bitrate}}$$

7.3.4. Μοντέλα VoD, HDTV και SDTV

Οι ροές πολυμέσων (multimedia streaming) απαιτούν μετάδοση δεδομένων έτσι ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία τους από το δέκτη με συνεχή και σταθερό τρόπο. Γενικά η χρήση στατιστικών κατανομών για την προσομοίωση της γεννήτριας κίνησης ενός χρήστη που πραγματοποιεί video streaming είναι εξαιρετικά δύσκολη και σπάνια μπορεί να αποδώσει την πραγματικότητα. Για αυτό τον λόγο, μια συνήθης τεχνική που εφαρμόζεται στην πράξη είναι η καταγραφή αρχείων κίνησης (Trace Files) από πραγματικά δίκτυα και η αναπαραγωγή τους κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Τα trace files (από τη διεύθυνση <http://trace.eas.asu.edu/> του Arizona State University) που χρησιμοποιήσαμε είναι από αρχεία κωδικοποίησης H.264/AVC στην περίπτωση της εκπομπής τηλεόρασης (HDTV και SDTV) και H.263 στην περίπτωση της υπηρεσίας Video on Demand. Η κύρια διαφορά ανάμεσα στις υπηρεσίες είναι ότι, ενώ οι χρήστες του Video on Demand δημιουργούνται δυναμικά με βάση εκθετικής κατανομής (υπηρεσία Unicast), η υπηρεσία ευρυεκπομπής τηλεοπτικών προγραμμάτων παρέχεται αδιαλείπτως. Είναι άλλωστε αυτή που αναμένουμε να καταναλώνει το μεγαλύτερο ποσοστό των πόρων του συστήματός μας.

7.3.5. WWW μοντέλο

Σύμφωνα με τα μοντέλα του διεθνούς οργανισμού ETSI, η κίνηση δεδομένων ενός χρήστη που πραγματοποιεί web browsing μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν μια ροή πακέτων με μορφή σαν αυτή που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Σχήμα 7.3 Ροή πακέτων WWW

Όπως μπορούμε να προσέξουμε η κίνηση αυτή αποτελείται από μια εναλλαγή μεταξύ ενεργών και ανενεργών περιόδων. Οι ενεργές περιόδους είναι αυτές κατά τις οποίες έχουμε συνεχόμενη ροή πακέτων και συμβολίζουν τη φάση μεταφοράς μιας ιστοσελίδας από το δίκτυο προς τον χρήστη. Ανάμεσα στις ενεργές περιόδους παρεμβάλλονται οι ανενεργές περιόδους κατά τις οποίες δεν υπάρχει ροή πακέτων και αντιπροσωπεύουν τη φάση ανάγνωσης μιας ιστοσελίδας από τον χρήστη.

Η διάρκεια μιας ανενεργού περιόδου ακολουθεί γεωμετρική κατανομή με μέση τιμή t_{off} . Η διάρκεια μιας ενεργού περιόδου ακολουθεί επίσης γεωμετρική κατανομή με μέση τιμή t_{on} . Κατά τη διάρκεια μιας ενεργού περιόδου έχουμε ροή πακέτων των οποίων το μέγεθος ακολουθεί κατανομή pareto με μέση και ελάχιστη τιμή **packet_size** και **min_packet_size** αντίστοιχα, ενώ το μεσοδιάστημα ανάμεσα σε δύο διαδοχικές εκπομπές πακέτων ακολουθεί γεωμετρική κατανομή με μέση τιμή t_{int} .

Κάθε χρήστης χαρακτηρίζεται από δύο διαφορετικές τιμές bit rate:

- Η πρώτη ονομάζεται **available_bitrate**, αντιπροσωπεύει το bit rate που μπορεί να διαθέσει το δίκτυο στον χρήστη και υπολογίζεται μόνο κατά τη διάρκεια μιας ενεργού περιόδου αγνοώντας τις ανενεργές περιόδους. Είναι ο όγκος των δεδομένων που διακινούνται κατά τη διάρκεια μιας ενεργού περιόδου προς τη χρονική διάρκεια της ενεργού περιόδου αυτής.
- Η δεύτερη ονομάζεται **mean_bitrate** και αντιπροσωπεύει το μέσο φορτίο που προσφέρει ο χρήστης στην κίνηση του δικτύου. Ουσιαστικά είναι ο συνολικός όγκος των δεδομένων που διακινούνται κατά τη διάρκεια μιας συνόδου προς τη χρονική διάρκεια της συνόδου. Το mean_bitrate είναι πάντοτε μικρότερο ή ίσο από το available_bitrate.

Έχοντας σαν δεδομένα το μέσο bit rate **mean_bitrate**, το διαθέσιμο bit rate **available_bitrate**, το μέσο μέγεθος των πακέτων **packet_size** και τον μέσο χρόνο ανάγνωσης μιας ιστοσελίδας t_{off} μπορούμε να υπολογίσουμε όλες τις άλλες ποσότητες ως εξής:

$$available_bitrate = \frac{packet_size}{t_{int}} \Rightarrow$$

$$t_{int} = \frac{packet_size}{available_bitrate}$$

Επίσης

$$\frac{mean_bitrate}{available_bitrate} = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = activity_factor \Rightarrow$$

$$t_{on} = \frac{mean_bitrate}{available_bitrate - mean_bitrate} \cdot t_{off}$$

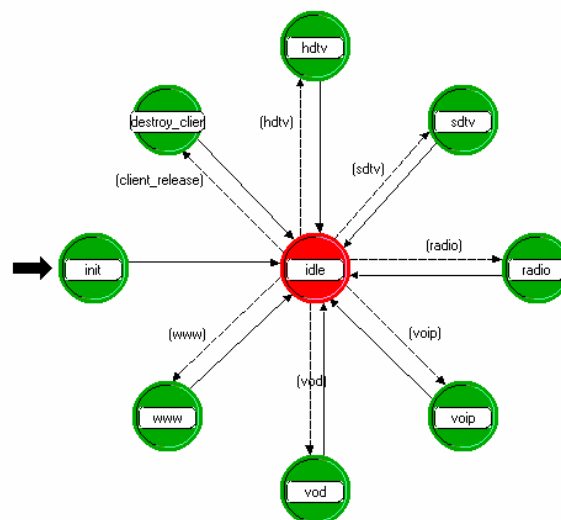
Στην ειδική περίπτωση που ισχύει $mean_bitrate = available_bitrate$, τότε το $t_{off} = 0$ ενώ $t_{on} = \infty$, δηλαδή έχουμε ουσιαστικά μόνο ενεργή περίοδο και καθόλου ανενεργές.

7.3.6. Radio μοντέλο

Η κατηγορία αυτή αντιπροσωπεύει την ραδιοφωνική εκπομπή που απαιτεί σταθερό εύρος ζώνης και χαρακτηρίζεται μόνο από τον μέγιστο ρυθμό μετάδοσης πακέτων που πρέπει να είναι διαθέσιμος σε όλη την διάρκεια της συνόδου. Η πηγή χαρακτηρίζεται από τον παράγοντα δραστηριότητας (activity factor) με τυπική τιμή συνήθως 0.8 και μπορεί να μεταδίδει σε ρυθμό ίσο ή μικρότερο από PCR ή ακόμα και καθόλου. Θα πρέπει όμως να γίνει η κατάλληλη δέσμευση πόρων ώστε να εξασφαλίζεται η συμφωνημένη ποιότητα υπηρεσίας.

7.4. Υλοποίηση Διεργασιών Προσομοιωτή

7.4.1. Κύρια Διεργασία Προσομοίωσης



Σχήμα 7.4 Κύρια διεργασία – Root

Στην υπομονάδα υπάρχει μια κύρια διεργασία («πατρική διεργασία»), η οποία ξεκινάει την λειτουργία της με την εκκίνηση της προσομοίωσης. Στη διεργασία αυτή ορίζονται ως παράμετροι :

- το μέγεθος των πακέτων MPEG-TS,
- το συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης εκφρασμένο σε symbols/sec,
- το ποσοστό του συνολικού φορτίου που αντιστοιχεί στην κάθε υπηρεσία,
- το συνολικό φορτίο που θα δημιουργηθεί από τις γεννήτριες κίνησης ως ποσοστό του εύρους ζώνης.

Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της κάθε υπηρεσίας, οι κοινοί χρησιμοποιούμενοι παράμετροι είναι οι εξής:

- το Bitrate (μέση τιμή του bitrate που χωρίζεται σε 2 ή 3 επίπεδα- High, Medium, Low -ανάλογα με την υπηρεσία)
- το Packet size.

Όσον αφορά τις IP υπηρεσίες υπάρχουν κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά που τις καθορίζουν :

- το Call Duration,
- το Available Bitrate,
- το OFF State Time,
- το Activity Factor.

Τέλος, υπάρχει ακόμα μια ομάδα παραμέτρων που αναλόγως της στάθμης σήματος χωρίζεται σε 3 διαμορφώσεις (QPSK, 8PSK, 16PSK) όπου η κάθε μια έχει δικό της

- Code Rate και
- Bits Per Symbol .

Ο κύριος σκοπός ύπαρξης της διεργασίας αυτής είναι δημιουργήσει τις συνόδους υπηρεσιών (session processes), στέλνοντας συγκεκριμένες διακοπές (session interarrivals) ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, τα οποία υπολογίζονται με βάση τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Αυτό βέβαια συμβαίνει με τις IP υπηρεσίες γιατί οι Broadcast δημιουργούνται στην αρχή της προσομοίωσης και «τρέχουν» για πάντα. Ταυτόχρονα με τις session processes δημιουργούμε τις διεργασίες δεκτών (receiver processes).

Σημαντικό ρόλο εδώ παίζει η διαδικασία CAC (Call Admission Control) που ελέγχει ποιες από τις IP υπηρεσίες θα γίνουν δεκτές προκειμένου να μην ξεπεραστεί το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Σε ξεχωριστό κεφάλαιο γίνεται η αναλυτική παρουσίαση του συγκεκριμένου αλγόριθμου.

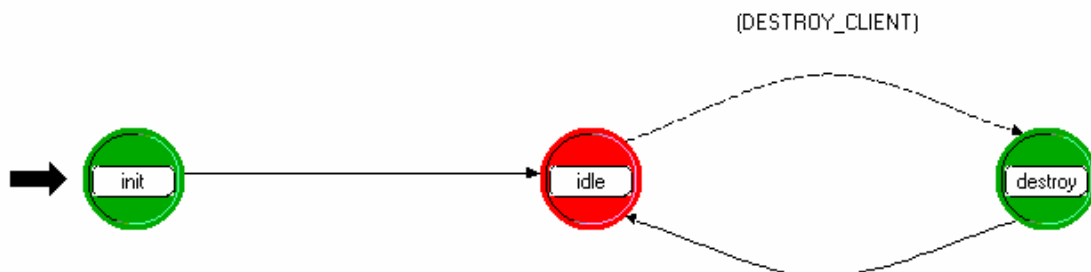
Άλλες λειτουργίες που επιτελεί η root process είναι να δημιουργήσει την διεργασία dnb process και να κρατά στατιστικά για τον χρόνο δημιουργίας και τερματισμού των sessions.

7.4.2. Οι Διεργασίες Υπηρεσιών

Δημιουργούνται έξι διεργασίες :

- radio_session_process
- hdtv_session_process
- sdtv_session_process
- voip_session_process
- www_session_process
- vod_session_process.

Ο ρόλος των διεργασιών αυτών είναι διπλός. Αφ' ενός υποκαθιστούν τον πελάτη (σταθμό) ως οντότητα μέσα στο δίκτυο και αφ' ετέρου διασφαλίζουν την έγκαιρη καταστροφή των κλήσεων υπηρεσιών όταν λήξει η διάρκειά τους (call duration), σε συνδυασμό με την προαναφερθείσα root_process αλλά και τις γεννήτριες κίνησης και τις διεργασίες δεκτών που αναλύονται εκτενέστερα παρακάτω.



Σχήμα 7.5 Τοπική session process

7.4.3. Γεννήτριες Κίνησης

Οι γεννήτριες κίνησης αποτελούν ένα από τα βασικότερα κομμάτια της προσομοίωσης. Υλοποιήσαμε τις γεννήτριες voip_dispatcher, www_dispatcher, vod_dispatcher, hdtv_dispatcher και sdtv_dispatcher, radio_dispatcher που δημιουργούν την κίνηση για τις αντίστοιχες εφαρμογές. Για να προσομοιώσουμε με ακρίβεια τη διάρκεια κλήσης, το μεσοδιάστημα μεταξύ δύο πακέτων της ίδιας κλήσης, τις ενεργές και ανενεργές περιόδους αλλά και τα μεγέθη των πακέτων αντιστοιχήσαμε μία γεννήτρια κίνησης σε κάθε κλήση υπηρεσίας, δηλαδή για κάθε νέα κλήση VoIP, www, VoD, SDTV, HDTV και Radio οι αντίστοιχες client_process δημιουργούν και μία νέα dispatcher process.

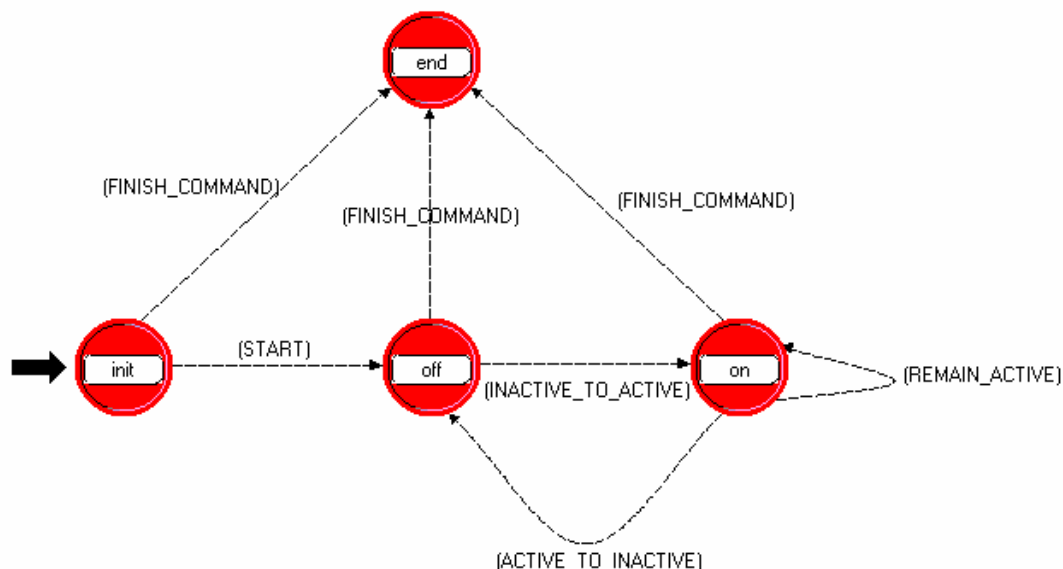
Οι γεννήτριες μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

- Γεννήτρια με ενεργές και ανενεργές περιόδους (υπηρεσίες VoIP και www)
- Γεννήτριες που είναι συνέχεια ενεργές και μεταδίδουν πακέτα σε διαστήματα ίσα με (μέγεθος πακέτου/bit rate) (υπηρεσία Radio)
- Γεννήτριες που παράγουν πακέτα σύμφωνα με κάποιο trace file (υπηρεσίες HDTV, SDTV, VoD)

Η κίνηση δεδομένων της υπηρεσίας VoIP ακολουθεί το ON-OFF μοντέλο. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό υπάρχει μια συνεχής εναλλαγή ανάμεσα σε δύο καταστάσεις: την κατάσταση εκπομπής πακέτων (ενεργή περίοδος) και την κατάσταση μη εκπομπής πακέτων (ανενεργή περίοδος). Αυτή η ροή δεδομένων χαρακτηρίζεται από τέσσερα κυρίως μεγέθη:

- Τον χρόνο t_{on} της ενεργού περιόδου.
- Τον χρόνο t_{off} της ανενεργού περιόδου.
- Τον χρόνο t_{int} μεταξύ δύο διαδοχικών εκπομπών πακέτων κατά τη διάρκεια μιας ενεργού περιόδου.
- Το μέγεθος πακέτου $packet_size$

Η στατιστική κατανομή καθώς επίσης και η μέση τιμή του καθενός από τα παραπάνω μεγέθη έχει αναλυθεί λεπτομερώς στο κεφάλαιο της προσομοίωσης της τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Η προγραμματιστική δομή της `voip_dispatcher` (ή της `www_dispatcher`) παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 7.6 Τυπική dispatcher process τύπου on-off

Η διεργασία ξεκινάει από την κατάσταση **init** στην οποία γίνεται η αρχικοποίηση των τιμών όλων των παραμέτρων. Επίσης μεταφέρονται οι τιμές των attributes call

duration, bit rate, on time, off time, interarrival time που έχουν εισαχθεί στη διεργασία root process , στις αντίστοιχες μεταβλητές και με την χρήση των τύπων του κεφαλαίου 6 για κάθε τύπο συνόδου υπολογίζεται η μέση τιμή και η στατιστική κατανομή που θα ακολουθήσει καθένα από τα μεγέθη t_{on} , t_{off} , t_{int} , packet_size της γεννήτριας.

Στη συνέχεια ο έλεγχος μεταβαίνει στην κατάσταση off η οποία αντιπροσωπεύει την ανενεργή περίοδο. Όσο διαρκεί η off period (χρόνο ίσο με t_{off}) δεν έχουμε δημιουργία πακέτων. Με τη λήξη της off period γίνεται μετάβαση στην ενεργό κατάσταση on.

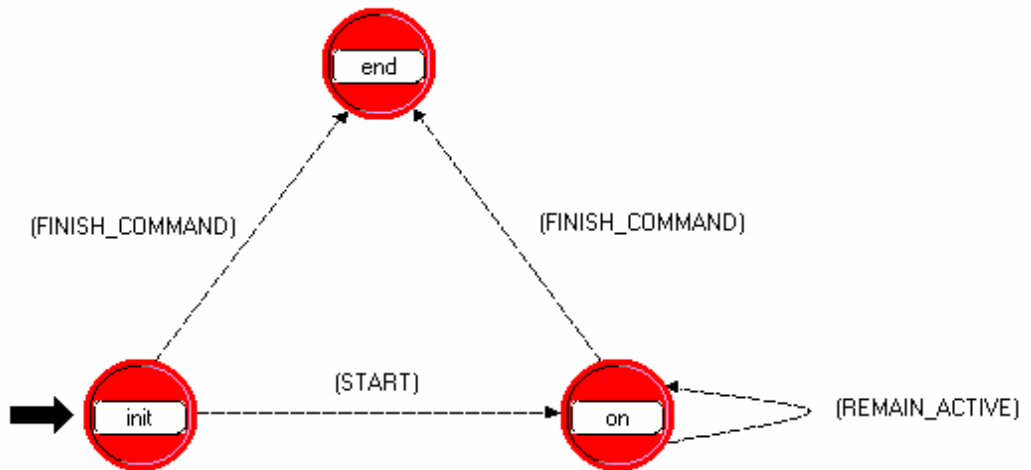
Με την είσοδο στην κατάσταση on πραγματοποιούνται οι εξής ενέργειες:

- Δημιουργία πακέτου ίσου με το προκαθορισμένο packet size ανάλογα με την υπηρεσία.
- Χωρισμός του IP πακέτου σε μικρότερα MPEG πακέτα των 188 bytes τα οποία στέλνονται στην διεργασία DVB η οποία τα τοποθετεί στις κατάλληλες ουρές.
- Στη generator process προγραμματίζεται η επόμενη διακοπή REMAIN_ACTIVE σε χρόνο t_{int} η οποία όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.6 θα προκαλέσει τη δημιουργία του επόμενου πακέτου και επανάληψη των δυο πρώτων βημάτων. Επίσης γίνεται έλεγχος για μετάβαση στην κατάσταση off .Το κριτήριο για αυτή την απόφαση είναι η σύγκριση του χρόνου εκπομπής του επόμενου πακέτου με το χρόνο λήξης της περιόδου εκπομπής πακέτων (on period).
- Κρατείται ως στατιστικό το bit rate της δημιουργίας πακέτων για να συγκριθεί με το throughput στο τέλος της προσομοίωσης.

Τέλος, στην κατάσταση **end** μεταβαίνει ο έλεγχος μετά από διακοπή FINISH_COMMAND η οποία σηματοδοτεί το τέλος της διάρκειας της συγκεκριμένης κλήσης υπηρεσίας (call duration) και προκαλεί την καταστροφή της session process που της αντιστοιχεί.

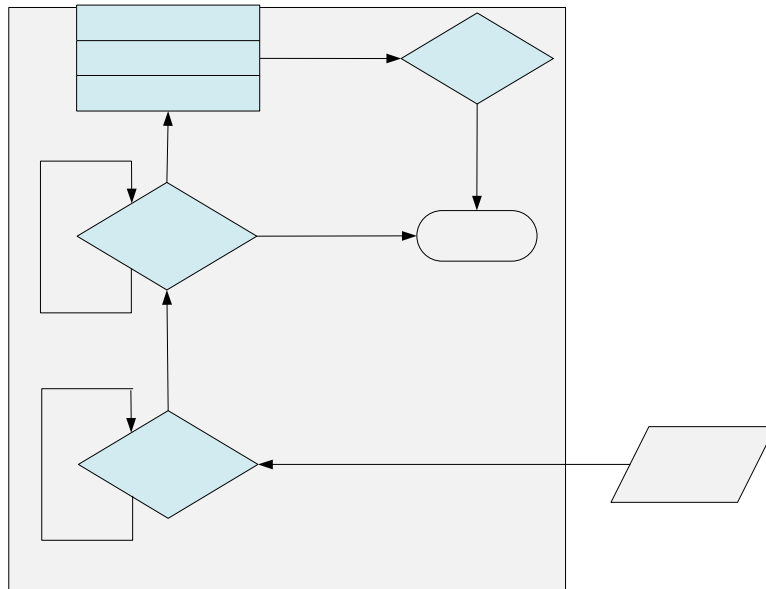
Οι γεννήτριες κίνησης των υπολοίπων υπηρεσιών είναι πανομοιότυπες στην υλοποίησή τους. Για το λόγο αυτό παρουσιάζονται στη γενική τους μορφή στο Σχήμα 7.7. Το process model που παρουσιάζεται είναι ίδιο με αυτό που χρησιμοποιούν οι HDTV, SDTV, VoD και Radio, με μόνη διαφορά ότι στο Radio εισάγονται οι παράμετροι και οι στατιστικές κατανομές της υπηρεσίας που της αντιστοιχεί, ενώ στις HDTV, SDTV και VoD οι παράμετροι καθόρίζονται από τα Trace Files τα οποία περιέχουν την αντίστοιχη πληροφορία αποθηκευμένη σε πίνακες. Παρακάτω φαίνεται ένα μικρό μέρος από ένα τέτοιο Trace File. Βλέπουμε ότι αποτελείται από δυο στήλες με το χρόνο σε msec στη μια και το μήκος των πακέτων σε bits στη άλλη.

#Time [ms]	Length [bits]
N	53999
DATA	
0	840
33	136
67	144
100	136
133	144
167	136



Σχήμα 7.7 Video Dispatcher

7.4.4. Αλγόριθμοι Ελέγχου Κίνησης



Σχήμα 7.8 Διεργασίες Ελέγχου Κίνησης

7.4.4.i. Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων (Call Admission Control – CAC)

Όπως έχουμε ήδη δει, αυτός ο μηχανισμός ελέγχει την κίνηση που επιτρέπεται να εξυπηρετηθεί από το δίκτυο, κατά προτίμηση με τέτοιο τρόπο που η καινούρια κίνηση να μην προκαλεί υπερφόρτωση στο δίκτυο και υποβάθμιση της ήδη εξυπηρετούμενης κίνησης.

Όπως βλέπουμε στο παραπάνω σχήμα, το οποίο αποτελεί μέρος του αρχικού 7.2, η διεργασία CAC λειτουργεί μόνο για τις IP υπηρεσίες (VoIP και VoD) και είναι σχεδιασμένος να εγγυάται καλή ποιότητα αυτών των υπηρεσιών, όταν οι πόροι του συστήματος τείνουν να εξαντληθούν λόγω αυξημένης κίνησης. Επειδή η κατηγορία κίνησης WWW αποτελεί υπηρεσία τύπου Best Effort, η CAC δεν επεμβαίνει στη λειτουργία της, και το αν θα εξυπηρετηθεί τελικά ο χρήστης εξαρτάται από το ρυθμό των χαμένων πακέτων που θα δημιουργηθούν από τις ουρές και την αποδεκτή από τον ίδιο καθυστέρηση που θα προκληθεί.

Η διεργασία CAC εκτελείται κάθε φορά που η root process στέλνει διακοπή για τη δημιουργία μίας νέας session process και λειτουργεί ως εξής. Δεδομένου ότι η διαμόρφωση και η κωδικοποίηση των πλαισίων που θα σταλούν δεν είναι σταθερές, δεν μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το συνολικό εύρος ζώνης σε bits/sec είναι κάποια συγκεκριμένη και σταθερή ποσότητα. Αντίθετα η ποσότητα που παραμένει σταθερή είναι ο ρυθμός μετάδοσης συμβόλων ανά δευτερόλεπτο. Μια τυπική τιμή για αναμεταδότη με εύρος ζώνης $BW=36\text{MHz}$ και συντελεστή $\alpha=0.20$ είναι 30 Mbaud. Αυτήν την τιμή θα χρησιμοποιήσουμε ως βάση για να κρίνει η CAC αν μία session μπορεί να γίνει δεκτή χωρίς να υποβαθμίσει την ποιότητα των ήδη υφιστάμενων υπηρεσιών.

Η CAC όπως την έχουμε υλοποιήσει είναι στην ουσία μια συνάρτηση η οποία παίρνει σαν είσοδο το επιθυμητό από το χρήστη bitrate και τον τρέχοντα σηματοθορυβικό λόγο του τερματικού του. Στην συνέχεια αφού βρει ποια κωδικοποίηση (modulation & coding) θα είναι κατάλληλη για το συγκεκριμένο SNR, ελέγχει τον παρακάτω αλγόριθμο:

ΕΑΝ
($B_{\text{current}} + B_{\text{new}} < B_{\text{available}}$)

ΤΟΤΕ

Αποδοχή Κλήσης ;

$B_{\text{current}} = B_{\text{current}} + B_{\text{new}} ;$

ΑΛΛΙΩΣ

ΕΑΝ

(Υπηρεσία = VoIP)

ΤΟΤΕ

Άρνηση Κλήσης;

ΕΑΝ

(Υπηρεσία = VoD)

ΤΟΤΕ

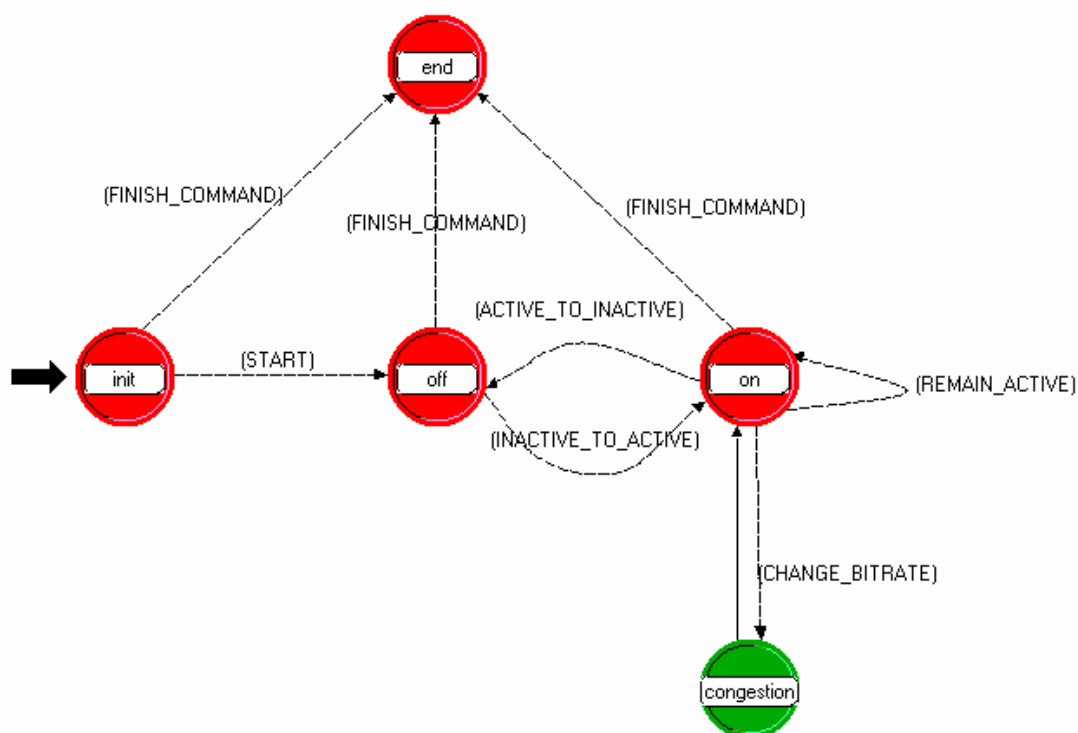
Υποβιβασμός Bitrate;
Επανεκτέλεση Ελέγχου (έως 3 φορές);
ΑΑΛΙΩΣ Άρνηση Κλήσης;

Όπου $B_{current}$ είναι το συνολικό εύρος ζώνης σε symbols/sec που χρησιμοποιείται από τις υπηρεσίες που ήδη παρέχονται, B_{new} το εύρος ζώνης σε symbols/sec που απαιτεί η υπό έλεγχο session και $B_{available}$ ο συνολικός διαθέσιμος από το σύστημα ρυθμός μετάδοσης συμβόλων. Το B_{new} υπολογίζεται βάση των bits/symbol για την συγκεκριμένη διαμόρφωση επί το peak bitrate για τις VoIP ή το μέσο bitrate για τις υπηρεσίες VoD.

7.4.4.ii. Έλεγχος Συμφόρησης (Congestion Control - CC)

Ένα σημαντικό εργαλείο στον Έλεγχο Κίνησης των πακέτων είναι ο Έλεγχος Συμφόρησης. Εμπλέκεται μόνο στις υπηρεσίες VoIP και VoD γιατί η WWW είναι best effort, και όπως στην CAC, η λειτουργία της δεν υπόκειται σε τέτοιου είδους ελέγχους.

Δεδομένου ότι η κωδικοποίηση και η διαμόρφωση των πλαισίων που θα σταλούν δεν είναι σταθερές, δε μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το σταθερό μέσο bitrate ισοδυναμεί με εξασφαλισμένη λειτουργία του συστήματος δίχως συμφορήσεις. Μπορεί δηλαδή μια υπηρεσία ενώ έχει γίνει ήδη δεκτή από την CAC και λειτουργεί κανονικά, μια αλλαγή στο SNR (π.χ. λόγω καιρικών φαινομένων) να δημιουργήσει προβλήματα στη ζεύξη. Έτσι πλέον για να συνεχίσει να λαμβάνει ο χρήστης, η session θα πρέπει να αλλάξει την κωδικοποίηση, ταυτόχρονα και να απαιτήσει μεγαλύτερο ποσοστό από το συνολικό διαθέσιμο ρυθμό μετάδοσης συμβόλων.



Σχήμα 7.9 VoIP dispatcher με Congestion Control

Σε ετούτη την περίπτωση, ο receiver στέλνει διακοπή (CHANGE_BITRATE) στην αντίστοιχη dispatcher process, και ξεκινά ο έλεγχος συμφόρησης από την διαδικασία Congestion Control. Υπάρχουν τρεις δυνατές τιμές του bitrate (high, medium και low) τις οποίες η Congestion Control δοκιμάζει αν ξεπερνούν το συνολικό διαθέσιμο Symbol Rate. Απ'αυτές που γίνονται δεκτές από τον έλεγχο, επιλέγει την καλύτερη δυνατή. Με αυτόν τον τρόπο, έχουμε την επιλογή του καλύτερου δυνατού bitrate όχι μόνο σε περίπτωση επιδείνωσης του SNR, αλλά ακόμα και όταν βελτιώνεται. Φυσικά αν κανένα από τα πιθανά bitrate δεν ικανοποιούν τη συνθήκη, τότε η Congestion Control διακόπτει τη λειτουργία της session. Εδώ ο αλγόριθμος ακολουθεί την παρακάτω δομή:

```

EAN
    ( $B_{\text{current}} - B_{\text{session}} + B_{\text{high}} < B_{\text{available}}$ )
TOTE
    bitrate_new = high_bitrate;
     $B_{\text{current}} = B_{\text{current}} - B_{\text{session}} + B_{\text{high}} ;$ 
ΑΛΛΙΩΣ EAN
    ( $B_{\text{current}} - B_{\text{session}} + B_{\text{medium}} < B_{\text{available}}$ )
TOTE
    bitrate_new = medium_bitrate;
     $B_{\text{current}} = B_{\text{current}} - B_{\text{session}} + B_{\text{medium}} ;$ 
ΑΛΛΙΩΣ EAN
    ( $B_{\text{current}} - B_{\text{session}} + B_{\text{low}} < B_{\text{available}}$ )
TOTE
    bitrate_new = low_bitrate;
     $B_{\text{current}} = B_{\text{current}} - B_{\text{session}} + B_{\text{low}} ;$ 
ΑΛΛΙΩΣ
    Απόρριψη Κλήσης;

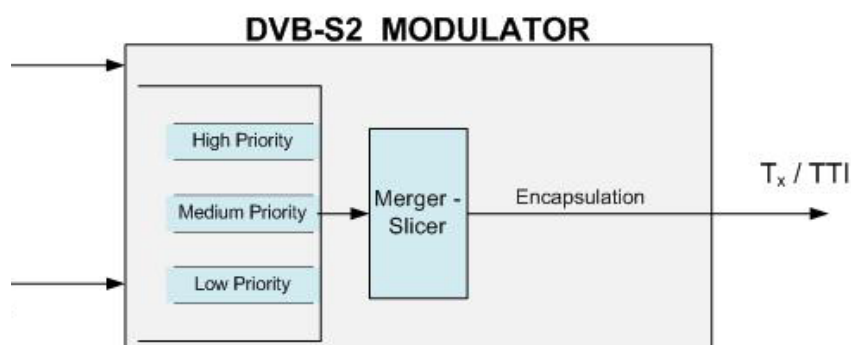
```

Όπου B_{current} είναι το συνολικό εύρος ζώνης σε symbols/sec που χρησιμοποιείται από τις υπηρεσίες που ήδη παρέχονται, B_{session} το εύρος ζώνης σε symbols/sec που χρησιμοποιεί ήδη η υπό έλεγχο session και $B_{\text{available}}$ ο συνολικός διαθέσιμος από το σύστημα ρυθμός μετάδοσης συμβόλων ενώ τα B_{high} , B_{medium} και B_{low} είναι τα εύρη ζώνης σε symbols/sec που θα χρησιμοποιεί η session με τις αντίστοιχες τιμές bitrate.

Το **bitrate_new** είναι το νέο bitrate της υπηρεσίας μετά την εφαρμογή του CC αλγόριθμου. Τα **high_bitrate**, **medium_bitrate** και **low_bitrate** είναι οι αντίστοιχοι ρυθμοί σε bits/sec όπως τους έχουμε ορίσει σε κάθε τύπο υπηρεσίας.

7.4.5. Ο DVB-S2 Διαμορφωτής

7.4.5.i. Προδιαγραφές Διαμορφωτή



Σχήμα 7.10 Λειτουργίες DVB-S2 Διαμορφωτή

Η συγκεκριμένη διεργασία αναλαμβάνει να προσομοιώσει και να υλοποιήσει τη λειτουργία του σταθμού πύλης – gateway, ο οποίος μεταδίδει τα δεδομένα από τον παροχέα του περιεχομένου στους χρήστες. Το συγκεκριμένο κομμάτι του προσομοιωτή στην πραγματικότητα μπορεί να βρίσκεται στο έδαφος και να στέλνει τα δεδομένα στο HAP (non regenerative architecture) είτε στο ίδιο το HAP (regenerative architecture). Στην περίπτωση μας χρησιμοποιήσαμε την non-regenerative αρχιτεκτονική εφαρμόζοντας τις αντίστοιχες καθυστερήσεις διάδοσης των πακέτων, από τις γεννήτριες κίνησης στην πύλη και από την πύλη στους χρήστες.

Το πρότυπο DVB-S2 προτείνει την χρήση ενός αριθμού από TDM (Time Division Multiplexing) φέροντων ανά δέσμη. Το συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης καταναίμεται στις δέσμες ακολουθώντας ένα συγκεκριμένο μοτίβο επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων και έτσι τελικά η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι μια υβριδική TDM/FDM Time/Frequency Division Multiplexing). Κάθε δέσμη TDM χωρίζεται σε χρονοθυρίδες (σε κάθε χρονοθυρίδα χωράει ένα πλαίσιο DVB-S2 που ονομάζεται FECFRAME). Όπως γνωρίζουμε, το FECFRAME είναι αρκετά μεγάλο σε σχέση με πλαίσια άλλων συστημάτων και έτσι μπορεί να περιέχει μεγάλο αριθμό IP πακέτων. Εφόσον αναφερόμαστε και σε unicast υπηρεσίες η πληροφορία των πακέτων αυτών προορίζεται για ένα τερματικό κάθε φορά, στο οποίο αντιστοιχεί ένα λόγος Σήματος προς Θόρυβο - SNIR (Signal-to-Noise-plus-Interference Ratio) λόγω συνθηκών διάδοσης. Τελικά το FECFRAME θα πρέπει να μεταδίδεται κάθε φορά με τέτοια κωδικοποίηση που να μπορεί να ληφθεί χωρίς σφάλματα από το τερματικό του χρήστη. Επιπλέον επειδή το σύστημα μας θέλουμε να έχει υποστήριξη για broadcast υπηρεσίες, το σύστημα θα πρέπει να ακολουθεί συγκεκριμένες προδιαγραφές όπως φαίνεται στον Πίνακα 14.

Πίνακας 14 Προδιαγραφές Συστήματος DVB-S2

Διαμόρφωση Συστήματος		Broadcast υπηρεσίες	Unicast υπηρεσίες
QPSK	1/4, 1/3, 2/5	E	N
	1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9, 9/10	N	N
8PSK	3/5, 2/3, 3/4, 5/6, 8/9, 9/10	N	N
16APSK	2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9, 9/10	E	N
32APSK	3/4, 4/5, 5/6, 8/9, 9/10	E	N
CCM		N	N
VCM		E	E
ACM		ΔΠ	N
FECFRAME (κανονικό)	64 800 (bits)	N	N
FECFRAME (μικρό)	16 200 (bits)	ΔΠ	N
Single Transport Stream		N	N
Multiple Transport Streams		E	E
Single Generic Stream		ΔΠ	E
Multiple Generic Streams		ΔΠ	E
Roll-off 0,35, 0,25 and 0,20		N	N
Όπου N = Ναι, E = Επιλεκτικά, ΔΠ = Δεν Προβλέπεται			

Από τον Πίνακα 14 γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι για να έχουμε ταυτόχρονη υποστήριξη broadcast και unicast υπηρεσιών, η μοναδική επιλογή για την προσαρμογή ανάλογα με το SNIR είναι η Μεταβλητή Κωδικοποίηση και Διαμόρφωση (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. Συγκεκριμένα για την προσομοίωση χρησιμοποιήσαμε τρία modulations, το QPSK 1/2, με αποδοτικότητα 1 bit/symbol, το 8PSK 5/6, με αποδοτικότητα 2.5 bit/symbol, και το 16PSK 8/9, με αποδοτικότητα 3.5 bit/symbol. Στον επόμενο πίνακα φαίνεται ποια χρησιμοποιεί η κάθε υπηρεσία.

Πίνακας 15 Αντιστοιχία Υπηρεσιών - Διαμορφώσεων

Υπηρεσία	Διαμόρφωση	Code Rate
HDTV	8PSK	5/6
SDTV	QPSK	1/2
Radio	QPSK	1/2
VoD	Όλα	Όλα
VoIP	Όλα	Όλα
WWW	16PSK	8/9

Η επιλογή των χαμηλότερων σε bits/symbol διαμορφώσεων και κωδικοποιήσεων έγινε με γνώμονα την εξασφάλιση σθεναρότητας για τις βασικές υπηρεσίες πολυεκπομπής που επιθυμούμε να είναι πάντα διαθέσιμες, και οποίες είναι οι SDTV και Radio. Συνεπώς με τη συγκεκριμένη διαμόρφωση (QPSK 1/2) ακόμα και αν οι συνθήκες στο κανάλι διάδοσης είναι χειριστες, δεν θα αλλοιώνονται τα χαρακτηριστικά των υπηρεσιών αυτών, αφού το ελάχιστο ανεκτό C/N είναι περίπου 1 dB.

Στην περίπτωση τώρα της τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας, είναι επιθυμητό να έχουμε αποδοτικότερη αξιοποίηση του bandwidth, αφού η συγκεκριμένη υπηρεσία είναι πολύ απαιτητική σε ρυθμό μετάδοσης. Επιπλέον θεωρήσαμε ότι η συγκεκριμένη υπηρεσία δεν είναι αναγκαία για το χρήστη σε περιπτώσεις πολύ κακών συνθηκών, εφόσον θα εξυπηρετείται (για πληροφόρηση κτλ.) από την τηλεόραση χαμηλής ευκρίνειας. Η 8PSK 5/6 κρίθηκε ότι καλύπτει επαρκώς τις ανάγκες αυτές, με ρυθμό 2.5 bits/symbol και ελάχιστο ανεκτό C/N περίπου 9.5 dB.

Στις unicast υπηρεσίες VoIP και VoD επιλέξαμε να εξυπηρετούνται και από τις 3 δυνατές διαμορφώσεις, ανάλογα με τα δεδομένα που λαμβάνει το σύστημα για την κατάσταση του χρήστη κάθε στιγμή. Το αν θα λάβει σωστά τα δεδομένα ο χρήστης, δεν εξαρτάται λοιπόν πλέον από το κανάλι, αλλά από την κίνηση του δικτύου τη συγκεκριμένη στιγμή, λόγω των λειτουργιών της CAC και της CC.

Τέλος στην περίπτωση του WWW, δεδομένου ότι δεν έχουμε αυστηρές απαιτήσεις (υπηρεσία τύπου Best Effort) μπορούμε να στέλνουμε τα δεδομένα με τη μέγιστη δυνατή διαμόρφωση, δηλαδή την 16PSK 8/9. Πιθανά σφάλματα στη λήψη των δεδομένων δεν είναι απαγορευτικά για την υπηρεσία, αφού μπορούμε να έχουμε επανεκπομπή πακέτων.

7.4.5.ii. Αλγόριθμος Χρονοδρομολόγησης Πακέτων

Το πρότυπο δεν υποδεικνύει πως ακριβώς διαμορφώνεται το ρεύμα TDM, και είναι υπόθεση του εκάστοτε χρονοπρογραμματιστή να τοποθετήσει τις θυρίδες με τη σωστή σειρά, κάτι που αναλαμβάνει να κάνει κεντρικά η gateway. Ο σχεδιασμός των αλγορίθμων καταμερισμού προσφέρει ένα μεγάλο αριθμό πιθανών υλοποιήσεων, ανάλογα με το πώς γίνεται η κατηγοριοποίηση της κίνησης, το κριτήριο χρονοδρομολόγησης κτλ. Για παράδειγμα, τέτοιες κατηγοριοποιήσεις είναι η διαμόρφωση και η κωδικοποίηση των πακέτων, η αιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας κτλ., ενώ σαν διαφορετικά κριτήρια μπορούμε να υποθέσουμε την μεγιστοποίηση της ρυθμοπαροχής (throughput) του συστήματος, την εξασφάλιση μικρής καθυστέρησης κτλ.

Στην περίπτωση μας όπως έχουμε ήδη δει, οι δυο βασικές κατηγορίες κίνησης είναι η IP και η Broadcast. Από 'κει και πέρα κάθε μια έχει διάφορες υποκατηγορίες. Η όλη διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω, παρουσιάζεται συνοπτικά και στα Σχήματα 7.11 και 7.12 σε επόμενες σελίδες.

Όσον αφορά την αιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας, τα IP πακέτα κατηγοριοποιούνται σε τρεις ουρές διαφορετικής προτεραιότητας. Στην πρώτη κλάση τοποθετούμε την υπηρεσία VoIP που χρειάζεται σταθερό ρυθμό μετάδοσης και εγγυημένα μικρή καθυστέρηση. Στη δεύτερη κλάση έχουμε την VoD, η οποία απαιτεί μικρές διακυμάνσεις καθυστέρησης και μέσο ρυθμό μετάδοσης που δε χρειάζεται να

είναι σταθερός. Στην τρίτη κλάση ανήκει το www που ως γνωστόν είναι τύπου best effort υπηρεσία, οπότε οι απαιτήσεις μας είναι οι ελάχιστες δυνατές.

Από την άλλη μεριά, για τις broadcast υπηρεσίες ακολουθήθηκε διαφορετική προσέγγιση. Έτσι, δεδομένου ότι τα Radio, SDTV, HDTV έχουν αρκετά κοινά χαρακτηριστικά χρησιμοποιήθηκε η έννοια της στατιστικής πολυπλεξίας όπου το καθένα πακέτο εξυπηρετείται με τη χρονική σειρά άφιξης του στον πολυπλέκτη. Δηλαδή δεν υπάρχουν ουρές προτεραιότητας αλλά μια ουρά στην οποία προστίθενται σειριακά τα πακέτα καθώς αφικνούνται.

Μια βασική απαίτηση που θέλαμε να υπάρχει στο σύστημά μας είναι, η Τηλεόραση και το Ραδιόφωνο να έχουν εξασφαλισμένη προτεραιότητα λόγω χαμηλής καθυστέρησης («ζωντανή» μετάδοση). Ωστόσο δεν επιλέχθηκε να τοποθετηθεί σε μια ουρά, με αυξημένη προτεραιότητα, μαζί με τις ουρές των IP υπηρεσιών, γιατί κάτι τέτοιο θα δημιουργούσε προβλήματα λόγω του μεγάλου όγκου δεδομένων. Έτσι τελικά από τις δυο τελικές ουρές που προκύπτουν από τις IP και Broadcast υπηρεσίες (Σχήμα 7.11) στέλνονται εναλλάξ BBFRAMES προς την ενθυλάκωση και δημιουργία FEC πλαισίων, ένα από καθέ τύπο. Με αυτήν την τύπου Round-Robin διαδικασία πετυχαίνουμε να είναι εξασφαλισμένο το μισό διαθέσιμο symbolrate για τις Broadcast υπηρεσίες, χωρίς όμως να επιβαρύνουμε και τις IP υπηρεσίες. Στην περίπτωση βέβαια που μία από τις δύο ουρές είναι κενή, επιλέγεται να σταλεί BBFRAME από την ίδια ουρά με πριν, ενώ αν είναι κενές και οι δύο ουρές στέλνουμε Dummy πλαίσιο, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του DVB-S2.

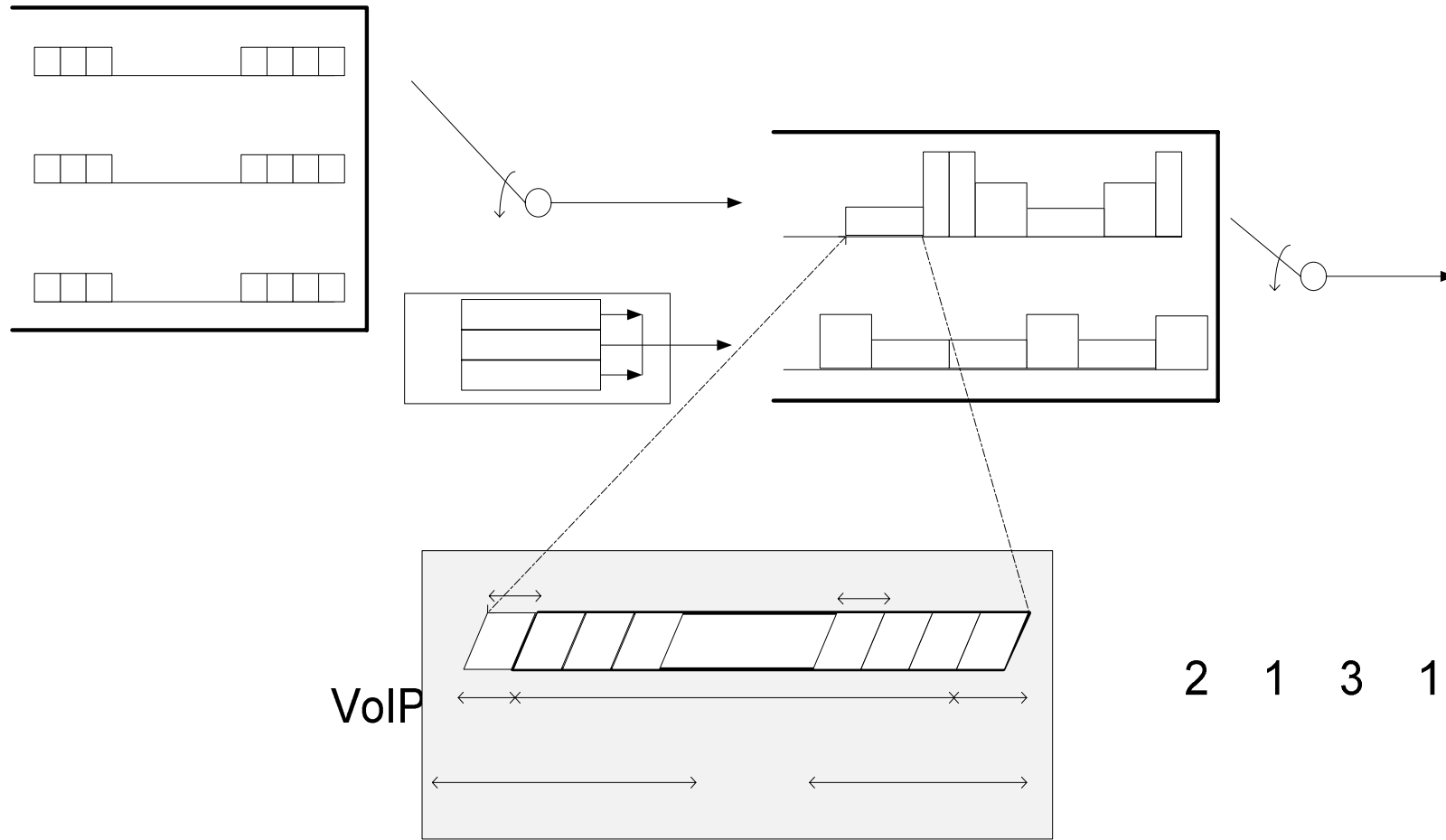
Όμως, δεδομένου ότι για κάθε πακέτο BBFRAME τελικά θα επιλεχτεί μόνο μια κωδικοποίηση, χρειάζεται να χωριστούν τα πακέτα σε περαιτέρω υποκατηγορίες ανάλογα με τον τύπο διαμόρφωσης που ακολουθούν, κάτι που επηρεάζει άμεσα τη σειρά με την οποία θα σταλούν τελικά τα πακέτα.

Στην περίπτωση των Broadcast υπηρεσιών, κάθε φορά που πρέπει να γεμίσει ένα BBFRAME με δεδομένα ελέγχεται η ουρά που περιέχει τα πακέτα όπως περιγράψαμε πριν. Επιλέγουμε σαν διαμόρφωση και κωδικοποίηση του BBFRAME, αυτή του πρώτου πακέτου προς αποστολή. Στην συνέχεια επιλέγονται πακέτα ίδιας διαμόρφωσης έως ότου το πλαίσιο γεμίσει. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι η λειτουργία της επιλογής πακέτων ακολουθεί αλγόριθμο τύπου FIFO για τη συγκεκριμένη διαμόρφωση. Αν το πλαίσιο δεν γεμίσει στο συγκεκριμένο έλεγχο, στέλνεται άλλο BBFRAME από τις IP ουρές ή αποστέλεται DUMMY πλαίσιο, εάν ούτε αυτές έχουν αρκετά πακέτα διαθέσιμα προς αποστολή,. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για ένα συγκεκριμένο αριθμό φορών και στη συνέχεια πραγματοποιείται προσθήκη bit (padding), ώστε να συμπληρωθεί πλήρως το BBFRAME.

Σχετικά με τις IP υπηρεσίες ακολουθείται ένα παρόμοιο μοντέλο επιλογής πακέτων με τις εξής τροποποιήσεις. Λόγω της ύπαρξης ουρών με διαφορετικές προτεραιότητες, ελέγχεται αρχικά η ουρά μέγιστης προτεραιότητας (ουρά υπηρεσίας VoIP), και επιλέγεται σαν διαμορφωση του BBFRAME αυτή του πρώτου πακέτου. Στη συνέχεια γεμίζουμε το πλαίσιο με πακέτα αυτής της ουράς με τον αλγόριθμο τύπου FIFO που αναφέραμε παραπάνω. Όσο το πλαίσιο δεν είναι γεμάτο και δεν υπάρχουν κατάλληλα πακέτα προς αποστολή στην πρώτη ουρά, προχωράμε στην ουρά δεύτερης προτεραιότητας (ουρά υπηρεσίας VoD) και παρομοίως στην τρίτη (ουρά υπηρεσίας WWW). Έαν φυσικά δεν υπάρχουν αρχικά πακέτα στην πρώτη ουρά ώστε να επιλεχθεί η διαμόρφωση και κωδικοποίηση του BBFRAME, αυτό γίνεται με βάση το πρώτο πακέτο της δεύτερης ουράς ή διαδοχικά της τρίτης. Ο αλγόριθμος αυτός παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 7.12. Και πάλι, αν τελικά δεν

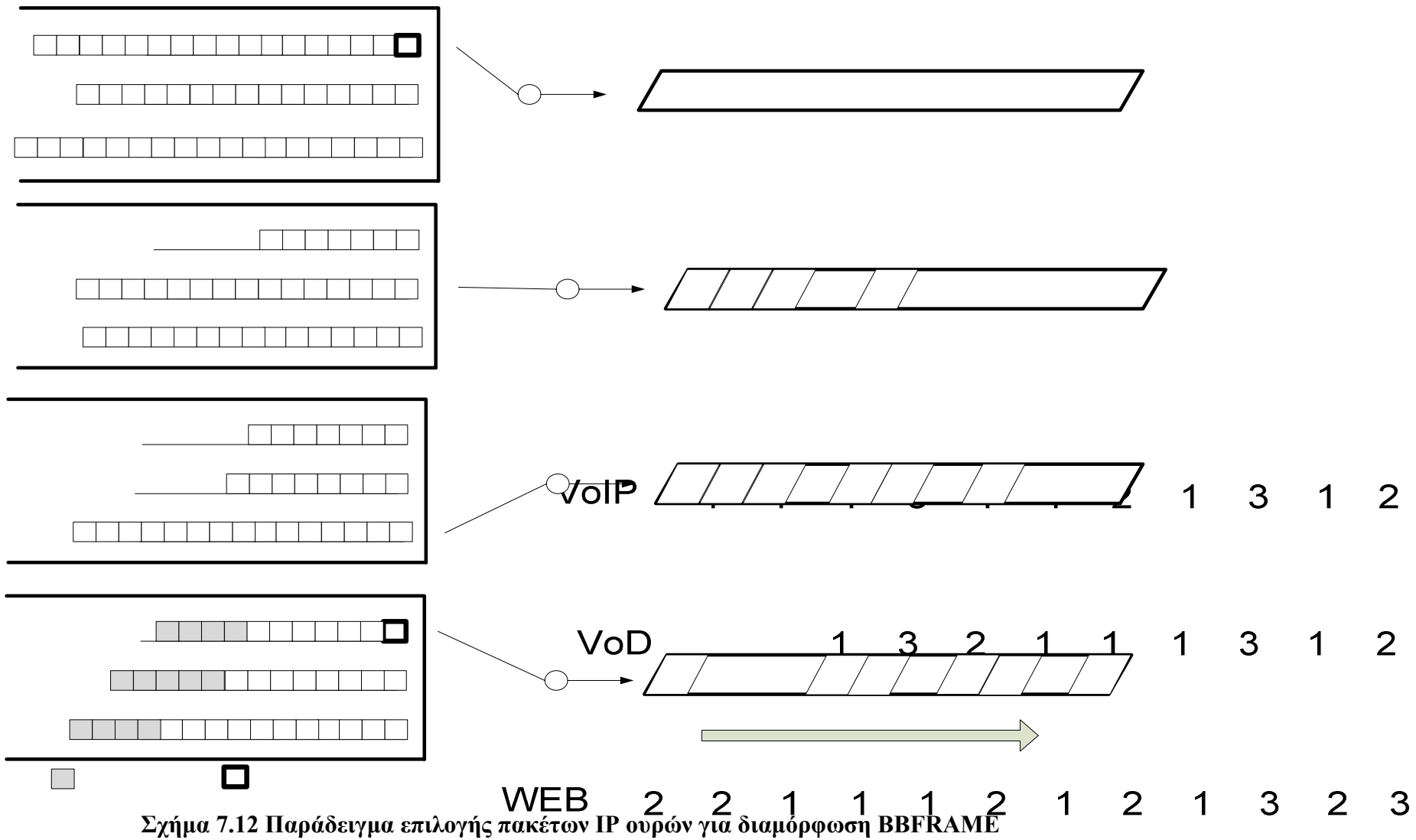
υπάρχουν αρκετά πακέτα για τη δημιουργία του BBFRAME, ακολουθείται ίδια διαδικασία με την αντίστοιχη των υπηρεσιών Broadcast.

Μία σημαντική απαίτηση σχετικά με την υλοποίηση του QoS κομματιού, είναι η διαχείριση των ουρών. Αυτό κυρίως αφορά το μέγεθος των ενταμιευτών των πακέτων, έτσι ώστε να απορρίπτονται πακέτα που φτάνουν στην ουρά σε συνθήκες συμφόρησης (ή επικείμενης συμφόρησης). Ο υπολογισμός που πραγματοποιούμε κάθε φορά για να επιλέξουμε αν θα απορριφθεί ή όχι ένα νέο πακέτο, έχει να κάνει με τον μέγιστο ανεκτό χρόνο καθυστέρησης που επιτρέπεται από την εκάστοτε υπηρεσία. Στην περίπτωση της WWW ουράς βέβαια δεν υπάρχει κάποιος τέτοιος περιορισμός όσον αφορά τη καθυστέρηση, και υποθέτουμε λοιπόν ενταμιευτή απείρου μεγέθους. Ο τρόπος που επιλέχθηκε για την αντιμετώπιση αυτής της κατάστασης είναι η θέσπιση ορίων απόρριψης για κάθε ουρά..



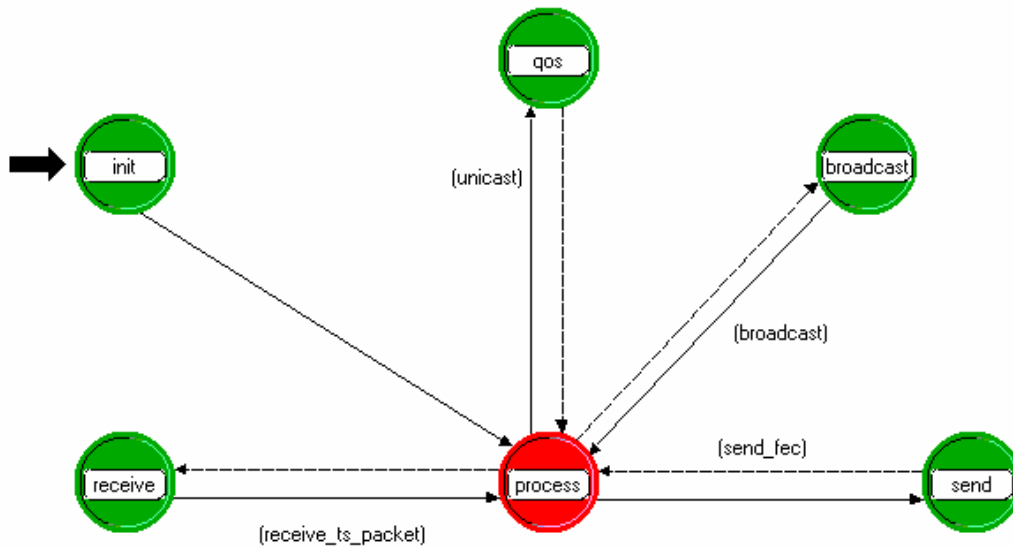
Σχήμα 7.11 Διάγραμμα Αλγορίθμου Χρονοδρομολόγησης Πακέτων και Δημιουργίας BBFRAME

VoD 2 3 3 . . . 3 1 1 2



Σχήμα 7.12 Παράδειγμα επιλογής πακέτων IP ουρών για διαμόρφωση BBFRAME

7.4.5.iii. Υλοποίηση Διεργασίας Διαμορφωτή Στον Προσομοιωτή



Σχήμα 7.13 Η DVB process

Οι κύριες λειτουργίες που επιτελεί η `dvb_process` είναι :

- Να μετατρέπει τα πακέτα σε μορφή ICI από τους dispatchers και να τα αποθηκεύει με μορφή `packet struct` στην κατάλληλη κάθε φορά ουρά,
- Να κάνει τη συγχώνευση (merging) των πακέτων σε BBFRAMES σύμφωνα με τα παραπάνω,
- Να κάνει την ενθυλάκωση σε FECFRAMES και να στέλνει αυτά τα FECFRAMES σύμφωνα με τον αλγόριθμο Round Robin που αναφέραμε παραπάνω,
- Να κρατά στατιστικά όσον αφορά τα μεγέθη των ουρών που ελέγχει.

Η `dvb_process` ξεκινά την λειτουργία της στην αρχή της προσομοίωσης, αφού την δημιουργεί η root process, και τρέχει συνεχώς.

Ξεκινώντας από την `init` state, αρχικοποιούνται κάποιοι παράμετροι (μήκη `mpeg packets`, DFL, FEC, τα `pilot symbols`, το `symbol rate` καθώς και τα `timeouts` των ουρών) και τα στατιστικά. Δημιουργούνται με μορφή λίστας οι τρεις ουρές για την αποθήκευση των IP πακέτων, η ουρά για την αποθήκευση των Broadcast πακέτων, καθώς και δυο λίστες που αντιπροσωπεύουν τα δυο frames προς γέμισμα πριν το Round Robin. Στην συνέχεια ο έλεγχος περνάει στην `state process`.

Η `state process` λειτουργεί στέλνοντας διακοπές (unicast και broadcast) στις states QoS και Broadcast, ανάλογα με το BBFRAME που πρόκειται να φτιαχτεί. Αυτές οι states εκτελούν τις παρακάτω λειτουργίες:

- Επιλογή διαμόρφωσης που πρόκειται να επιλεγεί για το επόμενο frame,

- Επιλογή πακέτων κατάλληλων προς αποστολή από τις ουρές αναμονής και μεταφορά τους στις λίστες BBFRAME.

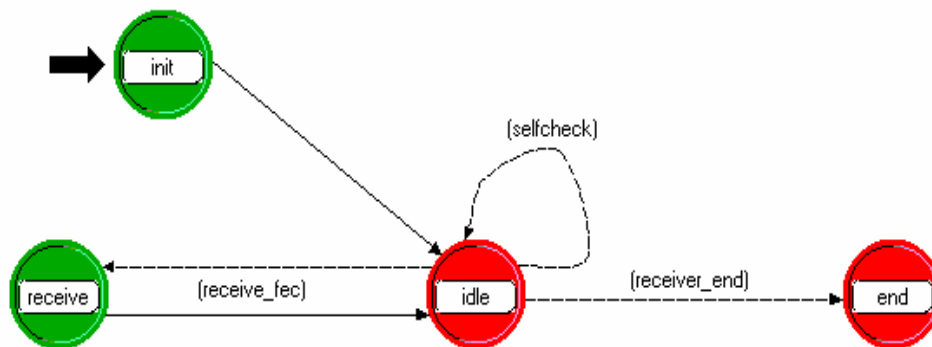
Στη συνέχεια επιστρέφεται ο έλεγχος στην process όπου γίνεται:

- Έλεγχος για το αν ένα BBFRAME έχει γεμίσει,
- Προσθήκη bit (padding), ώστε να συμπληρωθεί πλήρως το BBFRAME σε περίπτωση που δεν είναι γεμάτο μετά από αριθμό επαναλήψεων που καθορίζεται από κατάλληλη μεταβλητή.

Όταν πια το BBFRAME έχει γεμίσει, τον έλεγχο παίρνει η send state, η οποία αναλαμβάνει την ενθυλάκωση του BBFRAME σε FECFRAME προσθέτοντας την επικεφαλίδα και αναλαμβάνει να το στείλει σε όλους τους receivers με τη μορφή ICI (FEC ICI). Η διακοπή που ενεργοποιεί την send state, προγραμματίζεται σε χρόνο ίσο με τη διάρκεια που χρειάζεται να σταλεί το συγκεκριμένο FEC από το σύστημα. Αν η process state δεν είχε BBFRAME γεμάτο για να στείλει, ο χρόνος της διακοπής θα είναι αυτός της αποστολής του dummy frame.

Όσον αφορά τη λήψη των πακέτων από τους dispatcher, η state που αναλαμβάνει τη διαδικασία είναι η receive state. Κάθε φορά που ένα πακέτο ICI φτάνει με interrupt από τους dispatcher, ο έλεγχος περνάει από την process state στη receive state. Το πακέτο ICI αλλάζει και γίνεται μορφής packet struct, τοποθετείται στην κατάλληλη ουρά (voip, vod www ή broadcast) ή απορρίπτεται αν η ουρά είναι ήδη γεμάτη. Τέλος κρατάει τα στατιστικά σχετικά με το μήκος των ουρών και το χρόνο παραμονής των πακέτων. Όταν ο έλεγχος επιστρέφει στην process με κατάλληλο flag δεν εκτελούνται οι συνηθισμένες λειτουργίες της.

7.4.6. Δέκτες – Receivers



Σχήμα 7.14 receiver process

Ο ρόλος της receiver process είναι κυρίως να κρατάει τα στατιστικά από τη μεριά του δέκτη. Μας ενδιαφέρει δηλαδή να δούμε την τελική ποιότητα υπηρεσιών που απολαμβάνει ο χρήστης, σαν αποτέλεσμα των μηχανισμών που έχουν προηγηθεί.

Κάθε receiver process, όπως έχουμε ήδη δει, αντιστοιχεί σε μια session process και ξεκινάει μαζί τη λειτουργία τους. Ξεκινώντας από την init process αρχικοποιεί τα στατιστικά που πρόκειται να εγγράψει και αποκτά πρόσβαση στα στοιχεία των υπολοίπων sessions και στη συνέχεια εισέρχεται στην idle κατάσταση. Εκεί η μόνη λειτουργία που συμβαίνει είναι ο επαναλαμβανόμενος έλεγχος (selfcheck) για το αν άλλαξε σημαντικά το SNR του τερματικού, ώστε να χρειάζεται να στείλουμε διακοπή (CHANGE_BITRATE) στην αντίστοιχη dispatcher process.

Από εκεί κάθε φορά που έρχεται μια διακοπή από την dnb process (receive fec) περνάμε στην state receive. Αυτή αποκτά πρόσβαση στο FEC ICI, το οποίο περιέχει τη λίστα με τα mpeg πακέτα του FECFRAME. Έπειτα προσπελαύνει τη λίστα κρατώντας μόνο τα πακέτα που αντιστοιχούν στο δικό της session. Έτσι μπορεί να κρατήσει τα στατιστικά που ενδιαφέρουν για το συγκεκριμένο session.

Τέλος, στην κατάσταση **end** μεταβαίνει ο έλεγχος μετά από διακοπή kill_receiver από την session process, η οποία σηματοδοτεί το τέλος της διάρκειας της συγκεκριμένης κλήσης υπηρεσίας (call duration) και προκαλεί την καταστροφή της receiver process που της αντιστοιχεί.

7.5. Σενάρια Προσομοίωσης

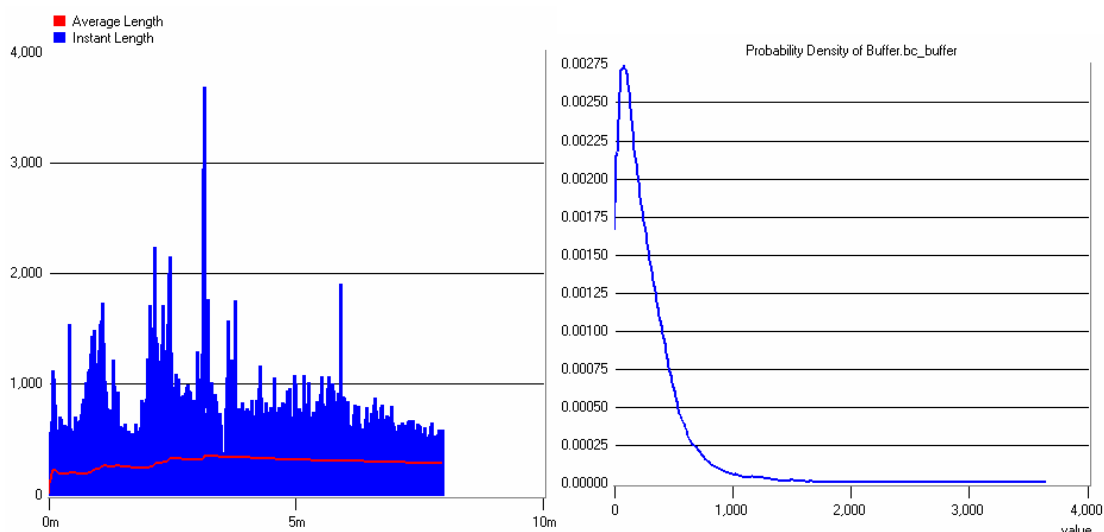
7.5.1. Μόνο Broadcast Υπηρεσίες

Τρέξαμε την προσομοίωση για 8 λεπτά με τα εξής χαρακτηριστικά για τις Broadcast Υπηρεσίες:

Πίνακας 16 - Broadcast Traffic Mix

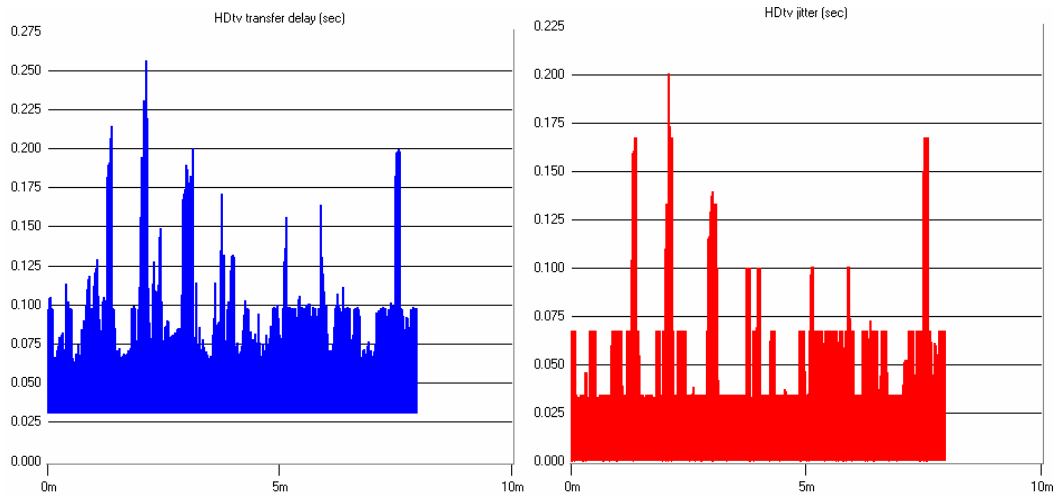
	Κανάλια	Bitrate(Kbps)	SymbolRate(MBaud)
SDTV Low	5	1750	1,750
SDTV High	5	3750	3,750
HDTV Low	2	4000	1,600
HDTV High	2	10000	4,000
Radio	20	2560	2,560
Total			13,660

Καταλαμβάνουν δηλαδή το 45% του διαθέσιμου bandwidth (30 Mbaud). Το υπόλοιπο Bandwidth παραμένει ανεκμετάλλευτο τις περισσότερες στιγμές. Παραθέτουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

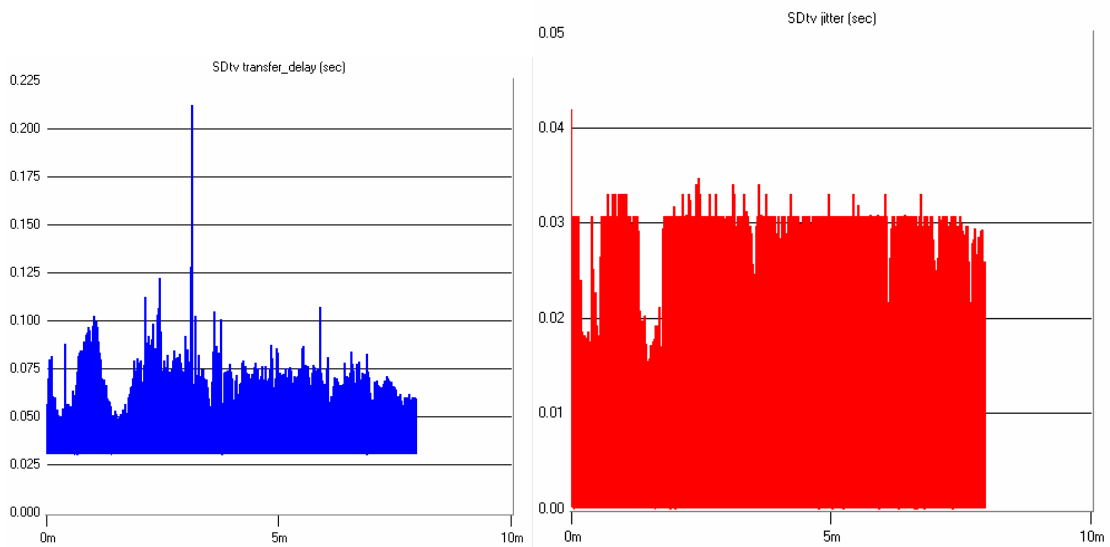


Σχήμα 7.15 - Μήκος ουράς Broadcast Υπηρεσιών (Στιγμιαίο, Μέσο, κατανομή PDF)

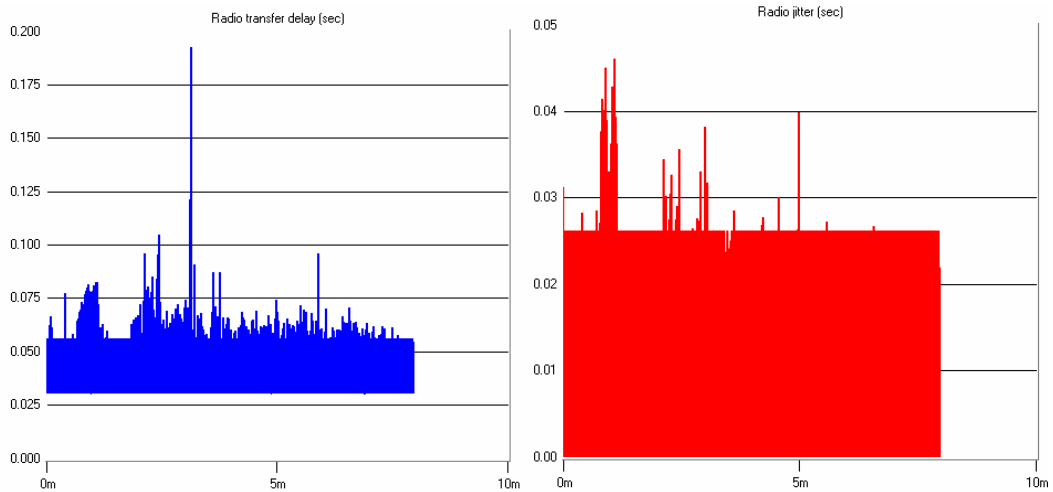
Παρατηρούμε ότι το μέγεθος της ουράς μόνο μία φορά περνάει τα 3000 πακέτα MPEG και ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των τιμών κυμαίνεται πολύ κάτω από το 1000. Συγκεκριμένα από στατιστική ανάλυση των τιμών βλέπουμε ότι η μέση τιμή της ουράς είναι 254 πακέτα, με μεγάλη όμως απόκλιση (284 πακέτα).



Σχήμα 7.16 - Καθυστέρηση μετάδοσης και Jitter πακέτων HDTV υπηρεσίας.

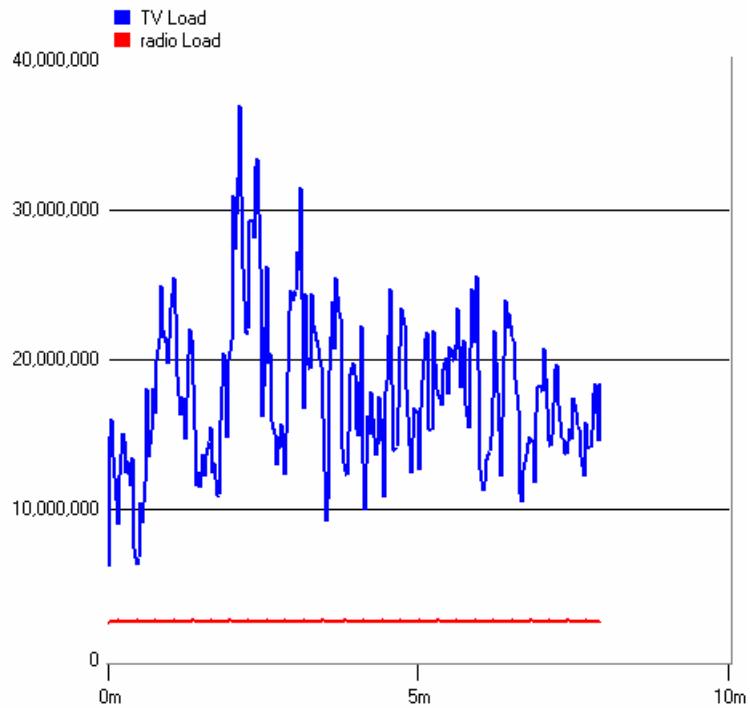


Σχήμα 7.17 - Καθυστέρηση μετάδοσης και Jitter πακέτων SDTV υπηρεσίας.

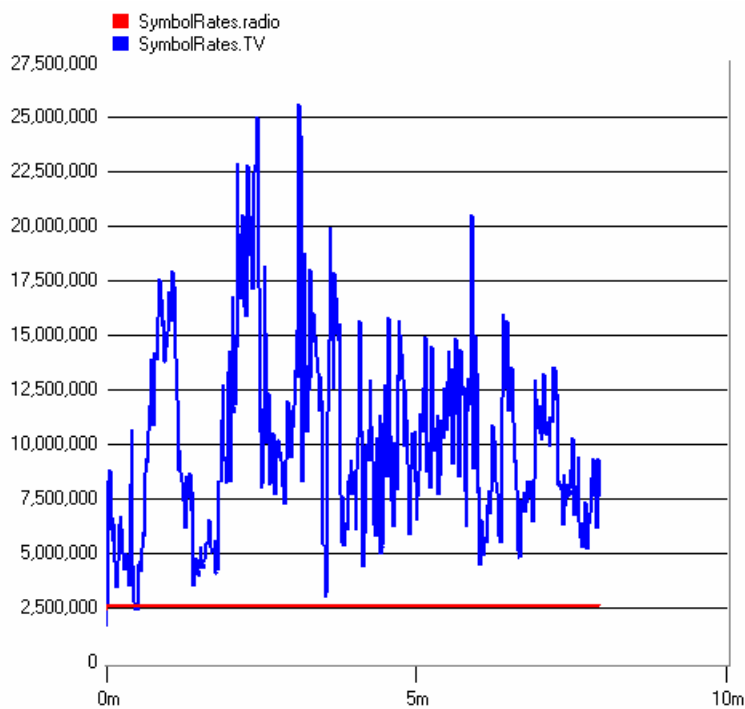


Σχήμα 7.18 - Καθυστέρηση μετάδοσης και Jitter πακέτων Radio υπηρεσίας

Όπως είναι φυσιολογικό οι καθυστερήσεις μετάδοσης και το Jitter των πακέτων των τριών υπηρεσιών έχουν σχετικά παρόμοιες τιμές, αφού εξυπηρετούνται από την ίδια ουρά αναμονής πριν μπουν στο BBFRAME. Η λίγο μεγαλύτερη τιμή τους στην περίπτωση της HDTV οφείλεται στην διαφορετική κωδικοποίηση που χρησιμοποιεί αλλά και στο αυξημένο bitrate τους. Πάντως σε κάθε περίπτωση, οι τιμές των πολύ σημαντικών αυτών παραμέτρων είναι απόλυτα αποδεκτές, αφού είναι κατά μέσο όρο πολύ μικρότερα του 0.1 sec.

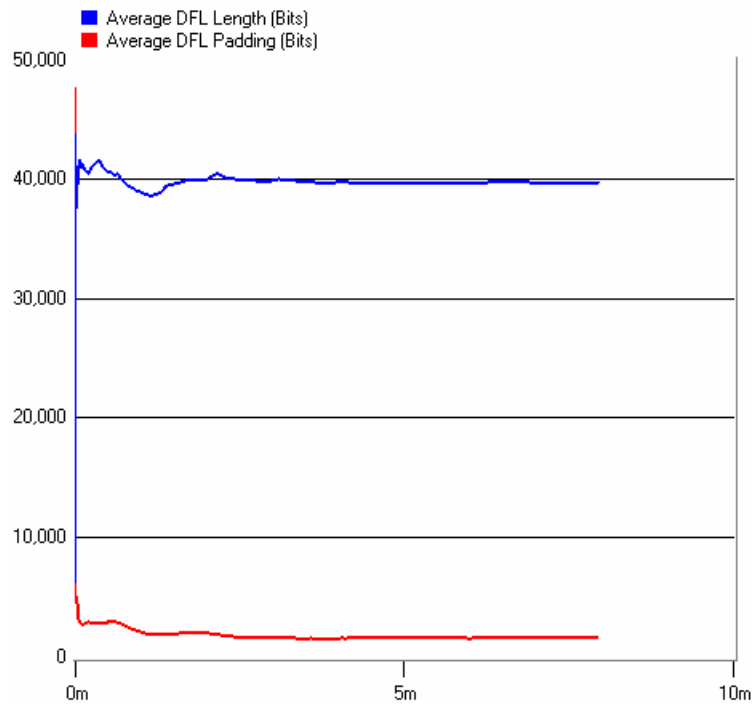


Σχήμα 7.19 - Ρυθμός μετάδοσης γεννητριών κίνησης σε bps.



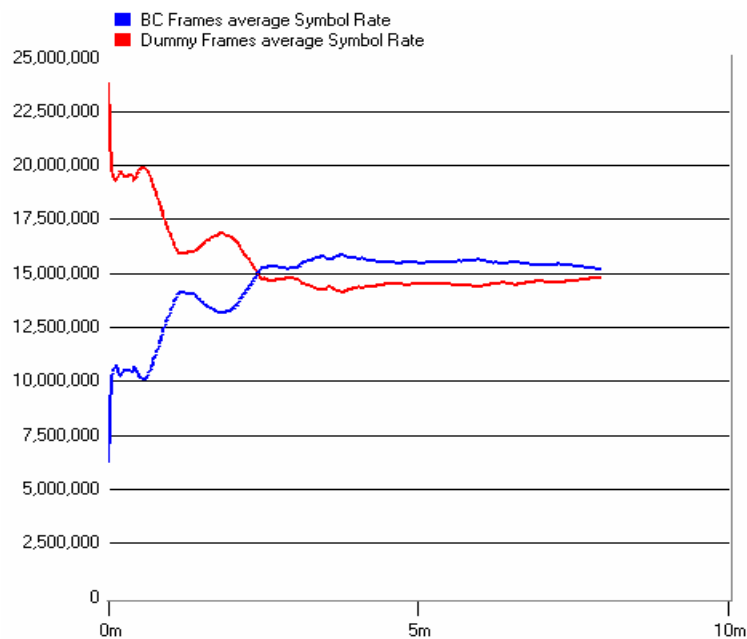
Σχήμα 7.20 - Ρυθμός μετάδοσης γεννητριών κίνησης σε symbols/sec.

Από την απεικόνιση των ρυθμών μετάδοσης του συστήματος παρατηρούμε το πόσο μεγάλος είναι ο φόρτος του συστήματος από τις υπηρεσίες τηλεόρασης. Παρόλα αυτά είναι σημαντικό ότι ακόμη και αν στιγμιαία έχουμε πλήρη χρησιμοποίηση του Bandwidth, κατά μέσο όρο το Bandwidth μένει ανεκμετάλλευτο.



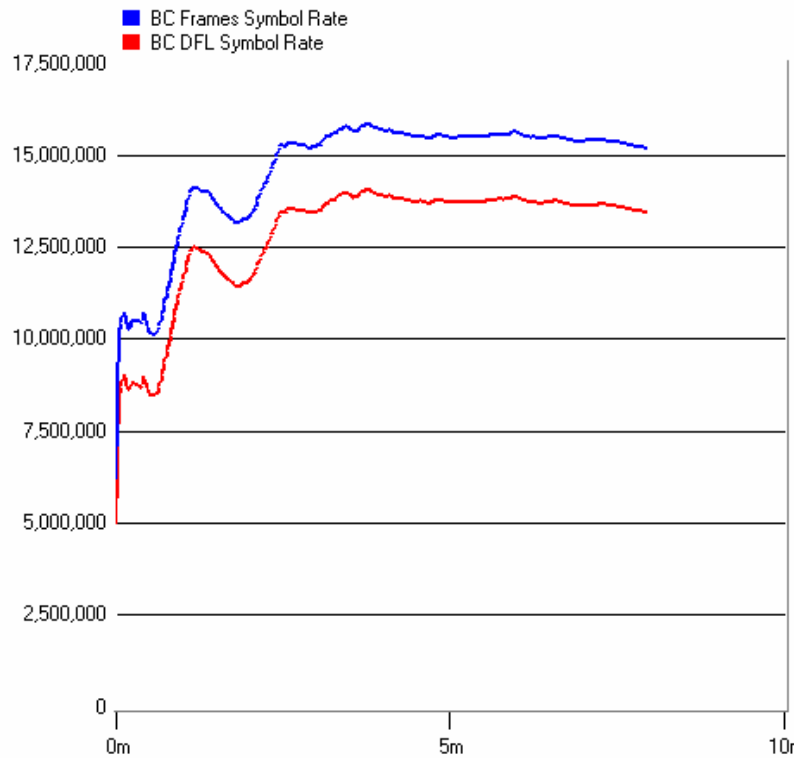
Σχήμα 7.21 - Μέση τιμή Μήκους DFL και Padding των BBFRAMEs

Με μέση τιμή 39718 bits για το ωφέλιμο DFL μήκος του πλαισίου και 1689 bits για παραγέμισμα, παρατηρούμε ότι η απόδοση της πλαισίωσης BBFRAME είναι πολύ καλή, περίπου της τάξης του 96%.



Σχήμα 7.22 - Ρυθμοί Μετάδοσης BC FECs και dummy πλαισίων

Εδώ βλέπουμε την αναλογία χρήσιμων FEC πλαισίων με τα dummy πλαίσια που αποστέλλονται από το σύστημα κατά μέσο όρο. Επιβεβαιώνεται η θεωρητική χρησιμοποίηση 45% του traffic mix που χρησιμοποιήσαμε.



Σχήμα 7.23 - Σύγκριση ωφέλιμου Symbol Rate με συνολικά χρησιμοποιούμενο

Η απόδοση της ενθυλάκωσης FEC φαίνεται να είναι και πάλι αρκετά αποδοτική, αν χειρότερη από την BBFRAME ενθυλάκωση, μιας και πλέον προστίθενται bits για την κωδικοποίηση (LDPC και BCH encoding).

7.5.2. Broadcast Υπηρεσίες και IP υπηρεσίες – Load Factor 0.8

Τρέξαμε την προσομοίωση για 8 λεπτά με τα ίδια χαρακτηριστικά για τις Broadcast Υπηρεσίες:

Πίνακας 17 - Broadcast Traffic Mix

	Κανάλια	Bitrate(Kbps)	SymbolRate(MBaud)
SDTV Low	5	1750	1,75
SDTV High	5	3750	3,75
HDTV Low	2	4000	1,6
HDTV High	2	10000	4
Radio	20	2560	2,56
Total			13,66

Καταλαμβάνουν δηλαδή το 45% του διαθέσιμου bandwidth (30 MBaud), ενώ το υπόλοιπο διαθέσιμο εύρος ζώνης διατίθεται στις IP υπηρεσίες ως εξής.

Πίνακας 18 - Unicast Traffic Mix

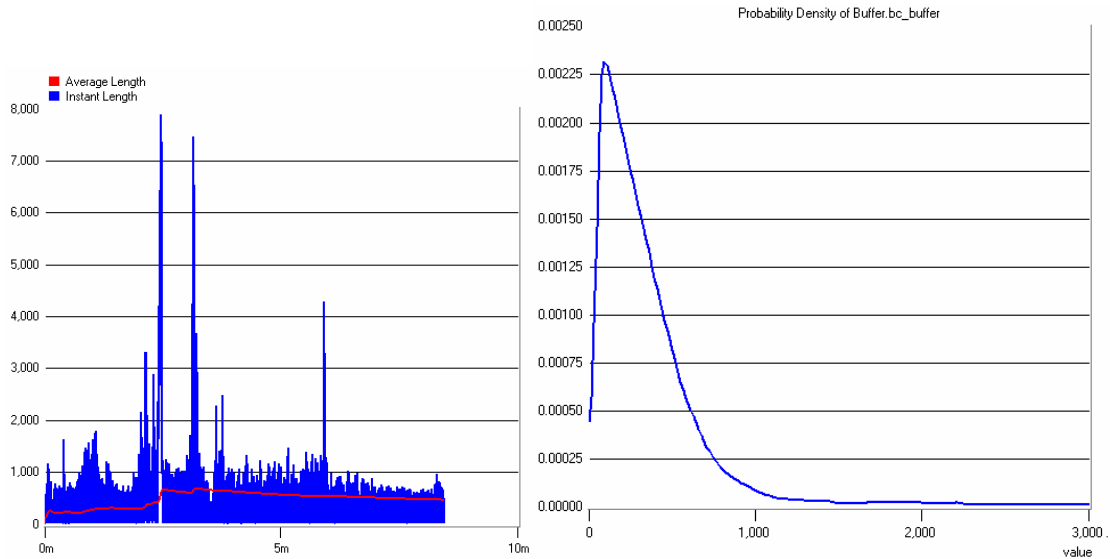
	Ποσοστό	Load = 0.8	Symbol Rate(MBaud)
VoIP	15%	12%	3,6
VoD	25%	20%	6
WWW	5%	4%	1,2
Total			10,8

Καταλαμβάνουν δηλαδή το 36% του διαθέσιμου bandwidth και έτσι έχουμε τελικά την επιθυμητή τιμή Load Factor του συστήματος ίση με 80%.

Με τις συγκεκριμένες ρυθμίσεις, ο αριθμός των IP υπηρεσιών που έτρεξαν είναι ο εξής:

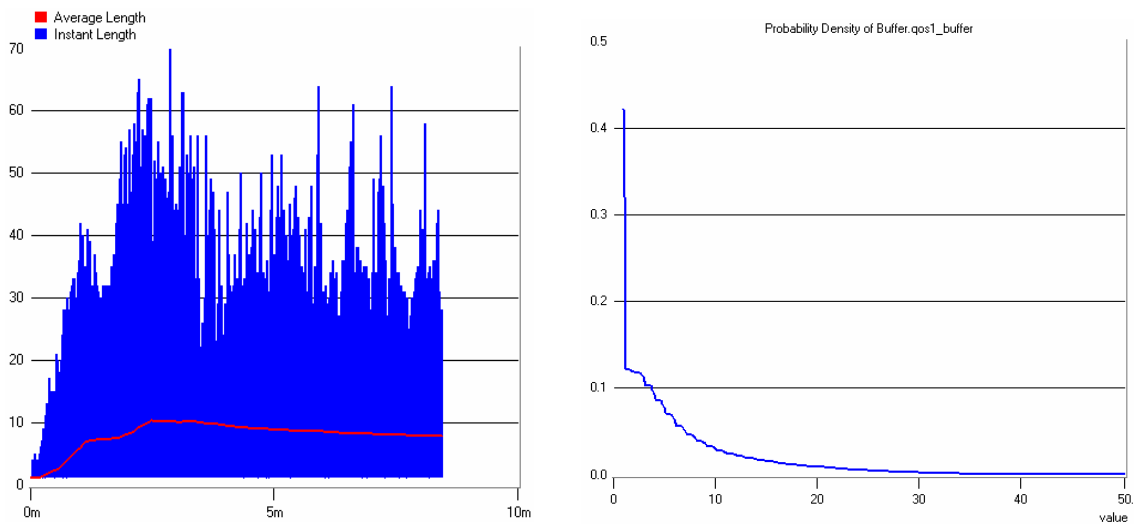
- 1502 κλήσεις VoIP, χωρίς να γίνει κανένα Call Deny από την CAC, από τις οποίες, οι 1283 τερματίστηκαν κανονικά μέσα στο χρόνο των 8 λεπτών.
- 28 VoD sessions, οι οποίες έγιναν δεκτές από την CAC με το μέγιστο δυνατό Bitrate (256 Kbps), και από τις οποίες, 14 διέκοψαν τη λειτουργία τους λόγω Congestion Control, αφού πρώτα είχε υποβιβαστεί το bitrate τους, και 2 τερμάτισαν κανονικά.
- 41 WWW sessions, από τα οποία τα 14 τερμάτισαν τη λειτουργία τους.

Παραθέτουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

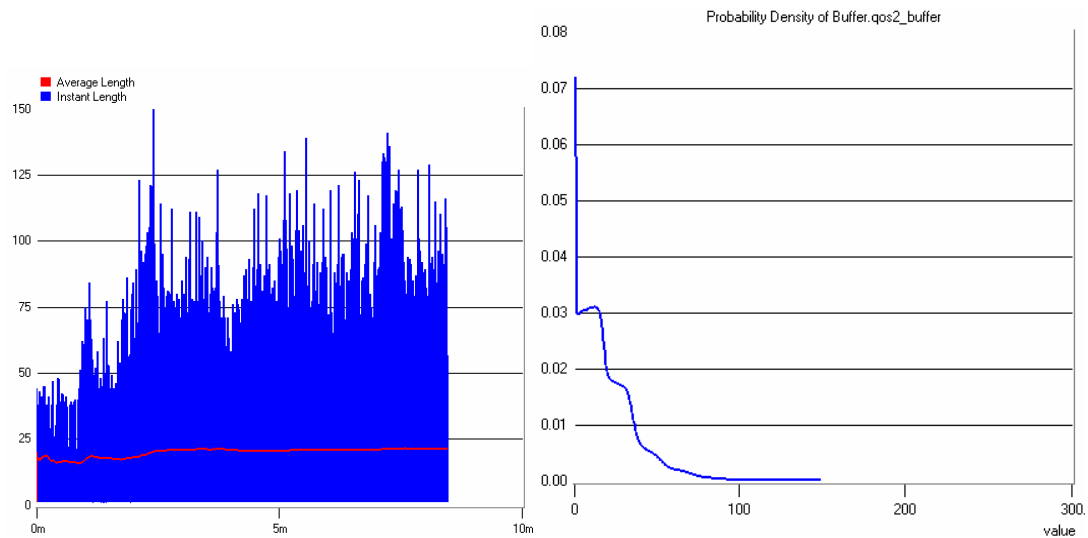


Σχήμα 7.24 - Μήκος ουράς Broadcast Υπηρεσιών (Στιγμιαίο, Μέσο, κατανομή PDF)

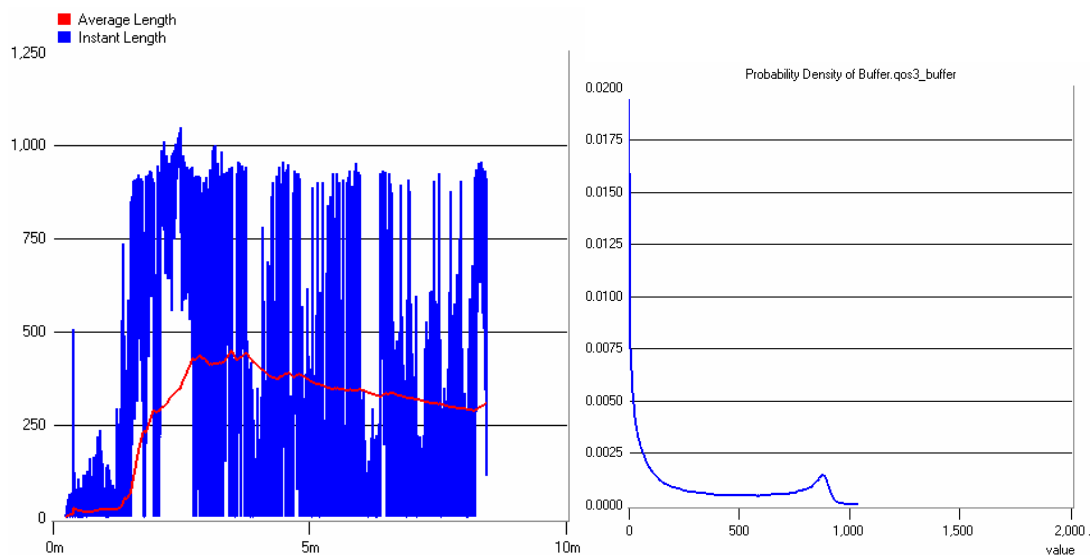
Το μήκος της ουράς Broadcast φαίνεται να επηρεάζεται στις μέγιστες τιμές που παίρνει (σχεδόν 8000, σε σχέση με τα 3000 του προηγούμενου σεναρίου), γενικότερα όμως παραμένει αρκετά πιο χαμηλά κατά μέσο όρο. Συγκεκριμένα από στατιστική ανάλυση των δεδομένων βρήκαμε ότι η μέση τιμή της ουράς είναι 477 πακέτα.



Σχήμα 7.25 - Μήκος ουράς VoIP Υπηρεσιών (Στιγμιαίο, Μέσο, κατανομή PDF)

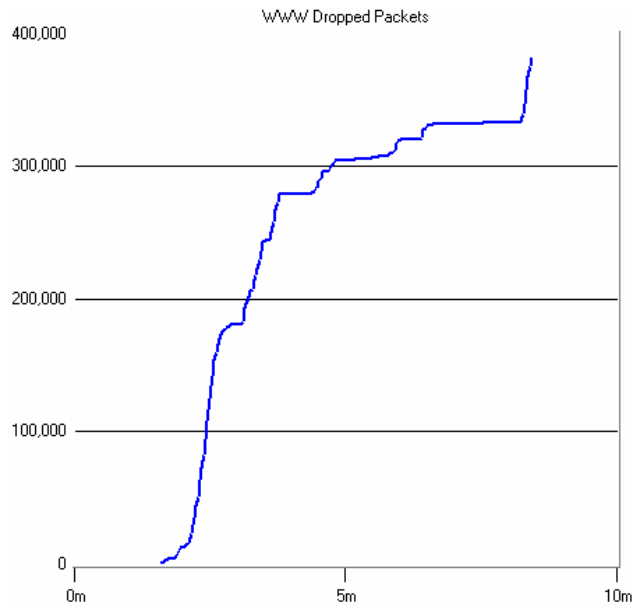


Σχήμα 7.26 - Μήκος ουράς VoD Υπηρεσιών (Στιγμιαίο, Μέσο, κατανομή PDF)



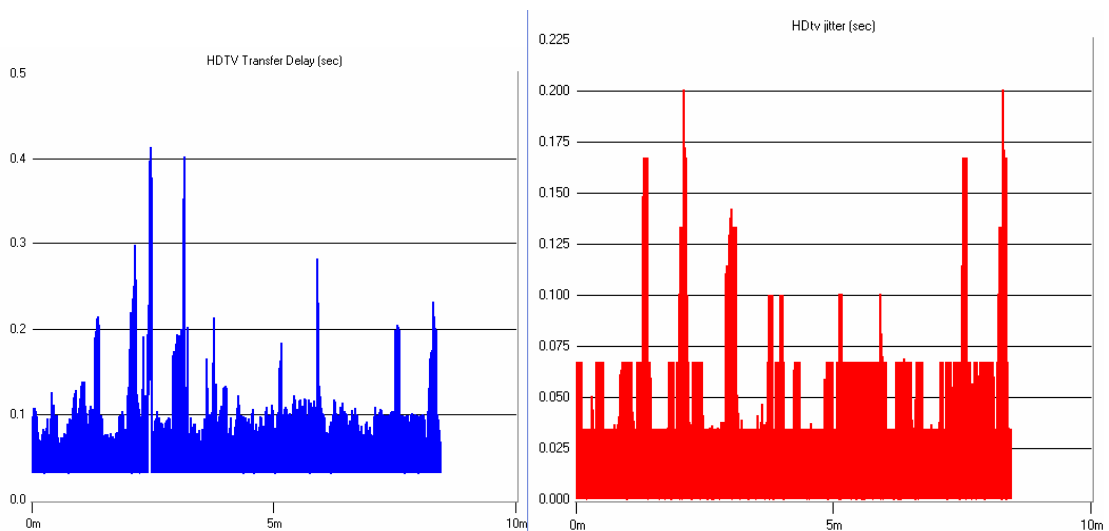
Σχήμα 7.27 - Μήκος ουράς WWW Υπηρεσιών (Στιγμιαίο, Μέσο, κατανομή PDF)

Από τις τρεις IP υπηρεσίες, παρατηρώντας τα στατιστικά των αντίστοιχων ουρών αναμονής των πακέτων τους (ουρά 1^η προτεραιότητα για VoIP, 2^η προτεραιότητας για VoD και 3^η για WWW), βλέπουμε ότι όπως είναι αναμενόμενο η VoIP ουρά έχει κατά μέσο όρο το μικρότερο μήκος. Συγκεκριμένα το μέσο μήκος της είναι 8 πακέτα, τη στιγμή που το μήκος της VoD ουράς είναι 21 πακέτα και της WWW ουράς 307 πακέτα. Βέβαια το μήκος της 3ης ουράς θα ήταν πολύ μεγαλύτερο εάν δεν υπήρχε ο μηχανισμός timeout που πετάει drop πακέτα.

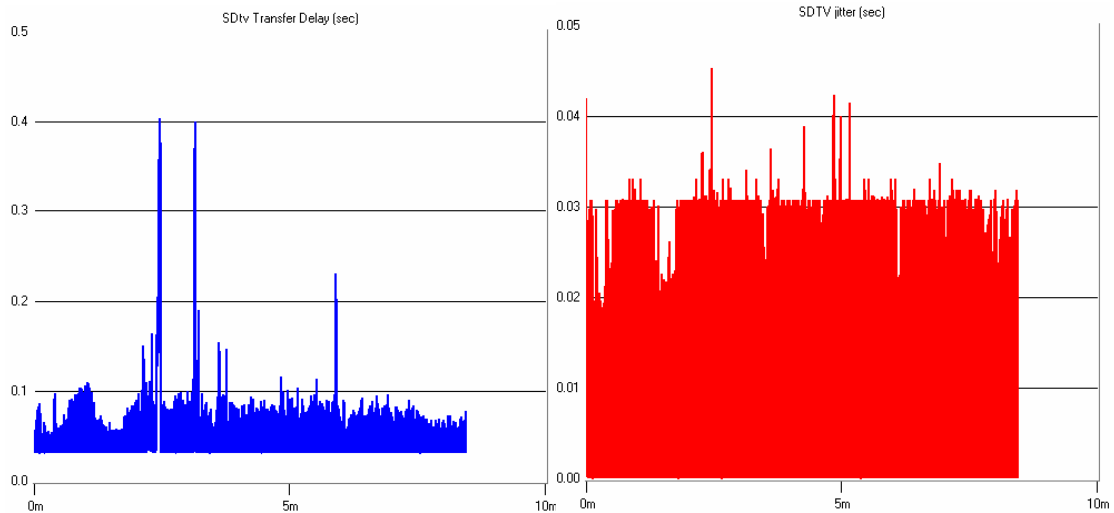


Σχήμα 7.28 - Πλήθος dropped πακέτων από timeout ουράς

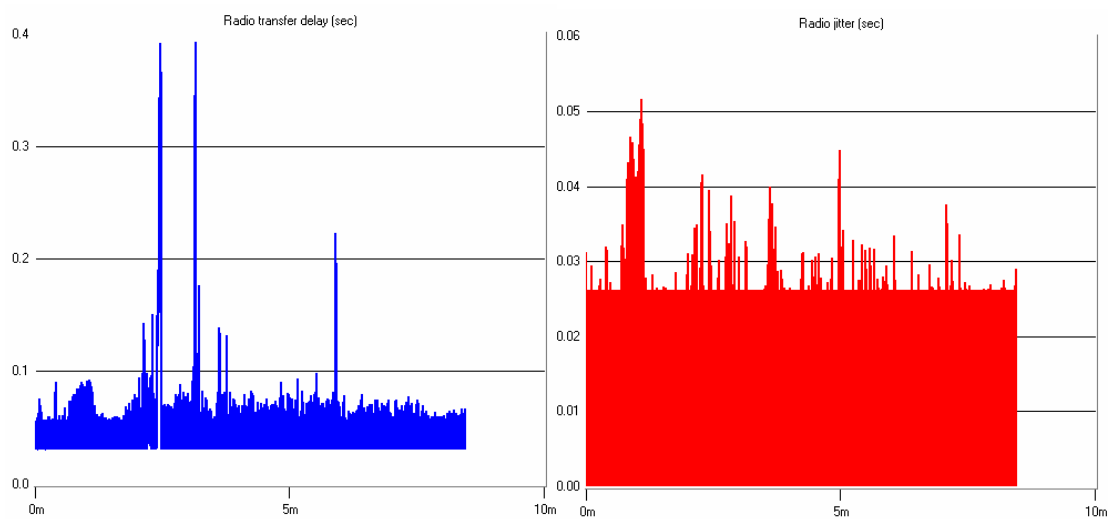
Εδώ βλέπουμε τελικά ότι ο αριθμός των dropped πακέτων είναι σχεδόν απαγορευτικός για τη συγκεκριμένη υπηρεσία.



Σχήμα 7.29 - Καθυστέρηση μετάδοσης και Jitter πακέτων HDTV υπηρεσίας.

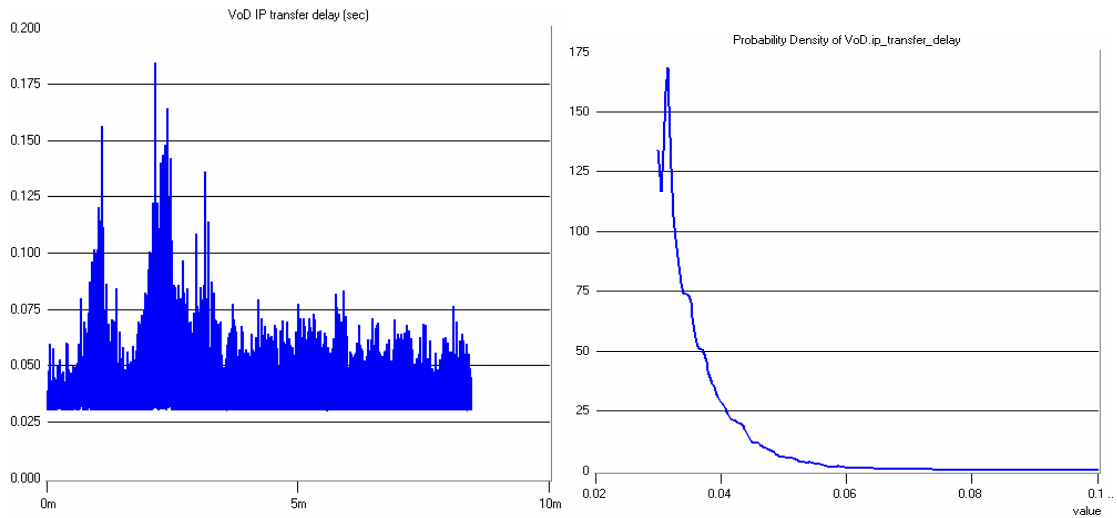


Σχήμα 7.30 - Καθυστερήση μετάδοσης και Jitter πακέτων SDTV υπηρεσίας.

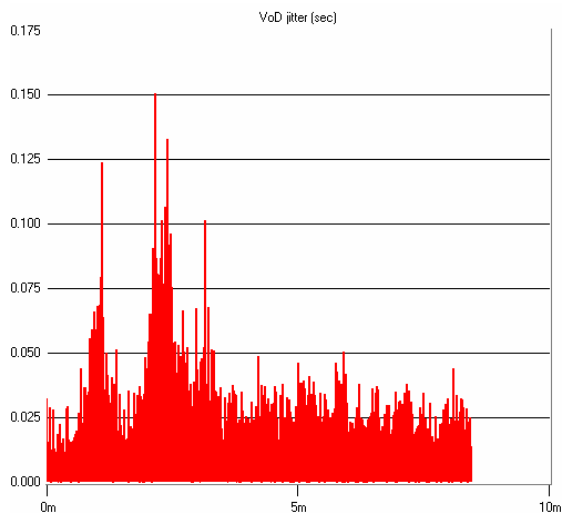


Σχήμα 7.31 - Καθυστερήση μετάδοσης και Jitter πακέτων Radio υπηρεσίας.

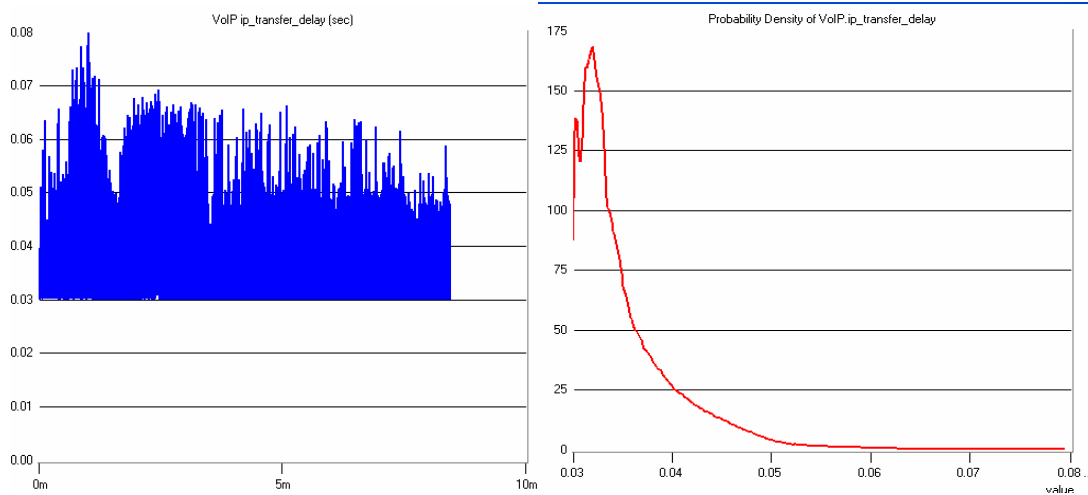
Οι καθυστερήσεις των Broadcast υπηρεσιών σχεδόν διπλασιάζονται, αλλά το jitter δεν μεταβάλλεται σημαντικά, όποτε οι υπηρεσίες δεν αναμένεται να παρουσιάσουν προβλήματα.



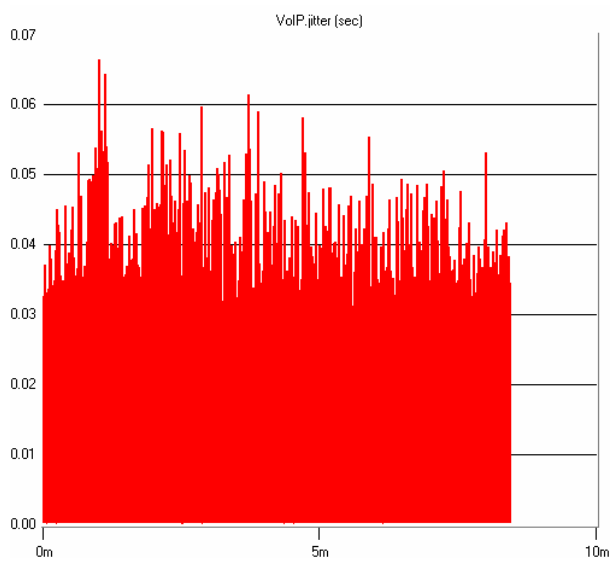
Σχήμα 7.32 - Καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων VoD υπηρεσίας.



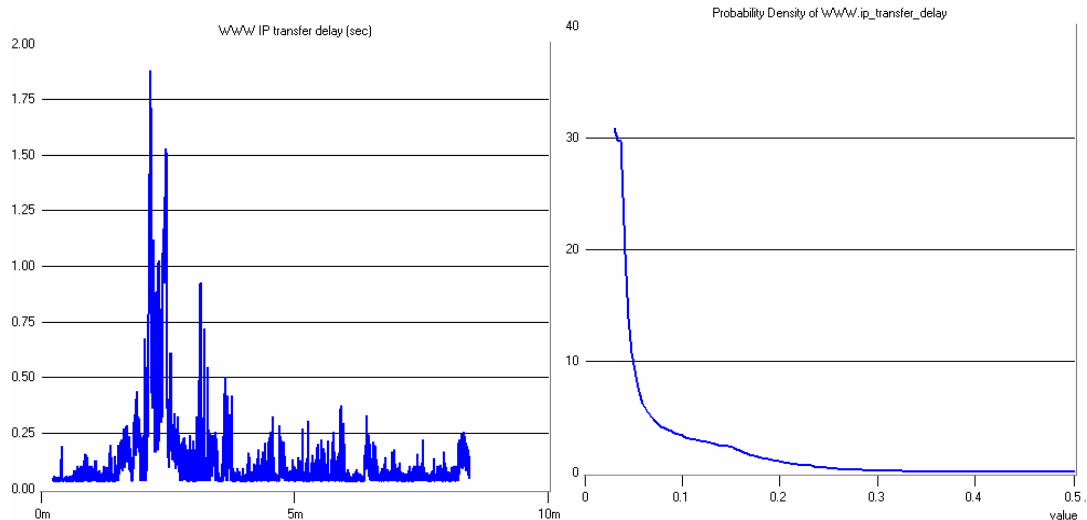
Σχήμα 7.33 - Jitter πακέτων VoD υπηρεσίας.



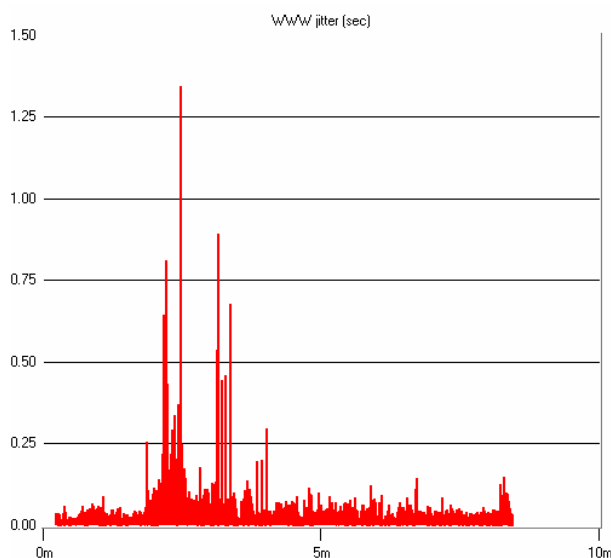
Σχήμα 7.34 - Καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων VoIP υπηρεσίας



Σχήμα 7.35 - Jitter πακέτων VoIP υπηρεσίας.

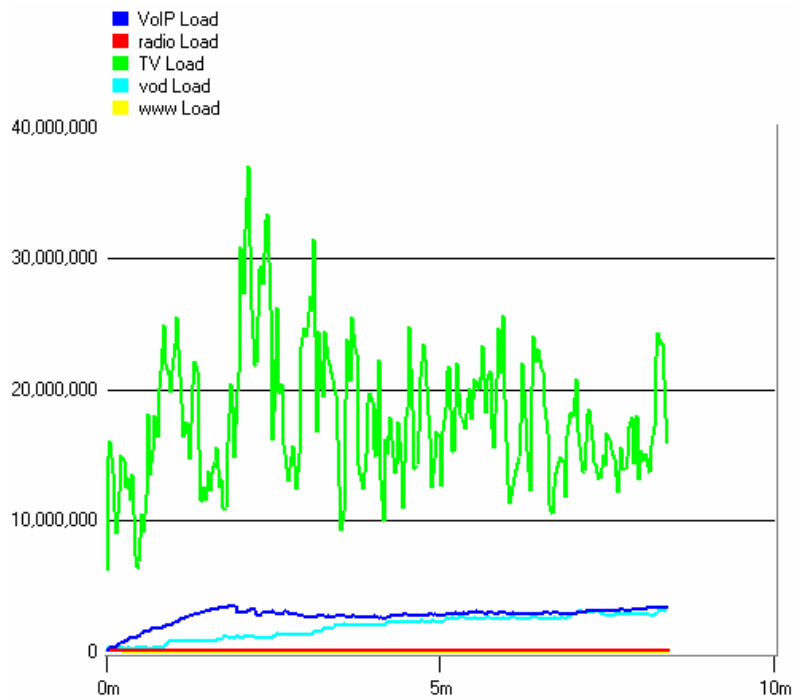


Σχήμα 7.36 - Καθυστέρηση μετάδοσης πακέτων WWW υπηρεσίας

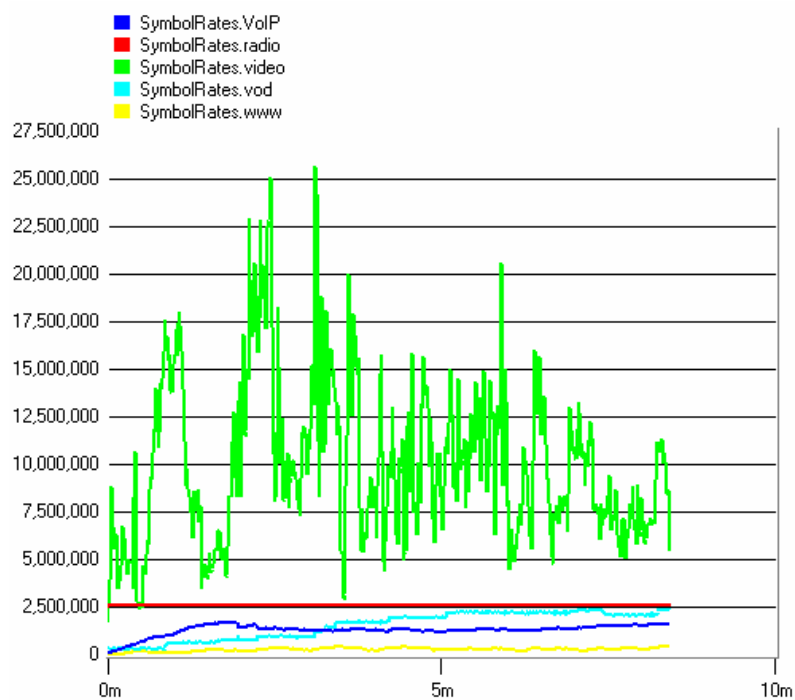


Σχήμα 7.37 - Jitter πακέτων WWW υπηρεσίας.

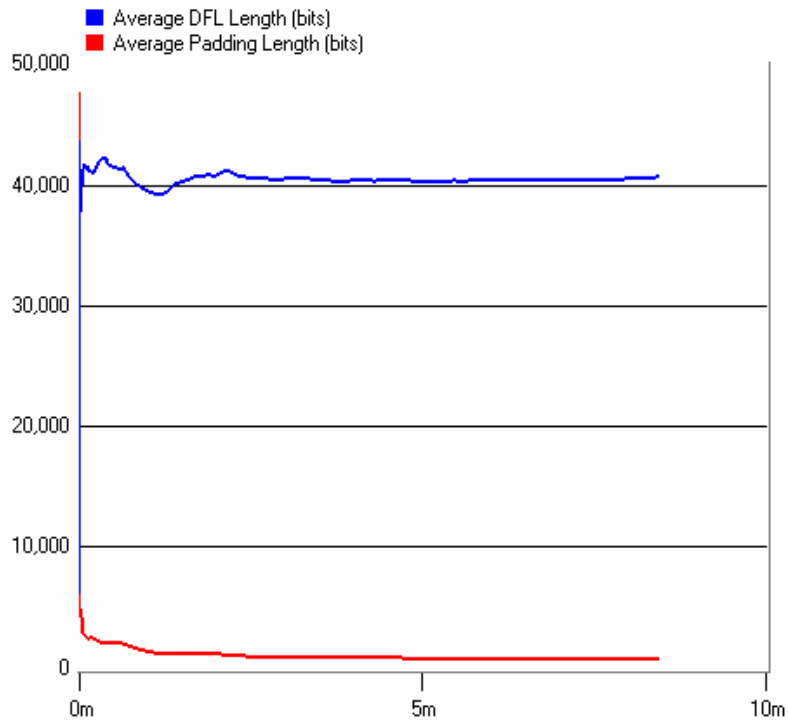
Και πάλι η υπηρεσία VoIP φαίνεται να μην παρουσιάζει κανένα πρόβλημα με τιμές καθυστέρησης περίπου 35 msec (όπου το μεγαλύτερο κομμάτι της οφείλεται στις καθυστερήσεις μετάδοσης και όχι σε αναμονή σε ουρές) ενώ το Jitter είναι σχεδόν μηδενικό. Για την VoD υπηρεσία οι χρόνοι δεν είναι πολύ χειρότεροι, και απλά έχουμε μια μεγαλύτερη διακύμανση του transfer delay, άρα και ελαφρά μεγαλύτερο Jitter. Για την WWW υπηρεσία όπως είπαμε και προηγουμένως τα αποτελέσματα δεν είναι αντιπροσωπευτικά, αφού οι τιμές τους θα ήταν πολύ χειρότερες αν δεν υπήρχαν timeouts στις ουρές.



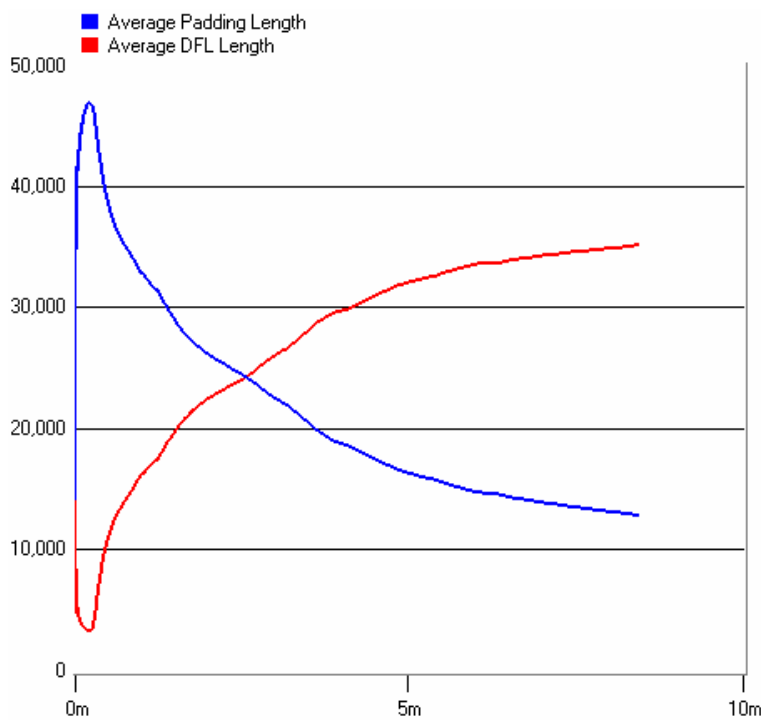
Σχήμα 7.38 - Ρυθμός μετάδοσης γεννητριών κίνησης σε bps.



Σχήμα 7.39 - Ρυθμός μετάδοσης γεννητριών κίνησης σε symbols/sec.

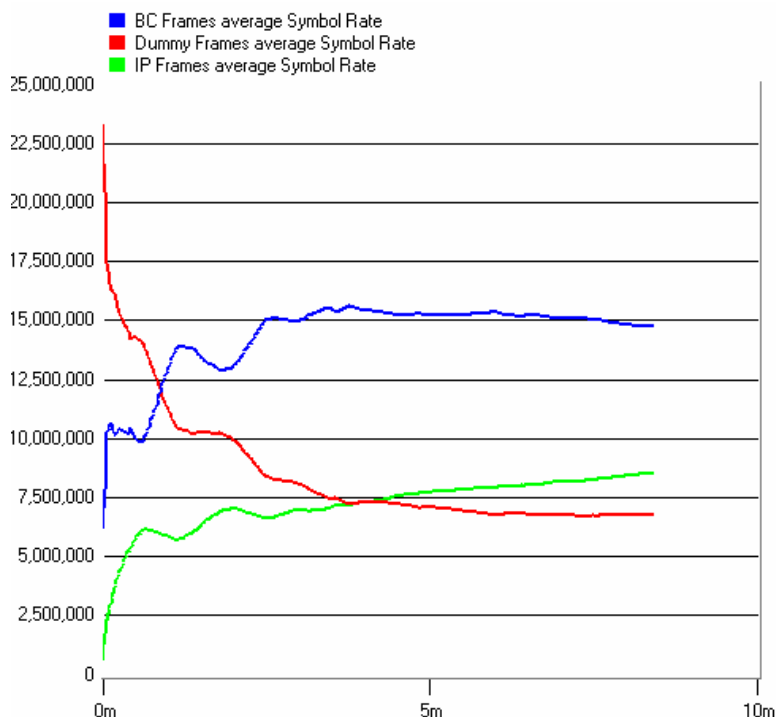


Σχήμα 7.40 - Μέση τιμή Μήκους DFL και Padding των Broadcast BBFRAMEs



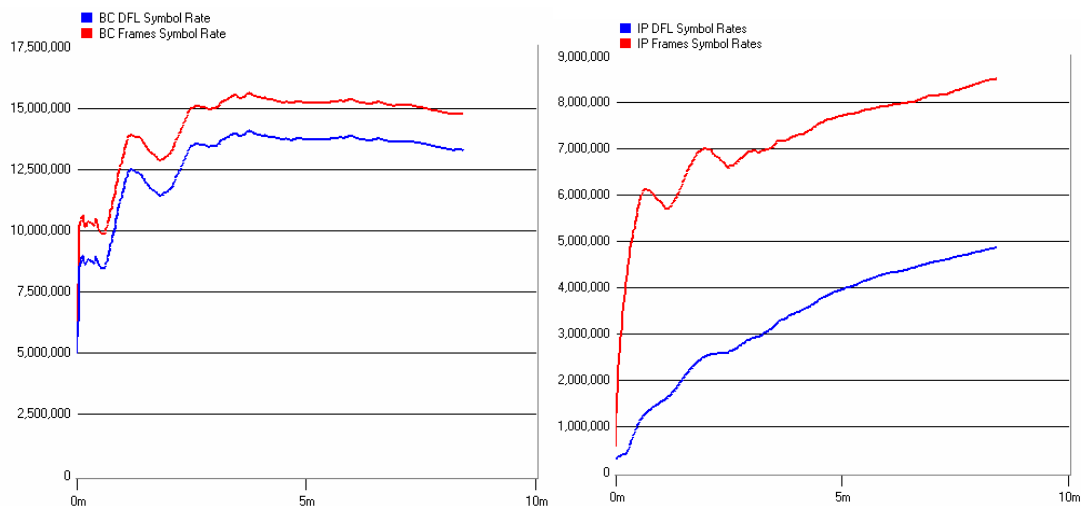
Σχήμα 7.41- Μέση τιμή Μήκους DFL και Padding των IP BBFRAMEs

Παρατηρούμε ότι οι IP υπηρεσίες είναι γενικά πολύ λιγότερο αποδοτικές όσον αφορά το ωφέλιμο φορτίο. Κατά μέσο όρο κάθε IP BBFRAME αποτελείται από 28381 bits payload και 19984 bits padding, αν και αυτές οι τιμές βελτιώνονται σημαντικά όσο αυξάνονται οι IP υπηρεσίες που τρέχουν. Στα broadcast πλαίσια οι τιμές είναι πολύ καλύτερες.



Σχήμα 7.42 - Ρυθμοί Μετάδοσης BC FECs, IP FECs και dummy πλαισίων

Τελικά από τα διαθέσιμα 30 Mbaud του συστήματος, παρατηρούμε ότι ένα μεγάλο ποσοστό (6,7 Mbaud – 22 %) είναι τα Dummy frames, ενώ τα IP frames δεν φτάνουν τελικά το αναμενόμενο ποσοστό (8,5 Mbaud – 28%) λόγω των dropped πακέτων WWW.



Σχήμα 7.43 - Σύγκριση ωφέλιμου Symbol Rate με συνολικά χρησιμοποιούμενο, σε BC και IP πλαίσια

Τέλος παρατηρούμε και πάλι τα πόσο αποδοτικότερα αξιοποιούνται τα FEC πλαίσια από τις Broadcast Υπηρεσίες. Σε αυτά τα διαγράμματα, εκτός από το Padding, ρόλο στη διαφορά μεταξύ DFL και FEC ρυθμού παίζει και τα bits κωδικοποίησης που εισάγονται στο FECFRAME.

7.6. Συμπεράσματα

Βάση των παραπάνω σεναρίων και αποτελεσμάτων που εξήχθησαν καταλήγουμε σε χρήσιμα συμπεράσματα για τον προσομοιωτή μας.

Αρχικά παρατηρούμε ότι το διαθέσιμο bandwidth χρησιμοποιείται πιο αποδοτικά από τις broadcast υπηρεσίες, παρά από τις unicast-IP υπηρεσίες. Σε αυτό το συμπέρασμα οδηγούμαστε με τη βοήθεια των διαγραμμάτων σύγκρισης ωφέλιμου Symbol Rate με αυτό του συνολικά χρησιμοποιούμενου.

Επίσης η καθυστέρηση και το jitter (η απόκλιση της καθυστέρησης) παρουσιάζουν πολύ καλή συμπεριφορά, μη ξεπερνώντας τα αποδεκτά όρια για κάθε υπηρεσία σε κάθε περίπτωση. Έτσι υποστηρίζονται σωστά οι λεγόμενες υπηρεσίες πραγματικού χρόνου (real time services), γεγονός σημαντικό για την προσομοίωση, διότι ο σκοπός εξαρχής ήταν να διαπιστωθεί εάν μπορεί το DVB-S2 πρότυπο να υποστηρίξει τέτοιες υπηρεσίες και πόσο αποτελεσματικά.

Όσον αφορά την υπηρεσία VoIP, προκύπτει ότι για χάρη της ζητούμενης μικρής καθυστέρησης προκειμένου να έχουμε ποιοτική ομιλία, θυσιάσαμε πολύτιμα FECFRAMES συνεπώς και bandwidth. Έτσι το VoIP και κάθε άλλη υπηρεσία που θα έχει απαιτήσεις για χαμηλή καθυστέρηση, θα κατασπαταλήσει τελικά το φυσικό μέσο λόγω του ότι τα πακέτα αυτά περιέχουν πολύ λίγη πληροφορία σε αντίθεση με τα «βαριά» πακέτα του video. Έτσι, αναγκαστικά, λόγω του ότι πρέπει να υπάρχει αυστηρός συγχρονισμός στην αποστολή πακέτων, χρησιμοποιείται η τεχνική του παραγεμίσματος και τα πλαίσια αποστέλλονται με λίγη χρήσιμη πληροφορία.

Έπειτα, η υπηρεσία του web browsing προκύπτει ότι είναι ουσιαστικά αυτή με τα χειρότερα χαρακτηριστικά καμπυλών από όλες τις υπηρεσίες. Αυτό είναι λογικό, εάν λάβουμε υπόψην το γεγονός ότι πρόκειται για best effort υπηρεσία, συνεπώς δεν έχουμε ιδιαίτερες απαιτήσεις ούτε ως προς την καθυστέρηση, ούτε ως προς τα χαμένα πακέτα.

Τέλος, τα πακέτα της υπηρεσίας VoD παρατηρούμε ότι απλά εξυπηρετούνται χωρίς ιδιαίτερα καλά αλλά ούτε και άσχημα χαρακτηριστικά ποιότητας.

7.7. Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Στο μέλλον υπάρχουν κάποια θέματα που ενώ δεν αναλύθηκαν στην παρούσα εργασία θα ήταν πολύ χρήσιμο να μελετηθούν.

Η κινητικότητα είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα για τις τηλεπικοινωνίες. Είτε αναφερόμαστε στην μικρο- είτε στην μακροκινητικότητα, είναι ένα φλέγον ζήτημα που πρέπει κάθε σύστημα που εισάγεται στην αγορά να υποστηρίζει. Χωρίς την κινητικότητα δε θα είχε καν νόημα να μιλούσαμε για κινητές επικοινωνίες διότι έννοιες όπως μεταγωγή κλήσης είναι ο ακρογωνιαίος λίθος τους.

Τέλος θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον να αναλύονταν και άλλοι ακόμα αλγόριθμοι πέραν του δικού μας για να διαπιστωθεί ποιος είναι όντως περισσότερο αποδοτικός και παρέχει καλύτερη λειτουργία στο σύστημα μας.

7.8. Βιβλιογραφία 7^{ου} Κεφαλαίου

1. Σημειώσεις για το Μάθημα «Προσομοίωση Πληροφοριακών Συστημάτων» 1999, Γιάννης Δ. Γαροφαλάκης Επ. Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Πατρών Πολυτεχνική Σχολή Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής