

Πανεπιστήμιο Μακεδονίας
ΠΜΣ Πληροφοριακά Συστήματα

Τεχνολογίες Τηλεπικοινωνιών & Δικτύων
Υπεύθυνος Καθηγητής: Α.Α. Οικονομίδης

Αλγόριθμοι για το Σχεδιασμό της τοπολογίας και τη διαχείριση των δορυφορικών δικτύων

Τέλη Βασιλική

Θεσσαλονίκη 2002

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι δορυφόροι αποτελούν πολύ σημαντικά συστατικά μέρη των συστημάτων επικοινωνίας λόγω κάποιων μοναδικών χαρακτηριστικών τους. Μερικές από τις ιδιότητες τους όπως η χαμηλού κόστους παγκόσμια κάλυψη, η μεγάλη δυναμικότητα, η ευρεία πρόσβαση, το μεγάλο εύρος ζώνης των συνδέσμων τους αποτελούν σημαντικά πλεονεκτήματα, που καθιστούν τους δορυφορικούς συνδέσμους ελκυστική λύση για την επίτευξη γρηγορότερης πρόσβασης στο Internet. Από την άλλη πλευρά κάποιες άλλες ιδιότητες των δορυφορικών συνδέσμων όπως η καθυστέρηση διάδοσης, η ύπαρξη λαθών λόγω θορύβου - χαμηλή ποιότητα των ασύρματων καναλιών αποτελούν σημαντικά μειονεκτήματα.

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια παρουσίαση των βασικών τεχνικών θεμάτων, που απασχολούν τα δορυφορικά δίκτυα και κάποιων αλγορίθμων και τεχνικών για τη σχεδίαση τοπολογίας και τη δρομολόγηση των δεδομένων στους δορυφορικούς συνδέσμους. Καθοριστικός παράγοντας στο σχεδιασμό των αλγορίθμων αυτών είναι η δυναμική τοπολογία που διακρίνει τα δορυφορικά δίκτυα.

Επίσης γίνεται αναφορά στο πρωτόκολλο TCP και στα προβλήματα που προκύπτουν κατά τη χρήση του στις δορυφορικές συνδέσεις. Παρουσιάζονται κάποιες βελτιώσεις αυτού του πρωτοκόλλου προσαρμοσμένες στη φύση και τις απαιτήσεις των δορυφορικών δικτύων.

Στόχος όλων αυτών των ερευνών είναι η ανεύρεση μεθόδων που θα εξασφαλίζουν δορυφορικά δίκτυα που θα εγγυώνται ποιότητα υπηρεσιών, έτσι ώστε να επιτευχθεί η ιδέα του δορυφορικού Internet που θα παρέχει πραγματική παγκόσμια κάλυψη.

ABSTRACT

Satellites are unique components of communication systems that possess singular characteristics. Some of these characteristics (breadth of broadcast “reach,” ubiquitous access, low-cost global coverage, large capacity etc.) represent significant advantages. Some others (propagation delay, wireless channel quality, exposure to space radiation, etc.) constitute serious shortcomings. Finally, a few others (onboard switching, spot-beam technology) offer opportunities and represent challenges that can transform some of the shortcomings into strengths.

In this work there is a presentation of basic technical issues of satellite networks and of some algorithms and techniques for design topology and routing in satellite links. Determinative factor in these algorithms is the dynamic topology of satellite networks.

There is also reference to TCP protocol and the problems that arise when this protocol is used in satellite networks. Enhancements of this protocol for better performance of satellite links are presented.

The goal of all these researches is to find methods that will ensure satellite networks, which will guarantee quality of service, so that the idea of satellite network with global coverage could be achieved.

CONTENTS

1. INTRODUCTION

1.1 Principles of Satellite Communication.....	6
1.2 Satellite Constelations	8

2. TECHNICAL ISSUES ABOUT SATELLITE NETWORKS

2.1 Technological Overview	13
2.2 Satellite Network Architecture – Issues for research.....	14
2.3 The sublevel of medium access.....	16
2.3.1 The sublevel MAC	16
2.4 Network level	18
2.4.1 Routing in LEO systems	18
2.4.2 Dynamic Topology.....	18
2.4.3 Routing algorithms in Satellite Networks	21
2.4.3.1 Datagram Routing Algorithm	22
2.4.3.2 Multicast Routing Algorithm	23
2.4.3.3 Hybrid Terrestrial/Satellite Routing Algorithm	24
2.4.3.4 Inter-System Handoff Management.....	26
2.4.3.5 Routing for more effective services in LEO systems.....	26
2.4.3.6 An Example : Teledesic.....	29
2.5 Transport level	31
2.5.1 TCP in Satellite Networks - Problems	31
2.5.2 Performance enhancements of TCP in Satellite Networks.....	32

3. CONCLUSIONS	34
----------------	----

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αρχές της δορυφορικής επικοινωνίας	6
1.2 Δορυφορικοί Αστερισμοί	8

2. ΤΕΧΝΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΠΟΥ ΑΦΟΡΟΥΝ ΤΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

2.1 Τεχνολογική σύνοψη	13
2.2 Αρχιτεκτονική δορυφορικών δικτύων – Θέματα προς έρευνα	14
2.3 Το υποεπίπεδο προσπέλασης μέσου	16
2.3.1 Το υποεπίπεδο MAC	16
2.4 Το επίπεδο δικτύου	18
2.4.1 Δρομολόγηση στα LEO συστήματα	18
2.4.2 Δυναμική Τοπολογία	18
2.4.3 Αλγόριθμοι Δρομολόγησης για Δορυφορικά Δίκτυα	21
2.4.3.1 Αλγόριθμος δρομολόγησης διαγράμματος	22
2.4.3.2 Αλγόριθμος δρομολόγησης πολλαπλής διανομής	23
2.4.3.3 Αλγόριθμος δρομολόγησης υβριδικών επίγειων/δορυφορικών συστημάτων	24
2.4.3.4 Αλγόριθμος διαχείρισης ανταλλαγών μεταξύ των δορυφόρων	26
2.4.3.5 Δρομολόγηση για αποτελεσματικότερες υπηρεσίες στα δορυφορικά συστήματα LEO	26
2.4.3.6 Ένα παράδειγμα : Teledesic	29
2.5 Το επίπεδο μεταφοράς	31
2.5.1 Το TCP στα δορυφορικά δίκτυα – Προβλήματα	31
2.5.2 Βελτιώσεις της απόδοσης του TCP στα δορυφορικά δίκτυα	32

3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	34
-----------------------	----

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αρχές της δορυφορικής επικοινωνίας

Από το παρελθόν, όταν υπήρχε μόνο το τηλεφωνικό δίκτυο μέχρι σήμερα, που η ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιών είναι αλματώδης υπήρχε η ανάγκη για σύνδεση των τηλεπικοινωνιακών δικτύων διαφορετικών χωρών. Ένας από τους τρόπους επίτευξης αυτής της σύνδεσης είναι τα δορυφορικά δίκτυα, που αποτελούν δίκτυα εκπομπής ευρείας περιοχής. Η χρήση των δορυφόρων στην μετάδοση πακέτων δεδομένων σήμερα βρίσκεται σε άνθιση και χρησιμοποιούνται συνήθως στα δίκτυα WAN (Wide Area Networks) παρέχοντας το βασικό κορμό (backbone) στη σύνδεση μεταξύ γεωγραφικά απομακρυσμένων LAN's (Local Area Networks) και MAN's (Metropolitan Area Networks).

Ένα δορυφορικό σύστημα αποτελείται από δορυφόρους και από γήινους σταθμούς μετάδοσης σημάτων. Ο γήινος σταθμός αποτελείται από σταθμούς εξόδου (gateway center, GSs), ένα κέντρο ελέγχου δικτύου (Network Control Center, NCC) και κέντρα ελέγχου λειτουργιών (Operation Control Centers, OCCs). Τα κέντρα NCC και OCCs χειρίζονται τη συνολική δίοικηση των πηγών του δικτύου, τη λειτουργία των δορυφόρων και τον έλεγχο των τροχιών. Οι σταθμοί εξόδου (GSs) λειτουργούν ως διεπαφή δικτύου μεταξύ διαφόρων εξωτερικών δικτύων και του δορυφορικού δικτύου. Επίσης εκτελούν μετατροπές πρωτοκόλλων, διευθύνσεων και μορφοποιήσεων [19].

Ο δορυφόρος επικοινωνιών λειτουργεί ως ένας εναέριος, ασύρματος σταθμός-επαναλήπτης, που παρέχει έναν επικοινωνιακό σύνδεσμο μικροκυμάτων μεταξύ δύο περιοχών γεωγραφικά απομακρυσμένων. Λόγω του μεγάλου υψομέτρου στο οποίο βρίσκονται η μετάδοση των δορυφόρων μπορεί να καλύψει μια μεγάλη περιοχή της επιφάνειας της γης. Οι δορυφόροι επικοινωνιών γενικά διαθέτουν μια δεκάδα και παραπάνω αναμεταδότες (transponders)*. Κάθε αναμεταδότης διαθέτει μια δέσμη η οποία καλύπτει ένα τμήμα της γής κάτω από αυτόν. Οι σταθμοί μπορούν να στέλνουν στο δορυφόρο πλαίσια με τη συχνότητα της γραμμής ανόδου ή **ανερχόμενη ζεύξη**. Η ανερχόμενη ζεύξη είναι μια κατευθυνόμενη σύνδεση σημείο με σημείο. Οι περισσότεροι δορυφόροι απλά αντανακλούν σε συγκεκριμένη κατεύθυνση πλαίσια που δέχονται (bent pipes) αλλά με διαφορετική συχνότητα (στη συχνότητα της γραμμής καθόδου ή **κατερχόμενη ζεύξη**). Η κατερχόμενη ζεύξη μπορεί να καλύπτει μια μεγάλη περιοχή της γής ή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια δέσμη για την εστίαση σε μια μικρή περιοχή, απαιτώντας φθηνότερους και μικρότερους γήινους σταθμούς. Ωστόσο, κάποιοι δορυφόροι μπορούν δυναμικά να ξανακατευθύνουν τη δέσμη τους και έτσι να αλλάξουν περιοχή κάλυψης. Για την ανοδική και την καθοδική ζεύξη χρησιμοποιούνται διαφορετικές συχνότητες, έτσι ώστε τα ανερχόμενα και κατερχόμενα πλαίσια να μην παρεμβάλλονται μεταξύ τους [1], [2], [5].

*Σημ. Μεταφ. (Transmitter – responder)

Τα κανάλια δορυφορικής επικοινωνίας χαρακτηρίζονται από:

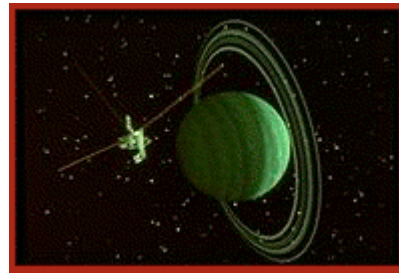
- Κάλυψη ευρείας περιοχής στην επιφάνεια της γής
- Μεγάλες καθυστερήσεις μετάδοσης
- Μετάδοση ευρείας εκπομπής
- Μεγάλο εύρος καναλιού
- Κόστος μετάδοσης ανεξάρτητο από την απόσταση

Η λαμβανόμενη δύναμη των μικροκυμάτων, που συμπεριλαμβάνεται στους δορυφορικούς συνδέσμους είναι τυπικά πολύ μικρή (της τάξεως των λίγων εκατοντάδων Pico watts). Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν ειδικοί γήινοι σταθμοί, που κρατούν το λόγο C/N (Carrier to Noise ratio) σε ένα ελάχιστο και χρησιμοποιούνται για τις δορυφορικές τηλεπικοινωνίες [2].

Ο παραλήπτης είναι το πιο σημαντικό τμήμα του γηινού σταθμού και αποτελεί βασικό παράγοντα στο συνολικό του κόστος. Ο παραλήπτης είναι συνήθως μια μεγάλη κεραία (παραβολικό δορυφορικό πιάτο) και ένας υψηλής ισχύος, και χαμηλού θορύβου ενισχυτής μικροκυμάτων (low noise microwave amplifier (LNA)) [3].



Εικόνα 1. Γήινος σταθμός [4]



Εικόνα 2. Επικοινωνιακός Δορυφόρος [4]



Εικόνα 3. Τερματικό επιστροφής συνδέσμου (Return Link Terminal) [4]

Οι δορυφορικοί σύνδεσμοι μπορούν να λειτουργήσουν σε διαφορετικό εύρος συχνότητας και να χρησιμοποιούν ξεχωριστές συχνότητες φορτίου για την ανερχόμενη και την κατερχόμενη ζεύξη. Ο πίνακας 1 δείχνει τα πιο συνηθισμένα κανάλια συχνοτήτων. Η χρήση των συχνοτήτων C ήταν πιο συχνή στα συστήματα δορυφόρων της πρώτης γεννιάς και απαιτούσε μεγάλες κεραίες με διάμετρο τουλάχιστον 2-3 m. Ωστόσο αυτό το κανάλι (band) συχνοτήτων έχει ήδη πολυχρησιμοποιηθεί αφού και οι επίγειοι σύνδεσμοι μικροκυμάτων χρησιμοποιούν αυτές τις συχνότητες. Σήμερα εμφανίζεται η τάση για τις υψηλότερες συχνότητες Ku και Ka καναλιού. Η πλειοψηφία των δορυφόρων άμεσης ευρείας εκπομπής χρησιμοποιούν το κανάλι Ku, όπως για τη σύνδεση στο Internet του Server με τους χρήστες. Μια κεραία για κανάλι Ku είναι μικρή με διάμετρο περίπου 18 ίντσες. Υπάρχουν προτάσεις για τη χρήση Ka καναλιού ως σύνδεσμου επιστροφής σε αυτά τα συστήματα. Το κανάλι αυτό προσφέρει αρκετά μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων με πολύ μικρές κεραίες, αλλά έχει προβλήματα απόδοσης λόγω καιρικών φαινομένων. Η μείωση της απόδοσης εξαιτίας της βροχής είναι ένα βασικό πρόβλημα στα δύο τελευταία κανάλια συχνοτήτων. Επίσης εξαιτίας των υψηλότερων συχνοτήτων, ο εξοπλισμός για μικροκύματα είναι ακόμη πολύ ακριβός ιδιαίτερα στα κανάλια Ka.

ΚΑΝΑΛΙ (BAND)	ΑΝΕΡΧΟΜΕΝΗ ΖΕΥΞΗ (GHz)	ΚΑΤΕΡΧΟΜΕΝΗ ΖΕΥΞΗ (GHz)	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ
C	4 (3.7-4.2)	6 (5.925-6.425)	Παρεμβολή με επίγειες συνδέσεις
Ku	11 (11.7-12.2)	14 (14.0-14.5)	Attenuation εξαιτίας της βροχής
Ka	20 (17.7-21.7)	30 (27.5-30.5)	Υψηλό κόστος εξοπλισμού
L/S	1.6 (1.610-1.625)	2.4 (2.483-2.500)	Παρεμβολή με ISM band

Πίνακας 1. Κατανομή του φάσματος συχνοτήτων για κάποια κοινά κανάλια [5].

1.2 Δορυφορικοί Αστερισμοί

Οι δορυφόροι μπορούν να είναι τοποθετημένοι σε τροχιές με διαφορετικά ύψη και σχήματα (κυκλικά ή ελλείψεις). Με βάση την τροχιακή ακτίνα, όλοι οι δορυφόροι περιέχονται σε μια από τις ακόλουθες κατηγορίες:

1. **LEO:** Low Earth Orbit (δορυφόροι χαμηλής περί της γης τροχιάς)
2. **MEO:** Medium Earth Orbit (δορυφόροι μεσαίας περί της γης τροχιάς)
3. **GEO ή GSO [19]:** Geostationary Earth Orbit or Geosynchronous Earth orbit (δορυφόροι γεωστατικής τροχιάς)

Οι δορυφόροι GEO τοποθετούνται σε τροχιά έτσι ώστε να παραμένουν σταθεροί ως προς ένα σημείο της γης. Ένας τέτοιος δορυφόρος τοποθετείται στα 35,786 χλμ περίπου πάνω από τη γη και η γωνιακή ταχύτητά του είναι ίση με αυτή της γης, έτσι ώστε εμφανίζεται να είναι πάνω από το ίδιο σημείο της γης. Αυτό τους επιτρέπει να παρέχουν σταθερή κάλυψη της περιοχής και να εξαλείφουν τις περιόδους συσκότισης (blackout) που παρουσιάζουν συνήθως οι δορυφόροι, που τοποθετούνται σε τροχιά, πράγμα που είναι καλό για την παροχή τηλεοπτικής μετάδοσης (η περιοχή κάλυψης ενός δορυφόρου ονομάζεται footprint) [19]. Ωστόσο το μεγάλο υψόμετρο τους, προκαλεί μεγάλη καθυστέρηση με αποτέλεσμα η επικοινωνία δύο δρόμων (αμφίδρομη επικοινωνία), στην οποία θα πρέπει να φορτωθούν και να μεταφορτωθούν δεδομένα πέρα από μια απόσταση 72.000 χλμ να μην πραγματοποιείται συχνά με αυτό το είδος δορυφόρων [6], [2].

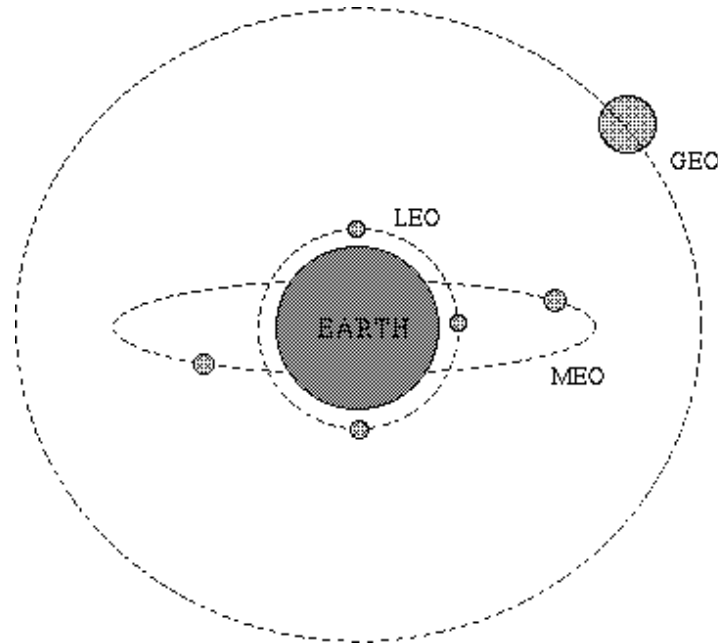
Οι δορυφόροι LEO αντιπροσωπεύουν τη χαμηλή γήινη τροχιά, και τοποθετούνται σε τροχιά 200 – 3000 km πάνω από τη γη. Σε αυτόν τον τύπο δορυφόρων μειώνονται οι χρόνοι μετάδοσης σε σύγκριση με τους GEO και η τυπική καθυστέρηση κατά την πραγματοποίηση του κύκλου της τροχιάς τους είναι 20-25 ms, που είναι συγκρίσιμο με καθυστερήσεις γήινων συνδέσμων. Μια τροχιά LEO μπορεί ακόμη να χρησιμοποιηθεί για να καλύψει μια πολική περιοχή, κάτι που δεν μπορεί να επιτευχθεί από τους GEO δορυφόρους.

Οι Δορυφόροι MEO τοποθετούνται σε απόσταση από 3000 Km έως την τροχιά των γεωστατικών δορυφόρων. Η καθυστέρηση κατά την ολοκλήρωση του κύκλου της τροχιάς τους φτάνει συνήθως τα 110 – 130 ms.

Οι δύο τελευταίες κατηγορίες δορυφόρων είναι πιο κοντά στην επιφάνεια της γης με αποτέλεσμα το μέγεθος της απαιτούμενης κεραίας να είναι πιο μικρό αλλά και το footprint τους να είναι μικρό. Σ' αυτές τις τροχιές απαιτούνται πολλοί δορυφόροι για την επίτευξη παγκόσμιας κάλυψης. Όσο πιο κοντά στην επιφάνεια της γης βρίσκεται η τροχιά των δορυφόρων, τόσο πιο πολλοί δορυφόροι απαιτούνται [19].

Επιπρόσθετα επειδή οι δορυφόροι έχουν πολύ υψηλές ταχύτητες σχετικές με την επιφάνεια της γης, ένας χρήστης του δορυφορικού δικτύου μπορεί να χρειαστεί να μπάει από δορυφόρο σε δορυφόρο καθώς μετακινούνται με ταχύτητα στην τροχιά [19]. Δεδομένου ότι αυτή η κατηγορία δορυφόρων δεν εμφανίζεται στάσιμη στους γήινους σταθμούς, οι γήινοι σταθμοί χρειάζονται μια συμβολική γλώσσα κεραίων (antenna assembly) που θα ακολουθήσει την κίνηση του δορυφόρου [7], [2].

Στην εικόνα 4 παρατηρούμε τους διαφορετικούς δορυφορικούς αστερισμούς και τις τροχιές στις οποίες τοποθετούνται.



Εικόνα 4. Οι τρεις κατηγορίες δορυφορικών αστερισμών [2]

Η ιδέα πάνω στην οποία βασίζονται οι παραπάνω κατηγορίες δορυφόρων είναι η προσπάθεια για επίτευξη παγκόσμιας δορυφορικής κάλυψης ταυτόχρονα, τοποθετώντας αρκετούς δορυφόρους σε τροχιές, έτσι ώστε σχεδόν κάθε σημείο της γης να έχει δορυφορική κάλυψη.

Στη συνέχεια εξετάζονται οι ιδιότητες των διαφορετικών κατηγοριών δορυφόρων. Η ακτίνα της τροχιάς του δορυφόρου επηρεάζει σημαντικά τις δυνατότητες και το σχεδιασμό του. Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των διαφορετικών δορυφορικών αστερισμών, που επηρεάζουν σημαντικά το σχεδιασμό τους.

Τύπος	LEO	MEO	GEO
Περιγραφή	Low Earth Orbit	Medium Earth Orbit	Geostationary Earth Orbit
Ύψος	100-300 μίλια	6000-12000 μίλια	22,282 μίλια
Απώλεια Χρόνου	15 λεπτά	2-4 ώρες	24 ώρες

Πίνακας 2. Βασικά χαρακτηριστικά των δορυφορικών αστερισμών [2], [10]

Στον πίνακα 3 παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε κατηγορίας δορυφόρων.

Τύπος	LEO	MEO	GEO
Πλεονεκτήματα	1. Χαμηλότερο κόστος εκτόξευσης. 2. Πολύ μικρές καθυστερήσεις κατά την πραγματοποίηση του κύκλου της τροχιάς τους. 3. Χαμηλή απώλεια μονοπατιού. 4. Μεγαλύτερη διαθεσιμότητα	1. Συγκρατημένο κόστος εκτόξευσης. 2. Μικρές καθυστερήσεις κατά την πραγματοποίηση του κύκλου της τροχιάς τους.	1. Καλύπτει το 42.2% της επιφάνειας της γης. 2. Σταθερή κάλυψη 3. Δεν υπάρχουν προβλήματα εξαιτίας του Doppler.
Μειονεκτήματα	1. Πολύ μικρός κύκλος ζωής, 1-3 μήνες 2. Συναντά ζώνες ραδιενέργειας	1. Μεγαλύτερες καθυστερήσεις 2. Μεγαλύτερη απώλεια μονοπατιού (path loss).	1. Πολύ μεγάλες καθυστερήσεις κατά την πραγματοποίηση του κύκλου της τροχιάς τους(τυπικές καθυστερήσεις είναι 250-280 ms). 2. Ακριβοί δορυφόροι και γήινοι σταθμοί εξαιτίας του αδύναμου σήματος.

Πίνακας 3. Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα των διαφορετικών δορυφορικών αστερισμών [2],[7],[16],[19].

Γενικότερα, Θα μπορούσαμε να συνοψίσουμε τα σημαντικά πλεονεκτήματα των δορυφόρων λέγοντας ότι είναι η χαμηλού κόστους παγκόσμια κάλυψη, η μεγάλη δυναμικότητα και ιδιαίτερα στα δίκτυα ευρείας εκπομπής, στα οποία οι δορυφόροι μπορούν να παρέχουν υψηλό εύρος ζώνης, που μπορεί να υποστηρίξει μετάδοση σε ρυθμούς των Gbps. Την ίδια στιγμή προκύπτουν προβλήματα σε αυτούς τους υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, που προέρχονται κυρίως από τα βασικά μειονεκτήματα των δορυφορικών δικτύων, που είναι οι μεγάλες καθυστερήσεις και τα λάθη [12]. Γίνεται εκτενέστερη αναφορά σε αυτά τα προβλήματα στην παράγραφο 2.1.

Οι δορυφόροι κατηγοριοποιούνται και σύμφωνα με το βάρος τους, εκτός από τις τροχιές στις οποίες τοποθετούνται. Εκείνοι οι δορυφόροι που ζυγίζουν 800 - 1000 κιλά θεωρείται ότι ανήκουν στην τάξη των «μικρών» δορυφόρων, ενώ αυτοί που ζυγίζουν περισσότερο ονομάζονται «μεγάλοι» δορυφόροι. Οι γεωστατικοί

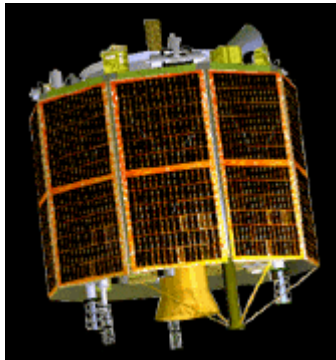
(GEO) δορυφόροι είναι συνήθως «μεγάλοι» δορυφόροι, ενώ οι δορυφόροι χαμηλής γήινης τροχιάς (LEO), μπορεί να ανήκουν στη μία ή στην άλλη κατηγορία [8].

Στον πίνακα 4 παρουσιάζεται μια γενική μέθοδος κατηγοριοποίησης των δορυφόρων ανάλογα με το βάρος τους. (Το βάρος τους υπολογίζεται συν τα καύσιμα, γιατί έτσι καθορίζονται και τα όρια στα οποία διαμορφώνονται οι δαπάνες για τους δορυφόρους) [10].

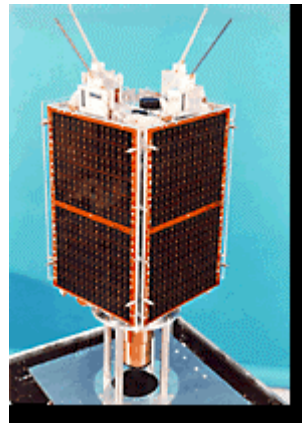
Τύπος		
Μεγάλοι δορυφόροι	>1000kg	
Μεσαίου μεγέθους δορυφόροι	500-1000kg	
Mini Δορυφόροι	100-500kg	Μικροί Δορυφόροι
Micro Δορυφόροι	10-100kg	
Nano Δορυφόροι	1-10kg	
Pico Δορυφόροι	0.1-1kg	
Femto Δορυφόροι	<100g	

Πίνακας 4. Κατηγοριοποίηση δορυφόρων με βάση το βάρος τους (συν το βάρος των καυσίμων) [10], [26]

Στις εικόνες 5, 6 φαίνονται κάποιοι από τους παραπάνω δορυφόρους.



Εικόνα 5. Minisatellite [26]



Εικόνα 6. Microsatellite [26]

2. ΤΕΧΝΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΠΟΥ ΑΦΟΡΟΥΝ ΤΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

2.1 Τεχνολογική σύνοψη

Η ενσωμάτωση δορυφόρων στα τοπικά δίκτυα παρεμποδίζεται συχνά εξαιτίας τριών χαρακτηριστικών της δορυφορικής επικοινωνίας, που είναι τα παρακάτω:

- **Χρόνος απόκρισης (καυστέρηση διάδοσης):** Εξαιτίας του μεγάλου ύψους στο οποίο βρίσκονται οι τροχιές των δορυφόρων, ο χρόνος που απαιτείται για τη μετάδοση δεδομένων σε ένα δορυφορικό σύνδεσμο (από ένα γήινο σταθμό σε έναν άλλο) ξεπερνάει τα 2/10 του δευτερολέπτου. Αυτό μπορεί να προκαλέσει πολλά προβλήματα σε ένα υψηλής ταχύτητας τοπικό δίκτυο, που περιμένει τα πακέτα δεδομένων.
- **Χαμηλό Εύρος ζώνης:** Εξαιτίας των περιορισμών του ραδιοφωνικού φάσματος (<30GHz), υπάρχει σταθερό εύρος ζώνης, που μπορεί να κατανεμηθεί στην δορυφορική μετάδοση.
- **Θόρυβος:** Η ισχύς ενός ραδιοφωνικού σήματος είναι ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης που διανύει. Επειδή η απόσταση μεταξύ δορυφόρου και γήινου σταθμού είναι μεγάλη, το σήμα καταλήγει πολύ αδύναμο. Ωστόσο αυτό το πρόβλημα μπορεί να λυθεί με τη χρήση κατάλληλων τεχνικών διόρθωσης λαθών. [9]

Διόρθωση των λαθών

Η ύπαρξη υψηλού θορύβου σε ένα δορυφορικό σύνδεσμο, οδήγησε στη δημιουργία πολλών τεχνικών διόρθωσης λαθών, οι οποίοι έχουν δοκιμαστεί σ' αυτούς. Οι περισσότερες ανήκουν σε μια από τις δύο κατηγορίες : **α.** Πρώιμη διόρθωση λαθών (forward-error-correction (FEC)) και **β.** Αυτόματη – επανάληψη – απαίτησης (automatic-repeat-request (ARQ)):

α. Πρώιμη διόρθωση λαθών (FEC) Σε αυτή τη μέθοδο ένας συγκεκριμένος αριθμός από πληροφοριακά σύμβολα χαρτογραφείται σε άλλα πληροφοριακά σύμβολα, αλλά με τέτοιο τρόπο ώστε υπάρχουν περισσότερα σύμβολα απ' ότι στην αρχή. Όταν αυτά τα νέα σύμβολα εξετάζονται στην πλευρά του παραλήπτη, τα πλεονάζοντα σύμβολα χρησιμοποιούνται για την αποκρυπτογράφηση των αυθεντικών συμβόλων και για να ελεγχθεί η ακεραιότητα των δεδομένων. Όσο περισσότερα είναι τα πλεονάζοντα σύμβολα για την κρυπτογράφηση τόσο πιο αξιόπιστη είναι η διόρθωση των λαθών. Από την άλλη πλευρά τόσο περισσότερο είναι και το εύρος ζώνης που χάνεται. Η μέθοδος αυτή είναι χρήσιμη όταν ο θόρυβος στο κανάλι είναι υψηλός.

β. Αυτόματη – επανάληψη – απαίτησης (ARQ) Σ' αυτή τη μέθοδο τα δεδομένα χωρίζονται σε πακέτα. Μέσα σε κάθε πακέτο περιέχεται ένα κλειδί ελέγχου λαθών. Εάν ο κώδικας λάθους δείξει απώλεια ακεραιότητας σε ένα πακέτο, ο παραλήπτης μπορεί να ζητήσει από τον αποστολέα να ξαναστείλει το πακέτο. Η μέθοδος αυτή δεν είναι πολύ κατάλληλη σε ένα κανάλι με υψηλό θόρυβο, μια και θα χρειαστούν πολλές αναμεταδόσεις και οι θόρυβοι που

κατέστρεψαν τα αρχικά πακέτα είναι πιθανό να καταστρέψουν και τα επόμενα που θα σταλούν. [13]

2.2 Αρχιτεκτονική δορυφορικών δικτύων – Θέματα προς έρευνα

Η μεγάλη εξέλιξη στις τηλεπικοινωνιακές τεχνολογίες στο διάστημα και οι όλο και αυξανόμενες απαιτήσεις για ευρείας εκπομπής υπηρεσίες Internet, απαιτούν νέους τρόπους σχεδίασης και αρχιτεκτονικής των μελλοντικών δορυφορικών δικτύων [14].

Όταν χρησιμοποιούνται οι δορυφόροι GEO για την παροχή υπηρεσιών πρόσβασης στο Internet, η απόδοση του Πρωτοκόλλου Ελέγχου Μεταφοράς (TCP) υποβαθμίζεται λόγω του μεγάλου χρόνου απόκρισης και του υψηλού βαθμού ασυμμετρίας εύρους ζώνης, που υπάρχει σε αυτά τα δίκτυα. Γι' αυτό το λόγο πραγματοποιούνται πολλές έρευνες για την απόδοση του πρωτοκόλλου TCP στα πλαίσια των δορυφορικών δικτύων ευρείας εκπομπής, που χρησιμοποιούνται για πρόσβαση στο δίκτυο.

Μερικά από τα θέματα που έχουν ερευνηθεί είναι τα παρακάτω:

- Κατά πόσο ο αλγόριθμος αποφυγής σύγκρουσης του TCP μπορεί να προσαρμοστεί έτσι ώστε να είναι πιο αμερόληπτος όταν οι δορυφορικοί σύνδεσμοι πρέπει να μοιραστούν κανάλια, στα οποία υπάρχει συμφόρηση με άλλες συνδέσεις (μικρότερης καθυστέρησης).
- Πόσο δραστικές εμπλοκές μπορεί να υπάρχουν στην απόδοση όταν γίνονται μικρές αλλαγές στις TCP εφαρμογές πάνω σε δορυφορικούς συνδέσμους (π.χ μείωση στα μεταφορόμενα αρχεία περισσότερο από το μισό).
- Τα οφέλη απόδοσης που προκύπτουν από το διαχωρισμό μιας TCP σύνδεσης σε μια πύλη πρωτοκόλλου (gateway) μέσα στο δορυφορικό δίκτυο. Μια τέτοια προσέγγιση μπορεί να επιτρέψει στην απόδοση του δορυφορικού δικτύου να πλησιάσει την απόδοση ενός μη δορυφορικού δικτύου [15].

Σε αντίθεση με τα συστήματα GEO η έρευνα στα συστήματα LEO δορυφόρων είναι ακόμη σε αρχικό στάδιο. Αυτά τα συστήματα είναι έτσι σχεδιασμένα ώστε να αποφεύγονται οι μεγάλες καθυστερήσεις, όπως προαναφέρθηκε στην παράγραφο 1.2 αλλά ο σχεδιασμός τους έχει ενδιαφέρον από την πλευρά της δρομολόγησης πακέτων εξαιτίας της τοπολογίας των δικτύων LEO, που συνεχώς αλλάζει.

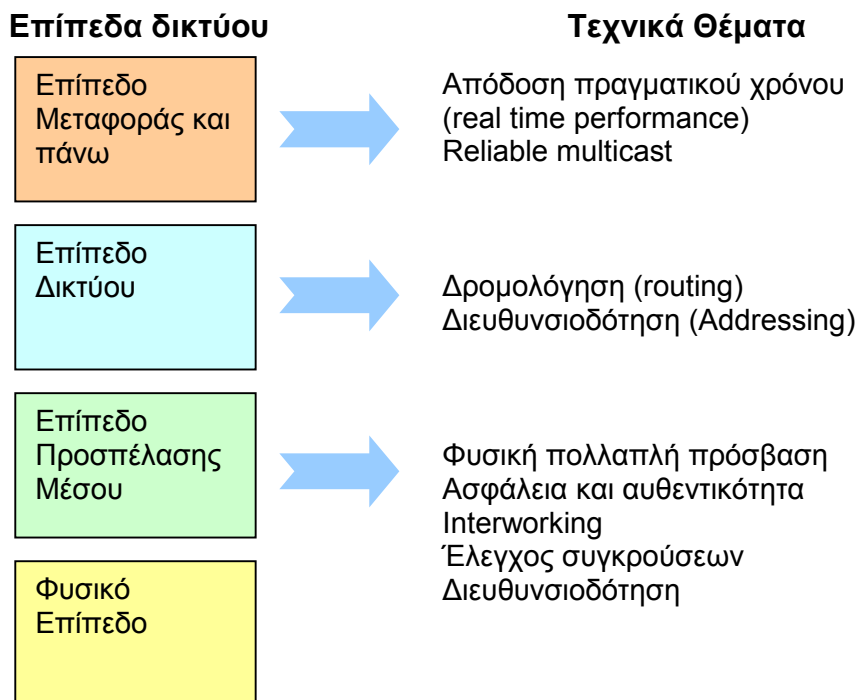
Συγκεκριμένα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον όσον αφορά τη δρομολόγηση των δεδομένων στα LEO και μικτά LEO/GEO συστήματα έχουν τα παρακάτω θέματα :

- Συνολική στρατηγική δρομολόγησης
- Ραγδαία ανταπόκριση στις συνεχείς αλλαγές της τοπολογίας
- Επιφόρτιση των προσωρινά σημαντικών σημείων με εξισορρόπηση και δρομολόγηση

- Διαχείριση της ασυμμετρίας και της κινητικότητας
- Δρομολόγηση βάση πολιτικής - στρατηγικής

Όλα τα παραπάνω θέματα έχουν μεγάλο ενδιαφέρον, γιατί τα δορυφορικά δίκτυα ευρείας εκπομπής πιθανότατα θα συμβάλουν στη δημιουργία ενός μελλοντικού Internet, εξαιτίας της μοναδικής τους ικανότητας να παρέχουν πρόσβαση στο δίκτυο σχεδόν σε κάθε σημείο της γης και ιδιαίτερα σε περιοχές αδικημένες από την εδαφική δομή. Ωστόσο επειδή τα πρωτόκολλα του Internet είναι σχεδιασμένα για την καλύτερη απόδοση του ενσύρματου Internet, οι μηχανικοί δορυφορικών δικτύων θα πρέπει να σχεδιάσουν πρωτόκολλα φιλικά προς τα δορυφορικά δίκτυα. Επίσης θα πρέπει να ασχοληθούν με ζητήματα όπως η συνύπαρξη δορυφορικών δικτύων και ενσύρματου δικτύου. Τα δίκτυα LEO ευρείας εκπομπής είναι πιθανό ότι θα αναπτυχθούν πιο αργά από τα GEO αφού ο σχεδιασμός τους είναι αρκετά απαιτητικός τεχνικά από οτιδήποτε είχε επιχειρηθεί στο παρελθόν.

Το σχήμα 1 δείχνει συνοπτικά τα θέματα, που έχουν ενδιαφέρον στην αρχιτεκτονική των δορυφορικών δικτύων.



Σχήμα 1. Βάσικα θέματα στην αρχιτεκτονική των δορυφορικών δικτύων [16]

Στις επόμενες παραγράφους ακολουθεί εκτενέστερη μελέτη τεχνικών, αλγορίθμων και πρωτοκόλλων που μπορούν να εφαρμοστούν στα δορυφορικά δίκτυα στα διάφορα επίπεδα (επίπεδο μέσου προσπέλασης, δικτύου, μεταφοράς).

2.3 Το υποεπίπεδο προσπέλασης μέσου

Όπως και με τα LANs έτσι και στα δορυφορικά δίκτυα, ένα από τα πιο σημαντικά θέματα σχεδίασης είναι το πώς θα γίνει η κατανομή των καναλιών του αναμεταδότη (transponder). Ωστόσο αντίθετα με τα LANs η ανίχνευση φέροντος είναι αδύνατη λόγω της καθυστέρησης διάδοσης των 270 ms. Όταν ένας σταθμός ανιχνεύει την κατάσταση ενός καναλιού του αναμεταδότη ακούει ότι μεταδιδόταν 270 sec πριν. Δεν έχει τρόπο να ακούσει εάν κάποιος προσπαθεί να μεταδώσει τώρα [1]. Στα αλληλεπιδραστικά δορυφορικά συστήματα ένας μεγάλος αριθμός τερματικών τα οποία είναι διασκορπισμένα στην περιοχή κάλυψης του δορυφόρου (footprint) αγωνίζονται για το κανάλι ανερχόμενης ζεύξης.

2.3.1 Το υποεπίπεδο MAC

Ο Έλεγχος Πολλαπλής Πρόσβασης (Multiple Access Control, MAC), που ορίζεται ως ένα σύνολο από κανόνες για τον έλεγχο του διαμοιραζόμενου καναλιού μεταξύ των χρηστών, παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην αποδοτική και δίκαιη χρήση των περιορισμένων πόρων των δορυφορικών δικτύων. Το πρωτόκολλο MAC μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα πρωτόκολλα υψηλότερων επιπέδων και την ποιότητα των υπηρεσιών (Quality of Service, QoS), που παρέχει το σύστημα [19].

Η απόδοση των πρωτοκόλλων MAC εξαρτάται από :

- Τα χαρακτηριστικά του δοιαμοιραζόμενου μέσου επικοινωνίας
- Την κυκλοφοριακή κίνηση στο μέσο (traffic)

Ο μεγάλος χρόνος απόκρισης στα δορυφορικά κανάλια και ιδιαίτερα στους GEO συνδέσμους αποκλείει κάποια από τα σχήματα MAC, που χρησιμοποιούνται στα επίγεια τοπικά δίκτυα, όπως το σχήμα Πολλαπλής Προσπέλασης με Ανίχνευση Φέροντος και Ανίχνευση Σύγκρουσης (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection, CSMA/CD) [1], [19]. Τα πρωτόκολλα αυτά υποθέτουν ότι ένας σταθμός μετάδοσης μπορεί να ανιχνεύσει τις συγκρούσεις μέσα σε λίγους χρόνους bit και κατόπιν να τραβιέται πίσω εάν συμβαίνει μια σύγκρουση. Αντίθετα με τα δίκτυα LAN στα οποία οι συγκρούσεις καταλαμβάνουν μόνο ένα μικρό αριθμό χρόνων bits, κάθε δορυφορική σύγκρουση σπαταλά ολόκληρο το πλαίσιο. Έτσι δημιουργείται η ανάγκη νέων πρωτοκόλλων.

Θεωρητικά θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένα πρωτόκολλο σαν αυτό της αρτηρίας με κουπόνι. Παρόλα αυτά, μ' ένα χρόνο διάδοσης 270 ms, θα απαιτούνταν 27 sec για τη μεταφορά του κουπονιού σε ένα λογικό δακτύλιο των 100 σταθμών ακόμη κι αν δεν υπήρχαν στην ουρά πλαίσια για μετάδοση [1].

Γενικά ένα καλό πρωτόκολλο MAC για ένα δίκτυο με δορυφόρους, θα πρέπει να είναι απλό στην εφαρμογή και ευέλικτο για να προσαρμόζεται στις συνεχείς αναδιαμορφώσεις της τοπολογίας. Ανάλογα με το πώς διανέμεται το εύρος ζώνης

ανάμεσα στους χρήστες τα πιθανά MAC πρωτόκολλα, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα δορυφορικά δίκτυα ανήκουν σε τρεις κατηγορίες:

1. Σταθερής εκχώρησης (fixed assignment)
2. Τυχαίας προσπέλασης (random access)
3. Εκχώρησης μετά από απαίτηση (demand assignment).

Στα πρωτόκολλα σταθερής εκχώρησης ανήκουν οι FDMA (Frequency Division Multiple Access) και TDMA (Time Division Multiple Access). Η FDMA είναι η απλούστερη. Κάθε κανάλι του αναμεταδότη χωρίζεται σε ξεχωριστά υποκανάλια με διαφορετικές συχνότητες, με (αχρησιμοποίητες) ζώνες ασφαλείας μεταξύ των υποκαναλιών για την αποφυγή παρεμβολών ανάμεσα σε δύο διπλανα κανάλια. Στην TDMA το δορυφορικό κανάλι δεν χωρίζεται σε υποκανάλια συχνότητας αλλά σε υποκανάλια χρόνου. Το κανάλι χωρίζεται σε σχισμές, οι οποίες ομαδοποιούνται σε πλαίσια. Και στις δύο μεθόδους κάθε σταθμός χρησιμοποιεί το κανάλι που έχει εκχωρηθεί σ' αυτόν. Αυτές οι τεχνικές μπορούν να παρέχουν υπηρεσίες υψηλής ποιότητας αλλά η έλλειψη ευελιξίας και δυνατότητας κλιμάκωσης τις καθιστά κατάλληλες μόνο για δίκτυα μικρής κλίμακας (μικρός και σχετικά στατικός αριθμός σταθμών και συνεχόμενη κυκλοφορία) [1], [19].

Στα πρωτόκολλα τυχαίας προσπέλασης κάθε σταθμός μεταδίδει δεδομένα ανεξάρτητα από την κατάσταση μετάδοσης των άλλων. Αυτά τα πρωτόκολλα χρησιμοποιούνται όταν υπάρχουν εκατοντάδες ή χιλιάδες σταθμοί με καταιγιστική κυκλοφορία (σύγχρονα μικρά και φθηνά τερματικά, π.χ VSATs, USATs). Κύριος υποψήφιος αλγόριθμος εδώ είναι το ALOHA – slotted ALOHA. Ο προφανής τρόπος λειτουργίας ενός συστήματος ALOHA σε ένα δορυφόρο είναι να έχει ένα κανάλι ανόδου και ένα κανάλι καθόδου, καθένα με εύρος ζώνης B bps από ένα σύνολο καταμεμημένου εύρους ζώνης $2B$. Το πρόβλημα με το ALOHA είναι η χαμηλή απόδοση του καναλιού, εξαιτίας των πολλών πιθανών συγκρούσεων, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα επανεκπομπές, που αυξάνουν τη μέση καθυστέρηση πακέτου. Υπάρχουν βέβαια διάφορες παραλλαγές του ALOHA, για τη βελτίωση της απόδοσης του, όπως ένα σύστημα ALOHA με δυο κανάλια ανόδου και ένα καθόδου [18], [1].

Τα πρωτόκολλα εκχώρησης μετά από απαίτηση προσπαθούν να λύσουν τα προβλήματα που έχουν αφήσει άλυτα οι προηγούμενοι αλγόριθμοι, οι οποίοι δεν εγγυώνται υψηλή ποιότητα υπηρεσιών, λόγω της χρήσης του ίδιου καναλιού από πολλά τερματικά με καταιγιστική κυκλοφορία. Τα πρωτόκολλα αυτά κατανέμουν δυναμικά το εύρος ζώνης ανάλογα με τις απαιτήσεις των χρηστών. Πριν την πραγματική μετάδοση δεδομένων πρέπει να έχει γίνει αποδεκτή μια απαίτηση για πόρο. Η μετάδοση των απαιτήσεων είναι κι αυτή ένα πρόβλημα πολλαπλής πρόσβασης, ωστόσο επειδή το μήνυμα της απαίτησης είναι αρκετά μικρότερο από την πραγματική μετάδοση δεδομένων, μπορεί να γίνεται εύκολα η διαχείριση συγκρούσεων στις απαιτήσεις και να αναμεταδίδονται. [19] Έτσι μετά από έναν έλεγχο των απαιτήσεων γίνεται κατανομή του εύρους ζώνης σε μια FDMA ή TDMA αρχιτεκτονική και υπάρχει εγγύηση μετάδοσης δεδομένων χωρίς συγκρούσεις. Πρωτόκολλα εκχώρησης μετά από απαίτηση είναι το PODA (Priority Oriented Demand Assignment, Εκχώρηση με βάση Προτεραιότητα) και το FODA (FIFO Ordered Demand Assignment, Εκχώρηση με Βάση Προτεραιότητα με τον αλγόριθμο First-in-First-Out). [22]

2.4 Το επίπεδο δικτύου

2.4.1 Δρομολόγηση στα LEO συστήματα

Τα συστήματα LEO με δυνατότητες επεξεργασίας (OBP, Onboard Processing)* και με συνδέσμους μεταξύ των δορυφόρων (Intersatellite Links, ISLs) είναι μια πολύ ελκυστική προσέγγιση για το μελλοντικό διαδίκτυο λόγω των μικρών καθυστερήσεων που μπορούν να επιτευχθούν, της υψηλότερης χρησιμοποίησης και επαναχρησιμοποίησης των διαθέσιμων συχνοτήτων γης-διαστήματος με αποτέλεσμα μεγαλύτερη δυναμικότητα συστήματος και της παγκόσμιας κάλυψης [17], [30]. Οι σύνδεσμοι μεταξύ των δορυφόρων (ISLs) έχουν κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα όπως:

- Οι δορυφόροι δε χρειάζονται γήινους σταθμούς εν όψει για να λειτουργήσουν με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται πραγματική παγκόσμια κάλυψη, συμπεριλαμβανομένων ωκεανών με μικρό αριθμό γήινων σταθμών (Ο Iridium έχει 12 γήινους σταθμούς).
- Αυξημένη ανεξαρτησία από τα επίγεια δίκτυα και έλεγχος της απόδοσης.
- Οι χρήστες μιλούν με άλλους χρήστες, χωρίς να χρειάζεται να βρίσκονται στην ίδια περιοχή κάλυψης [17], [38]

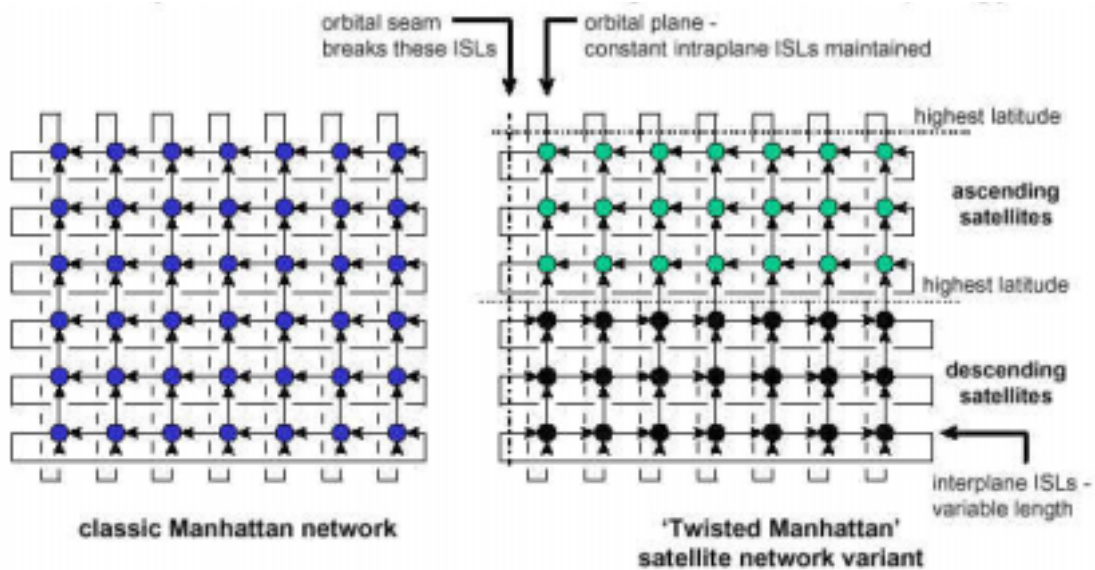
* Το OBP συνήθως σχετίζεται με τεχνικές αποδιαμόρφωσης και επαναδιαμόρφωσης, αποκρυπτογράφηση και επανακρυπτογράφηση διόρθωσης λαθών και προσαρμογής των δεσμών ραδιοσήματος.

2.4.2 Δυναμική Τοπολογία

Εξαιτίας της σχετικής κίνησης μεταξύ του LEO δορυφόρου και της γης, ο δορυφόρος έχει πολύ μικρή περίοδο που είναι εμφανής στους ακίνητους χρήστες στη γη. Για να διατηρηθεί μια συνεχής κάλυψη 24 ώρες, είναι πολύ σημαντικός ένας καλός σχεδιασμός του αστερισμού. Κάθε στιγμή θα πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον ένας δορυφόρος ορατός στο χρήστη. Όταν ένας δορυφόρος φεύγει από την περιοχή όρασης του χρήστη και κάποιος άλλος μετακινείται εκεί, τότε πραγματοποιείται μια διαδορυφορική ανταλλαγή (intersatellite handover). Για ένα δορυφόρο με πολλαπλές κεραίες και αναμεταδότες, η περιοχή κάλυψης του χωρίζεται σε έναν αριθμό από σημεία δέσμης (spot beams), καθένα από τα οποία καλύπτεται από μια κεραία εκπομπής. Έτσι η συχνή ανταλλαγή δεσμών ραδιοσήματος από σημείο δέσμης σε σημείο συμβαίνει κατά τη διάρκεια μιας μόνο περιόδου κατά την οποία ο δορυφόρος είναι ορατός [19].

Η χρήση όμως των ISLs έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας πολύπλοκης τοπολογίας δικτύου, όπου οι μόνιμοι ISLs εγκαθίστανται μεταξύ των δορυφόρων ακολουθώντας ο ένας τον άλλο στην ίδια κυκλική τροχιακή πτήση. Οι ISLs που δεν είναι τελείως μόνιμοι, μπορούν να εγκαθίστανται μεταξύ δορυφόρων, που είναι σε γειτονικές τροχιές, αλλά θα πρέπει να σπάσουν και να ξαναεγκατασταθούν στο υψηλότερο γεωγραφικό πλάτος κάθε τροχιάς καθώς τα επίπεδα διασταυρώνονται [18]. Στην εικόνα 7 φαίνεται ένα παράδειγμα τέτοιας τοπολογίας.

Οι ISLs έχουν κατευθύνσεις που δείχνουν τη διασταύρωση των τροχιακών επιπέδων στα υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη, όπου οι γειτονικοί δορυφόροι αλλάζουν θέσεις. Οι σύνδεσμοί είναι μιας μόνο κατεύθυνσης.



Εικόνα 7. Τοπολογία με ISL του αστερισμού LEO [17]

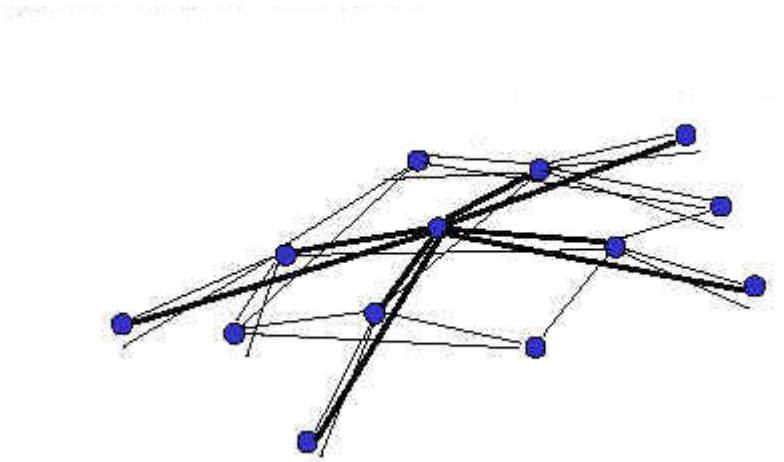
Η τοπολογία που δημιουργείται είναι αρκετά πολύπλοκη. Υπάρχουν Η τοπολογία που φαίνεται στην εικόνα έχει τη μορφή κυλινδρικού βρόχου. Στα υψηλότερα υψόμετρα οι σύνδεσμοι αποτυγχάνουν εξαιτίας της μεγάλης ταχύτητας των διερχόμενων δορυφόρων [17]. Η χρήση μιας τοπολογίας ρόδακα (Ballard) οδηγεί σε ένα δακτυλιοειδές δίκτυο. Αυτή η τοπολογία αποτελεί μια διαφορετική εκδοχή της τάξης των δικτύων, που είναι γνωστά ως Manhattan Networks [28]. Το δίκτυο είναι σίγουρα περιπλεγμένο και είναι πιθανές και άλλες εξαγωνικές, τριγωνικές ή άλλες περιπλέξεις συνδετικότητας.

Ποικιλία στις περιπλεγμένες τοπολογίες – Ο γεωδαιτικός παράγοντας

Είναι πιθανό ένας δορυφόρος να επικοινωνεί με οτιδήποτε βρίσκεται στο πεδίο όρασης του (όχι πάνω από τον ατμοσφαιρικό ορίζοντα) [17].

Η Teledesic συμπεριέλαβε συνδέσμους δύο βαθμών μεταξύ των δορυφόρων, όπου οι δορυφόροι μιλούσαν με τους γείτονες των γειτόνων τους και αποδείχτηκε ότι υπήρχε πλεονέκτημα καθυστέρησης διάδοσης και επεξεργασίας

σε σχέση με συστήματα πολλαπλών ενός βαθμού συνδέσμων. Η τοπολογία φαίνεται στην εικόνα 8.



Εικόνα 8. Τοπολογία στην οποία υπάρχουν σύνδεσμοι δύο βαθμών μεταξύ των δορυφόρων [17]

Αυτή η μέθοδος έχει προταθεί και για αρκετά γεωστατικά δίκτυα δακτυλίου, όπου η μείωση της καθυστέρησης είναι αξιοσημείωτη.

Όλες οι παραπάνω τοπολογίες είναι αρκετά πολύπλοκες. Κάθε δορυφόρος μπορεί να έχει 4-8 συνδέσμους (ISLs). Υπάρχουν δύο κατηγορίες συνδέσμων :

1. Σύνδεσμοι ενός βαθμού, που συνδέουν γειτονικούς δορυφόρους στην ίδια τροχιά
2. Σύνδεσμοι δύο βαθμών, που συνδέουν γειτονικούς δορυφόρους δορυφόρους, που βρίσκονται σε γειτονικές τροχιές. [19]

Παραπάνω παρουσιάστηκαν τοπολογίες, που περιλαμβάνουν συνδέσμους ενός αλλά και δύο βαθμών. Οι σύνδεσμοι ενός βαθμού διατηρούνται μόνιμα, αλλά κάποιοι σύνδεσμοι δύο βαθμών μπορεί προσωρινά να μη λειτουργούν όταν γωνία παρακολούθησης ή η απόσταση μεταξύ δυο δορυφόρων αλλάζει πολύ γρήγορα για να μπορέσουν να τις ακολουθήσουν οι κεραίες. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν δυο τροχιές διασταυρώνονται. Ο αλγόριθμος δρομολόγησης που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να μπορεί να χειρίζεται τις μεταβολές της τοπολογίας [19]. Ευτυχώς αυτές οι τοπολογίες έχουν κάποιες ενδιαφέρουσες και χρήσιμες ιδιότητες :

- Προβλεψιμότητα
- Περιοδικότητα
- Κανονικότητα
- Σταθερός αριθμός κόμβων δορυφορικού δικτύου

2.4.3 Αλγόριθμοι Δρομολόγησης για Δορυφορικά Δίκτυα

Αρκετές τεχνικές έχουν προταθεί για τη δρομολόγηση στο μεταβαλλόμενο αλλά εύκολα προβλέψιμο περιβάλλον των δορυφορικών δικτύων. Οι πιο σημαντικές από αυτές είναι οι παρακάτω:

DT - DVTR (Discrete Time - Dynamic Virtual Topology Routing) Αυτός ο αλγόριθμος κάνει πλήρη χρήση της περιοδικής φύσης των δορυφορικών αστερισμών. Χωρίζει την περίοδο T του συστήματος σε ένα σύνολο χρονικών διαστημάτων $[t_0=0, t_1]$, $[t_1, t_2]$, ..., $[t_{n-1}, t_n=T]$, επιλέγονται έτσι ώστε :

- η τοπολογία να αλλάζει μόνο στην αρχή κάθε διαστήματος και να παραμένει σταθερή μέχρι το επόμενο χρονικό διάστημα. Σε ένα διάστημα $[t_i, t_{i+1}]$, η τοπολογία μπορεί να μοντελοποιηθεί με ένα σταθερό γράφημα G_i . Σε κάθε διάστημα το πρόβλημα της δρομολόγησης είναι ένα πρόβλημα δρομολόγησης με στατική τοπολογία που μπορεί εύκολα να λυθεί.
- Το διάστημα $[t_i, t_{i+1}]$ είναι τόσο μικρό ώστε τα κόστη των μεμονομένων συνδέσμων ISLs να θεωρούνται ως σταθερά κατά τη διάρκεια κάθε διαστήματος. Τα κόστη αυτών των συνδέσμων μπορούν να υπολογιστούν από μια συνάρτηση με εισόδους την απόσταση μεταξύ των δορυφόρων, τη διάρκεια πριν την απενεργοποίηση ενός συνδέσμου, τη γεωγραφική θέση ή άλλους παράγοντες (αναθέτοντας υψηλότερο κόστος στους συνδέσμους με υψηλότερο γεωγραφικό πλάτος και με μικρό χρόνο πριν την απενεργοποίηση για παράδειγμα) [18]

Κατά τη διάρκεια αυτών των διαστημάτων «στιγμιαία» τοπολογία έχει σταθεροποιηθεί. Μπορούν να εγκατασταθούν βέλτιστα μονοπάτια μεταξύ δορυφόρων στο γράφημα του δικτύου με μια από τις γνωστές μεθόδους, όπως ο αλγόριθμος του συντομότερου μονοπατιού του Dijkstra. Σε αυτή την περίπτωση απαιτείται αρκετή μνήμη στους δορυφόρους για τους υπολογισμούς. Για να λυθεί το πρόβλημα της μνήμης αλλά και για να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των ανταλλαγών από δορυφόρο σε δορυφόρο που απαιτούνται κατά τη διάρκεια μιας περιόδου, μπορεί να προστεθεί μια διαδικασία βελτιστοποίησης για την επιλογή μεταξύ διαφορετικών μονοπατιών μεταξύ δυο δορυφόρων [29].

VN – Virtual Node Ο στόχος αυτού του αλγόριθμου είναι να κρύψει τις αλλαγές της τοπολογίας από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης. Μια ιδεατή τοπολογία δημιουργείται η οποία τοποθετείται με εικονικούς κόμβους πάνω από τη φυσική τοπολογία των δορυφορικών αστερισμών. Οι δορυφόροι μπορεί να κινούνται, αλλά η εικονική τοπολογία παραμένει σταθερή. Κάθε εικονικός κόμβος κρατάει πληροφορίες της κατάστασης, συμπεριλαμβανομένων πινάκων δρομολόγησης και πληροφορίες χρηστών που ανήκουν στην περιοχή κάλυψης του ιδεατού κόμβου. Σε μια συγκεκριμένη περίοδο κάθε εικονικός κόμβος αναπαρίσταται από ένα φυσικό δορυφόρο. Καθώς αυτός ο δορυφόρος εξαφανίζεται από τον ορίζοντα ο ιδεατός κόμβος αναπαρίσταται από τον επόμενο δορυφόρο που περνάει. Οι πληροφορίες κατάστασης επίσης μεταφέρονται από τον ένα δορυφόρο στον άλλο. Στην ιδεατή τοπολογία αποφασίζεται η

δρομολόγηση και τα πρωτόκολλα δεν γνωρίζουν τους δυναμικούς δορυφορικούς αστερισμούς, που κρύβονται στις πληροφορίες κατάστασης που μεταφέρονται.

Παρακάτω αναφέρονται κάποιοι αλγόριθμοι δρομολόγησης, που έχουν προταθεί. Παρουσιάζονται αλγόριθμοι για την αύξηση της αποδοτικότητας, για την επαναδρομολόγηση μετά από μια ανταλλαγή δορυφόρων με στόχο την επίτευξη ισορροπίας μεταξύ της προσθήκης διαδρομών και της βέλτιστης δρομολόγησης. Για τις επικοινωνίες, που είναι βασισμένες σε διάγραμμα, προτείνονται αλγόριθμοι για την επίτευξη κλιμακωτής και αποδοτικής δρομολόγησης και ευρείας εκπομπής. Επίσης παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος ενημέρωσης της θέσης και σελιδοποίησης για το χειρισμό της κινητικότητας του χρήστη και του δορυφόρου στα συστήματα LEO [31].

2.4.3.1 Datagram Routing Algorithm (Αλγόριθμος δρομολόγησης διαγράμματος)

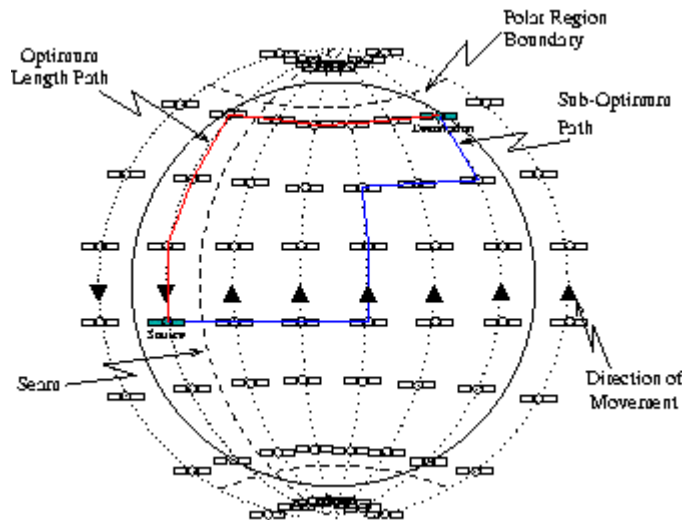
Ο αλγόριθμος αυτός είναι σχεδιασμένος για αστερισμούς τύπου Walker. Έχει ως στόχο να προωθεί τα πακέτα από μονοπάτια μεταξύ πηγής και προορισμού, με την ελάχιστη δυνατή καθυστέρηση μετάδοσης. Ο αλγόριθμος εγγυάται ότι η καθυστέρηση μετάδοσης για τα πακέτα είναι μικρότερη ή ίση από την καθυστέρηση μετάδοσης του μεγαλύτερου πιθανού μονοπατιού ελάχιστης καθυστέρησης μεταξύ του ίδιου ζευγαριού πηγής – προορισμού. Ο αλγόριθμος εκμεταλλεύεται την κανονικότητα των αστερισμών LEO. Οι δορυφόροι δεν ανταλλάσσουν πληροφορίες τοπολογίας και γι' αυτό το πρωτόκολλο από πάνω είναι μηδέν.

Σε αυτόν τον αλγόριθμο ο αστερισμός έχει χωριστεί σε δυο λογικές θέσεις. Οι λογικές αυτές θέσεις είναι τρύπες του ίδιου χώρου στο σφαιρικό πλέγμα του αστερισμού Walker. Αυτές οι τρύπες γεμίζουν από τους πιο κοντινούς δορυφόρους. Η δρομολόγηση γίνεται μεταξύ των λογικών θέσεων, για παράδειγμα των τρυπών του πλέγματος. Η κινητικότητα των δορυφόρων εγκλωβίζεται από την ιδέα των λογικών θέσεων. Για κάθε πακέτο κάθε δορυφόρος υπολογίζει το επόμενο μεταπήδημα ανεξάρτητα από τα προηγούμενα. Ο αλγόριθμος δρομολόγησης διαβεβαιώνει ότι:

- Τα πακέτα ακολουθούν τη διαδρομή με τη μικρότερη δυνατή καθυστέρηση μετάδοσης μεταξύ των λογικών θέσεων
- Οι περιοχές με συμφόρηση αποφεύγονται
- Το μονοπάτι στο οποίο καταλήγει είναι ελεύθερο από βρόχους (loop free)

Ο αλγόριθμος δρομολόγησης διαγράμματος επεξεργάζεται κάθε εισερχόμενο πακέτο ανεξάρτητα. Κάθε δορυφόρος υπολογίζει το επόμενο μεταπήδημα σε δορυφόρο για κάθε πακέτο που λαμβάνει. Το επόμενο μεταπήδημα στο μονοπάτι υπολογίζεται σε δυο φάσεις. Στην φάση *Εκτίμησης της κατεύθυνσης* οι κατευθύνσεις των πιθανών επόμενων μεταπηδήσεων στο μονοπάτι ελάχιστης καθυστέρησης καθορίζονται, υποθέτοντας ότι όλοι οι σύνδεσμοι δορυφόρων έχουν το ίδιο μήκος. Η φάση αυτή υπολογίζει μια ή δυο πιθανές κατευθύνσεις για το επόμενο μεταπήδημα. Αφού τα μήκη των συνδέσμων δορυφόρων σε ένα δορυφορικό δίκτυο διαφέρουν, η φάση αυτή χρειάζεται όπου λαμβάνονται υπόψιν

οι διαφορές των μηκών των inter-plane ISLs και σημειώνονται οι δυο κατευθύνσεις ως πρωτεύουσα ή μια και δευτερεύουσα ή άλλη. Αν ακολουθηθούν οι πρωτεύουσες κατευθύνσεις τότε τα πακέτα δρομολογούνται από τα μονοπάτια μικρότερης καθυστέρησης μετάδοσης μεταξύ των λογικών θέσεων. Η εικόνα 9 δείχνει μικρότερης καθυστέρησης μετάδοσης μεταξύ ενός ζευγαριού πηγής-προορισμού [33].



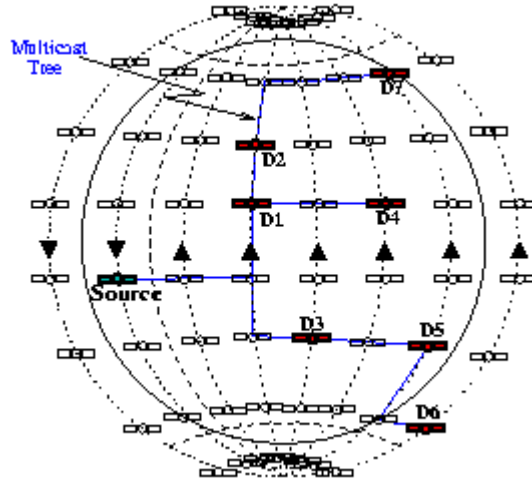
Εικόνα 9. Το μονοπάτι μικρότερης καθυστέρησης μετάδοσης στον αλγόριθμο δρομολόγησης διαγράμματος [33]

2.4.3.2 Multicast Routing Algorithm (Αλγόριθμος δρομολόγησης πολλαπλής διανομής)

Αυτό το πρωτόκολλο είναι βασισμένο στον προηγούμενο αλγόριθμο. Με τη χρήση του αλγόριθμου δρομολόγησης διαγράμματος, το νέο πρωτόκολλο πολλαπλής διανομής δημιουργεί πολλαπλής διανομής δέντρα στον αστερισμό LEO, που δρομολογούνται στην πηγή κάθε ομάδας πολλαπλής διανομής. Οι μεμονωμένες καθυστερήσεις διάδοσης στα μέλη πολλαπλής διανομής ορίζονται από την καθυστέρηση διάδοσης του μακεύτερου ελάχιστου μονοπατιού. Το δέντρο δημιουργείται έτσι ώστε το αντίγραφο του πακέτου πολλαπλής διανομής να είναι ελαχιστοποιημένο σε κάθε δορυφόρο, με αποτέλεσμα το μειωμένο μήκος δέντρου. Η διατήρηση του δέντρου δε χρειάζεται εκτός κι αν τα μέλη της ομάδας πολλαπλής διανομής αλλάξουν. Χρησιμοποιώντας την έννοια της λογικής θέσης, το νέο πολλαπλής διανομής πρωτόκολλο συντηρεί την αρχική δομή δέντρων παρά τη δορυφορική κινητικότητα.

Τα δέντρα πολλαπλής διανομής (multicast trees) δημιουργούνται με έναν περιοδικά επαναλαμβανόμενο τρόπο, χρησιμοποιώντας πακέτα δέντρων $P=(A,B)$, όπου A είναι η ταυτότητα του τμήματος και B είναι μια τμηματική λίστα των δορυφόρων προορισμού. Ο δορυφόρος – πηγή δημιουργεί πρώτα ένα πακέτο δέντρου για τη δική του χρήση με μια πλήρη λίστα των δορυφόρων προορισμού.

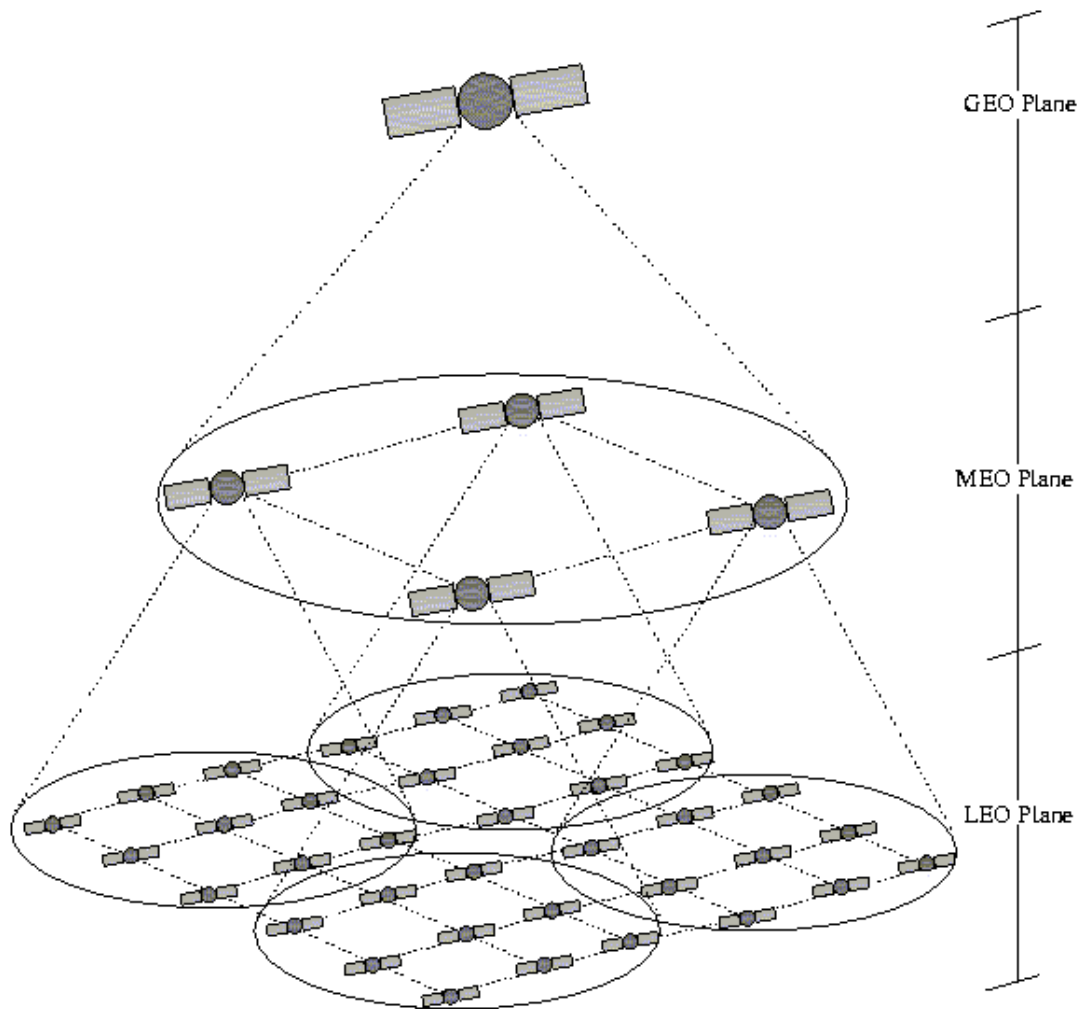
Όπως κάθε άλλος δορυφόρος που λαμβάνει ένα πακέτο δέντρου, ο δορυφόρος – πηγή χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο δρομολόγησης διαγράμματος για να καθορίσει τις κατευθύνσεις υψηλής και χαμηλής προτεραιότητας για κάθε προορισμό. Ακολουθώντας αυτό, δημιουργούνται υποομάδες μέσα στην τμηματική λίστα Β. Το κλειδί στη δημιουργία υποομάδων είναι να διατηρείται όσο το δυνατόν πιο μικρός ο αριθμός των υποομάδων [34]. Στην εικόνα 10 φαίνεται ένα δέντρο πολλαπλής διανομής.



Εικόνα 10. Ένα δέντρο πολλαπλής διανομής [34]

2.4.3.3 Hybrid Terrestrial/Satellite Routing Algorithm (Αλγόριθμος δρομολόγησης υβριδικών επίγειων/δορυφορικών συστημάτων)

Γι' αυτόν τον αλγόριθμο γίνεται εισαγωγή ενός διαφορετικού μοντέλου αρχιτεκτονικής. Σε αυτή την αρχιτεκτονική χρησιμοποιούνται δορυφόροι LEO, MEO, GEO για να δρομολογήσουν την κυκλοφοριακή κίνηση που δημιουργείται στα τερματικά στη γη. Τα πακέτα μπορούν να ακολουθήσουν μονοπάτια που είναι ολοκληρωτικά στη γη ή που βρίσκονται μεταξύ των δορυφόρων. Η επικοινωνία στο πολυεπίπεδο δορυφορικό δίκτυο εκτελείται μέσα από συνδέσμους ISLs και συνδέσμους μεταξύ των τροχιών Inter-Orbital Links (IOLs). Κάθε δορυφόρος στα επίπεδα LEO και MEO έχει συνδέσμους με τέσσερις γειτονικούς δορυφόρους. Οι δορυφόροι GEO μπορούν να επικοινωνούν με όλους τους άλλους GEO δορυφόρους όσο διατηρούν τη γραμμή ορατής επικοινωνίας, όπως φαίνεται και στην εικόνα 11.

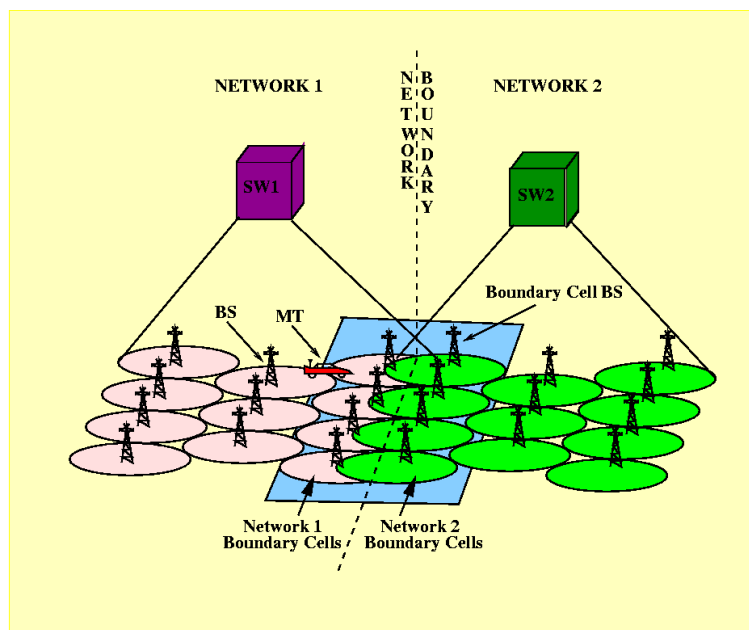


Εικόνα 11. Η πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική δορυφορικών συστημάτων [32]

Τα επίπεδα LEO και MEO διαιρούνται σε δυο ομάδες. Οι ομάδες διοικούνται από δορυφόρους του υψηλότερου επιπέδου. Οι μετρήσεις καθυστερήσεων που γίνονται στο επίπεδο LEO, αναφέρονται στην ομάδα που διοικεί το επίπεδο MEO. Οι διαχειριστές των ομάδων είναι υπεύθυνοι για τον υπολογισμό των πινάκων δρομολόγησης για τους δορυφόρους LEO των ομάδων τους. Ο υπολογισμός γίνεται αφού ανταλλάξουν πληροφορίες για τις καθυστερήσεις με τους υπόλοιπους MEO δορυφόρους. Οι GEO δορυφόροι είναι οι διαχειριστές για τις ομάδες των MEO. Οι πληροφορίες για τις καθυστερήσεις μεταδίδονται μέσω των IOLs συνδέσμων στους διαχειριστές των ομάδων GEO. Όπως πριν αυτού οι διαχειριστές υπολογίζουν τους πίνακες δρομολόγησης και ενημερώνουν αυτούς του επιπέδου MEO. Επιπλέον οι πίνακες δρομολόγησης αναφέρονται στις πύλες εξόδου της γης μαζί με τις καθυστερήσεις που σχετίζονται με αυτούς. Οι δορυφόροι GEO επίσης ανταλλάσσουν πληροφορίες για την κυκλοφοριακή κίνηση μεταξύ τους [32].

2.4.3.4 Inter-System Handoff Management (Αλγόριθμος διαχείρισης ανταλλαγών μεταξύ των δορυφόρων)

Τα ασύρματα συστήματα τρίτης γενιάς υπόσχονται ιεραρχική κάλυψη, υψηλούς ρυθμούς δεδομένων και υποστήριξη για πολυμεσικές συνδέσεις. Ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα των υπηρεσιών των συστημάτων τρίτης γενιάς είναι η διαχείριση ανταλλαγών δορυφόρων. Εδώ παρουσιάζεται η ιδέα μιας περιοριστικής περιοχής στην αρχιτεκτονική συστήματος. Αυτή η περιοχή χρησιμοποιείται σε ένα πρωτόκολλο ανταλλαγής δορυφόρων για να προετοιμάσει το κινούμενο τερματικό για επικοινωνία στο επόμενο σύστημα. Νέες διαδικασίες και μηνύματα σημάτων αναπτύσσονται για την υποστήριξη παγκόσμιας συνδετικότητας για τους κινούμενους χρήστες και την ποιότητα των υπηρεσιών για τις κινητές συνδέσεις.

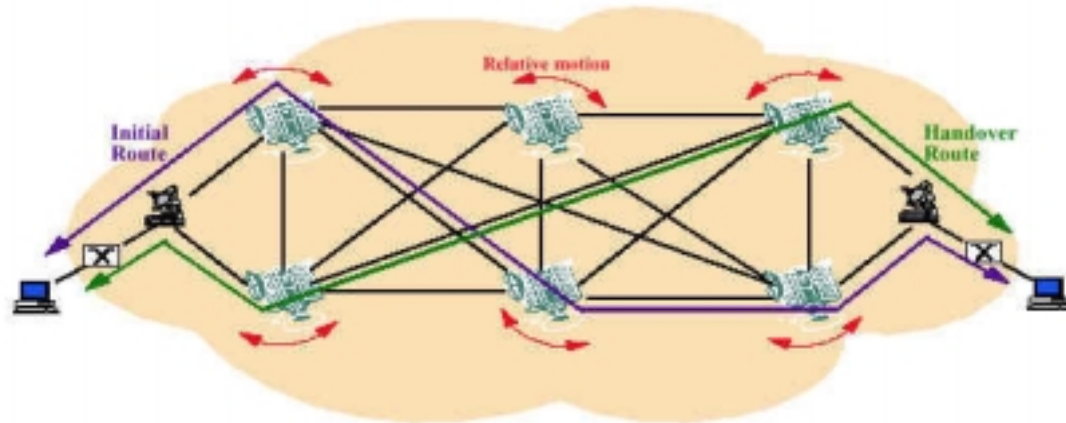


Εικόνα 12. Αρχιτεκτονική συστήματος με περιοριστική περιοχή (Boundary Region) [35]

2.4.3.5 Δρομολόγηση για αποτελεσματικότερες υπηρεσίες στα δορυφορικά συστήματα LEO

Οι αλγόριθμοι που θα παρουσιαστούν εδώ βασίζονται σε ένα πρωτοποριακό σχήμα διευθυνσιοδότησης καθώς και σε μια τεχνική παρεκτροπής για να αντιμετωπιστεί επιτυχώς το περιορισμένο μέγεθος των ενδιάμεσων μνημών (buffers) στο δορυφόρο. Αυτοί οι αλγόριθμοι είναι απλοί και απαιτούν λίγη επεξεργασία στο δορυφόρο, καθώς και χαμηλή ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ των κόμβων [36].

Στην εικόνα 13 φαίνεται ένα σύστημα LEO.



Εικόνα 13. Δορυφορικό σύστημα LEO [36]

Τα χαρακτηριστικά ενός δικτύου όπως το παραπάνω είναι :

- Δεκάδες με εκατοντάδες δορυφόρων
- Αλλαγή τοπολογίας κάθε δέκατο του δευτερολέπτου
- Δεκάδες εκατοντάδων σταθερών μονάδων στη γη
- Πολύπλοκες αλλαγές τοπολογίας λόγω των διασταυρώσεων των επιπέδων.

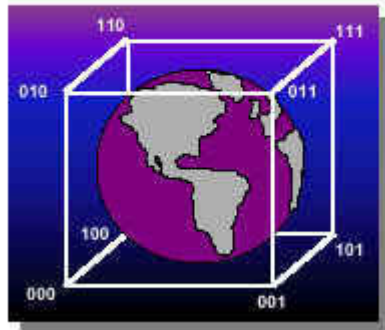
Η Nortel Networks έχει σχεδιάσει δύο απλούς αλγόριθμους δρομολόγησης για πιο αποτελεσματική διαχείριση της κυκλοφοριακής κίνησης στα δορυφορικά LEO δίκτυα:

1. **Pure Gray-code addressing and routing algorithm** χωρίς ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ των δορυφόρων.
2. **Enhanced Gray-code addressing and routing algorithm** με ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ γειτονικών δορυφόρων.

Οι αλγόριθμοι αυτοί εφαρμόζουν μια έξυπνη διευθυνσιοδότηση και μια τεχνική παρεκτροπής.

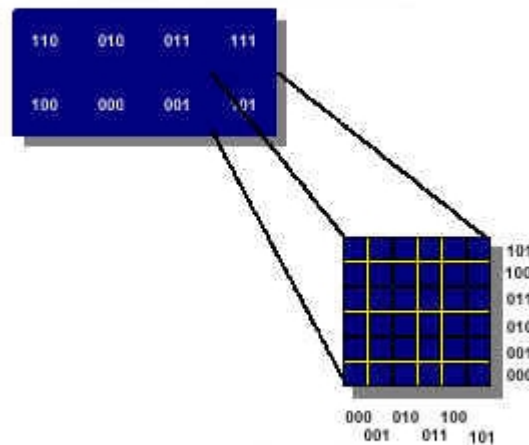
Διευθυνσιοδότηση και ιεραρχική δρομολόγηση

1^ο επίπεδο : 3 bit gray-code διευθυνσιοδότηση, δημιουργία 8 τμημάτων, όπως φαίνεται και στην εικόνα 14.



Εικόνα 14. Δημιουργία 8 τομέων [36]

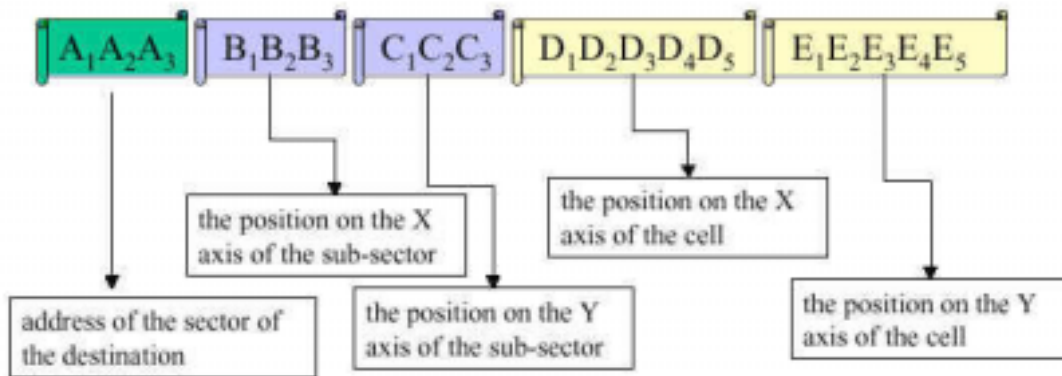
Μετατροπή του τρισδιάστατου προβλήματος της γης σε διδιάστατο πρόβλημα δρομολόγησης, όπως φαίνεται στην εικόνα 15.



Εικόνα 15. Μετατροπή τρισδιάστατου προβλήματος της γης σε διδιάστατο πρόβλημα δρομολόγησης [36]

2^ο επίπεδο και 3^ο επίπεδο: 6 και 10 bits γραμμικά. Η διευθυνσιοδότηση προσδιορίζεται σύμφωνα με ένα διδιάστατο δυο συντεταγμένων x,y επίπεδο. Δημιουργούνται 36 υποτομείς σε κάθε τομέα και 364 βασικές μονάδες σε κάθε υποτομέα. Για ένα δορυφόρο 364 μονάδων αρκούν 19 bits για να αναπαραστήσουν 104,832 θέσεις βασικών μονάδων [36].

Κάθε δορυφόρος ξέρει για τις διευθύνσεις των βασικών μονάδων, υποτομέων και τομέων που καλύπτει. Αυτό φαίνεται στην εικόνα 16.



Εικόνα 16. Διεύθυνση που λαμβάνει ο δορυφόρος [36]

Τα αποτελέσματα για τους δύο αλγορίθμους μετά από προσομείωση είναι τα εξής:

- Για τον πρώτο αλγόριθμο ο μέσος όρος παραπάνω μεταπηδήσεων από δορυφόρο σε δορυφόρο είναι 0.8.
- Για το δεύτερο αλγόριθμο ο μέσος όρος μειώνεται στο 0,65.

Συμπεράσματα :

- Οι παραπάνω αλγόριθμοι είναι απλοί αλλά συ,περιφέρονται καλά σε ένα σταθερό περιβάλλον
- Στις περισσότερες περιπτώσεις τα πακέτα φτάνουν τον κόμβο προορισμού με έναν αριθμό μεταπηδήσεων ισοδύναμο με το μικρότερο μονοπάτι.
- Η ανακατάταξη των πακέτων είναι απαραίτητη στον κόμβο προορισμού, έτσι ο αλγόριθμος είναι κατάλληλος για τη μεταφορά αποτελεσματικών υπηρεσιών.

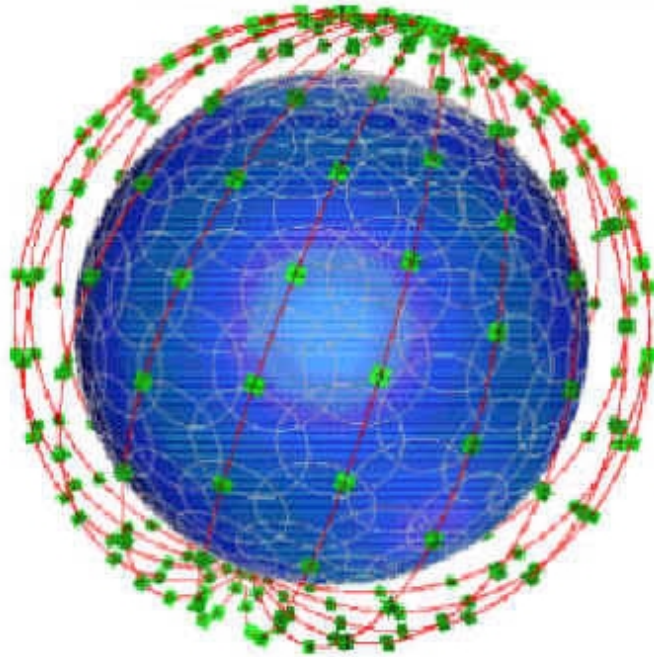
2.4.3.6 Ένα παράδειγμα : Teledesic

Ένα παράδειγμα δορυφορικού δικτύου με LEO δορυφόρους είναι το σύστημα της Teledesic στο οποίο :

- Κινούνται 288 δορυφόροι και αλλαγή τοπολογίας συμβαίνει κάθε δέκατο του δευτερολέπτου
- Δίκτυο με πολύ συμμετρική τοπολογία
- Χρήση 6 ISLs συνδέσμων, 2 σταθερών και 4 δυναμικών

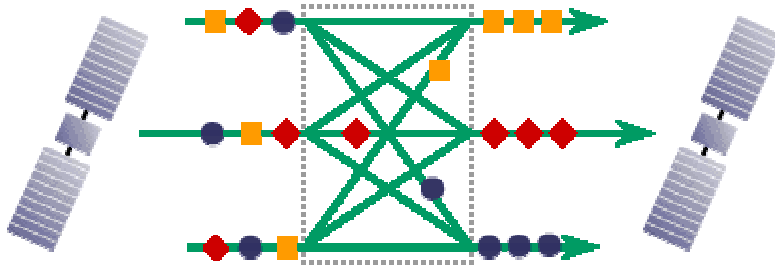
- Μικρή δυναμικότητα επεξεργασίας στο δορυφόρο
- Πολύ περιορισμένη αναμονή στο δορυφόρο
- Μεταγωγή πακέτων χωρίς σύνδεση

Στην εικόνα 14 φαίνεται το σύστημα της Teledesic.



Εικόνα 14. Δορυφορικό σύστημα Teledesic [27]

Το δίκτυο της Teledesic χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό από διευθυνσιοδότηση πακέτων βασισμένη στην κατεύθυνση και έναν κατακευκτικό, προσαρμόσιμο αλγόριθμο δρομολόγησης πακέτων για την επίτευξη μικρής καθυστέρησης στο δίκτυο. Κάθε πακέτο κουβαλάει τη διεύθυνση δικτύου του τερματικού προορισμού και κάθε κόμβος ανεξάρτητα επιλέγει τη διαδρομή με τη μικρότερη καθυστέρηση προς αυτό τον προορισμό. Πακέτα της ίδιας περιόδου μπορεί να ακολουθούν διαφορετικά μονοπάτια στο δίκτυο, όπως φαίνεται και στην εικόνα 15. Το τερματικό προορισμού αποθηκεύει και αν χρειαστεί ανακατατάσει τα λαμβανόμενα πακέτα για να εξαλείψει το αποτέλεσμα από τις μεταβολές του χρόνου [37].



Εικόνα 15. Ο κατανεμημένος, προσαρμόσιμος αλγόριθμος δρομολόγησης της Teledesic [37]

2.5 Το επίπεδο μεταφοράς

Τα πρωτόκολλα TCP/IP και UDP/IP αποτελούν τη βάση του Internet, με αποτέλεσμα να μην είναι τόσο πιθανό να αντικατασταθούν στο κοντινό μέλλον. Γι' αυτό το λόγο και το δορυφορικό Internet αναμένεται να χρησιμοποιεί αυτά τα πρωτόκολλα. Ωστόσο η απόδοση αυτών των πρωτοκόλλων θα επηρεαστεί σημαντικά από το μεγάλο χρόνο απόκρισης και τη μεγάλη πιθανότητα λαθών, που είναι βασικά χαρακτηριστικά των δορυφορικών δικτύων.

2.5.1 Το TCP στα δορυφορικά δίκτυα - Προβλήματα

Το TCP χρησιμοποιεί ένα πρακτικό μηχανισμό ανατροφοδότησης για την επίτευξη ελέγχου του ρυθμού μετάδοσης και αξιόπιστης διανομής. Ο μεγάλος χρόνος απόκρισης στους δορυφορικούς συνδέσμους και ιδιαίτερα στους συνδέσμους GEO αυξάνουν την καθυστέρηση μετάδοσης. Η αργή ανατροφοδότηση μετά από συγκρούσεις καθυστερεί πολύ την έξοδο του δικτύου. Ένα άλλο πιθανό πρόβλημα είναι η μεγάλη διακύμανση του χρόνου πραγματοποίησης του κύκλου του δορυφόρου (round-trip time, RTT), λόγω της δυναμικής τοπολογίας των LEO αστερισμών, που μελετήσαμε παραπάνω [19].

Στο αργό αρχικό στάδιο της TCP μετάδοσης, παρόλο που ο ρυθμός μετάδοσης αυξάνει εκθετικά, είναι πολύ αργός για το υψηλό εύρος των δορυφορικών συνδέσμων. Μια λύση είναι η αύξηση της αρχικής τιμής του παραθύρου. Το TCP ορίζει κανονικά μέγεθος παραθύρου 64Kbytes, που επίσης περιορίζει το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης στα 64 Kbytes/RTT. Ο δορυφορικός σύνδεσμος θα υποχρησιμοποιείται και θα απαιτείται μεγάλο μέγεθος παραθύρου για μεγαλύτερη έξοδο.

Επίσης οι δορυφορικοί σύνδεσμοι επηρεάζονται πολύ από καιρικά φαινόμενα, θορύβους κ.α με αποτέλεσμα να αναμένεται ένας υψηλός ρυθμός λαθών. Παρόλο που χρησιμοποιούνται προηγμένα σχήματα κωδικοποίησης, διαμόρφωσης και τεχνικές διόρθωσης λαθών σε μερικά περιβάλλοντα ο ρυθμός

λαθών επιμένει. Το TCP όμως δεν διακρίνει τα κατεστραμμένα δεδομένα, που προκαλούνται από λάθη μετάδοσης από τα πακέτα που έχουν χαθεί λόγω συμφόρησης του δικτύου. Επιπλέον τα λάθη μετάδοσης στα δορυφορικά δίκτυα μειώνουν πάρα πολύ την έξοδο πληροφορίας. Επιπρόσθετα η απόδοση του TCP επηρεάζεται από την δικτυακή ασυμμετρία. Ένας λόγος που δημιουργεί αυτή την ασυμμετρία είναι η ασυμμετρία του εύρους ζώνης σε αλληλεπιδραστικά τερματικά. Αυτά μπορεί να κατεβάζουν δεδομένα με ρυθμούς δεκάδες Mbits/sec αλλά η ανερχόμενη ζεύξη να πετυχαίνει ταχύτητες μερικών εκατοντάδων Kbits/sec. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το πρόβλημα της επιβεβαίωσης λήψης. Η απώλεια επιβιβέωσης λήψης λόγω της συμφόρησης του ανερχόμενου συνδέσμου μπορεί να προκαλέσει άσκοπες επανεκπομπές του μηνύματος [19].

Ένα άλλο πρόβλημα που κληρονομείται στο TCP είναι το ζήτημα του δίκαιου διαμοιρασμού ενός συνδέσμου με κυκλοφοριακή κίνηση, όταν υπάρχουν διαφορετικές TCP συνδέσεις με διαφορετικούς χρόνους πραγματοποίησης των κύκλων των δορυφόρων. Τότε οι συνδέσεις με μεγαλύτερο χρόνο πραγματοποίησης κύκλου έχουν πρόβλημα λόγω άδικης κατανομής του εύρους ζώνης.

2.5.2 Βελτιώσεις της απόδοσης του TCP στα δορυφορικά δίκτυα

Η ομάδα εργασίας IETF για το TCP στα δορυφορικά δίκτυα έχει κάνει κάποιες προτάσεις για βελτίωση της απόδοσης του TCP όπως οι εξής:

- **TCP selective Acknowledgment (SACK)** Οι επιλογές αυτές επιτρέπουν στον παραλήπτη να προσδιορίσει τα πακέτα που λήφθηκαν σωστά. Έτσι ο αποστολέας πρέπει να στείλει μόνο τα πακέτα που χάθηκαν. Η μέθοδος αυτή μπορεί να ανακτήσει πολλαπλές απώλειες σε ένα παράθυρο μετάδοσης μέσα σε έναν κύκλο πραγματοποίησης κύκλου.
- **TCP for Transaction (T/TCP)** Αυτή η μέθοδος προσπαθεί να μειώσει το χρόνο απόκρισης κατά την ανταλλαγή σημάτων επικοινωνίας μεταξύ συνδέσεων από 2 χρόνους πραγματοποίησης κύκλου σε 1, που είναι μια σημαντική βελτίωση για μικρές μεταδόσεις.
- **Persistent TCP connection** Αυτή η μέθοδος επιτρέπει πολλαπλές μικρές μεταφορές για το κατέβασμα σε μια απλή συνεχή σύνδεση TCP.
- **The Path maximum transfer unit (MTU)** Ο μηχανισμός αυτός επιτρέπει στο TCP να χρησιμοποιήσει το μεγαλύτερο δυνατό μέγεθος πακέτου αποφεύγοντας την τμηματοποίηση του IP.

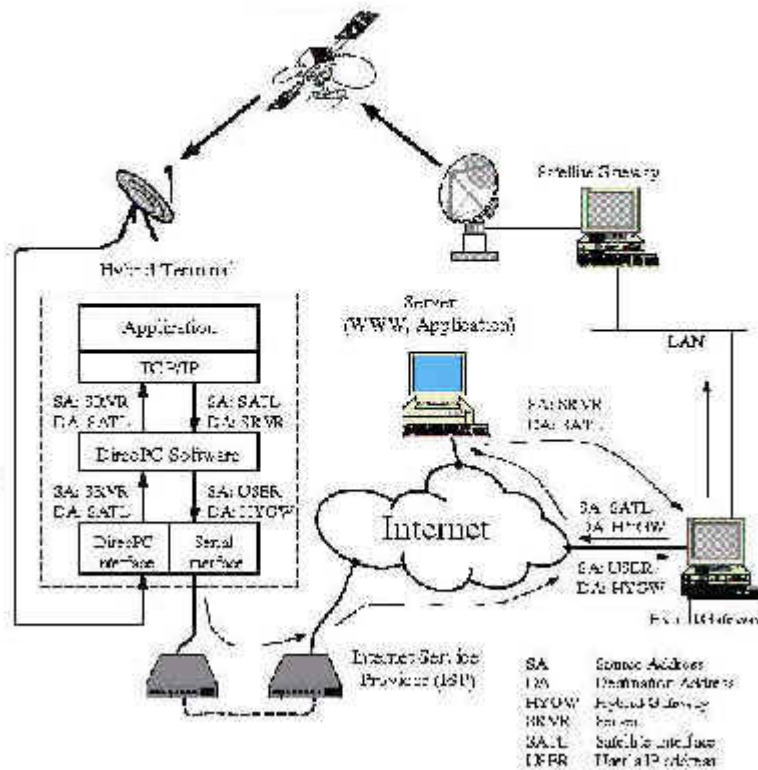
Οι παραπάνω τεχνικές μπορούν να λύσουν κάποιους από τους περιορισμούς του πρωτοκόλλου TCP στα δορυφορικά δίκτυα, αλλά υπάρχουν προβλήματα όπως ο μεγάλος χρόνος απόκρισης και η ασυμμετρία, που δεν αντιμετωπίζονται αποτελεσματικά με αυτές τις τεχνικές. Ένας τρόπος για την αντιμετώπιση των αποτελεσμάτων του μεγάλου χρόνου απόκρισης είναι να χωριστεί η σύνδεση TCP σε δυο ή περισσότερα τμήματα στους σταθμούς – πύλες (Gateway Stations, GSs), που συνδέουν το δορυφορικό δίκτυο με τα επίγεια δίκτυα. Υπάρχουν τρεις προσεγγίσεις για το χωρισμό των συνδέσεων TCP στους δορυφορικούς συνδέσμους:

- **TCP spoofing** Οι διαχωρισμένες συνδέσεις απομονώνονται από τους σταθμούς-πύλες, που πρόωρα στέλνουν επιβεβαιώσεις λήψης με τα πακέτα που λαμβάνουν. Αυτοί οι σταθμοί είναι και υπεύθυνοι για την επανεκπομπή οποιονδήποτε χαμένων δεδομένων.
- **TCP splitting** Ένα ιδιόκτητο πρωτόκολλο μεταφοράς μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα δορυφορικά δίκτυα χωρίς ανάμειξη με το TCP στα επίγεια δίκτυα. Είναι πιο ευέλικτη λύση και θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί κάποιο είδος μετατροπέα πρωτοκόλλου στα σημεία χωρισμού.
- **Web caching** Σε αντίθεση με τα προηγούμενα δύο σχήματα εδώ γίνεται χωρισμός της σύνδεσης TCP από μια κρυφή μνήμη Web (web cache). Οι χρήστες του δορυφορικού δικτύου που είναι συνδεδεμένοι με αυτή τη μνήμη cache δε χρειάζεται να εγκαταστήσουν σύνδεση TCP με τους απομακρυσμένους servers αν τα απαιτούμενα περιεχόμενα είναι διαθέσιμα από την cache. Αυτή η μέθοδος μειώνει αποτελεσματικά το χρόνο απόκρισης και την κατανάλωση εύρους ζώνης.

Παράδειγμα διαμοιρασμού του TCP

Μια λύση για τη λύση των προβλημάτων που δημιουργεί το πρωτόκολλο TCP στα δορυφορικά δίκτυα είναι η τεχνική διαμοιρασμού του TCP σε δυο φυσικά κανάλια :ένα συμβατικό επίγειο επιλογικό σύνδεσμο για τη μεταφορά δεδομένων από το χρήστη στο Internet και ένα πιο γρήγορο, μιας κατεύθυνσης σύνδεσμο για τη μεταφορά δεδομένων από το Internet στο χρήστη. Αυτή η πρόσβαση για οικονομικούς περισσότερους και όχι εχθικούς λόγους είναι πιθανότατα ασύμμετρη ενώ στο μέλλον η πρόσβαση στο διαδίκτυο με δορυφορικά συστήματα ευρείας εκπομπής δεν θα είναι αποκλειστικά ασύμμετρη.

Μια υβριδική σύνδεση όπως η παραπάνω χρησιμοποιείται στο σύστημα DirectPC για να παρέχει ασύμμετρη πρόσβαση στο διαδίκτυο με στόχο την υποστήριξη εφαρμογών, που απαιτούν μεγάλο εύρος ζώνης, όπως η φυλλομέτρηση του www. Αυτό το σύστημα σχεδιάστηκε για να υποστηρίζει κάθε προσωπικό υπολογιστή, κάθε εμπορικό πακέτο TCP/IP, κάθε τύπο δρομολογητή κ.λ.π. Στο DirectPC για την επίτευξη της απαιτούμενης δρομολόγησης της εισερχόμενης πληροφορίας ενός χρήστη από τους Internet hosts (κεντρικοί υπολογιστές του δικτύου) χρησιμοποιείται IP encapsulation ή Tunneling. Με το tunneling το διάγραμμα IP ενός χρήστη συμπτύκνεται στο μηχάνημα του μέσα σε ένα άλλο διάγραμμα IP. Το IP διάγραμμα δρομολογείται στο σύστημα DirectPC όπου απομακρύνεται η συμπτύκνωση. Η αρχική διεύθυνση του πρωτότυπου διαγράμματος IP αλλάζει τότε σε εκείνη της δορυφορικής πύλης του DirectPC έτσι ώστε να επιστρέψουν οι πληροφορίες από τον απομακρυσμένο Internet host στην πύλη αντι για το χρήστη μέσω του παροχέα υπηρεσιών Internet που έχει. Όταν φτάσουν οι ζητούμενες πληροφορίες από τον απομακρυσμένο κεντρικό υπολογιστή στην πύλη στέλνονται μέσω του δορυφόρου και λαμβάνονται από το χρήστη με μια μικρή δορυφορική κεραία. Με αυτό το σύστημα μπορεί να παρέχεται στο χρήστη ένας ρυθμός κατερχόμενης ζεύξης των 400 Kbps (δεν λαμβάνονται υπόψιν περιορισμοί που θέτονται από το TCP).Η χρήση της τεχνικής TCP spoofing μπορεί να βελτιώσει την απόδοση αυτού του συστήματος [27]. Στην εικόνα 16 παρουσιάζεται το σύστημα DirectPC.



Εικόνα 16. Σύστημα DirectPC [27]

3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι δορυφόροι αποτελούν πολύ σημαντικά συστατικά μέρη των συστημάτων επικοινωνίας λόγω κάποιων μοναδικών χαρακτηριστικών τους. Μερικές από τις ιδιότητες τους όπως η χαμηλού κόστους παγκόσμια κάλυψη, η μεγάλη δυναμικότητα, η ευρεία πρόσβαση, το μεγάλο εύρος ζώνης των συνδέσμων τους αποτελούν σημαντικά πλεονεκτήματα, που καθιστούν τους δορυφορικούς συνδέσμους ελκυστική λύση για την επίτευξη γρηγορότερης πρόσβασης στο Internet. Από την άλλη πλευρά κάποιες άλλες ιδιότητες των δορυφορικών συνδέσμων όπως η καθυστέρηση διάδοσης, η ύπαρξη λαθών λόγω θορύβου - χαμηλή ποιότητα των ασύρματων καναλιών, η έκθεση στην ακτινοβολία του διαστήματος αποτελούν σοβαρά μειονεκτήματα.

Πολλές είναι οι τεχνικές, οι αλγόριθμοι και οι μέθοδοι που ερευνούνται για την επίλυση των προβλημάτων, που αντιμετωπίζουν τα δορυφορικά δίκτυα και για την μετατροπή των μειονεκτημάτων τους σε δυνάμεις. Η δυναμική τοπολογία των δορυφορικών δικτύων, όπως μελετήθηκε παραπάνω δημιουργεί δυσκολίες στη

δρομολόγηση των πακέτων δεδομένων. Αλγόριθμοι για την αποδοτικότερη δρομολόγηση των δεδομένων μεταξύ των δορυφορικών συνδέσμων ερευνούνται και αρκετοί από αυτούς λύνουν σε μεγάλο βαθμό αυτό το πρόβλημα. Ακόμη θέματα που αφορούν τη μεταφορά και την πολλαπλή διανομή στα δορυφορικά δίκτυα απασχολούν τους ειδικούς και γίνονται προσπάθειες για την εύρεση αποδοτικών πρωτοκόλλων μεταφοράς για τα δορυφορικά δίκτυα. Ο στόχος είναι η ανεύρεση μεθόδων που θα εξασφαλίζουν δορυφορικά δίκτυα που θα εγγυώνται ποιότητα υπηρεσιών, έτσι ώστε να επιτευχθεί η ιδέα του δορυφορικού Internet που θα παρέχει πραγματική παγκόσμια κάλυψη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Andrew S. Tanenbaum (1992), Δίκτυα Υπολογιστών, 2^η έκδοση, Prentice-Hall Inc., Α. Παπασωτηρίου & ΣΙΑ Ο.Ε.
2. ftp://ftp.netlab.ohio-state.edu/pub/jain/courses/cis788-97/satellite_data/index.htm#SCO (This paper provides a brief overview to Satellite Data Network Communications. It discusses the latest trends in satellite communication technology and protocols for data networks on satellite channels)
3. <http://www.cs.berkeley.edu/~randy/Courses/CS294.S96/CS294-7.S96.html>
4. http://www.tech.plym.ac.uk/The_satellite_center.htm
5. Andrew S. Tanenbaum, "Computer Networks", 3rd Edition, Prentice Hall, 1996.
6. ftp://ftp.netlab.ohio-state.edu/pub/jain/courses/cis788-97/satellite_nets/index.htm#GEO (information about GEO constellation – part of the paper of reference 2)
7. ftp://ftp.netlab.ohio-state.edu/pub/jain/courses/cis788-97/satellite_nets/index.htm#LEO (information about LEO constellation – part of a paper– part of the paper of reference 2)
8. Bruce R. Elbert, "The Satellite Communication applications handbook", 1997 Artech House, Inc, MA.
9. <http://sulu.lerc.nasa.gov/dglover/network.html>
10. <http://www.howstuffworks.com/satellite6.htm>
11. <http://www.ee.surrey.ac.uk/SSC/SSHP/>
12. Y. Chotikapong, H Cruickshank, Z. Sun and B.G. Evans, "Network Architecture and Performance Evaluation of Broadband Satellite Systems", Proceedings of the IEEE International Conference on Networks (ICON'00)
13. ftp://ftp.netlab.ohio-state.edu/pub/jain/courses/cis788-97/satellite_nets/index.htm#ERROR
14. <http://www.wins.hrl.com/people/ygz/projects/index.html> (Yongguang Zhang's Research Projects, Satellite-based Internetworking Techniques)
15. <http://www.cs.berkeley.edu/~tomh/thesis/>
16. http://www.cs.berkeley.edu/~tomh/talks/retreat_sat.pdf
17. <http://www.ee.surrey.ac.uk/Personal/L.Wood/publications/WoodECOTEL98.pdf> (L. Wood, "A networking Perspective on Satellite Constelations", Ecole d'Hiver des Télécommunications de Sophia Antipolis 17h30- 18h00, jeudi 10 décembre 1998)
18. <http://www.ee.surrey.ac.uk/Personal/L.Wood/publications/Wood-et-al-ip-routing-issues.pdf> (Δημοσίευση των L. WOOD, A. CLERGET, I. ANDRIKOPOULOS, G. PAVLOU AND W. DABBOUS με θέμα "IP ROUTING ISSUES IN SATELLITE CONSTELLATION NETWORKS", στο Διεθνές συνέδριο των Δορυφορικών τηλεπικοινωνιών με ειδικό θέμα "Internet Protocols over Satellite", vol. 18 no.6, Nov/Dec 2000. Copyright © 1999, 2000 John Wiley and Sons.)
19. Yurong Hu and Victor O.K. Li, "Satellite Based Internet: A Tutorial", IEEE Communications Magazine, March 2001
20. <http://www.fcc.gov/connectglobe/sec8.html> (Παρουσιάζονται αρχές για τη ρύθμιση των δορυφορικών δικτύων, όπως το θέμα της άδειας για τους διαστημικούς σταθμούς, πολιτικές κ.τ.λ που αφορούν τους δορυφόρους)
21. JACOBS, I.M., BINDER, R., BRESSLER, R.D, EDMOND, W.B., and KILLIAN, E.A.: 'Packet Satellite Network Design Issues, "Proc. NTC, IEEE, Nov.1979.

22. N. Celadroni, and E. Ferro, " The FODA-TDMA Satellite Access Scheme: Presentation, Study of the System, and Results", IEEE. Trans. Commun., vol. 39, no. 12, Dec. 1991, pp.1823-31.
23. http://ece.www.ecn.purdue.edu/ECE/Research/ARS/ARS2000/PART_IV/keyword_search?keyword=702 (School of Electrical & Computer Engineering, 2000, Annual Research Summary, Μια περίληψη κάποιων σημαντικών papers για Computer & Electrical Engineering, κατηγοριοποιημένα με τη μορφή λεξικού.)
24. <http://www.ee.surrey.ac.uk/Personal/L.Wood/publications/PhD-thesis/> (Μια περίληψη της Διατριβής του L. Wood με θέμα "Internetworking with satellite constellations", Centre for Communication Systems Research, University of Surrey.)
25. <http://www.ee.surrey.ac.uk/Personal/L.Wood/constellations/background.html> (Η εισαγωγική σελίδα του L. Wood, στην οποία γίνεται αναφορά στους δορυφορικούς αστερισμούς.)
26. http://www.sstl.co.uk/services/subpage_services.html (Πρόκειται για το site του Surrey Technology LTD και τα προγράμματα στα οποία συμμετείχαν φοιτητές του MSc course in Satellite Communications Engineering.)
27. http://www.isr.umd.edu/TechReports/CSHCN/1999/CSHCN_TR_99-2/CSHCN_TR_99-2.pdf (M.H. Hadjithodios, A. Ephremides, D. Friedman, Technical Research Report, "Broadband Access via Satellite", Center for Satellite & Hybrid Communication Networks)
28. N. Maxemchuk, "Routing in the Manhattan street network", pp. 503-512, IEEE Transactions on Communications", vol. 35 no. 5, May 1987.
29. M. Werner, C. Delucchi, H-J. Vogel, G. Maral and J-J.de Ridder, 'ATM based routing in LEO/MEO satellite networks with intersatellite links', *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 15, no. 1, pp.69-82, January 1997.
30. <http://www.nren.nasa.gov/workshop/workshop6/presentations/modiano.ppt> (Eytan Modiano, παρουσίαση με θέμα: " Architectures and Protocols for Next Generation Satellite Networks", Massachusetts Institute of Technology)
31. <http://users.ece.gatech.edu/~eylem/NSA/index.html> ("Mobility Management in Satellite Networks", Supported by: Department of Defense (DoD) (National Security Agency))
32. <http://users.ece.gatech.edu/~eylem/NSA/routing.html> (παρουσίαση αλγορίθμου δρομολόγησης, αποτελεί κομμάτι του Project με θέμα " Mobility Management in Satellite Networks", όπως και τα επόμενα τρία site)
33. <http://users.ece.gatech.edu/~eylem/NSA/dra.html>
34. <http://users.ece.gatech.edu/~eylem/NSA/mls.html>
35. <http://users.ece.gatech.edu/~eylem/NSA/handoff.html>
36. <http://www.estec.esa.nl/artes3/workshop/Presentations/catherine.pdf> (Dr. Catherine Rosenberg, Nortel Networks & Imperial College, "Routing for best effort services in LEO-based satellite systems", ESA Workshop :Internet Protocols over Satellite, ESTEC, 13 January 1999)
37. www.teledesic.net/services-wireless.asp.com/tech/tech.htm (Μια τεχνολογική σύνοψη στο site της Teledesic, με αναφορά στο δίκτυο της Teledesic)
38. <http://www.ee.surrey.ac.uk/Personal/L.Wood/publications/PhD-thesis/wood-viva-presentation.pdf> (Lloyd Wood, PhD thesis, "Internetworking with satellite constellations", public presentation 11am, 21 February 2001)

