



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Μελέτη μεθόδων κατανομής των πόρων σε δορυφορικά δίκτυα
πολλαπλών δεσμών**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΥΦΡΟΣΥΝΗ Α. ΜΗΤΡΑΒΕΛΑ

Επιβλέπων : Παναγιώτης Γ. Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάιος 2009



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μελέτη μεθόδων κατανομής των πόρων σε δορυφορικά δίκτυα πολλαπλών δεσμών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΥΦΡΟΣΥΝΗ Α. ΜΗΤΡΑΒΕΛΑ

Επιβλέπων : Παναγιώτης Γ. Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Μαΐου 2009

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

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

.....
Γεώργιος Φικιώρης
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2009

.....
Ευφροσύνη Α. Μητραβέλα

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

Copyright © Ευφροσύνη Α. Μητραβέλα, Αθήνα Μάιος 2009

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αποδοτική κατανομή των δορυφορικών τηλεπικοινωνιακών πόρων, όπως η ισχύς και το εύρος ζώνης, σε δορυφορικά δίκτυα πολλαπλών δεσμών. Ο αλγόριθμος που μελετάται, λαμβάνει υπόψη τις διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας των χρηστών και τη μεταβλητότητα των συνθηκών του διαύλου και επιτυγχάνει ικανοποιητική αξιοποίηση των πόρων του δικτύου με εξασφάλιση αναλογικής δικαιοσύνης.

Στο 1^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται μια γενική επισκόπηση των δορυφορικών επικοινωνιών. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και ο σχεδιασμός των δορυφορικών δικτύων πολλαπλών δεσμών. Στο Κεφάλαιο 3 διαφορετικά πρωτόκολλα πολλαπλής πρόσβασης μελετώνται και συγκρίνονται. Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται, κυρίως, στα συστήματα που στηρίζονται στον ανταγωνισμό, όπως το PRMA, και δίνουν δικαιώματα μετάδοσης σε διάφορους τερματικούς σταθμούς ταυτόχρονα, καθώς και στα πρωτόκολλα δυναμικής εκχώρησης πόρων, όπως το FODA/IBEA, που δίνουν πρόσβαση στο δίκτυο, με βάση τα αιτήματα που υποβλήθηκαν από τους σταθμούς.

Επίσης, στο Κεφάλαιο 4 προτείνονται μέθοδοι για το πρόβλημα της κατανομής της ισχύος σε δίκτυα πολλαπλών δεσμών με χρήση της μεθόδου Lagrange για συναρτήσεις κόστους διαφορετικής τάξης. Η επίδοση του αλγορίθμου εκτιμάται μέσω κατάλληλων προσομοιώσεων όπου χρησιμοποιούνται ως μέτρα επίδοσης η συνολική εκχωρηθείσα χωρητικότητα και η αναλογική δικαιοσύνη. Στη συνέχεια το πρόβλημα επιλύεται με χρήση μιας ευριστικής μεθόδου που βελτιώνει την αποδοτικότητα του αλγορίθμου.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 5, προτείνεται μια μέθοδος για την κατανομή των δορυφορικών πόρων σε κινητά δορυφορικά συστήματα πολλαπλών δεσμών, διασφαλίζοντας, παράλληλα, την ποιότητα υπηρεσιών και την αύξηση της χωρητικότητας επικοινωνίας.

Λέξεις Κλειδιά

Δορυφορικά δίκτυα πολλαπλών δεσμών, πρωτόκολλα πολλαπλής προσπέλασης, SS-TDMA, κατανομή πόρων, κατανομή ισχύος

Abstract

The scope of this diploma thesis is the efficient allocation of satellite communication resources, such as bandwidth and power, over multibeam satellite networks. The proposed algorithm takes into account users' quality of service (QoS) requirements and variations in channel conditions and achieves efficient resource utilization with reasonable proportional fairness.

Chapter 1 provides an overview of satellite networks. In Chapter 2 the advantages and the design of a multibeam satellite network are presented as well as the current technology of the multibeam antennas. The SS-TDMA technique used for interconnection of coverage areas by onboard switching is also analyzed in Chapter 3, different multiple access schemes are studied and compared. Emphasis is given on contention-based schemes, like PRMA, which give transmission rights to several terminals at the same time, and on demand resource assignment protocols, like FODA/IBEA, which give access to the network on the basis of requests made by the stations.

Moreover, in Chapter 4 various methods for the power allocation problem in multibeam networks are proposed, using the Lagrange method for different cost functions. The performance of the algorithm is estimated via proper simulations, in which the total allocated capacity and the proportional fairness are used as performance metrics. Furthermore, the problem is resolved by using a heuristic method that improves the efficiency of the algorithm.

Finally, in Chapter 5, a scheme is proposed for allocating satellite resources to mobile satellite communication systems, while ensuring the QoS and increasing communication capacity.

Keywords

Multibeam satellite networks, multiple access protocols, SS-TDMA, resource allocation, power allocation

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις πιο θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Π. Κωττή για τις πολύτιμες υποδείξεις του και την άριστη συνεργασία μας, καθώς και στη διδάκτορα Διονυσία Πετράκη για τις επιστημονικές γνώσεις και τη συνεχή αρωγή κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω και το διδάκτορα Μάρκο Αναστασόπουλο για την σημαντική του συνεισφορά στο υπολογιστικό κομμάτι της εργασίας μου.

Την εργασία αυτή την αφιερώνω στην οικογένειά μου

Αθήνα, Μάιος 2009

Ευφροσύνη Α. Μητραβέλα

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1° Δορυφορικές επικοινωνίες

1.1 Γενική επισκόπηση στις δορυφορικές επικοινωνίες.....	15
1.2 Τροχιές δορυφόρων.....	17
1.3 Εφαρμογές δορυφορικών συστημάτων.....	19
1.4 Επίδραση του μέσου διάδοσης στα δορυφορικά σήματα.....	27
1.4.1 Επίδραση της βροχόπτωσης.....	30

Κεφάλαιο 2° Δορυφορικά δίκτυα πολλαπλών δεσμών

2.1 Δορυφόροι πολλαπλών δεσμών	31
2.2 Πλεονεκτήματα δορυφόρων πολλαπλών δεσμών	33
2.2.1 Επίδραση στο επίγειο κομμάτι	34
2.2.2 Επαναχρησιμοποίηση συχνότητας	36
2.3 Μειονεκτήματα δορυφόρων πολλαπλών δεσμών	37
2.4 Δορυφορική κεραία πολλαπλών δεσμών	38
2.5 Τρόποι διασύνδεσης περιοχών κάλυψης.....	39
2.5.1 Διασύνδεση με άλμα μέσω αναμεταδότη (transponder hopping)	39
2.5.2 Διασύνδεση μέσω μεταγωγής επί του δορυφόρου (SS-TDMA)	40
2.5.2.1 Οργάνωση του πλαισίου και του παραθύρου	43
2.5.2.2 Εκχώρηση πακέτων στο πλαίσιο.....	44
2.5.2.3 Συγχρονισμός.....	44
2.5.2.3 Απόδοση πλαισίου.....	46
2.5.3 Διασύνδεση με μετακίνηση δέσμης (beam forming).....	46
2.6 Διαδορυφορικές ζεύξεις.....	47
2.6.1 Ραδιοζεύξεις (GEO-LEO)	48
2.6.2 Ραδιοζεύξεις (GEO-GEO)	48
2.6.2.1 Η επέκταση της κάλυψης ενός συστήματος.....	50
2.6.2.2 Η αύξηση της ελάχιστης γωνίας ανύψωσης για τους επίγειους σταθμούς.....	52
2.6.2.3 Η μείωση των περιορισμών στην τροχιακή θέση.....	52
2.6.2.4 Ομάδες δορυφόρων.....	53
2.6.3 Ραδιοζεύξεις (LEO-LEO)	53

Κεφάλαιο 3° Συστήματα πολλαπλής πρόσβασης, πρωτόκολλα και πολιτικές ανάθεσης πόρων σε δορυφορικά δίκτυα

3.1 Κατανομή πόρων (resource allocation).....	55
3.2 Συστήματα πολλαπλής πρόσβασης.....	57
3.3 Ταξινόμηση πρωτοκόλλων.....	59
3.3.1 Πρωτόκολλα σταθερής πρόσβασης (επίπεδο κυκλώματος).....	60
3.3.2 Πρωτόκολλα βασιζόμενα στον ανταγωνισμό για κίνηση πακέτων δεδομένων	60

3.3.2.1 PRMA πρωτόκολλο.....	61
3.3.3 Πρωτόκολλα δυναμικής εκχώρησης (DRAMA, FODA/IBEA).....	63
3.4 Δυναμική ανάθεση εύρους ζώνης.....	68
3.4.1 Στατικά DBA συστήματα.....	70
3.4.2 Προσαρμοστικά DBA συστήματα.....	70

Κεφάλαιο 4° Βέλτιστη κατανομή ισχύος σε δορυφορικές κάτω ζεύξεις πολλαπλών δεσμών

4.1 Παρουσίαση του προβλήματος.....	73
4.1.1 Το πρότυπο DVB-RCS.....	74
4.2 Περιγραφή προηγούμενων συστημάτων.....	76
4.3 Περιγραφή υπό μελέτη συστήματος.....	77
4.4 Μοντελοποίηση της χωρητικότητας των δεσμών κάτω ζεύξης.....	79
4.5 Βέλτιστη κατανομή ισχύος για συνάρτηση κόστους δεύτερης τάξης.....	82
4.6 Σύγκριση κατανομής ισχύος για διάφορες συναρτήσεις κόστους.....	86
4.6.1 Συνάρτηση κόστους πρώτης τάξης.....	87
4.6.2 Συνάρτηση κόστους μεγαλύτερης τάξης.....	89
4.6.3 Γραμμική συνάρτηση κόστους.....	89
4.6.4 Κατανομή της ισχύος βάσει της αναλογικής δικαιοσύνης Και της συνολικής χωρητικότητας.....	89
4.7 Διαφορετικά κριτήρια μεθόδων κατανομής ισχύος.....	92
4.8 Κέρδος ισχύος με βέλτιστη κατανομή ισχύος.....	94
4.9 Επίδραση της καθυστέρησης στη σταθερή κατάσταση.....	96
4.10 Επίδραση των ενεργών δεσμών κάτω ζεύξης.....	99
4.11 Επέκταση του προβλήματος με τη χρήση ευριστικής μεθόδου (heuristic method).....	103
4.11.1 Θεμελίωση του προβλήματος.....	103

Κεφάλαιο 5° Συστήματα ανάθεσης πόρων για παροχή ποιότητας υπηρεσιών σε κινητά δορυφορικά δίκτυα πολλαπλών δεσμών

5.1 Κινητές δορυφορικές επικοινωνίες.....	107
5.2 Παρουσίαση του συστήματος πολλαπλών δεσμών στις κινητές δορυφορικές επικοινωνίες	109
5.3 Μέθοδος κατανομής πόρων του συστήματος.....	110
5.4 Επίδοση του συστήματος κατανομής πόρων.....	113

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	118
---------------------------	-----

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ & ΠΙΝΑΚΩΝ

Σχήμα 1.1 Οι πιο δημοφιλείς τροχιές (GEO, MEO, LEO) των δορυφόρων επικοινωνίας.....	17
Πίνακας 1.1: Δορυφορικές ζώνες συχνοτήτων και οι υπηρεσίες τους.....	20
Σχήμα 2.1 Περιοχή κάλυψης δορυφόρων πολλαπλών δεσμών.....	32
Σχήμα 2.2α Παγκόσμια κάλυψη από μια δέσμη.....	33
Σχήμα 2.2β Παγκόσμια κάλυψη από στενές δέσμες.....	33
Σχήμα 2.3 Η σύγκριση των τιμών EIRP που απαιτούνται για έναν επίγειο σταθμό στην περίπτωση παγκόσμιας κάλυψης ($\theta_{3db}=17.5^\circ$) και τοπικής δέσμης ($\theta_{3db}=1.75^\circ$).....	35
Σχήμα 2.4 Η σύγκριση των τιμών του δείκτη ποιότητας G/T για έναν επίγειο σταθμό στην περίπτωση παγκόσμιας κάλυψης ($\theta_{3db}=17.5^\circ$) και τοπικής δέσμης ($\theta_{3db}=1.75^\circ$).....	35
Σχήμα 2.5α Επανάχρηση συχνότητας με δυο δέσμες σε δορυφορικό σύστημα πολλαπλών δεσμών μέσω ορθογωνικής πόλωσης.....	36
Σχήμα 2.5β Επανάχρηση συχνότητας με δυο δέσμες σε δορυφορικό σύστημα πολλαπλών δεσμών μέσω γωνιακής απομόνωσης των δεσμών.....	36
Σχήμα 2.6α Δορυφόρος SS-TDMA με τρεις δέσμες. Οργάνωση πλαισίου.....	41
Σχήμα 2.6β Ακολουθία καταστάσεων μεταγωγής κατά το ενεργό μέρος του πεδίου διακίνησης.....	42
Σχήμα 2.7 Η οργάνωση του παραθύρου.....	43
Σχήμα 2.8 Ο συγχρονισμός σε ένα δίκτυο SS-TDMA.....	45
Σχήμα 2.9 Διασύνδεση με μετακίνηση των δεσμών.....	47
Σχήμα 2.10α Διαδορυφορικές ζεύξεις.....	49
Σχήμα 2.10β Διαδορυφορικές ζεύξεις.....	50
Σχήμα 2.10γ Διαδορυφορικές ζεύξεις.....	50
Σχήμα 2.11α Η επέκταση της κάλυψης του σήματος.....	51
Σχήμα 2.11β Η επέκταση της κάλυψης του σήματος.....	51
Σχήμα 2.11γ Η επέκταση της κάλυψης του σήματος.....	51
Σχήμα 2.12 Αύξηση της ελάχιστης γωνίας ανύψωσης για τους επίγειους σταθμούς.....	52
Σχήμα 4.1 Σύστημα DVB-RCS.....	75
Σχήμα 4.2 Δορυφόρος πολλαπλών δεσμών που παρέχει χωρητικότητα C_i στο i κελί, ζήτησης F_i	80
Σχήμα 4.3 Γραφική παράσταση κέρδους χωρητικότητας με ομοιόμορφη κατανομή ισχύος συναρτήσει του αριθμού πολλαπλών δεσμών.....	81

Σχήμα 4.4α <i>MBA antenna</i>	83
Σχήμα 4.4β <i>phased array antenna</i>	83
Σχήμα 4.5 Σύγκριση των δυο προσεγγίσεων (4.8) , (4.9) με την ακριβή αριθμητική λύση του τύπου (4.7)	85
Σχήμα 4.6 Περίπτωση δυο στατικών καναλιών που έχουν διαφορετική εξασθένιση σήματος και διαφορά στη χωρητικότητα.....	86
Σχήμα 4.7α Σύγκριση συναρτήσεων κόστους ως προς τη χωρητικότητα ανά μονάδα εύρους ζώνης για <i>phased array antennas</i>	91
Σχήμα 4.7β Σύγκριση συναρτήσεων κόστους ως προς την ισχύ για <i>phased array antennas</i>	91
Σχήμα 4.8 Σύγκριση κατανομής ισχύος σύμφωνα με την εξασθένιση του σήματος, που βασίζεται σε διαφορετικές μεθόδους ,όπως ελάχιστη τετραγωνική απόκλιση (συνάρτηση κόστους δεύτερης τάξης), μέγιστη συνολική χωρητικότητα (συνάρτηση κόστους πρώτης τάξης), αναλογική δικαιοσύνη (γραμμική συνάρτηση κόστους).....	93
Σχήμα 4.9α Κέρδος ισχύος παράλληλων δεσμών συναρτήσει του αριθμού των πολλαπλών δεσμών με σταθερή κατανομή κίνησης.....	95
Σχήμα 4.9β Κέρδος ισχύος παράλληλων δεσμών συναρτήσει της καμπύλης γραμμικής κατανομής κίνησης.....	95
.....
Σχήμα 4.10α <i>Ισχύς που απαιτείται για τον περιορισμό καθυστέρησης, ως συνάρτηση του ορίου καθυστέρησης</i>	98
Σχήμα 4.10β <i>Επιπλέον χωρητικότητα που απαιτείται για τον περιορισμό καθυστέρησης, ως συνάρτηση του ορίου καθυστέρησης</i>	98
Σχήμα 4.11 <i>Αριθμός των ενεργών δεσμών που απαιτούνται για να καλύψουν το 90% της συνολικής ζήτησης και να εξυπηρετήσουν $N=100$ κελιά συναρτήσει της καμπύλης της γραμμικής κατανομής της κίνησης</i>	101
Σχήμα 5.1 <i>Επόμενης γενιάς δορυφορικό σύστημα κινητών επικοινωνιών</i>	109
Σχήμα 5.2 <i>Διάδοση σήματος σε σύστημα πολλαπλών δεσμών και κατανομή των πόρων</i>	110
Σχήμα 5.3 <i>Σύστημα FPD-F</i>	111
Σχήμα 5.4 <i>Σύστημα FPD-V</i>	112
Σχήμα 5.5 <i>Χωρητικότητα επικοινωνίας</i>	114
Σχήμα 5.6 <i>Παρεμβολή στη μετάδοση πακέτου</i>	115
Σχήμα 5.7 <i>Επίδοση της ρυθμαπόδοσης συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου O_L</i>	116
Σχήμα 5.8 <i>Επίδοση της ρυθμαπόδοσης συναρτήσει του ποσοστού των χρηστών U_R στο άκρο της δέσμης</i>	116

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Δορυφορικές επικοινωνίες

1.1 ΓΕΝΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΙΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

Οι δορυφορικές επικοινωνίες είναι ένας αναπτυσσόμενος τομέας των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων και έρχεται να δώσει λύση σε πολλά προβλήματα και να ξεπεράσει τους περιορισμούς που έθεταν μέχρι σήμερα οι ενσύρματες ή ασύρματες επίγειες επικοινωνίες. Η χρήση ολοένα και υψηλότερων συχνοτήτων στις δορυφορικές ζεύξεις (πάνω από 10 GHz) έδωσε τη δυνατότητα για αύξηση της χωρητικότητας και της ποιότητας του διαύλου. Το γεγονός αυτό με τη σειρά του προκάλεσε την ταχεία αύξηση των χρηστών και των παρεχόμενων υπηρεσιών. Η διαθεσιμότητα των δορυφορικών υπηρεσιών φτάνει το 99.5%. Οι δορυφορικές μεταδόσεις διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στις τηλεφωνικές επικοινωνίες, τηλεοπτικές εκπομπές, επικοινωνίες μέσω υπολογιστών, τη ναυτιλία και την αεροναυτική. Επιπλέον, σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να είναι ο μόνος εφικτός τρόπος επικοινωνίας.

Οι δορυφόροι παρέχουν τη δυνατότητα κάλυψης, μεγάλων γεωγραφικών περιοχών ανεξάρτητα από την πληθυσμιακή τους πυκνότητα παρέχοντας υπηρεσίες υψηλής ποιότητας. Μπορούν ακόμα να μεταδίδουν ταυτόχρονα δεδομένα προς πολλούς χρήστες, οι οποίοι βρίσκονται διασκορπισμένοι σε μια μεγάλη έκταση. Έτσι, έγινε εφικτή η μετάδοση και λήψη τηλεοπτικών καναλιών που εντάσσεται στις υπηρεσίες ευρυεκπομπής (broadcasting). Επίσης τα δορυφορικά δίκτυα έχουν την ικανότητα υποστήριξης εφαρμογών με υψηλές απαιτήσεις σε μετάδοση εύρους ζώνης. Σε περιπτώσεις όμως εξυπηρέτησης συνδέσεων με απρόβλεπτες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης, που μπορεί να οδηγήσουν σε κατασπατάληση των πόρων του συστήματος, χρησιμοποιούν εναλλακτικούς διαύλους.

Οι περιορισμοί των δορυφορικών συστημάτων επικοινωνιών εντοπίζονται στο σχετικά υψηλό κόστος εγκατάστασης του συστήματος εξαιτίας του κόστους του δορυφόρου. Ένα ακόμα εμπόδιο είναι η εξάρτηση της παροχής τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών από τη διάρκεια ζωής του δορυφόρου και η ανάγκη για την έγκαιρη αντικατάσταση της ζεύξης. Σημαντική είναι και η έλλειψη ασφάλειας των δορυφορικές επικοινωνίες. Για το λόγο αυτό τα δορυφορικά συστήματα χρησιμοποιούν εξειδικευμένες τεχνικές κρυπτογράφησης.

Στην περίπτωση γεωστατικών δορυφόρων ένας πρόσθετος περιορισμός είναι η καθυστέρηση μετάδοσης λόγω της μεγάλης διαδρομής του σήματος. Όμως, έχει γίνει σημαντική πρόοδος στην ανάπτυξη τεχνολογίας καταστολής- εξάλειψης της ηχούς, η οποία αποτελεί σημαντικό πρόβλημα των δορυφορικών ζεύξεων σε υπηρεσίες φωνής, ενώ για τη μετάδοση δεδομένων, η χρονική καθυστέρηση αποτελεί σημαντικό πρόβλημα, ιδιαίτερα για τις υπηρεσίες που χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο TCP/IP. [1]

Η εξέλιξη των δορυφορικών συστημάτων μέχρι σήμερα είναι ραγδαία. Ο πρώτος δορυφόρος, που εκτοξεύτηκε το 1957 από την πρώην ΕΣΣΔ, ήταν ο SPUTNIK. Ο πρώτος γεωσύγχρονος δορυφόρος για επικοινωνία, ο SYNCOM, εκτοξεύτηκε το 1963 από τη NASA. Ενώ ο πρώτος εμπορικός γεωσύγχρονος δορυφόρος ήταν ο INTELSAT 1 το 1965. Το 1977 συντάσσεται από τη διεθνή ένωση τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union, ITU) ο κανονισμός για δορυφορικές εκπομπές κατευθείαν σε χρήστες. Ακολουθεί η εκτόξευση τριών δορυφόρων MARISAT το 1976 για την κάλυψη επικοινωνιών ναυσιπλοΐας, καθώς και η λειτουργία του πρώτου κινητού δορυφορικού τηλεφωνικού συστήματος INMARSAT, το 1982, που μπορούσε να μεταδίδει αναλογική φωνή, telex, fax. Το 1998 έγινε πραγματικότητα η επικοινωνία με μικρά κινητά τηλέφωνα μέσω δορυφορικών συστημάτων (Iridium, Globalstar) παγκόσμιας κάλυψης.

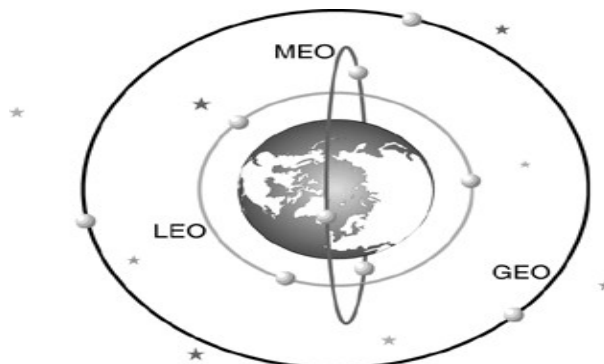
Η εκτόξευση του πρώτου ελληνικού δορυφόρου, του Hellas Sat2, έγινε στις 14 Μαΐου του 2004, από το ακρωτήριο Κανάβεραλ των ΗΠΑ. Ο Hellas Sat2 είναι ένας γεωστατικός, τηλεπικοινωνιακός δορυφόρος που καταλαμβάνει τη θέση 39^ο ανατολικά και που έχει ως σκοπό την εκμετάλλευση των ελληνικών και κυπριακών συχνοτήτων στη ζώνη Ku.

Ο Hellas Sat2 είναι ο ισχυρότερος δορυφόρος στη συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων. Επίσης είναι ο μοναδικός ευρωπαϊκός δορυφόρος ο οποίος εκτός του

ευρωπαϊκού χώρου διαθέτει ταυτόχρονη πρόσβαση στη Μέση Ανατολή και στη Ν.Αφρική. Συγκεκριμένα, διαθέτει δύο σταθερές δέσμες με 18 αναμεταδότες για την κάλυψη της Ευρώπης και δύο κινητές δέσμες με 12 αναμεταδότες για την κάλυψη της Μέσης Ανατολής, της Αφρικής και της Νοτιοανατολικής – Κεντρικής Ασίας.[1]

1.2 ΤΡΟΧΙΕΣ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ

Τίχος ενός δορυφόρου ονομάζεται η γήινη επιφάνεια στην οποία προσφέρει κάλυψη. Τροχιά ενός δορυφόρου είναι η πορεία που αυτός ακολουθεί. Αυτή η πορεία βρίσκεται σε ένα επίπεδο και έχει τη μορφή έλλειψης με μέγιστο άξονα στο απόγειο (σημείο μέγιστης απόστασης από τη γη) και ελάχιστο άξονα στο περίγειο (σημείο ελάχιστης απόστασης από τη γη). Ο δορυφόρος κινείται πιο αργά στην τροχιά του, καθώς αυξάνεται η απόσταση από τη γη. Οι βασικές τροχιές είναι, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.1 οι GEO, MEO, LEO.



Σχήμα 1.1: Οι πιο δημοφιλείς τροχιές (GEO,MEO,LEO) των δορυφόρων επικοινωνίας

➤ GEO (Geostationary Earth Orbit)

Η περιστροφή του δορυφόρου είναι συγχρονισμένη με την περιστροφή της Γης και για το λόγο αυτό ο δορυφόρος φαίνεται από τον επίγειο σταθμό σαν ένα σταθερό σημείο στον ουρανό. Συνεπώς, ελαχιστοποιούνται οι απαιτήσεις των επίγειων σταθμών εδάφους διότι η παρακολούθηση της θέσης του δορυφόρου είναι απλή.

Οι γεωστατικοί δορυφόροι περιστρέφονται σε ύψος περίπου 36000km πάνω από τον ισημερινό και μπορούν να καλύψουν σχεδόν το ένα τρίτο της επιφάνειας της Γης, με εξαίρεση τις πολικές περιοχές. Αυτό περιλαμβάνει περισσότερο από το 99% Διπλωματική Εργασία

του παγκόσμιου πληθυσμού και της οικονομικής δραστηριότητας. Ένα μειονέκτημα της γεωστατικής τροχιάς είναι η μεγάλη καθυστέρηση διάδοσης μετ' επιστροφής, της τάξης των 260 ms, σε ένα σύστημα επικοινωνίας. Η καθυστέρηση αυτή μπορεί να επηρεάσει το δίκτυο συγχρονισμού και να έχει δυσμενείς επιπτώσεις σε φωνητικές εφαρμογές. Επίσης οι δορυφόροι αυτοί έχουν μεγάλο ίχνος και χρησιμοποιούν μόνο μια συχνότητα για την κάλυψη μιας ευρείας περιοχής.

➤ **MEO (Medium Earth Orbit)**

Αυτού του είδους οι δορυφόροι δεν είναι γεωστατικοί, δηλαδή δε βρίσκονται συνεχώς πάνω από το ίδιο σημείο. Οι μεσαίας τροχιάς δορυφόροι μπορούν να έχουν κυκλικές ή ελλειπτικές τροχιές και το ύψος τους κυμαίνεται γύρω στα 10000km από το έδαφος. Ο κύκλος της τροχιάς τους διαρκεί 2-4 ώρες. Για να επιτευχθεί ένα σύστημα παγκόσμιας κάλυψης για παροχή υπηρεσιών σε πραγματικό χρόνο, χρειάζονται 10 μέχρι 15 δορυφόροι. Οι δορυφόροι επικοινωνιών που καλύπτουν το Βόρειο και Νότιο Πόλο τίθενται επίσης σε χαμηλή τροχιά. Η καθυστέρηση διάδοσης μετ' επιστροφής είναι της τάξης των 85-100 ms. Η πιο κοινή χρήση των δορυφόρων σε αυτή την περιοχή είναι για πλοήγηση, όπως το σύστημα GPS.

➤ **LEO (Low Earth Orbit)**

Οι χαμηλής τροχιάς δορυφόροι είναι και αυτοί μη γεωστατικοί και βρίσκονται σε ύψη που κυμαίνονται από 700 έως 2.000km πάνω από τη γη. Ο κύκλος της τροχιάς τους διαρκεί 15 λεπτά. Σε ύψος 1.000km, η καθυστέρηση είναι της τάξης των 7-20 ms. Λόγω της μικρής καθυστέρησης διάδοσης χρειάζονται λιγότερο ισχυρούς επίγειους τερματικούς σταθμούς. Επίσης το μικρό ίχνος του δορυφόρου επιτρέπει την καλύτερη αναχρησιμοποίηση της συχνότητας. Η παγκόσμια κάλυψη της γης πραγματοποιείται από ένα μεγάλο αριθμό LEO δορυφόρων και αυτό απαιτεί αποτελεσματική δρομολόγηση και κατάλληλα πρωτόκολλα μεταγωγής.

1.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Το βασικό δορυφορικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα αποτελείται από το δορυφορικό τμήμα και το επίγειο τμήμα. Τα χαρακτηριστικά του κάθε τμήματος εξαρτώνται από το κατά πόσο το σύστημα πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε στατικές τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές, εφαρμογές δορυφορικών κινητών τηλεπικοινωνιών ή εφαρμογές για απευθείας κάλυψη.

Το δορυφορικό τμήμα του συστήματος περιλαμβάνει τον αναμεταδότη και τον επίγειο σταθμό ελέγχου στον οποίο πραγματοποιούνται οι διαδικασίες παρακολούθησης και τηλεμετρίας ελέγχου του δορυφόρου. Η ζεύξη μεταξύ των επίγειων σταθμών ή χρηστών γίνεται μέσω του δορυφορικού αναμεταδότη. Το σήμα της άνω ζεύξης (uplink) που εκπέμπεται από κάθε επίγειο σταθμό μεταδίδεται μέσω της ατμόσφαιρας και υφίσταται ποικίλλες αποσβέσεις μέχρι να φτάσει στην είσοδο του αναμεταδότη. Ο δορυφόρος με τη σειρά του εκπέμπει προς το σταθμό λήψης (downlink). Για να αποφεύγεται η παρεμβολή του προς τα άνω σήματος στο προς τα κάτω σήμα, ο δορυφορικός αναμεταδότης εκτός από ενίσχυση πραγματοποιεί και μετατροπή συχνότητας, ώστε η προς τα κάτω ζεύξη να πραγματοποιείται σε διαφορετική (συνήθως μικρότερη) συχνότητα από αυτή της προς τα άνω ζεύξης.

Το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequencies, RF) είναι οι πόροι του συστήματος που πρέπει να κατανέμονται αποδοτικά σε όλους τους τύπους ασύρματων υπηρεσιών, επίγειων και δορυφορικών. Η ITU εκχωρεί συχνότητες για κάθε τηλεπικοινωνιακή υπηρεσία σε παγκόσμια ή τοπική βάση. Μια ζώνη συχνοτήτων μπορεί να εκχωρείται σε μια ή περισσότερες υπηρεσίες είτε σε παγκόσμιο είτε σε τοπικό επίπεδο.

Στην περίπτωση όπου κάποιες υπηρεσίες μοιράζονται το ίδιο εύρος συχνοτήτων, λαμβάνονται τα απαραίτητα μέτρα ώστε οι υπηρεσίες μικρότερης προτεραιότητας να μη δυσχεραίνουν αυτές που είναι υψηλής προτεραιότητας. Οι μεγάλες απαιτήσεις των δορυφορικών επικοινωνιών σε εύρος ζώνης οδήγησαν στη χρησιμοποίηση υψηλότερων συχνοτήτων. Στον επόμενο πίνακα 1.1, συνοψίζονται οι βασικές κατηγορίες τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών μέσω δορυφόρου ανά ζώνη συχνοτήτων. [2]

Όνομασία Ζώνης Συχνοτήτων	Συχνότητα κάτω ζεύξης	Συχνότητα άνω ζεύξης	Κατηγορίες Τηλεπικοινωνιακών Υπηρεσιών
L-ζώνη	1 GHz	2 GHz	Κινητή υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Mobile Satellite Service, MSS)
			Κινητή υπηρεσία ξηράς μέσω δορυφόρου (Land Mobile Satellite Service, LMSS)
S-ζώνη	2 GHz	4 GHz	Κινητή υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Mobile Satellite Service, MSS)
			Υπηρεσία έρευνας του διαστήματος (Space Research Service)
C-ζώνη	4 GHz	8 GHz	Σταθερή Υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Fixed Satellite Service, FSS)
X-ζώνη	8 GHz	12.5 GHz	Σταθερή Υπηρεσία μέσω δορυφόρου για στρατιωτικούς σκοπούς (Fixed Satellite Service military communication)
Ku-ζώνη	12.5 GHz	18 GHz	Σταθερή Υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Fixed Satellite Service, FSS)
			Υπηρεσία εκπομπής μέσω δορυφόρου (Broadcast Satellite Service, BSS)
K-ζώνη	18 GHz	26.5 GHz	Σταθερή Υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Fixed Satellite Service, FSS)
			Υπηρεσία εκπομπής μέσω δορυφόρου (Broadcast Satellite Service, BSS)
Ka-ζώνη	26.5 GHz	30 GHz	Σταθερή Υπηρεσία μέσω δορυφόρου (Fixed Satellite Service, FSS)
			Υπηρεσία εκπομπής μέσω δορυφόρου (Broadcast Satellite Service, BSS)

Πίνακας 1.1: Δορυφορικές ζώνες συχνοτήτων και οι υπηρεσίες τους.

Οι διάφορες δορυφορικές υπηρεσίες σύμφωνα με την ITU συμπεριλαμβάνουν τις σταθερές δορυφορικές υπηρεσίες (Fixed Satellite Service, FSS), τις κινητές δορυφορικές υπηρεσίες (Mobile Satellite Service, MSS), καθώς και τις δορυφορικές υπηρεσίες ευρυεκπομπής (Broadcasting Satellite Service, BSS).

Η σταθερή δορυφορική υπηρεσία (FSS) ορίζεται ως μια υπηρεσία επικοινωνίας μεταξύ μιας συγκεκριμένης θέσης στην επιφάνεια της γης και ενός ή περισσοτέρων δορυφόρων. Οι σταθμοί που βρίσκονται στη γη, ονομάζονται επίγειοι σταθμοί της FSS. Οι σταθμοί που βρίσκονται επί των δορυφόρων ονομάζονται διαστημικοί σταθμοί της FSS, και περιλαμβάνουν κυρίως, τους δορυφορικούς αναμεταδότες και τις συναφείς κεραίες. Οι δορυφόροι νέας γενιάς έχουν εξελιγμένα συστήματα μεταγωγής επί του δορυφόρου, συμπεριλαμβανομένων των εξελιγμένων συστημάτων μεταγωγής επί του σκάφους.

Οι επικοινωνίες μεταξύ επίγειων σταθμών γίνονται μέσω ενός δορυφόρου ή μέσω περισσότερων δορυφόρων που διασυνδέονται μεταξύ τους (inter-satellite links, ISL). Είναι επίσης δυνατό δύο δορυφόροι να διασυνδέονται μέσω ενός κοινού επίγειου σταθμού χωρίς διαδορυφορική σύνδεση (ISL). Η FSS υποστηρίζει όλους τους τύπους των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών καθώς και των υπηρεσιών δικτύων δεδομένων, όπως τηλεφωνία, fax, δεδομένα, βίντεο, τηλεόραση, διαδίκτυο και ραδιόφωνο.

Η κινητή δορυφορική υπηρεσία (MSS) ορίζεται ως μια υπηρεσία επικοινωνίας μεταξύ κινητών επίγειων σταθμών και ενός ή περισσότερων δορυφόρων. Αυτό περιλαμβάνει τις θαλάσσιες, τις εναέριες και τις επίγειες κινητές υπηρεσίες. Λόγω των απαιτήσεων για κινητικότητα, τα κινητά επίγεια τερματικά είναι συχνά μικρά, και μάλιστα ορισμένα μπορούν να είναι ακόμη και τερματικά χειρός (handheld terminals).

Η υπηρεσία ευρυεκπομπής (BSS) είναι μια υπηρεσία στην οποία σήματα που μεταδίδονται ή αναμεταδίδονται από τους δορυφόρους προορίζονται για άμεση λήψη από το ευρύ κοινό, χρησιμοποιώντας μόνο μια τηλεοπτική κεραία λήψης (TVRO). Οι δορυφόροι που υλοποιούν τις υπηρεσίες ευρυεκπομπής συχνά ονομάζονται δορυφόροι απευθείας μετάδοσης (direct broadcast satellites, DBS). Οι άμεσες λήψεις περιλαμβάνουν ατομικές απευθείας στο σπίτι (direct-to-home, DTH) τηλεοπτικές κεραίες καθώς και την κοινοτική κεραία τηλεόρασης (community antenna TV, CATV). Η νέα γενιά των BSS μπορεί να έχει και μια σύνδεση επιστροφής μέσω του

δορυφόρου.

Ο πιο σημαντικός ρόλος των δορυφορικών δικτύων είναι η παροχή πρόσβασης στους τερματικούς χρήστες καθώς και η διασύνδεση με τα επίγεια δίκτυα, έτσι ώστε οι εφαρμογές και οι υπηρεσίες που παρέχονται από τα επίγεια δίκτυα, όπως η τηλεφωνία, η τηλεόραση, η ευρυζωνική πρόσβαση και οι συνδέσεις στο Internet, να μπορέσουν να επεκταθούν και σε μέρη όπου τα καλωδιακά και τα επίγεια δίκτυα δε μπορούν οικονομικά να εγκαθίστανται και να συντηρούνται. Επιπλέον, τα δορυφορικά δίκτυα μπορούν επίσης να παρέχουν τις εν λόγω υπηρεσίες και εφαρμογές σε πλοία, αεροσκάφη, οχήματα και τόπους που υπερβαίνουν τις δυνατότητες των επίγειων δικτύων. Οι δορυφόροι διαδραματίζουν επίσης σημαντικό ρόλο στα στρατιωτικά συστήματα, στη μετεωρολογία, στα παγκόσμια συστήματα εντοπισμού θέσης (GPS), στην παρατήρηση του περιβάλλοντος, των ιδιωτικών δεδομένων και των υπηρεσιών επικοινωνίας, καθώς και στη μελλοντική ανάπτυξη νέων υπηρεσιών και εφαρμογών για άμεση παγκόσμια κάλυψη, όπως είναι τα ευρυζωνικά δίκτυα, οι νέες γενιές κινητών δικτύων και οι ψηφιακές υπηρεσίες που μεταδίδονται σε ολόκληρο τον κόσμο.

Υπάρχουν δυο βασικές κατηγορίες υπηρεσιών που παρέχονται στους χρήστες από τα δορυφορικά δίκτυα: οι υπηρεσίες αλληλεπίδρασης (interactive) και οι υπηρεσίες διανομής σήματος (distributive), οι οποίες υποδιαιρούνται περαιτέρω σε υποκλάσεις.

Οι υπηρεσίες αλληλεπίδρασης (interactive) προσφέρουν σε έναν χρήστη τη δυνατότητα να αλληλεπιδράσει με κάποιον άλλο χρήστη με συνομιλία και μηνύματα σε πραγματικό χρόνο, ή να αλληλεπιδρούν με εξυπηρετητές πληροφοριών στους υπολογιστές. Μπορεί να θεωρηθεί ότι οι διάφορες υπηρεσίες μπορούν να έχουν διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσιών (QoS) και εύρους ζώνης, από το δίκτυο που τις υποστηρίζει. Οι υποκατηγορίες των διαδραστικών υπηρεσιών ορίζονται ως εξής:

- Διαλογικές υπηρεσίες (conversational services): παρέχουν τα μέσα για την αμφίδρομη επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο (δεν υπάρχει αποθήκευση και προώθηση της πληροφορίας) μεταξύ των χρηστών ή μεταξύ του χρήστη και του εξυπηρετητή (π.χ. για την επεξεργασία δεδομένων). Η ροή των πληροφοριών του χρήστη μπορεί να είναι αμφίδρομη συμμετρική, αμφίδρομη ασύμμετρη και σε ορισμένες ειδικές περιπτώσεις (π.χ. όπως η επιτήρηση μέσω βίντεο), η ροή των

πληροφοριών μπορεί να είναι και μονής κατεύθυνσης. Οι πληροφορίες προέρχονται από το χρήστη ή τους χρήστες που τις αποστέλλουν, και προορίζονται σε έναν ή περισσότερους χρήστες που τις λαμβάνουν. Παραδείγματα ευρυζωνικών διαλογικών υπηρεσιών είναι η τηλεφωνία, η εικονοτηλεφωνία (video telephony) και η τηλεδιάσκεψη.

- Υπηρεσίες μηνυμάτων (messaging services): προσφέρουν επικοινωνία (user-to-user) μεταξύ των διάφορων χρηστών, με τη βοήθεια μονάδων αποθήκευσης οι οποίες αποθηκεύουν, επεξεργάζονται και μεταδίδουν πληροφορίες. Παραδείγματα ευρυζωνικών υπηρεσιών είναι οι υπηρεσίες που χειρίζονται μηνύματα, οι υπηρεσίες ταχυδρομείου για κινούμενες/υψηλής ευκρίνειας εικόνες και για πληροφορίες ήχου.
- Υπηρεσίες ανάκτησης πληροφοριών (retrieval services): ο χρήστης των υπηρεσιών αυτών μπορεί να ανακτήσει πληροφορίες που είναι αποθηκευμένες σε κέντρα πληροφοριών, σε ατομική βάση. Η πληροφορία αυτή θα σταλεί στο χρήστη μόνο κατόπιν ζήτησης. Επιπλέον, η ώρα κατά την οποία ξεκινά μια ακολουθία πληροφοριών είναι υπό τον έλεγχο του χρήστη. Παραδείγματα αποτελούν οι ευρυζωνικές υπηρεσίες για την ανάκτηση ταινίας, υψηλής ευκρίνειας εικόνων, πληροφοριών ήχου. Αντίστοιχα υπάρχουν και υπηρεσίες που δεν επιτρέπουν τον έλεγχο από το χρήστη, όπως η τηλεόραση.

Οι υπηρεσίες διανομής σήματος έχουν ως πρότυπο τις παραδοσιακές υπηρεσίες εκπομπής για να διανέμουν πληροφορίες σε μεγάλο αριθμό χρηστών. Η απαιτήσεις σε εύρος ζώνης και σε ποιότητα υπηρεσιών (QoS) είναι πολύ διαφορετικές από αυτές στις διαδραστικές υπηρεσίες. Οι υπηρεσίες διανομής υποδιαιρούνται περαιτέρω σε υποκατηγορίες ως εξής:

- Υπηρεσίες διανομής σήματος που δεν επιτρέπουν έλεγχο από το χρήστη: στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται οι ραδιοτηλεοπτικές υπηρεσίες. Παρέχουν μια συνεχής ροή πληροφοριών, οι οποία διανέμεται από μια κεντρική πηγή προς απεριόριστο αριθμό εγκεκριμένων παραληπτών οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο. Ο χρήστης μπορεί να έχει πρόσβαση σε αυτή τη μεταδιδόμενη ροή πληροφοριών, χωρίς να μπορεί να καθορίσει τη χρονική στιγμή που αυτή θα ξεκινήσει ούτε και το περιεχόμενό της. Ανάλογα με τη χρονική στιγμή πρόσβασης του χρήστη, οι πληροφορίες δεν θα παρουσιάζονται από την αρχή.
- Υπηρεσίες διανομής σήματος που επιτρέπουν έλεγχο από το χρήστη: οι υπηρεσίες αυτής της κατηγορίας, είναι ίδιες με αυτές που δεν επιτρέπουν έλεγχο όσον αφορά το

κεντρικό γραφείο από το οποίο μεταδίδεται η πληροφορία, με τη διαφορά όμως ότι η ροή της πληροφορίας αποτελείται από "ενότητες" (frames) πληροφορίας που επαναλαμβάνονται περιοδικά. Δίνεται δηλαδή στο χρήστη η δυνατότητα να επιλέξει μεταξύ αυτών των ενοτήτων, ελέγχοντας επομένως τόσο το χρόνο έναρξης (η επιλεγθείσα ενότητα λαμβάνεται πάντοτε από την αρχή της), όσο και το περιεχόμενο του προγράμματος. Ένα παράδειγμα αυτής της υπηρεσίας είναι το κατ' απαίτηση βίντεο (video on demand). [3]

Η τεχνολογία των δορυφορικών συστημάτων είναι εξαιρετικά ευπροσάρμοστη και αυτό το χαρακτηριστικό της είναι σημαντικό για την επέκτασή της σε νέες εφαρμογές στο μέλλον. Επίσης, η ιδιότητα των δορυφορικών δικτύων να μεταδίδουν ταυτόχρονα την πληροφορία από ένα σημείο στο διάστημα προς ένα μεγάλο αριθμό αποδεκτών στο έδαφος (ευρυεκπομπή, broadcast) είναι εξαιρετικά χρήσιμη σε εφαρμογές που συμπεριλαμβάνουν τηλεοπτικές και φωνητικές μεταδόσεις. Η διανομή των εφαρμογών ακολουθεί τους παρακάτω τύπους αρχιτεκτονικής δικτύου (network architecture): σημείου-προς-σημείο (point-to-point), σημείου-προς-πολλαπλά σημεία (point-to-multipoint) και διαδραστική επικοινωνία πολλαπλών σημείων (multipoint interactive).

Ο πρώτος τύπος αρχιτεκτονικής χρησιμοποιείται για την τηλεοπτική μετάδοση σήματος με ραδιοκύματα μέσω της ατμόσφαιρας (Over-the-Air TV Broadcasting) στις ζώνες συχοντήτων VHF (30 έως 300MHz) και UHF (300 έως 3,000MHz), όπου χρησιμοποιούνται τοπικοί τηλεοπτικοί πομποί. Ο δορυφόρος χρησιμοποιείται για να φέρει το σήμα δικτύου από το κεντρικό στούντιο ενός τηλεοπτικού σταθμού σε πολλούς επίγειους σταθμούς-δέκτες, καθένας από τους οποίους συνδέεται στον τοπικό τηλεοπτικό πομπό. Η διαδικασία αυτή έχει ονομαστεί διανομή (TV distribution) ή επανεκπομπή (TV rebroadcast) τηλεοπτικού σήματος. Οι απομακρυσμένοι επίγειοι σταθμοί, όταν είναι εφοδιασμένοι με εξοπλισμό άνω ζεύξης, μπορούν να μεταδίδουν ένα σήμα πίσω στο κεντρικό στούντιο του σταθμού ώστε να μπορεί ο σταθμός να προγραμματίσει τις μεταδόσεις του δικτύου. Με τον τρόπο αυτό είναι, για παράδειγμα, εφικτές οι τηλεοπτικές μεταδόσεις αθλητικών γεγονότων που διεξάγονται σε απομακρυσμένες περιοχές.

Στη συνέχεια δημιουργήθηκε η καλωδιακή τηλεόραση (cable TV) από την απλή ανάγκη να βελτιωθεί η τηλεοπτική λήψη σε απομακρυσμένες περιοχές. Τα τηλεοπτικά σήματα διανέμονται στους χρήστες μέσω ενός δικτύου, που αποτελείται

από ομοαξονικά καλώδια ή οπτικές ίνες καθώς και ενισχυτές ευρείας διανομής, ώστε να παρέχεται η κατάλληλη ποιότητα σήματος. Η καλωδιακή τηλεόραση είναι η πρώτη που προσφέρει ένα ευρύ φάσμα επιλογής προγραμμάτων. Όλα αυτά βέβαια, είναι υπό τον άμεσο έλεγχο του φορέα παροχής των υπηρεσιών. Ο χειριστής του τοπικού καλωδιακού συστήματος ελέγχει την πρόσβαση των χρηστών και συνεπώς η χρηματοδότηση βασίζεται στα τέλη συνδρομής και τις χρεώσεις παροχής υπηρεσιών των χρηστών. Εάν τα τέλη δεν καταβληθούν, τερματίζεται η υπηρεσία.

Το τελευταίο βήμα στην εξέλιξη του δορυφορικού τηλεοπτικού δικτύου έγινε με την απευθείας-στην-οικία του χρήστη τηλεόραση (Direct-to-Home TV, DTHTV), με άμεση ζεύξη του δορυφόρου με το χρήστη, χωρίς να υπεισέρχεται δίκτυο άλλης μορφής ανάμεσά τους. Η εξέλιξη της DTHTV βασίσθηκε σε μεγάλο βαθμό στη μείωση του μεγέθους των κεραιών λήψης καθώς και στην αύξηση της χωρητικότητας των αναμεταδοτών.

Στις εφαρμογές σημείου-προς-πολλαπλά σημεία ανοίκει η δορυφορική ψηφιακή εκπομπής ήχου (Satellite Digital Audio Radio Service, DARS). Με έμφαση στα ηχητικά προγράμματα χωρίς οπτικά στοιχεία, το S-DARS απευθύνεται σε δίκτυα όπου

- το φασματικό εύρος ζώνης είναι περιορισμένο
- οι χρήστες είναι κινητοί σε αυτοκίνητα και σε πλοία
- οι χρήστες έχουν απομονωθεί από τις κύριες πηγές των ραδιοφωνικών και των άλλων μέσων μαζικής ενημέρωσης.

Η δορυφορική ραδιοφωνική εκπομπή δεν είναι τόσο διαφορετική από τη μετάδοση τηλεοπτικών προγραμμάτων και στην πραγματικότητα μοιράζονται τις ίδιες αρχές και τα ίδια δομικά στοιχεία. Η ιδέα είναι να διασφαλιστεί με κάποιον τρόπο ότι η ροή μετάδοσης των προγραμμάτων γίνεται με τον ίδιο τρόπο, που έχουν συνηθίσει να οι ακροατές να ακούνε. Η πραγματική εκπομπή μετάδοσης είναι αρκετά προτυποποιημένη, όπως και στην τηλεόραση, χρησιμοποιώντας αναλογική προς ψηφιακή μετατροπή, κατάλληλη συμπίεση για το περιεχόμενο, κωδικοποίηση, διαμόρφωση και ενίσχυση RF. Ο δορυφόρος που θα χρησιμοποιηθεί μπορεί να είναι σχεδιασμένος με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπει τη χρήση κινούμενων δεκτών.

Η υπηρεσία λειτουργεί όπως ένα κινητό σύστημα εφαρμογής και για το λόγο αυτό θα πρέπει να εξετάσει αντίστοιχες διαλείψεις που υφίσταται το σήμα

από το περιβάλλον (πολλαπλές διαδρομές, σκίαση από το έδαφος και τα κτίρια, απορρόφηση από το φύλλωμα των δέντρων). Σε περίπτωση απουσίας των μέτρων καταπολέμησης, η διακοπή μετάδοσης της ροής των δεδομένων θα προκαλέσει πλήρη σιωπή στην πλευρά του δέκτη. Αντίθετα, τα ραδιόφωνικά σήματα AM που μεταδίδονται περίπου με συχνότητα στο 1 MHz χρησιμοποιώντας το έδαφος για τη διάδοση κυμάτων, περνούν τα σήματα από τους τοίχους με σχετική ευκολία. Τα FM φέρονται με συχνότητα περίπου στα 100 MHz αντιμετωπίζουν μεγαλύτερη αναστάτωση, αλλά έχουν καλύτερη συνοχή της παράδοσης του ήχου στον χρήστη από τα αντίστοιχα S-DARS (με φέρουσα συχνότητα πάνω από 1 GHz), υπό την παρουσία των μηχανισμών διαλείψεων. Εν μέρει, ο λόγος για αυτό είναι η μεγάλη ισχύς του φέροντος στην FM μετάδοση.

Η καταπολέμηση των κινητών διαλείψεων απαιτεί μια στρατηγική, ικανή να παρέχει το ακουστικό περιεχόμενο στη διάθεση του δέκτη μέσω διαφορετικών διαδρομών. Το περιθώριο διαλείψεων της βασικής σύνδεσης θα πρέπει να υπερβαίνει τα 6 dB, ώστε να αντιμετωπίζεται η ακύρωση του σήματος που μπορεί να προκληθεί λόγω των διαλείψεων από τις αντανάκλασεις του σήματος σε κτίρια ή σε λόφους. Επίσης ταυτόχρονες εκπομπές θα πρέπει μελλοντικά να υποστηρίζονται από τουλάχιστον δύο δορυφόρους σε επαρκή απόσταση μεταξύ τους, ώστε να παρέχουν διαφορετικές γωνίες άφιξης στην κεραία του χρήστη. Στα αστικά και ημιαστικά περιβάλλοντα μπορεί να προβλεφτεί η αδυναμία να μεταδοθεί το σήμα μέσω των δύο διαδρομών και επιστρατεύοντας τους επίγειους αναμεταδότες να συμπληρωθούν τα κενά.

Η παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών (broadband) με υψηλές ταχύτητες επιτυγχάνεται μέσω του Δορυφορικού Internet (Internet over Satellite). Λόγω του μεγάλου εύρους κάλυψης που έχει ένας δορυφόρος, επιτρέπεται η σύνδεση απομακρυσμένων περιοχών με υψηλές ταχύτητες ακόμα και σε σημεία που δεν υπάρχει επίγεια υποδομή μέσα σε μερικές ώρες. Αυτό αποτελεί σοβαρό πλεονέκτημα αν ληφθεί υπόψη το υψηλό κόστος το οποίο απαιτείται για τη δημιουργία επίγεια υποδομής. Για να χρησιμοποιήσει το δορυφορικό internet ο χρήστης καλεί τον Πάροχο Διαδικτύου της υπηρεσίας του (Internet Service Provider, ISP) μέσω του δορυφορικού modem του, που είναι συνδεδεμένο στον υπολογιστή του. Στη συνέχεια κάνει μια αίτηση για κάποια σελίδα η οποία αντί να γίνεται κατευθείαν από τον server, πηγαίνει στο Κέντρο Λειτουργιών Ελέγχου (Network Operation Center, NOC)

της υπηρεσίας. Το Κέντρο Λειτουργιών Ελέγχου είναι αυτό που θα κάνει την αίτηση στον server ο οποίος απαντάει πάλι στο NOC. Για να ολοκληρωθεί η αίτηση, το Κέντρο Λειτουργιών Ελέγχου αποστέλλει την σελίδα στο δορυφόρο, ο οποίος με τη σειρά του αποστέλλει τα δεδομένα σε ένα δορυφορικό πιάτο και από εκεί στο δορυφορικό modem του χρήστη. Το δορυφορικό internet χρησιμοποιείται κυρίως σε περιοχές που το χερσαίο internet δεν έχει εύκολη πρόσβαση και σε μονάδες που συνεχώς μετακινούνται.

Το βασικό μειονέκτημα του δορυφορικού internet είναι ότι έχει μεγάλο χρόνο καθυστέρησης από τη στιγμή που θα κάνει ο χρήστης την αίτηση μέχρι να εμφανιστούν τα δεδομένα στον υπολογιστή του. Η καθυστέρηση αυτή είναι λογική, δεδομένου του τρόπου διάδοσης της πληροφορίας. Πρόβλημα επίσης μπορεί να εμφανιστεί όταν πολλοί χρήστες χρησιμοποιούν την υπηρεσία καθώς το εύρος ζώνης θα κατανέμεται μεταξύ πολλών χρηστών και ο δορυφόρος έχει περιορισμένους πόρους. [2]

1.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΣΤΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΣΗΜΑΤΑ

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, όταν διαδίδονται στον ελεύθερο χώρο υπόκεινται μόνο σε απόσβεση ελευθέρου χώρου. Όμως στις δορυφορικές μεταδόσεις το ηλεκτρομαγνητικό σήμα κατά τη διάδοσή του στην ατμόσφαιρα και στην ιονόσφαιρα, υφίσταται επιπλέον απορρόφηση, διάχυση, διάθλαση και περιστροφή του επιπέδου πόλωσής του.

Το μέγεθος της επίδρασης των φαινομένων αυτών στην ποιότητα των δορυφορικών μεταδόσεων εξαρτάται από το μήκος της διαδρομής του σήματος μέσα στην ατμόσφαιρα και παίζει σημαντικό ρόλο ιδίως όταν η δορυφορική ζεύξη πραγματοποιείται υπό μικρή γωνία ανύψωσης. Η απορρόφηση και η διάχυση προκαλούνται κυρίως από τα χαμηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Η διάθλαση προκαλείται από την τροπόσφαιρα, ενώ το φαινόμενο της αποπόλωσης παρατηρείται όταν βρέχει ή όταν το ηλεκτρομαγνητικό κύμα διέρχεται μέσα από την ιονόσφαιρα. Επιπλέον, επειδή η πυκνότητα της ατμόσφαιρας μειώνεται συναρτήσει με το υψόμετρο, η προκαλούμενη απόσβεση του σήματος από την ατμόσφαιρα είναι μικρότερη σε μεγαλύτερα υψόμετρα. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εξάρτηση της συνολικής ατμοσφαιρικής απόσβεσης από τη γωνία ανύψωσης. Οι

κατακόρυφες μεταδόσεις υπερτερούν σημαντικά από τις μεταδόσεις κοντά στον ορίζοντα. Επιγραμματικά, τα φαινόμενα που επηρεάζουν τις δορυφορικές μεταδόσεις κατηγοριοποιούνται ως εξής:

➤ Τροποσφαιρικά φαινόμενα

- Απορρόφηση αερίων. Η διάδοση ενός ραδιοκύματος κύματος μέσω της γήινης ατμόσφαιρας, θα αντιμετωπίσει μείωση του σήματος λόγω των αέριων συστατικών που υπάρχουν στη διαδρομή μετάδοσης. Η υποβάθμιση του σήματος μπορεί να είναι ασήμαντη ή σοβαρή, ανάλογα με τη συχνότητα, τη θερμοκρασία, την πίεση και τη συγκέντρωση των υδρατμών. Τα ατμοσφαιρικά αέρια επηρεάζουν επίσης τις ραδιοεπικοινωνίες με την προσθήκη ατμοσφαιρικού θορύβου στη σύνδεση. Η εξασθένηση λόγω απορρόφησης από το οξυγόνο της ατμόσφαιρας εμφανίζει συμπεριφορά σχεδόν ανεξάρτητη των κλιματολογικών συνθηκών, ενώ η εξασθένηση λόγω απορρόφησης από τους υδρατμούς της ατμόσφαιρας εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την απόλυτη υγρασία μιας περιοχής.
- Απόσβεση λόγω βροχής. Οι βροχοπτώσεις αποτελούν το σημαντικότερο περιοριστικό παράγοντα της διαθεσιμότητας και της αξιοπιστίας των δορυφορικών ζεύξεων. Η βροχή αποτελεί τυχαία χωροχρονική διαδικασία με έντονη ανομοιογένεια και μελετάται μόνο κατά στατιστικό τρόπο. Αποτελείται από υγρές σταγόνες τυχαίου σχήματος και μεγέθους με μορφή πεπλατυσμένου σφαιροειδούς. Η επίδρασή της στις δορυφορικές επικοινωνίες θα μελετηθεί εκτενέστερα παρακάτω.
- Απόσβεση από τα σύννεφα και την ομίχλη. Τα σύννεφα και η ομίχλη γενικά αποτελούνται από σταγονίδια νερού μικρότερα από 0,1mm σε διάμετρο, ενώ οι αντίστοιχες σταγόνες της βροχής συνήθως κυμαίνονται από 0,1 mm έως 10 mm σε διάμετρο. Η εξασθένηση λόγω ομίχλης είναι εξαιρετικά χαμηλή για συχνότητες κάτω από 100 GHz και συνεπώς μπορεί να αγνοηθεί. Τα σύννεφα αποτελούνται από σταγονίδια νερού και η σχετική υγρασία μέσα στο σύννεφο είναι συνήθως κοντά στο 100%. Συνεπώς επιδρούν σημαντικά στην εξασθένηση του δορυφορικού σήματος.
- Αποπόλωση λόγω βροχής. Δημιουργείται λόγω της διαφορικής απόσβεσης και της διαφορικής ολίσθησης φάσης, που προκαλείται από μη σφαιρικές σταγόνες βροχής. Καθώς αυξάνεται το μέγεθος των σταγόνων, το σχήμα τους τείνει να έχει

μια πιο επίπεδη ή κοίλη βάση. Αν και το φαινόμενο αυτό δεν επηρεάζει δορυφορικά συστήματα απλής πόλωσης, έχει σημαντική επίπτωση σε συστήματα αναχρησιμοποίησης συχνότητας που χρησιμοποιούν δύο ορθογώνιες πολώσεις. Μέρος της ισχύος του σήματος που εκπέμπεται με τη μια από τις δυο πολώσεις παρεμβάλλεται λόγω αποπόλωσης στο ορθογώνια πολωμένο σχήμα.

- Αποπόλωση από τον πάγο. Προκαλείται κυρίως από διαφορετική ολίσθηση φάσης. Τα δύο σχήματα που προτιμώνται για την παράσταση των παγοκρυστάλλων είναι οι βελόνες (needles) και οι πλάκες (plates). Σε θερμοκρασία κάτω των -25°C οι παγοκρυστάλλοι έχουν το σχήμα βελόνας, ενώ για θερμοκρασίες -25°C μέχρι -9°C μοιάζουν κυρίως με πλάκες. Οι παγοκρυστάλλοι έχουν πολύ μικρό βάρος και τείνουν να πέφτουν με πολύ αργό ρυθμό. Οι επιδράσεις των παγοκρυστάλλων έχουν παρατηρηθεί σε δορυφορικές συνδέσεις με συχνότητες από 4 GHz έως 30 GHz και πάνω.

➤ Ιονοσφαιρικά φαινόμενα

- Φαινόμενο Faraday, περιστροφή γραμμικά πολωμένου H/M κύματος επικοινωνιακού συστήματος στην ιονόσφαιρα λόγω αλληλεπίδρασης με το μαγνητικό πεδίο της γης. Δεδομένου ότι η περιστροφή του Faraday είναι ανάλογη της πυκνότητας των ηλεκτρονίων και του συστατικού του γήινου μαγνητικού πεδίου κατά μήκος της πορείας διάδοσης, η μέση τιμή της παρουσιάζει μια πολύ κανονική ημερήσια, εποχιακή, και ηλιακή κυκλική συμπεριφορά που είναι συνήθως προβλέψιμη. Αυτό επιτρέπει να αντισταθμίζεται η μέση περιστροφή από τη χειρωνακτική ρύθμιση της γωνίας κλίσης της πόλωσης στη δορυφορική κεραία του επίγειου σταθμού. Ωστόσο, μεγάλες αποκλίσεις από αυτήν την κανονική συμπεριφορά μπορούν να εμφανιστούν για τα μικρά ποσοστά του χρόνου ως αποτέλεσμα των γεωμαγνητικών θυελλών και, σε μια μικρότερη έκταση, λόγω των μεγάλης κλίμακας μετακινούμενων ιονοσφαιρικών διαταραχών. Οι αποκλίσεις αυτού του είδους δεν μπορούν να προβλεφθούν εκ των προτέρων.
- Ταχείες μεταβολές πλάτους, φάσης πόλωσης και γωνίας άφιξης του H/M σήματος, λόγω μεταβολών του συντελεστή διάθλασης της ιονόσφαιρας. Οι ιονοσφαιρικές μεταβολές είναι πιο σοβαρές για μετάδοση μέσω του ισημερινού και των πολικών περιοχών καθώς και κατά την ανατολή και τη δύση του ηλίου. Ο συντελεστής διακύμανσης των ιονοσφαιρικών σπινθηρισμών είναι αρκετά

γρήγορος, περίπου 0,1 έως 1 Hz. [1], [4], [5]

1.2.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ

Η σοβαρότερη ατμοσφαιρική επίδραση στις δορυφορικές μεταδόσεις είναι η παρουσία βροχόπτωσης στη διαδρομή του σήματος. Οι σταγόνες της βροχής σκεδάζουν και απορροφούν την προσπίπτουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία προκαλώντας απόσβεση πολλαπλάσια των απωλειών ελεύθερου χώρου. Η απώλεια ενέργειας που οφείλεται στη βροχόπτωση είναι καθοριστική σε συχνότητες πάνω από 10GHz. Επιπλέον, η σκέδαση μπορεί να προκαλέσει και φαινόμενα παρεμβολών μεταξύ γειτονικών συστημάτων, κυρίως μεταξύ επίγειων και δορυφορικών ζεύξεων. Το μέγεθος της συμβολής της σκέδασης και της απορρόφησης στην εξασθένηση του ραδιοκύματος εξαρτάται από τη σχέση του μεγέθους των υδρομετεωριτών με το μήκος κύματος. Για μήκη κύματος μεγάλα σε σύγκριση με το μέγεθος της σταγόνας, πχ στην περιοχή SHF (Super High Frequency), η εξασθένηση του ραδιοκύματος λόγω απορρόφησης υπερτερεί έναντι αυτής που οφείλεται στη σκέδαση. Αντιθέτως, για μήκη κύματος μικρά σε σύγκριση με τη βροχοσταγόνα, πχ στην περιοχή EHF (Extremely High Frequency), υπερτερεί η σκέδαση.

Η καλή λειτουργία του δορυφορικού συστήματος κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης, απαιτεί υψηλό περιθώριο διαλείψεων, δηλαδή την εκπομπή σημαντικά μεγαλύτερης ισχύος, ώστε να αντισταθμισθεί η πρόσθετη απόσβεση που προκαλεί η βροχόπτωση. Κατά συνέπεια, για τη σωστή σχεδίαση του δορυφορικού επικοινωνιακού συστήματος, είναι αναγκαία η γνώση της ακριβούς τιμής αυτής της πρόσθετης απόσβεσης. Η αναμενόμενη πρόσθετη απόσβεση εξαρτάται από τη συχνότητα λειτουργίας, το ύψος βροχόπτωσης και το μήκος της διαδρομής του ραδιοκύματος υπό βροχή. Έχοντας καθορίσει το μέσο μήκος διαδρομής L , είναι δυνατόν να υπολογιστεί η συνολική απόσβεση λόγω βροχόπτωσης ως το γινόμενο της ειδικής απόσβεσης επί το μέσο μήκος διαδρομής. Επειδή η βροχή είναι ένα στατιστικό φαινόμενο, συνήθως η σχεδίαση του δορυφορικού τηλεπικοινωνιακού συστήματος δεν γίνεται για να καλύπτει τη μέγιστη τιμή της απόσβεσης, για να αποφεύγεται η σοβαρή υπερεκτίμηση της απαιτούμενης ισχύος του συστήματος. Εμπειρικά τοπικά δεδομένα λαμβάνονται υπόψη και η σχεδίαση γίνεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε η διαθεσιμότητα της δορυφορικής ζεύξης να καλύπτει το 95%, έως 99% του χρόνου λειτουργίας της. Με την παραχώρηση αυτή προκύπτει σημαντική μείωση του κόστους του δορυφορικού συστήματος. [6]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

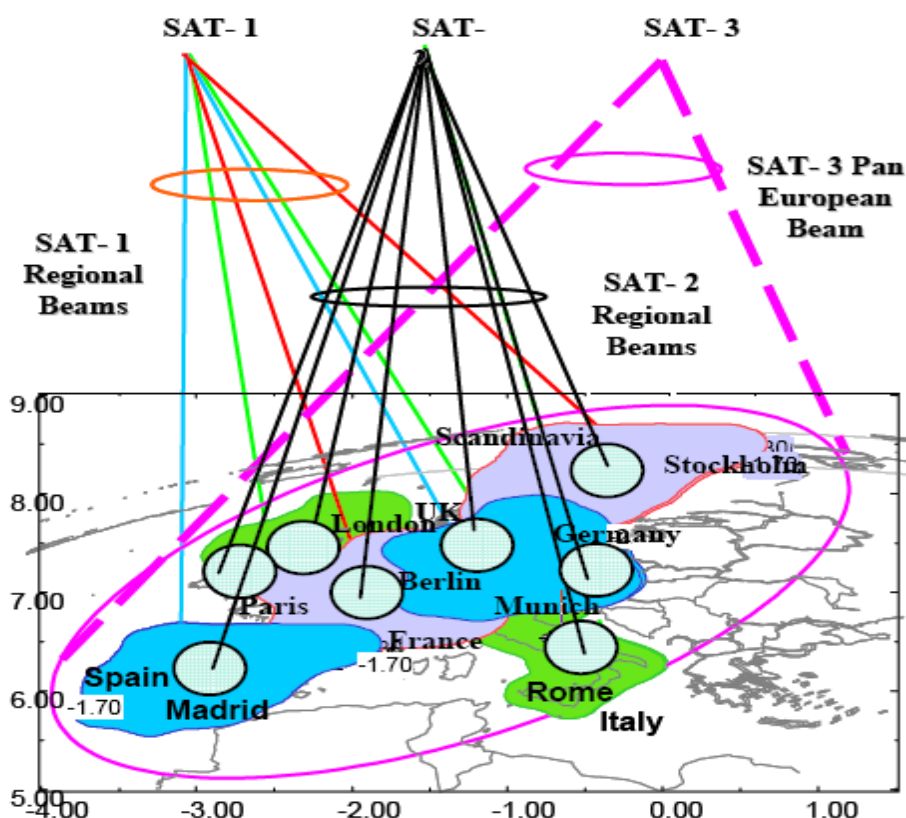
Δορυφορικά δίκτυα πολλαπλών δεσμών

2.1 ΔΟΡΥΦΟΡΟΙ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΔΕΣΜΩΝ

Η απαίτηση της δορυφορικής μετάδοσης μέσω πολλαπλών δεσμών γίνεται ο στυλοβάτης των νέων δορυφορικών συστημάτων. Τα δορυφορικά συστήματα πολλαπλών δεσμών έχουν σημαντικές επιπτώσεις στη μείωση του μεγέθους των επίγειων σταθμών μετάδοσης και στην αύξηση της χωρητικότητας μετάδοσης, και κατά συνέπεια στη διεύρυνση του φάσματος των εφαρμογών των σύγχρονων δορυφορικών επικοινωνιών.

Τα δορυφορικά συστήματα απλής δέσμης έχουν κάποια μειονεκτήματα όσον αφορά στην περιοχή κάλυψης. Ο δορυφόρος μπορεί να παρέχει κάλυψη όλης της περιοχής της γης η οποία είναι ορατή από αυτόν, και έτσι είναι σε θέση να επιτρέπει την εγκαθίδρυση ραδιοζεύξεων σε μεγάλες αποστάσεις (από μια ήπειρο σε μια άλλη). Στην περίπτωση αυτή, η απολαβή της κεραίας του δορυφόρου περιορίζεται από το εύρος της δέσμης της, όπως επιβάλλεται από την απαιτούμενη κάλυψη. Για παράδειγμα σε ένα γεωστατικό δορυφόρο, η παγκόσμια κάλυψη προϋποθέτει εύρος δέσμης 3db δηλαδή 17.5° , και συνεπώς η απολαβή κεραίας δεν ξεπερνά τα 20db. Από την άλλη, ο δορυφόρος μπορεί να παρέχει κάλυψη μόνο μέρους της γης (μιας περιοχής ή μιας χώρας), μέσω μιας στενής δέσμης εκπομπής (δέσμη ζώνης ή τοπική). Έτσι, υπάρχει ωφέλεια από τη μεγαλύτερη απολαβή της κεραίας, που οφείλεται στη μικρότερη γωνία της δέσμης της κεραίας, αλλά το σύστημα μπορεί να συνδεθεί με σταθμούς έξω από την περιοχή κάλυψής του μόνο μέσω επίγειων ή διαδορυφορικών ζεύξεων. Συνεπώς κατά τη χρήση ενός δορυφόρου απλής δέσμης πρέπει να γίνει επιλογή μεταξύ της δικτύωσης ενός μεγάλου αριθμού σταθμών (εκτεταμένη κάλυψη) και της οικονομικής λειτουργίας της ραδιοζεύξης, που επιτυγχάνεται μέσω μεγάλης απολαβής της κεραίας του δορυφόρου (ελαττωμένη κάλυψη).

Στην περίπτωση του δορυφόρου πολλαπλών δεσμών (σχήμα 2.1), ο οποίος διαθέτει αρκετές δέσμες εκπομπής-λήψης, επιτρέπεται ο συμβιβασμός των παραπάνω συντελεστών. Η κάλυψη είναι εκτεταμένη, αφού προκύπτει από την παράθεση της κάλυψης από μερικές δέσμες, ενώ ταυτόχρονα κάθε δέσμη παρέχει μια απολαβή που αυξάνεται καθώς μειώνεται το εύρος δέσμης της κεραίας. Η απόδοση βελτιώνεται με την αύξηση του αριθμού των δεσμών. Το όριο τίθεται από την τεχνολογία της κεραίας και από τη μάζα του δορυφόρου, του οποίου η πολυπλοκότητα αυξάνεται με τον αριθμό των δεσμών.



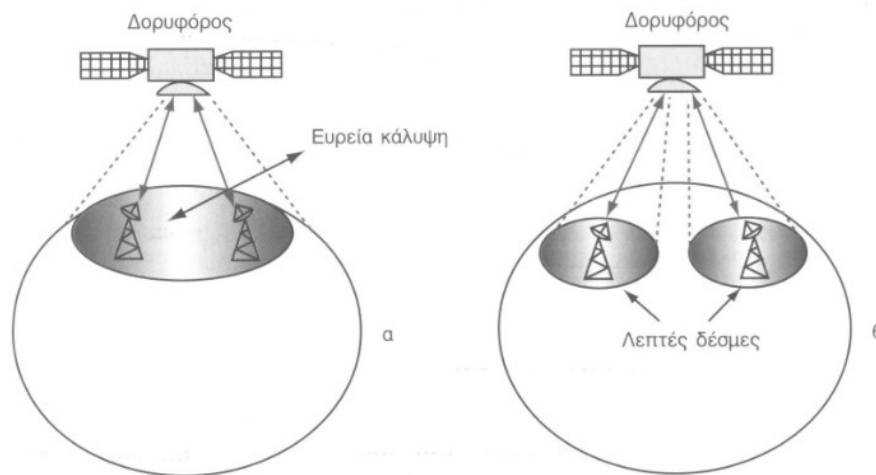
Σχήμα 2.1: Περιοχή κάλυψης δορυφόρων πολλαπλών δεσμών

Ένα δορυφορικό σύστημα χαρακτηρίζεται αποδοτικό οικονομικά, όταν το διαστημικό τμήμα ενισχύεται ώστε να παρέχει υψηλή ισοδύναμη ισότροπα ακτινοβολούμενη ισχύ (EIRP) και όταν ο λόγος του κέρδους προς τη θερμοκρασία θορύβου (G/T) στο επίγειο τμήμα, επιτρέπει τη χρήση μικρών, χαμηλής ισχύος σταθμών που παρέχουν την υπηρεσία στους χρήστες. Αυτό οδηγεί στη δημιουργία ενός διαστημικού τμήματος που έχει μεγάλο άνοιγμα κεραιών και συνεπώς στενές δέσμες.

Οι δέσμες καθορίζονται, επίσης, σύμφωνα με την κίνηση της περιοχής που καλύπτουν, αν δηλαδή η κίνηση επαρκεί για την δέσμη. Αυτό είναι κατάλληλο για τις περιφέρειες που περιλαμβάνουν περιοχές με υψηλή πυκνότητα πληθυσμού. Ωστόσο, σε περιοχές όπου η πυκνότητα του πληθυσμού είναι αραιή, η δέσμη πρέπει να «κάνει άλμα» (hop), ώστε να συσσωρεύσει αρκετή κίνηση, για να συμπληρωθεί. [7]

2.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΔΕΣΜΩΝ

Στο σχήμα 2.2 συγκρίνονται δυο διατάξεις δορυφόρων. Στη μια ο δορυφόρος παρέχει ευρεία κάλυψη με μια απλή δέσμη με εύρος $\theta_{3db} = 17.5^\circ$ (σχήμα 2.2α), και στην άλλη ο δορυφόρος έχει εστιασμένες δέσμες με εύρος $\theta_{3db} = 1.75^\circ$ (σχήμα 2.2β), με ανάλογα ελαττωμένη κάλυψη. Και στις δυο περιπτώσεις, όλοι οι επίγειοι σταθμοί στο δορυφορικό δίκτυο βρίσκονται εντός της κάλυψης του δορυφόρου.



Σχήμα 2.2: (α) Παγκόσμια κάλυψη από μια δέσμη (β) κάλυψη από στενές δέσμες

Τα πλεονεκτήματα των δορυφορικών δικτύων πολλαπλών δεσμών είναι συνοπτικά τα εξής:

1. Η ισχύς διαιρείται μεταξύ των δεσμών ενώ το εύρος ζώνης παραμένει σταθερό για κάθε δέσμη. Ως αποτέλεσμα, το συνολικό εύρος ζώνης αυξάνεται με τον αριθμό των δεσμών.

2. Οι επιδόσεις του συστήματος βελτιώνεται καθώς αυξάνεται ο αριθμός των δεσμών. Ωστόσο με την αύξηση των δεσμών αυξάνεται η πολυπλοκότητα του δορυφόρου.

3. Υπάρχει εκτεταμένη δορυφορική κάλυψη από την παράθεση πολλαπλών δεσμών. Κάθε δέσμη παρέχει ένα κέρδος κεραίας, το οποίο αυξάνεται με τη μείωση του γωνιακού εύρους των δεσμών.

4. Επιτυγχάνεται η επαναχρησιμοποίηση της συχνότητας, δηλαδή η ίδια ζώνη συχνοτήτων χρησιμοποιείται αρκετές φορές, ώστε να αυξηθεί η συνολική χωρητικότητα του δικτύου, χωρίς να αυξηθεί το εύρος ζώνης που διατίθεται.

2.2.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΟ ΕΠΙΓΕΙΟ ΤΜΗΜΑ

Ο δορυφόρος πολλαπλών δεσμών παρέχει οικονομία μεγέθους στο επίγειο τμήμα και κατά συνέπεια και οικονομία κόστους. Συγκριτικά με έναν δορυφόρο απλής δέσμης, αυτός των πολλαπλών δεσμών έχοντας μεγαλύτερη απολαβή κεραίας, παρουσιάζει μικρότερη $(EIRP)_{station}$ και $(G/T)_{station}$ για δεδομένο σηματοθορυβικό λόγο και απώλειες, που υπολογίζονται από τη σχέση:

$$(C/N_0)_U = (EIRP)_{station} + (G_R)_{satellite} - 0.4 \text{ (dBHz)}, \text{ για την άνω ζεύξη}$$

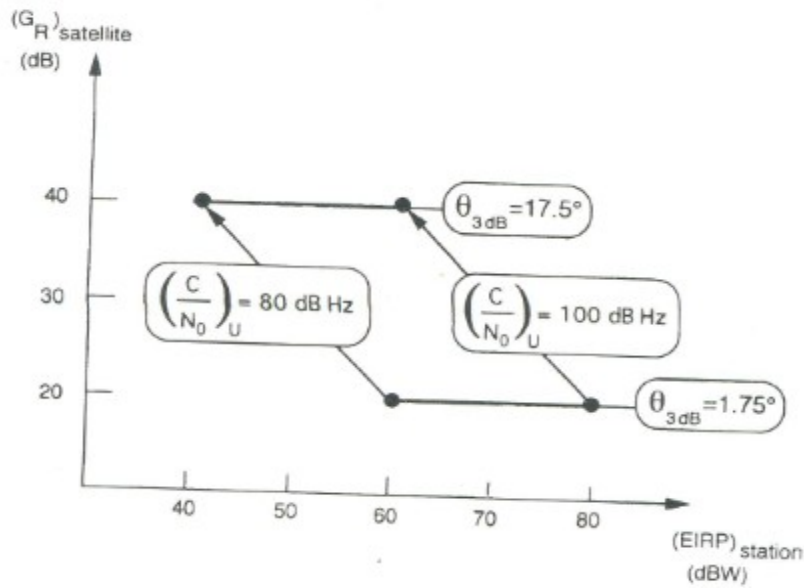
$$(C/N_0)_D = (G_T)_{satellite} + (G/T)_{station} + 38.6 \text{ (dBHz)}, \text{ για την κάτω ζεύξη}$$

όπου $(EIRP)_{station}$: η ενεργός ακτινοβολούμενη ισχύς του επίγειου σταθμού

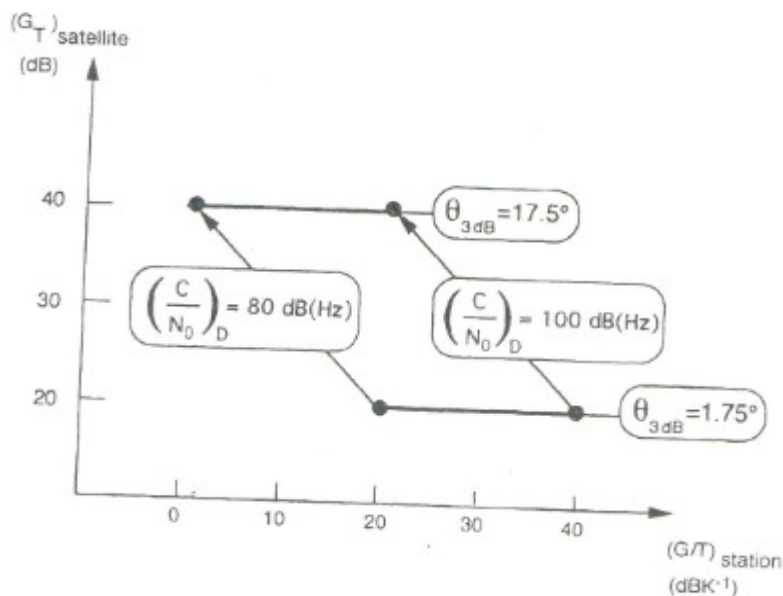
$$(G/T)_{station} : \text{ σύνθετη απολαβή λήψης / θερμοκρασία θορύβου}$$

$$(G_R)_{satellite}, (G_T)_{satellite} : \text{ απολαβή κεραίας λήψης, εκπομπής}$$

Στα σχήματα 2.3 και 2.4 τα κεκλιμμένα βέλη δείχνουν την ελάττωση στο $(EIRP)_{station}$ και $(G/T)_{station}$ (για τον επίγειο σταθμό), όταν από δορυφόρο απλής δέσμης και παγκόσμιας κάλυψης πηγαίνουμε σε δορυφόρο πολλαπλών δεσμών, που παρέχει κάλυψη με μερικές τοπικές δέσμες. Στην περίπτωση αυτή ο δορυφόρος πολλαπλών δεσμών παρέχει οικονομία μεγέθους και άρα κόστους, στο επίγειο τμήμα. Για παράδειγμα μια ελάττωση κατά 20 dB στο $(EIRP)_{station}$ και $(G/T)_{station}$ μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα τον υποδεκαπλασιασμό του μεγέθους της κεραίας και μεγάλη ελάττωση του κόστους του επίγειου σταθμού. [7]



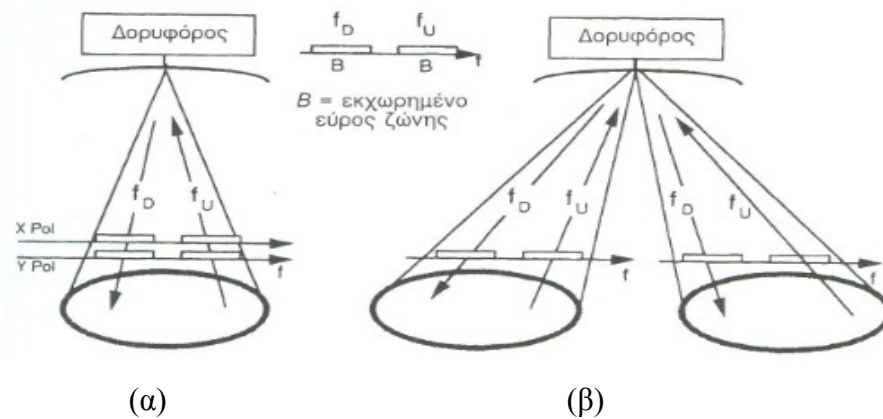
Σχήμα 2.3: Η σύγκριση των τιμών EIRP που απαιτούνται για έναν επίγειο σταθμό στην περίπτωση παγκόσμιας κάλυψης ($\theta_{3\text{dB}}=17.5^\circ$) και τοπικής δέσμης ($\theta_{3\text{dB}}=1.75^\circ$).



Σχήμα 2.4: Η σύγκριση των τιμών του δείκτη ποιότητας G/T για έναν επίγειο σταθμό στην περίπτωση παγκόσμιας κάλυψης ($\theta_{3\text{dB}}=17.5^\circ$) και τοπικής δέσμης ($\theta_{3\text{dB}}=1.75^\circ$).

2.2.2 ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

Η επαναχρησιμοποίηση της συχνότητας σημαίνει πολλαπλή χρήση της ίδιας ζώνης συχνοτήτων, κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αυξάνεται η ολική ικανότητα διακίνησης πληροφορίας του δικτύου χωρίς όμως να αυξάνεται και το εκχωρημένο εύρος ζώνης. Στην περίπτωση του δορυφόρου πολλαπλών δεσμών η απομόνωση, η οποία οφείλεται στην κατευθυντικότητα της κεραίας, μπορεί να επιτρέψει την επανάχρηση της ίδιας ζώνης συχνοτήτων για την κάλυψη διαφορετικών περιοχών. Μια δέσμη σχετίζεται με μια δεδομένη πόλωση και μια δεδομένη κάλυψη. Η επανάχρηση συχνότητας μπορεί να γίνει μέσω ορθογωνικής πόλωσης (σχήμα 2.5α) ή μέσω γωνιακής απομόνωσης των δεσμών (σχήμα 2.5β). Το εύρος ζώνης που εκχωρείται στο σύστημα και στις δυο περιπτώσεις είναι B . Το σύστημα χρησιμοποιεί αυτό το εύρος ζώνης B κεντραρισμένο στη συχνότητα f_U για την άνω ζεύξη και στη συχνότητα f_D για την κάτω ζεύξη. Στην περίπτωση της ορθογωνικής πόλωσης χρησιμοποιείται μόνο δύο φορές, ενώ στη περίπτωση της γωνιακής απομόνωσης μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για όσες δέσμες καθορίζει η επιτρεπτή στάθμη παρεμβολών. Και οι δυο τύποι επανάχρησης συχνότητας μπορούν να συνδυαστούν.



Σχήμα 2.5: Επανάχρηση συχνότητας με δυο δέσμες σε δορυφορικό σύστημα πολλαπλών δεσμών. (α) Μέσω ορθογωνικής πόλωσης (β) Μέσω γωνιακής απομόνωσης των δεσμών.

Ο αριθμός των φορών που χρησιμοποιείται το ίδιο εύρος ζώνης B ορίζεται ως συντελεστής επανάχρησης συχνότητας. Ένας δορυφόρος με M δέσμες, σε καθεμιά από τις οποίες έχει εκχωρηθεί το εύρος ζώνης B και καθεμιά συνδυάζει την επανάχρηση συχνότητας μέσω γωνιακής απομόνωσης με την επανάχρηση μέσω ορθογωνικής πόλωσης, μπορεί να έχει συντελεστή επανάχρησης M . Αυτό υποδηλώνει ότι ο συγκεκριμένος δορυφόρος μπορεί να έχει την ικανότητα διακίνησης πληροφορίας που θα είχε ένας δορυφόρος απλής δέσμης και απλής πόλωσης, αν χρησιμοποιούσε εύρος ζώνης ίσο με $M \times B$. Στην πράξη ο συντελεστής επανάχρησης συχνότητας εξαρτάται από τη μορφή της περιοχής κάλυψης πριν ακόμα χρησιμοποιηθεί ο δορυφόρος. Αν η περιοχή κάλυψης αποτελείται από μερικές απομακρυσμένες γεωγραφικά περιοχές (π.χ αστικές περιοχές που διαχωρίζονται από μεγάλες αγροτικές εκτάσεις), είναι δυνατό να χρησιμοποιήσουμε την ίδια ζώνη συχνοτήτων σε όλες τις δέσμες. Τότε ο συντελεστής επανάχρησης συχνότητας μπορεί να πάρει τη θεωρητική τιμή M . Όταν οι καλύψεις των δεσμών είναι γειτονικές, δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ίδια ζώνη συχνοτήτων από τη μια δέσμη στη διπλανή της. [7]

2.3 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΔΕΣΜΩΝ

Τα μειονεκτήματα των δορυφορικών συστημάτων πολλαπλών δεσμών έγκεινται στην παρεμβολή μεταξύ των δεσμών. Στην άνω ζεύξη το φέρον κύμα μιας δέσμης μπορεί να εμφανιστεί ως θόρυβος παρεμβολής στο φάσμα του φέροντος της δέσμης, που εκπέμπεται από τον επίγειο σταθμό βάσης. Αυτός ο θόρυβος ονομάζεται ενδοκαναλική παρεμβολή (co-channel interference, CCI).

Εκτός όμως από τις ενδοκαναλικές παρεμβολές, υπάρχουν και οι παρεμβολές από γειτονικά κανάλια (adjacent-channel interference, ACI). Μέρος της ισχύος του φέροντος μιας δέσμης γειτονικού καναλιού εισάγεται, λόγω ατελούς φιλτραρίσματος στο κανάλι εκπομπής. Στην κάτω ζεύξη η παρεμβολή προέρχεται από τις ακόλουθες συνεισφορές φασματικής πυκνότητας ισχύος που υπερτίθενται στο φάσμα του φέροντος που λαμβάνει ο σταθμός βάσης:

— από τα φάσματα του θορύβου παρεμβολής από γειτονικό και από το ίδιο κανάλι στην άνω ζεύξη, το οποίο αναμεταδίδεται από το δορυφόρο.

— από το φάσμα του φέροντος μιας γειτονικής δέσμης, το οποίο έχει την ίδια συχνότητα με το φέρον της δέσμης που λαμβάνεται από τον επίγειο σταθμό, και έχει μια μικρή απολαβή στη διεύθυνση της λαμβανόμενης δέσμης.

2.4 ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΚΕΡΑΙΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΔΕΣΜΩΝ

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των κεραιών έχει οδηγήσει στη δημιουργία κεραιών με διαμορφωμένες δέσμες (shaped) και πολλαπλές δέσμες, οι οποίες μπορούν να κινούνται. Οι κεραιές αυτές επιτρέπουν τη επανάχρησιμοποίηση της ίδιας συχνότητας με αλλαγή διεύθυνσης ακτινοβολίας ή πόλωσης. Οι τομές των μορφοποιημένων δεσμών είναι σχεδιασμένες για να ταιριάζουν όσο το δυνατόν περισσότερο με τα πραγματικά όρια της περιοχής εξυπηρέτησης. Η μορφοποίηση της σύνθετης δέσμης γίνεται με διάφορες τεχνικές, κυρίως συνδυάζοντας την ακτινοβολία διάφορων στοιχειωδών δεσμών με μικρότερο γωνιακό εύρος.

Η κάλυψη πολλαπλών δεσμών προϋποθέτει τη δημιουργία πολλών δεσμών, οι οποίες μπορεί να βρίσκονται σε διαφορετική ζώνη συχνοτήτων και να έχουν διαφορετικές πολώσεις.

A. Χωριστές πολλαπλές δέσμες

Η ζώνη εξυπηρέτησης αποτελείται από ένα σύνολο γεωγραφικών περιοχών που βρίσκονται χωριστά η μία από την άλλη. Οι περιοχές αυτές τροφοδοτούνται από δέσμες με στενή κυκλική διατομή και έχουν απλή γεωμετρική μορφή- στην αναπαράστασή τους από γωνία πραγματικής άποψης, η οποία παρουσιάζει πιστά τη μορφή της δέσμης της κεραιάς ανεξάρτητα από τη διεύθυνση της οπτικής ευθείας και το ύψος του δορυφόρου. Οι περιοχές αυτές μπορεί να αντιστοιχούν σε μεγάλες πόλεις, μεταξύ των οποίων θα πρέπει να εγκατασταθούν συνδέσεις υψηλής απόδοσης (high capacity links). Συνεπώς οι δέσμες μπορούν να μοιράζονται τις ίδιες ζώνες συχνοτήτων όταν έχουν αρκετή γωνιακή απόσταση. Η χρήση ορθογώνιας πόλωσης απομονώνει ακόμα περισσότερο τις συνδέσεις, αν η γωνιακή απόσταση είναι πολύ μικρή.

B. Συναφείς δέσμες (contiguous beams)

Η κάλυψη ενός δεδομένου γεωμετρικού περιγράμματος –δηλαδή το σύνολο σημείων αναφοράς για τα οποία ικανοποιούνται οι προδιαγραφές, μπορεί να

επιτευχθεί με ένα σύνολο συναφών δεσμών παρά με μια μόνο δέσμη. Αφού καθεμιά από τις δέσμες είναι στενότερη από μια δέσμη, που θα κάλυπτε όλη την περιοχή εξυπηρέτησης, η αντίστοιχη απολαβή είναι υψηλότερη. Αφού οι δέσμες επικαλύπτουν η μία την άλλη, οι συχνότητες θα πρέπει να διαφέρουν από δέσμη σε δέσμη. Συνεπώς οι κεραίες μοιράζονται το ολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης

Γ. Πλέγμα δεσμών

Ο συνδυασμός πολλαπλών δεσμών και η εκ νέου χρήση της συχνότητας δημιουργεί κάλυψη πλέγματος (lattice coverage), όπου το βασικό σχέδιο που δημιουργούν οι δέσμες, χρησιμοποιώντας μια ομάδα διαφορετικών συχνοτήτων, επαναλαμβάνεται σε μια ζώνη εξυπηρέτησης. Ο μεγάλος αριθμός δεσμών (και συχνοτήτων) στο βασικό σχέδιο, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της γωνιακής απόστασης των δεσμών που χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα. Αυτό οδηγεί σε μείωση των παρεμβολών στο σύστημα, αλλά και σε ελάττωση του εύρους ζώνης που χρησιμοποιείται και κατά συνέπεια της χωρητικότητας ανά δέσμη.[7]

2.5 ΤΡΟΠΟΙ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΚΑΛΥΨΗΣ

Ένα σύστημα δορυφόρων με πολλαπλές δέσμες πρέπει να είναι σε θέση να διασυνδέει όλους τους επίγειους σταθμούς του δικτύου και με τον τρόπο αυτό να παρέχει διασύνδεση των περιοχών κάλυψης. Η πολυπλοκότητα του ωφέλιμου φορτίου προστίθεται σε εκείνη του υποσυστήματος της δορυφορικής κεραίας πολλαπλών δεσμών. Υπάρχουν οι ακόλουθες τεχνικές για τη διασύνδεση περιοχών κάλυψης χρησιμοποιώντας «διαφανείς» αναμεταδότες (transponders).

2.5.1 ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΑΛΜΑ ΜΕΣΩ ΑΝΑΜΕΤΑΔΟΤΗ

(transponder hopping)

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται όταν ο αριθμός των δεσμών είναι μικρός. Η ζώνη συχνοτήτων που έχει εκχωρηθεί στο σύστημα διαιρείται σε τόσες υποζώνες όσες είναι και οι υπάρχουσες δέσμες. Ένα φίλτρο στο δορυφόρο ξεχωρίζει τα φέροντα σύμφωνα με την καταλαμβανόμενη ζώνη συχνοτήτων.

Η έξοδος κάθε φίλτρου συνδέεται μέσω ενός αναμεταδότη στην κεραία που θα δώσει τη δέσμη προς τον επιθυμητό σταθμό. Ο αριθμός των φίλτρων και των αναμεταδοτών θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσος με το τετράγωνο του αριθμού των δεσμών. Ανάλογα με τον τύπο της κάλυψης, οι επίγειοι σταθμοί πρέπει να μπορούν να εκπέμπουν και να λάβουν σε μερικές συχνότητες και πολώσεις ώστε να γίνει το “άλμα” από τον ένα αναμεταδότη στον άλλο (transponder hopping). Το βασικό μειονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι ο πίνακας διασυνδέσεων είναι σταθερός και έτσι η κατεύθυνση των σημάτων από τους επίγειους σταθμούς λήψης είναι προκαθορισμένη, χωρίς να υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής της κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος.

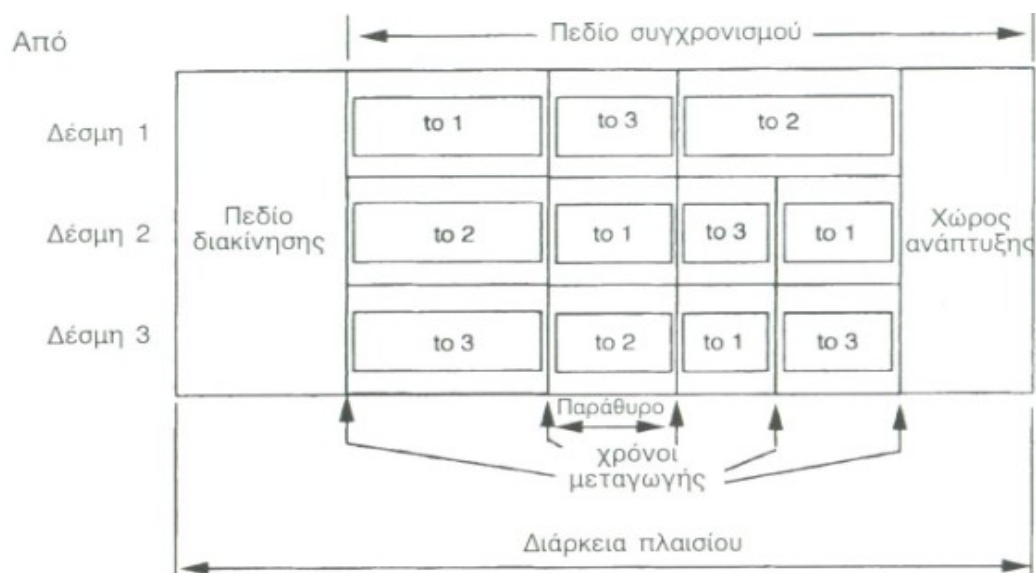
2.5.2 ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕΣΩ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ ΕΠΙ ΤΟΥ ΔΟΡΥΦΟΡΟΥ (SS- TDMA)

Όταν ο αριθμός των δεσμών είναι μεγάλος, ο δορυφόρος γίνεται πολύ πιο βαρύν και για το λόγο αυτό πρέπει να εξεταστεί η δυνατότητα μεταγωγής επί του δορυφόρου. Το ωφέλιμο φορτίο περιλαμβάνει μια προγραμματιζόμενη μήτρα μεταγωγής, που έχει έναν αριθμό εισόδων και εξόδων ίσο με αυτόν των δεσμών.

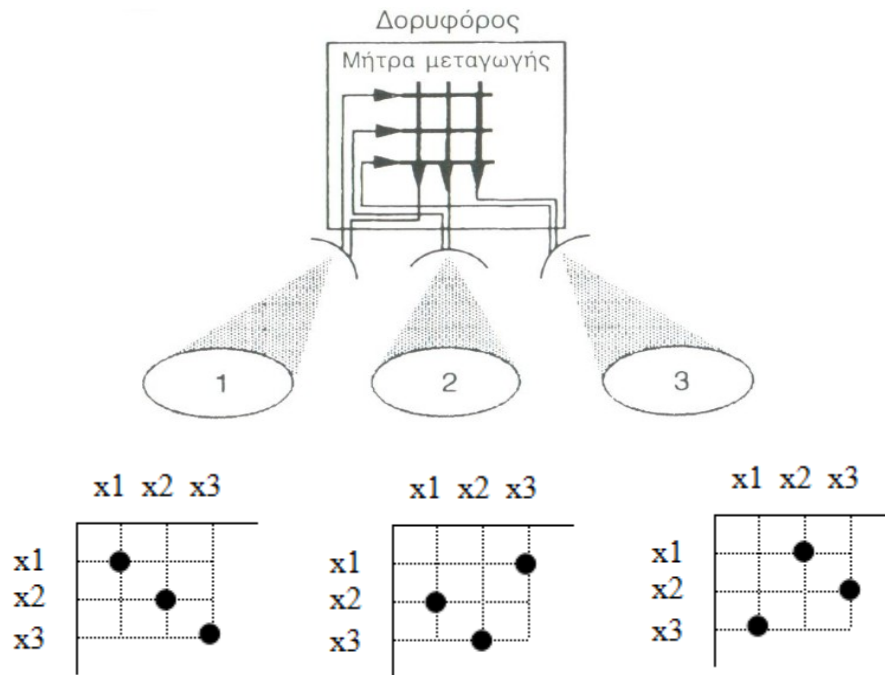
Η μήτρα αυτή συνδέει κάθε δέσμη του uplink με μια δέσμη του downlink μέσω ενός δέκτη και ενός πομπού. Συνεπώς ο αριθμός των αναμεταδοτών πρέπει να ισούται με τον αριθμό των δεσμών. Η μονάδα ελέγχου διανομής (DCU) που σχετίζεται με τη μήτρα μεταγωγής, καθορίζει την ακολουθία των καταστάσεων σύνδεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου κατά τη διάρκεια ενός πλαισίου με τέτοιο τρόπο ώστε τα φέροντα που φθάνουν στο δορυφόρο με κάθε δέσμη να διοχετεύονται προς τις δέσμες προορισμού τους. Επειδή η διασύνδεση είναι κυκλική, οι σταθμοί πρέπει να αποθηκεύουν δεδομένα από τους χρήστες και να τα εκπέμπουν με μορφή ριπών όταν πραγματοποιείται η απαιτούμενη σύνδεση μεταξύ των δεσμών. Η τεχνική αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο με ψηφιακή μετάδοση και πρόσβαση τύπου TDMA, για το λόγο αυτό ονομάζεται και πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χρόνου με μεταγωγή στο δορυφόρο (SS-TDMA). [7]

2.5.2.1 ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΤΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΠΑΡΑΘΥΡΟΥ

Το σχήμα 2.6α δείχνει την οργάνωση ενός πλαισίου για ένα δορυφόρο με τρεις δέσμες. Το πλαίσιο περιέχει ένα πεδίο συγχρονισμού και ένα πεδίο διακίνησης. Οι ριπές από τους σταθμούς διακίνησης πληροφορίας διοχετεύονται στους προορισμούς τους μέσω του πεδίου διακίνησης. Το πεδίο διακίνησης περιέχει μια ακολουθία καταστάσεων μεταγωγής. Στη διάρκεια μιας δεδομένης κατάστασης μεταγωγής, η μήτρα μεταγωγής διατηρεί την ίδια κατάσταση σύνδεσης. Το πεδίο διακίνησης περιέχει επίσης ένα «χώρο ανάπτυξης», στην περίπτωση που οι απαιτήσεις διακίνησης είναι μικρότερες από τη δυνατή χωρητικότητα. Η διάρκεια διασύνδεσης μιας δέσμης του uplink με μια δέσμη του downlink ονομάζεται παράθυρο (window). Κάθε επίγειος σταθμός εκπέμπει ένα σήμα σε κάθε χρονικό παράθυρο και όχι σε κάθε χρονική σχισμή (καταιγισμός), όπως γίνεται στο τυπικό TDMA. Ένα παράθυρο μπορεί να εκτείνεται για τη διάρκεια μερικών καταστάσεων μεταγωγής. Το χρονικό παράθυρο ταυτίζεται με τη χρονική σχισμή μόνο όταν σε κάθε κάτω δέσμη αντιστοιχεί μόνο ένας επίγειος σταθμός. Κατά το επόμενο χρονικό παράθυρο η κατάσταση του πίνακα διασυνδέσεων έχει αλλάξει κυκλικά και με τον τρόπο αυτό συνδέονται διαφορετικοί επίγειοι σταθμοί μεταξύ τους.



(α) Οργάνωση πλαισίου

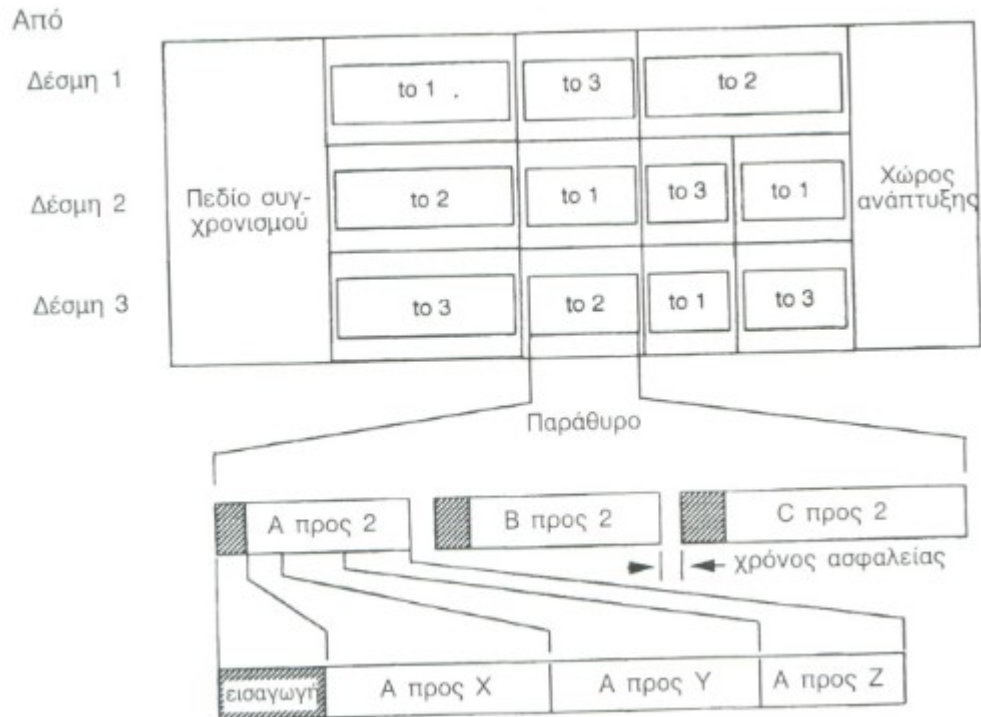


(β) Ακολουθία καταστάσεων μεταγωγής

Σχήμα 2.6: Δορυφόρος SS-TDMA με τρεις δέσμες. (α) Οργάνωση πλαισίου (β) Ακολουθία καταστάσεων μεταγωγής κατά το ενεργό μέρος του πεδίου διακίνησης

Το σχήμα 2.6β δείχνει την ακολουθία των καταστάσεων μεταγωγής η οποία υλοποιείται από τη μήτρα μεταγωγής για να διοχετευθούν οι πληροφορίες σύμφωνα με την οργάνωση του πλαισίου.

Το σχήμα 2.7 δείχνει τον τρόπο με τον οποίο διατάσσονται οι ριπές στο χρονικό διάστημα ενός παραθύρου. Οι ριπές εκπέπονται από τους σταθμούς A,B,C στο παράθυρο όπου αντιστοιχεί σε μια σύνδεση από τη δέσμη 3 στη δέσμη 2. Κάθε ριπή η οποία εκπέμπεται από έναν σταθμό στη χρονική διάρκεια του παραθύρου που εξετάζεται, αποτελείται από μερικές υπο-ριπές οι οποίες περιέχουν πληροφορίες από σταθμό σε σταθμό.



Σχήμα 2.7: Η οργάνωση του παραθύρου

2.5.2.2 ΕΚΧΩΡΗΣΗ ΠΑΚΕΤΩΝ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Η εκχώρηση ριπών στο πλαίσιο πρέπει να μεγιστοποιεί την αξιοποίηση των αναμεταδοτών του δορυφόρου. Οι αναμεταδότες αξιοποιούνται καλύτερα, όταν η κατανομή της διακίνησης πληροφορίας μεταξύ των δεσμών είναι “ισορροπημένη”. Πρακτικά όμως, δε γίνεται πάντοτε έτσι. Υπάρχουν πολυάριθμοι αλγόριθμοι που επιτρέπουν το γέμισμα των πλαισίων με ριπές κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να ελαχιστοποιείται η χρονική διάρκεια του ενεργού πεδίου μεταφοράς.

Ένα δίκτυο SS-TDMA μπορεί να λειτουργεί είτε με σταθερή είτε με κατ’ απαίτηση εκχώρηση. Με κατ’ απαίτηση εκχώρηση μπορούμε να μεταβάλλουμε την ικανότητα διακίνησης πληροφορίας που εκχωρείται σε σταθμούς, με μεταβολή του μήκους της ριπής, όπως και στην περίπτωση του απλού TDMA. Η διακύμανση του μήκους της ριπής του σταθμού συνοδεύεται από διακύμανση της θέσης των ριπών άλλων σταθμών, και συνεπώς από αλλαγή στην εκχώρηση άλλων ριπών (αλλαγή στο χρονοδιάγραμμα των ριπών). Υπάρχουν τρεις τρόποι μεταβολής του χρονοδιαγράμματος των ριπών:

- χωρίς μεταβολή της εκχώρησης μεταγωγής.

- συνοδευόμενη από μεταβολή της εκχώρησης τρόπου μεταγωγής, αλλά χωρίς μεταβολή της ακολουθίας κατάστασης μεταγωγής.
- συνοδευόμενη από μεταβολή της ακολουθίας κατάστασης μεταγωγής.

Η πρώτη περίπτωση αφορά μόνο τους επίγειους σταθμούς. Οι μεταβολές της εκχώρησης συμβαίνουν στην αρχή ενός υπερ-πλασίου για να εξασφαλιστεί ο συγχρονισμός της αλλαγής, μεταξύ όλων των σταθμών και του δορυφόρου.

2.5.2.3 ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΣ

Ο συγχρονισμός του δικτύου αφορά στον συγχρονισμό των επίγειων σταθμών μεταξύ τους και στον συγχρονισμό των επίγειων σταθμών με το δορυφόρο. Ο πρώτος επιτυγχάνεται με μεθόδους κλειστού ή ανοικτού βρόγχου, όπως στα απλά συστήματα TDMA. Επειδή όμως οι σταθμοί που καλύπτονται από μια δέσμη δεν λαμβάνουν τις ριπές τους που εκπέμπονται προς άλλες δέσμες και έτσι δε μπορούν να αντιληφθούν τα σφάλματα συγχρονισμού, δεν προτιμάται η τεχνική του κλειστού βρόγχου. Μια λύση, που ονομάζεται *συγχρονισμός κλειστού βρόχου με συνεργασία*, περιλαμβάνει την εκτέλεση αυτής της μέτρησης συγχρονισμού στο σταθμό για τον οποίο προορίζεται η δέσμη. Αυτός ο σταθμός, με τη σειρά του, υποδεικνύει την παρατηρηθείσα τιμή σφάλματος σε μια από τις ριπές του, που προορίζεται για τον πρώτο σταθμό. Αυτή η μέθοδος ελαττώνει την απόδοση πλαισίου, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο αν ο αριθμός των δεσμών είναι μικρός. Για να μην ελαττωθεί η απόδοση πλαισίου με μεγάλο αριθμό δεσμών, είναι προτιμότερη η χρήση μιας τεχνικής ανοικτού βρόχου.

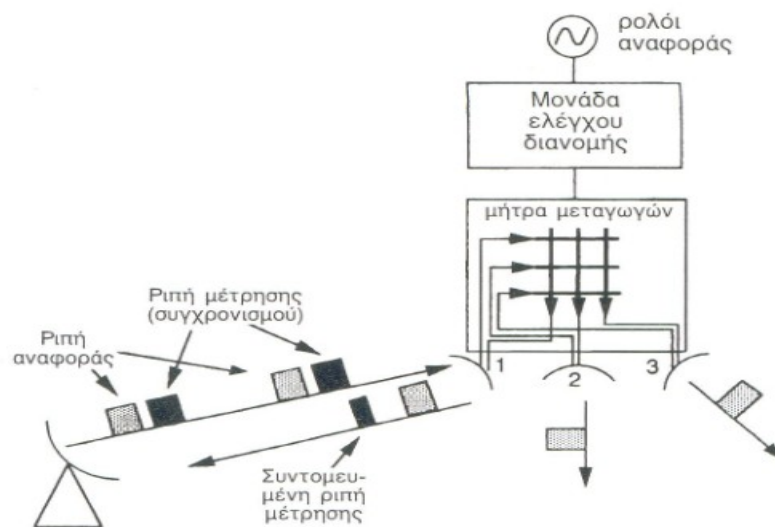
Ο συγχρονισμός του επίγειου τμήματος με το δορυφόρο υπονοεί μια επιλογή που πρέπει να γίνει για τη θέση του ρολογιού του δικτύου. Θα πρέπει να βρίσκεται στον επίγειο σταθμό αναφοράς, όπως στην τεχνική TDMA, ή θα πρέπει να βρίσκεται στο δορυφόρο, λόγω της θέσης του σαν ένα προνομιούχο κομβικό σημείο; Αν αφήσουμε το ρολόι στο σταθμό αναφοράς, τότε πρέπει επίσης να υπάρχει ένας αποδιαμορφωτής και ένα κύκλωμα ανίχνευσης της μοναδικής λέξης πάνω στο δορυφόρο. Η εγκατάσταση του ρολογιού επί του δορυφόρου απαιτεί ένα διαμορφωτή για τη μετάδοση του σήματος του ρολογιού σε όλες τις δέσμες.

Και στις δύο περιπτώσεις, απαιτείται επιπλέον εξοπλισμός στο δορυφόρο, και αυτός είναι πιθανό να παρουσιάσει βλάβη. Επίσης, στην περίπτωση

εγκατάστασης στο δορυφόρο, μπορεί να μην υπάρχει ικανοποιητική σταθερότητα του σήματος του ρολογιού. Μια λύση είναι να χρησιμοποιήσουμε το ρολόι της μονάδας ελέγχου διανομή (DCU) σαν ρολόι του δικτύου. [7]

Ο σταθμός αναφοράς αναγνωρίζει το σήμα αυτού του ρολογιού και συγχρονίζει την εκπομπή της ριπής αναφοράς. Ο τρόπος λειτουργίας φαίνεται στο σχήμα 2.8. Ο σταθμός αναφοράς εκπέμπει μια άλλη ριπή, η οποία ονομάζεται *ριπή μέτρησης*, πριν από τη *ριπή αναφοράς*. Με συγχρονισμό σταθερής κατάστασης, αυτή η ριπή φτάνει στο δορυφόρο στο πεδίο συγχρονισμού του πλαισίου, το οποίο εκτείνεται στους δύο πρώτους τρόπους μεταγωγής. Ο πρώτος τρόπος καθορίζει μια σύνδεση επιστροφής προς τη δέσμη του σταθμού αναφοράς (δέσμη 1 στο σχήμα 2.8) και ο δεύτερος δεν παρέχει διασύνδεση μεταξύ εισόδου-εξόδου.

Έτσι, η ριπή μέτρησης επιστρέφει, συντομευμένη, στο σταθμό αναφοράς, και έτσι ελέγχεται η εκπομπή του ώστε να παραμείνει σε συγχρονισμό με το ρολόι της DCU. Η εκπομπή της ριπής αναφοράς ακολουθεί εκείνη της ριπής μέτρησης, με μια σταθερή καθυστέρηση. Διανέμεται από το δορυφόρο σε όλες τις δέσμες μέσω ενός τρίτου τρόπου μεταγωγής του πεδίου συγχρονισμού που συνδέει τη δέσμη 1 με όλες τις δέσμες. Το σήμα του ρολογιού μπορεί να συγκριθεί με εκείνο ενός πιο ακριβούς ρολογιού στο σταθμό αναφοράς. Κατόπιν, μπορούν να σταλούν διορθώσεις φάσης μέσω τηλεχειρισμού, κατά τρόπο ώστε να εξασφαλιστεί η απαιτούμενη σταθερότητα.



Σχήμα 2.8: Ο συγχρονισμός σε ένα δίκτυο SS-TDMA

2.5.2.4 ΑΠΟΔΟΣΗ ΠΛΑΙΣΙΟΥ

Η απόδοση του πλαισίου δίνεται από τον τύπο:

$$\eta = 1 - \Sigma t_i / T_F$$

όπου το Σt_i αναπαριστά το άθροισμα των χρόνων που δεν είναι αφιερωμένοι στη μετάδοση πληροφορίας (νεκροί χρόνοι) και T_F είναι η διάρκεια του πλαισίου.

Υπάρχουν πέντε συνιστώσες του Σt_i :

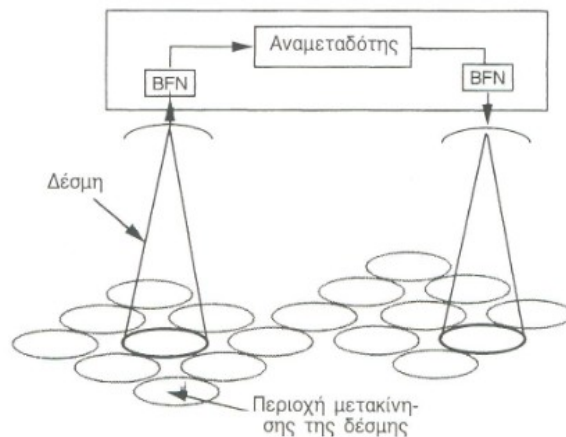
- Το πεδίο συγχρονισμού
- Οι επικεφαλίδες των πακέτων και οι χρόνοι ασφαλείας, περιλαμβανομένων και των διαστημάτων που κρατούνται για τη μεταγωγή της μήτρας στο δορυφόρο. Σε σύγκριση με ένα δορυφόρο απλής δέσμης, ένας σταθμός πρέπει να εκπέμψει μερικές φορές μέσα σε ένα πλαίσιο, αν τα πακέτα του προορίζονται για μερικές δέσμες. Καθώς κάθε πακέτο έχει μια εισαγωγή, υπάρχει περισσότερος νεκρός χρόνος.
- Στην περίπτωση της κατ'απαίτηση εκχώρησης, η εκχώρηση ριπών δεν μπορεί να είναι βέλτιστη σε μια δεδομένη στιγμή και εισάγονται νεκροί χρόνοι στα παράθυρα, όταν προκύπτει μια αλλαγή εκχώρησης χωρίς αλλαγή στον τρόπο μεταγωγής ή στην ακολουθία των καταστάσεων μεταγωγής.
- Ο χώρος ανάπτυξης, στην περίπτωση που η απαίτηση διακίνησης πληροφορίας που αντιστοιχεί στην κρίσιμη γραμμή είναι μικρότερη από τη χωρητικότητα ενός καναλιού του επαναλήπτη.

Συνολικά, είναι δύσκολο να γίνουν εκτιμήσεις, αφού η απόδοση εξαρτάται από τη διοχέτευση των πληροφοριών. Με τεχνικές προσομοίωσης, έχουν βρεθεί τιμές από 75 μέχρι 80%. Για κάθε υπόθεση, η απόδοση είναι μικρότερη από εκείνη με ένα δορυφόρο απλής δέσμης. [7]

2.5.3 ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΔΕΣΜΗΣ (beam forming)

Κάθε καλυπτόμενη περιοχή καλύπτεται κυκλικά από μια δέσμη κεραίας της οποίας ο προσανατολισμός ελέγχεται από ένα κατάλληλο κύκλωμα μορφοποίησης δέσμης (Beam Forming Network, BFN), που είναι μέρος του υποσυστήματος της κεραίας στο δορυφόρο (σχήμα 2.9).

Οι σταθμοί της περιοχής εκπέμπουν ή λαμβάνουν τις ριπές τους όταν η περιοχή καλύπτεται από μια δέσμη. Όταν δεν υπάρχει μνήμη στο δορυφόρο, είναι απαραίτητες τουλάχιστον δύο δέσμες σε μια δεδομένη στιγμή, μία για το uplink και μια για το downlink. Η διάρκεια του χρόνου που μια δέσμη καλύπτει μια περιοχή είναι ανάλογη με τον όγκο της πληροφορίας που πρέπει να μεταφερθεί μεταξύ των δυο περιοχών.



Σχήμα 2.9: Διασύνδεση με μετακίνηση των δεσμών

2.6 ΔΙΑΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΡΑΔΙΟΖΕΥΞΕΙΣ

Οι διαδορυφορικές ζεύξεις (inter-satellite links, ISL) μπορούν να θεωρηθούν ιδιαίτερης σημασίας δέσμες, των δορυφόρων με πολλαπλές δέσμες. Στην περίπτωση αυτή, η δέσμη δεν κατευθύνεται προς τη γη αλλά προς άλλους δορυφόρους. Για αμφικατευθυντικούς τηλεπικοινωνιακούς δορυφόρους, είναι αναγκαίες δυο δέσμες, μια για το uplink και μια για το downlink.

Η δυνατότητα διασύνδεσης του δικτύου υπονοεί τη δυνατότητα διασύνδεσης μεταξύ των δεσμών που αφιερώνονται σε διαδορυφορικές ζεύξεις, καθώς και άλλες ζεύξεις στο επίπεδο του ωφέλιμου φορτίου. Υπάρχουν τρεις κατηγορίες διαδορυφορικής ραδιοζεύξης, οι οποίες θα μελετηθούν εκτενέστερα στη συνέχεια:

- Ραδιοζεύξεις (GEO-LEO), μεταξύ γεωστατικών δορυφόρων (GEO) και δορυφόρων χαμηλής τροχιάς (LEO), οι οποίες ονομάζονται και διατροχιακές ζεύξεις (inter-orbital links, IOL).

- Ραδιοζεύξεις (GEO-GEO), μεταξύ γεωστατικών δορυφόρων.
- Ραδιοζεύξεις (LEO-LEO), μεταξύ δορυφόρων χαμηλής τροχιάς.

2.6.1 ΡΑΔΙΟΖΕΥΞΕΙΣ (GEO-LEO)

Αυτός ο τύπος ραδιοζεύξης χρησιμεύει για την εγκαθίδρυση μιας μόνιμης σύνδεσης μέσω ενός γεωστατικού δορυφόρου, μεταξύ ενός ή περισσότερων επίγειων σταθμών και μιας ομάδας δορυφόρων που κινούνται σε μια χαμηλή τροχιά σε ύψος από 500-1000 km. Για οικονομικούς και πολιτικούς λόγους, δεν είναι επιθυμητή η εγκατάσταση ενός δικτύου σταθμών που να είναι τόσο μεγάλο, ώστε κάθε στιγμή οι διερχόμενοι δορυφόροι χαμηλής τροχιάς (LEO) να είναι ορατοί από τουλάχιστον έναν σταθμό.

Έτσι χρησιμοποιούνται ένας ή περισσότεροι γεωστατικοί δορυφόροι, οι οποίοι είναι μόνιμα και ταυτόχρονα ορατοί τόσο από τους επίγειους σταθμούς όσο και από τους δορυφόρους χαμηλής τροχιάς, και οι οποίοι αποτελούν τους ενδιάμεσους στη μεταφορά των πληροφοριών. Αυτή η τεχνική επιτρέπει επίσης να ξεπεραστούν οι πιθανοί περιορισμοί του επίγειου δικτύου.

Με τον τρόπο αυτό λειτουργεί το δίκτυο ανίχνευσης της NASA, μέσω των δορυφόρων ανίχνευσης και μετάδοσης δεδομένων (tracking and data relay satellites, TDRS), οι οποίοι παρέχουν επικοινωνίες με το αμερικανικό διαστημικό λεωφορείο [LAN-82],[SCH-84]. Υπάρχει και ένα ευρωπαϊκό πρόγραμμα σε εξέλιξη, για την εγκατάσταση εξοπλισμού αναμετάδοσης πληροφοριών (ARTEMIS satellite), για την παροχή επικοινωνιών μεταξύ του εδάφους και διαστημικών σκαφών σε χαμηλή γήινη τροχιά.

2.6.2 ΡΑΔΙΟΖΕΥΞΕΙΣ (GEO-GEO)

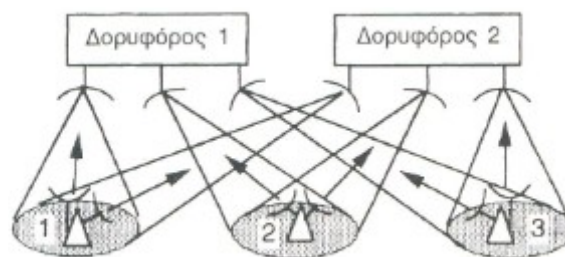
Έστω ένα δορυφορικό δίκτυο με πολλαπλές δέσμες. Υποτίθεται ότι η απαίτηση διακίνησης πληροφορίας αυξάνει και υπερβαίνει τις δυνατότητες του δορυφόρου. Έτσι είναι αναγκαίο να εκτοξευθεί ένας δορυφόρος με μεγαλύτερες δυνατότητες και αυτό εμπεριέχει κινδύνους, κόστος και προϋποθέτει την ύπαρξη ενός κατάλληλου πυραύλου εκτόξευσης. Εναλλακτικά θα μπορούσε να εκτοξευθεί ένας δεύτερος δορυφόρος, πανομοιότυπος με τον πρώτο και η διακίνηση της πληροφορίας

να μοιραστεί μεταξύ των δυο δορυφόρων. Για να αποφευχθούν οι παρεμβολές οι δυο δορυφόροι θα πρέπει να είναι σε δυο απομακρυσμένες θέσεις τροχιάς αλλά όχι πολύ μακριά, ώστε να μπορούν να παρέχουν, ικανοποιητικά, μεγάλη κοινή κάλυψη. Για να εξασφαλιστεί η δυνατότητα διασύνδεσης μεταξύ όλων των σταθμών, είναι αναγκαίο να εξοπλιστούν όλοι οι σταθμοί με δύο κεραίες, που η καθεμία θα διευθύνεται προς έναν από τους δορυφόρους (σχήμα 2.10α). Με δορυφόρους που έχουν ικανότητα διαδορυφορικής σύνδεσης, υπάρχουν δύο επιλογές:

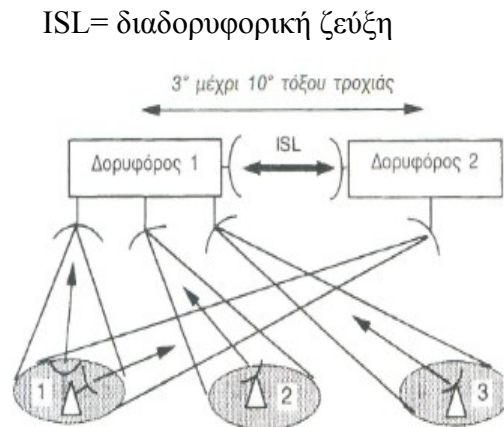
— Να εξοπλιστούν οι σταθμοί της περιοχής 1, που υποτίθεται ότι έχουν τη μεγάλη απαίτηση διακίνησης πληροφορίας, με μια δεύτερη κεραία, και οι σταθμοί των περιοχών 2 και 3 να κρατήσουν τις υπάρχουσες διατάξεις τους (σχήμα 2.10β). Η διαδορυφορική σύνδεση μεταφέρει τον πλεονάζοντα όγκο των πληροφοριών

— Να κατανεμηθούν οι σταθμοί, ο καθένας με μια κεραία, σε δύο ομάδες, που η κάθε ομάδα να λειτουργεί με ένα δορυφόρο (Σχ. 2.10γ). Η διαδορυφορική σύνδεση μεταφέρει τις πληροφορίες μεταξύ των δύο ομάδων.

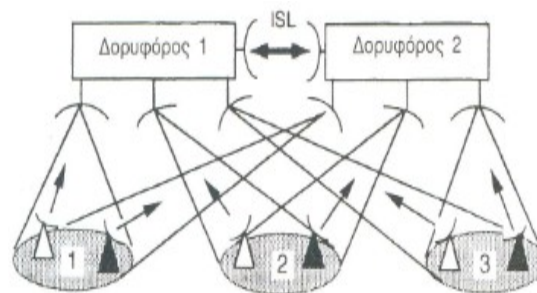
Η επιλογή γίνεται με οικονομικά κριτήρια, και εξαρτάται από την περίπτωση. Μια μελέτη που έγινε για ένα ευρωπαϊκό σύστημα, δείχνει, για παράδειγμα, ότι η επιλογή μιας διαδορυφορικής ζεύξης δικαιολογείται οικονομικά αν η μάζα των διαδορυφορικών αναμεταδοτών δεν υπερβαίνει το 20% της μάζας εκτόξευσης του δορυφόρου, και αν το πολύ 15 μέχρι 20% των σταθμών πρέπει να είναι εξοπλισμένοι με δύο κεραίες. [7]



(α) Εκτοξεύεται δεύτερος δορυφόρος για να αυξηθούν οι δυνατότητες του διαστημικού τμήματος. Οι επίγειοι σταθμοί πρέπει να είναι εξοπλισμένοι με δυο κεραίες.



(β) Με μια διαδορυφορική ζεύξη μόνο οι σταθμοί που βρίσκονται στην περιοχή με τη μεγαλύτερη ζήτηση θα πρέπει να είναι εξοπλισμένοι με δυο κεραίες



(γ) Οι σταθμοί κατανέμονται μεταξύ των δυο δορυφόρων. Η διαδορυφορική ζεύξη μεταφέρει τις πληροφορίες μεταξύ των δυο ομάδων σταθμών

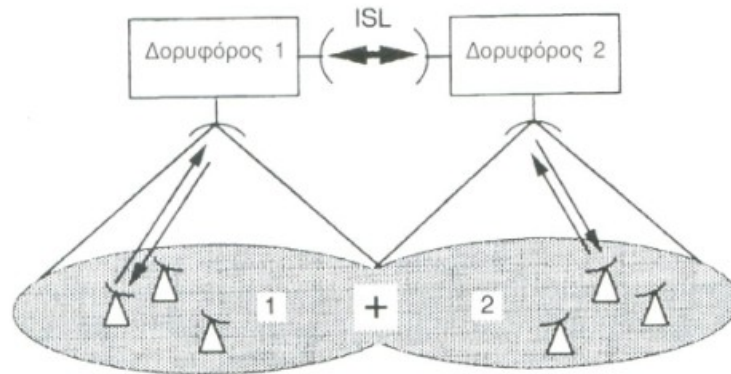
Σχήμα 2.10: Διαδορυφορικές ζεύξεις

2.6.2.1 Η ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΛΥΨΗΣ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

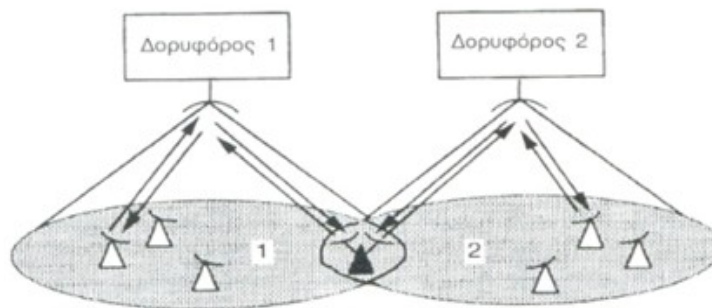
Μια διαδορυφορική ζεύξη επιτρέπει στους επίγειους σταθμούς να διασυνδέονται, και έτσι μπορεί να συνδυαστεί η γεωγραφική περιοχή κάλυψης των δύο δορυφόρων (Σχ. 2.11α). Οι εναλλακτικές λύσεις είναι τότε:

- Η εγκατάσταση ενός επίγειου σταθμού διασύνδεσης εξοπλισμένου με δύο κεραίες, στο κοινό τμήμα των περιοχών κάλυψης, αν υπάρχει (σχήμα 2.11β).

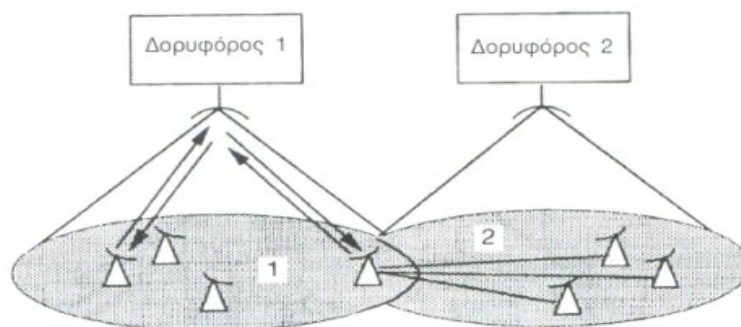
- Η πραγματοποίηση της σύνδεσης μέσω του επίγειου δικτύου, από τους σταθμούς του ενός δικτύου σε ένα σταθμό του άλλου δικτύου, ο οποίος βρίσκεται στα κοινά όρια των δύο περιοχών κάλυψης (σχήμα 2.11γ).



- (α) Διασύνδεση των σταθμών κάθε καλυπτόμενης περιοχής μέσω μιας διαδορυφορικής ζεύξης.



- (β) Διασύνδεση χωρίς διαδορυφορική ζεύξη, από έναν σταθμό που είναι κοινός και για τα δυο δίκτυα.



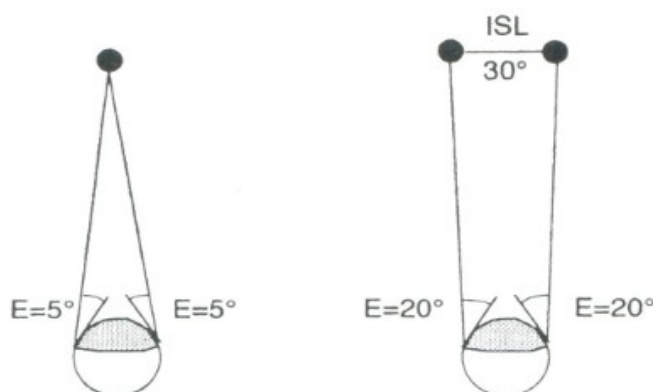
- (γ) Διασύνδεση χωρίς διαδορυφορική ζεύξη από ένα επίγειο δίκτυο.

Σχήμα 2.11: Η επέκταση της κάλυψης του σήματος.

2.6.2.2 Η ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΑΝΥΨΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΕΠΙΓΕΙΟΥΣ ΣΤΑΘΜΟΥΣ

Οι ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων μέσω ενός δορυφόρου απαιτούν επίγειους σταθμούς με μικρή γωνία ανύψωσης (δηλαδή κλίσης δέσμης σε σχέση με τον ορίζοντα), μερικές φορές μικρότερη από 10°. Αυτό έχει σαν συνέπεια τη μείωση του λόγου G/T για το σταθμό λήψης και αυξάνει τον κίνδυνο παρεμβολής από επίγειες μικροκυματικές ζεύξεις.

Αν η ραδιοζεύξη περνά διαμέσου δύο γεωστατικών δορυφόρων που συνδέονται μέσω μιας διαδορυφορικής ζεύξης, η γωνία ανύψωσης αυξάνεται. Έτσι, μια ραδιοζεύξη με απλό δορυφόρο με γωνία ανύψωσης 5° γίνεται, με δύο δορυφόρους που απέχουν 30°, ραδιοζεύξη με γωνία ανύψωσης 20° για τους σταθμούς που βρίσκονται στον ισημερινό (σχήμα 2.12), και 15° για σταθμούς με γεωγραφικό πλάτος 45°. Αυτή, για παράδειγμα, θα ήταν η περίπτωση μεταξύ Λονδίνου και Τόκιο, με δύο δορυφόρους πάνω από τον Ινδικό Ωκεανό.



Σχήμα 2.12: Αύξηση της ελάχιστης γωνίας ανύψωσης για τους επίγειους σταθμούς

2.6.2.3 Η ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ ΣΤΗΝ ΤΡΟΧΙΑΚΗ ΘΕΣΗ

Η τροχιακή θέση ενός δορυφόρου είναι συχνά το αποτέλεσμα μιας διαμάχης, που επιλύεται μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται *συντονισμός*, μεταξύ της επιθυμίας του χειριστή του δορυφόρου να εξασφαλίσει την κάλυψη της εξυπηρετούμενης περιοχής με τις καλύτερες συνθήκες, και την ανάγκη να αποφευχθεί η παρεμβολή με άλλα ήδη λειτουργούντα συστήματα. Το πρόβλημα

γίνεται οξύ πάνω από ηπείρους, και ιδιαίτερα στο τόξο της τροχιάς πάνω από την Αμερικανική ήπειρο.

Οι διαδορυφορικές ζεύξεις, όταν επιτρέπουν την κατανομή της διακίνησης πληροφορίας σε μερικούς δορυφόρους σε διαφορετικές τροχιακές θέσεις, παρέχουν στο χειριστή κάποια ελευθερία στην τοποθέτηση των δορυφόρων του.

2.6.2.4 ΟΜΑΔΕΣ ΔΟΡΥΦΟΡΩΝ

Η βασική ιδέα είναι να τοποθετηθούν μερικοί δορυφόροι στην ίδια θέση της τροχιάς με απόσταση μεταξύ τους περίπου 100 km, και να διασυνδεθούν μέσω διαδορυφορικών ζεύξεων. Έτσι, όλοι αυτοί οι δορυφόροι βρίσκονται στον κύριο λοβό μιας κεραίας επίγειου σταθμού, και φαίνονται σαν ένας ισοδύναμος δορυφόρος μεγάλων δυνατοτήτων, που θα ήταν υπερβολικά βαρύς για να εκτοξευτεί με έναν υπάρχοντα πύραυλο. Η ομάδα των δορυφόρων τοποθετείται στη θέση της με διαδοχική εκτόξευση των δορυφόρων που την αποτελούν. Καθώς όλοι οι δορυφόροι υφίστανται τις ίδιες μετατοπίσεις, απλοποιείται ο έλεγχος της τροχιάς. Στην περίπτωση βλάβης ενός δορυφόρου, αυτός μπορεί να αντικατασταθεί. Τέλος, η διάταξη της ομάδας μπορεί να τροποποιηθεί, ανάλογα με τις ανάγκες διακίνησης της πληροφορίας.

2.6.3 ΡΑΔΙΟΖΕΥΞΕΙΣ (LEO-LEO)

Τα πλεονεκτήματα των δορυφόρων χαμηλής τροχιάς και η αυξανόμενη συμφόρηση στις τροχιές των γεωστατικών δορυφόρων προδιαγράφουν τη μελλοντική ανάπτυξη των δορυφορικών επικοινωνιών. Πράγματι, τα μειονεκτήματα ενός δορυφόρου σε τροχιά (περιορισμένος χρόνος επικοινωνιών και σχετικά μικρή κάλυψη) μπορούν να ελαττωθούν σε ένα δίκτυο που περιέχει ένα μεγάλο αριθμό δορυφόρων οι οποίοι διασυνδέονται μέσω διαδορυφορικών ζεύξεων και είναι εξοπλισμένοι με κάποιο τρόπο μεταγωγής μεταξύ των δεσμών. Η εταιρεία Motorola κατασκεύασε, έθεσε σε τροχιά και λειτουργεί ένα τέτοιο δίκτυο, που ονομάζεται IRIDIUM, για παγκόσμιες προσωπικές επικοινωνίες με κινητά τηλέφωνα. Το σύστημα χρησιμοποιεί έναν "αστερισμό" 66 δορυφόρων, ενώ αρχικά είχε σχεδιαστεί με 77 δορυφόρους. [7]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Συστήματα πολλαπλής πρόσβασης, πρωτόκολλα και πολιτικές ανάθεσης πόρων σε δορυφορικά δίκτυα

3.1 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΟΡΩΝ (resource allocation)

Η κατανομή των πόρων (resource allocation) και η αποτελεσματική αξιοποίησή τους είναι μια σημαντική διαδικασία στα δορυφορικά δίκτυα. Οι κοινοί πόροι (εύρος ζώνης, χωρητικότητα) του διαύλου είναι περιορισμένοι σε μέγεθος και γι' αυτό πρέπει να κατανέμονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να ικανοποιούν τις διαφορετικές απαιτήσεις των χρηστών σε ποιότητα υπηρεσιών (Quality of Service, QoS). Ένας από τους παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα της μετάδοσης είναι η μεταβλητότητα του διαύλου. Αυτή οφείλεται σε μεταβολές στη δυναμική της κίνησης καθώς και σε φαινόμενα διαλείψεων, που προκαλούνται από ατμοσφαιρικά φαινόμενα (βροχή, χαλάζι, χιόνι).

Η ποιότητα υπηρεσιών που λαμβάνει ένας τερματικός χρήστης του δικτύου εξαρτάται από την ποιότητα υπηρεσιών που επιτυγχάνεται σε κάθε επίπεδο του δικτύου. Κάθε στρώμα πρέπει να χρησιμοποιεί αποτελεσματικές τεχνολογίες και να αντισταθμίζει τους διάφορους παράγοντες υποβάθμισης της επίδοσης του δικτύου, προκειμένου να εκπληρώνονται οι απαιτήσεις του χρήστη. Οι ακόλουθες ενέργειες θεωρούνται παράδειγμα της συνεργασίας των διαφόρων στρωμάτων ώστε να βελτιστοποιηθεί η απόδοση του συστήματος:

- Στο φυσικό στρώμα (physical layer) πρέπει να χρησιμοποιηθούν αποδοτικά συστήματα διαμόρφωσης εύρους ζώνης και κωδικοποίησης, για να βελτιωθεί ο ρυθμός απώλειας ψηφίων (Bit Error Ratio, BER) -δηλαδή το ποσοστό των λανθασμένων ψηφίων μετά την ψηφιακή αποδιαμόρφωση- καθώς και η απόδοση του επιπέδου ισχύος σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες, όπως οι ισχυρές βροχοπτώσεις.

- Στο στρώμα σύνδεσης δεδομένων (data link layer) πρέπει να παρέχεται εγγυημένο εύρος ζώνης, χρησιμοποιώντας αποτελεσματικά συστήματα πολλαπλής πρόσβασης με απαίτηση εύρους ζώνης και μελετώντας την αλληλεπίδραση των διαφόρων μηχανισμών, υπό την παρουσία συμφόρησης και διαλείψεων. Το περιορισμένο εύρος ζώνης -που διατίθεται από το φυσικό στρώμα στα ανώτερα στρώματα- προϋποθέτει την ύπαρξη μεθόδων εκχώρησής του. Οι μέθοδοι αυτές διαμοιράζουν το διαθέσιμο εύρος ζώνης ανάμεσα στους διάφορους τερματικούς χρήστες, που έχουν διαφορετικές ροές κίνησης

- Στο στρώμα δικτύου (network layer), που ασχολείται με την αποστολή αιτήσεων σύνδεσης από την πηγή προς τον προορισμό (σε δίκτυα μεταγωγής κυκλωμάτων) ή την αποστολή πακέτων (σε δίκτυα μεταγωγής πακέτου), πρέπει να εφαρμοστούν αποτελεσματικές πολιτικές δρομολόγησης, ώστε να επιλεγούν οι διαδρομές με τη μικρότερη πιθανότητα συμφόρησης. Όσον αφορά τη διαχείριση της IP κίνησης, πρέπει να ληφθεί υπόψη και η κινητικότητα των χρηστών. Συνεπώς, τα πρωτόκολλα επιπέδου δικτύου πρέπει να παρέχουν διαχείριση με προτεραιότητα στην κίνηση που προέρχεται από χρήστες που βρίσκονται σε φάση διαπομπής (handover) από κάποιο σταθμό βάσης σε κάποιον άλλο.

- Στο στρώμα μεταφοράς (transport layer), TCP συνδέσεις, οι οποίες σήμερα αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος της κίνησης που μεταφέρεται στο Internet, τείνουν να καταλάβουν όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Η φύση της περισσότερης TCP κίνησης είναι ασύμμετρη, με τα δεδομένα να πηγαίνουν προς μία κατεύθυνση και τις γνωστοποιήσεις (ACK) προς την αντίθετη κατεύθυνση. Αυτό μεταφράζεται σε διαφορετικές απαιτήσεις για εύρος ζώνης, του πομπού και του δέκτη. Η εκχώρηση του εύρους ζώνης και η ποιότητα της ζεύξης έχουν σημαντική επίδραση στην διέλευση TCP.

- Στο στρώμα εφαρμογών (application layer), διαφορετικά είδη κίνησης (π.χ κίνηση πραγματικού χρόνου και κίνηση μη πραγματικού χρόνου) πρέπει να έχουν συγκεκριμένες συμφωνίες σε επίπεδο υπηρεσίας (Service Level Agreements, SLA) και να διενεργούνται ενέργειες παρακολούθησης

από κοινού με το επίπεδο δικτύου, προκειμένου να τροποποιείται δυναμικά η προτεραιότητα των υπηρεσιών.

Στο παρόν κεφάλαιο θα μελετηθούν κυρίως τα πρωτόκολλα που συντονίζουν τις ενέργειες στο στρώμα σύνδεσης δεδομένων και κατανέμουν το διαθέσιμο εύρος ζώνης. [8]

3.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ

Η πολλαπλή πρόσβαση είναι μια ψηφιακή τεχνολογία μετάδοσης που επιτρέπει σε πολλούς σταθμούς εδάφους να ανταλλάξουν, ταυτόχρονα, δεδομένα πολυμέσων μέσω δορυφορικής σύνδεσης. Είναι ένας γενικός όρος που δηλώνει τις μεθόδους για τον καταμερισμό της διαθέσιμης χωρητικότητας του δορυφορικού αναμεταδότη μεταξύ των διάφορων επίγειων σταθμών.

Οι πιο δημοφιλείς τεχνικές κατανομής λειτουργούν ως εξής:

1. χωρίζοντας το εύρος ζώνης του αναμεταδότη με διαφορετικές σχισμές συχνότητας (Frequency Division Multiple Access, FDMA)
2. μοιράζοντας τη διαθεσιμότητα του αναμεταδότη σε διακριτές χρονικές σχισμές (Time Division Multiple Access, TDMA)
3. επιτρέποντας σε κωδικοποιημένα σήματα να επικαλύπτονται στο χρόνο και τη συχνότητα (Code Division Multiple Access, CDMA) και στη συνέχεια κάθε σταθμός εδάφους διαχωρίζει τα σήματα αναγνωρίζοντας ποια κωδικοποίηση προορίζεται για αυτόν.
4. υιοθετώντας ένα συνδυασμό των παραπάνω τεχνικών (TDMA με CDMA ή FDMA με TDMA)

Με την παρουσία μιας κεραίας πολλαπλών δεσμών στο δορυφόρο, πολλοί χρήστες ταυτόχρονα μπορούν να έχουν πρόσβαση σε αυτόν, εφόσον καλύπτονται από χωριστές δέσμες. Η τεχνική αυτή ονομάζεται πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χώρου (Space Division Multiple Access, SDMA). Ένας δορυφόρος έχει διάφορες κατευθυντικές κεραίες, ορισμένες από τις οποίες μπορεί να χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα, υπό την προϋπόθεση ότι οι παρεμβολές μεταξύ τους (λόγω του τρόπου ακτινοβολίας από τους πλευρικούς

Διπλωματική Εργασία 57

λοβούς) είναι αμελητέες. Συνήθως, οι δέσμες που χωρίζονται από περισσότερα από δύο ή τρία εύρη ημίσιας ισχύος μπορούν να χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες. Αυτή η τεχνική της επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας επιτρέπει μια ευρύτερη χρησιμοποίηση των πόρων της διεπαφής του αέρα.

Η διαχείριση των πόρων με τεχνικές TDMA, FDMA, CDMA μπορεί να γίνει με κεντρικά ελεγχόμενα ή καταναμημένα. Τα παραπάνω συστήματα πολλαπλής πρόσβασης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ρυθμίσουν την πρόσβαση διάφορων τερματικών στο δορυφόρο (up-link) καθώς και να χαρακτηρίσουν τις μεταδόσεις του δορυφόρου σε αυτά τα τερματικά (downlink). Το μειονέκτημα της TDMA είναι η ανάγκη να καθορίσει το μέγεθος των επίγειων σταθμών για τη χωρητικότητα όλου του συστήματος (εύρος ζώνης αναμεταδότη), ακόμα και αν ένα μόνο τερματικό χρησιμοποιεί ένα μικρό μέρος από αυτή. Μια ενδιαφέρουσα λύση δίνεται από τον υβριδικό συνδυασμό πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης χρόνου πολλαπλών συχνοτήτων (Multi Frequency-Time Division Multiple Access, MF-TDMA), η οποία συνδυάζει τα πλεονεκτήματα και του FDMA και του TDMA. Στο MF-TDMA το φάσμα του αναμεταδότη χωρίζεται σε διάφορα φέροντα σήματα, επιτρέποντας έτσι να ληφθούν υπόψη οι αιτήσεις του σταθμού σε ένα πιο περιορισμένο εύρος ζώνης. Κάθε φέρον υποδιαιρείται με τη μέθοδο TDMA. Η μετάδοση της κίνησης γίνεται σε χρονοθυρίδες που μπορεί να ανήκουν σε διαφορετικά φέροντα. Όταν χρησιμοποιείται ένας μόνο ενισχυτής, το ίδιο τερματικό δεν μπορεί να μεταδίδει σε χρονοθυρίδες διαφορετικών φερόντων την ίδια χρονική στιγμή διότι δημιουργούνται προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης.

Η μέθοδος πολλαπλής πρόσβασης MF-TDMA είναι μια υβριδική τεχνική που υιοθετήθηκε επίσης από την άνω ζεύξη (up-link) του προτύπου DVB-RCS (Digital Video Broadcasting - Return Channel via Satellite). Παρέχει τη δυνατότητα αποτελεσματικής ροής της κίνησης, διατηρώντας παράλληλα ευελιξία στην κατανομή της χωρητικότητας. Η πρόσβαση στη δορυφορική άνω ζεύξη χαρακτηρίζεται από ένα μεγάλο αριθμό συνδέσεων που μοιράζονται περιορισμένο αριθμό πόρων. Υβριδικοί συνδυασμοί FDMA / TDMA και CDMA / CDMA είναι επίσης δυνατοί. [8]

3.3 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ

Το βασικό πρόβλημα είναι πώς θα επιτραπεί σε μια ομάδα επίγειων σταθμών να μοιραστεί τους δορυφορικούς πόρους με τρόπο που να βελτιστοποιεί τη δορυφορική χωρητικότητα, την ποιότητα υπηρεσιών για την κίνηση πολυμέσων, τη χρησιμοποίηση του ραδιοφάσματος, το κόστος, δορυφορική ισχύ, την αποδοχή του χρήστη, τη διασύνδεση και την ευελιξία. Τα πρωτόκολλα του στρώματος MAC ελέγχουν τις μεταδόσεις άνω ζεύξης αναφορικά με το συντονισμό των επίγειων σταθμών κατά την πρόσβαση και την κατανομή των δορυφορικών πόρων. Διάφορα MAC συστήματα έχουν προταθεί για δορυφορικά συστήματα. Μια ταξινόμηση των MAC πρωτοκόλλων περιγράφεται παρακάτω:

- πρωτόκολλα σταθερής πρόσβασης (fixed access protocols) τα οποία επιτρέπουν μετάδοση μόνο σε ένα τερματικό κάθε φορά, ώστε να αποφεύγονται οι συγκρούσεις μηνυμάτων στο κοινό μέσο. Τα δικαιώματα πρόσβασης είναι ορισμένα στατικά για τους σταθμούς.
- πρωτόκολλα βασιζόμενα στον ανταγωνισμό (contention-based protocols), τα οποία δίνουν δικαίωμα μετάδοσης σε διάφορους τερματικούς σταθμούς ταυτόχρονα. Οι πολιτικές αυτές που δύο ή περισσότερα τερματικά μπορούν να μεταδίδουν συγχρόνως ίσως προκαλέσουν σύγκρουση των μηνυμάτων τους στο κοινό μέσο.
- πρωτόκολλα δυναμικής εκχώρησης (Demand-assignment protocols), που παρέχουν πρόσβαση στο δίκτυο με βάση τις αιτήσεις που υποβάλλονται από τους σταθμούς.

Ο λόγος ύπαρξης πολλών κατηγοριών MAC πρωτοκόλλων είναι ότι κάποια από τα πρωτόκολλα αυτά μπορεί να είναι κατάλληλα για ορισμένες εφαρμογές (και αντίστοιχα είδη κίνησης), αλλά να μη πληρούν τις απαιτήσεις για ποιότητα υπηρεσιών QoS άλλων εφαρμογών. Για παράδειγμα, τα πρωτόκολλα σταθερής πρόσβασης δεν είναι αποτελεσματικά για εκρηκτική (bursty) κίνηση, επειδή δεν μπορούν να προσαρμοστούν στις μεταβαλλόμενες συνθήκες της κίνησης αυτής.

3.3.1 ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ (ΕΠΠΕΔΟ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ)

Σύμφωνα με τα πρωτόκολλα σταθερής πρόσβασης, οι πόροι του συστήματος (δηλαδή ζώνες συχνοτήτων σε FDMA, χρονοθυρίδες σε TDMA και κωδικοί σε CDMA) εκχωρούνται σταθερά στους τερματικούς σταθμούς. Για παράδειγμα, σε ένα σύστημα TDMA, μια συγκεκριμένη θυρίδα (ή μια ομάδα θυρίδων), ανατίθεται περιοδικά ανά πλαίσιο στους σταθμούς. Επιπλέον, σε ένα σύστημα FDMA μια ζώνη συχνοτήτων μπορεί να ανατεθεί σταθερά σε ένα χρήστη με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

— Ένα φέρον ανά σύνδεση (Single Carrier Per Link, SCPL) : Σε κάθε σταθμό ανατίθεται ένα φέρον για κάθε σύνδεση. Στην περίπτωση της πλήρους αμφίδρομης σύνδεσης N σταθμών, ο αριθμός των φερόντων είναι $N_c = N(N - 1)$.

— Ένα φέρον ανά σταθμό (Single Carrier Per Station, SCPS): Σε κάθε σταθμός ανατίθεται ένα φέρον για όλες τις συνδέσεις του. Στην περίπτωση αυτή, ο αριθμός των φερόντων N_c μειώνεται στο N .

— Ένα φέρον ανά κανάλι (Single Carrier Per Channel, SCPC): Σε κάθε σταθμό ανατίθεται ένα φέρον ανά κανάλι. Το σύστημα αυτό επιτρέπει την ευέλικτη χρήση των πόρων της συχνοτήτας.

3.3.2 ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΑ ΣΤΟΝ ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΜΟ ΓΙΑ ΚΙΝΗΣΗ ΠΑΚΕΤΩΝ ΔΕΛΟΜΕΝΩΝ

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει τα πρωτόκολλα pure-Aloha και slotted-Aloha, που είναι κλασικά πρωτόκολλα για δορυφορικά συστήματα. Στα συστήματα Aloha, οι επίγειοι σταθμοί δεν είναι συντονισμένοι όσον αφορά τη μετάδοση των δεδομένων. Μόλις είναι διαθέσιμα νέα δεδομένα, μεταδίδονται τα πακέτα. Εάν συμβεί σύγκρουση πακέτων, τότε κάθε τερματικό επανεκπέμπει το πακέτο έπειτα από κάποια τυχαία επιλεγμένο χρονικό διάστημα. Στο πρωτόκολλο Slotted-Aloha εισάγεται συγχρονισμός, έτσι ώστε τα πακέτα μπορούν να μεταδοθούν μόνο στην αρχή των χρονοθυρίδων, καθώς η διάρκεια εκπομπής ενός πακέτου ισούται με το μέγεθος της χρονοθυρίδας. Τα πρωτόκολλα τυχαίας προσπέλασης είναι πολύ απλά

στην εφαρμογή, αλλά δεν εξασφαλίζουν ικανοποιητική αξιοποίηση των δορυφορικών πόρων (οι κλασικές τιμές αξιοποίησης είναι 18% με Aloha 36% με Slotted-Aloha). Για το λόγο αυτό έχουν προταθεί νέα πρωτόκολλα πρόσβασης για την αποτελεσματική υποστήριξη της κίνησης πολυμέσων με διαφοροποιημένες απαιτήσεις QoS. Ειδικότερα, πρόσφατες μελέτες έχουν διεξαχθεί από το συνδυασμό συστημάτων τυχαίας προσπέλασης και εκτεταμένου φάσματος (CDMA-like).

3.3.2.1 PRMA ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ

Πολλαπλή πρόσβαση με κράτηση πακέτων (Packet Reservation Multiple Access, PRMA). Το PRMA είναι ένα πρωτόκολλο MAC που συνδυάζει τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου Slotted-Aloha τυχαίας προσπέλασης με δέσμευση χρονοθυρίδας και της τεχνικής TDMA. Το πρωτόκολλο PRMA προτάθηκε αρχικά για τα επίγεια κυψελοειδή συστήματα, αλλά αποδείχθηκε αποτελεσματικό για μεταδόσεις πολυμέσων στην περίπτωση LEO ή MEO δορυφορικών συστημάτων. Το PRMA μπορεί να θεωρηθεί ως ένα δυναμικό TDMA (Dynamic-Time Division Multiple Access, D-TDMA) πρωτόκολλο όπου οι χρονοθυρίδες κατανέμονται δυναμικά στους χρήστες για μεταδόσεις άνω ζεύξης ανάλογα με τη ζήτηση. Το PRMA απευθύνεται κυρίως σε κινητά δίκτυα που αποτελούνται από ένα δορυφόρο και μια σειρά από κινητούς σταθμούς που ανταλλάσσουν κίνηση φωνής και δεδομένων. Είναι ένα κατανεμημένο πρωτόκολλο με επεξεργασία στο δορυφόρο (on-board processing, OBP).

Με το πρωτόκολλο PRMA, κάθε πλαίσιο TDMA αποτελείται από κατειλημμένες και διαθέσιμες χρονοθυρίδες. Κάθε φέρον στο σύστημα PRMA διαιρείται σε χρονοθυρίδες που αποτελούν ένα πλαίσιο (frame). Κάθε πακέτο που αποστέλλεται από τους τερματικούς σταθμούς έχει μια επικεφαλίδα για το συγχρονισμό των δεδομένων, καθώς και τον εντοπισμό του τερματικού αναχώρησης και του τερματικού προορισμού. Η πληροφορία αυτή είναι σημαντική, διότι ο δορυφόρος μπορεί αμέσως να αναγνωρίσει το σταθμό-αποστολέα του πακέτου. Για την αποτελεσματική χρήση του PRMA πρωτοκόλλου, το μήκος του πλαισίου TDMA πρέπει να είναι μεγαλύτερο από την καθυστέρηση διάδοσης (propagation delay) στο δίκτυο. Επιπλέον, η διάρκεια ζωής του πακέτου (packet lifetime) -δηλαδή ο χρόνος που αυτό είναι έγκυρο-(στην περίπτωση της κίνησης σε πραγματικό

χρόνο) πρέπει να είναι μεγαλύτερη από καθυστέρηση διάδοσης από άκρο σ' άκρο (Round Trip Time, RTT). Η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο αναφέρεται στην καθυστέρηση κατά τη διάδοση του πακέτου από τον επίγειο τερματικό σταθμό προς το δορυφόρο και στη συνέχεια πίσω στον τερματικό.

Μόλις ο τερματικός σταθμός χρειάζεται να μεταδώσει τα πακέτα του, επιχειρεί να το κάνει στην πρώτη διαθέσιμη χρονοθυρίδα με κάποια δεδομένη πιθανότητα. Αν δύο ή περισσότερα τερματικά συγκρούονται κατά την προσπάθεια πρόσβασης στην ίδια χρονοθυρίδα, δε γίνεται αποστολή των δεδομένων στη χρονοθυρίδα και τα τερματικά που συμμετέχουν κάνουν τυχαία τις επόμενες απόπειρες μετάδοσης. Εάν η προσπάθεια μετάδοσης ενός τερματικού σε μια χρονοθυρίδα δεν συνοδεύεται από σύγκρουση, το τερματικό αποκτά την αποκλειστική χρήση της χρονοθυρίδας στα επόμενα πλαίσια.

Εάν σε μια χρονοθυρίδα γίνει μόνο μία προσπάθεια μετάδοσης πακέτου (αν και η σχετική επικεφαλίδα πακέτου έχει ληφθεί σωστά), ο δορυφόρος θα είναι σε θέση να δεσμεύσει τη συγκεκριμένη χρονοθυρίδα για τον τερματικό σταθμό και να μεταδώσει την πληροφορία αυτή στο επόμενο πλαίσιο. Αν παρουσιαστούν πολλές μεταδόσεις στην ίδια χρονοθυρίδα, τα πακέτα που λαμβάνονται ταυτόχρονα συγκρούονται. Οι κινητοί σταθμοί όμως, αναγνωρίζουν ότι οι προσπάθειές τους ήταν ανεπιτυχείς και άρα χρειάζεται να ξαναπροσπαθήσουν έπειτα από RTT, δηλαδή έπειτα από χρόνο μετάβασης με επιστροφή. Ως εκ τούτου, η παρουσία των συγκρούσεων αυξάνει την καθυστέρηση πρόσβασης, μια κρίσιμη παράμετρο για τη διαχείριση κίνησης σε πραγματικό χρόνο με αυστηρούς χρονικούς περιορισμούς. Αν η προθεσμία μεταφοράς του πακέτου υπερβληθεί, το πακέτο απορρίπτεται. Από τη στιγμή που το φαινόμενο αυτό μπορεί να παρουσιαστεί κατά την έναρξη της φάσης πρόσβασης, λέγεται front-end αποκοπή. Ένας χρήστης μπορεί να δεσμεύσει περισσότερες από μια χρονοθυρίδες, αν χρειαστεί και εφόσον υπάρχουν διαθέσιμες.

Στην περίπτωση όμως που συμβαίνουν επαναλαμβανόμενες συγκρούσεις πακέτων το πρωτόκολλο πρόσβασης μπορεί να γίνει ασταθές, καθώς αυξάνεται η τιμή της μέσης καθυστέρησης πρόσβασης, από τη στιγμή που ο σταθμός προσπαθεί να επαναμεταδώσει το πακέτο έπειτα από πολλαπλά RTTs. Προτάθηκε, λοιπόν, ένα τροποποιημένο PRMA πρωτόκολλο σύμφωνα με το οποίο ο σταθμός επιτρέπεται να επιχειρεί μεταδόσεις πακέτων (σύμφωνα με κάποια πιθανότητα όπως και στο απλό PRMA), ενώ περιμένει το αποτέλεσμα της προηγούμενης προσπάθειας. Εάν η

προηγούμενη προσπάθεια είναι αποτυχημένη, η τροποποίηση αυτή του επιτρέπει γρηγορότερη πρόσβαση. Σε αντίθετη περίπτωση, οι περαιτέρω προσπάθειες είναι ανώφελες και ίσως παρεμποδίζουν την πρόσβαση σε άλλα τερματικά. Για το λόγο αυτό ονομάζεται PRMA με παρεμπόδιση καταστάσεων (PRMA with Hindering States, PRMA-HS). [8], [9]

3.3.3 ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΕΚΧΩΡΗΣΗΣ (DRAMA, FODA/IBEA)

Η τεχνολογία της πολλαπλής προσπέλασης εκχώρησης ανάλογα με τη ζήτηση (Demand Assignment Multiple Access, DAMA) επιτρέπει τη δυναμική διανομή και ανακατανομή της δορυφορικής ισχύος και του εύρους ζώνης, με βάση τις ανάγκες επικοινωνίας των χρηστών του δικτύου. Τα πλεονεκτήματά της είναι τα εξής:

- Οικονομική χρησιμοποίηση των πόρων μετάδοσης.
Οι συνδέσεις που δε χρησιμοποιούνται, δεν καταναλώνουν πόρους του δορυφόρου. Η δεσμευμένη χωρητικότητα στο δορυφόρο είναι, επομένως, συνάρτηση του συνολικού όγκου της κίνησης στο δίκτυο.
- Οικονομία στο μέγεθος των σταθμών.
Αυτό ισχύει ιδιαίτερα στην περίπτωση των δικτύων που χρησιμοποιούν SCPC πρόσβαση, όπου το κάθε κανάλι αντιστοιχεί σε ένα ξεχωριστό modem του επίγειων σταθμών. Με την τεχνολογία DAMA είναι δυνατόν να δίνεται ο εξοπλισμός ενός SCPC καναλιού σε ένα κύκλωμα, μόνο όταν η σύνδεση είναι εγκατεστημένη. Εάν τα κυκλώματα που πρόκειται να συνδεθούν δεν είναι πολύ απασχολημένα, υπάρχει πραγματική εξοικονόμηση στον αριθμό των SCPC καναλιών που απαιτούνται από κάποιον σταθμό.
- Βελτίωση της σύνδεσης με το δίκτυο
Με τη DAMA λειτουργία επιτρέπεται να δημιουργούνται απευθείας συνδέσεις μεταξύ όλων των σταθμών.

Επίπεδο κυκλώματος: Για εφαρμογές όπου είναι αναγκαία σύνδεση υψηλής ταχύτητας -αλλά όχι μόνιμη-, ενδεχομένως είναι προτιμότερο να εφαρμόζεται τεχνολογία DAMA παρά ένα πλήρες SCPS. Για παράδειγμα, εάν ένα δορυφορικό δίκτυο έχει πολλαπλά sites με απαιτήσεις για υπηρεσίες φωνής και

δεδομένων, αλλά δεν χρειάζεται 24 ώρες την ημέρα όλα τα sites να είναι σε επικοινωνία μεταξύ τους, όλοι οι σταθμοί μπορούν να μοιράζονται λιγότερη δορυφορική ισχύ και εύρος ζώνης. Η λύση αυτή επιτρέπει την αποτελεσματική χρήση των δορυφορικών πόρων.

Με την ανταλλαγή πακέτων σηματοδοσίας, η διαδικασία έναρξης της κλήσης προϋποθέτει διαπραγμάτευση μεταξύ των επίγειων σταθμών και του σταθμού ελέγχου (master station) ο οποίος ελέγχει το δορυφορικό δίκτυο και διενεργεί την κατανομή των πόρων του δικτύου. Μόλις εγκαθίσταται η σύνδεση, ένα τμήμα του εύρους ζώνης του δορυφόρου διατίθεται για τη νέα σύνδεση. Επιπλέον, πρέπει να χρησιμοποιηθούν κατάλληλα κανάλια σηματοδοσίας για την αποστολή των αιτήσεων ώστε να ρυθμιστεί η κατανομή των πόρων του δικτύου.

Επίπεδο πακέτου: Έχουν προταθεί πολλά νέα πρωτόκολλα σε επίπεδο πακέτου τα σημαντικότερα από τα οποία είναι το σχήμα πολλαπλής πρόσβασης με δυναμική εκχώρηση των πόρων (Dynamic Resource Assignment Multiple Access, DRAMA) και το σχήμα FODA/IBEA (Fifo Ordered Demand Assignment/Information Bit Energy Adaptive) .

Το σύστημα DRAMA βασίζεται σε ένα πλαίσιο TDMA και περιλαμβάνει χρονοθυρίδες πρόσβασης (access slots) και χρονοθυρίδες πληροφορίας (information slots). Οι χρονοθυρίδες πρόσβασης υποδιαιρούνται σε μικρότερες χρονοθυρίδες (mini-slots). Ο σταθμός στέλνει έναν σύντομο καταιγισμό πρόσβασης (με τυχαίο τρόπο) σε μια mini-slot για να κάνει αίτηση για πόρους. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιήσει και κάποια πιθανότητα επιμονής (persistence probability) για να ελέγχει την πρόσβαση σε mini-slots που εμφανίζουν ανταγωνισμό. Ανάλογα με την πιθανότητα να είναι η αίτησή του επιτυχής, ο σταθμός μπορεί να αποφασίσει εάν μπορεί να επιχειρήσει να κάνει αίτηση σε ένα πλαίσιο (frame) ή αν πρέπει να αναβάλλει την προσπάθειά του για το επόμενο πλαίσιο.

Όταν ο σταθμός θέλει να μεταβιβάσει δεδομένα στο δορυφόρο, περιμένει το επόμενο πλαίσιο και μεταδίδει έναν καταιγισμό πρόσβασης, επιλέγοντας τυχαία ένα mini-slot κατά την έναρξη του πλαισίου (εάν χρησιμοποιείται κάποιο σύστημα με πιθανότητες, η προσπάθεια μετάδοσης επιτρέπεται μόνο αν πληρείται ο πιθανοτικός έλεγχος να είναι η προσπάθεια επιτυχής, διαφορετικά αναβάλλεται για επόμενο πλαίσιο). Δεδομένου ότι ο αριθμός των mini-slots σε κάθε φάση της πρόσβασης είναι ικανοποιητικά μεγαλύτερος από τον αριθμό των σταθμών, αυτή η μέθοδος

πρόσβασης είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική, καθώς η πιθανότητα σύγκρουσης των αιτήσεων για ένα mini-slot είναι αρκετά μικρή.

Σύμφωνα με το πρωτόκολλο DRAMA οι αιτήσεις, που προέρχονται από τους σταθμούς, βρίσκονται σε ουρά αναμονής στο δορυφόρο και εξυπηρετούνται σύμφωνα με την κατάλληλη πολιτική διαχείρισης. Η οργάνωση της μετάδοσης μεταβάλλεται δυναμικά σε κάθε πλαίσιο. Οι σταθμοί ενημερώνονται για τις εκχωρήσεις των χρονοθυρίδων μέσω ενός καναλιού ανάδρασης (feedback channel), το οποίο εισάγεται στην αρχή του πλαισίου. Εάν ο δορυφόρος δε λάβει σωστά τις αιτήσεις λόγω συγκρούσεων, δεν υπάρχει ανάδραση και ο σταθμός πρέπει να κάνει αίτηση στο επόμενο πλαίσιο.

Οι χρονοθυρίδες πληροφορίας του DRAMA TDMA πλαισίου είναι χωρισμένες σε δύο τμήματα: χρονοθυρίδες για μεταδόσεις άνω ζεύξης (όπως και προηγουμένως), και χρονοθυρίδες για μεταδόσεις κάτω ζεύξης. Όπως στην περίπτωση της άνω ζεύξης, έτσι και για τη μετάδοση της κάτω ζεύξης, ο δορυφόρος αποφασίζει την κατανομή των πόρων στις διάφορες ροές κίνησης, σύμφωνα με κάποια πολιτική διαχείρισης των ουρών αναμονής.

Η επίδοση του DRAMA πρωτοκόλλου μειώνεται όταν υπάρχουν πηγές κίνησης πραγματικού χρόνου, επειδή αυξάνεται η διάρκεια του πλαισίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι τερματικοί σταθμοί έχουν (το πολύ) μια ευκαιρία πρόσβασης ανά πλαίσιο. Εάν το πλαίσιο είναι πάρα πολύ μεγάλο, μετά από μια σύγκρουση, η νέα προσπάθεια μετάδοσης μπορεί να γίνει μόνο μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα ανάλογο του μεγέθους του πλαισίου. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο τα συστήματα DRAMA δεν είναι κατάλληλα για την υποστήριξη ροών κίνησης πραγματικού χρόνου σε συστήματα GEO και MEO. [8], [9]

Το FODA / IBEA σύστημα σχεδιάστηκε για να ικανοποιεί τις παρακάτω απαιτήσεις:

1. ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και μη πραγματικό χρόνο
2. διατήρηση της ποιότητας υπηρεσιών κοντά στις απαιτήσεις των χρηστών
3. βελτιστοποίηση του διαύλου σε όλες τις καιρικές συνθήκες
4. οικονομικά αποτελεσματική ευρωστία.

Το FODA/IBEA (FIFO Ordered Demand Assignment/Information Bit Energy Adaptive) είναι ένα πρωτόκολλο πολλαπλής προσπέλασης διαίρεσης χρόνου

κεντρικού ελέγχου. Το πρώτο μέρος της ονομασίας του δηλώνει ότι πραγματοποιεί κατανομή των πόρων ανάλογα με τη ζήτηση, ενώ το δεύτερο μέρος αναφέρεται στη διαδικασία αντιμετώπισης της εξασθένησης λόγω βροχής δηλαδή στη δυνατότητα αύξησης της ενέργειας ανά ψηφίο πληροφορίας για την ικανοποίηση της απαιτούμενης ποιότητας υπηρεσίας κάτω από δυσμενείς συνθήκες εκπομπής και λήψης.

Η ενέργεια ανά ψηφίο πληροφορίας αλλάζει μεταβάλλοντας την ισχύ άνω ζεύξης, όπου είναι εφικτό, ή μεταβάλλοντας σταδιακά αρχικά το ρυθμό κωδικοποίησης και, στη συνέχεια, το ρυθμό μετάδοσης των καταγισμών. Στο σύστημα FODA / IBEA ο σταθμός ελέγχου (master station) είναι υπεύθυνος για το συγχρονισμό και για την κατανομή της χωρητικότητας ανάλογα με τη ζήτηση των σταθμών. Οι ενέργειες αυτές πραγματοποιούνται με την αποστολή καταγισμού αναφοράς, η οποία περιλαμβάνει το πλάνο μετάδοσης καταγισμών (Burst Time Plan), κατά την έναρξη κάθε πλαισίου, το οποίο έχει διάρκεια 20ms. Για κάθε σταθμό που κάνει αίτηση για μετάδοση εκχωρείται το πολύ ένα παράθυρο ανά πλαίσιο, ώστε μόνο μία κεφαλή σήματος να απαιτείται για κάθε σταθμό που μεταδίδει.

Σε κάθε χρονικό πλαίσιο, ένας μικρός αριθμός χρονοθυρίδων ελέγχου (control slots) εκχωρείται από τον κύριο σταθμό, με βάση έναν αλγόριθμο χρονοδρομολόγησης κυκλικής επαναφοράς (round-robin), σε όλους τους ενεργούς σταθμούς που δεν έλαβαν καμία εκχώρηση στο συγκεκριμένο πλαίσιο. Οι χρονοθυρίδες ελέγχου είναι παράθυρα μετάδοσης με σταθερό μέγεθος που μεταφέρουν σύντομα δεδομένα, όπως ενημερώσεις αιτήσεων ή άλλα μηνύματα ελέγχου και ο αριθμός τους αυξάνεται σύμφωνα με τον αριθμό των σταθμών, για παράδειγμα προβλέπεται μια χρονοθυρίδα ελέγχου για κάθε ομάδα οκτώ σταθμών. Η θέση τους στο πλαίσιο δεν είναι σταθερή. Αν όλοι οι σταθμοί έχουν λάβει εκχώρηση για αποστολή δεδομένων στο συγκεκριμένο πλαίσιο, το τμήμα που έχει προεκχωρηθεί στις σχισμές ελέγχου προστίθεται στο αχρησιμοποίητο τμήμα του πλαισίου. Σε κάθε νέο σταθμό δίδεται η ευκαιρία να εισέλθει στο δορυφορικό δίκτυο χρησιμοποιώντας τη χρονοθυρίδα πρώτης εισόδου (First Access Slot, FAS). Αυτή η χρονοθυρίδα ελέγχου έχει μια καθορισμένη θέση πριν από το τέλος του πλαισίου και η συχνότητά της είναι κάθε 32 πλαίσια.

Κάθε σταθμός διαχειρίζεται δεδομένα συνεχούς ροής καθώς και πακέτα δεδομένων -datagrams, σύμφωνα με τον τύπο της κίνησης (πραγματικού ή μη χρόνου). Η εκχώρηση συνεχούς ροής δεδομένων, αφού η αίτηση γίνει αποδεκτή από τον κύριο σταθμό, διατηρείται, μέχρι να απελευθερωθεί οικειοθελώς από το χρήστη ή μέχρι ο αιτών σταθμός να κηρυχθεί ανενεργός. Κάτι τέτοιο δε συμβαίνει για εκχωρήσεις κίνησης πακέτων δεδομένων. Δεδομένου ότι το εύρος ζώνης που ανατίθεται σε κάθε σταθμό περιλαμβάνει ποσοστό συνεχούς κίνησης δεδομένων και κίνησης πακέτων δεδομένων, η συνολική κατανομή κυμαίνεται γενικά από το ένα πλαίσιο στο άλλο, λόγω της χρονικής διακύμανσης των πακέτων δεδομένων.

Η αίτηση r για κίνηση πακέτων δεδομένων που αποστέλλεται από έναν σταθμό είναι ανάλογη της κίνησης πακέτων δεδομένων που φτάνει στο σταθμό και του όγκου πληροφορίας που ήδη περιμένει στον δορυφόρο να εκπεμφθεί και συνιστά το απόθεμα του σταθμού (backlog), δηλαδή:

$$r = \text{backlog} + h \text{ traffic} \quad , \quad \text{όπου } h \text{ είναι μια σταθερά αναλογίας}$$

Οι σταθμοί κάνουν τις αιτήσεις τους για πακέτα δεδομένων (datagrams) όσο το δυνατόν συχνότερα, προκειμένου να παρέχουν στον κύριο σταθμό ενημερωμένες πληροφορίες για την εισερχόμενη κίνηση. Ο κύριος σταθμός οργανώνει το σύνολο των αιτήσεων που ελήφθησαν σε μια κυκλική ουρά (ring), την οποία σαρώνει κυκλικά για να υπολογίσει τις εκχωρήσεις. Το μέγεθος της εκχώρησης της κίνησης μη πραγματικού χρόνου a είναι ανάλογο με την αίτηση r και κυμαίνεται σε μια περιοχή τιμών μεταξύ ενός ελάχιστου (T_{\min}) και ενός μέγιστου (T_{\max}) κατώφλιου. Συγκεκριμένα:

$$T_{\min} \leq a = f_r \leq T_{\max} \quad , \quad \text{όπου } f \text{ είναι ο συντελεστής αναλογίας}$$

Το ελάχιστο κατώφλι T_{\min} εισάγεται για λόγους αποδοτικότητας ώστε να αποφευχθούν πολύ μικρές διανομές όταν οι πρόσθετες πληροφορίες εκπομπής είναι πολύ περισσότερες σε σχέση με τα δεδομένα πληροφορίας. Το μέγιστο κατώφλι T_{\max} εισάγεται με σκοπό να αποτρέψει έναν υπερφορτωμένο σταθμό από το να καταλάβει ένα πολύ μεγάλο μέρος της χωρητικότητας εις βάρος των άλλων σταθμών. Μετά από κάθε εκχώρηση κίνησης πακέτων δεδομένων, η αντίστοιχη αίτηση του σταθμού μειώνεται σε μέγεθος ίσο με την εκχώρηση και, στη συνέχεια, αναλύεται η επόμενη αίτηση, αν υπάρχει ακόμα διαθέσιμος χώρος μέσα στο πλαίσιο. Η κυκλική ουρά δεν σαρώνεται πάνω από μία φορά σε κάθε πλαίσιο. Ως

κύκλος εκχώρησης (assignment cycle) ορίζεται μία πλήρης σάρωση του δαχτυλιδιού ή εναλλακτικά ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών εκχωρήσεων στον ίδιο σταθμό. Συνεπώς, δεν γίνεται πάνω από ένας κύκλος εκχώρησης σε κάθε πλαίσιο. [6], [8]

3.4 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΘΕΣΗ ΕΥΡΟΥΣ ΖΩΝΗΣ

Κάποια από τα χαρακτηριστικά πλεονεκτήματα των δορυφορικών δικτύων, όπως η ευρεία κάλυψη και η ευελιξία διάρθρωσης (configuration flexibility), τα καθιστούν ιδανικά για την παροχή υπηρεσιών πολυμέσων σε παγκόσμιο επίπεδο. Επειδή το δορυφορικό εύρος ζώνης έχει μεγάλη ζήτηση, η μη αποδοτική χρησιμοποίησή του μπορεί να αναιρέσει τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα. Συνεπώς ένα πλάνο καταμερισμού, που είναι ικανό να κατανέμει δυναμικά το εύρος ζώνης στα διάφορα δορυφορικά τερματικά ενώ ταυτόχρονα να ικανοποιεί τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσιών (QoS), έχει ύψιστη σημασία. Τα δορυφορικά συστήματα χρειάζεται να αντιμετωπίσουν μεταβλητό φορτίο κίνησης, μεταβλητές συνθήκες διαύλου και μεγάλες διασπορές καθυστερήσεων. Η μεταβλητότητα στις συνθήκες λειτουργίας οφείλεται στα φορτία κίνησης και στην εξασθένιση του σήματος, που προκαλείται από άσχημες ατμοσφαιρικές συνθήκες οι οποίες επηρεάζουν ιδιαίτερα τις μεταδόσεις στη ζώνη Ka (30/20 GHz).

Η αποδοτική χρησιμοποίηση του εύρους ζώνης και η παροχή ποιότητας υπηρεσιών είναι δυο ανταγωνιστικοί στόχοι που πρέπει να επιτύχουν τα δορυφορικά δίκτυα. Το σχέδιο δυναμικής ανάθεσης εύρους ζώνης (Dynamic Bandwidth Allocation, DBA) ψάχνει ένα ισοζύγιο (trade-off) ανάμεσα στην παροχή ποιότητας υπηρεσιών και στην εξοικονόμηση εύρους ζώνης. Θεωρείται σημαντικό να υπάρχει μια τεχνική, που αξιολογεί έμμεσα την απαίτηση για εύρος ζώνης σε κάθε δορυφορικό τερματικό. Με τον τρόπο αυτό διαχειρίζεται τη ροή κυκλοφορίας στο κατανεμημένο εύρος ζώνης, για να αντιμετωπίσει την πλειοψηφία της IP κίνησης – η οποία είναι εγγενώς εκρηκτική. Συνεπώς παρουσιάζεται μια σειρά από λύσεις για τα προβλήματα που συνδέονται στενά με την ανάθεση του δορυφορικού εύρους ζώνης σε διαφορετικούς χρήστες (επίγειους σταθμούς) και για διαφορετικά είδη κυκλοφορίας,

Η συνδυασμένη δράση μεταξύ των διαφόρων στρωμάτων του δικτύου (από το φυσικό στρώμα μέχρι το στρώμα εφαρμογών) μπορεί να είναι ένας καλός τρόπος

για την καταπολέμηση της μεταβλητότητας του καναλιού. Ωστόσο, η διαδικασία αυτή είναι περίπλοκη και δύσκολο να επιτευχθεί στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό, διότι απαιτούνται πολλές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των στρωμάτων για σκοπούς ελέγχου καθώς και για την ανταλλαγή πληροφοριών σηματοδότησης.

Προκειμένου να υπάρξουν βελτιστοποιημένες πολιτικές για την κατανομή του δορυφορικού εύρους ζώνης, θα μπορούσαν να συντονιστούν οι ενέργειες που γίνονται σε ένα δορυφορικό δίκτυο στο φυσικό στρώμα, physical layer (όπου εφαρμόζεται η τεχνική αντιμετώπισης των διαλείψεων), με τις λειτουργίες που εκτελούνται στο στρώμα σύνδεσης δεδομένων, data link layer (όπου έχει κατανεμηθεί το δορυφορικό εύρος ζώνης), ώστε να επιτυγχάνεται ο βέλτιστος τρόπος διασύνδεσης των διαφόρων στρωμάτων. Η πολυπλοκότητα της διαδικασίας αυτής έγκειται στις ταχέως μεταβαλλόμενες μετρήσεις που γίνονται στο φυσικό στρώμα, όσον αφορά την κατάσταση του καναλιού (σήματος προς θόρυβο SNR), οι οποίες θα μπορούσαν να προκαλέσουν μια ασταθή κατανομή στο στρώμα σύνδεσης δεδομένων. Οι πληροφορίες ανάδρασης (feedback) θα πρέπει να φιλτράρονται με μια σωστή υστέρηση, η οποία θα μπορεί να παράγει μια σταθερή κατανομή του εύρους ζώνης στο στρώμα σύνδεσης δεδομένων.

Όσον αφορά την κατανομή των πόρων, ένα άλλο πρόβλημα είναι η αρχιτεκτονική του δικτύου ελέγχου, η οποία μπορεί να είναι συγκεντρωτική ή κατανεμημένη. Η κατανομή μέσω κεντρικού ελέγχου απαιτεί ένας σταθμός, ο οποίος ονομάζεται και κέντρο ελέγχου του δικτύου (NCC) να παίζει το ρόλο αυτού που ελέγχει (master). Ο κεντρικός αυτός σταθμός συλλέγει όλες τις πληροφορίες σχετικά με τους ελεγχόμενους σταθμούς (slaves) και εκτελεί την καλύτερη επιλογή υπό την έννοια της κατανομής του εύρους ζώνης. Καθώς, όμως, ο αριθμός των επίγειων σταθμών αυξάνεται, το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την επιτυχή εκχώρηση του εύρους ζώνης γίνεται μεγαλύτερο, με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται η διαχείριση του συστήματος και να απαιτείται μεγάλη υπολογιστική προσπάθεια από την πλευρά του κεντρικού σταθμού. Μια τεχνική κατανεμημένης ανάθεσης του εύρους ζώνης λύνει το υπολογιστικό πρόβλημα, αλλά απαιτεί ένα εύρωστο κανάλι ελέγχου και ένα αποτελεσματικό πρωτόκολλο ελέγχου, το οποίο να συμπεριλαμβάνει τη μεγάλη καθυστέρηση στην επικοινωνία. Όλοι οι επίγειοι σταθμοί παρακολουθούν την κατάσταση των διαθέσιμων επικοινωνιακών διαύλων και ενημερώνουν συνεχώς τη βάση δεδομένων τους μέσω μηνυμάτων σηματοδότησης τα οποία ανταλλάσσουν.

Κάτω από αυτό το πρίσμα, το διαθέσιμο εύρος ζώνης μειώνεται σημαντικά από το πρωτόκολλο σηματοδοσίας που χρησιμοποιείται. [8]

3.4.1 ΣΤΑΤΙΚΑ DBA ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Τα συστήματα κατανομής δυναμικού εύρους ζώνης, DBA, μπορούν να διακριθούν σε δυο κατηγορίες: στα στατικά και τα προσαρμοστικά. Στα στατικά συστήματα, όταν στο τερματικό ανατεθεί ένα συγκεκριμένο ποσό χωρητικότητας, η χωρητικότητα αυτή παραμένει σταθερή για όλη τη διάρκεια της σύνδεσης και μπορεί να γίνεται χειρισμός της δυναμικά, χωρίς να παρεμβαίνει το NCC. Η χωρητικότητα δηλαδή, που εκχωρείται, καταμερίζεται σε υψηλής προτεραιότητας (High Priority) και χαμηλής προτεραιότητας (Low Priority) κίνηση.

3.4.2 ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΑ DBA ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Στην περίπτωση των προσαρμοστικών συστημάτων, κάθε δορυφορικό τερματικό πρέπει να στείλει αιτήσεις στο NCC, προκειμένου να διατηρήσει ή να αποδεσμεύσει τη χωρητικότητα του διαύλου, βασιζόμενο στη δυναμική εκτίμηση των απαιτήσεων για εύρος ζώνης. Για να ανταποκριθούν τα συστήματα αυτά στις απαιτήσεις της κίνησης, που είναι εκρηκτική και ευαίσθητη στις καθυστερήσεις, έχουν προταθεί τρεις προσεγγίσεις:

- σταθερή κατανομή, ανάλογη με το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης της πηγής.
- σταθερή κατανομή με ένα συγκεκριμένο ρυθμό μετάδοσης, χρησιμοποιώντας DBA συστήματα σε μέγιστες εκρήξεις (peak bursts) κίνησης.
- τεχνικές πλήρους δυναμικής εκχώρησης εύρους ζώνης (DBA).

Η πρώτη προσέγγιση είναι ανεπαρκής για δορυφορικά συστήματα. Επίσης, ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης της πηγής είναι συνήθως άγνωστος. Όσον αφορά τις πλήρεις DBA τεχνικές, αυτές μπορούν να εκμεταλλευτούν την χωρητικότητα του διαύλου αρκετά αποτελεσματικά, δεδομένου ότι δεν δεσμεύουν χωρητικότητα κατά τη διάρκεια ανενεργών περιόδων. Ωστόσο, το κοινό κανάλι σηματοδοσίας μπορεί να υπερφορτωθεί σε φάσεις λήψης, με αποτέλεσμα την αύξηση των καθυστερήσεων

και της συμφόρησης. Κατά συνέπεια, μια μικτή προσέγγιση φαίνεται να είναι η πιο ευέλικτη επιλογή, όπου σε κάθε τερματικό έχουν ανατεθεί κάποια κανάλια μέτριας χωρητικότητας, ενώ μια σειρά από DBA κανάλια χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια περιόδων αιχμής της κίνησης.

Όσον αφορά τα προσαρμοστικά συστήματα, ένα από τα δύσκολα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπίσουν οι μηχανικοί, είναι η εφαρμογή αυτής της τεχνικής σε ένα δορυφορικό σύστημα GEO. Το κύριο πρόβλημα προκύπτει από τη μεγάλη καθυστέρηση μεταξύ της στιγμής που η αίτηση αποστέλλεται στο NCC και της στιγμής που το δορυφορικό τερματικό ενημερώνεται σχετικά με το εύρος ζώνης που του έχει ανατεθεί. Αυτός ο λανθάνων χρόνος εμποδίζει τη χωρητικότητα να αλλάξει αμέσως. Επειδή ένας μικρής διάρκειας λανθάνων χρόνος έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη απόδοση, ένα δορυφορικό σύστημα GEO αποτελεί την χειρότερη περίπτωση (περίπου 500 ms, όταν το NCC είναι στο έδαφος ή 250 ms όταν η πλειοψηφία της επεξεργασίας εφαρμόζεται επί του δορυφόρου, on board).

Τα προσαρμοστικά συστήματα DBA γενικά κατηγοριοποιούνται είτε ως Αποτρεπτικά (Proactive) είτε ως Αντιδραστικά (Reactive). Τα Reactive συστήματα λαμβάνουν υπόψη το μήκος της τρέχουσας ουράς, την απώλεια πακέτων, και τη μέση καθυστέρηση, ώστε να μπορούν να αντιδρούν σε διακυμάνσεις της κίνησης χωρίς να προσπαθούν να τις προβλέψουν. Σε σύγκριση με τους Proactive αλγόριθμους, οι Reactive είναι πιο εύκολο να εφαρμοστούν και μπορούν να αξιοποιήσουν καλύτερα τη χωρητικότητα του καναλιού. Ωστόσο, οι απαιτήσεις για ποιότητα υπηρεσιών δεν επιτυγχάνονται εύκολα, εφόσον οι αιτήσεις (αυτές που αποστέλλονται στο NCC) που αντιπροσωπεύουν τις τρέχουσες ανάγκες για εύρος ζώνης, δεν ικανοποιούνται πάντα. Αν και τα Reactive συστήματα μπορούν να έχουν καλές επιδόσεις σε LEO δορυφορικά δίκτυα, δεν είναι καλά προσαρμοσμένα στα GEO συστήματα, εξαιτίας της υψηλής διάδοσης της καθυστέρησης.

Τα Proactive συστήματα έχουν ως στόχο να αναλύουν την κίνηση και να προβλέπουν το απαιτούμενο εύρος ζώνης. Συνήθως αυτό γίνεται, παρέχοντας δεδομένα (π.χ. τα μήκη των ουρών, τις ροές εισόδου και εξόδου) μέχρι τη χρονική στιγμή t σε έναν μηχανισμό πρόβλεψης, ο οποίος με τη σειρά του κάνει μια πρόβλεψη στο χρόνο t για τη συνολική κίνηση στο χρονικό διάστημα $[t, t + k)$ (π.χ. την κίνηση εντός του επόμενου υπερπλασιού- superframe, το οποίο είναι το άθροισμα k διαδοχικών πλαισίων), βασιζόμενος κυρίως στις στατιστικές ιδιότητες

της IP κίνησης. Ανάλογα με τον αριθμό των ταυτόχρονων ροών κυκλοφορίας (δηλαδή, συνδέσεις TCP, εφαρμογές που απαιτούν ροές δεδομένων) υιοθετούνται και διαφορετικές τεχνικές πρόβλεψης της κίνησης. Συνεπώς το απαιτούμενο εύρος ζώνης μπορεί να εκτιμηθεί.

Για να γίνουν οι προβλέψεις προσαρμοστικές, ικανές δηλαδή να ακολουθήσουν τις αλλαγές των χαρακτηριστικών της κίνησης στο χρόνο, πρέπει οι παράμετροι του μηχανισμού πρόβλεψης να ενημερώνονται τακτικά. Η απόδοση των συστημάτων αυτών στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στην ακριβή πρόβλεψη τις μελλοντικής κίνησης. Με βάση μια δίκαιη πολιτική κατανομής των πόρων μεταξύ όλων των δορυφορικών τερματικών, το NCC λαμβάνει τις αιτήσεις για εύρος ζώνης κάθε τερματικού και αποφασίζει εάν θα ικανοποιήσει αυτά τα αιτήματα ή όχι. Για να ανταποκριθεί στην επιθυμητή ποιότητα υπηρεσιών, τόσο ο αλγόριθμος των αιτήσεων όσο και η πολιτική της κατανομής των πόρων του NCC είναι υψίστης σημασίας. [8]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Βέλτιστη κατανομή ισχύος σε δορυφορικές κάτω ζεύξεις πολλαπλών δεσμών

4.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Κατά το παρελθόν, οι εμπορικοί δορυφόροι δε μπορούσαν να υποστηρίζουν ενσωματωμένες (on board) πολλαπλές δέσμες. Στα σύγχρονα δορυφορικά δίκτυα, κάθε δορυφόρος χρησιμοποιεί πολλαπλές στενές δέσμες, κάθε μία από τις οποίες καλύπτει ένα «κελί» πάνω στη Γή για να εξυπηρετεί μια συγκεκριμένη περιοχή κάλυψης. Το γεγονός αυτό επιτρέπει στους δορυφόρους να παρέχουν υπηρεσίες σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές. Δυστυχώς όμως, δεν έχουν όλες οι γεωγραφικές περιοχές τις ίδιες απαιτήσεις σε χωρητικότητα. Αυτό οδήγησε σε ένα πολύ ενδιαφέρον ζήτημα, πώς δηλαδή να αυξηθεί ή να μειωθεί προσαρμοστικά, η χωρητικότητα με βάση την αύξηση ή τη μείωση της ζήτησης των χρηστών / υπηρεσιών. Οι δορυφόροι έχουν τη δυνατότητα, αν και συσσωρευτικά, να εξυπηρετούν μεγάλο αριθμό χρηστών. Επίσης είναι σχεδιασμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να καλύψουν τις μελλοντικές απαιτήσεις, δεδομένου ότι αναμένεται να βρίσκονται σε λειτουργία τουλάχιστον για λίγες δεκαετίες. Ωστόσο, πολλές απομακρυσμένες περιοχές δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν αποτελεσματικά τη χωρητικότητα που τους εκχωρείται λόγω του αραιού πληθυσμού τους, ενώ αντίστοιχα υψηλές απαιτήσεις σε χωρητικότητα μπορεί να προέρχονται από κάποιο αστικό κέντρο. Συνεπώς, η ανακατανομή της χωρητικότητας είναι μια πραγματική πρόκληση ώστε να επιτυγχάνεται η αποτελεσματική αξιοποίηση των περιορισμένων πόρων του δορυφορικού δικτύου.

Οι στενές δέσμες χρησιμοποιούνται από τους δορυφόρους γιατί δίνουν τη δυνατότητα να φτάνει μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος στη συγκεκριμένη περιοχή κι έτσι μπορούν να υποστηριχθούν υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης στα τερματικά των χρηστών. Επίσης, η μέθοδος αναχρησιμοποίησης συχνοτήτων στα διαφορετικά κελιά

οδηγεί σε αύξηση του εύρους ζώνης του συστήματος. Καθώς μελετάται η χρήση συχνοτήτων άνω των 20 GHz για την παροχή υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης δεδομένων σε εφαρμογές δικτύων, σε επίδεδο αρχιτεκτονικής ο σχεδιασμός ευέλικτων και στενών δεσμών γίνεται ιδιαίτερα ελκυστικός. Οι παραδοσιακές αρχιτεκτονικές δορυφορικών δικτύων ήταν ακατάλληλες για ασύγχρονη εκρηκτική κίνηση δεδομένων, ιδιαίτερα σε χρονομεταβλητά κανάλια, επειδή χρησιμοποιούσαν υψηλότερες μικροκυματικές φέρουσες συχνότητες που επηρεάζονται από την εξασθένιση λόγω βροχής.

Συνεπώς η αρχιτεκτονική της μετάδοσης της κάτω ζεύξης πρέπει να χρησιμοποιεί αποδοτικά και δίκαια τους πόρους του δικτύου. Αυτό περιλαμβάνει τη δυναμική προσαρμογή της σε ανομοιογενείς και χρονομεταβλητές απαιτήσεις καθώς και σε ατμοσφαιρικές εξασθενίσεις του σήματος. Η αποδοτική διαχείριση των πόρων της κάτω ζεύξης για υπηρεσίες δεδομένων στα δορυφορικά δίκτυα, είναι πολύ σημαντική για την οικονομική ανταγωνιστικότητα του μέσου. Για το λόγο αυτό απαιτείται ένας οικονομικά αποδοτικός σχεδιασμός ευέλικτων δεσμών και πρωτοκόλλων στρώματος MAC, ώστε να γίνει η δορυφορική ευρυζωνική δικτύωση δεδομένων ανταγωνιστική σε σχέση με άλλα μέσα, όπως οι ενσύρματες και οι ασύρματες επικοινωνίες. [10]

4.1.1 ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ DVB-RCS

Το πρότυπο DVB-S (Digital Video Broadcasting - Satellite) πρότυπο βρίσκεται στο επίκεντρο των ευρυζωνικών δορυφορικών επικοινωνιών. Τα πρότυπα υποστηρίζουν την διαχείριση των πόρων με ένα σύνολο πρωτοκόλλων για την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ του κέντρου ελέγχου του δικτύου (Network Control Center, NCC) και των δορυφορικών τερματικών με κανάλι επιστροφής (Return Channel via Satellite Terminals, RCSTs). Η δεύτερη γενιά (DVB-S2) περιλαμβάνει τη μετάδοση της κίνησης πολυμέσων καθώς και διάφορους τύπους σύνδεσης (ευρυεκπομπή (broadcast), μονοεκπομπή (unicast) και επιλεκτική πολυεκπομπή (multicast)). Έχει τη δυνατότητα να παρέχει πολλά είδη υπηρεσιών (π.χ. τηλεοπτικές εκπομπές, τηλεδιάσκεψη, σερφάρισμα στο Internet, εικόνα και ήχο μέσω του IP (Internet Protocol), κ.λπ.) στους τελικούς χρήστες, μέσω RCSTs.

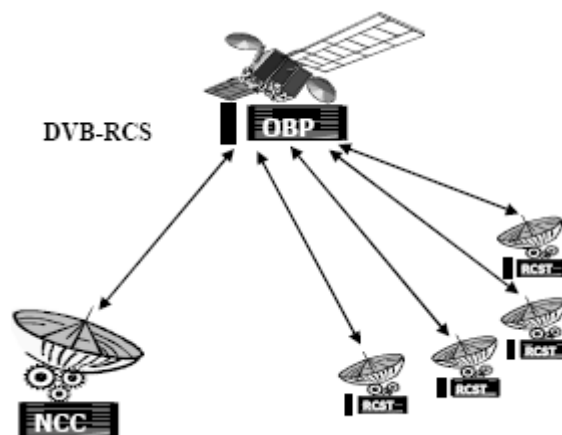
Μια διαδραστική υπηρεσία με πρόσβαση στο internet είναι μια υπηρεσία εκχώρησης πόρων ανάλογα με τη ζήτηση (Bandwidth on Demand, BoD), σύμφωνα

με την οποία οι χρήστες πραγματοποιούν αιτήσεις χωρητικότητας ανάλογα με τις απαιτήσεις της κίνησης. Ένας κεντρικός αλγόριθμος στο NCC εκχωρεί το εύρος ζώνης για να ικανοποιήσει την απαίτηση του κάθε χρήστη. Το πώς θα μεγιστοποιηθεί η χρησιμοποίηση των περιορισμένων πόρων παραμένει μια μεγάλη πρόκληση για τους παρόχους υπηρεσιών μέσω δορυφόρου.

Το σχήμα 4.1 απεικονίζει ένα τυπικό δορυφορικό δίκτυο με το πρότυπο DVB-RCS. Πολλά RCSTs παρέχουν διασύνδεση με τους τελικούς χρήστες. Ο OBP (On-Board Processor) δρομολογεί τα πακέτα από την άνω ζεύξη στην κάτω με ευέλικτο τρόπο. Το NCC εξυπηρετεί την αίτηση για δορυφορική πρόσβαση των RCSTs και διαχειρίζεται την OBP διαμόρφωση.

Οι αιτήσεις που λαμβάνονται από όλους τους τερματικούς σταθμούς εντός μιας δέσμης αποτελούν τη συνολική απαίτηση για κίνηση στην εν λόγω δέσμη. Ο OBP κατανέμει το εύρος ζώνης με την προσαρμογή της ισχύος ανάλογα με τις διαφορετικές απαιτήσεις κίνησης και τα διαφορετικά SLAs (Service Level Agreements) των πολλαπλών δεσμών.

Στο πρότυπο DVB-RCS, τέσσερα είναι τα βασικά είδη αιτημάτων εκχώρησης χωρητικότητας: Εκχώρηση συνεχούς ρυθμού (Continuous Rate Assignment, CRA), Δυναμική Χωρητικότητα με βάση το ρυθμό μετάδοσης (Rate Based Demand Capacity, RBDC), Δυναμική Χωρητικότητα με βάση τον όγκο δεδομένων (Volume based Dynamic Capacity, VBDC) και Εκχώρηση Ελεύθερης Χωρητικότητας (Free Capacity Assignment, FCA). Εδώ εξετάζεται μόνο η συνολική αίτηση χωρητικότητας εντός μιας δέσμης που προέρχεται και από τα τέσσερα είδη κίνησης αντί αυτής ενός συγκεκριμένου είδους κίνησης.



Σχήμα 4.1: Σύστημα DVB-RCS

4.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Έχουν προταθεί διάφορα δορυφορικά συστήματα επικοινωνίας για εφαρμογές πολυμέσων. Ένα από αυτά περιλαμβάνει ένα σύστημα μεταγωγής ενσωματωμένο στο δορυφόρο, το οποίο χρησιμοποιεί μια ειδική δομή πακέτου και μια τεχνική διαχείρισης της άνω και της κάτω δέσμης για τη δρομολόγηση των πακέτων δεδομένων από το σταθμό προέλευσης στο σταθμό προορισμού μέσω του δορυφόρου. Κάθε επίγειο τερματικό επικοινωνεί με το δορυφόρο μέσω ενός φέροντος άνω ζεύξης που χρησιμοποιεί ως μέθοδο πολλαπλής πρόσβασης το σχήμα MF-TDMA. Το εύρος ζώνης του σήματος αυτού διανέμεται ψευδο-στατικά σε έναν ακέραιο αριθμό φερόντων με τουλάχιστον ένα φέρον σε κάθε δέσμη. Τα πακέτα δεδομένων μεταφέρονται από το δορυφόρο σε κάθε επίγειο τερματικό μέσω ενός TDMA καταγισμού (burst), ο οποίος διαφέρει δυναμικά σε μήκος από πλαίσιο σε πλαίσιο, σύμφωνα με τις απαιτήσεις σε κίνηση και εύρος ζώνης κάθε δέσμης. Το προτεινόμενο σύστημα προσαρμόζεται στις απαιτήσεις της κίνησης και αντιμετωπίζει και την εξασθένηση λόγω βρόχης της άνω / κάτω ζεύξης. Κάνοντας μετρήσεις του επιπέδου ισχύος του λαμβανόμενου σήματος, το σύστημα εντοπίζει αν το σήμα έχει υποστεί διάλειψη λόγω βροχής και καθορίζει το επίπεδο αυτής της διάλειψης. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να εφαρμόσει τα ανάλογα αντίμετρα κατά των διαλείψεων (Fade Countermeasures, FCM) στο μεταδιδόμενο σήμα. Ωστόσο με αυτό το σύστημα δε γίνεται συστηματική μοντελοποίηση του προβλήματος και των αντίστοιχων λύσεων. [11]

Μια άλλη πολιτική κατανομής ισχύος προτείνει να σταθεροποιεί το σύστημα, όσο το διάνυσμα του ρυθμού αφίξεων βρίσκεται εντός της χωρητικότητας του διαύλου. Η πολιτική αυτή βασίζεται στο μέγεθος των ανοκλήρωτων εργασιών στην ουρά αναμονής και στην κατάσταση του διαύλου - χωρίς να γνωρίζει το ρυθμό άφιξης των πακέτων κίνησης. Τα πακέτα που προορίζονται για N επίγειους σταθμούς, αποθηκεύονται σε N διαφορετικές ουρές των αντίστοιχων διαύλων. Οι εξυπηρετητές κάθε ουράς αναμονής μπορεί να ενεργοποιηθούν ταυτόχρονα αλλά ο ρυθμός μετάδοσης κάθε εξυπηρετητή εξαρτάται από την εκχωρούμενη σε αυτόν ισχύ και από την τρέχουσα κατάσταση του διαύλου. Όταν οι χρήστες καλύπτονται από πολλούς δορυφόρους, καθένας από τους οποίους έχει πολλές ουρές αναμονής για την κίνηση

της κάτω ζεύξης, η απόφαση δρομολόγησης λαμβάνεται με γνώμονα το μέγιστο συνολικό ρυθμό εξυπηρέτησης (throughput). [12]

Μια διαφορετική προσέγγιση του προβλήματος επιχειρεί να ελαχιστοποιήσει το αναμενόμενο συνολικό μήκος της ουράς αναμονής. Το σύστημα αποτελείται από έναν περιορισμένο αριθμό K εξυπηρετητών στο δορυφόρο, με αποτέλεσμα να μην εξυπηρετούνται ταυτόχρονα όλες οι δέσμες, καθώς κάθε εξυπηρετητής ανατίθεται μόνο σε μια από τις N ουρές αναμονής. Όταν το κανάλι της ουράς είναι ON, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μετάδοση. Κάθε κανάλι έχει μια πανομοιότυπη κατάσταση και μεταφέρει τον ίδιο μέγιστο αριθμό πακέτων. Αποδεικνύεται ότι μια πολιτική εκχώρησης των K εξυπηρετητών στα ON κανάλια που συνδέονται με τις K μεγαλύτερες σε μήκος ουρές, είναι βέλτιστη. Ωστόσο, παραμένει ένα χάσμα που μεταξύ των συγκεκριμένων λύσεων για τις ειδικές περιπτώσεις και της γενικής μεθοδολογίας που χρειάζεται για την πρακτική εφαρμογή του συστήματος. [13]

4.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Στο σύστημα που μελετάται γίνεται μια προσπάθεια εύρεσης αναλυτικών λύσεων για το πρόβλημα βέλτιστης κατανομής των δορυφορικών πόρων, κάτι το οποίο δεν ήταν εφικτό από τις προηγούμενες προσεγγίσεις. Για το λόγο αυτό εξετάζεται η κατανομή της ισχύος και των δεσμών κατά την δορυφορική κάτω ζεύξη, σε σχέση με τη χωρητικότητα Shannon -βασιζόμενοι στην κατανομή της κίνησης και την κατάσταση του διαύλου- ώστε να μεγιστοποιηθεί η απόδοση του συστήματος και να επιτευχθεί ικανοποιητική δικαιοσύνη μεταξύ των χρηστών.

Για να διατυπωθεί το πρόβλημα βελτιστοποίησης της χωρητικότητας των πολλαπλών δεσμών κάτω ζεύξης πρέπει να ληφθούν υπόψη κάποιες παράμετροι. Υπάρχουν δυο είδη διαλείψεων στο δορυφορικό κανάλι υψηλής συχνότητας. Στο πρώτο ανήκει η εξασθένιση λόγω του νερού, με τη μορφή της ομίχλης, της βροχής και του χιονιού και στο δεύτερο η ατμοσφαιρική αναταραχή που οφείλεται στις κινήσεις του αέρα. Το ενδιαφέρον εστιάζεται κυρίως στην εξασθένιση λόγω βροχής, διότι είναι μια αργή διάλειψη (slow fading event) και μπορεί να υποτεθεί ομοιόμορφη εξασθένιση κατά μήκος κάθε δέσμης. Η υπόθεση αυτή δεν είναι ιδανική, αλλά επειδή θεωρούμε στενές δέσμες (το μήκος των οποίων θα είναι 50-100 mi στο

μέλλον) για υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, το μοντέλο αυτό ανταποκρίνεται καλύτερα σε ρεαλιστικές συνθήκες.

Κατά την ανάλυση του συστήματος χρησιμοποιείται η χειρότερη εξασθένιση εντός μιας στενής δέσμης ώστε να εκτιμάται ένα συντηρητικό όριο της απόδοσης του συστήματος, το οποίο πρακτικά θα ήταν αυτό που θα χρησιμοποιούσε ο δορυφόρος ελλείψει της δυνατότητας μετρήσεων σε κάθε χρήστη ξεχωριστά.

Υπάρχουν δυο είδη κεραιών:

1) multiple beam antenna (MBA), κεραία που εκπέμπει διαφορετικές δέσμες σε διαφορετικές κατευθύνσεις.

2) phased array antenna, η αλλαγή της κατευθυντικότητας της δέσμης επιτυγχάνεται με την αλλαγή της φάσης των στοιχείων του πίνακα.

Οι διαφορετικοί τρόποι υλοποίησης των δυο κεραιών οδηγούν και σε διαφορετικούς περιορισμούς ισχύος.

Για ένα απλό μοντέλο, ο βέλτιστος σχεδιασμός επιτυγχάνεται ελαχιστοποιώντας μια γενική συνάρτηση διαφοράς μεταξύ χωρητικότητας που διανέμεται στα διάφορα κελιά και απαιτήσεων για εύρος ζώνης. Η μελέτη εστιάζεται στην κατανομή της ισχύος και των δεσμών στο φυσικό στρώμα όταν η συνολική απαίτηση για ισχύ υπερβαίνει τη συνολική χωρητικότητα του διαύλου, κάνοντας την υπόθεση ότι εν τέλει, το πρωτόκολλο του στρώματος μεταφοράς θα εξυπηρετήσει το πλεόνασμα των απαιτήσεων.

Χρησιμοποιώντας διαφορετικές συναρτήσεις κόστους εξετάζεται ο αντίστοιχος συμβιβασμός (tradeoff) μεταξύ δικαιοσύνης ανάμεσα στα κελιά και συνολικής χωρητικότητας, ενώ διαφαίνονται και τα πλεονεκτήματα των παράλληλων δεσμών βέλτιστης κατανομής ισχύος σε σχέση με το κέρδος ισχύος. Καθώς ο δορυφόρος χρησιμοποιεί ολοένα και μικρότερου μεγέθους κελιά εντός της περιοχής κάλυψης, είναι σημαντικό να μοιράζει οικονομικά- με την πάροδο του χρόνου- μικρό αριθμό από ενεργές δέσμες και αναμεταδότες με μια βέλτιστη μορφή. Το πρακτικό αποτέλεσμα του περιορισμένου αριθμού ενεργών δεσμών είναι για παράδειγμα η ανάγκη για οργάνωση των πολλαπλών δεσμών κάτω ζεύξης (downlink multibeam scheduling). [10]

4.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΔΕΣΜΩΝ ΚΑΤΩ ΖΕΥΞΗΣ

Η θεωρία της περίθλασης δίνει τη σχέση μεταξύ της εκπεμπόμενης και της λαμβανόμενης ισχύος για ζεύξεις από το δορυφόρου-γης. Το σύμβολο P_i^t υποδηλώνει τη εκπεμπόμενη ισχύ της i δέσμης του δορυφόρου πολλαπλών δεσμών που εξυπηρετεί τις απαιτήσεις F_i των χρηστών σε κίνηση, στο i «κελί» της περιοχής κάλυψης (σχήμα 4.2). Η ισχύς εκπομπής διαιρείται και κατανέμεται στους πομπούς για να κατανεμηθούν οι χωρητικότητες στα κελιά. Εκπέμπονται ταυτόχρονα πολλαπλά σήματα είτε χρησιμοποιώντας κεραία πολλαπλών δεσμών (MBA antenna) είτε κεραία με συμφασικά στοιχεία (phased array antenna).

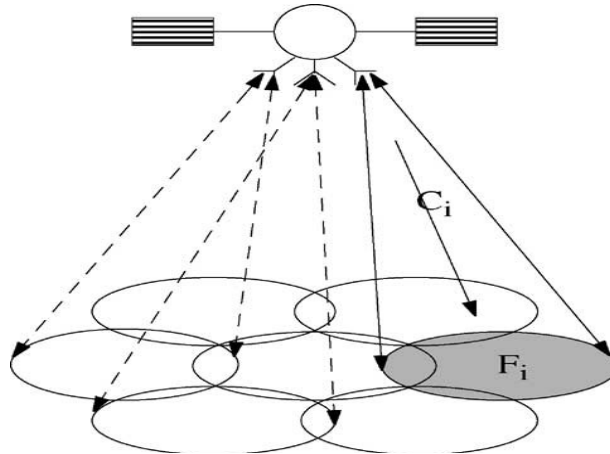
Θεωρείται ότι κάθε δέσμη είναι εφοδιασμένη με έναν αναμεταδότη, ο οποίος μεταφέρει ένα μόνο σήμα για τη συγκεκριμένη δέσμη. Για μια κεραία εκπομπής διαμέτρου D , μήκους κύματος λ και ύψος δορυφόρου L , το εύρος δέσμης του κύριου λοβού «φωτιζόμενο» από μια περιορισμένη-λόγω περίθλασης- δέσμη είναι $\lambda L/D$. Η λαμβανόμενη ισχύς P_i^r για μια κεραία λήψης διαμέτρου d συναρτήσει της εκπεμπόμενης ισχύος P_i^t , δίνεται από τον τύπο:

$$P_i^r = \left(\frac{\pi}{4} \right)^2 \frac{D^2 d^2}{\lambda^2 L^2} P_i^t \quad (4.1)$$

Εντός του i κελιού η περιορισμένου εύρους χωρητικότητα Shannon επιτυγχάνεται, είτε χρησιμοποιώντας υπέρθεση από κώδικες (οι οποίοι υπερθέτουν τα σήματα, που δημιουργούνται από διαφορετικά codebooks και τα στέλνουν συνολικά αφού πρώτα τα αθροίσουν), είτε μια μέθοδο διαίρεσης χρόνου για Gaussian κανάλια εκπομπής. Η χωρητικότητα αυτή δίνεται από τον τύπο:

$$C_i = W \log_2 \left(1 + \frac{P_i^r}{WN_0} \right)$$

όπου N_0 είναι η πυκνότητα ισχύος του θορύβου και W το διαθέσιμο εύρος ζώνης.



Σχήμα 4.2: Δορυφόρος πολλαπλών δεσμών που παρέχει χωρητικότητα C_i στο i κελί, ζήτησης F_i

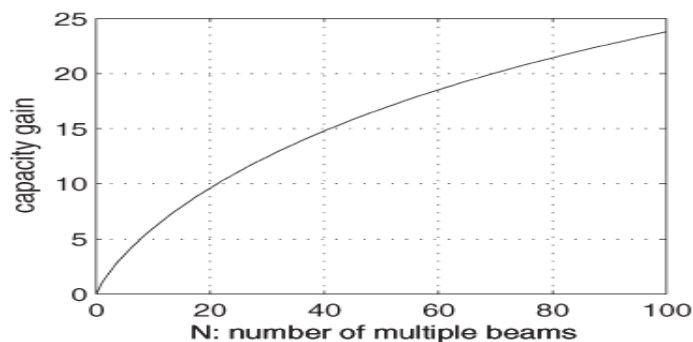
Αυτή η χωρητικότητα επιτυγχάνεται ανεξαρτήτως του αριθμού των μη συντονισμένων δεκτών στο κελί, κάνοντας την υπόθεση ότι όλοι οι δέκτες χρησιμοποιούν κεραία ίδιου μεγέθους. Βέβαια, μπορεί να υπάρξει παρεμβολή εντός των δεσμών, από τους πλευρικούς λοβούς των διπλανών δεσμών, γεγονός που χειροτερεύει την χωρητικότητα Shannon. Υποτίθεται, όμως, ότι η παρεμβολή αυτή είναι αμελητέα καθώς οι δέσμες είναι πολύ στενές πάνω από έναν μεγάλο αριθμό κελιών. Πρακτικά, δεν επιτρέπεται διπλανές δέσμες να είναι ενεργές, γι' αυτό οι ενεργές δέσμες κάτω ξεύξης μπορούν να τοποθετούνται αρκετά μακριά σε κάθε χρονοθυρίδα. Ακόμα και στην περίπτωση διπλανών ενεργών δεσμών, η χρησιμοποίηση διαφορετικού εύρους ζώνης ή πόλωσης καθιστά ασήμαντη την ενδοδεσμική παρεμβολή (με κόστος την απώλεια μέρους της αποδοτικότητας).

Καθώς η συνάρτηση χωρητικότητας της ισχύος είναι κοίλη, η παράγωγός της ως προς την ισχύ είναι μονότονα φθίνουσα. Για να εκμεταλλευθούμε αυτή τη διαπίστωση δεν πρέπει να παρέχουμε τη μέγιστη ισχύ για μια μόνο δέσμη, αλλά να διαιρεθεί η ισχύς και να χρησιμοποιηθούν πολλαπλές δέσμες με μικρή ποσότητα ισχύος η καθεμιά. Όταν υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή ισχύος σε κάθε δέσμη (αυτό δίνει τη μέγιστη χωρητικότητα για ένα δεδομένο αριθμό δεσμών, λόγω της φύσης της κοιλότητας της λογαριθμικής συνάρτησης), δηλαδή $P_i^t = P_{total}^t / N$, όπου P_{total}^t είναι η συνολική ισχύς που εκπέμπεται και N είναι ο αριθμός των δεσμών (ο οποίος είναι ίσος με τον αριθμό των κελιών). Η μέγιστη αποδοτικότητα του εύρους ζώνης για τον δίαυλο δορυφόρος-γη δίνεται από τον τύπο:

Διπλωματική Εργασία

$$\frac{C}{W} = N \log\left(1 + \frac{\pi^2 D^2 d^2}{16\lambda^2 L^2} \frac{P_{total}}{N} \frac{1}{NoW}\right) \text{ b/s/Hz} \left(\sim \frac{\pi^2 D^2 d^2 P_{total}}{16\lambda^2 L^2 NoW \ln 2} \right) \text{ για μεγάλα } N \quad (4.2)$$

Ο τύπος (4.2) δείχνει ότι το κέρδος χωρητικότητας των δεσμών αυξάνεται μονότονα με τον αριθμό των δεσμών και αυτό φαίνεται γραφικά στο σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3: Γραφική παράσταση κέρδους χωρητικότητας με ομοιόμορφη κατανομή ισχύος συναρτήσει του αριθμού πολλαπλών δεσμών

Πρακτικά, όμως, αν και η συνολική χωρητικότητα ενός δορυφόρου μπορεί να γίνει μέγιστη, «φωτίζοντας» όλες τις περιοχές ομοιόμορφα όλη την ώρα ίσως προκαλέσει σπατάλη των πόρων λόγω έλλειψης ζήτησης, αφού η πραγματική κίνηση είναι ανομοιόμορφη και χρονομεταβλητή. Συνεπώς χρειάζεται να βρεθεί η βέλτιστη κατανομή ισχύος στις δέσμες για οποιοσδήποτε απαιτήσεις του χρήστη. Χρησιμοποιώντας τη σχέση (4.1) η κατανομή του P_i^r μεταφράζεται σε αυτή του P_i^t και θεωρείται

$$P_i^r \equiv P_i^t \quad \text{και} \quad P_{total} \equiv (\pi^2 D^2 d^2 / 16\lambda^2 L^2) P_{total}^t$$

Εαν υπάρχει μια επιλεκτική εξασθένιση σε κάποιο συγκεκριμένο κελί της ζεύξης γίνονται εκτιμήσεις της και ενσωματώνεται σε μια τροποποιημένη έκφραση της σχέσης (4.1). Η δέσμη του δορυφόρου που θεωρούμε στο μέλλον θα είναι τόσο στενή, ώστε το κελί θα μπορεί να έχει διάμετρο 50-100 mi. Συνεπώς η εξασθένιση κατά μήκος κάθε δέσμης θεωρείται ομοιόμορφη καθώς η συσχετιζόμενη απόσταση των διαλείψεων είναι πολύ μεγαλύτερη από το μικρό μέγεθος των δεσμών στα υψίσυχνα δορυφορικά κανάλια.

Όταν το i κελί έχει εξασθένιση ισχύος του σήματος $a_i^2 (\leq 1)$ σε όλη την περιοχή του κελιού, η λαμβανόμενη ισχύς γίνεται $a_i^2 P_i$ και μπορούμε να συνάγουμε το P_i' από το P_i'' με τις μετρήσιμες εκτιμήσεις του a_i^2 . [10]

4.5 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΙΣΧΥΟΣ ΓΙΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΔΕΥΤΕΡΑΣ ΤΑΞΗΣ

Για να εκτιμήσει κανείς την επίδοση ενός συστήματος υπάρχουν διάφορα μεγέθη, όπως η μέγιστη συνολική χωρητικότητα και η δικαιοσύνη. Αυτά τα διαφορετικά μεγέθη μπορεί να οδηγήσουν το σύστημα σε πολύ διαφορετικές συμπεριφορές, με διαφορετική κατανομή της ισχύος. Συνεπώς η επιλογή του κατάλληλου μεγέθους είναι πολύ σημαντική για την εξέταση του προβλήματος.

Στο πρόβλημα που εξετάζεται γίνεται η προσπάθεια να έρθει όσο το δυνατόν πιο κοντά η χωρητικότητα C_i της ζεύξης με τις απαιτήσεις σε κίνηση F_i του χρήστη, δηλαδή θέλουμε να ελαχιστοποιηθεί μια γενική συνάρτηση της διαφοράς μεταξύ $\{C_i\}$ και $\{F_i\}$ στα κελιά. Αυτός ο τρόπος αποτελεί έναν λογικό συμβιβασμό μεταξύ συνολικής χωρητικότητας και δικαιοσύνης, που είναι δυο έννοιες αντικρουόμενες όπως θα δειχτεί και παρακάτω. Χρησιμοποιώντας τη τετραγωνική απόκλιση της συνάρτησης κόστους το πρόβλημα μοντελοποιείται ως εξής:

$$\text{minimize } \sum_{i=1}^N (F_i - C_i)^2 \quad (4.3)$$

$$\text{ώστε } C_i = W \log\left(1 + \frac{a_i^2 P_i}{W N_0}\right) \leq F_i \quad \text{για κάθε } i \text{ δέσμη} \quad (4.4)$$

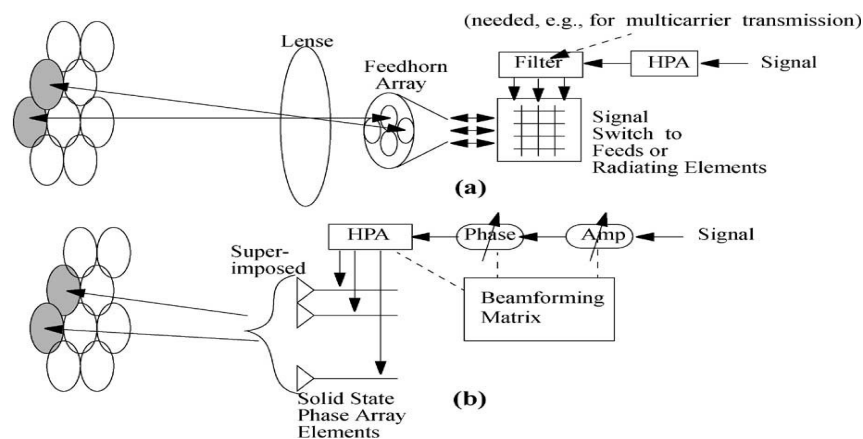
$$\sum_{i=1}^N P_i \leq P_{total} \quad (4.5)$$

$$P_i \leq P_0 \quad \text{για κάθε } i \text{ δέσμη} \quad (4.6)$$

Στην (4.4) δίνεται έμφαση στο γεγονός ότι ποτέ δε χρησιμοποιείται περισσότερη ισχύς από αυτή που απαιτεί ο χρήστης για την κίνηση. Η καλύτερη περίπτωση είναι όταν έχουμε την τετριμμένη λύση του προβλήματος όπου $C_i = F_i$ για όλα τα i με $\sum P_i \leq P_{total}$. Ωστόσο σε πολλές περιπτώσεις, κάποιες από όλες τις δέσμες μπορεί να

έχουν χωρητικότητες μικρότερες από τις απαιτήσεις των χρηστών σε κίνηση με τη διαθέσιμη ισχύ, γεγονός το οποίο μπορεί να οδηγήσει το σύστημα σε συμφόρηση (traffic congestion). Οι λύσεις σε αυτό το πρόβλημα περιλαμβάνουν περισσότερη καθυστέρηση κατά τη μεταφορά των δεδομένων, πιθανή δρομολόγηση των δεδομένων σε διαφορετικό μονοπάτι καθώς και μηχανισμούς ελέγχου συμφόρησης στο επίπεδο μεταφοράς. Εδώ, μελετάται η περίπτωση όπου η συνολική ζήτηση υπερβαίνει τη συνολική χωρητικότητα, έτσι ώστε η αποδοτική κατανομή της ισχύος να αντιμετωπίζεται από το φυσικό επίπεδο. Θεωρούμε ότι η επίδραση της επιλεκτικής εξασθένισης του σήματος σε κάθε κελί κάλυψης, κυρίως λόγω βροχής, μπορεί να προκαλέσει αργές αλλά βαθιές διαλείψεις (10-20 db) πάνω από υψίσυχνες ζώνες. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, η εξασθένιση $a_i^2 (\leq 1)$ σε κάθε στενή δέσμη θεωρείται ομοιόμορφη.

Η συνθήκη (4.5) συνεπάγεται έναν περιορισμό για τη συνολική ισχύ. Τέλος η συνθήκη (4.6) υποδηλώνει ότι όταν κάθε τροφοδότηση κεραίας MBA (σχήμα 4.4α) ακολουθεί το δικό της ενισχυτή υψηλής ισχύος (HPA), όπως ένας ενισχυτής οδεύοντος κύματος (Travelling Wave Tube Amplifier, TWTA), κάθε δέσμη έχει ένα μέγιστο όριο ισχύος που εκπέμπει. Από την άλλη πλευρά, εάν μια κεραία phased array (σχήμα 4.4β) ενεργοποιείται, κάθε δέσμη μπορεί να συντεθεί προσθέτοντας τα στοιχεία του πίνακα των οποίων οι φάσεις και τα πλάτη είναι προσαρμόσιμα, ώστε να μπορούμε να παρέχουμε σε κάθε κελί όση ισχύ θέλουμε (μέχρι τη συνολική ισχύ του πίνακα) ελέγχοντας τον πίνακα που έχει σχηματιστεί από δέσμες και χρησιμοποιώντας ενισχυτές ισχύος στερεάς κατάστασης (solid state power amplifiers, SSPAs). Συνεπώς με κεραίες phased array μπορούμε να παραλείψουμε τον περιορισμό (4.6).



Σχήμα 4.4: a) MBA b) phased array antenna

Το παραπάνω πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι κυρτό, δηλαδή οι περιορισμοί του είναι κυρτές συναρτήσεις (convex functions), που πρέπει να ελαχιστοποιηθούν. Για την περίπτωση της phased array antenna [χωρίς να ληφθεί υπόψη ο περιορισμός (4.6)], η αντίστοιχη συνάρτηση Lagrange είναι:

$$J(P_i) = \sum (F_i - C_i)^2 + \Lambda (\sum P_i - P_{total}).$$

Διαφορίζοντάς της ως προς P_i έχουμε τη βέλτιστη ισχύ της δέσμης, που ικανοποιεί την εξίσωση:

$$F_i - W \log\left(1 + \frac{a_i^2 P_i}{WNo}\right) = \frac{\Lambda No \ln 2}{2} \left(\frac{1}{a_i^2} + \frac{P_i}{WNo}\right) \quad (4.7)$$

όπου Λ είναι ο συντελεστής Lagrange και προσδιορίζεται από τον περιορισμό (4.5) της συνολικής ισχύος. Θετικό Λ σημαίνει ότι η (4.7) ικανοποιεί τον περιορισμό (4.4), δηλαδή $C_i \leq F_i$

Εαν βρούμε $P_i > P_0$, στην περίπτωση των κεραιών MBA θέτουμε $P_i = P_0$ λόγω της σχέσης (4.6). Γενικά, η σχέση (4.7) δεν παράγει λύσεις κλειστού τύπου, αλλά μπορεί να λυθεί αριθμητικά για να βρεθεί το P_i σε σχέση με το F_i , όποια κατανομή κι αν ακολουθεί το F_i .

Ωστόσο αν διαχωρίσουμε τις περιπτώσεις σε υψηλού και χαμηλού σηματοθορυβικού λόγου (SNR), μπορούν να προκύψουν σημαντικά συμπεράσματα και λύσεις κλειστού τύπου.

Για χαμηλό SNR, όπου $\left(\frac{a_i^2 P_i}{WNo}\right) \ll 1$ ($=0$ db), χρησιμοποιώντας την προσέγγιση $\ln(1+x) \approx x$ για πολύ μικρά x η προσέγγιση της συνάρτησης πρώτης τάξης δίνεται από τον τύπο:

$$P_i = \begin{cases} \frac{No \ln 2}{a_i^2} \left(F_i - \frac{\Lambda No \ln 2}{2a_i^2} \right) & , F_i > \frac{\Lambda No \ln 2}{2a_i^2} \\ 0 & , F_i \leq \frac{\Lambda No \ln 2}{2a_i^2} \end{cases} \quad (4.8)$$

Για υψηλό SNR, όπου $\left(\frac{a_i^2 P_i}{WNo}\right) \gg 1$ (≥ 10 db) έχουμε

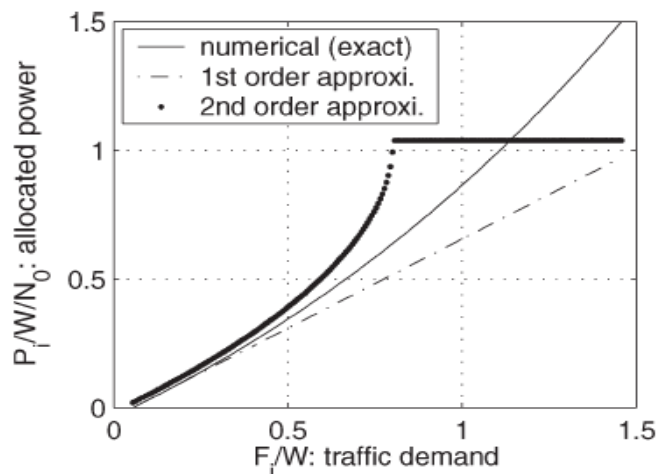
$F_i = W \log\left(1 + \frac{a_i^2 P_i}{WNo}\right) + \frac{\Lambda No \ln 2}{2} \left(\frac{P_i}{WNo}\right)$ η οποία είναι μια μονότονα αύξουσα

συνάρτηση του P_i . Συνεπώς για ένα δεδομένο F_i βρίσκουμε ένα μοναδικό P_i πολυπλοκότητας $O(F_i) < P_i < O(2^{\frac{F_i}{W}})$, χρησιμοποιώντας τμήμα της προσέγγιση

Taylor $\ln(1+x) \approx x - \frac{x^2}{2}$, η προσέγγιση της συνάρτησης δεύτερης τάξης δίνεται από τον τύπο:

$$P_i = \frac{No}{a_i^2} \left[W + \frac{\Lambda No (\ln 2)^2}{2a_i^2} - \sqrt{\left(W + \frac{\Lambda No (\ln 2)^2}{2a_i^2} \right)^2 - 2F_i W \ln 2} \right] \quad (4.9)$$

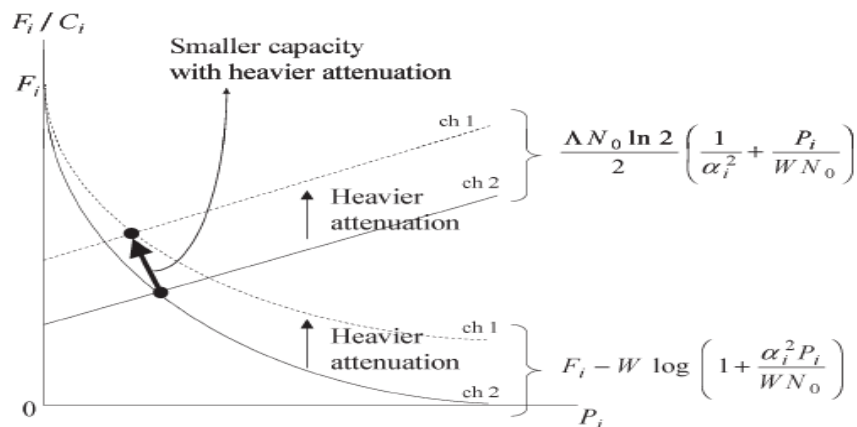
Η λύση του P_i για δεδομένο F_i είναι γενική (generic). Σε δυναμικά περιβάλλοντα όπου οι απαιτήσεις αλλάζουν με το χρόνο, η κατανομή ισχύος ενημερώνεται σε κάθε χρονική σχισμή σύμφωνα με τη διακύμανση των απαιτήσεων. Στο σχήμα 4.5 παρουσιάζονται συγκριτικά η ακριβής λύση της συνάρτησης κόστους δεύτερης τάξης και οι δυο προσεγγίσεις της, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η εξασθένιση της δέσμης ($a_i^2 = 1$).



Σχήμα 4.5: Σύγκριση των δυο προσεγγίσεων (4.8), (4.9) με την ακριβή αριθμητική λύση του τύπου (4.7).

Στη στατική περίπτωση δυο καναλιών σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή με $F_1 = F_2$ και $a_1^2 = a_2^2$, το σχήμα 4.6 δείχνει ότι το κελί 1, με μικρότερο a_1^2 (μεγαλύτερη εξασθένιση σε χειρότερες συνθήκες διαύλου) πετυχαίνει μικρότερη

χωρητικότητα. Αυτό συμβαίνει επειδή οι συναρτήσεις $f_1(P_i) = F_i - W \log(1 + (\alpha_i^2 \frac{P_i}{WN_0}))$ και η $f_2(P_i) = (\frac{\Lambda N_0 \ln 2}{2})(\frac{1}{\alpha_i^2} + \frac{P_i}{WN_0})$, οι οποίες καθορίζουν το ποσό της ισχύος P_i στο σημείο διασταύρωσης (crossing point) της (4.7), έχουν μετατοπιστεί προς τα πάνω για να οδηγήσουν σε μεγαλύτερη διαφορά $F_i - C_i$, για την ίδια F_i . Εάν όλες οι άλλες παράμετροι, εκτός από την κατάσταση του διαύλου, είναι πανομοιότυπες η ισχύς κατανέμεται έτσι ώστε η χωρητικότητα του καναλιού που υφίσταται ισχυρότερες διαλείψεις να μην είναι μεγαλύτερη από τη χωρητικότητα αυτού που βρίσκεται υπό ευνοϊκότερες συνθήκες. Με άλλα λόγια, περισσότερα δεδομένα αποστέλλονται μέσω του καναλιού που βρίσκεται υπό ευνοϊκότερες συνθήκες ακόμα κι αν οι απαιτήσεις σε κίνηση είναι ίδιες και στα δυο κανάλια. [10]



Σχήμα 4.6: Περίπτωση δυο στατικών καναλιών που έχουν διαφορετική εξασθένιση σήματος και διαφορά στη χωρητικότητα

4.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΚΟΣΤΟΥΣ

Εκτός από τη συνάρτηση κόστους δεύτερης τάξης θα μελετηθούν και άλλες, όπως αυτή της πρώτης τάξης ,n-στού βαθμού με $n \geq 3$ και τη γραμμική συνάρτηση, ώστε να συγκρίνουμε τη διαφορετική κατανομή ισχύος σύμφωνα με την αντίστοιχη συνάρτηση κόστους. Για όλες τις συναρτήσεις θεωρούμε ότι δεν παρέχεται περισσότερη ισχύς από αυτή που απαιτείται, σύμφωνα με τη ζήτηση, δηλαδή ισχύει ο περιορισμός $C_i \leq F_i$ για κάθε i κελί.

4.6.1 ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΠΡΩΤΗΣ ΤΑΞΗΣ

Με τη συνάρτηση κόστους πρώτης τάξης θέλουμε να ελαχιστοποιήσουμε το:

$$\sum_{i=1}^N |F_i - C_i|$$

με τους ίδιους περιορισμούς όπως στη συνάρτηση δεύτερης τάξης.

Για λόγους απλότητας η απόκλιση μεταξύ αιτούμενης και εκχωρηθείσας χωρητικότητας ορίζεται ως $x_i \equiv F_i - C_i$. Στην περίπτωση αυτή το πρόβλημα μοντελοποιείται ως:

$$\text{minimize} \quad \sum_{i=1}^N x_i \quad (4.10)$$

$$\text{ώστε} \quad x_i \geq 0 \quad (\text{δηλαδή} - x_i \leq 0) \quad (4.11)$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{2^{\frac{F_i - x_i}{W}}}{a_i^2} \leq P'_{total} \quad (4.12)$$

Οι ίδιοι περιορισμοί ισχύος (4.5), (4.6) για το πρόβλημα δεύτερης τάξης, ισχύουν εδώ για το x_i . Χρησιμοποιώντας τους πολλαπλασιαστές Lagrange Λ , $\{\mu_i\}$ η συνάρτηση Lagrange είναι

$$L(x, \Lambda, \mu) = \sum x_i + \Lambda \sum \frac{2^{\frac{F_i - x_i}{W}}}{a_i^2} - \sum \mu_i x_i \quad (4.13)$$

και διαφορίζοντάς της ως προς x_i έχουμε:

$$\frac{\partial L}{\partial x_i} = 1 + \Lambda \cdot 2^{\frac{F_i - x_i}{W}} - \mu_i = 0 \quad (4.14)$$

όπου από την παραγωγή προκύπτει:

$$\Lambda' = - \frac{\Lambda \ln 2}{a_i^2 W} \quad (4.15)$$

Σύμφωνα με τη συνθήκη Kuhn-Tucker, αν $x_i = 0$ (δηλαδή $C_i = F_i$) έχουμε $\mu_i \geq 0$ και η (4.14) γίνεται:

$$1 + \Lambda' 2^{\frac{F_i}{W}} - \mu_i = 0 \quad (4.16)$$

αν $x_i > 0$, έχουμε $\mu_i = 0$ και η (4.14) γίνεται:

$$1 + \Lambda' 2^{\frac{F_i - x_i}{W}} = 1 + \Lambda' 2^{\frac{C_i}{W}} = 0 \quad (4.17)$$

Σε αυτή την περίπτωση που το C_i είναι ανεξάρτητο από το δείκτη i ισχύει

$$C_i = \Gamma_i \quad \text{και} \quad \Lambda' = -2^{\frac{C}{W}} \quad (4.18)$$

όπου Γ_i είναι μια σταθερά. Συνδιάζοντας τις σχέσεις (16), (18) και απαλοφώντας το συντελεστή Λ' έχουμε :

$$\mu_i = 1 - 2^{\frac{F_i - C}{W}} \geq 0 \quad (4.19)$$

που σημαίνει ότι $F_i - C \leq 0$ όταν $\mu_i \geq 0$.

Η λύση δίνεται από τον τύπο:

$$C_i = \begin{cases} F_i & , F_i \leq \Gamma_i \\ \Gamma_i & , F_i > \Gamma_i \end{cases} \quad (4.20)$$

Όπου η παράμετρος $\Gamma_i = W \log_2 \left(\frac{a_i^2 W}{\Lambda \ln 2} \right)$, προσδιορίζεται [συνδιάζοντας τις σχέσεις (4.15), (4.18)] από τον περιορισμό της συνολικής ισχύος (4.5) και την κατάσταση διαύλου του κάθε κελιού. Η συνάρτηση πρώτης τάξης εξισώνει το C_i με το F_i μέχρι το F_i να συναντήσει το κατώφλι (threshold) Γ_i . Η ισχύς που απομένει μοιράζεται στο κελί που απαιτεί περισσότερο από Γ_i , έτσι ώστε η χωρητικότητα να παίρνει την τιμή Γ_i ανεξάρτητα από τις απαιτήσεις κίνησης. Επειδή έχουμε

$$\sum |F_i - C_i| = \sum F_i - \sum C_i \quad \text{με} \quad C_i \leq F_i, \quad \text{θέλουμε η συνολική χωρητικότητα να}$$

γίνει μέγιστη. Είναι γνωστό ότι το μέγιστο της συνολικής χωρητικότητας σε παράλληλα Gaussian κανάλια επιτυγχάνεται με τη τεχνική του water filling. Η σχέση (4.20) αντιπροσωπεύει water filling τεχνική, διότι ενώ ικανοποιείται ο περιορισμός

$C_i \leq F_i$, η σχέση “ $C_i = \Gamma_i$ ” είναι ισοδύναμη με την “ $\left(\frac{1}{a_i^2} + \frac{P_i}{WN_0}\right) = \text{σταθερά}$ ”. Εαν

όλα τα κελιά έχουν ίση εξασθένιση σήματος, η σχέση (4.20) οδηγεί σε μια ομοιόμορφη κατανομή ισχύος.

4.6.2 ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗΣ ΤΑΞΗΣ

Στην περίπτωση συνάρτησης κόστους μεγαλύτερης τάξης $n \geq 3$, ελαχιστοποιώντας τη συνάρτηση $\sum_{i=1}^N |F_i - C_i|^n$ με τους ίδιους περιορισμούς όπως πριν, καταλήγουμε σε μια τροποποιημένη μορφή της σχέσης (4.7) :

$$F_i - W \log\left(1 + \frac{a_i^2 P_i}{W N_0}\right) = \left[\frac{\Lambda N_0 \ln 2}{n} \left(\frac{1}{a_i^2} + \frac{P_i}{W N_0} \right) \right]^{\frac{1}{n-1}} \quad (4.21)$$

Αναμένεται ότι η διαφορά $F_i - C_i$ θα μειώνεται παρέχοντας περισσότερη ισχύ από αυτήν της συνάρτησης δεύτερης τάξης, στις περιοχές με υψηλή ζήτηση. Ενώ αντίστοιχα θα αυξάνεται παρέχοντας λιγότερη ισχύ από αυτήν της δεύτερης τάξης στις περιοχές με χαμηλή ζήτηση.

4.6.3 ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ

Αντί να χρησιμοποιήσουμε συναρτήσεις κόστους με αποκλίσεις, οι οποίες εξαρτώνται από τη διαφορά $F_i - C_i$, θεωρούμε σε κάθε κελί τη χωρητικότητα C_i ως μια κλιμακωτή συνάρτηση του F_i της μορφής:

$$C_i = a F_i, \text{ όπου } a \text{ μια σταθερά } 0 < a \leq 1$$

Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται αναλογική δικαιοσύνη (proportional fairness), καθώς σε όλα τα κελιά δίνεται η ίδια αναλογία χωρητικότητας σύμφωνα με τις απαιτήσεις τους. Η κατανομή ισχύος και ο παράγοντας a προσδιορίζονται, λύνοντας αριθμητικά ένα σύνολο μη γραμμικών εξισώσεων σύμφωνα με τον περιορισμό συνολικής ισχύος (4.5), από τον τύπο:

$$P_i = \frac{N_0 W}{a_i^2} \left(2^{\frac{a F_i}{W}} - 1 \right)$$

4.6.4 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΒΑΣΕΙ ΤΗΣ ΑΝΑΛΟΓΙΚΗΣ ΔΙΚΑΙΟΣΥΝΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Γενικά ο ορισμός της αναλογικής δικαιοσύνης (proportional fairness) δίνεται ως εξής. Η κατανεμημένη χωρητικότητα C_i είναι αναλογικά δίκαιη ανά μονάδα

ζήτησης, εαν η C_i είναι εφικτή και εαν για κάθε άλλη εφικτή χωρητικότητα C_i^* το σταθμισμένο άθροισμα των ανάλογων αλλαγών είναι μηδέν ή αρνητικό.

$$\sum_i F_i \frac{C_i^* - C_i}{C_i} \leq 0 \quad (4.22)$$

Η κατανομή αυτή, είναι γνωστό ότι μεγιστοποιεί το $\sum_i F_i \log C_i$. Εαν λύσουμε τη συνάρτηση Lagrange $J(P_i) = \sum_i F_i \log C_i - \Lambda (\sum P_i - P_{total})$, η βέλτιστη

ισχύς κι η αντίστοιχη κατανομή χωρητικότητας δίνεται από τον τύπο $\frac{F_i}{C_i} \left(\frac{dC_i}{dP_i} \right) = \Lambda$,

σύμφωνα με τον οποίο η χωρητικότητα μπορεί να είναι της μορφής $C_i = aF_i$ μόνο

εαν ισχύει $\frac{dC_i}{dP_i} = \sigma \tau \alpha \theta \epsilon \rho \alpha$, δηλαδή η χωρητικότητα είναι μια γραμμική συνάρτηση

της ισχύος. Όμως στη γενική περίπτωση μιας μη γραμμικής χωρητικότητας με περιορισμένο εύρος ζώνης, τα παραπάνω δεν ισχύουν.

Συνεπώς για το δικό μας πρόβλημα η αναλογική δικαιοσύνη επιτυγχάνεται

λύνοντας ένα πρόβλημα $\max \min_i \frac{C_i}{F_i}$, δηλαδή μεγιστοποιώντας το μικρότερο

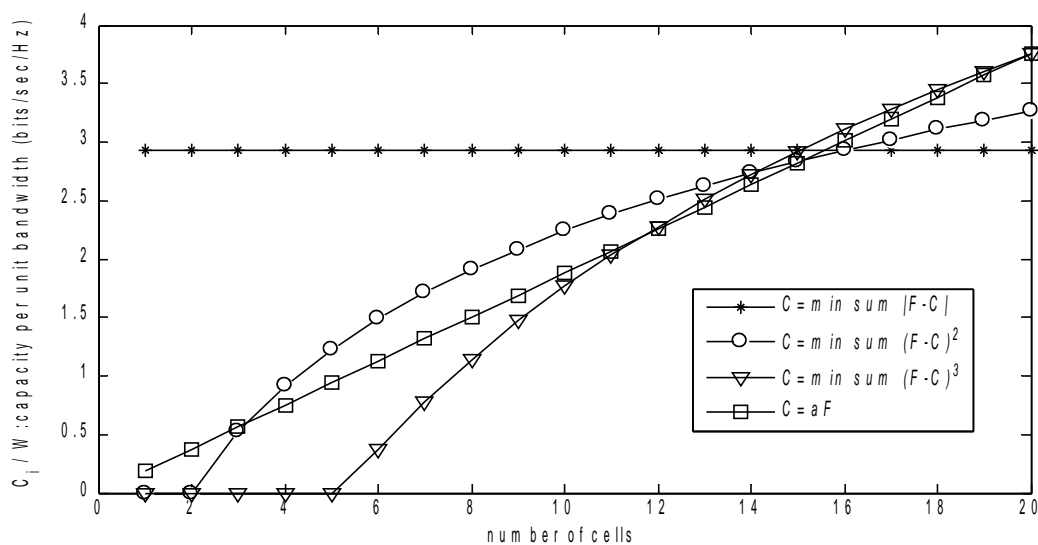
σηματοθορυβικό λόγο SINR. Με τον τρόπο αυτό δείχνεται ότι είναι βέτιστο να ισοσταθμίζεται η επίδοση της κάτω ζεύξης κάθε χρήστη με $SNR_1 = SNR_2 = \dots = SNR_N$, και να μειώνεται σημαντικά η εξερχόμενη ισχύς και κατ' επέκταση το κόστος του σταθμού βάσης.

Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην επίδραση της διαφορετικής κατανομής της κίνησης μέσα στα κελιά. Για το λόγο αυτό η εξασθένιση για κάθε δέσμη i θεωρείται ίση με τη μονάδα ($a_i^2 = 1$), δηλαδή θεωρούνται συνθήκες καθαρού ουρανού. Επίσης οι κατανομές των διαφορετικών συναρτήσεων κόστους μελετήθηκαν για 20 κελιά, των οποίων η συνάρτηση ζήτησης είναι γραμμική σύμφωνα με τον τύπο $F_i = 4 * i$.

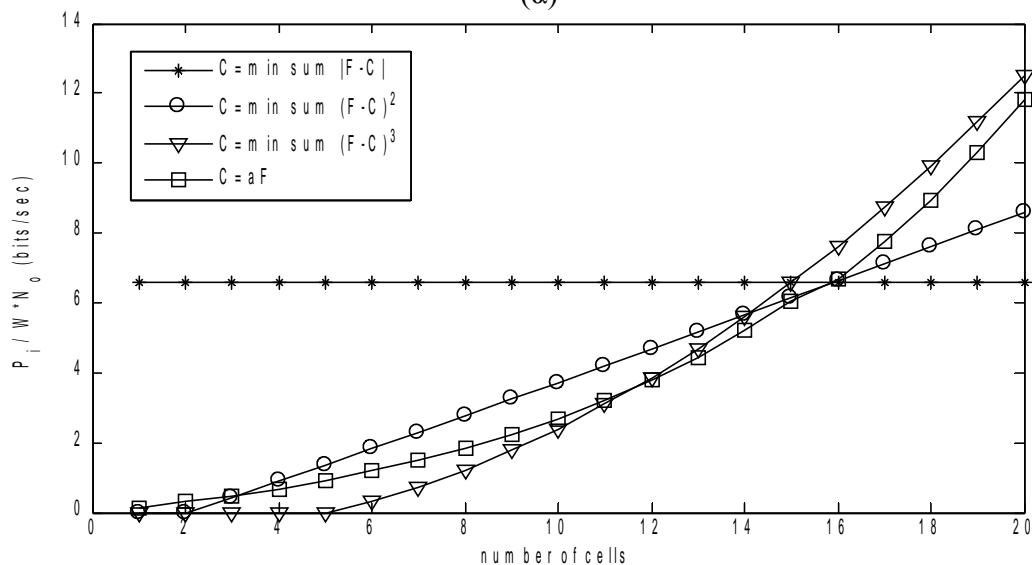
Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7α, όταν χρησιμοποιείται συνάρτηση κόστους αποκλίσεων υψηλότερης τάξης περισσότερη ισχύς παρέχεται στα κελιά με την

υψηλότερη ζήτηση. Αντίστοιχα μια συνάρτηση κόστους χαμηλότερης τάξης δίνει, σχετικά, περισσότερη ισχύ στα κελιά με χαμηλότερη ζήτηση.

Η συνάρτηση κόστους τρίτης τάξης δεν παρέχει ισχύ στα 5 πρώτα κελιά με τη χαμηλότερη ζήτηση, αυτή της δεύτερης τάξης μηδενίζει μόνο τα 2 πρώτα κελιά ενώ της πρώτης τάξης δε μηδενίζει την ισχύ που εκχωρείται σε κανένα κελί. Οι συναρτήσεις κόστους δεύτερης και τρίτης τάξης μπορεί να θεωρηθούν αναλογικά πιο δίκαιες από τη συνάρτηση πρώτης τάξης. Αυτό συμβαίνει διότι χρησιμοποιούν μεθόδους κατανομής ισχύος που προσεγγίζουν αυτές της γραμμικής συνάρτησης κόστους, δηλαδή εξυπηρετούν καλύτερα τα κελιά με τη μεγαλύτερη ζήτηση.



(α)



(β)

Σχήμα 4.7: Σύγκριση συναρτήσεων κόστους ως προς α) τη χωρητικότητα ανά μονάδα εύρους ζώνης και β) την ισχύ, για phased array antennas

Ωστόσο, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.7β, για να επιτευχθεί μεγαλύτερη χωρητικότητα σε ένα κανάλι που έχει περιορισμένο εύρος ζώνης, χρειάζεται περισσότερη ισχύ ανά bit εξαιτίας της κοιλότητας της συνάρτησης χωρητικότητας. Αυτό συνεπάγεται ότι η συνολική χωρητικότητα των κελιών είναι χαμηλότερη όταν χρησιμοποιούνται συναρτήσεις κόστους υψηλότερης τάξης. [10]

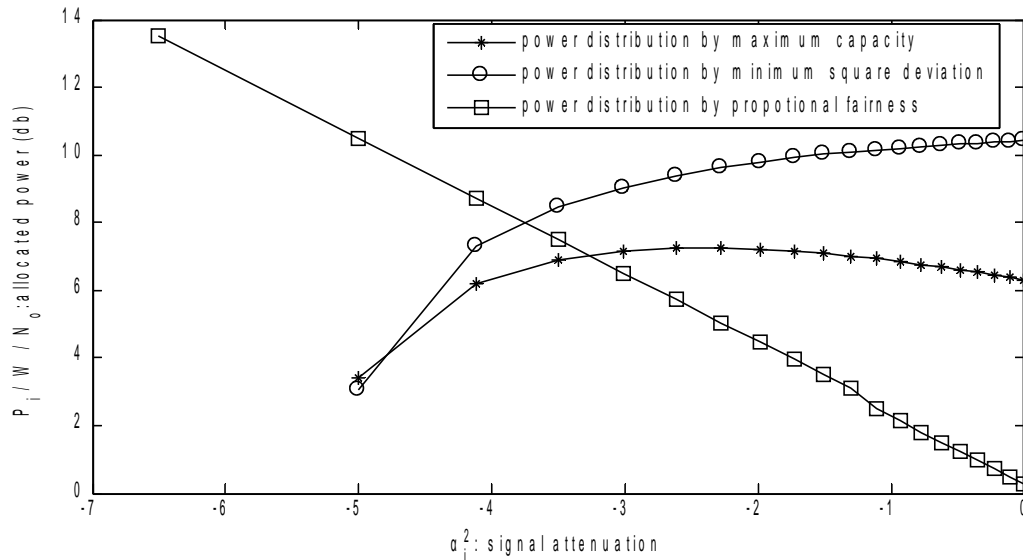
Στο συγκεκριμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης -παρέχοντας περισσότερη ισχύ σε υψηλότερες απαιτήσεις- επιτυγχάνουμε μεγαλύτερη δικαιοσύνη αναλογικά, ενώ χάνουμε σε χωρητικότητα, στις περιπτώσεις συναρτήσεων κόστους δεύτερης ή τρίτης τάξης. Το αντίθετο αποτέλεσμα έχουμε στην περίπτωση της συνάρτησης κόστους πρώτης τάξης. Με βάση τα παραπάνω συμπεράσματα κρίνεται σκόπιμο να κατασκευαστεί μια περίπλοκη συνάρτηση κόστους που να κάνει ένα λογικό συμβιβασμό μεταξύ των συναρτήσεων κόστους χαμηλότερης και υψηλότερης τάξης.

4.7 ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Σε γενικές γραμμές αντιμετωπίζεται το πρόβλημα του συμβιβασμού μεταξύ μέγιστης συνολικής χωρητικότητας και αναλογικής δικαιοσύνης. Οι παράμετροι αυτές, αν και συνιστούν μεγέθη εκτίμησης της επίδοσης ενός δορυφορικού συστήματος, έχουν αντικρουόμενες πολιτικές κατανομής της ισχύος. Εάν στόχος είναι η μεγιστοποίηση της συνολικής χωρητικότητας, πρέπει να διανεμηθεί στα κελιά ένα συγκεκριμένο ποσό ισχύος ανεξάρτητα από την πραγματική κυκλοφοριακή ζήτηση. Αυτό σημαίνει πρακτικά ότι όταν η ζήτηση σε κάθε κελί υπερβαίνει κάποιο threshold, θα παρέχεται συγκεκριμένη ισχύς και θα χάνεται η αναλογική δικαιοσύνη. Αντίθετα εάν ο στόχος είναι να διασφαλιστεί η δικαιοσύνη ανάμεσα στα κελιά, τότε θα πρέπει να κατανεμηθεί περισσότερη ισχύς στα κελιά με τη μεγαλύτερη ζήτηση και να χαθεί ένα μέρος της συνολικής χωρητικότητας.

Εάν ληφθεί υπόψη ότι στους διαύλους υπάρχει και κάποια εξασθένιση, η κατανομή της ισχύος εξαρτάται και πάλι από τη σκοπιά που επιλέγουμε να μελετηθεί το πρόβλημα. Με γνώμονα τη συνολική χωρητικότητα, επιδιώκουμε να χρησιμοποιηθούν τα καλύτερα κανάλια, δηλαδή αυτά με συντελεστή εξασθένισης $\alpha_i=1$. Ακολουθώντας την τεχνική water filling, κατανέμουμε περισσότερη ισχύ σε αυτά και αγνοούμε τα χειρότερα κανάλια. Αντίστοιχα, για να επιτύχουμε αναλογική

δικαιοσύνη παρέχουμε περισσότερη ισχύ στα χειρότερα κανάλια για να αντιμετωπιστεί η χειροτέρευση του διαύλου και να υπάρχει δικαιοσύνη ανάμεσα στα κελιά ανάλογα με τις απαιτήσεις τους σε κίνηση.



Σχήμα 4.8: Σύγκριση κατανομής ισχύος σύμφωνα με την εξασθένιση του σήματος, που βασίζεται σε διαφορετικές μεθόδους, όπως ελάχιστη τετραγωνική απόκλιση (συνάρτηση κόστους δεύτερης τάξης), μέγιστη συνολική χωρητικότητα (συνάρτηση κόστους πρώτης τάξης), αναλογική δικαιοσύνη (γραμμική συνάρτηση κόστους).

Το σχήμα 4.8 συγκρίνει τη κατανομημένη ισχύ για τρία διαφορετικά κριτήρια όπως αυτά εκφράζονται μέσω των συναρτήσεων κόστους: την ελάχιστη τετραγωνική απόκλιση (δεύτερης τάξης συνάρτηση), τη μέγιστη συνολική χωρητικότητα (πρώτης τάξης συνάρτηση) και την αναλογική δικαιοσύνη (γραμμική συνάρτηση). Θεωρείται, ωστόσο, ότι είναι σταθερή η ζήτηση της κίνησης κάθε κελιού.

Μελετώντας τη γραφική παράσταση διαφαίνεται ότι η συνάρτηση κόστους δεύτερης τάξης προσεγγίζει αυτήν της μέγιστης συνολικής χωρητικότητας (πρώτης τάξης συνάρτηση). Ωστόσο, η συνάρτηση δεύτερης τάξης δίνει περισσότερη ισχύ στα χειρότερα κανάλια, εξασφαλίζοντας μια μορφή δικαιοσύνης, και το κατώφλι (threshold) της εξασθένισης όπου το κανάλι τίθεται εκτός λειτουργίας είναι χαμηλότερο από αυτό της συνάρτησης πρώτης τάξης. Το κατώφλι εξασθένισης δηλώνει την τιμή του συντελεστή α_i κάτω από την οποία η κατάσταση του διαύλου

είναι τόσο κακή που τον καθιστά οικονομικά ασύμφορο να χρησιμοποιηθεί και συνεπώς δεν κατανέμεται ισχύς σε αυτόν.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι υπάρχει ακόμα ένας συμβιβασμός μεταξύ αναλογικής δικαιοσύνης και μέγιστης συνολικής χωρητικότητας με διαφορετική, όμως, εξασθένιση του σήματος. Από το διάγραμμα διαπιστώνεται ότι η συνάρτηση κόστους δεύτερης τάξης επιτυγχάνει ένα συμβιβασμό μεταξύ των δύο.

Σε δυναμικά περιβάλλοντα η κατανομή της ισχύος ανανεώνεται σε κάθε χρονοθυρίδα, σύμφωνα με τις μεταβολές της ζήτησης και της κατάστασης των διαύλων που είναι χρονομεταβλητά μεγέθη, εισάγωντας έναν καινούργιο συντελεστή Lagrange Λ . Ο συντελεστής Λ εξαρτάται από την κατάσταση όλων των κελιών. Ακόμα και αν η ζήτηση και η κατάσταση ενός κελιού παραμείνει η ίδια στην προηγούμενη χρονοθυρίδα, η κατανομή της ισχύος του ενδέχεται να αλλάξει επειδή άλλαξαν οι συνθήκες στα άλλα κελιά. [10]

4.8 ΚΕΡΔΟΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΙΣΧΥΟΣ

Είναι γνωστό από τη συνάρτηση χωρητικότητας ότι ένας δορυφόρος με πολλαπλές παράλληλες δέσμες χρησιμοποιεί καλύτερα ένα συγκεκριμένο ποσό ισχύος ώστε να παρέχει μεγαλύτερη χωρητικότητα, παρά ένας δορυφόρος μιας μόνο δέσμης. Είναι σημαντικό η ισχύς να κατανέμεται βέλτιστα, ειδικά όταν υπάρχει ένα περιορισμένο ποσό ισχύος και η ζήτηση από τους χρήστες είναι ανομοιόμορφη και χρονομεταβλητή.

Στο επόμενο σχήμα (4.9α) γίνεται σύγκριση μεταξύ του ποσού της συνολικής ισχύος, που σπαταλάται για βέλτιστη κατανομή ισχύος και της ομοιόμορφης κατανομής ισχύος, στην περίπτωση που και οι δυο έχουν το ίδιο κόστος απόκλισης, που δίνεται από τον τύπο $\sum_i (F_i - C_i)^2$.

Το κέρδος ισχύος $g(N)$, παράλληλων πολλαπλών δεσμών με τη βέλτιστη κατανομή ισχύος ορίζεται ως συνάρτηση του αριθμού N των δεσμών και της ομοιόμορφης κατανομής ισχύος μέσω του τύπου:

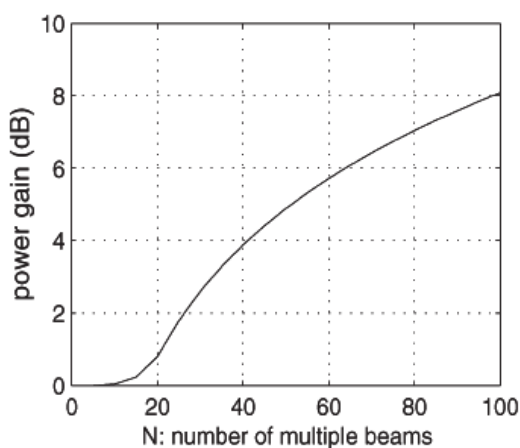
$$g(N) = \frac{NP_{uniform}}{\sum_{i=1}^N P_i} = \frac{NP_{uniform}}{P_{total}} \quad (4.23)$$

$$\text{ώστε } \sum_{i=1}^N \{F_i - C(P_{uniform})\}^2 = \sum_{i=1}^N \{F_i - C(P_i)\}^2 \quad (4.24)$$

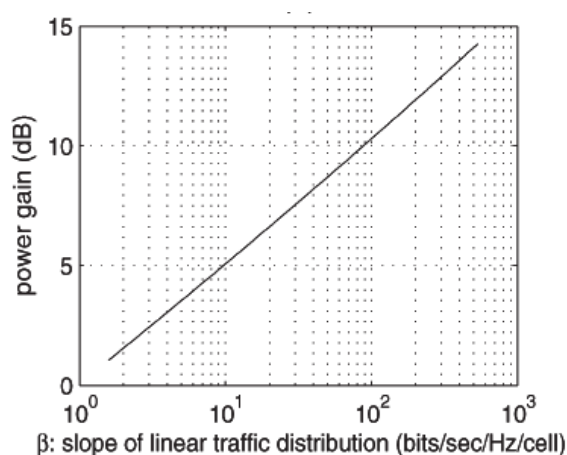
όπου $C(\cdot)$ είναι η συνάρτηση χωρητικότητας Shannon περιορισμένου εύρους, $P_{uniform}$ δηλώνει την απαιτούμενη ισχύ, εαν αυτή κατανεμηθεί ομοιόμορφα σε όλα τα κελιά, που θα επιτύχει το ίδιο αποτέλεσμα με αυτό στην περίπτωση της βέλτιστης κατανομής ισχύος. Λαμβάνοντας υπόψη τη σπατάλη της ισχύος που χρησιμοποιείται για να εξυπηρετήσει τους χρήστες με χαμηλές απαιτήσεις, θεωρούμε μια εντελώς ομοιόμορφη κατανομή ισχύος, που μπορεί να οδηγήσει σε $F_i < C(P_{uniform})$.

Κατανέμοντας βέλτιστα την ισχύ, όχι μόνο εξοικονομείται συνολική ισχύς από την πλευρά του δορυφόρου μειώνοντας τη σπατάλη ισχύος για κελιά με μικρή ζήτηση, αλλά επιτυγχάνεται και ικανοποιητική αναλογική δικαιοσύνη από την πλευρά των χρηστών, δηλαδή διαχειριζόμαστε αποδοτικά την ισχύ.

Το κέρδος ισχύος εξαρτάται επίσης από τη μορφή της κατανομής της κίνησης, στην περίπτωση που μελετάμε πρόκειται για την καμπύλη β που είναι μια γραμμική συνάρτηση κατανομής. Για τις ίδιες απαιτήσεις σε όλα τα κελιά το σχήμα 4.9β δείχνει ότι όσο λιγότερο ισοσταθμισμένη είναι η κατανομή της κίνησης, τόσο μεγαλύτερο είναι το κέρδος ισχύος. Αυτό συμβαίνει επειδή η βέλτιστη μέθοδος επωφελείται της ανομοιομορφίας της κατανομής, παρέχοντας περισσότερη ισχύ στα περισσότερα απαιτητικά κελιά.



(α)



(β)

Σχήμα 4.9: κέρδος ισχύος παράλληλων δεσμών (α) συναρτήσει του αριθμού των πολλαπλών δεσμών με σταθερή κατανομή κίνησης (β) συναρτήσει της καμπύλης γραμμικής κατανομής κίνησης

4.9 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΣΤΗ ΣΤΑΘΕΡΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Στο πρόβλημα βέλτιστης κατανομής των πόρων εισάγεται μια ακόμα σημαντική παράμετρος, η καθυστέρηση. Στην πράξη, για πολλές εφαρμογές πραγματικού χρόνου όπως η συνδιάσκεψη με ήχο ή με βίντεο, η απόδοση της καθυστέρηση είναι τόσο κρίσιμη όσο το σφάλμα επαναφοράς. Είναι πιθανό ότι, στις περισσότερες περιπτώσεις, ένας δορυφόρος πολλαπλών δεσμών ασχολείται με ετερογενή κίνηση πραγματικού χρόνου και μη. Επαναπροσδιορίζοντας τη ζήτηση της συσσωρευμένης κίνησης F_i και τη χωρητικότητα C_i , αντίστοιχα, θεωρούμε το A_i να χαρακτηρίζει το μέσο ρυθμό της εισερχόμενης κίνησης και U_i το μέσο ρυθμό της κίνησης που αφαιρείται από την ουρά και εξυπηρετείται (δηλαδή, που μεταδίδεται), για τη σταθερή κατάσταση (steady state). Υποθέτουμε ότι κάθε ουρά είναι σταθερή, δηλαδή $F_i < \infty$ με $A_i \leq U_i$.

Αναλύουμε την επίδραση μιας πεπερασμένης καθυστέρηση στο μεταδιδόμενο ποσό U_i . Όταν δεν υπάρχει σφάλμα μετάδοσης, έχουμε $0 < U_i < C_i$ και η πιθανότητα να είναι επιτυχής η μετάδοση είναι $1 - e_i$ όπου e_i είναι το ποσοστό των λανθασμένων πακέτων (packet error rate, PER) πάνω στη ζεύξη της i δέσμης. Όταν υπάρχει ένα σφάλμα μετάδοσης, έχουμε $U_i = 0$ και οι απαιτήσεις της αποτυχημένης μετάδοσης συσσωρεύονται. Η πιθανότητα για αυτή την περίπτωση είναι e_i . Επομένως προκύπτει $U_i \leq (1 - e_i) C_i$, και για τις δύο περιπτώσεις.

Στη συνέχεια, από το θεώρημα του Little, ο μέσος χρόνος καθυστέρησης στην ουρά i στη σταθερή κατάσταση δίνεται από τη σχέση:

$$d_i = \frac{F_i}{A_i} = \frac{F_i}{U_i} \geq \frac{F_i}{(1 - e_i)C_i} \quad (4.25)$$

Σημειώνεται ότι η παραπάνω σχέση (4.25) ισχύει για τους μέσους όρους του συνόλου των ποσοτήτων στη σταθερή κατάσταση. Ειδικότερα, η παροδική διακύμανση της κίνησης και οι συνθήκες του καναλιού θεωρούνται ημιστατικές (quasi-static) κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου, επειδή ο χρόνος επεξεργασίας του πακέτου και οι προθεσμίες μεταφοράς είναι πολύ λιγότερες από το χρόνο συσχέτισης της εξασθένησης του σήματος λόγω βροχής, ο οποίος είναι της τάξης του λεπτών ή ωρών.

Σε γενικές γραμμές, η συσσωρευμένη κίνηση μεταβάλλεται με πιο αργό ρυθμό σε σύγκριση με τις συνθήκες του καναλιού.

Γίνεται η υπόθεση ότι η i δέσμη έχει τον περιορισμό της μέσης καθυστέρησης $d_i \leq D_i$, για $i = 1, \dots, N$, όπου $D_i (> 0)$ είναι ένα δεδομένο επιτρεπτό όριο μέσης καθυστέρησης και μπορεί να διαφέρει από δέσμη σε δέσμη. Θα επικεντρωθούμε μόνο στη μακροπρόθεσμη μέση καθυστέρηση κάθε δέσμης, θεωρώντας ένα "genie-aided" πρωτόκολλο επιπέδου μεταφοράς, που εξυπηρετεί σωστά τη ζήτηση που υφίσταται συμφόρηση καθώς και τη συσσωρευμένη ζήτηση όπως και κάθε νέα εισερχόμενη κίνηση. Επιπλέον, στη σχέση (4.25), υποθέτουμε ότι $A_i A_i \approx U_i U_i$ στη σταθερή κατάσταση, και $U_i \approx (1 - e_i)C_i$ χρησιμοποιώντας κώδικες διόρθωσης λαθών. Έτσι, έχουμε έναν περιορισμό μέσης καθυστέρησης, που δίνεται συναρτήσει των F_i, C_i από τον τύπο:

$$\frac{F_i}{(1 - e_i)C_i} \leq D_i \quad \text{ή} \quad \frac{F_i}{(1 - e_i)D_i} - C_i \leq 0 \quad (4.26)$$

Αυτός ο περιορισμός (4.26) υπονοεί ότι η i δέσμη πρέπει να εξασφαλίσει τουλάχιστον κάποιο μέρος ($1 / (1 - e_i)D_i$) της ζήτησης ώστε η χωρητικότητα να ικανοποιεί τον περιορισμό της καθυστέρησης. Το κλάσμα αυτό καθορίζεται από το επιτρεπόμενο όριο καθυστέρησης και το ποσοστό λανθασμένων πακέτων (PER) στο κανάλι. Διαισθητικά, ένα μικρότερο επιτρεπτό όριο καθυστέρησης με μεγαλύτερη προτεραιότητα μετάδοσης οδηγεί σε περισσότερη χωρητικότητα. Επίσης ένα μεγαλύτερο ποσοστό λανθασμένων πακέτων σε ένα κανάλι με άσχημες συνθήκες απαιτεί επίσης ένα περισσότερη χωρητικότητα, για να ξεπεράσει την κακή ποιότητα της ζεύξης. Μια μεγαλύτερη απαίτηση σε χωρητικότητα για το χειρότερο κανάλι μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια της συνολικής χωρητικότητας.

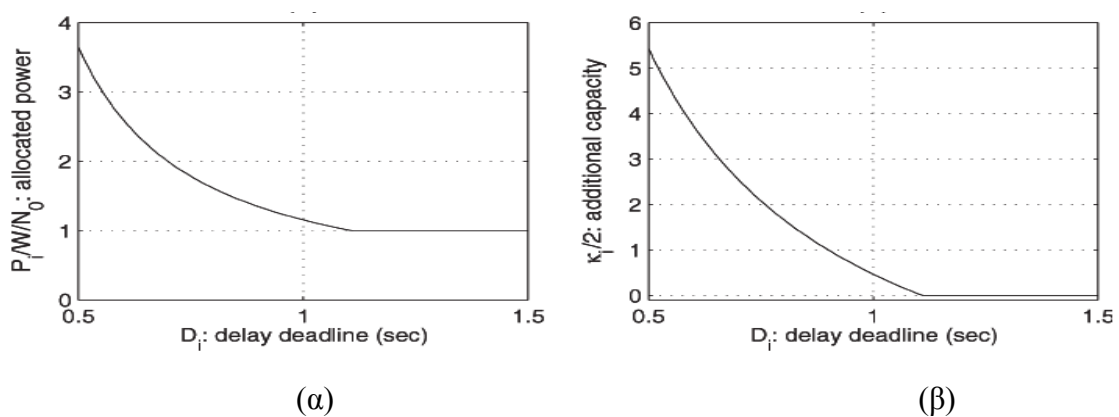
Η αρχή της water-filling τεχνικής δείχνει ότι είναι καλύτερα να εκμεταλλευτεί κάποιος την καλή κατάσταση ενός καναλιού, κατανέμοντας περισσότερη ισχύ σε αυτό, ώστε να μεγιστοποιήσει τη συνολική χωρητικότητα των παράλληλων Gaussian καναλιών. Συνεπώς, προκύπτει το πρόβλημα του συμβιβασμού μεταξύ της καθυστέρησης και της συνολικής χωρητικότητας των εξασθενημένων καναλιών.

Προσθέτοντας την παράμετρο της καθυστέρησης στο αρχικό πρόβλημα ελαχιστοποίησης και εφαρμόζοντας τους πολλαπλασιαστές Lagrange ($\kappa_i, i = 1, \dots, N$), προκύπτει η σχέση:

$$F_i - C_i + \frac{1}{2}\kappa_i = \frac{\lambda N_0 \ln 2}{2} \left(\frac{1}{a_i^2} + \frac{P_i}{WN_0} \right), \quad \text{για } i = 1, \dots, N \quad (4.27)$$

από την οποία υπολογίζεται η κατανομή της ισχύος θεωρώντας αρχικά κάθε $\kappa_i=0$. Αν ισχύει $C_i \geq F_i / (1 - e_i)D_i$, ικανοποιούνται οι συνθήκες Kuhn-Tucker με $\kappa_i=0$. Αν $C_i < F_i / (1 - e_i)D_i$, η χωρητικότητα C_i και η αντίστοιχη ισχύς P_i θα πρέπει να αυξηθούν με $\kappa_i > 0$. Συνεπώς, θέσαμε $C_i = F_i / (1 - e_i)D_i$ και ξαναυπολογίσαμε, έτσι ώστε να ικανοποιήσουμε τον περιορισμό της καθυστέρησης. Το σχήμα 4.10 δείχνει ένα παράδειγμα κατανομής ισχύος και την αντίστοιχη αύξηση της χωρητικότητας $(1/2)\kappa_i$ στη σχέση (4.27), που απαιτούνται για τον περιορισμό της καθυστέρησης, ως συνάρτηση του ορίου καθυστέρησης. Για μεγαλύτερα όρια από κάποιο κατώφλι (1.11 στο συγκεκριμένο παράδειγμα), η ισχύς κατανέμεται με τον ίδιο τρόπο όπως στην περίπτωση που δεν υπάρχει η παράμετρος της καθυστέρησης, και έτσι δεν είναι αναγκαία η πρόσθετη χωρητικότητα $[(1/2)\kappa_i=0]$.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι περιορισμοί καθυστέρησης μπορεί να μην ικανοποιούνται λόγω έλλειψης της διαθέσιμης ισχύος, η οποία οδηγεί σε φραγή (blocking) ή διακοπή (dropping) της υπηρεσίας.[10]



Σχήμα 4.10: (α) Ισχύς και (β) επιπλέον χωρητικότητα, που απαιτούνται για τον περιορισμό καθυστέρησης, ως συνάρτηση του ορίου καθυστέρησης

4.10 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΩΝ ΔΕΣΜΩΝ ΚΑΤΩ ΖΕΥΞΗΣ

Μέχρι στιγμής, έχει υποτεθεί ότι ο αριθμός των κελιών στην περιοχή της δορυφορικής υπηρεσίας είναι ο ίδιος με αυτό των ενεργών δεσμών κάτω ζεύξης, δηλαδή, ένας δορυφόρος μπορεί ταυτόχρονα να καλύπτει πλήρως όλες τα κελιά του. Στο μέλλον, ένας δορυφόρος μπορεί να πρέπει να χρησιμοποιεί εκατοντάδες ή χιλιάδες κελιά για να υποστηρίξει με υψηλή πυκνότητα ισχύος, μικρούς χρήστες με στενές δέσμες (spotbeams). Θα είναι μη αποδοτικό για ένα δορυφόρο να μεταφέρει τόσους πομπούς, έναν για κάθε spotbeam. Ως εκ τούτου, πρέπει να βρεθεί ένας τρόπος για να μοιράσουμε αποδοτικά και προγραμματίσουμε ένα μικρότερο αριθμό ενεργών δεσμών κάτω ζεύξης, ώστε να καλύψουν ένα πολύ μεγαλύτερο αριθμό κελιών στην περιοχή κάλυψης.

Ο αριθμός των διαθέσιμων ενεργών δεσμών δηλώνεται με K και ο αριθμός των κελιών με N ($> K$). Αυτό σημαίνει ότι, το πολύ K δέσμες κάτω ζεύξης μπορούν να μεταφέρουν σήματα, που παράγονται από πομπούς επί του δορυφόρου (on board), σε K κελιά ενώ τα υπόλοιπα $N - K$ κελιά έχουν μηδενικές χωρητικότητες. Το πρόβλημα να βρεθούν ποια από τα K κελιά θα πρέπει να εξυπηρετηθεί μπορεί να διατυπωθεί ως ένα πρόβλημα δυαδικού προγραμματισμού με τους ίδιους

περιορισμούς $C_i < F_i$ και $\sum_{i=1}^N P_i \leq P_{total}$ (4.6), ως εξής:

$$\text{minimize } \sum_{i=1}^N (F_i - z_i C_i)^n \quad (4.28)$$

$$\text{ώστε } \sum_{i=1}^N z_i = K \quad \text{όπου } z_i \in \{0,1\} \quad (4.29)$$

όπου το z_i δηλώνει αν το i κελί θα πρέπει να καλυφθεί ή όχι, και θεωρούμε μόνο $n > 1$

Μπορούμε να λύσουμε αυτό το πρόβλημα εξετάζοντας όλες τις $\binom{N}{K}$ περιπτώσεις και επιλέγοντας τη βέλτιστη. Ωστόσο, επειδή είναι δύσκολο να λύσουμε αυτό το είδος προβλήματος πάμε πίσω στο αρχικό πρόβλημα ελαχιστοποίησης γράφοντας διαφορετικά τη δυαδική συνθήκη του z_i :

$$\text{minimize } \sum_{i=1}^N (F_i - C_i)^n \quad (4.30)$$

$$\text{ώστε } 0 \leq C_i < \min\{C_i^0, F_i\} \quad (4.31)$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{2^{\frac{C_i}{W}}}{a_i^2} \leq P_{total} \quad (4.32)$$

και θα επικεντρωθούμε στην C_i αντί για την P_i . Στις σχέσεις (4.31) και (4.32), οι συνθήκες περιορισμού της ισχύος αντιπροσωπεύονται χρησιμοποιώντας το C_i και το C_i^0 , τη μέγιστη χωρητικότητα του i κελιού από τον περιορισμό (4.6).

Χρησιμοποιώντας τους πολλαπλασιαστές Lagrange μ_i για $-C_i \leq 0$ και ν_i για $C_i \leq C_i^0$ αντίστοιχα, η αντίστοιχη συνάρτηση Lagrange είναι:

$J(P_i) = \sum (F_i - C_i)^2 + \Lambda (\sum P_i - P_{total})$. Διαφορίζοντάς της ως προς C_i έχουμε:

$$\frac{\partial J}{\partial C_i} = -n(F_i - C_i)^{n-1} + \frac{\Lambda'}{a_i^2} 2^{\frac{C_i}{W}} - \mu_i - \nu_i = 0 \quad (4.33)$$

στην οποία μπορούμε να εφαρμόσουμε τη συνθήκη Kuhn-Tucker, για να καθοριστεί σε ποια περίπτωση έχουμε $C_i = 0$.

Όταν $C_i > 0$, έχουμε $\mu_i = 0$ και η (4.23) γίνεται:

$$n(F_i - C_i)^{n-1} = \frac{\Lambda'}{a_i^2} 2^{\frac{C_i}{W}} + \nu_i = \frac{\Lambda'}{a_i^2} \left(1 + \frac{a_i^2 P_i}{WN_0} \right) + \nu_i > \frac{\Lambda'}{a_i^2} \quad (4.34)$$

αυτό προκύπτει από $P_i > 0$ και $\nu_i \geq 0$. Η σχέση αυτή είναι ίδια με την (4.21), όπου το ν_i δε χρησιμοποιείται και $C_i > C_i^0$ (δηλαδή $P_i > P_0$) απορρίπτεται χωρίς να χάνεται η βελτιστοποίηση.

Όταν αντιθέτως $C_j = 0$ ($< C_j^0$), έχουμε $\mu_j \geq 0$ και $\nu_j = 0$ η (4.33) γίνεται:

$$\frac{\Lambda'}{a_j^2} = nF_j^{n-1} + \mu_j \geq nF_j^{n-1} \quad (4.35)$$

Από τις σχέσεις (4.34), (4.35) με κοινό Λ' έχουμε $na_i^2(F_i - C_i)^{n-1} > \Lambda' \geq na_j^2 F_j^{n-1}$ η οποία δίνει:

$$a_i^{\frac{2}{n-1}} F_i > a_i^{\frac{2}{n-1}} (F_i - C_i) > a_j^{\frac{2}{n-1}} F_j \quad \text{για } n > 1$$

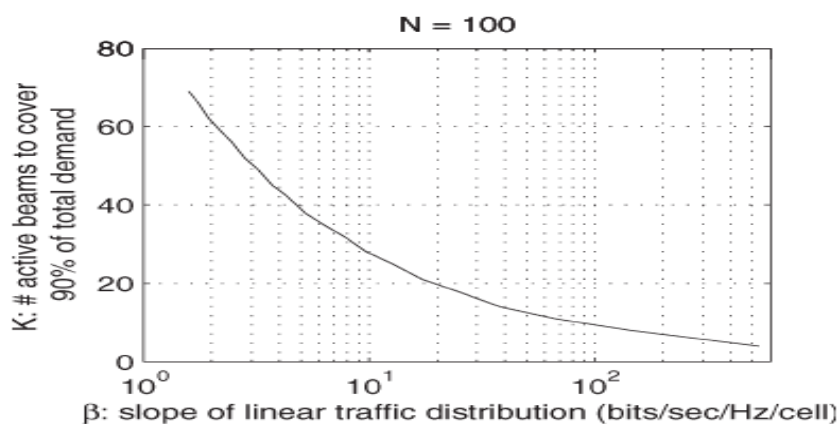
όπου οι δείκτες i, j αντιπροσωπεύουν $\{C_i > 0\}$ και $\{C_j = 0\}$ αντίστοιχα. Συνεπώς το

$a_j^{\frac{2}{n-1}} F_j$ μπορεί να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο όταν $C_j = 0$. Αυτό αποδεικνύει το

επιχείρημα ότι πρέπει να παρέχουμε διαθέσιμες ενεργές δέσμες στα κελιά με τη μεγαλύτερη εξασθένηση ζήτησης, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η απόκλιση της

συνάρτησης κόστους για $n > 1$. Στα K κελιά με την υψηλότερη εξασθένιση της ζήτησης, η ισχύς κατανέμεται με τον τρόπο που έχει ήδη περιγραφεί (σχήμα 4.7) χρησιμοποιώντας την κατάλληλη συνάρτηση κόστους. Έχοντας διαφορετικές διαλείψεις στα κανάλια, καθώς η τάξη n , της συνάρτησης κόστους αυξάνεται, η διαφορά μεταξύ των βαρών εξασθένισης των καναλιών καθίσταται λιγότερο σημαντική $[(a_i / a_j)^{2/n-1} \rightarrow 1$, καθώς $n \rightarrow \infty$, για $a_i > a_j$] και μόνο οι απαιτήσεις της κίνησης κυριαρχούν. Όπως αναλύθηκε προηγουμένως, συναρτήσεις κόστους μεγαλύτερης τάξης καλύτερων παρέχουν μεγαλύτερη αναλογική δικαιοσύνη σύμφωνα με τις απαιτήσεις της κίνησης και να επηρεάζονται τόσο από τις συνθήκες του καναλιού. Από την άλλη πλευρά, συναρτήσεις κόστους χαμηλότερης τάξης δίνουν μεγαλύτερη συνολική χωρητικότητα, κάνοντας τα βάρη της εξασθένισης περισσότερο σημαντικά $[(a_i / a_j)^{2/n-1} \rightarrow \infty$ καθώς $n \rightarrow 1$, για $a_i > a_j$] και εστιάζοντας περισσότερο στις συνθήκες του καναλιού.

Το σχήμα 4.11 δείχνει τον αριθμό των ενεργών δεσμών που απαιτούνται για να καλύψουν το 90% της συνολικής ζήτησης 100 κελιών, η οποία ακολουθεί γραμμική κατανομή. Όσο πιο απότομη είναι η κλίση της καμπύλης, τόσο λιγότερες δέσμες απαιτούνται εξαιτίας της ανομοιομορφίας της κίνησης. Έτσι, μια λογική λύση είναι να έχουμε ένα μικρότερο αριθμό ενεργών δεσμών και να τις μοιράζουμε αποτελεσματικά, με κάποιο χρονοπρογραμματισμό, στα κελιά. Επιπλέον, δεν χρειάζονται πολλοί πομποί με έναν μικρό αριθμό ενεργών δεσμών, και με τον τρόπο αυτό το σύστημα μπορεί να είναι πιο αποδοτικό οικονομικά και απλούστερο.



Σχήμα 4.11: αριθμός των ενεργών δεσμών που απαιτούνται για να καλύψουν το 90% της συνολικής ζήτησης και να εξυπηρετήσουν $N=100$ κελιά συναρτήσει της καμπύλης της γραμμικής κατανομής της κίνησης .

Με αυτή την (άπληστη) "greedy" πολιτική, κελιά με μικρή ζήτηση μπορεί να μη λάβουν πόρους για πολύ καιρό. Για το λόγο αυτό, πρέπει να τροποποιηθεί η πολιτική προγραμματισμού της κατερχόμενης δέσμης (downlink beam) ώστε να κατανέμονται κάποιες χωρητικότητες σε κελιά με μικρή ζήτηση, αν η καθυστέρηση ενός κελιού είναι μεγαλύτερη από κάποιο καθορισμένο κατώφλι.

Εάν υποθεθεί ότι έχουμε μια πολύ γρήγορη τεχνολογία μεταγωγής της δέσμης της κεραίας χωρίς σημαντικό κόστος δαπανών, μπορούμε, διαιρώντας το χρόνο, να μοιράσουμε αποτελεσματικά έναν μικρό αριθμό στενών δεσμών σε πολλά κελιά στην περιοχή εξυπηρέτησης του δορυφόρου. Η τρέχουσα δορυφορική τεχνική μεταγωγής μπορεί να είναι της τάξης των *μsec* για την κατανομή ισχύος και την μεταγωγή δεσμών, χρησιμοποιώντας ενισχυτές ισχύος στερεάς κατάστασης (SSPA) για να τροφοδοτήσει περίπου 10–100 στοιχεία του πίνκα μιας συμφασικής κεραίας αν παρέχονται εκ των προτέρων οι συνθήκες και οι μεταβλητές. Στο μέλλον, αναμένεται ότι μια τέτοια γρήγορη τεχνολογίας μεταγωγής θα εφαρμόζεται σε πολύ μεγαλύτερης κλίμακας κεραία (1000-100000 στοιχεία και 100-1000 δέσμες), ώστε να υποστηρίζει μικρές δέσμες σε ζώνες υψηλών συχνοτήτων. Η κατανομή ενεργών δεσμών αρκετά μακριά η μια από την άλλη σε κάθε χρονική σχισμή, θα περιορίσει το πρόβλημα των παρεμβολών μεταξύ των δεσμών. Η πολιτική της κατανομής της ισχύος όπως και ο προγραμματισμός για το ποιές δέσμες θα είναι ενεργές, πρέπει να βασίζονται στην κατανομή της κίνησης, τις συνθήκες του διαύλου και στους περιορισμούς της καθυστέρησης.

Η ανομοιομορφία και η διακύμανση της κίνησης διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στις επιδόσεις των πραγματικών συστημάτων. Μια κατανομή ισχύος σε αυτό το είδος της κίνησης και μια μέθοδος προγραμματισμού των δεσμών είναι ζωτικής σημασίας για ένα δορυφορικό σύστημα που εξυπηρετεί εκρηκτική (bursty) και απρογραμματίστη κίνηση δεδομένων. Όσο λιγότερο ομοιόμορφη είναι η κίνηση, τόσο μεγαλύτερο είναι κέρδος ισχύος που μπορεί να επιτευχθεί. Επίσης τόσο μικρότερος είναι ο αριθμός των ενεργών δεσμών που απαιτούνται, ώστε να παρέχουν, προσαρμοστικά, στα περισσότερα (λιγότερα) απαιτητικά κελιά περισσότερη (λιγότερη) ισχύ και ενεργές δέσμες. Όταν η κίνηση σε κάθε κελί αυξάνεται ή υποχωρεί, τα κελιά μπορούν να σαρώνονται διαδοχικά σε όλη την περιοχή κάλυψης, προκειμένου να ικανοποιήσουν τη ζήτηση. Η έννοια της διακύμανσης της κίνησης θα πρέπει να συνδυαστεί με μια δυναμική δρομολόγηση και μια πολιτική ελέγχου της

ροής και της συμφόρησης της κίνησης στα επίγεια δορυφορικά δίκτυα. [10]

4.11 ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΥΡΙΣΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ (heuristic method)

Οι δορυφόροι πολλαπλών δεσμών πρέπει να είναι σε θέση να διανέμουν δυναμικά τη χωρητικότητα και να αυξάνουν το ρυθμό εξυπηρέτησης (throughput), διότι οι ενσωματωμένοι πόροι (onboard resources) του δορυφόρου (όπως ισχύς, εύρος ζώνης, πομποί, δέκτες και δέσμες) είναι περιορισμένοι και ακριβοί. Για το λόγο αυτό είναι πολύ σημαντικό οι πόροι αυτοί να μοιράζονται αποδοτικά ανάμεσα σε όσο το δυνατόν περισσότερους χρήστες.

Επί του παρόντος, τα συμβατικά συστήματα παρέχουν την πλεονάζουσα σταθερή χωρητικότητα, ώστε ο δορυφόρος πολλαπλών δεσμών να εγγυάται την κάλυψη όποιων απαιτήσεων των χρηστών, με πλήρη δέσμευση των πόρων. Ωστόσο, εκτός από την εγγυημένη ποιότητα υπηρεσιών (QoS) οι δορυφορικοί πάροχοι υπηρεσιών αναμένουν να αυξήσει τα έσοδα από την εισαγωγή περισσότερων συνδρομητών. Συνεπώς η μέγιστη χρησιμοποίηση των περιορισμένων πόρων καθίσταται αναγκαία.

Όπως μελετήθηκε και προηγουμένως στόχος είναι η βέλτιστη κατανομή του εύρους ζώνης μεταξύ των πολλαπλών δεσμών. Για να επιτευχθεί αυτό, θα διατυπωθεί το γενικό πρόβλημα βελτιστοποίησης της κατανομής ισχύος σε πολλαπλές δέσμες. Κάνοντας κάποιες επιμέρους υποθέσεις και χρησιμοποιώντας την ευριστική μέθοδο (heuristic method) για την αναζήτηση του πολλαπλασιαστή Lagrange, θα προσπαθήσουμε να επιτύχουμε τη βέλτιστη κατανομή ισχύος για κάθε δέσμη ώστε να τηρηθεί ο περιορισμός της συνολικής ισχύος καθώς και ο περιορισμός των επιμέρους συμφωνιών σε επίπεδο υπηρεσιών (Service Level Agreement, SLA) ελαχιστοποιώντας τη δέσμευση των πόρων. [14]

4.11.1 ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Ο σχεδιασμός του κάθε δορυφορικού σύστημα βασίζεται σε δύο κύριους στόχους:

- την ικανοποίηση ενός ελάχιστου σηματοθορυβικού λόγου (Signal to Noise, SNR) για μια συγκεκριμένη περίοδο.

— τη μεταφορά της μέγιστης προσοδοφόρας κίνησης με ένα ελάχιστο κόστος.

Προκειμένου να επιτευχθεί υψηλό SNR κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες, κάθε δορυφορική ζεύξη μπορεί να σχεδιαστεί με πολύ μεγάλες κεραίες και υψηλό κόστος. Ο στόχος ενός καλά σχεδιασμένου συστήματος είναι να επιτευχθεί ο καλύτερος συμβιβασμός μεταξύ της απόδοσης του συστήματος και του κόστους του. Χωρίς απώλεια της γενικότητας, κάνουμε τις εξής υποθέσεις όπως και στην περιγραφή του προηγούμενου συστήματος: (i) κάθε δέσμη είναι εξοπλισμένη με έναν ατομικό αναμεταδότη, που μεταφέρει ένα σήμα μόνο για την εν λόγω δέσμη, (ii) το σύνολο των δεκτών (RCTs) χρησιμοποιούν κεραίες ίδιου μεγέθους. Κάνουμε όμως και μια νέα υπόθεση, ότι λαμβάνοντας υπόψη το κέρδος της κεραίας του αναμεταδότη, το κέρδος της κεραίας του δέκτη και την απώλεια διαδρομής ελευθέρου χώρου, υπάρχει ένας παράγοντας αναλογίας γ μεταξύ της εκπεμπόμενης ισχύος P_i και της λαμβανόμενης Pr_i , δηλαδή $P_i = \gamma Pr_i$, εντός της i δέσμης. Έτσι, οι αντίστοιχοι σηματοθοριβικοί λόγοι SNR_i προσεγγίζονται ως $SNR_i = (Pr_i / W) / N_0 = P_i / (\gamma WN_0)$, όπου N_0 είναι η πυκνότητα ισχύος του θορύβου και W είναι το εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται. Χρησιμοποιώντας το σύστημα διαίρεσης χρόνου στη μετάδοση Gaussian καναλιών, η περιορισμένη χωρητικότητα Shannon δίνεται από τη σχέση:

$$C_i = W \log_2 \left(1 + \frac{P_i}{\gamma WN_0} \right) \quad (4.36)$$

Με βάση τη σχέση μεταξύ της χωρητικότητα C_i και της εκπεμπόμενης ισχύος P_i , μπορούμε να ενισχύσουμε την χωρητικότητα C_i με την αύξηση της ισχύος P_i , προκειμένου να ικανοποιήσουμε τη στιγμιαία ζήτηση κίνησης D_i με ένα κάτω όριο D_i^{\min} και ένα άνω όριο D_i^{\max} . Ωστόσο, το όριο της συνολικής ισχύος που μπορεί να παρέχει δορυφόρος περιορίζει τη συνολική χωρητικότητα. Για να αξιοποιήσουμε αποτελεσματικά τη συνολική χωρητικότητα και να ικανοποιήσουμε τις απαιτήσεις κίνησης όσο το δυνατόν περισσότερων χρηστών, θα θέλαμε να ελαχιστοποιηθεί όπως και πριν η συνάρτηση κόστους της διαφοράς μεταξύ $\{C_i\}$ και $\{D_i\}$ σε όλες τις δέσμες, για $i = 1, 2, \dots, n$. Δεδομένης της απόκλισης μεταξύ της πραγματικής χωρητικότητας C_i' και της χωρητικότητας Shannon C_i , θα υιοθετήσουμε ένα 10% περιθώριο ασφαλείας (δηλαδή $C_i \geq 1,1 D_i^{\min}$), ώστε να εξασφαλίζεται η ελάχιστη ζήτηση κίνησης D_i^{\min} και να καλύπτεται η απαίτηση για ελάχιστο SNR. Ως εκ

τούτου, το πρόβλημα κατανομής της ισχύος για μια συνάρτηση κόστους δευτέρας τάξης, διατυπώνεται ως εξής:

$$\text{minimize } \sum_{i=1}^n (D_i - C_i)^2 \quad (4.37)$$

$$\text{ώστε } 1.1D_i^{\min} \leq C_i \leq D_i \leq D_i^{\max}, \forall i \quad (4.38)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν την εξίσωση (4.36), μπορούμε να ξαναγράψουμε τον περιορισμό (4.38)

$$1.1D_i^{\min} \leq C_i = W \log_2 \left(1 + \frac{P_i}{\gamma W N_o} \right) \leq D_i \leq D_i^{\max}$$

Ο περιορισμός (4.38) υπαινιγμοί ότι δεν παράγεται περισσότερη ισχύ από αυτή που απαιτείται από τη ζήτηση κίνησης. Συμπεριλαμβάνοντας και το περιορισμό της συνολικής ισχύος (4.5) η συνάρτηση Lagrange δίνεται από τη σχέση:

$$J(P_i) = \sum_{i=1}^n (D_i - C_i)^2 + \lambda \left(\sum_{i=1}^n P_i - P_{tot} \right)$$

Διαφορίζοντάς τη ως προς P_i , θα πρέπει να ικανοποιείται η ακόλουθη εξίσωση:

$$D_i - W \log_2 \left(1 + \frac{P_i}{\gamma W N_o} \right) = \frac{\lambda \gamma N_o \ln 2}{2} \left(1 + \frac{P_i}{\gamma W N_o} \right) \quad (4.39)$$

Εδώ θέλουμε να βρούμε μια λύση κλειστής μορφής για το P_i χρησιμοποιώντας μια διαισθητική προσεγγιστική μέθοδο για διευκρινιστεί η σχέση μεταξύ των απαιτήσεων της κίνησης και της ισχύος των δεσμών. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την ακόλουθη ευριστική μέθοδο για να βρούμε τη βέλτιστη ισχύ P_i από τη μη γραμμική σχέση (4.39), έχοντας προσδιορίσει τον κατάλληλο πολλαπλασιαστική Lagrange, λ .

$$\text{I. Έστω } f_1(P_i) = D_i - W \log_2 \left(1 + \frac{P_i}{\gamma W N_o} \right)$$

$$\text{και } f_2(P_i) = \frac{\lambda \gamma N_o \ln 2}{2} \left(1 + \frac{P_i}{\gamma W N_o} \right)$$

II. Λαμβάνοντας $D_{sum} = \sum_{i=1}^n D_i$. Συγχωνεύουμε το D_{sum} και την P_{tot} σε μια δέσμη για

να λάβουμε μια αρχική τιμή λ_0 για το λ , δηλαδή :

$$\lambda = \lambda_0 = \left[D_{sum} - W \log_2 \left(1 + \frac{P_{tot}}{W N_o} \right) \right] / \left[\frac{N_o \ln 2}{2} \left(1 + \frac{P_{tot}}{W N_o} \right) \right]$$

Χρησιμοποιώντας δυαδική αναζήτηση ως εμπειρικό μέθοδο, θέτουμε $\lambda_{min} = \lambda_0 / 2$ και $\lambda_{max} = 2\lambda_0$. Δοκιμάζοντας πολλά διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης, διαπιστώθηκε ότι το βέλτιστο λ βρίσκεται στην περιοχή μεταξύ λ_{min} και λ_{max} .

III. Αυξάνουμε σταδιακά το P_i με $P_i \in [P_{tot} D_i / (10D_{sum}), P_{tot}]$ μέχρι το τετραγωνικό λάθος μεταξύ $f_1(P_i)$ και $f_2(P_i)$ να είναι αρκετά αμελητέο ώστε να λάβουμε το βέλτιστο P_i^{opt} .

IV. Επαναλαμβάνουμε το βήμα III για κάθε άλλο P_i .

V. Τώρα έχουμε $P_{sum} = \sum_{i=1}^n P_i^{opt}$. Αν $P_{sum} \cong P_{tot}$ και $P_{sum} \leq P_{tot}$, έχουμε τη βέλτιστη ισχύ P_i .

V.A. Αν $P_{sum} < P_{tot}$, τότε θέτουμε $\lambda_{max} = \lambda$ και $\lambda = (\lambda_{min} + \lambda_{max})/2$. Μετάβαση στο βήμα III.

V.B. Αν $P_{sum} > P_{tot}$, τότε θέτουμε $\lambda_{min} = \lambda$ και $\lambda = (\lambda_{min} + \lambda_{max})/2$. Μετάβαση στο βήμα III.

VI. Αν $C_i \geq 1.1D_i^{\min}$ για κάθε i δέσμη, τότε βρίσκουμε τελικά τη βέλτιστη ισχύ P_i και πληρούνται όλες οι ελάχιστες απαιτήσεις κίνησης από όλες τις δέσμες.

VII. Εάν $C_j \leq 1.1D_j^{\min}$ για κάποια j δέσμη, τότε θέτουμε $C_j = 1.1D_j^{\min}$. Αφαιρούμε το C_j και το D_j από το σύνολο της βελτιστοποίησης (δηλαδή, μειώνουμε τον αριθμό n των βέλτιστων δεσμών). Μετάβαση στο βήμα (2).

Παρόμοια ευριστική μέθοδος αναζήτησης έχει εφαρμοστεί αποτελεσματικά σε βιομηχανική διαδικασία ελέγχου και στον έλεγχο της κίνησης του Διαδικτύου. Η βέλτιστη λύση της P_i μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε κυμαινόμενη ζήτηση κίνησης D_i . Αφού η βέλτιστη ισχύς P_i έχει κατανεμηθεί σε κάθε δέσμη, έχει επιτευχθεί ο στόχος

της ελαχιστοποίησης του $\sum_{i=1}^n (D_i - C_i)^2$, ενώ παράλληλα πληρούνται οι επιμέρους

SLA κάθε δέσμης (δηλαδή $C_i \geq 1,1 D_i^{\min}$). [14]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Σύστημα ανάθεσης πόρων, για παροχή ποιότητας υπηρεσιών σε κινητά δορυφορικά δίκτυα πολλαπλών δεσμών

5.1 ΚΙΝΗΤΕΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

Μέχρι τώρα μελετήθηκε η κατανομή των πόρων σε σταθερές δορυφορικές υπηρεσίες (Fixed Satellite Services, FSS), δηλαδή υπηρεσίες μεταξύ συγκεκριμένων θέσεων στην επιφάνεια της γης μέσω ενός ή περισσότερων δορυφόρων. Οι θέσεις αυτές μπορεί να είναι κάποιο ειδικό σταθερό σημείο ή οποιοδήποτε σταθερό σημείο εντός συγκεκριμένων περιοχών. Εδώ, λοιπόν, εξετάζεται η κατανομή των πόρων σε κινητές δορυφορικές υπηρεσίες (Mobile Satellite Services, MSS). Οι υπηρεσίες αυτές διεξάγονται ανάμεσα σε κινητούς επίγειους σταθμούς και έναν ή περισσότερους διαστημικούς σταθμούς, ή ανάμεσα σε κινητούς επίγειους σταθμούς (ξηράς, αέρα και θάλασσας) μέσω δορυφόρων. . Οι αντίστοιχες κατηγορίες υπηρεσιών που έχουν θεσπιστεί από την ITU για καθένα από τα περιβάλλοντα αυτά είναι η Κινητή Υπηρεσία Ξηράς μέσω Δορυφόρου (Land Mobile Satellite Service, LMSS), η Κινητή Ναυτική Υπηρεσία μέσω Δορυφόρου (Maritime Mobile Satellite Service, MMSS) και η Κινητή Αεροναυτική Υπηρεσία μέσω Δορυφόρου (Aeronautical Mobile Satellite Service, AMSS).

Τα κινητά δορυφορικά συστήματα επικοινωνίας δε θα αντικαταστήσουν τα υπάρχοντα κυβελωτά συστήματα επικοινωνίας αλλά θα επεκτείνουν την περιοχή κάλυψης των κινητών επικοινωνιών σε ολόκληρη τη γη, ακόμα και στις απομακρυσμένες και δυσπρόσιτες περιοχές. Επίσης μπορούν να λειτουργήσουν σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης (φυσικές καταστροφές), όπου η επικοινωνία με οποιοδήποτε άλλο μέσο είναι αδύνατη. Προσφέρουν διάφορες υπηρεσίες όπως είναι οι: Δορυφορική Υπηρεσία Περιαγωγής (Satellite Roaming Service), Δορυφορική

Τηλεφωνική Υπηρεσία (Satellite Telephone Service) και Επικοινωνίες Στόλου (Fleet Communications). Η τελευταία κατηγορία υπηρεσιών περιλαμβάνει το ιδιαίτερα δημοφιλές σύστημα προσδιορισμού της ακριβούς γεωγραφικής θέσης ενός κινητού GPS (Global Positioning System).

Η δορυφορική επικοινωνία μεταξύ των κινούμενων επίγειων σταθμών είναι πολύ διαφορετική από αυτή των σταθερών σταθμών. Η κατάσταση ενός χρήστη που κινείται σχετικά με το δορυφόρο (GEO δορυφορικά συστήματα) ή ενός δορυφόρου που κινείται σχετικά με το χρήστη (non-GEO δορυφορικά συστήματα), προκαλεί στη σύνδεση δυναμική συμπεριφορά. Αυτό το γεγονός, εισάγει νέες μορφές εξασθένισης που δεν μπορούν να προβλεφθούν με τον ίδιο τρόπο όπως η εγασθένιση λόγω βροχής.

Η εποχή των συστημάτων κινητής δορυφορικής επικοινωνίας (Mobile Satellite Communications, MSC) άρχισε με τον πρώτο MARISAT δορυφόρο που ξεκίνησε σε γεωστατική τροχιά πάνω από τον Ειρηνικό Ωκεανό το 1976 και μπορούσε να παρέχει επικοινωνίες μεταξύ πλοίων και σταθμών ξηράς. Δύο ακόμη δορυφόροι ξεκίνησαν το 1976 και βρίσκονταν πάνω από περιοχές του Ατλαντικού και του Ινδικού Ωκεανού. Ο συνδυασμός του υψηλού κόστους και του μεγάλου εξοπλισμού απαγόρευε στα MSC συστήματα να απευθυνθούν στην ευρύτερη αγορά των κινητών προσωπικών επικοινωνιών. Ωστόσο, η πρόοδος που σημειώνεται κατά τη διάρκεια των τελευταίων δέκα ετών στη δορυφορική τεχνολογία, έχει οδηγήσει στη βιωσιμότητα των MSC συστημάτων καταλαμβάνοντας μέρος της αναπτυσσόμενης αγοράς στις προσωπικές κινητές επικοινωνίες.

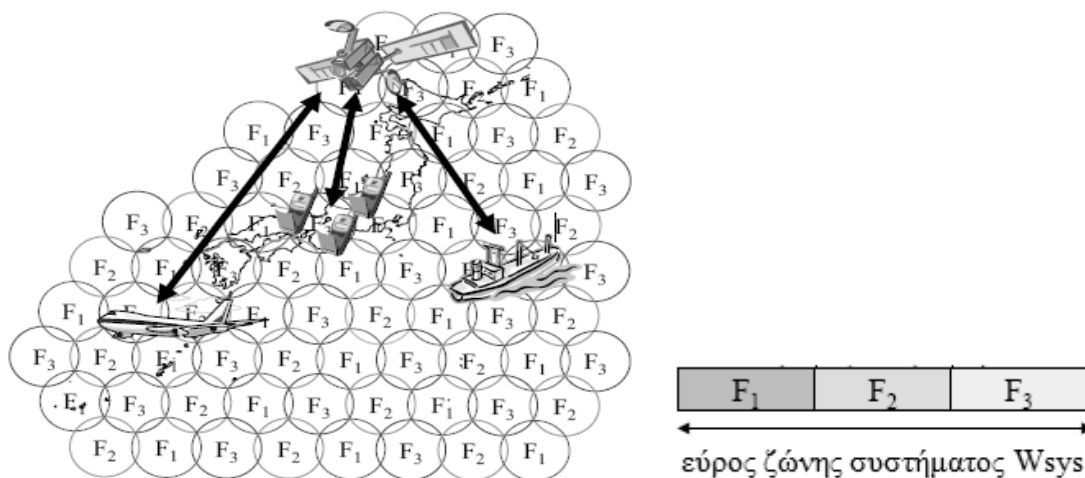
Οι κινητές υπηρεσίες με γεωστατικούς (GEO) δορυφόρους παρέχονται από το Inmarsat σύστημα με 11 GEO δορυφόρους, καθένας από τους οποίους έχει διαφορετικό αριθμό δεσμών ανάλογα με την κάλυψη που παρέχει, για παράδειγμα οι δορυφόροι ευρείας κάλυψης έχουν 4-6 δέσμες. Επίσης στις ΗΠΑ και τον Καναδά οι υπηρεσίες παρέχονται από το MSAT-2 σύστημα με 1 δορυφόρο που έχει 6 δέσμες. Επίσης, υπάρχει και το σύστημα Thuraya με δυο δορυφόρους που μπορούν να έχουν 200 δέσμες. Καλύπτει πάνω από 110 χώρες σε Ευρώπη, Αφρική και Ασία και παρέχει δορυφορικές υπηρεσίες τηλεφώνου μέσω ενός δυναμικού κινητού τηλεφώνου, το οποίο περιλαμβάνει έναν δέκτη GPS για τον καθορισμό της δέσμης από την οποία εξυπηρετείται.

Οι κινητές υπηρεσίες με μη γεωστατικούς (non-GEO) δορυφόρους έχουν μειωμένη καθυστέρηση διάδοσης κι έτσι πλεονεκτούν στις διαδραστικές φωνητικές

επικοινωνίες. Οι υπηρεσίες αυτές προσφέρονται κυρίως από τα συστήματα Iridium, με 66 LEO δορυφορικούς επαναλήπτες που ο καθένας έχει 48 δέσμες και Globalstar, με 48 LEO δορυφορικούς επαναλήπτες που ο καθένας έχει 16 δέσμες, καθώς και από άλλα συστήματα. [2]

5.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΔΕΣΜΩΝ ΣΤΙΣ ΚΙΝΗΤΕΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

Για την ανάπτυξη στο μέλλον, κινητών δορυφορικών συστημάτων υψηλής ποιότητας και μεγάλης χωρητικότητας, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα πολλαπλών δεσμών που να μπορεί να αντεπεξέλθει σε μεγάλη επαναχρησιμοποίηση των συχνοτήτων. Στο σχήμα 5.1 δίνεται μια γενική εικόνα του συστήματος. Η ιαπωνική οικονομική ζώνη καλύπτεται από 69 δέσμες. Για να διευρυνθεί ουσιαστικά το χρήσιμο εύρος ζώνης συχνοτήτων, το εύρος ζώνης συχνοτήτων κάθε δέσμης πρέπει να επαναχρησιμοποιηθεί για την αποφευχθούν οι επικαλύψεις μεταξύ συνεχόμενων δεσμών. Σύμφωνα με διάφορες εκτιμήσεις, για την επίτευξη συνολικής χωρητικότητας 1 Gbps, πρέπει να εφαρμοστεί στο σύστημα κατανομής, μια ομάδα κυψελών (cluster) που απαρτίζεται από τρεις δέσμες. Σε αντίθεση με τα άλλα μοντέλα ομάδων κυψελών, όπως αυτά των τεσσάρων ή των επτά δεσμών, στο cluster των τριών δεσμών εντοπίζεται η υψηλότερη επαναχρησιμοποιούμενη συχνότητα καθώς επίσης και οι μεγαλύτερες παρεμβολές μεταξύ των δεσμών. Για να κατασκευαστεί ένα cluster τριών δεσμών, το εύρος ζώνης του συστήματος W_{sys} χωρίζεται σε τρεις περιοχές συχνοτήτων F_1, F_2, F_3 . [15]



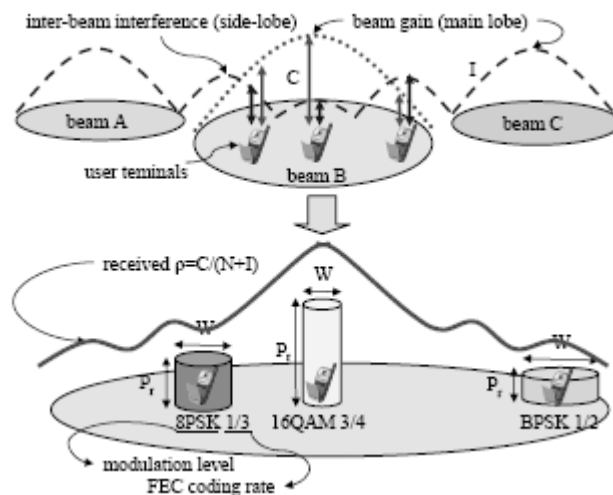
Σχήμα 5.1: Επόμενη γενιάς δορυφορικό σύστημα κινητών επικοινωνιών
Διπλωματική Εργασία

5.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΡΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Οι χρήστες του συστήματος θα έχουν διαφορετικά περιβάλλοντα, όπως το μέγεθος κεραίας του δέκτη, το ρυθμό μετάδοσης bit, την απαιτούμενη QoS, τη διάδοση του σήματος που οφείλεται στο κέρδος της δορυφορικής κεραίας ή τις παρεμβολές λόγω της τοποθεσίας. Συνεπώς ένα σύστημα κατανομής των πόρων θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα διαφορετικά περιβάλλοντα των χρηστών. Το σύστημα αυτό διαχειρίζεται το εύρος ζώνης W και την πυκνότητα ισχύος P_r ταυτόχρονα, βασιζόμενο σε μια προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση (Adaptive Modulation and Coding, AMC). Ορίζεται το ρ από τον τύπο:

$$\rho = \frac{C}{N + I} \quad (5.1)$$

όπου C είναι η ισχύς ενός φέροντος που δίνεται από τον τύπο $C = P_r W$, N είναι ο θερμικός θόρυβος, και I είναι η παρεμβολή μεταξύ των δεσμών. Το ρ που έλαβε κάθε χρήστης διαφέρει ανάλογα με την τοποθεσία του χρήστη, επειδή το κέρδος της δέσμης και τα επίπεδα παρεμβολής αλλάζουν εντός της δέσμης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2



Σχήμα 5.2: Διάδοση σήματος σε σύστημα πολλαπλών δεσμών και κατανομή των πόρων

Κατά την προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση (AMC), η φασματική απόδοση n , που καθορίζεται από τον FEC (forward error correction) ρυθμό κωδικοποίησης και τον αριθμό των επιπέδων διαμόρφωσης, επιλέγεται

κατάλληλα σύμφωνα με την ρ που έλαβε. Στη συνέχεια, όταν οι χρήστες απαιτούν ρυθμό μετάδοσης bit R_{req} , το εύρος ζώνης W κατανέμεται ως:

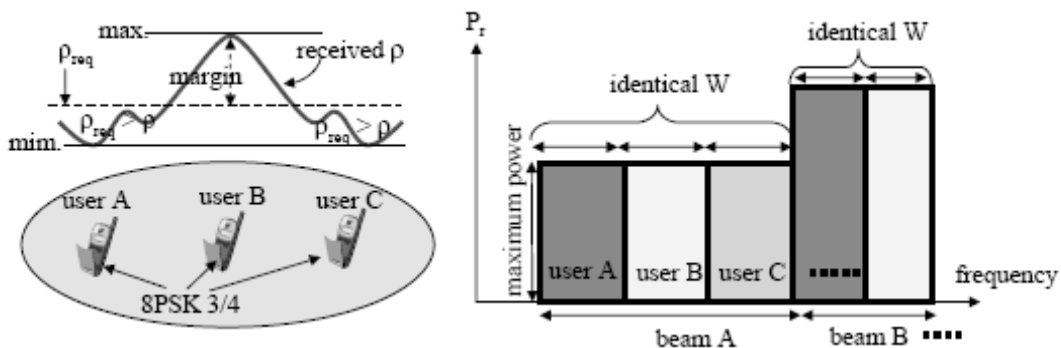
$$W = \frac{R_{req}}{\eta} \quad (5.2)$$

Ως αποτέλεσμα, το σύστημα κατανέμει τους διάφορους πόρους της κάθε δέσμης, όπως το W , P_r και η , σε κάθε χρήστη ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον διάδοσης του σήματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2. Θεωρώντας ότι η P_r δεν πρέπει να μεταβάλλεται εντός μιας δέσμης διότι προκαλεί απρόβλεπτη παρεμβολή και υποβάθμιση της ποιότητας υπηρεσιών στις άλλες δέσμες, καταφέρνουμε με τη μέθοδο αυτή να διαχειριστούμε τη φασματική απόδοση η , ενώ προσδιορίζουμε το εύρος ζώνης W χρησιμοποιώντας τη (5.2).

Στη συνέχεια προτείνονται δυο μέθοδοι βασισμένες σε σταθερή πυκνότητα ισχύος (Fixed Power Density, FPD), με σταθερή φασματική απόδοση η και με μεταβλητή. [15]

A. FPD-F (FPD με σταθερή-fixed- η)

Αρχικά όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3, το λαμβανόμενο ρ για κάθε χρήστη υπολογίζεται όταν όλοι οι χρήστες μεταδίδουν με τη μέγιστη ισχύ τους. Στη συνέχεια, σε κάθε μια δέσμη προσδιορίζεται, σταθερά, το απαιτούμενο $\rho \equiv \rho_{req}$ λαμβάνοντας υπόψη ένα περιθώριο από το υψηλότερο ρ που λαμβάνεται. Κατά συνέπεια, η φασματική απόδοση η σε κάθε δέσμη είναι σταθερή, διότι η η καθορίζεται χρησιμοποιώντας τη σταθερά ρ_{req} . Τελικά, το εύρος ζώνης W κατανέμεται με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιεί το ρυθμό μετάδοσης bit, R_{req} , χρησιμοποιώντας τη (5.2).



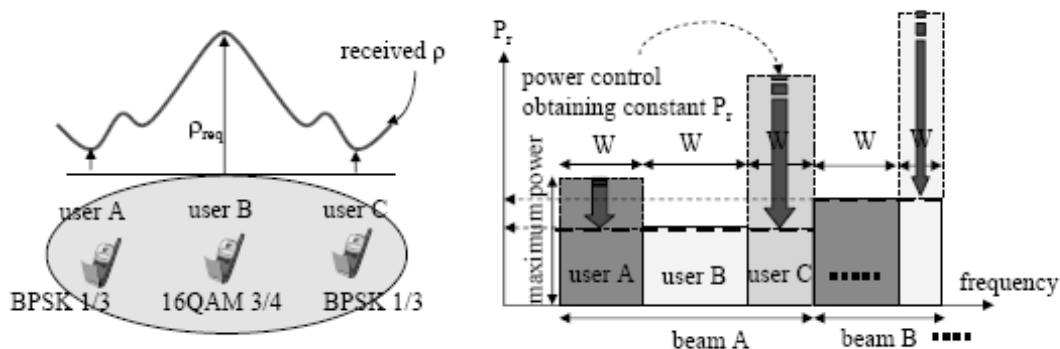
Σχήμα 5.3: Σύστημα FPD-F

Με τον τρόπο αυτό, η μέθοδος FPD-F τείνει να απλουστεύσει τη διαχείριση των πόρων, διότι όλοι οι χρήστες σε μια δέσμη έχουν ταυτόσημους πόρους, ανεξάρτητα από τη θέση τους. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα δεν χρειάζεται να γνωρίζει τις θέσεις των χρηστών ακόμη και όταν βρίσκονται σε κίνηση.

Ωστόσο, ο καθορισμός ενός υψηλότερου περιθωρίου μειώνει τη συνολική χωρητικότητα επικοινωνίας, διότι επιλέγεται η χαμηλότερη φασματική απόδοση. Το χαμηλότερο περιθώριο σημαίνει ότι περισσότεροι χρήστες είναι δυσρεστημένοι από την ποιότητα που προδιαγράφεται, επειδή το λαμβανόμενο ρ για κάποιους χρήστες δε φτάνει αυτό που απαιτούν ρ_{req} . Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3, το λαμβανόμενο ρ για τους χρήστες A και C είναι χαμηλότερο από το ρ_{req} .

B. FPD-V (FPD με μεταβλητή -variable- η)

Για την επίλυση του προβλήματος της μεθόδου FPD-F, η μέθοδος FPD-V μεταβάλλει τη φασματική απόδοση ανάλογα με την εκτιμώμενη ρ για κάθε χρήστη, όταν όλοι οι χρήστες μεταδίδουν με δική τους μέγιστη ισχύ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4. Συνεπώς, ένα διαφορετικό W διατίθεται σε κάθε χρήστη, βάσει της (5.2).



Σχήμα 5.4: Σύστημα FPD-V

Ωστόσο, όταν οι χρήστες μεταδίδουν με τη μέγιστη ισχύ, η πυκνότητα ισχύος σε μια δέσμη έχει τάση jagging, επειδή η πυκνότητα ισχύος εξαρτάται από το κατανομημένο εύρος ζώνης. Τέτοιο jagging της πυκνότητας ισχύος μπορεί να υποβαθμίσει την ποιότητα της επικοινωνίας, διότι ορισμένοι χρήστες, στους οποίους έχει κατανομηθεί υψηλότερη πυκνότητα ισχύος, παρεμβαίνουν περισσότερο με άλλους χρήστες, όπως προαναφέρθηκε. Για να αντισταθμίσει αυτό το φαινόμενο, η FPD-V ελέγχει την ισχύ.

Μειώνει την πυκνότητα ισχύος, έτσι ώστε να δίνει την ίδια πυκνότητα ισχύος σε μία δέσμη. Στη συνέχεια, αν το εκτιμώμενο ρ αλλάζει λόγω του ελέγχου ισχύος, το ρ επανεκτιμάται με τη χρήση ελεγχόμενης ισχύος, και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την απόκτηση ενός συγκλίνοντος ρ . Συνεπώς, διακυμάνσεις παρεμβολής δεν συμβαίνουν, και όλοι οι χρήστες είναι εγγυημένο ότι λαμβάνουν το ρ_{req} . Ωστόσο, αυτός ο έλεγχος ισχύος μειώνει ελαφρώς τη συνολική χωρητικότητα επικοινωνίας, επειδή η ισχύς ορισμένων χρηστών είναι μικρότερη από τη μέγιστη ισχύ. [15]

5.3 ΕΠΙΔΟΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΡΩΝ

Κάνουμε την υπόθεση ότι ορισμένοι χρήστες σε μια δέσμη συγκεντρώνονται στο άκρο της δέσμης και άλλοι χρήστες βρίσκονται κοντά στο κέντρο της δέσμης. Έτσι, το ποσοστό των χρηστών U_R στο άκρο της δέσμης, ορίζεται ως:

$$U_R = \frac{U_E}{U_T} \quad (5.3)$$

όπου U_E είναι ο αριθμός των χρηστών που βρίσκονται στο άκρο της δέσμης και U_T είναι ο συνολικός αριθμός των χρηστών της δέσμης.

Στη συνέχεια αξιολογείται η επίδοση των συστημάτων FPD-F, FPD-V με βάση τη χωρητικότητα επικοινωνίας και τη ρυθμαπόδοση για τη μετάδοση των πακέτων.

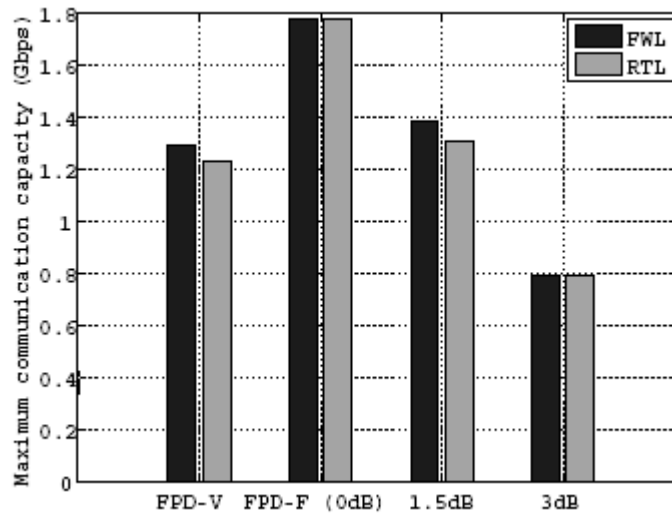
A. Χωρητικότητα επικοινωνίας (communication capacity)

Στο σχήμα 5.5 απεικονίζονται οι μέγιστες χωρητικότητες επικοινωνίας των δυο μεθόδων σύμφωνα με κάποιες προσομοιώσεις. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται για την προς τα εμπρός (από το δορυφόρο στο τερματικό του χρήστη) σύνδεση (FWL), καθώς και την προς τα πίσω (από το τερματικό του χρήστη προς το δορυφόρο) σύνδεση (RTL), αντίστοιχα. Στο FPD-F, τα περιθώρια έχουν επιλεγεί από 0, 1,5 έως και 3 dB. Η μέγιστη χωρητικότητα επικοινωνίας ορίζεται ως το άθροισμα του απαιτούμενου ρυθμού μετάδοσης bit R_{req} για όλους τους χρήστες, όταν το εύρος ζώνης και η ισχύς του συστήματος φτάσουν το όριο του συστήματος με την αύξηση του R_{req} . Οι απώλειες πληροφορίας που οφείλονται σε σφάλματα ψηφίων (bit errors) αγνοούνται, κατά τον καθορισμό της χωρητικότητας.

Το σχήμα που αντιστοιχεί στο FPD-F με 0 dB, δείχνει ότι προσφέρει υψηλότερη χωρητικότητα από τα άλλα dB επίπεδα, δεδομένου ότι θέτει την υψηλότερη φασματική απόδοση η για κάθε χρήστη.

Ωστόσο, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αυτό το χαμηλότερο περιθώριο σημαίνει ότι περισσότεροι χρήστες δεν λαμβάνουν ρ_{req} . Αυτό συμβαίνει επειδή στους χρήστες στην άκρη της δέσμης δίνεται υψηλότερο ρ_{req} από ό,τι αναμενόταν.

Το πιο σημαντικό, όμως, είναι ότι το σύστημα FPD-V επιτυγχάνει το στόχος μας, δηλαδή μια χωρητικότητα μεγαλύτερη του 1 Gbps και για τους δύο τύπους συνδέσεων (PWL,RWL). Ωστόσο το FPD-V τείνει να έχει μικρότερη ισχύ από το F-FPD.



Σχήμα 5.5: Χωρητικότητα επικοινωνίας

B. Επίδοση ρυθμαπόδοσης (throughput performance)

1) *Μετάδοση πακέτου*: Λαμβάνοντας υπόψη την ποιότητα της σύνδεσης για κάθε χρήστη, αξιολογείται η επίδοση της ρυθμαπόδοσης για την μετάδοση των πακέτων. Όταν P_S είναι το μήκος του πακέτου, T_B είναι το χρονικό διάστημα της μεταφοράς πακέτων, N_B είναι ο συνολικός αριθμός των δεσμών και B_R είναι το ποσοστό απώλειας πακέτων λόγω σφαλμάτων ψηφίων, το προσφερόμενο φορτίο O_L δίνεται από τη σχέση:

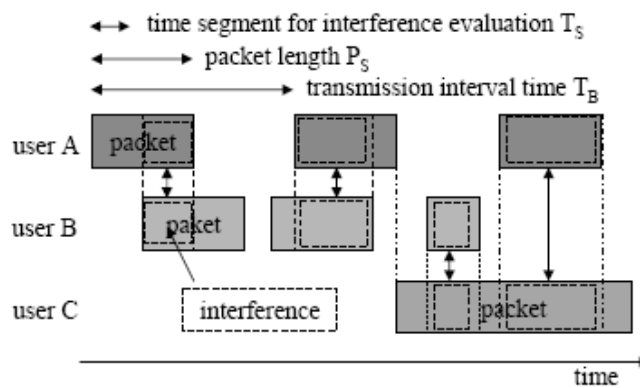
$$O_L = \frac{P_S U_T N_B}{T_B} \quad (4)$$

και η ρυθμαπόδοση T_P δίνεται από τη σχέση:

$$T_p = O_L B_R \quad (5)$$

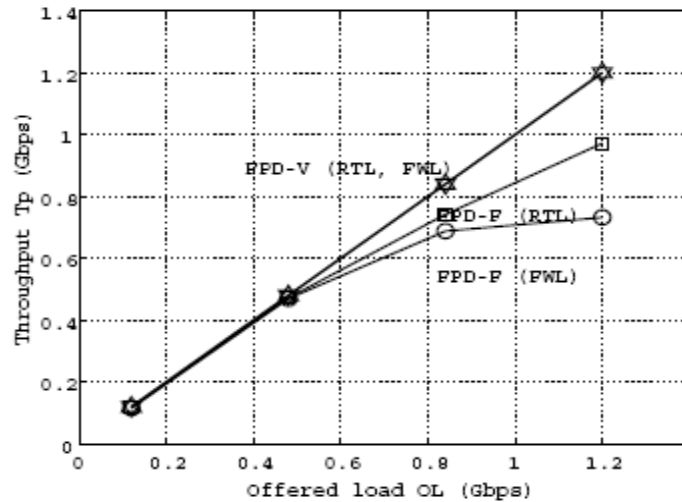
Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6, καθώς τα πακέτα από διαφορετικούς χρήστες παρεμβάλλονται μεταξύ τους, η παρεμβολή έχει χρονική εξάρτηση στο σύστημά μας. Εντούτοις, χρειάζεται ένα τεράστιο ποσό υπολογισμού για την εκτίμηση της αλλαγής της παρεμβολής κάθε χρονική στιγμή.

Συνεπώς, για να απλουστευθεί η προσομοίωση, κάθε περίοδος προσομοίωσης χωρίζεται σε πολλά τμήματα, προκειμένου να θεωρείται ότι η παρεμβολή είναι σταθερή σε μια χρονική στιγμή T_s .



Σχήμα 5.6: Παρεμβολή στη μετάδοση πακέτου

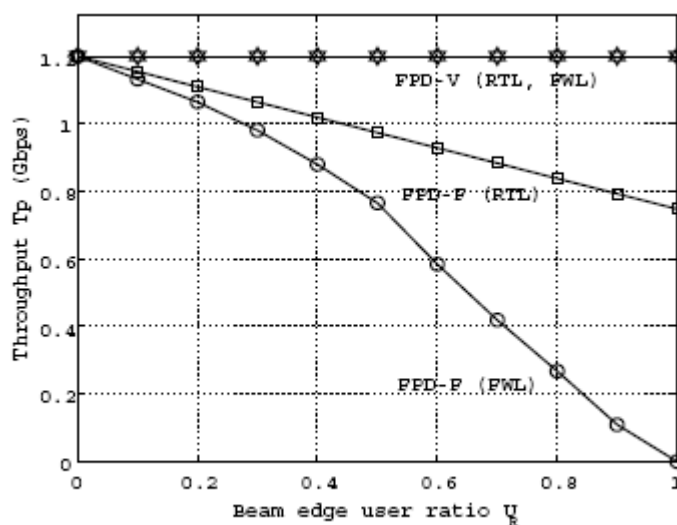
2) *Εξάρτηση από την κίνηση των πακέτων*: Το σχήμα 5.7 δείχνει τη ρυθμαπόδοση συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου και στις δύο συνδέσεις. Σε γενικές γραμμές, το μεγαλύτερο προσφερόμενο φορτίο O_L τείνει να υποβαθμίσει τη ρυθμαπόδοση T_p , επειδή περισσότερα πακέτα παρεμβαίνουν το ένα στο άλλο. Ωστόσο, η ανώτατη ρυθμαπόδοση μπορεί να επιτευχθεί εάν δεν υπάρχει απώλεια πακέτων. Η ανώτατη ρυθμαπόδοση δίνεται από τον τύπο σύμφωνα με τη σχέση (5.5) $T_p = O_L$, όταν $B_R = 0$. Το σχήμα δείχνει ότι το σύστημα FPD-V επιτυγχάνει μέγιστη ρυθμαπόδοση ανεξάρτητα από το προσφερόμενο φορτίο O_L , ενώ το σύστημα FPD-F υποβαθμίζει τη ρυθμαπόδοση όταν $O_L \geq 0,5$ Gbps. Αυτή η υποβάθμιση αυξάνεται όσο αυξάνεται και το προσφερόμενο φορτίο O_L . Το FPD-V προσφέρει κατ'ανώτατο όριο 1,3 φορές υψηλότερη απόδοση για RTL συνδέσεις και 1,7 φορές υψηλότερη απόδοση για FWL συνδέσεις, συγκριτικά με το FPD-F.



Σχήμα 5.7: Επίδοση της ρυθμαπόδοσης συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου O_L

3) *Εξάρτηση από την κατανομή των χρηστών*: Το σχήμα 5.8 δείχνει τη ρυθμαπόδοση για το ποσοστό των χρηστών στο άκρο της δέσμης. Στο FPD-F, όταν το ποσοστό των χρηστών U_R γίνεται πυκνότερο, αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών των οποίων το λαμβανόμενο ρ είναι χαμηλότερο από το επιθυμητό ρ_{req} .

Αντίθετα, το FPD-V παρέχει επαρκές επιθυμητό ρ_{req} ανεξάρτητα από την τοποθεσία του χρήστη. Με άλλα λόγια, ενώ η υποβάθμιση της ρυθμαπόδοσης του FPD-F αυξάνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό, U_R , των χρηστών στο άκρο της δέσμης, το FPD-V προσφέρει πάντα τη μέγιστη ρυθμαπόδοση και στις δύο συνδέσεις, ανεξάρτητα από U_R .



Σχήμα 5.8: Επίδοση της ρυθμαπόδοσης συναρτήσει του ποσοστού των χρηστών U_R στο άκρο της δέσμης

Όπως προκύπτει από τις προαναφερθείσες αξιολογήσεις, το σύστημα τμήματος, FPD-V αποδεικνύεται καλύτερο από το FPD-F στην επίτευξη της επιθυμητής χωρητικότητας. Επιτυγχάνει αυτή τη χωρητικότητα χωρίς να υποβαθμίζει τη ρυθμαπόδοση και είναι επίσης ανεξάρτητο από την κατανομή των χρηστών. Όλα αυτά δείχνουν ότι το FPD-V προσφέρει, αποτελεσματικά, την επιθυμητή ποιότητα υπηρεσιών, QoS, σε δορυφορικά συστήματα πολλαπλών δεσμών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Παναγιώτης Κωττής, Χρήστος Καυάλης, “Δορυφορικές Επικοινωνίες”, Εκδόσεις Τζιόλα, 2006.
- [2] B.R Elbert, “The satellite Communication Applications Handbook”, Artech House, 1997.
- [3] Zhili Sun, “Satellite Networking Principles And Protocols”, Wiley, 2005.
- [4] Κανελλόπουλος, “Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων σε Γήινο Περιβάλλον”, Εκδόσεις ΕΜΠ, 2001.
- [5] Louis J. Ippolito, Jr., “Satellite Communication Systems Engineering”, Wiley, 2008.
- [6] Διονυσία Πετράκη, “Πολιτικές ανάθεσης τηλεπικοινωνιακών πόρων σε δορυφορικά δίκτυα επικοινωνιών πολλαπλής προσπέλασης”, Διπλωματική εργασία, 2005.
- [7] G. Maral, M.Bousquet, “Satellite Communications Systems”, Wiley, 1993.
- [8] Paolo Barsocchi , Nedo Celandroni , Franco Davoli , Erina Ferro , Giovanni Giambene , Francisco Javier González Castaño , Alberto Gotta , Jose Ignacio Moreno , Petia Todorova, “Radio resource management across multiple protocol layers in satellite networks: A tutorial overview”, International Journal of Satellite Communications and Networking, 23:265–305, 2005.
- [9] Giovanni E. Corazza, “Digital Satellite Communicatios”, Springer, 2007.
- [10] J. P. Choi, V. W. S. Chan, “Optimum power and beam allocation based on traffic demands and channel conditions over satellite downlinks”, Wireless Communications, IEEE Transactions on Volume 4, Issue 6, pp. 2983 – 2993, November 2005
- [11] C.J. Black, P. Takats, M. Cote, and T. T. Le-Ngoc, “Data communication satellite system and method of carrying multimedia traffic,” U.S. Patent 6 377 561, Apr. 23, 2002. Spar Aerospace Ltd., Mississauga, CA.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [12] M. Neely, E. Modiano, and C. Rohrs, “Power Allocation and Routing in Multi-Beam Satellites with Time Varying Channels,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 11, no. 1, pp. 138–152, February 2003.
- [13] A. Ganti, “Transmission scheduling for wireless and satellite systems,” Ph.D. thesis, Dept. Elect. Eng. Comput. Sci., Massachusetts Inst. Technol., Cambridge, Feb. 2003.
- [14] Yang Hong, Srinivasan, A., Cheng, B., Hartman, L., Andreadis P., “Optimal Power Allocation for Multiple Beam Satellite Systems”, *Radio and Wireless Symposium, 2008 IEEE* Volume , Issue , 22-24, pp.823 – 826, Jan. 2008
- [15] Nakahira K., Kobayashi K., Ueba M., “A Resource Allocation Scheme for QoS Provision in Multi-beam Mobile Satellite Communication Systems”, *Wireless Communications and Networking Conference*, pp. 4011-4015, March 2007.