‘ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΚΑΛΥΨΗΣ ΓΕΙΤΟΝΩΝ ΓΙΑ ΔΟΡΥΦΟΡΟΥΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΓΗΙΝΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ LOW EARTH ORBIT, (LEO)’

Διπλωματική Εργασία

Δημήτριος Φ. Τσιούνης

ΑΘΗΝΑ, Ιούλιος 2001

Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
Μεταπτυχιακό Λογικής, Θεωρίας Αλγορίθμων και Υπολογισμού

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή στα Δορυφορικά Δίκτυα Επικοινωνιών

1.1 Ιστορική αναδρομή στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα δορυφόρων

Κατά το δεύτερο μισό του εικοστού αιώνα, υπήρξε μια αναβίωση του ενδιαφέροντος για τα δίκτυα μεταφοράς δεδομενων βασισμένα αποκλειστικά σε δορυφόρους. Τα δορυφορικά συστήματα επικοινωνίας από παλιά ήταν ένα από τα κύρια σημεία της υψηλής τηλεπικοινωνιακής τεχνολογίας, με την αξιοσημείωτη και ξεχωριστή ικανότητα που διαθέτουν στο να μπορούν να συνδέσουν τις περισσότερες από τις κατοικημένες περιοχές του πλανήτη μας.

Ωστόσο, η βιομηχανία πίσω από την δορυφορική τεχνολογία προβλέπεται να γνωρίσει ταχύτατη ανάπτυξη, με ύπαρξη κονδυλίων για την εγκατάσταση των φιλόδοξων τεχνικά, αξίας πολλών δισεκατομμυρίων δολαρίων συστημάτων, και τον αυξανόμενο ανταγωνισμό τόσο στην παροχή υπηρεσιών, όσο και στον κατασκευαστικό τομέα. Οικονομικοί αναλυτές προβλέπουν ότι ο ρυθμός ανάπτυξης της δορυφορικής βιομηχανίας θα ξεπεράσει τον ρυθμό ανάπτυξης ολόκληρης της τηλεπικοινωνιακής αγοράς στα ερχόμενα δέκα χρόνια. Τι προκάλεσε αυτή την ταχύτατη αναστροφή· Η απάντηση βρίσκεται στην σύνθεση δύο οικονομικών και τεχνολογικών τάσεων:

- **Η έκρηξη του Internet.** Η δεκαετία του '90 θα μπορούσε να χαρακτηριστεί η δεκαετία στην οποία το Internet ενηλικιώθηκε. Σήμερα υπάρχει μια απίστευτη (και αυξανόμενη) ζήτηση για ταχύτερες και φτηνότερες υπηρεσίες Internet, και πολλές εταιρίες σπεύδουν για να μπορούν να προσφέρουν αυτές τις υπηρεσίες ευρείας ζώνης (broadband services). Τα δίκτυα δορυφόρων παρέχουν έναν γρήγορο τρόπο για την προσέγγιση των πελατών, επειδή δεν στηρίζονται στην κατασκευή ενός επίγειου δικτύου υψηλής ταχύτητας, το οποίο μπορεί να χρειαστεί πολλά χρόνια για να επιτευχθεί. Επιπλέον, με την εμφάνιση της υπηρεσίας του Παγκοσμίου Ιστού (World Wide Web).

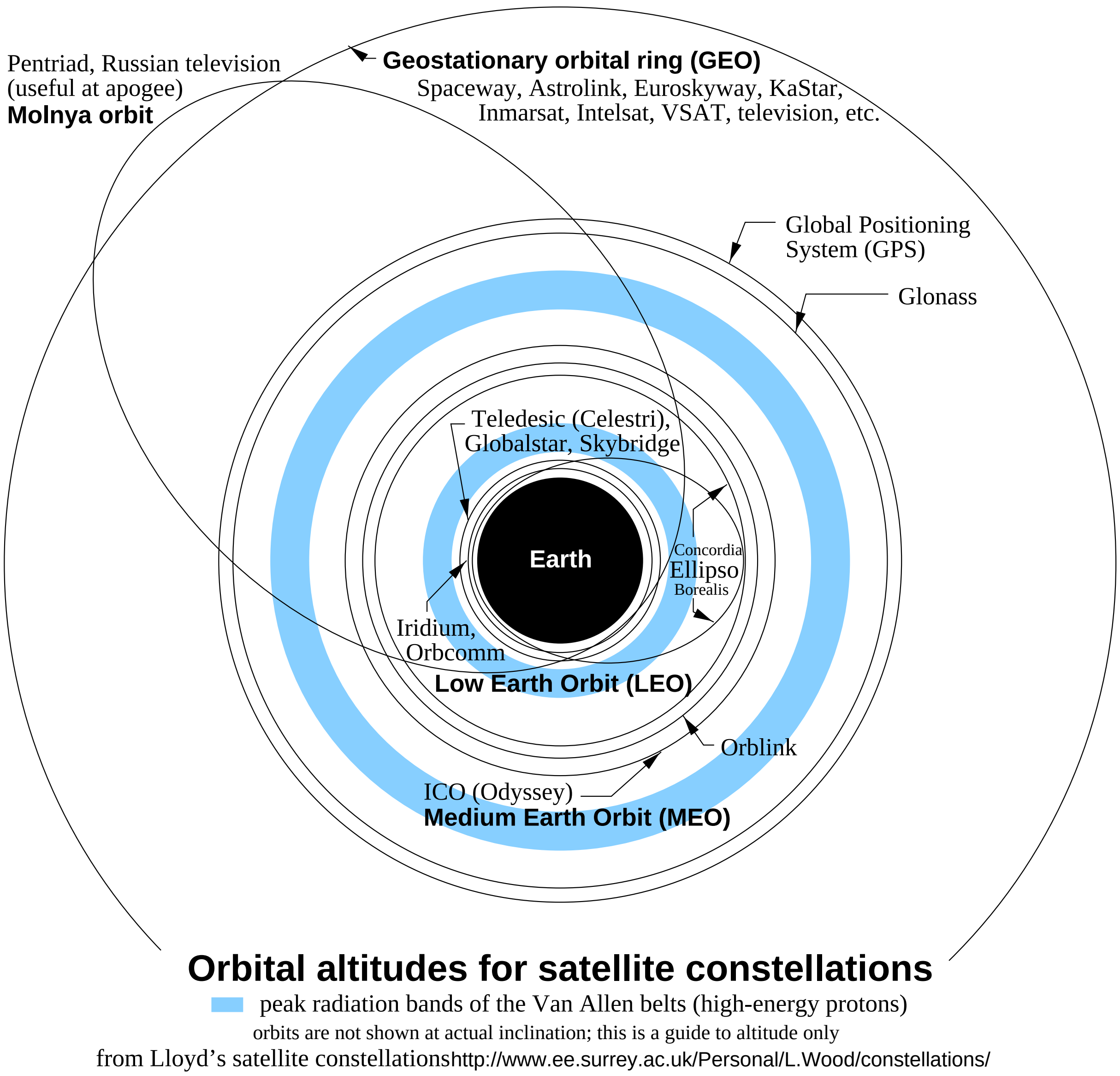
- **Πρόοδος στην δορυφορική τεχνολογία.** Η ταχεία τεχνολογική πρόοδος η οποία ώθησε την ανάπτυξη του Internet βοήθησε επίσης την σημαντική πρόοδο της τελευταίας λέξης της τεχνολογίας στην κατασκευή δορυφόρων και τερματικών (terminals). Αξίζει να σημειωθεί, ότι η ελάττωση του μεγέθους των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων έκανε δυνατή την εγκατάσταση όλο και πιο πολύπλοκου και σύνθετου hardware δορυφόρων και τερματικών. Οι δορυφόροι, οι οποίοι παλιότερα ήταν απλά αναμεταδότες (repeaters) τοποθετημένοι στο διάστημα, τώρα διαθέτουν περισσότερες ενσωματωμένες (on-board) δυνατότητες επεξεργασίας, και διαθέτουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιούν πολλαπλές κατευθυντικές δέσμες εκπομπής/λήψης προς την επιφάνεια της Γης, ενώ ταυτόχρονα μπορούν να επικοινωνούν με άλλους δορυφόρους με την χρήση συνδέσεων υψηλών ραδιοσυχνοτήτων. Σύνθετοι ¨αστερισμοί' δορυφόρων χαμηλής τροχιάς (Low Earth Orbiting satellites - LEO), σε συνδυασμό με την χρήση τηλεφώνων και τερματικών τα οποία μπορούν να παρακολουθούν την κίνηση αυτών των δορυφόρων, κατασκευάζονται και τοποθετούνται σε τροχιά στις μέρες μας. Νέες μπάντες συχνοτήτων στα 20-30 GHz, η χρήση των οποίων παλαιότερα ήταν αδύνατη λόγω της έλλειψης υλικού σε λογικό κόστος, τώρα είναι διαθέσιμες για χρήση στο πεδίο των δορυφορικών τηλεπικοινωνιών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης (bandwidth) στα νέα συστήματα δορυφόρων. Πιθανότατα τα πιο εύρέως παρατηρούμενα στοιχεία του αντίκτυπου της προόδου των ηλεκτρονικών σε αυτή την βιομηχανία μπορούν να εξαχθούν από την ανάπτυξη των direct-to-home (DTH) υπηρεσιών δορυφορικής τηλεόρασης, ένα από τα πιο ταχέως διαδιδόμενα καταναλωτικά ηλεκτρονικά προϊόντα στην ιστορία. Οι υπηρεσίες DTH, χρησιμοποιώντας μικρά, οικονομικά δορυφορικά ¨πιάτα' (dishes), έφεραν τις δορυφορικές υπηρεσίες στην ευρεία κατανάλωση με έναν τρόπο, ο οποίος δεν ήταν δυνατός με την χρήση τεχνολογιών της προηγούμενης δεκαετίας.

Ενώ η χρήση των δορυφορικών δικτύων σαν μέρος του κορμού (backbone) του Internet γίνεται εδώ και εικοσιπέντε χρόνια, η χρήση των δορυφόρων για την παροχή υψηλής ταχύτητας πρόσβασης σε δίκτυα είναι σχετικά νέα. Η επιτυχία των νέων δικτύων δορυφόρων στο να παρέχουν υψηλής ταχύτητας πρόσβαση εξαρτάται από την ικανότητα των πρωτοκόλλων που τα υποστηρίζουν στο να μπορούν να λειτουργούν σωστά και αποδοτικά σε αυτό το περιβάλλον. Το περιβάλλον αυτό χαρακτηρίζεται από μεγάλες καθυστερήσης μετάδοσης (propagation delays) σε σύγκριση με αυτές των επίγειων δικτύων όταν αναφερόμαστε σε γεωστατικούς δορυφόρους, ενώ όταν αναφερόμαστε σε δορυφόρους LEO χαρακτηρίζεται από διαρκώς μεταβαλλόμενη με το χρόνο τοπολογία δικτύου (βλ. σχ. 1.1).

1.2 Σύντομη επισκόπηση των δορυφορικών τηλεπικοινωνιών

Το πεδίο των δορυφορικών τηλεπικοινωνιών είναι ένα πλούσιο, πολυσυλλεκτικό πεδίο το οποίο εμπλέκει διάφορες περιοχές της επιστήμης, όπως ηλεκτρονικής, μηχανολογίας, και αεροναυπηγικής. Αρκετά βιβλία παρέχουν επισκοπήσεις του πεδίου αυτού σαν ολότητα. Ανάμεσα σε αυτά τα βιβλία τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα είναι αυτά των Maral & Bosquet, Gordon & Morgan, Pratt & Bostian.

Η πρώτη εμφάνιση της ιδέας για την χρήση δορυφόρων σε γεωστατική τροχιά (35780 χιλιόμετρα πάνω από τον ισημερινό) για την παροχή τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών έγινε από τον συγγραφέα Arthur C. Clarke στο βιβλίο του "Profiles of the Future" περί τα 1945. Ο πρώτος τεχνητός τηλεπικοινωνιακός δορυφόρος (SCORE το 1958) δεν άργησε να ακολουθήσει την εκτόξευση του Sputnik το 1957, και ο πρώτος εμπορικός γεωστατικός δορυφόρος (INTELSAT 1, ή "Early Bird") το 1965 οδήγησαν στην εποχή της υπερθαλάσσιας



Σχήμα 1.1: Τροχιές δορυφόρων γύρω από τη Γη.

(overseas) τηλεφωνίας με τη χρήση δορυφόρου. Ο πρώτος δορυφόρος INTEL-SAT είχε δυνατότητα εξυπηρέτησης 480 τηλεφωνικών καναλιών, με ετήσιο κόστος $32500 ανά κανάλι.

Στις δεκαετίες του '70 - '80, τόσο η αγορά των δορυφορικών τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών όσο και η απαιτούμενη τεχνολογία αναπτύχθηκε με ταχείς ρυθμούς. Εκτός από την παροχή τηλεφωνίας σε διεθνές επίπεδο και υπηρεσιών μεταφοράς δεδομένων ανάμεσα σε μεγάλους επίγειους σταθμούς που ανήκαν σε εθνικούς τηλεπικοινωνιακούς φορείς (national carriers), οι τηλεπικοινωνιακοί δορυφόροι χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για αναμετάδοση τηλεοπτικού σήματος. Ιδρύθηκε ο διεθνής οργανισμός INMARSAT, με σκοπό την παροχή υπηρεσιών τηλεφωνίας και μεταφοράς δεδομένων στον τομέα της ναυτιλίας. Τα πρώτα πειράματα με δίκτυα δορυφόρων βασισμένα σε packet switching ξεκίνησαν το 1976. Τελικά, η κατασκευή συστημάτων βασισμένα σε Τερματικά Πολύ Μικρής Διαμέτρου (Very Small Aperture Terminals - VSATs) για παροχή υπηρεσιών όπως επαλήθευση πιστωτικών καρτών και διαχείρισης βάσεων δεδομένων ξεκίνησε στις αρχές του 1980.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στην δεκαετία του '90 η ανάπτυξη εναλλακτικών, και συνάμα οικονομικότερων τεχνολογιών όπως τα δίκτυα οπτικών ινών (fiber optic networks) σταδιακά εξαφάνισε πολλές από τις ανάγκες για διεθνή σταθερή τηλεφωνία. Ωστόσο, η τεχνολογική πρόοδος επέτρεψε την δημιουργία της δορυφορικής τηλεόρασης, η οποία έγινε ανταγωνιστική της ήδη υπάρχουσας καλωδιακής (cable) τηλεόρασης. Και εξαιτίας της έκρηξης ενδιαφέροντος προς το Internet, προς το τέλος της δεκαετίας '90, ξεκίνησε η χρήση δορυφορικών καναλιών επικοινωνίας για την διαμεταγωγή δεδομένων ανάμεσα σε διεθνής Παροχείς Υπηρεσιών Internet (Internet Service Providers - ISPs) και του κορμού επικοινωνίας των ΗΠΑ.

Στην ερχόμενη δεκαετία, η αγορά των δορυφορικών τηλεπικοινωνιών πρόκειται να γνωρίσει μεγάλη ανάπτυξη, εφόσον έχει αυξηθεί ραγδαία η ζήτηση για υπηρεσίες υψηλής πρόσβασης στο Internet καθώς και για υπηρεσίες της λεγόμενης ¨ψηφιακής τηλεόρασης¨. Οι δύο μεγαλύτερες τεχνολογικές καινοτομίες πιθανότατα θα είναι η εμφάνιση συστημάτων τα οποία χρησιμοποιούν την λεγόμενη Ka-band ζώνη υψηλών συχνοτήτων (20-30 GHz) και συστήματα αποτελούμενα από δεκάδες έως εκατοντάδες δορυφόρους LEO. Τα συστήματα που χρησιμοποιούνε την προαναφερόμενη ζώνη συχνοτήτων διαθέτουν ένα σημαντικό πλεονέκτημα, καθώς επιτρέπουν την χρήση τερματικών συσκευών για το χρήστη οι οποίες θα διαθέτουν δέκτη διαμέτρου λιγότερης από ένα μέτρο για την επίτευξη διμερής επικοινωνίας two-way communication). Επίσης, εφόσον το διαθέσιμο φάσμα συχνοτήτων το οποίο παρέχεται στην ζώνη αυτή συχνοτήτων είναι πολύ μεγαλύτερο από τις ήδη χρησιμοποιούμενες ζώνες, υπόσχεται υψηλότερες χωρητικότητες δικτύων. Όπως θα αναλυθεί και παρακάτω, τα συστήματα βασιζόμενα σε δορυφόρους LEO υπόσχονται την προσφορά υπηρεσιών με πολύ λιγότερες καθυστερήσεις μετάδοσης, και απαιτήσεις σε ενέργεια στους τερματικούς σταθμούς στη γη, συγκρινόμενα πάντα με αυτά τα οποία απαιτούνται για την επικοινωνία με γεωστατικούς δορυφόρους. Το σχήμα X δείχνει την τωρινή τοποθέτηση των περίπου 200 εμπορικών γεωστατικών δορυφόρων. Με την χρήση των προαναφερθέντων τεχνολογιών, η πυκνότητα αυτή μπορεί να διπλασιαστεί στην ερχόμενη δεκαετία. Μακροπρόθεσμα, οι δορυφόροι βρίσκονται στην καταλληλότερη θέση για την προσφορά υπηρεσιών αναμετάδοσης (broadcast services) σε ανταγωνιστικές τιμές και την παροχή δυνατότητας επικοινωνίας σε περιοχές στον πλανήτη μας οι οποίες δεν εξυπηρετούνται καλά από τα επίγεια δίκτυα. Ωστόσο, είναι φανερό ότι δεν υπάρχει επαρκής χωρητικότητα φάσματος για τους δορυφόρους για να μπορέσουν να εκτοπίσουν σημαντικά τα επίγεια ενσύρματα ή ασύρματα δίκτυα, ακόμα και αν αυτό ήταν πιο οικονομικά εφικτό.

1.3 Η Αρχιτεκτονική του Internet Protocol

Ο όρος Internet αναφέρεται σε μια ευρεία συλλογή packet switching δικτύων τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με την χρήση ενός κοινού πρωτοκόλλου, το ονομαζόμενο Internet Protocol (IP) και τις συμβάσεις που το ακολουθούν όσον αφορά την δρομολόγηση routing και την διευθυνσιοδότηση addressing. Το κάθε δίκτυο μπορεί να ιδωθεί σαν ένα ξεχωριστό ¨αυτόνομο σύστημα' (autonomous system), το οποίο αναλαμβάνει την ευθύνη της διακίνησης των δεδομένων μέσα σε αυτό με όποιον τρόπο αυτό βρίσκει σωστό, ενώ παράλληλα ακολουθεί συγκεκριμένους μηχανισμούς στα σημεία διασύνδεσης (exchange points) με τα άλλα δίκτυα που συνδέεται. Το πιο εμφανές χαρακτηριστικό αυτής της αρχιτεκτονικής δικτύων είναι ότι είναι αποκεντρωμένη (decentralized), και δεν διαθέτει έναν και μόνο διαχειριστή. Μια άλλη σημαντική πλευρά αυτής της αρχιτεκτονικής είναι το πως τα διάφορα πρωτόκολλα συνεργάζονται μεταξύ τους. Το σχήμα X δείχνει μια δημοφιλή όψη της αρχιτεκτονικής του Internet Protocol, που έχει τη μορφή κλεψύδρας. Η όψη αυτή απεικονίζει την ύπαρξη ενός κοινού πρωτοκόλλου (IP) το οποίο όλοι χρησιμοποιούν (στα σημεία διασύνδεσης) αλλά τα επίπεδα αφαίρεσης πάνω και κάτω από το επίπεδο του IP είναι πιο ετερογενή. Στην πραγματικότητα, η ανάγκη για την διασύνδεση διαφορετικών δικτύων όπως το αρχικό ARPAnet, SATNET και το Mobile Radio Network στην περιοχή του San Fransisco Bay τα οποία προώθησαν την χρήση του Internet Protocol. Στο σχήμα X, απεικονείζονται πέντε επίπεδα δικτύωσης τα οποία συσχετίζονται με την αρχιτεκτονική του Internet (συχνά ονομάζονται ¨αρχιτεκτονική TCP/IP¨).

Το παρόν Internet μπορεί να χαρακτηριστεί από τις ακόλουθες ιδιότητες:

- **Μη εγγυημένη παράδοση πακέτων (Best effort packet delivery).** Το Internet δεν παρέχει καμία εγγύηση όσον αφορά το διαθέσιμο bandwidth, καθυστέρηση (latency), σειρά άφιξης των πακέτων, ακόμα και την επιτυχή παράδοση ενός πακέτου. Αντίθετα, τα πακέτα δρομολογούνται στους προορισμούς τους τόσο καλά όσο η δικτυακή υποδομή μπορεί να επιτύχει, και είναι δουλειά των πρωτοκόλλων σε υψηλότερα επίπεδα τα οποία χειρίζονται την επικοινωνία ανάμεσα σε δύο κόμβους που ανταλλάσσουν δεδομένα να παρέχουν τις οποιεσδήποτε εγγυήσεις σχετικά με τιν επικοινωνία (όπως σωστή σειρά άφιξης των πακέτων, αξιόπιστη μεταφορά). Αυτή η ¨δομική' απόφαση έχει συνεισφέρει στις καλές ιδιότητες επέκτασης που διαθέτει το Internet όπως το ξέρουμε σήμερα, πληρώνοντας από την άλλη το κόστος της υποστήριξης των εφαρμογών οι οποίες απαιτούν πολύ αυστηρές εγγυήσεις όσον αφορά την απόδοση από το δίκτυο.

- **Ετερογένεια.** Με οποιονδήποτε τρόπο και αν κοιτάξει κανείς το Internet αυτό διαθέτει ένα τρομακτικό ποσό ετερογένειας. Τα χαρακτηριστικά της απόδοσης των κόμβων και των συνδέσεων επικοινωνίας ποικίλλουν πάρα πολύ. Η επιτυχία του δικτύου βασίζεται στην επιτυχημένη εγκατάσταση και λειτουργία των πρωτοκόλλων εκείνων τα οποία προσπαθούν να εξαλείψουν τα προβλήματα που τίθονται από αυτό το ετερογενές περιβάλλον.

- **Μεγάλη εγκατεστημένη βάση**. Στην δεκαετία του ΄90, ο αριθμός των κόμβων στο Internet αυξήθηκε με εκθετικό ρυθμό. Αυτή τη στιγμή υπάρχουν πάνω από 60 εκατομμύρια κόμβοι, και διπλασιάζεται σχεδόν κάθε χρόνο. Σαν αποτέλεσμα αυτής της αύξησης, υπάρχει μια αυξανόμενη δυσκολία στην υλοποίηση αλλαγών/βελτιώσεων στα πρωτόκολλα, καθώς αυτό θα έθετε πιθανούς κινδύνους στην σωστή συνεργασία των υπαρχόντων κόμβων. Νέα πρωτόκολλα ή βελτιώσεις πρωτοκόλλων οι οποίες απαιτούνε αλλαγές στους κόμβους είναι μάλλον δύσκολο να υιοθετηθούν εκτός και αν αυτά εισαγάγουν μια νέα υπηρεσία η οποία δεν μπορεί να υποστηριχθεί εύκολα από τα υπάρχοντα πρωτόκολλα, ή παρέχουν μια πολή μεγάλη βελτίωση στην απόδοση. Έτσι, το βάρος πέφτει στον δημιουργό/σχεδιαστή των πρωτοκόλλων για την εκπόνηση ενός ξεκάθαρου τρόπου με τον οποίο οποιεσδήποτε προτεινόμενες βελτιώσεις θα πραγματοποιούνται και θα επιδεικνύεται ότι η προτεινόμενες αλλαγές δεν παρεμποδίζουν την συνεργασία με την ήδη υπάρχουσα εγκατεστημένη βάση.

1.4 Δορυφόροι & Internet

Είναι ήδη γνωστό και αναπόφευκτό ότι η καθυστέρηση ανάμεσα στα δύο άκρα επικοινωνίας με την χρήση γεωστατικών δορυφορικών συνδέσεων είναι της τάξης αρκετών εκατοντάδων milliseconds πιο μεγάλη από τις περισσότερες συνδέσεις Internet υψηλής ταχύτητας. Παρόλο που τα μελλοντικά συστήματα δορυφόρων LEO στοχεύουν στην ελάττωση αυτής της καθυστέρησης (η οποία οφείλεται κατά κύριο λόγο στην απόσταση που πρέπει να καλύψει το σήμα από τη Γη στο δορυφόρο και αντίστροφα), η απόδοση αυτών των συστημάτων με όρους συχνότητας εμφάνισης λαθών στη μετάδοση αλλά και της καθυστέρησης, είναι ακόμα αβέβαια μέχρι τη στιγμή αυτή, αλλά το πιθανότερο είναι ότι θα είναι χειρότερη σε σύγκριση με αυτήν που παρατηρείται συνήθως σε επίγεια ενσύρματα συστήματα. Τόσο οι μεγάλες καθυστερήσεις και (πιθανώς) η μεγάλες συχνότητες εμφάνισης λαθών μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα απόδοσης στις συνδέσεις Internet. Συχνά, τα προβλήματα αυτά στην απόδοση μπορούν να αντιμετωπιστούν με κατάλληλο σχεδιασμό του πρωτοκόλλου, αλλά η εμπειρία έχει αποδείξει ότι δεν είναι ρεαλιστικό να αναμένεται ότι οι σχεδιαστές πρωτοκόλλων θα λάβουν υπόψη τους τα ειδικά χαρακτηριστικά των δορυφορικών συνδέσεων όταν σχεδιάζουν πρωτόκολλα - η αγορά των δορυφόρων είναι πολύ εξειδικευμένη για να χρίζει βελτιστοποιήσεων. Πάρα ταύτα, πιστεύεται ότι το Internet και οι δορυφορικές συνδέσεις μπορούν να συναγωνιστούν τις τρέχουσες τεχνολογίες για παροχή πρόσβασης ευρείας ζώνης, για τους ακόλουθους λόγους:

- **Η τρέχουσα απόδοση του Internet είναι ασταθής**. Οι ρυθμοί απώλειας πακέτων στο Internet μπορεί να είναι αρκετά υψηλή· είναι αρκετά συνηθισμένο οι ρυθμοί απώλειας πακέτων σε τμήματα του Internet να πλησιάζουν το 10 έως 20% σε κάποιες στιγμές λόγω συμφόρησης των κόμβων. Πολλοί χρήστες του Internet σήμερα έχουν πρόσβαση σε αυτό μέσω της απλού τηλεφωνικού δικτύου, το οποίο (σε ταχύτητες της τάξης των 30Kb/sec) μπορεί να προσθέτει εκατοντάδες milliseconds καθυστέρησης για μεγάλα πακέτα. Επιπλέον, οι χρόνοι εξυπηρέτησης των εξυπηρετητών, οι οποίοι συνήθως είναι πολύ μικροί, μπορεί να γίνουν πολύ μεγάλοι. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον, η απόδοση μιας δορυφορικής σύνδεσης δεν μοιάζει και τόσο κακή. Στην πραγματικότητα, για ορισμένες εφαρμογές όπως για μετάδοση video χαμηλής ποιότητας, είναι δυνατή η αποκωδικοποίηση ενός τέτοιου σήματος που μεταδίδεται με τη χρήση δορυφορικής σύνδεσης σε λιγότερο χρόνο από μια μετάδοση με τη χρήση επίγειων συνδέσεων, αν η τελευταία αντιμετωπίζει μεγαλύτερους ρυθμούς απώλειας δεδομένων. Επειδή δεν υπάρχει κανένας έλεγχος ως προς τη χρήση ούτε δυνατότητα αυστηρής επιβολής πολιτικής όσον αφορά το χρησιμοποιούμενο bandwidth από μια σύνδεση στο Internet είναι ακόμα ασαφές το κατά πόσο η απόδοση αυτή θα βελτιωθεί αισθητά στο προσεχές μέλλον.

- **Ελαστικότητα των δημοφιλών εφαρμογών**. Οι γεωστατικοί δορυφόροι θεωρούνται προβληματικοί για εφαρμογές ¨πραγματικού χρόνου' οι οποίες έχουν να κάνουν με αλληλεπίδραση ανθρώπων· για παράδειγμα, τηλεφωνικές κλήσεις με την χρήση δορυφορικών συνδέσεων αντιμετωπίζουν μεγάλες καθυστερήσεις έτσι ώστε να κάνει δύσκολη έως ενοχλητική μια συνηθισμένη συνομιλία. Αυτό το είδος εφαρμογών έχουν χαρακτηριστεί ¨μη-ελαστικές¨. Άπό την άλλη πλευρά, δύο από τις πιο διαδεδομένες εφαρμογές στο Internet - το Web και το email - είναι ¨ελαστικές' με την έννοια ότι δεν απαιτούν αυστηρές εγγυήσεις ως προς την απόδοση του δικτύου έτσι ώστε οι χρήστες του να είναι ικανοποιημένοι. Ενώ είναι πιθανόν ότι εφαρμογές ευαίσθητες σε καθυστερήσεις του δικτύου (όπως η τηλεφωνία μέσω IP) θα εξελιχθεί στο κοντινό μέλλον, τα συστήματα LEO σχεδιάζονται ειδικά για την καλύτερη υποστήριξη αυτών των εφαρμογών.

- **Ασυμμετρία στο bandwidth συμφηφίζεται με την ασυμμετρία στην διακίνηση των δεδομένων**. Τα δορυφορικά δίκτυα που σχεδιάζονται έτσι ώστε να επιτρέπουν την χρήση τερματικών χαμηλού κόστους, συνήθως χτίζονται γύρω από μια τοπολογία ¨αστέρα¨, στην οποία μια μεγάλη κεραία και ενισχυτές μεγάλης ισχύος χρησιμοποιούνται για την μετάδοση δεδομένων με μεγάλες ταχύτητες στους πελάτες. Ωστόσο, επειδή το πιο ακριβό κομμάτι ενός τερματικού που χρησιμοποιεί ο πελάτης είναι ο ενισχυτής ισχύος, χρησιμοποιείται ένας ενισχυτής με χαμηλή ισχύ, και άρα ο πελάτης δεν μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα αρκετά ισχυρό φέρον σήμα για την μετάδοση προς την κεντρική κεραία. Ευτυχώς, το είδος του ασύμμετρου bandwidth που παρέχεται από αυτά τα συστήματα είναι αρκετό για εφαρμογές που απαιτούν την χρήση του World Wide Web, μακράν την πιο δημοφιλή υπηρεσία του Internet όσον αφορά την χρήση των πόρων του δικτύου. Πρόσφατες μετρήσεις κίνησης δεδομένων από διάφορους υπολογιστές, έδειξαν την ύπαρξη μιας ασυμμετρίας ανάμεσα στην όγκο των εισερχόμενων και εξερχόμενων δεδομένων με λόγο 5 προς 1. Οι σχεδιαστές των δορυφορικών συστημάτων έχουν ήδη λάβει υπόψιν τους αυτή την ασυμμετρία και προσφέρουν υβριδικά δορυφορικά συστήματα, όπως το δίκτυο DirecPC το οποίο επιτρέπει στους χρήστες του την λήψη δεδομένων με ρυθμούς της τάξης των 400Kb/sec αλλά το οποίο απαιτεί και την ύπαρξη ενός καναλιού επιστροφής βασιζόμενο σε σύνδεση μέσω απλού τηλεφωνικού δικτύου (ταχύτητας περίπου 30Kb/sec).

Κεφάλαιο 2

Κεπλεριανά στοιχεία περιγραφής της κίνησης (Keplerian Elements)

2.1 Τα Επτά Κεπλεριανά Στοιχεία

Για τον καθορισμό της τροχιάς ενός δορυφόρου, απαιτείται ή γνώση μόνο επτά στοιχείων. Το σύνολο αυτών των επτά αριθμών ονομάζεται ¨δορυφορικά στοιχεία τροχιάς' satellite orbital elements, η μερικές φορές Κεπλεριανά στοιχεία (προς τιμήν του Johan Kepler [1571-1630]), ή απλά στοιχεία. Αυτοί οι αριθμοί ορίζουν μία έλλειψη, την προσανατολίζουν γύρω από τη Γη, και τοποθετούν τον δορυφόρο στην έλλειψη αυτή σε μια δεδομένη χρονική στιγμή. Στο μοντέλο Kepler, οι δορυφόροι κινούνται πάνω σε μια ελλειπτική τροχιά σταθερού σχήματος και φοράς. Η Γη βρίσκεται πάνω σε ένα από τα εστιακά σημεία της έλλειψης, και όχι στο κέντρο της (εκτός και αν η ελλειπτική τροχιά είναι στην πραγματικότητα κυκλική).

Στην πραγματικότητα τα πράγματα είναι ελαφρώς πιο πολύπλοκα από το μοντέλο Kepler. Το υπάρχον λογισμικό το οποίο υπάρχει για τον υπολογισμών τέτοιων τροχιών, λαμβάνει υπόψιν το γεγονός αυτό εισάγοντας μικρές διορθώσεις στο μοντέλο Kepler. Οι διορθώσεις αυτές είναι γνωστές σαν διαταράξεις perturbations. Οι διαταράξεις αυτές είναι απαραίτητες λόγω της ανομοιογένειας του βαρυτικού πεδίου της Γης, και της αντίστασης κατά την κίνηση του δορυφόρου στην ατμόσφαιρα. Η αντίσταση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ένα όγδοο στοιχείο τροχιάς.

Τα βασικά στοιχεία τροχιάς ενός δορυφόρου είναι τα εξής (βλ. σχ. 2.1)

1. **Χρονικό σημείο αναφοράς (Epoch)**
2. **Τροχιακή Κλίση (Orbital Inclination)**
3. **Ορθή Απόκλιση (Right Ascension)**
4. **Σημείο Περιγείου (Argument Of Perigee)**
5. **Εκκεντρότητα (Eccentricity)**
6. **Μέση Κίνηση (Mean Motion)**
7. **Μέση Ανωμαλία (Mean Anomaly)**
8. **Αντίσταση (Drag) (προαιρετικό)**

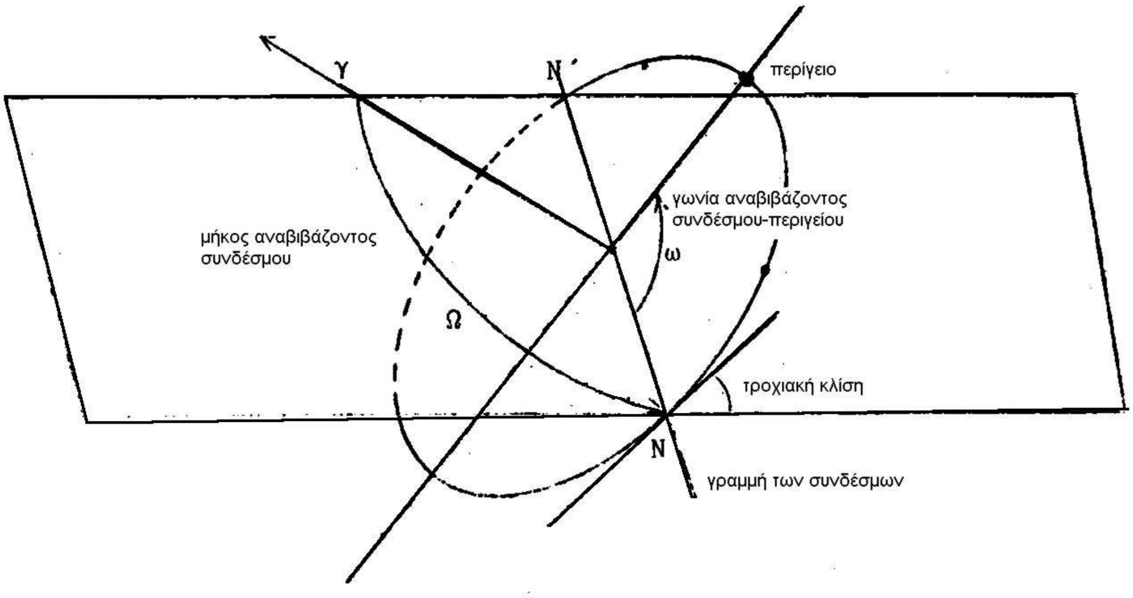
2.2 Epoch

Το Epoch, είναι γνωστό και ως "Epoch Time" ή "T0". Το σύνολο των στοιχείων τροχιάς είναι μια ¨φωτογραφία¨, ένα στιγμιότυπο της τροχιάς του δορυφόρου σε κάποια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Το Epoch είναι ένας αριθμός ο οποίος καθορίζει την χρονική στιγμή στην οποία λήφθηκε αυτό το στιγμιότυπο.

2.3 Orbital Inclination

Το Orbital Inclination είναι γνωστό και ως "Inclination" ή "T0".

Η ελλειπτική τροχιά βρίσκεται σε ένα επίπεδο το οποίο είναι γνωστό σαν το επίπεδο τροχιάς. Το επίπεδο αυτό πάντα διέρχεται από το κέντρο μάζας της Γης, αλλά μπορεί να σχηματίζει οποιαδήποτε γωνία με το ισημερινό επίπεδο (το επίπεδο το οποίο διέρχεται από τον ισημερινό). Η κλίση αυτή είναι η γωνία



Σχήμα 2.1: Κεπλεριανά στοιχεία.

ανάμεσα στο επίπεδο τροχιάς και το ισημερινό επίπεδο. Κατά σύμβαση, η κλίση είναι ένας αριθμός ανάμεσα σε 0 και 180 μοίρες.

Σημ: Οι τροχιές με κλίση 0 μοιρών ονομάζονται ισημερινές τροχιές (επειδή ο δορυφόρος βρίσκεται σχεδόν πάνω από τον ισημερινό). Τροχιές με κλίση σχεδόν 90 μοιρών ονομάζονται πολικές (επειδή ο δορυφόρος διέρχεται πάνω από τον Βόρειο και Νότιο Πόλο). Η τομή του ισημερινού επιπέδου και του επιπέδου τροχιάς είναι μια ευθεία η οποία ονομάζεται γραμμή των κόμβων (line of nodes).

2.4 Right Ascension of Ascending Node

Η Right Ascension of Ascending Node, γνωστό και ως "RAAN" ή "RA of Node" ή "O0" ή "Longitude of Ascending Node"

Η "RAAN", ίσως πρόκειται για το πιο κακώς ονομαζόμενο στοιχείο τροχιάς. Δύο αριθμοί απαιτούνται για τον προσανατολισμό της του επιπέδου τροχιάς στο χώρο. Ο πρώτος είναι η Απόκλιση. Αυτός είναι ο δεύτερος. Με την γνώση μόνο της Απόκλισης, υπάρχουν άπειρα το πλήθος επίπεδα τροχιάς τα οποία είναι δυνατά. Η γραμμή των κόμβων μπορεί να βρίσκεται οπουδήποτε πάνω στον ισημερινό. Αν καθοριστεί το που τέμνει η γραμμή των κόμβων τον ισημερινό, θα έχουμε πλήρως καθορίσει το επίπεδο τροχιάς. Η γραμμή των κόμβων τέμνει τον ισημερινό σε δύο σημεία. Απαιτείται όμως ο καθορισμός μόνο του ενός εκ των δύο. Το ένα ονομάζεται αναβιβάζοντας κόμβος (ascending node), όπου ο δορυφόρος διασχίζει τον ισημερινό από νότο προς βορρά. Το άλλο ονομάζεται κατερχόμενος κόμβος (descending node), όπου ο δορυφόρος διασχίζει τον ισημερινό από βορά προς νότο. Κατά σύμβαση, καθορίζουμε την θέση το αναβιβάζοντος κόμβου.

Επιπλέον, υπάρχει και η περιστροφή της Γης. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το κλασσικό σύστημα συντεταγμένων γεωγραφικού μήκους και πλάτους, για τον καθορισμό της διεύθυνσης της γραμμής των κόμβων. Αντί αυτού, χρησιμοποιούμε το αστρονομικό σύστημα συντεταγμένων, το οποίο χρησιμοποιεί σαν συντεταγμένες την right ascension και right declination, και το οποίο δεν περιστρέφεται μαζί με τη Γη. Η right ascension ουσιαστικά περιγράφει μια γωνία, τη γωνία η οποία σχηματίζεται από ένα σημείο αναφοράς στον ουρανό και το ισημερινό επίπεδο, όταν η right ascension του σημείου αυτού είναι μηδέν. Στην Αστρονομία το σημείο αυτό ονομάζεται vernal equinox.

Εν τέλει, Right Ascension of Ascending Node είναι η γωνία, μετρούμενη από το κέντρο της γης, ανάμεσα στο vernal equinox και τον αναβιβάζοντα κόμβο.

Κατά σύμβαση, RAAN είναι μια γωνία από 0 έως 360 μοίρες.

Μετά από αυτή την σύντομη περιγραφή μπορεί να δοθεί ένας πιο αυστηρός ορισμός του RAAN. Ας θεωρήσουμε την τροχιά του ήλιου γύρω από τη Γη. Η τροχιά αυτή έχει μια απόκλιση περίπου 23.5 μοίρες. Σε αστρονομική ορολογία, η γωνία αυτή ονομάζεται εκλειπτική. Η τροχιά του ήλιου χωρίζεται σε 4 ισομεγέθη τμήματα και ονομάζονται εποχές. Η Άνοιξη ξεκινάει την ημέρα στην οποία ο ήλιος διασχίζει το ισημερινό επίπεδο από νότο προς βορρά. Αυτό το σημείο ονομάζεται αναβιβάζοντας κόμβος της τροχιάς του ήλιου. Η τροχιά του ήλιου έχει RAAN=0 σύμφωνα με τους παραπάνω ορισμούς. Η RAAN της τροχιάς ενός δορυφόρου είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο σημείο το οποίο η τροχιά του ηλίου τέμνει το ισημερινό επίπεδο, και του σημείου στο οποίο η τροχιά του δορυφόρου τέμνει το ισημερινό επίπεδο.

2.5 Σημείο Περιγείου

Το Σημείο Περιγείου, είναι γνωστό και σαν "AGRP" ή "W0".

Πρόκειτα για έναν όρο ο οποίος ουσιαστικά περιγράφει μια γωνία. Τώρα που το επίπεδο τροχιάς είναι προσανατολισμένο στο χώρο, με τη χρήση των προηγούμενων στοιχείων, απαιτείται ο προσανατολισμός της ελλειπτικής τροχιάς στο επίπεδο τροχιάς. Αυτό γίνεται με την χρήση μιας γωνίας, η οποία είναι γνωστή σαν σημείο περιγείου.

Το σημείο στο οποίο ο δορυφόρος βρίσκεται στη μικρότερη απόσταση από τη Γη ονομάζεται περίγειο. Το σημείο στο οποίο ο δορυφόρος βρίσκεται στην μεγαλύτερη απόσταση από τη Γη ονομάζεται απόγειο. Η ευθεία που διέρχεται από το περίγειο και το απόγειο ονομάζεται γραμμή των αψίδων. Μερικές φορές, η γραμμή των αψίδων ονομάζεται ο μεγάλος άξονας της έλλειψης.

Η γραμμή των αψίδων διέρχεται από το κέντρο της Γης. Υπάρχει άλλη μια γραμμή η οποία διέρχεται από εκεί: η γραμμή των κόμβων. Η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα σάυτές τις δύο ευθείες ονομάζεται σημείο περιγείου. Συγκεκριμένα είναι η γωνία η οποία μετράται από το αναβιβάζον σημείο προς το περίγειο.

Παράδειγμα: Όταν AGRP=0, το περίγειο συμπίπτει με τον αναβιβάζοντα κόμβο. Αυτό σημαίνει ότι ο δορυφόρος βρίσκεται στο κοντινότερο σημείο της τροχιάς του ως προς τη Γη, ακριβώς τη στιγμή που ανατέλλει από τον ισημερινό. Αντίστοιχα και στην περίπτωση όπου AGRP=180.

Κατά σύμβαση, το AGRP είναι μια γωνία μεταξύ 0 και 360 μοιρών.

2.6 Εκκεντρότητα

Η εκκεντρότητα, γνωστή και ως "ecce" ή "EO" ή "e". Στο τροχιακό μοντέλο Kepler, η τροχιά ενός δορυφόρου είναι μια έλλειψη. Η εκκεντρότητα περιέχει την πληροφορία σχετικά με το σχήμα της έλλειψης. Όταν $e = 0$, η τροχιά είναι κυκλική. Όταν το e πλησιάζει το 1, η τροχιά είναι μοιάζει με ευθεία.

Για να είμαστε πιο ακριβείς, η τροχιά Kepler είναι μια κωνική τομή η οποία μπορεί να είναι είτε ελλειπτική, κυκλική, παραβολική, υπερβολική, ή ακόμα και ευθεία. Στην περίπτωσή μας όμως ενδιαφερόμαστε μόνο για ελλειπτικές τροχιές. Για τους σκοπούς αυτούς, η εκκεντρότητα πρέπει να βρίσκεται στην περιοχή $0 \leq e < 1$.

2.7 Μέση Κίνηση

Η Μέση Κίνηση, γνωστή και ως "N0".

Μέχρι τώρα έχει καθοριστεί η φορά του επιπέδου τροχιάς, η φορά της ελειπτικής τροχιάς στο επίπεδο αυτό, και το σχήμα της ελλειπτικής τροχιάς. Το επόμενο που χρειάζεται είναι η γνώση του μεγέθους της ελλειπτικής τροχιάς. Με άλλα λόγια, το πόσο μακρυά βρίσκεται ο δορυφόρος.

Ο τρίτος νόμος του Kepler περί τροχιακής κίνησης δίνει μια ακριβή σχέση ανάμεσα στην ταχύτητα του δορυφόρου και της απόστασής του από τη Γη. Οι δορυφόροι που βρίσκονται πλησιέστερα στη Γη περιστρέφονται με μεγαλύτερη ταχύτητα. Οι δορυφόροι που βρίσκονται πιο μακρυά από τη Γη, περιστρέφονται με μικρότερη ταχύτητα. Αυτό σημαίνει ότι το ίδιο πράγμα θα ήταν εφικτό είτε με τον καθορισμό της ταχύτητας με την οποία κινείται ο δορυφόρος, είτε με τον καθορισμό της απόστασής του από τη Γη.

Οι δορυφόροι που διαγράφουν κυκλική τροχιά, κινούνται με σταθερή ταχύτητα σε όλα τα σημεία της τροχιάς τους. Άρα το μόνο που απαιτείται είναι η γνώση της ταχύτητας αυτής. Οι δορυφόροι που κινούνται σε μη κυκλική τροχιά ($e > 0$) κινούνται ταχύτερα όταν βρίσκονται πλησιέστερα στη Γη, και πιο αργά όταν βρίσκονται πιο μακρυά της. Μια συνηθισμένη τακτική είναι η χρήση της μέσης τιμής αυτής της ταχύτητας. Στην Αστρονομία, αυτό ονομάζεται ¨Μέση Κίνηση¨. Η Μέση Κίνηση συνήθως μετράται με αριθμούς περιστροφής γύρω από τη Γη ανά ημέρα. Επίσης, μια περιστροφή συνηθίζεται να μετράται από το περίγειο έως το επόμενο.

Μερικές φορές αντί για το μέγεθος αυτό χρησιμοποιείται η τροχιακή περίοδος, και ισχύει Τροχιακή Περίοδος = 1/Μέση Κίνηση. Ένας δορυφόρος με Μέση Κίνηση 2, έχει Τροχιακή Περίοδο 12 ωρών.

Μερικές φορές αντί της Μέσης Κίνησης δίνεται ο μικρός άξονας της ελλειπτικής τροχιάς. Αυτός ισούται με το μισό του μήκους της τροχιάς, και συνδέεται άμεσα με την Μέση Κίνηση με μια απλή εξίσωση.

Στην πράξη, οι περισσότεροι δορυφόροι έχουν Μέση Κίνηση που κυμαίνεται ανάμεσα σε 1 έως 16.

2.8 Η Μέση Ανωμαλιακή Κίνηση

Η Μέση Ανωμαλιακή Κίνηση, γνωστή και ως "M0" ή "MA" ή "Phase".

Με την γνώση των προηγούμενων μεγεθών, το μόνο το οποίο έχει μείνει να καθοριστεί είναι ο καθορισμός ενός σημείου αναφοράς της θέσης του δορυφόρου πάνω στην τροχιά του σε μια δεδομένη χρονική στιγμή. Το πρώτο στοιχείο τροχιάς που ορίστηκε (Epoch) καθορίζει μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, άρα το μόνο που χρειάζεται είναι ο καθορισμός της θέσης του δορυφόρου πάνω στην τροχιά του την στιγμή αυτή.

Αν ο δορυφόρος κινούνταν σε κυκλική τροχιά (με αποτέλεσμα να έχει σταθερή ταχύτητα) και κάποιος παρατηρητής στο κέντρο της Γης μετρούσε την γωνία που σχηματίζει ο δορυφόρος με το περίγειο, τότε αυτή η γωνία αποτελεί την Μέση Ανωμαλιακή Κίνηση. Η τιμή της γωνίας αυτής κυμαίνεται από 0 έως 360 μοίρες, και εξόρισμού το 0 τοποθετείται στο περίγειο, και άρα στο απόγειο θα είναι 180 μοίρες. Επειδή όμως οι δορυφόροι κινούνται σε μη κυκλικές τροχιές και άρα με μεταβαλλόμενη ταχύτητα, αυτή η απλή σχέση δεν είναι και τόσο ακριβής. Η σχέση αυτή ωστόσο ισχύει πάντα, ανεξάρτητα από την εκκεντρότητα της τροχιάς (δηλαδή το είδος της). Το περίγειο συμβαίνει πάντα στις 0 μοίρες, και το απόγειο πάντα στις 180.

σεςτιονΑντίσταση Η Αντίσταση, γνωστή και ως "N1".

Η αντίσταση που υφίσταται κατά την κίνησή του ο δορυφόρος στην ατμόσφαιρα της Γης, έχει σαν αποτέλεσμα η τροχιά του να φθίνει με το χρόνο, δηλαδή ο δορυφόρος πέφτει διαρκώς σε τροχιές μικρότερου ύψους. Καθώς ο δορυφόρος χάνει ύψος, η ταχύτητα περιστροφής του μεγαλώνει. Αυτό το στοιχείο τροχιάς λοιπόν μας πληροφορεί για τον ρυθμό με τον οποίο η Μέση Ανωμαλιακή Κίνηση μετάβάλλεται λόγω της αντίστασης ή άλλων παραγόντων. Ακριβέστερα, αν A είναι η αντίσταση και MA η Μέση Ανωμαλιακή Κίνηση, ισχύει $A = \frac{1}{2}\frac{d(MA)}{dt}$.

Μετράται σε μονάδες περιστροφής γύρω από τη Γη ανά ημέρα. Συνήθως είναι ένας πάρα πολύ μικρός αριθμός. Τυπικές τιμές για δορυφόρους LEO είναι της τάξης του 10^{-4}. Τυπικές τιμές για δορυφόρους με τροχιές μεγαλύτερου ύψους είναι της τάξης του 10^{-7} ή μικρότερο.

Μερικές φορές, στοιχεία τροχιών που δημοσιεύονται μπορούν να περιέχουν αρνητικές τιμές για την Αντίσταση. Αυτό μπορεί να φαίνεται παράλογο, όμως υπάρχουν πολλοί λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτό. Πρώτα πρώτα, οι μετρήσεις οι οποίες παρήγαγαν αυτά τα στοιχεία μπορεί να περιέχουν μεγάλα σφάλματα. Είναι συνηθισμένη η εκτίμηση των στοιχείων τροχιάς από ένα μικρό αριθμό παρατηρήσεων που πραγματοποιήθηκαν μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα. Με τέτοιες μετρήσεις, είναι εξαιρετικά δύσκολη η αξιόπιστη εκτίμηση της Αντίστασης. Μικρά σφάλματα τα οποία συχνά εμφανίζονται στις μετρήσεις, μπορούν να δώσουν αρνητικές τιμές Αντίστασης.

Ο δεύτερος λόγος για την εμφάνιση αρνητικής τιμής Αντίστασης είναι ελαφρώς πιο πολύπλοκος. Ένας δορυφόρος υφίσταται πολλές δυνάμεις κατά την κίνησή του, εκτός από τις δύο που έχουν αναφερθεί μέχρι τώρα (βαρυτική έλξη της Γης, και ατμοσφαιρική αντίσταση). Μερικές από αυτές τις δυνάμεις (π.χ. βαρυτική έλξη της σελήνης και του ήλιου) μπορούν να ¨σπρώξουν' τον δορυφόρο σε μια τροχιά ελαφρώς μεγαλύτερου ύψους. Αυτό μπορεί να συμβεί σε μεγαλύτερο βαθμό εάν ο ήλιος και η σελήνη είναι ευθυγραμμισμένοι με την τροχιά του δορυφόρου με συγκεκριμένο τρόπο. Η η τροχιά μετρηθεί όταν συμβαίνει αυτό, μια ελαφρά αρνητική τιμή Αντίστασης μπορεί να παρέχει ένα είδος ¨βελτίωσης' προς την εκτίμηση της πραγματικής τροχιάς του δορυφόρου για μια σύντομη χρονική περίοδο.

Κεφάλαιο 3

Εμπορικοί τηλεπικοινωνιακοί δορυφόροι - σχηματισμοί (constellations)

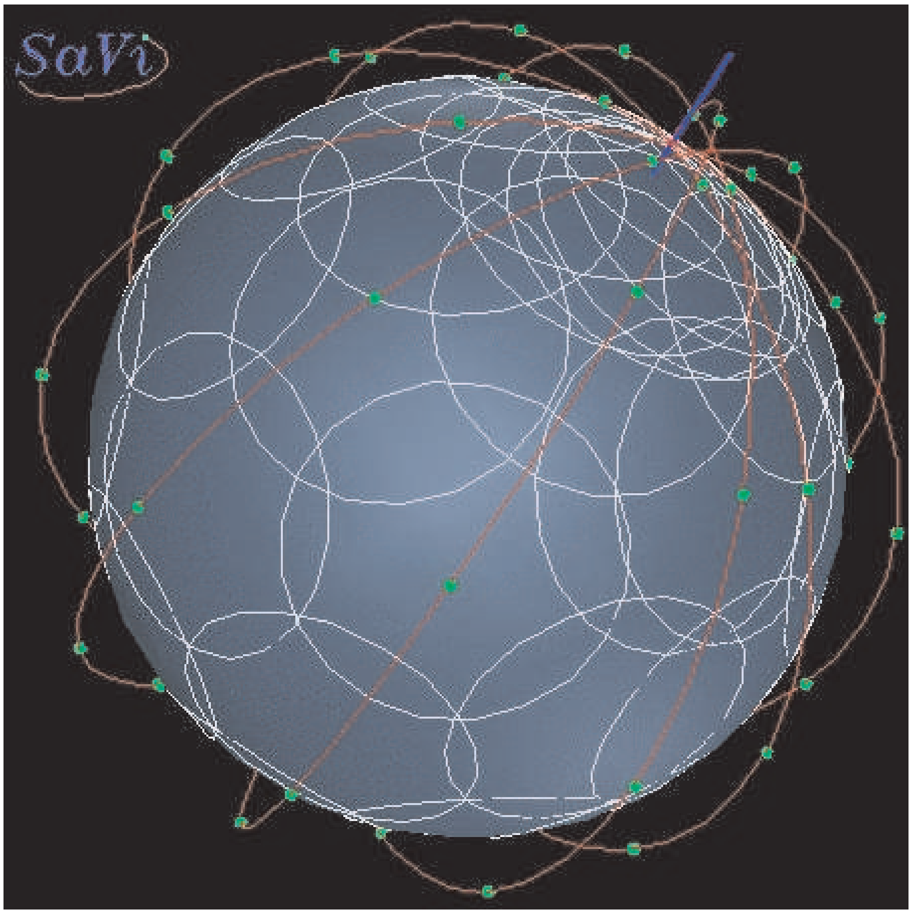
3.1 Σύστημα δορυφόρων Iridium

Σε μια προσπάθεια των ιδιωτικών εταιριών τηλεπικοινωνιών για την παροχή αδιάλειπτης ¨οικουμενικής' επικοινωνίας στο κοινό, προωθήθηκε η ανάπτυξη αρκετών νέων συστημάτων δορυφόρων, τα οποία εγκαταλείπουν την παραδοσιακή χρήση της γεωστατικής τροχιάς, προς χάριν συστημάτων LEOκαι MEO. Τα δίκτυα αυτά αυξάνουν την περιοχή που μπορούν να εξυπηρετήσουν, παρέχοντας υπηρεσίες σε περιοχές του κόσμου στις οποίοες η τηλεπικοινωνιακή υποδομή είναι λιγότερο ανεπτυγμένη, όπως Ασία, Αφρική, Ανατολική Ευρώπη, Νότια Αμερική και τις πολικές περιοχές. Αυτά τα συστήματα δορυφόρων παρέχουν οικουμενική κάλυψη στους χρήστες τους, κάτι το οποίο ένα τυπικό σύστημα δορυφόρων GEOδεν μπορεί να παρέχει. Ένα τέτοιο σύστημα δορυφόρων LEO, το Iridium της Motorola, ολοκληρώθηκε και τέθηκε σε λειτουργία το 1998.

Η αρχική ιδέα του Iridium εμφανίστηκε το 1987, και ήταν το πρώτο ιδιωτικό οικουμενικό ασύρματο σύστημα επικοινωνίας το οποίο παρέχει υπηρεσίες φωνής, δεδομένων, τηλεομοιοτυπίας και ειδοποίησης στον κόσμο. Η αρχική του μορφή περιλάμβανε 77 δορυφόρους, και πήρε το όνομα του από το άτομο του στοιχείου Iridium το οποίο διαθέτει 77 ηλεκτρόνια γύρω από τον πυρήνα του. Ωστόσο, σε μια προσπάθεια μεγιστοποίησης της κάλυψης και της ελάττωσης του κόστους, ο ¨αστερισμός' των δορυφόρων βελτιστοποιήθηκε, και απαιτούσε πλεον 66 δορυφόρους. Ο τρόπος τοποθέτησης των δορυφόρων σε τροχιά στο Iridium βασίζεται σε έναν ¨αστερισμό' που προτάθηκε από τους Αδαμς & Ριδερ.

Οι δορυφόροι του Iridium βρίσκονται τοποθετημένοι σε ύψος 780 χιλίομέτρων από την επιφάνεια της Γης, και οι 66 δορυφόροι βρίσκονται κατανεμημένοι σε έξι επίπεδα, το κάθε ένα από αυτά περιέχει 11 δορυφόρους βλέπε σχήμα 3.1. Τα επίπεδα αυτά διαθέτουν σχεδόν κυκλικές τροχιές, και απέχουν μεταξύ τους 31,6 μοίρες, εκτός από τα αντίθετα περιστρεφόμενα επίπεδα ένα και έξι, τα οποία απέχουν 22 μοίρες. Η ελάχιστη γωνία λήψης για έναν επίγειο σταθμό είναι 8,2 μοίρες, κάτι το οποίο μεγιστοποιεί την περιοχή κάλυψης κάθε δορυφόρου και βελτιώνει την ποιότητα των συνδέσεων σε σύγκριση με χαμηλότερες τιμές της γωνίας. Ο μέσος χρόνος για τον οποίο είναι ορατός κάθε δορυφόρος είναι περίπου 10 λεπτά.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του συστήματος Iridium είναι οι δορυφόροι, οι επίγειες πύλες, και τα οι τερματικές συσκευές. Οι δορυφόροι χρησιμοποιούν δια-δορυφορικές συνδέσεις (inter-satellite links - ISLs) για την διαμεταγωγή των δεδομένων. Οι τοπικές επίγειες πύλες αναλαμβάνουν τις διαδικασίες αρχικοποίησης των κλήσεων και της διασύνδεσης του Iridium με τα ήδη υπάρχοντα τηλεφωνικά δίκτυα. Το Iridium δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες του να λαμβάνουν κλήσεις σε οποιοδήποτε σημείο της Γης και αν βρίσκονται με την χρήση ενός και μόνου αριθμού κλήσεως. Έχει σχεδιαστεί για την επέκταση των υπαρχόντων επιγείων σταθερών και κινητών δικτύων τηλεφωνίας. Το Iridium σχεδιάστηκε για να παρέχει υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας σε περιοχές όπου η αντίστοιχη επίγεια υπηρεσία δεν είναι διαθέσιμη, ή όπου το PSTN δεν είναι αρκετά ανεπτυγμένο. Η τρέχουσα τιμή μιας συσκευής επικοινωνίας για το δίκτο Iridium είναι περίπου \$3000. Για την πρόσβαση στο δίκτυο, υπάρχει ένα μηνιαίο πάγιο κόστος της τάξης των \$70. Η χρήση του συστήματος κόστίζει περίπου \$2 με \$3 το λεπτό για εξερχόμενες κλήσεις προς της ΗΠΑ, και \$7 με \$8 για εξερχόμενες κλήσεις σε άλλες χώρες (συμπεριλαμβανομένων και των κλήσεων οι οποίες έχουν σαν σημείο έναρξης πλοία). Οι εισερχόμενες κλήσεις χρεώνονται στον καλούντα.



Σχήμα 3.1: Δορυφορικός σχηματισμός Iridium 66.

3.1.1 Iridium Σχεδιασμός του δορυφορικού σχηματισμου constellation design

Τα περισσότερα από τα ήδη υπάρχοντα δορυφορικά συστήματα τηλεπικοινωνίας χρησιμοποιούν κυρίως γεωστατικούς δορυφόρους οι οποίοι βρίσκονται τοποθετημένοι σε ύψος περίπου 35800 χιλιομέτρων από την επιφάνεια της Γης. Οι δορυφόροι αυτοί επιτρέπουν πλήρη κάλυψη της Γης για γεωγραφικά πλάτη κάτω των 70 μοιρών, με τη χρήση τριών μόνο δορυφόρων. Η καθυστέρηση διάδοσης του σήματος προς μια κατεύθυνση για ένα τέτοιο σύστημα είναι περίπου 120 ms. Με τα συστήματα αυτά, είναι αδύνατη η χρήση τερματικών συσκευών μικρού μεγέθους, καθώς απαιτείται μεγάλο μέγεθος κεραίας για την σωστή λήψη του σήματος. Η απαίτηση από το Iridium της παγκόσμιας κάλυψης με την χρήση μικρών και ελαφρών τερματικών συσκευών είχε σαν αποτέλεσμα την χρήση ενός ¨αστερισμού' δορυφόρων LEO. Τα βασικά πλεονεκτήματα που προσφέρουν οι δορυφόροι αυτοί είναι οι λιγότερες απαιτήσεις στην ισχύ του μεταδιδόμενου σήματος, χαμηλότερη καθυστέρηση διάδοσης σήματος, και κάλυψη στις περιοχές των πόλων.

Η ταχύτητα ενός δορυφόρου LEO σχετικά ως προς τη Γη δίνεται από

$$V_l = \frac{\omega R_g^{3/2}}{\sqrt{R_l}}$$

όπου ω είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της Γης, R_g η ακτίνα περιστροφής της τροχιάς ενός δορυφόρου GEO , και R_l η ακτίνα περιστροφής της τροχιάς του δορυφόρου LEO . Η γωνιακή ταχύτητα της Γης ισούται με 0.2618 radians/ώρα από την εξίσωση

$$\omega = \frac{2\pi\,\text{radians}}{24\,\text{ώρες}} = 0.2618\,\text{radians/ώρα}$$

Η ακτίνα της τροχιάς των δορυφόρων υπολογίζεται αν προσθέσουμε την ακτίνα της Γης στον ισημερινό με το ύψος στο οποίο βρίσκεται ο δορυφόρος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τιμές όπως $R_g = 42178\,km$ και $R_l = 7158\,km$. Η ταχύτητα ενός δορυφόρου LEO ως προς τη Γη θα είναι $V_l = 26804\,km/h$. Οι παράμετροι των τροχιών των δορυφόρων του Iridium οδηγούν σε μια περίοδο των 100 περίπου λεπτών. Η ελάχιστη γωνία λήψης στην οποία μπορεί ένας χρήστης να επικοινωνήσει με το δορυφόρο είναι 8,2 μοίρες. Για ένα δεδομένο σημείο στη Γη, ο μέσος χρόνος για τον οποίο ένας δορυφόρος είναι ¨ορατός' είναι 9 λεπτά, και είτε ένας είτε δύο δορυφόροι είναι ορατοί σε κάθε χρονική στιγμή. Η περιοχή κάλυψης ενός δορυφόρου δίνεται από την εξίσωση

$$A = 2\pi R_e^2(1 - cos\theta)$$

όπου R_e είναι η ακτίνα της Γης και θ η γωνία που απεικονίζεται στο σχήμα. Η γωνία θ υπολογίζεται από την εξίσωση

$$\theta = \left[cos^{-1}\left(\frac{R_e\, cosE}{R_e + h}\right)\right] - E$$

όπου R_e η ακτίνα της Γης, E η ελάχιστη γωνία λήψης, και h το ύψος του δορυφόρου.

Η περιοχή κάλυψης του δορυφόρου, όπως φαίνεται στο σχήμα, θα ισούται με $15299900km^2$, το οποίο ισούται με μια ακτίνα κάλυψης της τάξης των $2209km$. Οι δορυφόροι Iridium ζυγίζουν περίπου 680 κιλά και έχουν αναμενόμενη διάρκεια ζωής πέντε ετών.

Μέχρι σήμερα υπάρχουν δύο σχεδιαστικές προσεγγίσεις σχετικά με την ύπαρξη συνδέσεων ανάμεσα στους δορυφόρους. Οι προσεγγίσεις αυτές στηρίζονται στο γεγονός του αν οι δορυφόροι χρησιμοποιούνται σαν αναμεταδότες (repeaters), ή αν διαθέτουν ενσωματωμένη τεχνολογία σωιτςηινγ (on-board switching). Οι δορυφόροι που χρησιμοποιούνται σαν αναμεταδότες χρησιμοποιούν μια αρχιτεκτονική ¨λυγισμένου σωλήνα' (bent-pipe). Το σήμα που μεταδίδεται από έναν χρήστη αναμεταδίδεται από τον δορυφόρο σε μια επίγεια πύλη η οποία βρίσκεται στην ίδια περιοχή κάλυψης με αυτόν. Το απαραίτητο hardware για την διεκπεραίωση της κλήσης βρίσκεται στην πύλη. Αυτό το είδος συστήματος απαιτεί την ύπαρξη μιας πύλης σε κάθε περιοχή κάλυψης των δορυφόρων έτσι ώστε να μπορεί να εξυπηρετήσει τη διασύνδεση των χρηστών με το δίκτυο. Το σύστημα GLOBALSTAR, το οποίο εξελίσσεται από την εταιρία Loral QUALCOMM Satellite Services Inc. χρησιμοποιεί την αρχιτεκτονική λυγισμένου σωλήνα. Οι δορυφόροι οι οποίοι διαθέτουν ενσωματωμένη τεχνολογία switching έχουν την δυνατότητα χρήσεως δια-δορυφορικών συνδέσεων ISLs για την δρομολόγηση των κλήσεων. Το σήμα που μεταδίδεται από έναν χρήστη δρομολογείται ανάμεσα από διάφορους δορυφόρους και τελικά παραδίδεται είτε σε κάποια τοπική επίγεια πύλη είτε σε κάποιον άλλον χρήστη.

Αυτό δημιουργεί ένα δίκτυο στον ουρανό και επιτρέπει τη χρήση μεγάλων τοπικών πυλών αντί μιας πύλης σε κάθε περιοχή κάλυψης. Μέχρι πρόσφατα, η τεχνολογική πολυπλοκότητα της χρήσης δια-δορυφορικών συνδέσεων για την πραγματοποίηση δρομολόγηση ανάμεσα στους δορυφόρους ήταν περιορισμένη μόνο σε στρατιωτικές εφαρμογές. Οι σχεδιαστές του δικτύου Iridium ξεπέρασαν αυτά τα εμπόδια. Έτσι, το δίκτυο δορυφόρων Iridium χρησιμοποιεί δορυφόρους με ενσωματωμένη δυνατότητα switching και υποστήριξη ISLs.

3.1.2 Συνδέσεις μεταξύ των δορυφόρων (Intersatellite Links)

Ο κάθε δορυφόρος του δικτύου Iridium διατηρεί μέχρι και τέσσερα ISLs. Τα ISLs είναι συνδέσεις που συνάπτονται ανάμεσα σε δορυφόρους που κινούνται στο ίδιο επίπεδο (και ονομάζονται intra-plane), και ανάμεσα σε δορυφόρους σε γειτονικά επίπεδα (και ονομάζονται inter-plane). Οι συνδέσεις intra-plane διατηρούνται μόνιμα, με κάθε δορυφόρο να συνδέεται με τους δορυφόρους που βρίσκονται αμέσως μπροστά και πίσω του. Οι συνδέσεις inter-plane συνάπτονται δυναμικά και τερματίζονται καθώς οι δορυφόροι μετακινούνται πάνω στις τροχιές τους. Εκτός από τους δορυφόρους στα αντιθέτως κινούμενα επίπεδα ένα και έξι, ο κάθε δορυφόρος έχει 4 ISLs. Οι δορυφόροι οι οποίοι βρίσκονται στα στα επίπεδα ένα και έξι διατηρούν μόνο 3 ISLs ο καθένας τους, τα δύο εκ των οποίων είναι intra-plane. Οι δορυφόροι στα επίπεδα αυτά δεν επιτρέπεται να συνάψουν συνδέσεις ISLs μεταξύ τους, λόγω της πολύ γρήγορης γωνιακής μεταβολής η οποία παρατηρείται σε δορυφόρους που κινούνται πάνω σε αντίθετα περιστρεφόμενα επίπεδα.

Τα ISLs πραγματοποιούνται στην περιοχή συχνοτήτων 22.55 έως 23.55 GHz και με ταχύτητες της τάξης των 25 Mbps. Η γωνία κατεύθυσης ανάμεσα σε δύο δορυφόρους σε γειτονικά επίπεδα τροχιάς, αν χρησιμοποιήσουμε σαν αναφορά τις μηδέν μοίρες παράλληλα στον ισημερινό, κυμαίνεται περίπου ± 65 σε μια περιστροφή. Η γωνία αυτή μεταβάλλεται με μικρότερο ρυθμό κοντά στον ισημερινό όπου οι δορυφόροι που βρίσκοντα σε γειτονικές τροχιές απέχουν την μεγαλύτερη δυνατή απόσταση, και μεταβάλλεται με μεγαλύτερο ρυθμό κοντά στους πόλους όπου διασταυρώνονται οι τροχίες. Αυτή η διακύμανση κάνει απαραίτητη την χρήση κατευθυνόμενων κεραιών πάνω στους δορυφόρους για την διατήρηση των inter-plane συνδέσεων. Ακόμα και με κατευθυνόμενες κεραίες, θα ήταν πολύ δύσκολη η διατήρηση των συνδέσεων αυτών μεταξύ δορυφόρων που βρίσκονται στα επίπεδα ένα και έξι, και μάλιστα σε μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη όπου το αζιμούθιο μεταβάλλεται με μεγαλύτερη ταχύτητα. Μια προσέγγιση που χρησιμοποιείται για την διατήρηση inter-plane συνδέσεων είναι η επιλογή ενός τυπικού αζιμουθίου κοντά σε αυτό των δορυφόρων που βρίσκονται κοντά στον ισημερινό. Τότε η κεραία εκ κατασκευής να σχεδιαστεί έτσι ώστε να μπορεί να μετακινηθεί μόνο σε μια περιοχή η οποία επιτρέπει inter-plane συνδέσεις σε χαμηλότερα γεωγραφικά πλάτη όπου το αζιμούθιο μεταβάλλεται πιο αργά. Τυπικές τιμές είναι ± 45 με 50 μοίρες, και σε συνδυασμό με μια κεραία που μπορεί να μετακινηθεί μεταξύ 35 και 40 μοιρών, είναι αρκετό για την διατήρηση inter-plane συνδέσεων για γεωγραφικά πλάτη από 50 έως 60 μοιρών βόρεια και νότια. Μια αναπαράσταση αυτών των ISLs φαίνεται στο σχήμα, όπου ή κάθε τομή των ευθειών αναπαριστάνει την θέση ενός ενεργού δορυφόρου.

Τα ISLs παρέχουν στο δίκτυο ένα μεγαλύτερο βαθμό αυτονομίας συγκρινόμενο με αυτόν των δικτύων γεωστατικών δορυφόρων. Απαιτούνται λιγότερες επίγειες πύλες γιατί η δρομολόγηση των δεδομένων πραγματοποιείται διαμέσου των ISLs. Έτσι, το Iridium δεν εξαρτάται από τις υπηρεσίες που παρέχονται από άλλους οργανισμούς, όπως οι τοπικές τηλεπικοινωνιακές εταιρίες, το οποίο μεταφράζεται και σε μεγαλύτερα κέρδη εφόσον το κόστος για την χρήση επίγειων συνδέσεων ελαττώνεται.

Η πολυπλοκότητα των δορυφόρων του Iridium οφείλεται από τις ενσωματωμένες δυνατότητες επεξεργασίας που απαιτούνται για την διαχείριση και υποστήριξη των ISLs και την διατήρηση της συνδεσιμότητας του δικτύου. Αποδοτικοί αλγόριθμοι ανάθεσης συνδέσεων και δρομολόγησης μπορούν να ελαττώσουν την καθυστέρηση και να ελαττώσουν τον χρόνο προεπεξεργασίας (overhead). Αυτοί οι αλγόριθμοι πρέπει να συγκλίνουν ταχύτατα σε μια λύση δρομολόγησης με όσο το δυνατόν μικρεότερο χρόνο προεπεξεργασίας. Αυτό θα έχει σαν άμεσο αποτέλεσμα στην καλύτερη λειτουργία του δικτύου. Η σημασία σχεδιασμού και χρήσης τέτοιων αλγορίθμων θα συζητηθεί παρακάτω.

3.1.3 Διασυνδέσεις του Iridium με επίγεια δίκτυα

Τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα αναπαρίστανται συνήθως σαν γραφήματα, των οποίων οι κόμβοι αντιστοιχούν σε σημεία επικοινωνίας, και οι ακμές τους αντιστοιχούν σε κανάλια μετάδοσης. Το δίκτυο Iridium ουσιαστικά διαθέτει δύο επίπεδα κόμβων, ένα για τους δορυφόρους, και ένα για τους επίγειους σταθμούς, και οι θέσεις μεταξύ των μεταβάλλονται διαρκώς. Σαν αποτέλεσμα αυτού, οι συνδέσεις που συνδέουν επίγειους σταθμούς με τους δορυφόρους αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου. Αυτή η μεταβολή μοιάζει με αυτήν που παρατηρείται ανάμεσα σε μετακινούμενους χρήστες και σταθμούς βάσης σε ένα τυπικό δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Σε ένα τέτοιο δίκτυο, ο χρήστης συνδέεται στον σταθμό βάσης με το ισχυρότερο σήμα. Καθώς αυτός μετακινείται από την περιοχή κάλυψης ενός σταθμού βάσης προς την περιοχή ενός άλλου, η σύνδεσή του μεταφέρεται στον νέο σταθμό βάσης. Στο δίκτυο Iridium μια σύνδεση επιτυγχάνεται από έναν επίγειο σταθμό προς το δορυφόρο με το ισχυρότερο σήμα. Οι δορυφόροι κινούνται σαφώς ταχύτερα από τους χρήστες του. Για το λόγο αυτό, οι χρήστες μπορεί να θεωρηθούν ότι είναι ακίνητοι σε σύγκριση με την ταχύτητα των δορυφόρων, καθώς ακόμα και ένας χρήστης ο οποίος βρίσκεται μέσα σε ένα αεροπλάνο, ταξιδεύει με πολύ μικρότερη ταχύτητα από ένα δορυφόρο. Καθώς οι δορυφόροι διέρχονται από μια περιοχή κάλυψης, η σύνδεση από το δορυφόρο προς τον αντίστοιχο επίγειο σταθμό μεταφέρεται από τον δορυφόρο που αφήνει την περιοχή αυτή στον επερχόμενο δορυφόρο που έρχεται να καλύψει την περιοχή.

Η συνδεσιμότητα ανάμεσα στο επίπεδο των δορυφόρων και το επίπεδο των επίγειων σταθμών είναι από τη φύση της περιοδική. Η περίοδος αυτή μπορεί να οριστεί σαν τον χρόνο που απαιτείται για την ευθυγράμμιση των δύο επιπέδων στην ίδια θέση και να αποκατασταθούν τις ίδιες συνδέσεις ανάμεσα στους δορυφόρους και τους επίγειους σταθμούς. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο κάθε δορυφόρος κάνει μια πλήρη περιστοφή γύρω από τη Γη κάθε 100 λεπτά περίπου, έτσι κάθε επίπεδο δορυφόρων βρίσκεται στην ίδια θέση κάθε 100 λεπτά. Οι επίγειοι σταθμοί βρίσκονται στην ίδια θέση κάθε 1440 λεπτά (1 ημέρα). Είναι λογικό λοιπόν ότι η περίοδος της συνδεσιμότητας του δικτύου μπορεί να βρεθεί με την μέτρηση του αριθμού των ημερών στον οποίο ο αστερισμός συμπληρώνει ακέραιο αριθμό περιόδων. Βασιζόμενοι σάυτές τις τιμές όμως, ο ¨αστερισμός' των δορυφόρων δεν συμπληρώνει ακέραιο αριθμό περιόδων μέσα σε δέκα ημέρες. Αυτό φαίνεται να δείχνει ότι η ίδια συνδεσιμότητα μεταξύ επίγειων σταθμών και δορύφόρων δεν επιτυγχάνεται σε περιοδική βάση. Ωστόσο, το μέγεθος της περιοχής κάλυψης ενός δορυφόρου και η ελάχιστη γωνία λήψης του σταθμού πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν για τον καθορισμό της συνδεσιμότητας ανάμεσα στους επίγειους σταθμούς και τους δορυφόρους. Ακόμα και αν οι σχετικές θέσεις μεταξύ δορυφόρων και επίγειων σταθμών δεν είναι ακριβώς οι ίδιες, οι ίδιες συνδέσεις είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν.

3.1.4 Διεκπεραίωση Κλήσεων και λειτουργικότητα του Iridium

Το σύστημα Iridium επιτρέπει στους χρήστες του την περιαγωγή (roaming) σε όλο τον κόσμο με την χρήση ενός και μόνου αριθμού κλήσης. Για την επίτευξη αυτού, ο κάθε χρήστης διαθέτει μια οικεία πύλη (home gateway) η οποία διαχειρίζεται τις υπηρεσίες του. Οι πύλες στο σύστημα αυτό είναι περιοχικές (regional) και υποστηρίζουν μεγάλες γεωγραφικές περιοχές. Γαι παράδειγμα, μια πύλη υποστηρίζει ολόκληρη τη Βόρεια Αμερική. Οι πύλες χρησιμεύουν και σαν σημεία διασύνδεσης με το επίγειο δίκτυο τηλεφωνίας. Επίσης εκτελούν τις λειτουργίες της προετοιμασίας κλήσης (call setup), εντοπισμού κλήσης (call location), και χρέωσης. Η πύλη πρέπει να διατηρεί μια βάση δεδομένων με προφίλ συνδρομητών καθώς και μια βάση δεδομένων με τις θέσεις τους κάθε στιγμή. Αυτή η βάση δεδομένων ονομάζεται home location register - HLR.

Κάθε χρήστης του Iridium καθορίζεται μοναδικά από τρεις αριθμούς:

- **Mobile Subscriber Integrated Services Digital Network Number (MSISDN)**
- **Temporary Mobile Subscriber Identification (TMSI)**
- **Iridium Mobile Subscriber Identity (IMSI)**

Ο MSISDN είναι ο τηλεφωνικός αριθμός κλήσης του χρήστη. Έχει μέγεθος πέντε ψηφίων, και αποτελεί τμήμα του δωδεκαψήφιου αριθμού που απαιτείται να καλέσει κάποιος για να επικοινωνήσει με τον κάτοχο αυτού του αριθμού.

Το πρώτο πεδίο αυτού του δωδεκαψήφιου αριθμού είναι ένας τετραψήφιος αριθμός, ο κωδικός χώρας. Το δεύτερο πεδίο είναι ένας τριψήφιος αριθμός, ο κωδικός γεωγραφικής περιοχής. Αυτός ο κωδικός χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της οικείας χώρας home country σε περιοχές όπου μια πύλη εξυπηρετεί παραπάνω από μια χώρες. Το τρίτο και τελευταίο πεδίο του αριθμού είναι ο MSISDN. Ο TMSI είναι ένας προσωρινός αριθμός που μεταδίδεται από το δίκτυο κατά την προετοιμασία κάθε κλήσης. Ο αριθμός αυτός αλλάζει σε τακτά χρονικά διαστήματα για την προστασία της ιδιωτικότητας του χρήστη. Ο IMSI είναι ένας μόνιμος αριθμός αποθηκευμένος σε μια κάρτα μοναδική για κάθε χρήστη και την οποία εισάγει ο χρήστης στην τερματική του συσκευή. Ο αριθμός αυτός περιέχει πληροφορίες απαραίτητες για τον μοναδικό καθορισμό του χρήστη και της οικείας πύλης του από μια πύλη.

Για την διεκπεραίωση των κλήσεων, το δίκτυο Iridium πρέπει να παρακολουθεί την θέση ενός χρήστη καθώς αυτός κινείται σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές. Όταν ένας χρήστης ενεργοποιεί την συσκευή του, μεταδίδει ένα σήμα ¨ετοιμότητας για λήψη' ("ready to receive") στην πλησιέστερη πύλη. Το σήμα μεταβιβάζεται από τον χρήστη προς τον δορυφόρο που βρίσκεται ακριβώς πάνω από τη συγκεκριμένη περιοχή κάλυψης. Αν ο χρήστης δεν βρίσκεται στην ίδια περιοχή κάλυψης με την πύλη, το σήμα διασχίζει κάποια ISLs μέχρι να φτάσει στο δορυφόρο που βρίσκεται ακριβώς πάνω από την πύλη. Το σήμα τότε μεταφέρεται στην πύλη. Αν ο χρήστης δεν βρίσκεται στην περιοχή οικείας πύλης, η πύλη η οποία λαμβάνει το σήμα ¨ετοιμότητας για λήψη' θα αναγνωρίσει ότι ο χρήστης είναι ¨επισκέπτης' για την πύλη αυτή. Η πύλη καθορίζει την θέση του χρήστη και εισάγει την πληροφορία αυτή στον visited location register - VLR. Η πύλη αυτή στέλνει πληροφορίες διαμέσου ISLs στην οικεία πύλη του χρήστη και ζητάει το προφίλ του χρήστη και την άδεια για την διεκπεραίωση κλήσεων για τον χρήστη. Η οικεία πύλη στέλνει την άδεια στην πύλη και ενημερώνει την θέση του χρήστη στον HLR.

Οι πύλες χειρίζονται τις διαδικασίες προετοιμασίας κλήσεων στο δίκτυο Iridium. Όταν πραγματοποιείται μια κλήση προς έναν χρήστη του δικτύου Iridium, αυτή δρομολογείται στην οικεία πύλη του χρήστη. Η κλήση μπορεί να έχει πραγματοποιηθεί από επίγειο δίκτυο τηλεφωνίας ή από κάποιον άλλο χρήστη του Iridium. Η οικεία πύλη του χρήστη καθορίζει την θέση του από την πληροφορία που διαθέτει στον HLR. Η πύλη τότε στέλνει ένα σήμα κλήσης το οποίο διέρχεται μέσω ISLs μέχρι τον δορυφόρο που βρίσκεται ακριβώς πάνω από τον χρήστη. Το σήμα μεταφέρεται στην συσκευή του χρήστη και το τηλέφωνο χτυπά. Όταν ο χρήστης αρχίσει να χρησιμοποιεί τη συσκευή του, αυτή στέλνει ένα σήμα κατειλημμένου το οποίο διασχίζει το δίκτυο μέσω ISLs μέχρι την πύλη. Η πύλη τότε δρομολογεί τα πακέτα δεδομένων (που στο παράδειγμά μας μεταφέρουν φωνή) διαμέσου του δικτύου Iridium στον χρήστη. Τα πακέτα αυτά δεν χρειάζεται να δρομολογηθούν μέσω της πύλης. Αν η κλήση προέρχεται από έναν χρήστη του Iridium προς έναν άλλον χρήστη του Iridium τότε τα πακέτα αυτά δρομολογούνται αποκλειστικά από το δίκτυο δορυφόρων και τα ISLs τους. Η πληροφορίες προετοιμασίας της κλήσης μεταφέρονται μέσω της πύλης, αλλά ο ρόλος της πύλης τελειώνει μόλις αυτό ολοκληρωθεί.

3.2 Σχηματισμός δορυφόρων Teledesic

Το δίκτυο δορυφόρων Teledesic είναι ένα δίκτυο υψηλής ταχύτητας και χωρητικότητας το οποίο συνδυάζει την παροχή παγκόσμιας κάλυψης και χαμηλής καθυστέρησης διάδοσης ενός συστήματος δορυφόρων LEO την ευελιξία και αξιοπιστία του Internet και μηχανισμούς ελέγχου ποιότητας υπηρεσιών (Quality of Service - QoS). Ουσιαστικά το δίκτυο Teledesic θα παρέχει οικονομική πρόσβαση υψηλής ταχύτητας σε όλες τις περιοχές της Γης στις οποίες η παροχή τέτοιων υπηρεσιών με επίγεια μέσα θα ήταν οικονομικά ασύμφορη.

Το δίκτυο Teledesic μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μια σύνδεση πρόσβασης ανάμεσα σε έναν χρήστη και μια πύλη σε ένα επίγειο δίκτυο, ή σαν ένα μέσο σύνδεσης χρηστών ή δικτύων μεταξύ τους. Με σχεδόν πλήρη κάλυψη της Γης (95% της επιφάνειας), το δίκτυο Teledesic σχεδιάστηκε για την υποστήριξη εκατομμυρίων χρηστών ταυτόχρονα.

3.3 Teledesic: Σχεδιασμός του δορυφορικού σχηματισμου (constellation design)

3.3.1 Συμβατότητα με ήδη υπάρχοντα δίκτυα

Τα δορυφορικά συστήματα επικοινωνίας που χρησιμοποιούν γεωστατικούς δορυφόρους απαιτούν αλλαγές στα επίγεια στάνταρ και πρωτόκολλα δικτύωσης για την αντιμετώπιση της ενδογενής καθυστέρησης μετάδοσης που παρουσιάζουν, η οποία κατ΄ ελάχιστο είναι μισό δευτερόλεπτο. Ο στόχος του Teledesic είναι η συμβατότητα με τα ήδη υπάρχοντα στάνταρ δικτύωσης, και όχι η αλλαγή τους. Το δίκτυο Teledesic σχεδιάστηκε για την παροχή συμβατότητας με τις εφαρμογές που βασίζονται στα σημερινά πρωτόκολλα. Αυτό θέτει αυστηρές απαιτήσεις στον σχεδιασμό του συστήματος, συμπεριλαμβανομένης της απαίτησης για μικρή καθυστέρηση διάδοσης, χαμηλό ρυθμό εμφάνισης σφαλμάτων στη μετάδοση, υψηλή διαθεσιμότητα των υπηρεσιών, και ευέλικτη και υψηλής ταχύτητας σύνδεση. Το Teledesic στηρίζεται σε ένα επίγειο τμήμα (τερματικές συσκευές, δικτυακές πύλες και συστήματα λειτουργίας και ελέγχου του δικτύου και ένα διαστημικό τμήμα (το switching δίκτυο δορυφόρων το οποίο παρέχει τις συνδέσεις επικοινωνίας ανάμεσα στις τερματικές συσκευές). Οι τερματικές συσκευές αποτελούν τις απολήξεις του δικτύου Teledesic και παρέχουν την διεπαφή ανάμεσα στο δορυφορικό δίκτυο και τους επίγειους τελικούς χρήστες και δίκτυα. Πραγματοποιούν την μετάφραση ανάμεσα στα εσωτερικά πρωτόκολλα που χρησιμοποιεί το δίκτυο Teledesic και τα στάνταρ πρωτόκολλα των επίγειων δικτύων, απομονώνοντας έτσι τον κύριο κορμό του δικτύου που είναι οι δορυφόροι από την πολυπλοκότητα τους και τυχόν αλλαγές τους.

Οι τερματικές συσκευές του Teledesic επικοινωνούν άμεσα με το δίκτυο δορυφόρων και υποστηρίζουν μια ευρεία ζώνη ταχυτήτων σύνδεσης. Τα τερματικά επίσης διαθέτουν υποστήριξη μιας ευρείας γκάμας από πρωτόκολλα δικτύωσης, συμπεριλαμβανομένων των IP, ISDN, ATM και άλλα. Αν και το βελτιστοποιημένο για παροχή υπηρεσίας σε σταθερές τερματικές συσκευές, το δίκτυο Teledesic, μπορεί να υποστηρίξει μεταφερόμενες και κινητές τερματικές συσκευές, καθώς και τερματικές συσκευές για ναυτικές και αεροπορικές εφαρμογές.

Οι περισσότεροι χρήστες θα διαθέτουν αμφίδρομες συνδέσεις οι οποίες θα παρέχουν ταχύτητες μέχρι 64Mbps για λήψη, και μέχρι 2Mbps για αποστολή δεδομένων. Αυτό σε κλίμακα μεγέθους, είναι περίπου 2000 φορές μεγαλύτερη ταχύτητα από αυτή που παρέχουν συνδέσεις με την χρήση κλασικών αναλογικών μοδεμς σήμερα.

Η δυνατότητά του υποστήριξης πολλαπλών ταχυτήτων σύνδεσης, πρωτοκόλλων και υπηρεσιών παρέχει ευελιξία υποστήριξης ενός ευρέως φάσματος εφαρμογών συμπεριλαμβανομένου του Internet, εταιρικών ιδιωτικών δικτύων, επικοινωνίες πολυμέσων, διασύνδεση τοπικών δικτύων (LAN).

Οι τερματικές συσκευές επίσης θα παρέχουν τα απαραίτητα σημεία διασύνδεσης για τα Constellation Operations Control Centers (COCC) και Network Operations Control Centers (NOCC). Τα COCCs συντονίζουν την αρχική τοποθέτηση (deployment) των δορυφόρων σε τροχιά, αντικατάσταση των αναπληρωματικών δορυφόρων, διάγνωση σφαλμάτων, επισκευές και παροπλισμού (de-orbiting). Τα NOCCs συμπεριλαμβάνουν μια πληθώρα από λειτουργίες κατανεμημένης διαχείρισης δικτύου και ελέγχου όπως βάσεις δεδομένων, διαχείριση δικτύου και συστήματα καταγραφής χρεώσεων.

3.3.2 Γρήγορο Switching Πακέτων

Το διαστημικό τμήμα του δικτύου Teledesic χρησιμοποιεί γρήγορο switching πακέτων. Οι επικοινωνίες αντιμετωπίζονται από το δίκτυο σαν ροή μικρών και σταθερών σε μέγεθος πακέτων. Το κάθε πακέτο περιέχει μιε επικεφαλίδα (header) η οποία περιέχει τη διεύθυνση προορισμού και πληροφορίες για το πακέτο, ένα κωδικό διόρθωσης σφαλμάτων ο οποίος χρησιμοποιείται για την επαλήθευση της ακεραιότητας της επικεφαλίδας, και το κύριο τμήμα του πακέτου, τα δεδομένα. Η μετατροπή από και προς αυτή τη μορφή πακέτων πραγματοποιείται στις τερματικές συσκευές στις απολήξεις του δικτύου.

Η τοπολογία ενός δικτύου δορυφόρων LEO είναι δυναμικά μεταβαλλόμενη. Το δίκτυο πρέπει διαρκώς να προσαρμόζεται στις αλλαγές αυτές για την επίτευξη της βέλτιστης (ως προς την συνολική καθυστέρηση) σύνδεσης ανάμεσα στις τερματικές συσκευές. Το δίκτυο Teledesic χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό διευθυνσιοδότησης βασισμένης στον προορισμό (destination-based packet addressing) και ενός κατανεμημένου, προσαρμοστικού (adaptive) αλγορίθμου δρομολόγησης. Στόχος αυτών είναι η επίτευξη μικρών καθυστερήσεων και μικρής διακύμανσης των πακέτων κατά μήκος του δικτύου. Το κάθε πακέτο περιέχει τη διεύθυνση προορισμού και ο κάθε κόμβος (δορυφόρος) επιλέγει αυτόνομα την διαδρομή ελάχιστης καθυστέρησης προς τον προορισμό αυτό.

Η τερματική συσκευή στον προορισμό διατηρεί και αν είναι απαραίτητο αναδιατάσσει τα πακέτα που λαμβάνει έτσι ώστε να εξαλείψει το φαινόμενο της διακύμανσης στις καθυστερήσεις.

Ο κάθε δορυφόρος αποτελεί ένα κόμβο στο δίκτυο και διαθέτει ISLs με άλλους δορυφόρους στο ίδιο και στα γειτονικά του επίπεδα τροχιάς. Αυτή η διάταξη, σχηματίζει ένα πλέγμα, ένα δίκτυο το οποίο είναι ανθεκτικό σε σφάλματα και τοπικές συμφορήσεις. Το δίκτυο συνδυάζει τα πλεονεκτήματα ενός circuit-switched δικτύου και ενός packet-switched δικτύου.

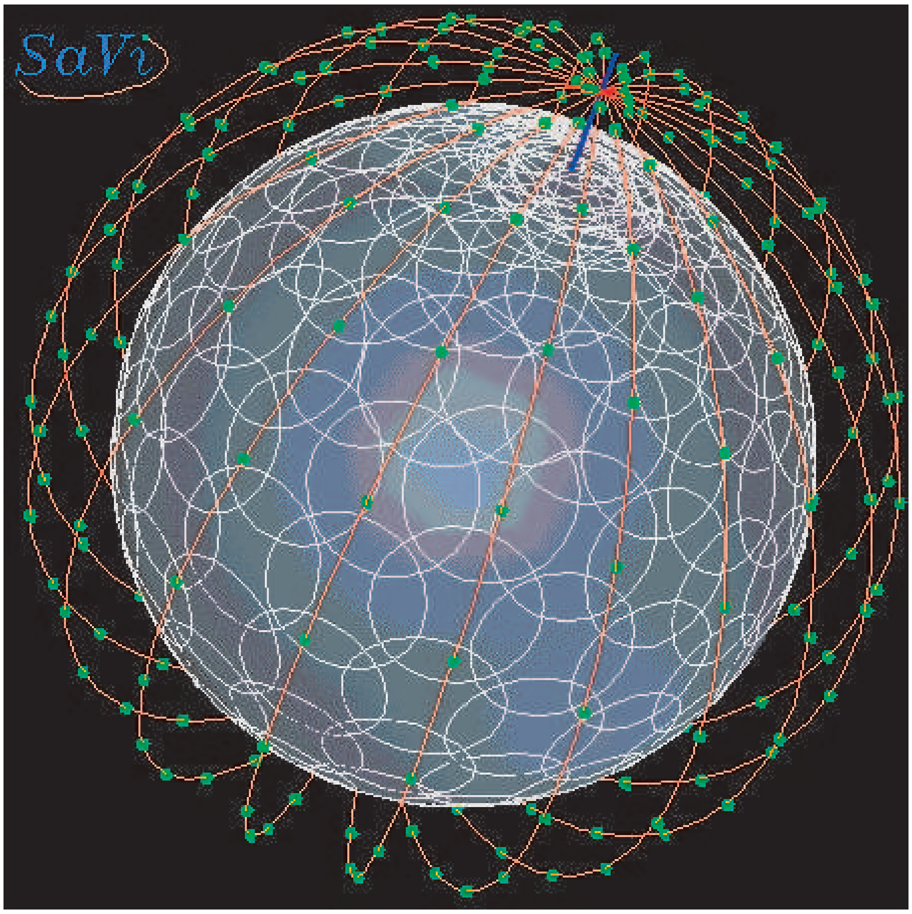
Από την πλευρά του δικτύου, η ύπαρξη ενός μεγάλου αστερισμού δορυφόρων με την δυνατότητα σχηματισμού συνδέσεων μεταξύ των προσφέρει ένα αριθμό πλεονεκτημάτων σε όρους ποιότητας υπηρεσίας, αξιοπιστίας και χωρητικότητας. Ένα δίκτυο με πολλές συνδέσεις προσφέρει εν γένει ένα στιβαρό, ανθεκτικό σε σφάλματα σχεδιασμό ο οποίος μπορεί να προσαρμοστεί σε τοπολογικές αλλαγές και σε κόμβους ή συνδέσεις που παρουσιάζουν βλάβη ή συμφόρηση. Για την επίτευξη μεγάλης χωρητικότητας και πυκνότητας συνδέσεων, ο κάθε δορυφόρος έχει δυνατότητα παροχής μεγάλης χωρητικότητας σε σχετικά μικρή περιοχή κάλυψης. Επικαλυπτόμενες περιοχές κάλυψης σε συνδυασμό με την χρήση εφεδρικών δορυφόρων σε τροχιά επιτρέπουν την ταχεία επισκευή του δικτύου όταν μια βλάβη ενός δορυφόρου έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση προβλήματος στην κάλυψη.

Η χαμηλότερη ζώνη συχνοτήτων με αρκετά ευρύ φάσμα έτσι ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις των υπηρεσιών σε ταχύτητα και ποιότητα που υπόσχεται να προσφερει το Teledesic είναι η μπάντα Ka. Οι συνδέσεις επικοινωνίας τερματικής συσκευής - δορυφόρου χρησιμοποιούν συχνότητες της μπάντας αυτής οι οποίες είναι διεθνώς δεσμευμένες για χρήση από μη-γεωστατικούς δορυφόρους και στις ΗΠΑ, δεσμευμένες για χρήση από το Teledesic. Οι συνδέσεις λήψης λειτουργούν ανάμεσα στα 18.8 και 19.3 GHz, και οι συνδέσεις αποστολής ανάμεσα στα 28.6 και 29.1 GHz. Η ποιότητα συνδέσης σε τέτοιες συχνότητες πέφτει σημαντικά από καιρικά φαινόμενα όπως βροχή, και από εμπόδια τα οποία παρεμβάλλονται ανάμεσα στο δορυφόρο και την τερματική συσκευή. Για την αποφυγή των εμποδίων αυτών και τον περιορισμό της απόστασης που πρέπει το σήμα να διανύσει στα χαμηλά στρώματα της ατμόσφαιρας, τοποθετείται η απαίτηση της χρήσης υψηλής γωνίας λήψης. Ο αστερισμός Teledesic εξασφαλίζει σαν ελάχιστη γωνία λήψης τις 40 μοίρες για όλη την περιοχή που καλύπτει.

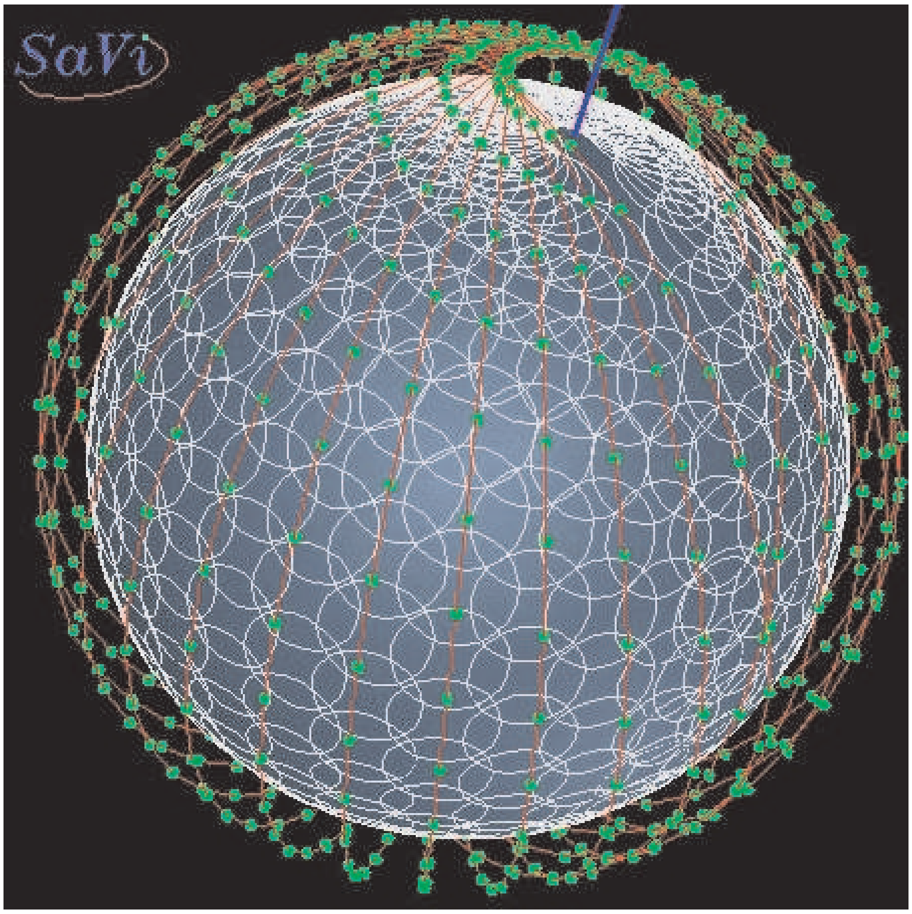
Η καθυστέρηση μετάδοσης παίζει σημαντικό ρόλο στην ποιότητα των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, ειδικά για αλληλεπιδραστική επικοινωνία (τηλεφωνικές συνδιαλέξεις), και για διάφορα καθιερωμένα πρωτόκολλα ανταλλαγής δεδομένων. Για την ύπαρξη συμβατότητας με τις απαιτήσεις των τελευταίων που έχουν αναπτυχθεί για τις επίγειες τηλεπικοινωνιακές υποδομές, οι δορυφόροι του Teledesic βρίσκονται σε τροχιές χαμηλού ύψους, λιγότερου από 1400 χιλιόμετρα. Ο συνδυασμός υψηλής γωνίας λήψης και χαμηλής τροχιάς έχει σαν αποτέλεσμα μικρή περιοχή κάλυψης για κάθε δορυφόρο, γεγονός το οποίο επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων αλλά απαιτεί μεγαλύτερο αριθμό δορυφόρων για την κάλυψη ολόκληρου του πλανήτη.

3.4 Συνδέσεις μεταξύ των δορυφόρων (Intersatellite Links)

Στον αρχικό σχεδιασμό, το δίκτυο Τελεδεσις αποτελούνταν από 840 δορυφόρους τοποθετημένους σε 21 επίπεδα τροχιάς με 40 δορυφόρους σε κάθε επίπεδο. Μερικά χρόνια αργότερα, η διάταξη αυτή επανασχεδιάστηκε με στόχο την ελάττωση του αριθμού δορυφόρων με αποτέλεσμα τον σχεδιασμό ενός αστερισμού από 288 δορυφόρους, τοποθετημένους σε 12 επίπεδα τροχιάς με 24 δορυφόρους σε κάθε επίπεδο.



Σχήμα 3.2: Δορυφορικός σχηματισμός Teledesic288.



Σχήμα 3.3: Δορυφορικός σχηματισμός Teledesic840.

Κεφάλαιο 4

Ανακάλυψη Γειτόνων (Neighbor Discovery)

4.1 Εισαγωγή

Ένας τηλεπικοινωνιακός δορυφόρος αποτελείται από πολλά και πολύπλοκα υποσυστήματα τα οποία είναι απαραίτητα για τη σωστή λειτουργία του, αλλά και την επιβίωσή του στις συνθήκες στις οποίες καλείται να λειτουργήσει. Όσον αφορά τις τηλεπικοινωνιακές του δυνατότητες, για την περαιτέρω ανάλυση μόνο ορισμένα χαρακτηριστικά του είναι αναγκαία, και έτσι κάνοντας κάποια αφαίρεση (abstraction) να είναι δυνατή η ανάπτυξη αλλά και η ανάλυση των αλγορίθμων δρομολόγησης και ανακάλυψης γειτόνων.

Ο κάθε δορυφόρος του σχηματισμού λαμβάνει πακέτα δεδομένων είτε από τερματικές συσκευές στη Γη, είτε από άλλους δορυφόρους στο σχηματισμό. Τα πακέτα αυτά πρέπει με κάποιον τρόπο να δρομολογηθούν 'έξυπνα' διαμέσου του σχηματισμού, έτσι ώστε αυτά να φτάσουν στον τελικό παραλήπτη σε όσο το δυνατόν μικρότερο χρόνο, αλλά και με όσο το δυνατόν λιγότερα σφάλματα (τα οποία θα απαιτήσουν και επαναμετάδοση των προβληματικών πακέτων).

Οι ιδέες που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο αυτό, βασίζονται σε ήδη υπάρχουσα και εξελισσόμενη δουλειά που γίνεται πάνω στην νέα έκδοση 6 του πρωτοκόλλου Internet (Internet Protocol), γνωστό και σαν IPv6. Συγκεκριμένα αντλήθηκαν πληροφορίες και ιδέες από το κείμενο RFC2461, "Neighbor Discovery for IP Version 6 (IPv6)" [5], καθώς και το RFC2760, "Ongoing

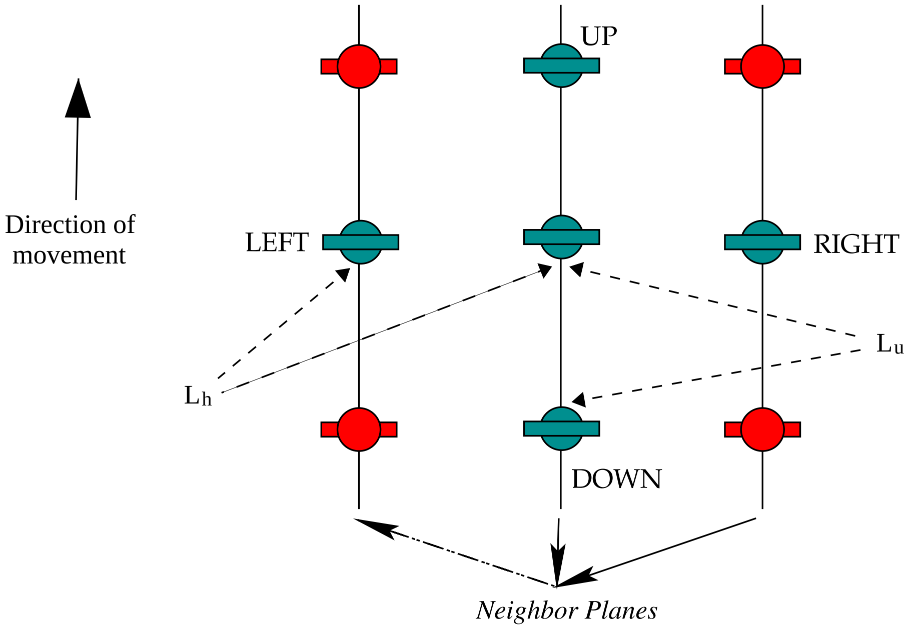
TCP Research Related to Sattelites" [6].

4.2 Ορισμοί

1. **Έννοια Γειτόνων**: με τον όρο γείτονες ονομάζονται οι δορυφόροι οι οποίοι βρίσκονται πλησιέστερα σε έναν δορυφόρο του σχηματισμού, έτσι ώστε να είναι δυνατή η επίτευξη συνδέσεων μεταξύ των. Σκοπός των συνδέσεων αυτών είναι η δρομολόγηση δεδομένων ανάμεσα στους δορυφόρους μέχρι να φτάσουν στον τελικό επίγειο παράλήπτη.

2. **Συνδέσεις (InterSatellite Links - ISLs)**: Οι συνδέσεις μεταξύ δορυφόρων, μπορούν να διαχωριστούν σε κατηγορίες, ανάλογα με την διάρκεια ύπαρξής τους. Επειδή ο όλος σχηματισμός των δορυφόρων βρίσκεται σε διαρκή κίνηση, τόσο ως προς τη Γη αλλά και μεταξύ των δορυφόρων οι συνδέσεις για ανταλλαγή δεδομένων δεν μπορούν να θεωρηθούν μόνιμες με την έννοια που καταλαβαίνει κάποιος όταν αναφερόμαστε σε μόνιμη σύνδεση για επίγει δίκτυα. Όσον αφορά την κίνηση των δορυφόρων πάνω από τη Γη, η παρακολούθηση και η πραγματοποίηση των απαραίτητων συνδέσεων ονομάζεται handoff. Όσον αφορά την κίνηση των δορυφόρων μεταξύ τους, τα δεδομένα αλλάζουν ανάλογα με την σχεδίαση και εγκατάσταση του σχηματισμού στο διάστημα. Λαμβάνοντας σαν παράδειγμα τους σχηματισμούς δορυφόρων που έχουν ήδη αναφερθεί, δηλαδή το Iridium(ήδη σε λειτουργία) και το Teledesic(υπό κατασκευή), μπορούμε να παρατηρήσουμε το εξής: Η τοποθέτηση των δορυφόρων παρουσιάζει μια κανονικότητα. Δηλαδή οι δορυφόροι βρίσκονται τοποθετημένοι σε επίπεδα τροχιών που διέρχονται από τους πόλους και τα επίπεδα μεταξύ τους απέχουν σταθερή γωνιακή απόσταση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα για έναν οποιονδήποτε δορυφόρο το ότι οι αποστάσεις, αλλά και οι σχετικές τους θέσεις με τους άλλους δορυφόρους που βρίσκονται ¨πάνω' και ¨κάτω' του, (βλ. σχήμα 4.1) να παραμένουν αρκετά σταθερές. Από την άλλη πλευρά, δορυφόροι που βρίσκονται ¨αριστερά' και ¨δεξιά' από κάποιον δορυφόρο, λόγω της μεγαλύτερης απόστασης που τους χωρίζει αλλά και της ύπαρξης του φαινομένου του να κινούνται με αντίθετη διεύθυνση στα σημεία των seams θεωρούνται λιγότερο αξιόπιστες και

σταθερές, και στην πράξη αυτές οι συνδέσεις μεταβάλλονται με μεγάλη συχνότητα.



Σχήμα 4.1: Μοντέλο γειτόνων με 4 ή 8 ταυτόχρονες συνδέσεις.

Στο μοντέλο που εξετάζεται παρακάτω, χρησιμοποιείται η εκδοχή ενός δορυφόρου ο οποίος μπορεί να διατηρεί μέχρι και 4 ταυτόχρονες συνδέσεις ISL, αντικατοπτρίζοντας δηλαδή τους δορυφόρους του σχηματισμού Iridium. Υπάρχει ένα πιο εξελιγμένο μοντέλο, το οποίο μπορεί να υποστηρίζει μέχρι και 8 ταυτόχρονες συνδέσεις ISL, και το οποίο όπως φαίνεται (βλ. σχήμα 4.1) θα είναι και αυτό το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για τους δορυφόρους του σχηματισμού Teledesic.

4.3 Μοντέλο Δορυφόρου

Ο δορυφόρος, όσον αφορά τη συμπεριφορά του στην ανάλυση των αλγορίθμων ανακάλυψης γειτόνων διαθέτει κάποια βασικά χαρακτηριστικά.

- **Συνδέσεις μεταφοράς/ανταλλαγής δεδομένων**. Πρόκειται για συνδέσεις δύο ειδών:

- **Συνδέσεις μεταξύ δορυφόρων**
  Πρόκειται για τα λεγόμενα inter-satellite links ή για συντομία I-SLs. Είναι συνδέσεις που επιτυγχάνονται ανάμεσα σε δορυφόρους που βρίσκονται είτε στο ίδιο επίπεδο τροχιάς, είτε σε γειτονικά επίπεδα τροχιάς. Γενικά είναι συνδέσεις υψηλής ταχύτητας μεταφοράς δεδομένων, και μπορούμε να υποθέσουμε ότι οι συνδέσεις αυτές είναι αμφίδρομες, δηλαδή επιτρέπουν την ροή δεδομένων και προς τις δύο κατευθύνσεις. Λόγω της μεταβαλλόμενης τοπολογίες του δικτύου των δορυφόρων λόγω της κίνησής τους, οι συνδέσεις αυτές δεν παραμένουν σταθερές με το χρόνο. Επίσης διάφορα άλλα φαινόμενα, δημιουργούν προβλήματα στην σωστή λειτουργία τους, όπως καιρικά φαινόμενα, αλλοιώσεις στην τροχιά των δορυφόρων.

- **Συνδέσεις δορυφόρων-τερματικών συσκευών στη Γη**
  Πρόκειται για τα λεγόμενα downlinks και uplinks, η ονομασία που χρησιμοποιείται κάθε φορά εξαρτάται από την θέση του παρατηρητή (πάνω σε κάποιο δορυφόρο ή σε κάποια θέση στη Γη). Και αυτές οι συνδέσεις μπορεί να υποτεθεί ότι είναι αμφίδρομες, όχι όμως συμμετρικές ως προς την ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων σε κάθε κατεύθυνση.

• **Ενσωματωμένο σύστημα switching**
Εφόσον πλέον ο δορυφόρος δεν αποτελεί ένα ¨χαζό' αναμεταδότη, πρέπει να διαθέτει την απαιτούμενη λογική αρχικά για την παρακολούθηση της κατάστασης των συνδέσεών του με τις τερματικές συσκευές/επίγειους σταθμούς και τους δορυφόρους - γείτονές του. Επίσης για την υλοποίηση και εκτέλεση του αλγόριθμου δρομολόγησης ο οποίος έχει επιλεγεί για την εύρεση της βέλτιστης κάθε φορά διαδρομής για κάθε πακέτο, απαιτείται η ύπαρξη κάποιου υπολογιστικού συστήματος.

• **Προσωρινή μνήμη**
Για την αποθήκευση δεδομένων κρίσιμων για την σωστή λειτουργία του δορυφόρου, όπως πληροφορίες για την κατάσταση των συνδέσεών του την κάθε χρονική στιγμή, καθώς και για προσωρινή αποθήκευση πακέτων τα οποία έχουν παραληφθεί και περιμένουν να προωθηθούν στον δορυφόρο επόμενου βήματος (next-hop).

Ο κάθε δορυφόρος μπορεί να ιδωθεί σαν ένας δρομολογητής (router) πακέτων δεδομένων. Δηλαδή ο δορυφόρος λαμβάνει όχι μόνο πακέτα τα οποία προορίζονται γιάυτόν, αλλά μπορεί να λάβει πακέτα τα οποία προορίζονται και για άλλους δορυφόρους. Αυτό που κάνει είναι να τα προωθεί μέσα από έναν αριθμό συνδέσεων που διατηρεί με τους ¨γειτονικούς' του δορυφόρους. Ο κάθε δορυφόρος διαθέτει έναν προκαθορισμένο αριθμό συνδέσεων που μπορεί να διατηρεί και να διαχειρίζεται σε κάθε χρονική στιγμή. Λόγω της διαρκής κίνησής των δορυφόρων, οι συνδέσεις αυτές δεν παραμένουν σταθερές για διαφόρους λόγους.

Λόγω της περιορισμένης διαθέσιμης ενέργειας πάνω στο δορυφόρο, οποιοσδήποτε αλγόριθμος δρομολόγησης/ανακάλυψης γειτόνων εφαρμοστεί, θα πρέπει να χρησιμοποιεί όσο το δυνατόν λιγότερο αριθμό μηνυμάτων ελέγχου. Ο περιορισμός των μηνυμάτων αυτών επίσης συμβάλλει στην αποσυμφόρηση του δικτύου σε περιόδους μεγάλης κίνησης δεδομένων.

Το πρώτο βήμα είναι η λήψη πληροφοριών για άμεσα γειτονικούς δορυφόρους (αμέσως ¨πάνω' και ¨κάτω' στο ίδιο επίπεδο τροχιάς, και ¨αριστερά¨/¨δεξιά' στα γειτονικά επίπεδα). Σαν ένα παραπάνω βήμα θα ήταν δυνατή η επέκταση της έννοιας των γειτόνων για την κάλυψη παραπέρα επιπέδων, ειδικά σε υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη.

Τα προβλήματα που τίθενται προς αντιμετώπιση είναι τα εξής:

- Καθορισμός Επόμενου Βήματος (Next-hop Determination)
- Ανίχνευση μη Διαθεσιμότητας Γειτόνων (Unreachability Detection)
- Ανακατεύθυνση (Redirection)

4.4 Καθορισμός Επόμενου Βήματος (Next-hop Determination)

Εφόσον ο κάθε δορυφόρος μπορεί να ιδωθεί σαν έναν δρομολογητή δεδομένων, για κάθε πακέτο που λαμβάνει σε κάποια από τις διεπαφές του (interfaces), θα πρέπει να είναι σε θέση να αποφασίζει τον αμέσως επόμενο δορυφόρο στον οποίο θα πρέπει να προωθήσει το πακέτο δεδομένων, έτσι ώστε αυτό τελικά να φτάσει στον προορισμό του. Στο σημείο αυτό εφαρμόζονται από το σύστημα οι κατάλληλοι αλγόριθμοι δρομολόγησης, οι οποίοι έχουν ενσωματωθεί στο δορυφόρο.

4.5 Ανίχνευση μη Διαθεσιμότητας Γειτόνων (Unreachability Detection)

Οι συνδέσεις μεταξύ των γειτόνων δεν παραμένουν σταθερές με τον χρόνο. Για τον λόγο αυτό απαιτείται η ύπαρξη ενός μηχανισμού ανίχνευσης της μεταβολής της κατάστασης αυτών των συνδέσεων. Οι συνδέσεις μεταξύ γειτόνων μπορούν να αποτύχουν για διάφορους λόγους: βλάβη του δορυφόρου, καιρικά φαινόμενα (ειδικά για δορυφόρους χαμηλής τροχιάς LEO), εμφάνιση ανωμαλιών στις τροχιές με την πάροδο του χρόνου, μηχανική δυσλειτουργία στα συστήματα διεύθυνσης των κεραιών που είναι υπεύθυνες για την επίτευξη των συνδέσεων.

4.6 Ανακατεύθυνση (Redirection)

Ας υποθέσουμε ένας δορυφόρος-δρομολογητής λαμβάνει ένα πακέτο για να προωθήσει στον επόμενο προορισμό του. Συμβουλεύεται τα αποτελέσματα του αλγόριθμου δρομολόγησης. Στην περίπτωση που προκύψει ότι το πακέτο δεν θα έπρεπε να έχει σταλεί σε αυτόν αλλά έπρεπε να είχε ακολουθήσει κάποιαν άλλη διαδρομή (πιθανόν πιο βέλτιστη σε χρόνο, ή με οποιαδήποτε άλλη συνάρτηση βάρους), ο δορυφόρος στέλνει μήνυμα στον αρχικό αποστολέα του πακέτου ενημερώνοντας τον για την νέα διαδρομή. Η πράξη αυτή ονομάζεται ανακατεύθυνση.

4.7 Μέθοδοι Ανακάλυψης Γειτόνων

Για την πραγματοποίηση της ανακάλυψης γειτόνων από έναν δορυφόρο, απαιτείται τόσο η διατήρηση κάποιων πληροφοριών σχετικά με τις συνδέσεις που μπορεί να χειριστεί, αλλά και η ενημέρωσή τους με την πάροδο του χρόνου. Το κατα πόσο μπορεί ο κάθε δορυφόρος να διαθέτει τα δεδομένα αυτά όσο πιο ενημερωμένα, αντικατοπτρίζει και την ακριβή εικόνα που έχει για το δίκτυο στο οποίο βρίσκεται. Οι παρακάτω δομές είναι απαραίτητες για την αποθήκευση των πληροφοριών αυτών.

4.7.1 Neighbor Cache

Πρόκειται για μια λίστα εγγραφών που περιέχει τους γείτονες στους οποίους έχουν δρομολογηθεί πακέτα πρόσφατα. Επίσης περιέχει πληροφορίες οι οποίες χρησιμοποιούνται από τον αλγόριθμο ανίχνευσης διαθεσιμότητας (Network Unreachability Detection - N.U.D)
Τέτοιες πληροφορίες μπορούν να είναι:

- **Διαθεσιμότητα του γειτονικού κόμβου**
  Περιγράφει την κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο κάθε γειτονικός δορυφόρος. Ο κάθε γειτονικός δορυφόρος μπορεί να αναφέρεται είτε με την θέση του σε σχέση με τον δορυφόρο που διατηρεί τη λίστα (πάνω/κάτω/αριστερά/δεξιά), είτε κάποιον μοναδικό αριθμό/διεύθυνση η οποία έχει ανατεθεί στον κάθε δορυφόρο που συμμετέχει στο σχηματισμό. Οι καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρίσκεται μια σύνδεση ISL μπορούν να είναι οι παρακάτω:

  - **Incomplete**: η κατάσταση της σύνδεσής είναι άγνωστη, οπότε και θα πρέπει να επαληθευτεί με τους ανάλογους μηχανισμούς.
  - **Reachable**: η σύνδεση βρίσκεται σε λειτουργία, και η ανταλλαγή δεδομένων είναι εφικτή χωρίς πρόβλημα.
  - **Unreachable**: η σύνδεση δεν είναι δυνατή, οπότε και δεν δρομολογούνται δεδομένα μέσω αυτής. Εδώ το πρωτόκολλο δρομολόγησης θα πρέπει να λάβει υπόψιν την πληροφορία αυτή και να υπολογίσει, αν αυτό είναι εφικτό μια νέα διαδρομή την οποία θα πρέπει να ακολουθήσουν τα πακέτα δεδομένων.
  - **Stale**: η σύνδεση βρίσκεται σε λειτουργία, αλλά έχει παρέλθει αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα (καθοριζόμενο από τις απαιτήσεις μας ως προς την απόδοση) από την τελευταία επαλήθευση. Αυτό μπορεί να σημαίνει ότι θα πρέπει να εξακριβωθεί το αν συνεχίζει να βρίσκεται σε λειτουργία.

  - **Probe**: η κατάσταση της σύνδεσης εξακριβώνεται την στιγμή αυτή. Εδώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι πληροφορίες που υπάρχουν μέχρι τώρα για τη σύνδεση, ή σταματάει η δρομολόγηση των πακέτων δεδομένων μέχρι η κατάσταση να επανέλθει σε Reachable/Unreachable.

- **Πλήθος προσπαθειών επαλήθευσης που έχουν πραγματοποιηθεί**: στο σημείο αυτό διατηρείται το πλήθος των προσπαθειών που έχουν πραγματοποιηθεί για την εξαξρίβωση της κατάστασης μιας σύνδεσης I-SL. Συνήθως μετά από κάποιον αριθμό προσπαθειών χωρίς επιτυχία, η σύνδεση πρακτικά θεωρείται ότι δεν βρίσκεται σε λειτουργία.

4.7.2 Destination Cache

Πρόκειται για μια λίστα εγγραφών που περιέχει προορισμούς στους οποίους ο δορυφόρος έχει δρομολογήσει πρόσφατα πακέτα δεδομένων. Με τον τρόπο αυτό γνωρίζει ότι μπορεί να δρομολογήσει πακέτα δεδομένων για συγκεκριμένους προορισμούς χωρίς να συμβουλεύεται κάθε φορά τον αλγόριθμο δρομολόγησης.

4.7.3 Λίστα Γειτόνων

Πρόκειται για μια λίστα γειτονικών δορυφόρων στους οποίους μπορούν να σταλούν πακέτα δεδομένων την συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η λίστα αυτή περιέχει αναφορές στην Neighbor Cache. Ουσιαστικά παρέχει πληροφορίες σχετικά με το από ποιες συνδέσεις μπορούν να προωθηθούν πακέτα δεδομένων σε κάθε χρονική στιγμή. Η λίστα αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν ένα μέσο ελέγχου ροής δεδομένων, με την έννοια ότι συνδέσεις με υψηλή συμφόρηση congestion, αποκτούν μικρότερη προτεραιότητα, έτσι ώστε να αποφευχθεί η απώλεια πακέτων δεδομένων.

4.7.4 Αλγόριθμος ανίχνευσης διαθεσιμότητας (Network Unreachability Detection - N.U.D)

Είναι ένας μηχανισμός ο οποίος χρησιμοποιείται για την εξακρίβωση της κατάστασης μιας σύνδεσης με έναν γειτονικό δορυφόρο. Η λειτουργία αυτού του μηχανισμού μπορεί να επιφέρει την εκτέλεση διαφόρων ενεργειών από το δορυφόρο, όπως η έναρξη διαδικασιών επαναφοράς της σύνδεσης, σε περίπτωση απώλειάς της.

Εξακρίβωση Κατάστασης Σύνδεσης: Ένας γειτονικός δορυφόρος θεωρείται προσβάσιμος (reachable) αν ο κόμβος που θέλει να στείλει κάποιο πακέτο δεδομένων έχει επαληθεύσει πρόσφατα ότι τα πακέτα που δρομολογούνται μέσω αυτού του γείτονα έχουν ληφθεί. Σε περίπτωση που δεν υπάρχουν στοιχεία, ο δορυφόρος ενεργά στέλνει probes στον γειτονικό δορυφόρο για να εξακριβώσει την κατάσταση της σύνδεσης.

Ο NUD εργάζεται παράλληλα με τη διαδικασία δρομολόγησης πακέτων στους γείτονες. Αν δεν υπάρχουν δεδομένα προς δρομολόγηση μέσω ενός συγκεκριμένου γείτονα, δεν γίνονται προσπάθειες για την εξακρίβωση της κατάστασης της σύνδεσής του με αυτόν.

Ανταλλαγή Μηνυμάτων Όταν ένας δορυφόρος τοποθετείται σε τροχιά και αρχίζει την λειτουργία του σαν ένα ενεργό μέλος του σχηματισμού, αρχικοποιείται με ενδείξεις (hints) ως προς την κατάσταση των συνδέσεων του με τους γείτονες του από κάποιον επίγειο σταθμό. Στη συνέχειά όμως ο κάθε δορυφόρος θα πρέπει να είναι σε θέση να επαληθεύσει τις πληροφορίες αυτές έτσι ώστε να συνεχίσει να επικοινωνεί χωρίς πρόβλημα με τους γειτονικούς του δορυφόρους σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή της κίνησής του γύρω από τη Γη.

Βιβλιογραφία

[1] Eylem Ekici, Ian F. Akyildiz, Michael D. Bender, *A Distributed Routing Algorithm for Datagram Traffic in LEO Satellite Networks*, IEEE/ACM TRANSACTIONS ON NETWORKING, VOL. 9, NO. 2, APRIL 2001 pp. 137-147

[2] E. Ekici, I. F. Akyildiz, and M. D. Bender, *Datagram routing algorithm for LEO satellite networks*, in Proc. IEEE INFOCOM, vol. 2, Mar. 2000, pp. 500-508.

[3] M. W. Lo, *Satellite-constellation design*, Comput. Sci. Eng., vol. 1, no.1, pp. 58-67, Jan.-Feb. 1999.

[4] W. Dobosiewicz and P. Gburzynski, *A bounded-hop-count deflection scheme for Manhattan-street networks*, in Proc. IEEE INFOCOM, 1996, pp. 172-179.

[5] Network Working Group, *Neighbor Discovery for IP Version 6 (IPv6*, December 1998

[6] Network Working Group, *Ongoing TCP Research Related to Satellites*, February 2000

[7] Harald Keller and Horst Salzwedel, *H. Keller and H. Salzwedel. Link Strategy for the Mobile Satellite System Iridium.* Proceedings of the 1996 IEEE Vehicular Technology Conference, 1996.

[8] L. Wood and G. Pavlou and B. Evans, *Effects on TCP of routing strategies in satellite constellations*, IEEE Communications Magazine, special

issue on Satellite-Based Internet Technology and Services, vol. 39 no. 3, pp. 172-181, March 2001

[9] S. Pratt and R. Raines and C. Jr and M. Temple, *An Operational and Performance Overview of IRIDIUM Low Earth Orbit Satellite System*, IEEE Communications, 1999.

[10] C. Cheng and R. Riley and S. Kumar, *A Loop Free Extended Bellman-Ford Routing Protocol without Bouncing Effect*, 1989 ACM.

[11] S. Ramanathan and Martha Steenstrup, *A Survey of Routing Techniques for Mobile Communications Networks*, Mobile Networks and Applications, vol. 1, no. 2, pp. 89-104, 1996.

[12] The Radio Amateur Satellite Corporation(AMSAT), *A tutorial on Keplerian Elements*, http://www.amsat.org/amsat/keps/kepmodel.html

[13] R. Jain and A. Puri and R. Sengupta, *Geographical routing using partial information for wireless ad hoc networks*, IEEE Personal Communications , Volume: 8 Issue: 1 , pp 48-57, Feb. 2001

[14] M.W. Lo, *Satellite-constellation design*, Computing in Science & Engineering, vol 1, issue 1, pp 58-67, Jan.-Feb. 1999.

[15] T. Henderson, *Networking over Next-Generation Satellite Systems*, Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley, 1999.

[16] Y. Hashimoto and B. Sarikaya, *Design of IP-based Routing in a LEO Satellite Network*, Proceedings of Third International Workshop on Satellite-Based nformation Services (WOSBIS '98), pages 81–88, 1998

[17] Hong Seong Chang and Byoung Wan Kim and Chang Gun Lee and Yanghee Choi and Sang Lyul Min and Hyun Suk Yang and Chong Sang Kim, *Topological design and routing for low-Earth orbit satellite networks*, Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), vol 1, pp 529 -535, 1995

[18] Peter T.S. Tam, *LEO Mesh Routing*, CUHK CSE, 1999.

[19] Huseyin Uzunalioglu and Wei Yen and Ian F. Akyildiz, *A Connection Handover Protocol for LEO Satellite ATM Networks*, in proceedings of Mobile Computing and Networking (MOBICOM), pp 204-214, 1997

[20] Kuang Tsai and Richard P. Ma, *Darting: A cost effective routing alternative for large space-based dynamic-topology networks*, The Aerospace Corporation, 1995