



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

**Σχεδίαση βέλτιστων αλγορίθμων πολυδιαδρομικής
δρομολόγησης δεδομένων για το διαπλανητικό διαδίκτυο με
χρήση μοντέλων πολλαπλής ώρας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αντώνιος Δ. Μιχαλολιάκος

Επιβλέπων : Παναγιώτης Γ. Κωττής
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2009



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Σχεδίαση βέλτιστων αλγορίθμων πολυδιαδρομικής
δρομολόγησης δεδομένων για το διαπλανητικό διαδίκτυο με
χρήση μοντέλων πολλαπλής ώρας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αντώνιος Δ. Μιχαλολιάκος

Επιβλέπων : Παναγιώτης Γ. Κωττής
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

.....
Π. Κωττής

Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Χ. Καγάλης

Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Γ. Φικιώρης

Επίκουρος καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2009

.....

Αντώνιος Δ. Μιχαλολιάκος

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

Copyright © Αντώνιος Μιχαλολιάκος, 2009.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η ανάπτυξη και προσομοίωση αλγορίθμων δρομολόγησης δεδομένων για το Διαπλανητικό Διαδίκτυο. Οι αλγόριθμοι που θα αναπτυχθούν υλοποιούν πολυδιαδρομική δρομολόγηση και βασίζονται σε μοντέλα πολλαπλής ώρας.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη παρουσίαση της τεχνολογίας του επίγειου Διαδικτύου και των προϋποθέσεων λειτουργίας του. Στη συνέχεια εντοπίζοντας τις ιδιαιτερότητες του Διαπλανητικού περιβάλλοντος επισημαίνεται η αδυναμία χρήσης των πρωτοκόλλων μεταφοράς του Διαδικτύου σε Διαπλανητικές αποστάσεις. Παρουσιάζεται η ανεκτική στην καθυστέρηση αρχιτεκτονική δικτύωσης (delay – tolerant networking) η οποία βασίζεται σε μεταγωγή μηνυμάτων με αποθήκευση και προώθηση (store and forward) και αντικαθιστά τα πρωτόκολλα επίγειου Διαδικτύου. Τέλος σκιαγραφείται ένα υποθετικό διαπλανητικό δίκτυο Γης- Σελήνης (με σταθμό βάσης στην Αθήνα) το οποίο και θα αποτελέσει τη βάση για την περαιτέρω ανάλυση και τις προσομοιώσεις.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται διεξοδικά στην αρχιτεκτονική του Διαπλανητικού δικτύου Γης- Σελήνης. Αρχικά παρουσιάζονται τα δομικά στοιχεία του: σταθμός βάσης, γεωστατικοί δορυφόροι και Σελήνη. Στη συνέχεια παρουσιάζονται στοιχεία και προβλέψεις για τη χωρητικότητα των δορυφόρων που οδηγούν στο συμπέρασμα ότι είναι πολύ περιορισμένη και την ανάγκη για βέλτιστη χρησιμοποίησή της για την παροχή ποιότητας υπηρεσιών (QoS). Ως τρόπος επιλογής βέλτιστης διαδρομής αρχικά εξετάζεται η χρήση ελάχιστης διαδρομής που κρίνεται ανεπαρκής λόγω περιορισμένης χωρητικότητας και ενέργειας των δορυφόρων. Η διαπίστωση ότι οι ώρες αιχμής των χωρών της Ευρώπης δεν συμπίπτουν λόγω της διαφοράς ώρας μεταξύ τους ωθεί στη χρήση αλγορίθμων που εκμεταλλεύονται αυτό το γεγονός, δηλ. αλγόριθμοι πολλαπλής ώρας. Τέλος παρουσιάζεται ένα μοντέλο παγκόσμιας δορυφορικής ζήτησης που προσαρμόζεται στα δεδομένα του θέματος.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται εκτενώς τα μοντέλα σχεδίασης δικτύων πολλαπλής ώρας και πολλαπλής περιόδου τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στο Διαπλανητικό Δίκτυο. Τα μοντέλα αυτά αφορούν κάθε είδος μεταφορικού δικτύου και έχουν ήδη εφαρμοστεί σε τηλεφωνικά δίκτυα και δίκτυα ATM.

Τέλος στο τέταρτο κεφάλαιο, προσαρμόζουμε τα μοντέλα πολλαπλής ώρας και πολλαπλής περιόδου που παρουσιάστηκαν στο τρίτο κεφάλαιο στα δεδομένα του υποθετικού Διαπλανητικού Δικτύου που είναι προς εξέταση. Την παρουσίαση των μοντέλων ακολουθεί αναλυτική κατανομημένη λύση με χρήση μεθόδων γραμμικού προγραμματισμού (lagrangian relaxation).

Η διπλωματική ολοκληρώνεται με παρουσίαση των αποτελεσμάτων, συμπεράσματα αλλά και προτάσεις για μελλοντικές επεκτάσεις και εφαρμογές του θέματος.

Λέξεις-κλειδιά: Διαπλανητικό Διαδίκτυο, δίκτυα ανεκτά στην καθυστέρηση, αλγόριθμοι πολυδιαδρομικής δρομολόγησης, μοντέλα πολλαπλής ώρας, μοντέλα πολλαπλής περιόδου, Λαγκρανζιανή χαλάρωση, γραμμικός προγραμματισμός.

Abstract

The aim of this thesis is the development and simulation of the performance of routing algorithms for the upcoming Interplanetary Internet. The developed algorithms realize multipath routing based on multi-time models.

In the first chapter we briefly present the technology and the operation assumptions of the earth-based Internet. Next, after pointing out the special conditions of the interplanetary environment, we conclude that standard Internet protocols aren't capable if realizing interplanetary routing. Furthermore we present a delay tolerant networking (DTN) architecture based on store-and-forward message switching technology that replaces standard Internet protocols. Finally we sketch a hypothetical interplanetary network between Earth and the Moon (with a base station in Athens), which will be the starting point of our analysis and simulations.

The second chapter refers to the architecture of the interplanetary network between Earth and the Moon. Firstly we present the structural elements of the network: base station, geostationary satellites and the Moon. Afterwards we present facts and forecasts related to the capacity of satellites and we jump to the conclusion that satellite capacity is scarce and should be utilised optimally to retain quality of service (QoS). As a mean of optimal path selection we consider firstly the shortest path, which proves itself insufficient due to scarce capacity and resources of satellites. The fact that due to different time zones the busy hours of each country don't coincide motivates us to use algorithms that exploit this fact, i.e. multi time algorithms. Finally we present a global traffic model which is tailored to our needs.

In the third chapter we analyse at a great length multi hour and multi period design models. These models fit to all traffic networks and have been applied in telephone and ATM networks.

Finally in the fourth chapter the previously presented multi hour and multi period models are tailored to fit our hypothetical Earth –Moon Interplanetary network. This is followed by an analytic distributed solution by means of linear programming (Lagrangian Relaxation).

This thesis concludes by presenting the results, conclusions and also future extensions and applications of these models.

Key words: Interplanetary Internet, delay tolerant networks, multipath routing algorithms, multi hour models, multi period models, Lagrangian relaxation, linear programming.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά τον καθηγητή μου κ. Παναγιώτη Κωττή για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου αυτή τη διπλωματική αλλά και την προθυμία του να με καθοδηγήσει όποτε αυτό χρειάστηκε.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω το Διδάκτορα Μάρκο Αναστασόπουλο για την επιστημονική καθοδήγηση αλλά και την ηθική υποστήριξη καθ'όλη τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της διπλωματικής.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου, τους γονείς μου και τον αδερφό μου, που με στήριξαν όλα τα χρόνια της φοίτησής μου στο Πολυτεχνείο και χωρίς αυτούς δεν θα είχα φτάσει ποτέ εδώ.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	6
Abstract	8
Ευχαριστίες.....	10
Περιεχόμενα	11
Ευρετήριο Σχημάτων.....	13
Ευρετήριο Πινάκων.....	15
Εισαγωγή.....	16
Κεφάλαιο 1: Διαπλανητικό Διαδίκτυο	18
1.1. Το Διαδίκτυο σήμερα.....	18
1.2. Ανάπτυξη ασύρματων δικτύων έξω από το Διαδίκτυο.....	20
1.3. Το λειτουργικό περιβάλλον του IPN.....	21
1.4. Αρχιτεκτονική ανεκτική στην καθυστέρηση	27
1.5. Διαπλανητικό Δίκτυο Γης-Σελήνης	32
Κεφάλαιο 2: Ανάλυση Διαπλανητικού Δικτύου Γης- Σελήνης	35
2.1. Τοπολογία δικτύου Γης-Σελήνης.....	35
2.1.1. Επίγειοι σταθμοί βάσης	35
2.1.2. Δορυφόροι	36
2.1.3. Σελήνη	39
2.2. Χωρητικότητα δορυφόρων	40
2.3. Επιλογή δορυφόρου	44
2.3.1. Βέλτιστη διαδρομή	44
2.3.2. Μοντέλο κίνησης και διαφορά ώρας.....	45
2.4. Παραρτήματα	49
Παράρτημα 2.4.1: Γεωσύγχρονοι και γεωστατικοί δορυφόροι.....	49
Παράρτημα 2.4.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά γεωστατικών δορυφόρων	51

Παράρτημα 2.4.3: Ισοζύγιο ισχύος (Link-budget Analysis).....	54
Κεφάλαιο 3: Σχεδίαση και μοντελοποίηση δικτύων πολλαπλής-ώρας και πολλαπλής-περιόδου	56
3.1. Σχεδίαση πολλαπλής-ώρας	57
3.1.1. Απεικόνιση μοντελοποίησης προβλημάτων πολλαπλής ώρας.....	58
3.1.2. Μοντέλα διαστασιολόγησης πολλαπλής ώρας.....	61
3.1.3. Πολλαπλές υπηρεσίες.....	66
3.1.4. Αλγοριθμική προσέγγιση.....	68
3.1.5. Δρομολόγηση πολλαπλής-ώρας σε δίκτυο δεδομένης χωρητικότητας	71
3.2. Σχεδίαση πολλαπλής-περιόδου	75
3.2.1. Προγραμματισμός χωρητικότητας (Capacity Planning)	75
3.2.2. Δρομολόγησης ροής σε προβλήματα πολλαπλής περιόδου	82
3.3. Παραρτήματα	87
Παράρτημα 3.3.1: Προβλήματα διαστασιολόγησης	87
Κεφάλαιο 4: Προσομοιώσεις και αριθμητικά αποτελέσματα	93
4.1. Διατύπωση του προβλήματος	93
4.2. Επίλυση με Lagrangian Relaxation based Dual Approach	95
4.3. Αποτελέσματα.....	98
4.4. Συμπεράσματα	100
Βιβλιογραφία	101

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1-1: Το διαδίκτυο σήμερα.	19
Σχήμα 1-2: Μεταγωγή πακέτου.....	20
Σχήμα 1-3: Ασύρματα δίκτυα έξω από το Διαδίκτυο.	21
Σχήμα 1-4: Καθυστέρηση απλής μετάβασης πακέτου σε διάφορους προορισμούς.	22
Σχήμα 1-5: Χαρακτηριστικά λειτουργικού περιβάλλοντος του Διαπλανητικού Διαδικτύου.	24
Σχήμα 1-6: Η τοπολογία ενός DTN δικτύου.....	28
Σχήμα 1-7: Store-and-forward λειτουργία στη μεταγωγή μηνυμάτων.....	29
Σχήμα 1-8: Επικοινωνία μεταξύ κατά διαστήματα συνδεδεμένων κόμβων σε DTN δίκτυο.	30
Σχήμα 1-9: Επικοινωνία κατά τη διάρκεια καιροσκοπικής επαφής.....	31
Σχήμα 1-10: Οι προγραμματισμένες επαφές εμπλέκουν και αποστολή μηνυμάτων χωρίς οπτική επαφή.	32
Σχήμα 1-11: Τοπολογία δικτύου σταθμού βάσης δορυφόρων.	33
Σχήμα 1-12: Επικοινωνία Γης-Άρη με χρήση της Σελήνης ως ενδιάμεσο κόμβο.	34
Σχήμα 2-1: Διαπλανητικός σταθμός βάσης Αθήνας και οι γεωστατικοί δορυφόροι που τον εξυπηρετούν.	36
Σχήμα 2-2: Οι γεωστατικοί δορυφόροι του διαπλανητικού δικτύου.	37
Σχήμα 2-3: Γη και Σελήνη. Ακτίνες, απόσταση, κλίση τροχιάς.....	39
Σχήμα 2-4: Τοπολογία διαπλανητικού δικτύου και πιθανές διαδρομές των δεδομένων.....	40
Σχήμα 2-5: Πρόβλεψη για τις απαιτήσεις σε αναμεταδότες εύρους ζώνης 36 MHz για την εξυπηρέτηση των αναγκών φωνής, βίντεο και δεδομένων από το 2006 έως το 2015.....	42
Σχήμα 2-6: Προβλέψεις για την προσφορά και τη ζήτηση χωρητικότητας δορυφορικών δικτύων από το 2006 – 2015.	43
Σχήμα 2-7: Ζώνες ώρας Ευρώπης και Ανατολικής Ασίας.....	45
Σχήμα 2-8: Παγκόσμια κατανομή 1000000 συνδρομητών δορυφορικών υπηρεσιών στις 6 ηπείρους.....	46

Σχήμα 2-9: Ένταση δορυφορικής κίνησης για το 2005 [16].	47
Σχήμα 2-10: Κανονικοποιημένη ημερήσια δραστηριότητα για τις χώρες της Ευρώπης.	48
Σχήμα A-1: Ίχνος δορυφόρου.	49
Σχήμα B-1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά γεωστατικού δορυφόρου.	52
Σχήμα B-2: Ίχνος δορυφόρου – αζιμούθιο.	53
Σχήμα 3-11: Α) Δίκτυο τριών κόμβων. Β) Οι πιθανές διαδρομές (paths) για το δίκτυο 3 κόμβων.	58
Σχήμα 3-2: Μη-διακλαδιζόμενη λύση για τρεις κόμβους.	60
Σχήμα 3-3: Φορτίο ανά ζευγάρι επιλεγμένων πόλεων. Μεταβολή της κίνησης για ένα επιλεγμένο σύνολο ζευγών πόλεων κατά τη διάρκεια μιας μέρας για ένα δίκτυο που εκτείνεται στις Ηπειρωτικές ΗΠΑ (ώρα σε Ανατολική Ζώνη ώρας στις ΗΠΑ).	63
Σχήμα 3-4: Παράδειγμα δικτύου τεσσάρων κόμβων.	88
Σχήμα 3-5: Παράδειγμα δικτύου τεσσάρων κόμβων: Κόστη ζεύξης, όγκοι ζήτησης και διαδρομές.	89
Σχήμα 4-1: Το δίκτυο Γης-Σελήνης.	98
Σχήμα 4-2: Επιλογή διαδρομής για ώρα αιχμής Αθήνας.	99
Σχήμα 4-3: Ταχύτητα σύγκλισης. Δυικοί πολλαπλασιαστές και αριθμός επαναλήψεων.	99
Σχήμα 4-4: Ταχύτητα σύγκλισης. Μέγεθος βήματος συναρτήσει αριθμού επαναλήψεων.	100

Ευρετήριο Πινάκων

<i>Πίνακας 2-1: Χαρακτηριστικά γεωστατικών δορυφόρων.....</i>	<i>38</i>
<i>Πίνακας 2-2: Τεχνικά χαρακτηριστικά γεωστατικών δορυφόρων.....</i>	<i>41</i>
<i>Πίνακας 2-3: Επίπεδα έντασης κίνησης και αντιστοιχία σε εκατ. λεπτά/χρόνο για το 2005 [16].....</i>	<i>47</i>
<i>Πίνακας 3-1: Δεδομένα για το πρόβλημα σχεδίασης τριών ωρών (Δίκτυο τριών κόμβων)</i>	<i>59</i>
<i>Πίνακας 3-2: Λύση για δίκτυο τριών κόμβων: όγκος ζήτησης πολλαπλής ώρας (πλήρως αναδιατάξιμη).....</i>	<i>60</i>
<i>Πίνακας 3-3: Σύγκριση μοντέλων πολλαπλής-ώρας</i>	<i>65</i>
<i>Πίνακας 3-4: Συντελεστές ζεύξης-διαδρομής για το παράδειγμα των τεσσάρων κόμβων.</i>	<i>91</i>

Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η ανάπτυξη και προσομοίωση αλγορίθμων δρομολόγησης δεδομένων για το Διαπλανητικό Διαδίκτυο. Οι αλγόριθμοι που θα αναπτυχθούν υλοποιούν πολύ-διαδρομική δρομολόγηση και βασίζονται σε μοντέλα πολλαπλής ώρας.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται σύντομη παρουσίαση της τεχνολογίας του επίγειου Διαδικτύου και των προϋποθέσεων λειτουργίας του. Στη συνέχεια, εντοπίζοντας τις ιδιαιτερότητες του Διαπλανητικού περιβάλλοντος, επισημαίνεται η αδυναμία χρήσης των πρωτοκόλλων μεταφοράς του Διαδικτύου σε Διαπλανητικές αποστάσεις. Παρουσιάζεται η ανεκτική στην καθυστέρηση αρχιτεκτονική δικτύωσης (delay – tolerant networking) η οποία βασίζεται σε μεταγωγή μηνυμάτων με αποθήκευση και προώθηση (store and forward) και αντικαθιστά τα πρωτόκολλα επίγειου Διαδικτύου. Τέλος, σκιαγραφείται ένα υποθετικό διαπλανητικό δίκτυο Γης– Σελήνης (με σταθμό βάσης στην Αθήνα) το οποίο και θα αποτελέσει τη βάση για την περαιτέρω ανάλυση και τις προσομοιώσεις.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται διεξοδικά στην αρχιτεκτονική του Διαπλανητικού δικτύου Γης- Σελήνης. Αρχικά παρουσιάζονται τα δομικά στοιχεία του: σταθμός βάσης, γεωστατικοί δορυφόροι και Σελήνη. Στη συνέχεια παρουσιάζονται στοιχεία και προβλέψεις για τη χωρητικότητα των δορυφόρων που οδηγούν στο συμπέρασμα ότι είναι πολύ περιορισμένη και την ανάγκη για βέλτιστη χρησιμοποίησή της για την παροχή ποιότητας υπηρεσιών (QoS). Ως τρόπος επιλογής βέλτιστης διαδρομής αρχικά εξετάζεται η χρήση ελάχιστης διαδρομής που κρίνεται ανεπαρκής λόγω περιορισμένης χωρητικότητας και ενέργειας των δορυφόρων. Η διαπίστωση ότι οι ώρες αιχμής των χωρών της Ευρώπης δεν συμπίπτουν λόγω της διαφοράς ώρας μεταξύ τους ωθεί στη χρήση αλγορίθμων που εκμεταλλεύονται αυτό το γεγονός, δηλ. αλγόριθμοι πολλαπλής ώρας. Τέλος, παρουσιάζεται ένα μοντέλο παγκόσμιας δορυφορικής ζήτησης που προσαρμόζεται στα δεδομένα του θέματος.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται εκτενώς τα μοντέλα σχεδίασης δικτύων πολλαπλής ώρας και πολλαπλής περιόδου τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στο Διαπλανητικό Δίκτυο. Τα μοντέλα αυτά αφορούν κάθε είδος δικτύου μεταφοράς δεδομένων και έχουν ήδη εφαρμοστεί σε τηλεφωνικά δίκτυα και δίκτυα ATM.

Τέλος στο τέταρτο κεφάλαιο, τα μοντέλα πολλαπλής ώρας και πολλαπλής περιόδου που παρουσιάστηκαν στο τρίτο κεφάλαιο προσαρμόζονται στα δεδομένα του υποθετικού Διαπλανητικού Δικτύου που είναι προς εξέταση. Την παρουσίαση των μοντέλων ακολουθεί αναλυτική κατανεμημένη λύση με χρήση μεθόδων γραμμικού προγραμματισμού (lagrangian relaxation).

Η διπλωματική ολοκληρώνεται με παρουσίαση των αποτελεσμάτων, συμπεράσματα αλλά και προτάσεις για μελλοντικές επεκτάσεις και εφαρμογές του θέματος.

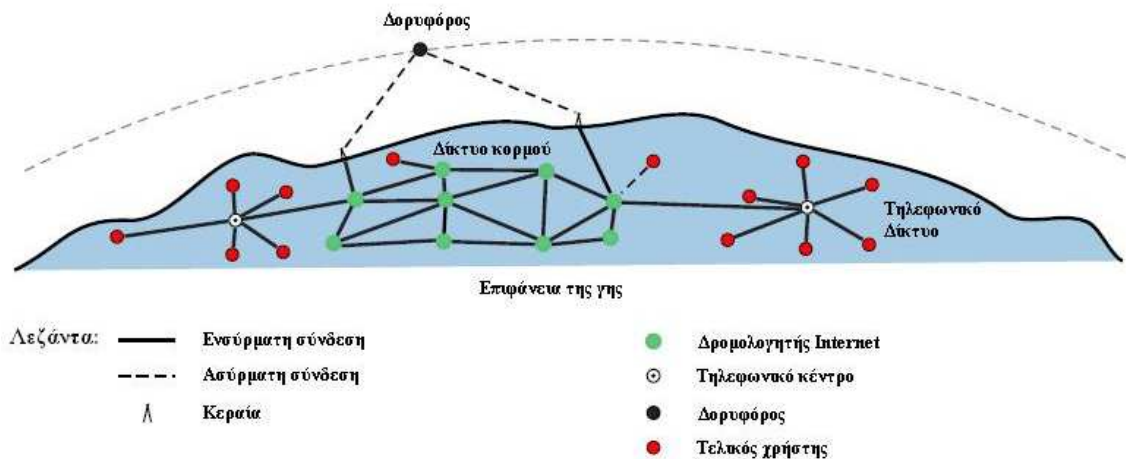
Κεφάλαιο 1: Διαπλανητικό Διαδίκτυο

Πριν είκοσι χρόνια λίγοι άνθρωποι είχαν ακούσει για το Διαδίκτυο. Ακόμα και πριν 15 χρόνια αντιμετωπιζόταν από πολλούς ως τεχνολογική περιέργεια - κάποιoi το θεωρούσαν μια μόδα που θα περνούσε. Σήμερα, η αποκαλούμενη " dot com" οικονομία κλείνει συμφωνίες πολλών εκατομμυρίων δολαρίων σε καθημερινή βάση. Σε δέκα χρόνια από τώρα το Διαδίκτυο θα μπορούσε να είναι ένας μηχανισμός που θα έχει επεκταθεί πέρα από τη γη για να διαμορφώσει ένα διαπλανητικό δίκτυο Διαδικτύων που θα φθάνει στον Άρη και ακόμα παραπέρα. Αυτός είναι ο στόχος του Διαπλανητικού Διαδικτύου (IPN-InterPlanetary Internet).

1.1. Το Διαδίκτυο σήμερα

Το Διαδίκτυο σήμερα παρουσιάζει μεγάλη επιτυχία στη διασύνδεση συσκευών επικοινωνίας σε όλη την υδρόγειο. Αυτό έχει επιτευχθεί με τη χρήση ενός ομοιογενούς συνόλου πρωτοκόλλων επικοινωνίας, της ακολουθίας πρωτοκόλλων TCP/IP (TCP/IP protocol suite) [1]. Όλες οι συσκευές στις εκατοντάδες χιλιάδες των υποδικτύων που αποτελούν το Διαδίκτυο χρησιμοποιούν αυτά τα πρωτόκολλα για τη δρομολόγηση των δεδομένων και τη διασφάλιση αξιόπιστης ανταλλαγής μηνυμάτων.

Η συνδεσιμότητα στο διαδίκτυο στηρίζεται κατά κύριο λόγο στις ενσύρματες ζεύξεις, συμπεριλαμβανομένου και του καλωδιακού τηλεφωνικού δικτύου, αν και οι νέες ασύρματες τεχνολογίες όπως είναι οι κινητές και δορυφορικές ζεύξεις έχουν αρχίσει να αξιοποιούνται ευρέως (Σχήμα 1-1). Αυτές οι ζεύξεις είναι συνεχώς συνδεδεμένες σε από-άκρο-σε-άκρο διαδρομές χαμηλής καθυστέρησης μεταξύ πηγών και προορισμών. Έχουν χαμηλά ποσοστά λάθους και σχετικά συμμετρικούς αμφίδρομους ρυθμούς μετάδοσης.



Σχήμα 1-1: Το διαδίκτυο σήμερα.

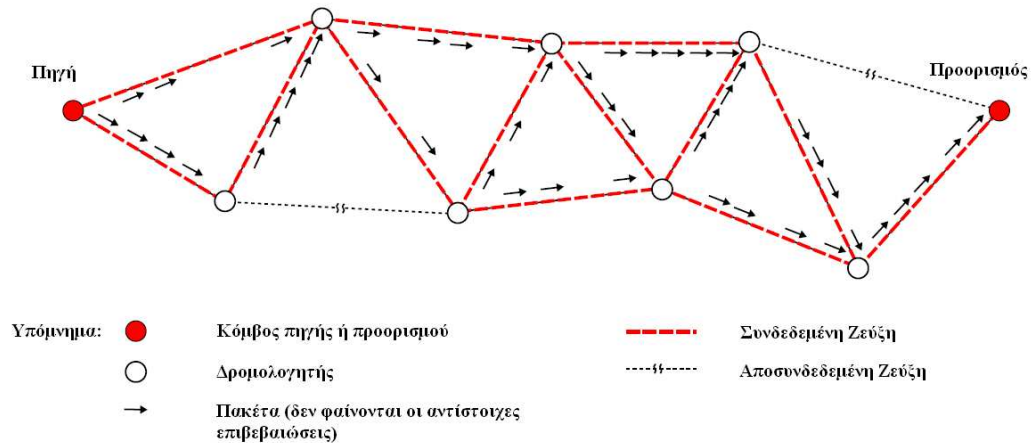
Η επικοινωνία στο Διαδίκτυο βασίζεται στη *μεταγωγή πακέτου* [1]. Τα πακέτα είναι τμήματα ενός ολοκληρωμένου συνόλου δεδομένων του χρήστη (πχ., τμήματα ενός ηλεκτρονικού μηνύματος ή μιας ιστοσελίδας) που μεταδίδονται ανεξάρτητα από την πηγή προς το προορισμό μέσω ενός δίκτυο ζεύξεων που ενώνονται με δρομολογητές. Η πηγή, ο προορισμός, και οι δρομολογητές ονομάζονται συλλογικά *κόμβοι*.

Κάθε πακέτο που απαρτίζει ένα μήνυμα μπορεί να ακολουθήσει διαφορετική διαδρομή μέσα στο δίκτυο. Αν μια ζεύξη αποσυνδεθεί, τα πακέτα ακολουθούν άλλη διαδρομή. Τα πακέτα περιέχουν δεδομένα της εφαρμογής (το τμήμα του ωφέλιμου φορτίου-payload part) και μια επικεφαλίδα (το τμήμα του ελέγχου). Η επικεφαλίδα περιέχει την διεύθυνση προορισμού και άλλες πληροφορίες που καθορίζουν το πώς θα *δρομολογηθεί* το πακέτο από κόμβο σε κόμβο. Τα πακέτα ενός συγκεκριμένου μηνύματος μπορούν να καταφθάσουν εκτός σειράς, αλλά ο μηχανισμός μεταφοράς του προορισμού (tcp πρωτόκολλο) τα συναρμολογεί με τη σωστή σειρά.

Η δυνατότητα χρησιμοποίησης του Διαδικτύου εξαρτάται από ορισμένες σημαντικές παραδοχές [2]:

- *Συνεχής, αμφίδρομη, από-άκρο-σε-άκρο διαδρομή*: Μια συνεχώς διαθέσιμη αμφίδρομη σύνδεση μεταξύ πηγής και προορισμού για να υποστηρίξει την από-άκρο-σε-άκρο αλληλεπίδραση.
- *Σύντομοι μετ'επιστροφής χρόνοι (Round Trip Times)*: Μικρές και σχετικά προβλέψιμες καθυστερήσεις κατά την αποστολή των δεδομενογραμμάτων (data grams) και τη λήψη των αντίστοιχων πακέτων επιβεβαίωσης.

- *Συμμετρικοί ρυθμοί μετάδοσης:* Σχετικά σύμφωνοι ρυθμοί μετάδοσης και προς τις δύο κατευθύνσεις μεταξύ πηγής και προορισμού.
- *Μικροί ρυθμοί σφαλμάτων:* Σχετικά μικρή απώλεια ή αλλοίωση των δεδομένων σε κάθε ζεύξη.



Σχήμα 1-2: Μεταγωγή πακέτου.

1.2. Ανάπτυξη ασύρματων δικτύων έξω από το Διαδίκτυο

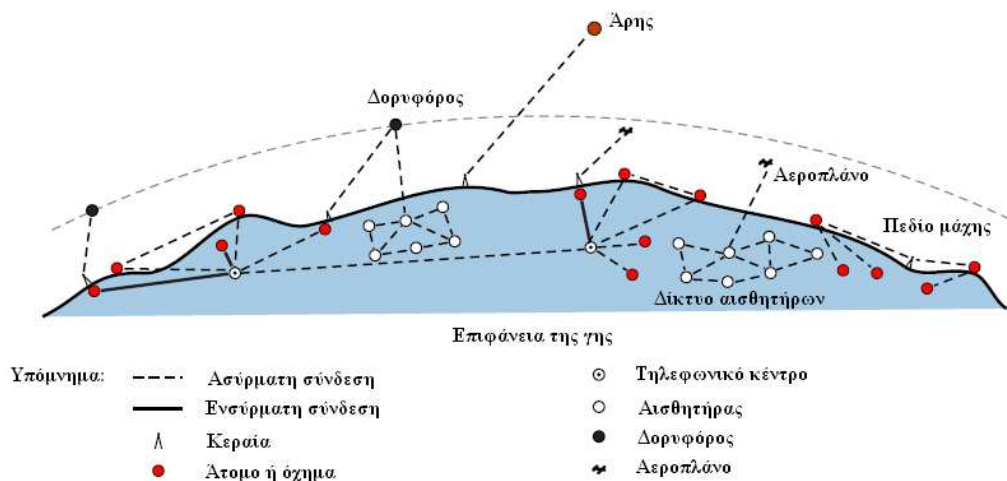
Η επικοινωνία έξω από Διαδίκτυο -όπου αναπτύσσονται οι περιορισμένης ισχύος ασύρματες κινητές, δορυφορικές, και διαπλανητικές επικοινωνίες- επιτυγχάνεται με ανεξάρτητα δίκτυα, καθένα από τα οποία υποστηρίζει εξειδικευμένες επικοινωνιακές απαιτήσεις. Αυτά τα δίκτυα δεν χρησιμοποιούν τα πρωτόκολλα του Διαδικτύου και είναι αμοιβαία ασύμβατα-κάθε ένα είναι καλό στη διαβίβαση μηνυμάτων μέσα στο δίκτυό του αλλά όχι ικανό να ανταλλάξει μηνύματα με άλλα δίκτυα.

Κάθε δίκτυο προσαρμόζεται σε συγκεκριμένη περιοχή επικοινωνίας, όπου τα χαρακτηριστικά επικοινωνίας είναι σχετικά ομοιογενή. Τα όρια μεταξύ των περιοχών καθορίζονται από παράγοντες όπως η καθυστέρηση των ζεύξεων, η συνδεσιμότητα των ζεύξεων, η ασυμμετρία των ρυθμών μετάδοσης, τα ποσοστά λάθους, οι μηχανισμοί διευθυνσιοδότησης και αξιοπιστίας, οι παροχές ποιότητας υπηρεσιών, και τα όρια εμπιστοσύνης. Σε αντίθεση με το Διαδίκτυο, τα ασύρματα αυτά δίκτυα υποστηρίζουν μεγάλες και ευμετάβλητες καθυστερήσεις, αυθαίρετα μεγάλες περιόδους αποσύνδεσης ζεύξεων, υψηλά ποσοστά λάθους, και μεγάλες ασυμμετρίες στους αμφίδρομους ρυθμούς μετάδοσης.

Παραδείγματα ασύρματων δικτύων έξω από το Διαδίκτυο είναι (Σχήμα 1-3):

- Επίγεια πολιτικά δίκτυα που συνδέουν τις κινητές ασύρματες συσκευές, συμπεριλαμβανομένων προσωπικών συσκευών επικοινωνίας, ευφών αυτοκινητόδρομων και απομακρυσμένων φυλακίων.
- Ασύρματα στρατιωτικά δίκτυα στο πεδίο της μάχης που συνδέουν τα στρατεύματα, τα αεροσκάφη, τους δορυφόρους, και τους αισθητήρες (στο έδαφος ή στο νερό).
- Δίκτυα στο μακρινό διάστημα, όπως το πρόγραμμα του διαπλανητικού Διαδικτύου (IPN).

Η δρομολόγηση μεταξύ δύο διαφορετικών περιοχών δικτύου απαιτεί τη μεσολάβηση ενός κόμβου που μπορεί να μεταφράζει τα ασύμβατα δικτυακά χαρακτηριστικά και να ενεργεί ως απομονωτής (buffer) για τις ασυσχέτιστες καθυστερήσεις μεταξύ των δικτύων.

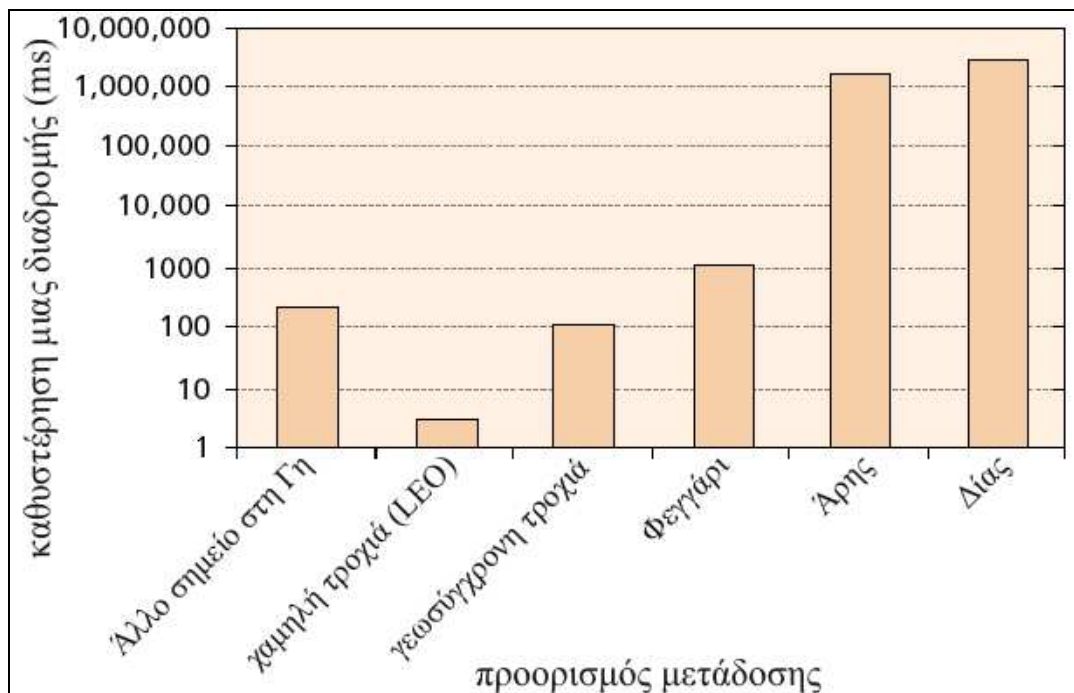


Σχήμα 1-3: Ασύρματα δίκτυα έξω από το Διαδίκτυο.

1.3. Το λειτουργικό περιβάλλον του IPN

Υπάρχει ένα πλήθος θεμελιωδών διαφορών μεταξύ του περιβάλλοντος των επίγειων τηλεπικοινωνιών και αυτού του διαπλανητικού Διαδικτύου. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αυτές οι διαφορές περιλαμβάνουν καθυστέρηση, χαμηλό και ασύμμετρο εύρος ζώνης, διακοπτόμενη συνδεσιμότητα και σχετικά υψηλό ρυθμό σφαλμάτων bit. Λαμβάνοντας αυτά υπόψη επηρεάζεται το μοντέλο επικοινωνίας στο σύνολό του, μετατοπίζοντάς το από το «τηλεφωνικό» μοντέλο που εφαρμόζεται στο σημερινό

Διαδίκτυο στο «ταχυδρομικό» (ή αλλιώς «Rony Express») μοντέλο [3]. Στη συνέχεια θα περιγραφούν οι περιβαλλοντικές διαφορές μεταξύ επίγειων τηλεπικοινωνιών και του IPN και θα δοθεί μια σύντομη εξήγηση για την ακαταλληλότητα του κλασσικού διαδικτυακού πρωτοκόλλου για αξιόπιστη μεταφορά, TCP (transmission control protocol), για από-άκροσε-άκρο επικοινωνίες στο IPN.

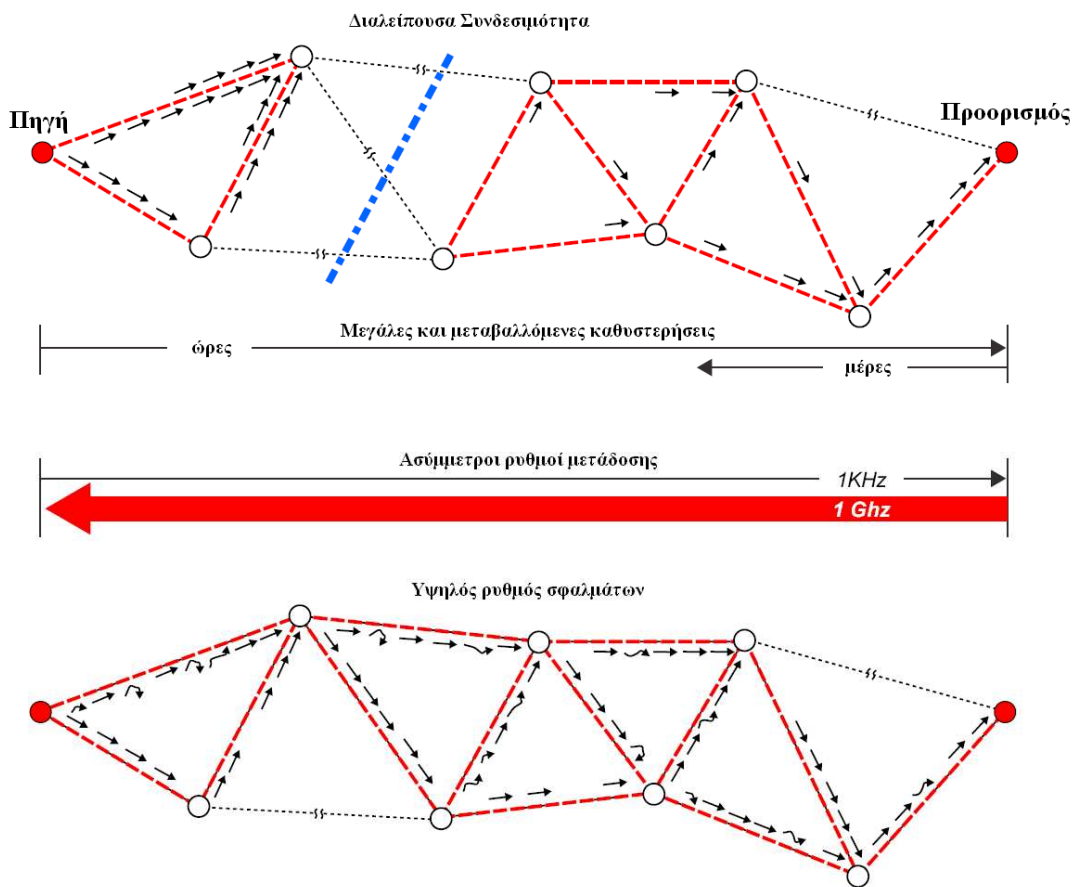


Σχήμα 1-4: Καθυστέρηση απλής μετάβασης πακέτου σε διάφορους προορισμούς.

Η εμφανέστερη διαφορά μεταξύ επικοινωνίας σημείων πάνω στη Γη και επικοινωνίας πλανητών είναι η καθυστέρηση (Σχήμα 1-4) [4]. Ενώ οι χρόνοι RTT στο επίγειο Διαδίκτυο κυμαίνονται από χιλιοστά του δευτερολέπτου μέχρι μερικά δευτερόλεπτα, οι χρόνοι αυτοί για τον Άρη κυμαίνονται από 8 μέχρι 40 λεπτά, ανάλογα με τη θέση του πλανήτη, και για την Ευρώπη (δορυφόρο του Δια) από 66 μέχρι 100 λεπτά. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι χρόνοι αυτοί για γεωστατικούς δορυφόρους είναι περίπου 0.24 δευτερόλεπτα ενώ για τη σελήνη 2,6 δευτερόλεπτα. Επιπλέον, η επικοινωνία σε διαπλανητικές αποστάσεις απαιτεί ειδικό εξοπλισμό (μεγάλες κεραιές, δέκτες υψηλών επιδόσεων, κλπ). Για τις περισσότερες διαστημικές αποστολές, ακόμα και αυτές που δεν είναι της NASA, ο εξοπλισμός αυτός παρέχεται από το Δίκτυο Μακρινού Διαστήματος της NASA (Deep Space Network-DSN). Οι επικοινωνιακοί πόροι του DSN είναι προς το παρών ανεπαρκείς (oversubscribed), και πιθανότατα και στο μέλλον. Αν και έχουν γίνει μελέτες

για τη δυνατότητα αναβάθμισης ή και αντικατάστασης του υπάρχοντος DSN, ο αριθμός των διαστημικών αποστολών θα συνεχίσει, από ό,τι φαίνεται, να αυξάνεται ταχύτερα από την επίγεια υποδομή που απαιτείται για την υποστήριξή τους, καθιστώντας την εξάντληση των πόρων διαρκές πρόβλημα.

Αυτή η υπερκάλυψη των πόρων σημαίνει ότι οι χρόνοι RTT που υφίστανται τα πακέτα δεν επηρεάζονται μόνο από την καθυστέρηση κατά τη διάδοση, αλλά και από τις καθυστερήσεις του χρονοπρογραμματισμού (scheduling) και των ουρών αναμονής που υπαγορεύονται από την έλλειψη πόρων στη Γη. Έτσι τα πακέτα για ένα συγκεκριμένο προορισμό μπορεί να τοποθετηθούν σε μια ουρά αναμονής μέχρι την επόμενη προγραμματισμένη περίοδο επικοινωνίας, η οποία μπορεί χρονικά να απέχει ώρες, ημέρες ή ακόμα και εβδομάδες. Αν και οι χρόνοι αναμονής και προγραμματισμού είναι γενικά γνωστοί εκ των προτέρων με εξαίρεση επείγουσες υπηρεσίες που μπορεί να χρειαστεί μια αποστολή (όπως κατά τη διάρκεια προσγείωσης ή ελιγμών), οι μακρές και ιδιαιτέρως μεταβλητές καθυστερήσεις καθιστούν τη σχεδίαση χρονομέτρων, και ειδικά χρονομέτρων αναμετάδοσης, ιδιαίτερα δύσκολη. Αυτό ωθεί στην αναχώρηση από το υπάρχον μοντέλο Διαδικτύου, καθότι οι εφαρμογές του IPN (IPN-aware applications) χρειάζονται τρόπους για να ανιχνεύουν την κατάσταση μιας σύνδεσης και να πληροφορούν τους χρήστες για την αναμενόμενη καθυστέρηση μέχρι την άφιξη της απάντησης. Αυτό θα είναι πολύπλοκο μόλις το IPN μεταφερθεί από την αρχική γεωκεντρική προσέγγιση σε ένα δίκτυο ισότιμων κόμβων (peer-to-peer), δεδομένου ότι από μόνη της η γνωστοποίηση της προόδου στους χρήστες θα καταλαμβάνει πολύτιμο εύρος ζώνης μέσα στο δίκτυο.



Σχήμα 1-5: Χαρακτηριστικά λειτουργικού περιβάλλοντος του Διαπλανητικού Διαδικτύου.

Οι συνδυασμένες επιπτώσεις των μεγάλων αποστάσεων, το κόστος και η δυσκολία εγκατάστασης μεγάλων κεραιών σε απομακρυσμένους πλανήτες, και η δυσκολία παραγωγής ενέργειας στο διάστημα οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το διαθέσιμο εύρος ζώνης στο διάστημα για επικοινωνία στο IPN είναι περιορισμένο σε σύγκριση με τα επίγεια συστήματα. Ρυθμοί μετάδοσης της τάξης των εκατοντάδων kbps μέχρι μερικά mbps θα είναι συνήθεις για τις επόμενες δεκαετίες. Ένα άλλο χαρακτηριστικό που κυριαρχεί στις σημερινές διαστημικές αποστολές είναι η ασυμμετρία των ρυθμών μετάδοσης που αντιστοιχεί και σε ασυμμετρία στο εύρος ζώνης, δηλαδή τα δεδομένα μεταδίδονται με διαφορετικούς ρυθμούς προς διαφορετικές κατευθύνσεις. Οι τωρινές αποστολές συνήθως σχεδιάζονται με πολύ μεγαλύτερο ρυθμό επιστροφής δεδομένων (από το διάστημα στη Γη) σε σχέση με το ρυθμό των εντολών. Ο λόγος ύπαρξης αυτής της ασυμμετρίας είναι απλός: ένα κανάλι εντολών με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεν είναι απαραίτητο λόγω του μικρού συνήθως μεγέθους των δεδομένων προς αποστολή, προτιμήθηκε έτσι ένα πιο αξιόπιστο κανάλι εντολών παρά ένα γρήγορο. Αυτή η

σχεδιαστική επιλογή έχει οδηγήσει σε ασυμμετρίες των ρυθμών μετάδοσης μεγαλύτερες από 100:1, μερικές φορές μάλιστα προσεγγίζοντας και το 1000:1. Η επιθυμία για ένα πολύ στιβαρό κανάλι εντολών παραμένει. Έτσι τα πρωτόκολλα μεταφοράς που σχεδιάζονται για χρήση στο IPN πρέπει να λειτουργούν με σχετικά χαμηλό εύρος ζώνης στο εξερχόμενο προς το διάστημα κανάλι.

Οι δυσκολίες παραγωγής ενέργειας σε διαπλανητικό επίπεδο οδηγεί επίσης σε σχετικά υψηλά ποσοστά λαθών (bit error ratio-BER). Οι σημερινές διαστημικές αποστολές λειτουργούν με πολύ υψηλό BER (της τάξης του $10e-1$, ή ένα λάθος κάθε 10 bit) που βελτιώνονται με χρήση εύρωστων σχημάτων κωδικοποίησης. Η ανταλλαγή μεταξύ κωδικοποίησης, ποσοστού σφαλμάτων, και απαιτήσεων αξιοπιστίας επανεξετάζονται στα πλαίσια του IPN.

Τέλος, οι διαπλανητικές επικοινωνίες (σήμερα και σίγουρα και στο άμεσο μέλλον) χαρακτηρίζονται από διαλείπουσα συνδεσιμότητα μεταξύ των κόμβων. Καθώς οι δορυφόροι ή τα φεγγάρια (φυσικοί δορυφόροι) διέρχονται πίσω από πλανήτες, και καθώς οι πλανήτες κρύβονται πίσω από τον ήλιο σε σχέση με τη Γη, χάνεται η δυνατότητα επικοινωνίας. Αυτό το φαινόμενο προστίθεται στις καθυστερήσεις που υφίστανται τα πακέτα, και μπορεί να ωθήσει τους χρόνους αναμονής σε αρκετές εβδομάδες ή και ένα μήνα αν η πηγή και ο προορισμός είναι σε αντίθετες πλευρές του ήλιου. Είναι απαραίτητη, λοιπόν, η ύπαρξη διαστρωματικής σηματοδότησης, ειδικά από το στρώμα ζεύξης δεδομένων, για να παρέχονται ειδοποιήσεις για τέτοιες διακοπές της συνδεσιμότητας.

Το IPN θα επεκτείνεται μακριά από τη Γη καθώς θα εξερευνούνται όλο και περισσότεροι πλανήτες, φεγγάρια, αστεροειδείς και, πιθανόν, και άλλα αστέρια. Κατά συνέπεια, πάντα θα υπάρχει μια περιοχή στις παρυφές του IPN, χωρίς ικανοποιητική τηλεπικοινωνιακή υποδομή. Επομένως, ο ρυθμός μετάδοσης, η συνδεσιμότητα, και τα χαρακτηριστικά των λαθών που αναφέρθηκαν προηγουμένως θα αποτελούν πάντα ενδεχόμενο πρόβλημα κάπου στο IPN. Για τις πλέον αναπτυγμένες περιοχές στον πυρήνα του IPN, είναι αξιοσημείωτο ότι η καθυστέρηση είναι το μόνο αμετάβλητο χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί το IPN από τις επίγειες επικοινωνίες. Οι ρυθμοί μετάδοσης, η διαλείπουσα συνδεσιμότητα και το ποσοστό σφαλμάτων μπορούν να μετριαστούν ή να εξαλειφθούν με την προσθήκη συμπληρωματικής υποδομής. Πρόσθετη υποδομή μπορεί ακόμα να μετριάσει τις καθυστερήσεις χρονοπρογραμματισμού και αναμονής που

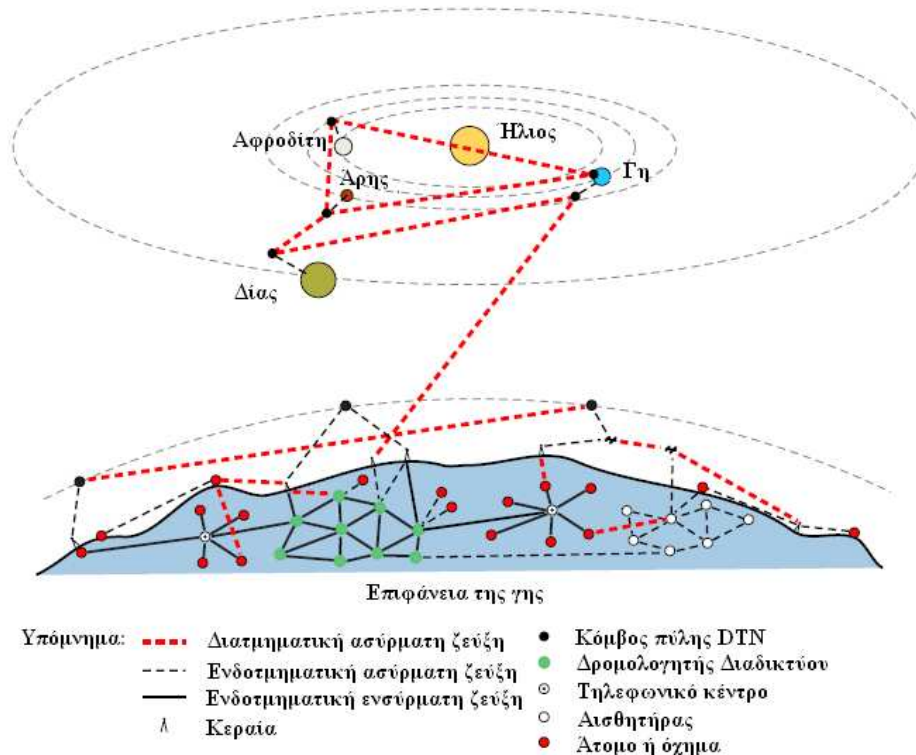
αναφέρθηκαν προηγουμένως, αλλά οι καθυστερήσεις διάδοσης θα παραμείνουν σημαντικές εκτός αν βρεθεί τρόπος να μεταδίδεται η πληροφορία ταχύτερα της ταχύτητας του φωτός!

Αυτά τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά, δηλαδή μεγάλες καθυστερήσεις, στενό και ασύμμετρο εύρος ζώνης, διαλείπουσα συνδεσιμότητα και σχετικά υψηλό ποσοστό λαθών καθιστούν αδύνατη τη χωρίς τροποποιήσεις χρήση των πρωτοκόλλων TCP/IP για από-άκρο-σε-άκρο επικοινωνία στο IPN. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις από τον Mathis και άλλους [5] υπολογίζεται ένα άνω όριο για βιώσιμη ρυθμοαπόδοση μιας TCP σύνδεσης, λαμβάνοντας υπόψη τους μηχανισμούς αποφυγής συμφόρησης του TCP. Ακόμα κι αν 1 στα 100 εκατομμύρια πακέτα χάνεται, μια TCP σύνδεση προς τον Άρη περιορίζεται σε κάτω από 250kbps. Υποθέτοντας ότι χάνονται 1 στα 5000 πακέτα (αυτό το νούμερο αναφέρεται από τον Paxson ως ο ρυθμός καταστροφής πακέτων στο Internet [6]) ο ρυθμός μετάδοσης πέφτει σε περίπου 1600bps. Αυτές οι τιμές είναι άνω όρια για μια ρυθμοαπόδοση σταθερής κατάστασης. Επειδή ο αριθμός των πακέτων σε μια σύνδεση θα είναι γενικά κάτω από 10000, οι επιδόσεις του TCP θα κυριαρχούνται από τη συμπεριφορά του κατά την αργή εκκίνηση (slow start). Ακόμα και όταν ο Άρης είναι στη μικρότερη απόσταση από τη Γη, θα χρειαστούν σχεδόν 100 λεπτά για να φθάσει το TCP σε ένα ρυθμό μετάδοσης των 20kbps. Εργαστηριακά πειράματα με χρήση προσομοιωτή καναλιού και κλασικές εφαρμογές δείχνουν ότι ακόμα και αν το TCP μπορούσε να πιεστεί να λειτουργεί αποτελεσματικά σε τέτοιες αποστάσεις, πολλές εφαρμογές είτε βασίζονται σε πολλούς γύρους χειραψιών είτε έχουν εσωτερικά χρονόμετρα που τις καθιστούν μη λειτουργικές όταν ο χρόνος RTT ωθείται σε περισσότερο από μερικά λεπτά. Για παράδειγμα, χρειάζονται οκτώ διαδρομές μετ'επιστροφής για να εισέλθει το πρωτόκολλο μεταφοράς αρχείων (File transfer protocol-FTP) σε μια κατάσταση όπου μπορεί ξεκινήσει η ροή της πληροφορίας, ενώ ένας εξυπηρετητής FTP μπορεί να επανεκκινήσει τη σύνδεση μετά από 5 λεπτά αδράνειας. Αυτό σημαίνει ότι ένας τυπικός FTP εξυπηρετητής θα ήταν ακατάλληλος προς χρήση για επικοινωνία ακόμα και με τους πλησιέστερους πλανήτες.

1.4. Αρχιτεκτονική ανεκτική στην καθυστέρηση

Στην προηγούμενη παράγραφο έγινε φανερό ότι τα διαπλανητικά δίκτυα δεν συμμορφώνονται με τις θεμελιώδεις παραδοχές του Internet που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 1.1. Η ανάλυση κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα συνήθη διαδικτυακά πρωτόκολλα πρέπει καταρχήν να τερματίζονται στις Διαπλανητικές Πύλες (Interplanetary Gateways) και το φορτίο των πληροφοριών να μεταβιβάζεται με ένα νέο σύνολο πρωτοκόλλων, καταλληλότερο για τις διαπλανητικές αποστάσεις, τις μεταβλητές καθυστερήσεις και τους ασύμμετρους ρυθμούς μετάδοσης του διαπλανητικού διαδικτύου. Ουσιαστικά, η σχεδίαση είναι ανάλογη με ένα σύστημα ταχυδρομικής αναμετάδοσης στο οποίο τα μηνύματα παραδίδονται στην ενδιάμεση Διαπλανητική Πύλη, εξάγονται από τα τυποποιημένα Διαδικτυακά πρωτόκολλα, και προωθούνται στην επόμενη πύλη του IPN με νέα πρωτόκολλα μεταφοράς μέχρι να φθάσουν στον προορισμό τους. Η νέα αυτή αρχιτεκτονική σχεδίασης που χρησιμοποιήθηκε για να υπερπηδήσει τα προβλήματα του Διαπλανητικού περιβάλλοντος αποτελεί περίπτωση δικτύωσης ανεκτικής στην καθυστέρηση (delay/distortion-tolerant networking - DTN) [7].

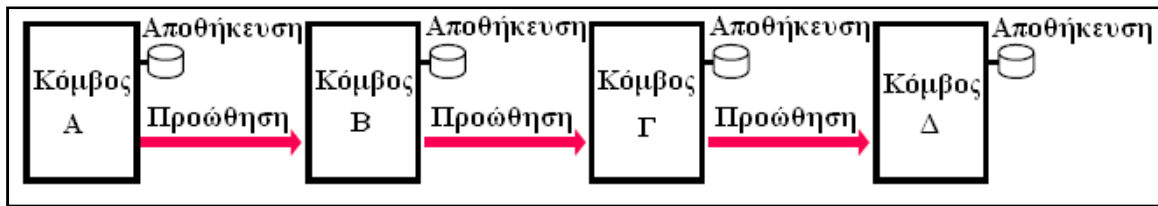
Ένα δίκτυο ανεκτικό στην καθυστέρηση αποτελείται από πολλά περιφερειακά (regional) δίκτυα και υπέρκειται πάνω από τα δίκτυα αυτά, συμπεριλαμβανομένου και του Internet. Τα DTN επιτρέπουν τη διαλειτουργικότητα προσαρμόζοντας τις καθυστερήσεις μεταξύ και εντός των περιφερειακών δικτύων, και μεταφράζοντας τα επικοινωνιακά χαρακτηριστικά των δικτύων. Παρέχοντας αυτές τις λειτουργίες, τα DTN εξυπηρετούν τις απαιτήσεις κινητικότητας αλλά και περιορισμένης ισχύος των εξελισσόμενων ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συσκευών και ταυτόχρονα αποτελούν άριστη επιλογή για το Διαπλανητικό Διαδίκτυο (Σχήμα 1-6).



Σχήμα 1-6: Η τοπολογία ενός DTN δικτύου.

Τα DTN αντιμετωπίζουν τα προβλήματα που σχετίζονται με τη διαλείπουσα συνδεσιμότητα, τις μεγάλες και μεταβλητές καθυστερήσεις, τους ασύμμετρους ρυθμούς μετάδοσης, και τους υψηλούς ρυθμούς σφαλμάτων με τη χρήση μεταγωγής μηνυμάτων με αποθήκευση και προώθηση (*store-and-forwarding*). Αυτή είναι μια παλιά μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε από τα ταχυδρομικά συστήματα από τα αρχαία χρόνια. Ολόκληρα μηνύματα (σύνολο δεδομένων εφαρμογής) ή τμήματα τέτοιων μηνυμάτων προωθούνται από ένα σημείο αποθήκευσης σε ένα κόμβο, σε ένα σημείο αποθήκευσης, σε κάποιο άλλο κόμβο, κατά μήκος μιας διαδρομής που τελικά καταλήγει στον προορισμό (Σχήμα 1-7). Με την προώθηση ολόκληρων των μηνυμάτων (ή τμημάτων αυτών) σε μία μεταφορά, η τεχνική μεταγωγής μηνυμάτων παρέχει στους δικτυακούς κόμβους την άμεση γνώση του μεγέθους των μηνυμάτων και επομένως, των απαιτήσεων για ενδιάμεση αποθήκευση και εύρος ζώνης αναμετάδοσης. Μέθοδοι αποθήκευσης-και-προώθησης (*store-and-forwarding*) χρησιμοποιούνται και στα σημερινά συστήματα φωνητικού (*voicemail*) και ηλεκτρονικού ταχυδρομείου (*email*), αν και στα συστήματα δεν υπάρχουν αναμεταδότες μιας κατεύθυνσης (Σχήμα 1-7) αλλά αναμεταδότες αστέρα (η πηγή και ο προορισμός

επικοινωνούν ανεξάρτητα με μία κεντρική συσκευή αποθήκευσης στο κέντρο των ζεύξεων).

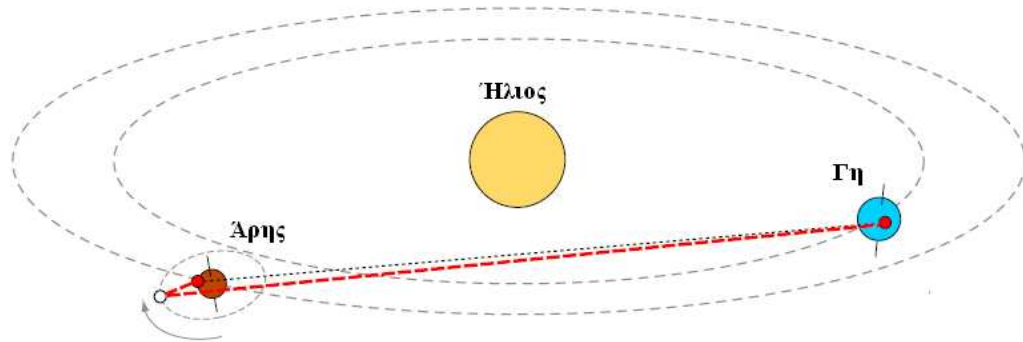
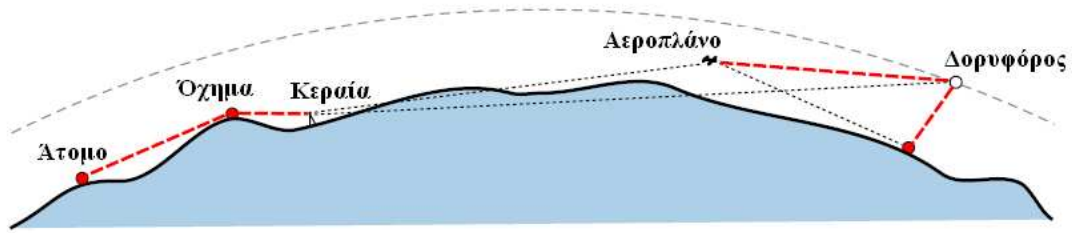


Σχήμα 1-7: Store-and-forward λειτουργία στη μεταγωγή μηνυμάτων.

Τα σημεία αποθήκευσης (όπως για παράδειγμα σκληροί δίσκοι) μπορούν να κρατήσουν τα μηνύματα για αόριστο χρόνο. Ονομάζονται *επίμονη αποθήκευση* (*persistent storage*), σε αντίθεση με τη βραχυπρόθεσμη αποθήκευση που παρέχουν τα τσιπ μνήμης. Οι δρομολογητές του Διαδικτύου χρησιμοποιούν τσιπ μνήμης για να αποθηκεύσουν τα εισερχόμενα πακέτα για λίγα χιλιοστά του δευτερολέπτου μέχρι να βρεθεί ο επόμενος κόμβος (next hop) από τον πίνακα δρομολόγησης και να ελευθερωθεί κάποια πύλη εξόδου. Οι δρομολογητές του DTN χρειάζονται επίμονη αποθήκευση για ένα ή περισσότερους από τους ακόλουθους λόγους:

- Μια επικοινωνιακή ζεύξη με τον επόμενο κόμβο μπορεί να μην είναι διαθέσιμη για μεγάλο χρονικό διάστημα.
- Ένας κόμβος στο επικοινωνιακό ζεύγος ενδεχομένως αποστέλλει ή λαμβάνει δεδομένα πολύ ταχύτερα ή αξιόπιστα από τον άλλο κόμβο.
- Ένα μήνυμα, αφού μεταδοθεί, μπορεί να απαιτηθεί να αναμεταδοθεί στην περίπτωση όπου συμβεί κάποιο σφάλμα στην άνω ζεύξη (προς τον προορισμό) ή αν ένας κόμβος αρνηθεί να δεχθεί ένα προωθημένο μήνυμα.

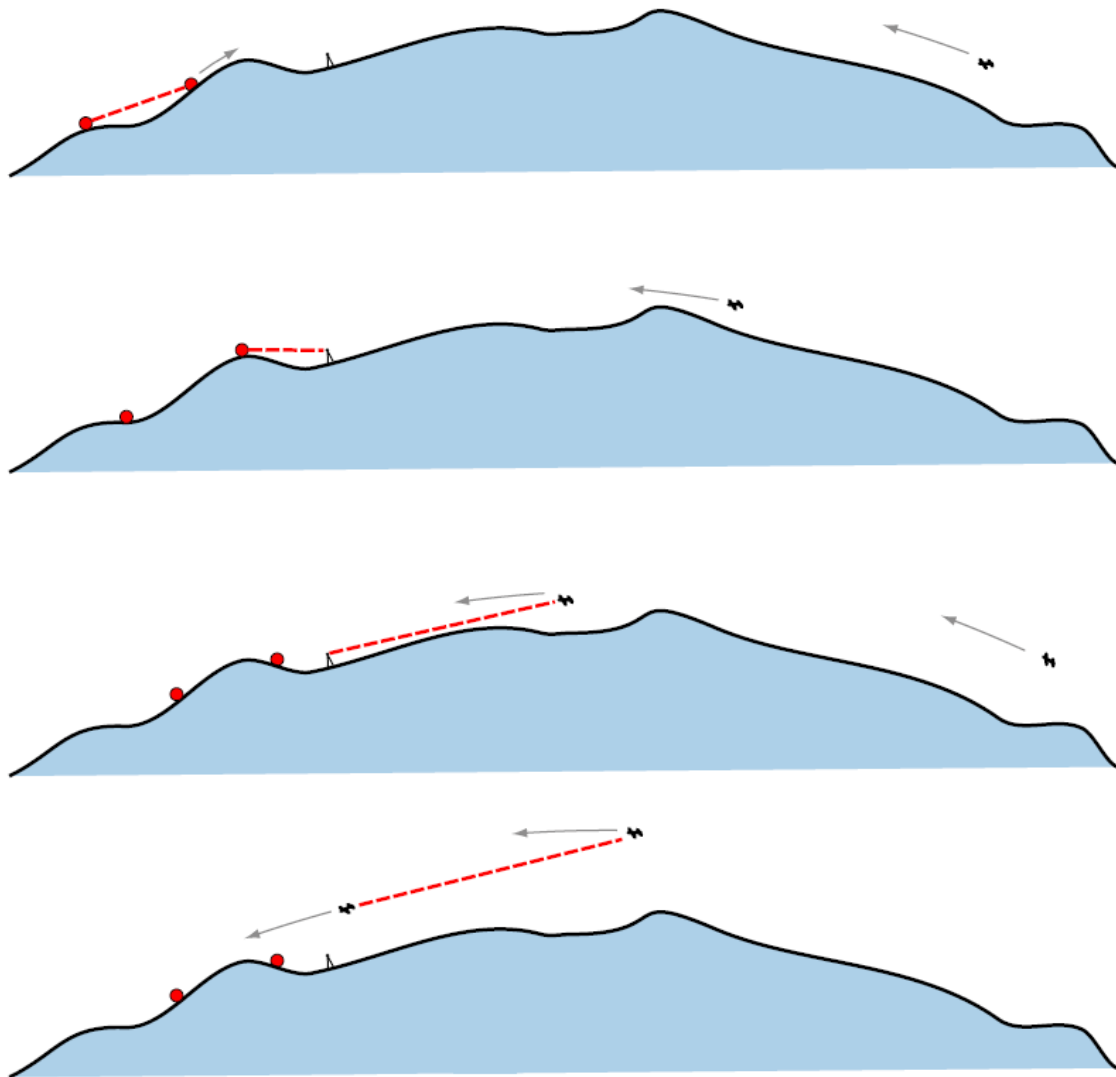
Στο διαδίκτυο, η διαλείπουσα συνδεσιμότητα οδηγεί σε απώλεια δεδομένων. Πακέτα που δεν μπορούν να προωθηθούν άμεσα συνήθως απορρίπτονται, και το TCP μπορεί να τα αναμεταδώσει αργότερα. Αν η απώλεια πακέτων είναι εκτεταμένη, το TCP τελικά τερματίζει τη σύνοδο, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αποτυχία την εφαρμογή. Αντίθετα, το DTN υποστηρίζει επικοινωνία μεταξύ κόμβων που συνδέονται κατά διαστήματα απομονώνοντας τις καθυστερήσεις με την τεχνική αποθήκευσης-και-προώθησης (Σχήμα 1-8).



Υπόμνημα: --- Συνδεδεμένη ζεύξη ● Κινητός ή σταθερός επιφανειακός κόμβος
--- Αποσυνδεδεμένη ζεύξη ○ Περιστρεφόμενος κόμβος

Σχήμα 1-8: Επικοινωνία μεταξύ κατά διαστήματα συνδεδεμένων κόμβων σε DTN δίκτυο.

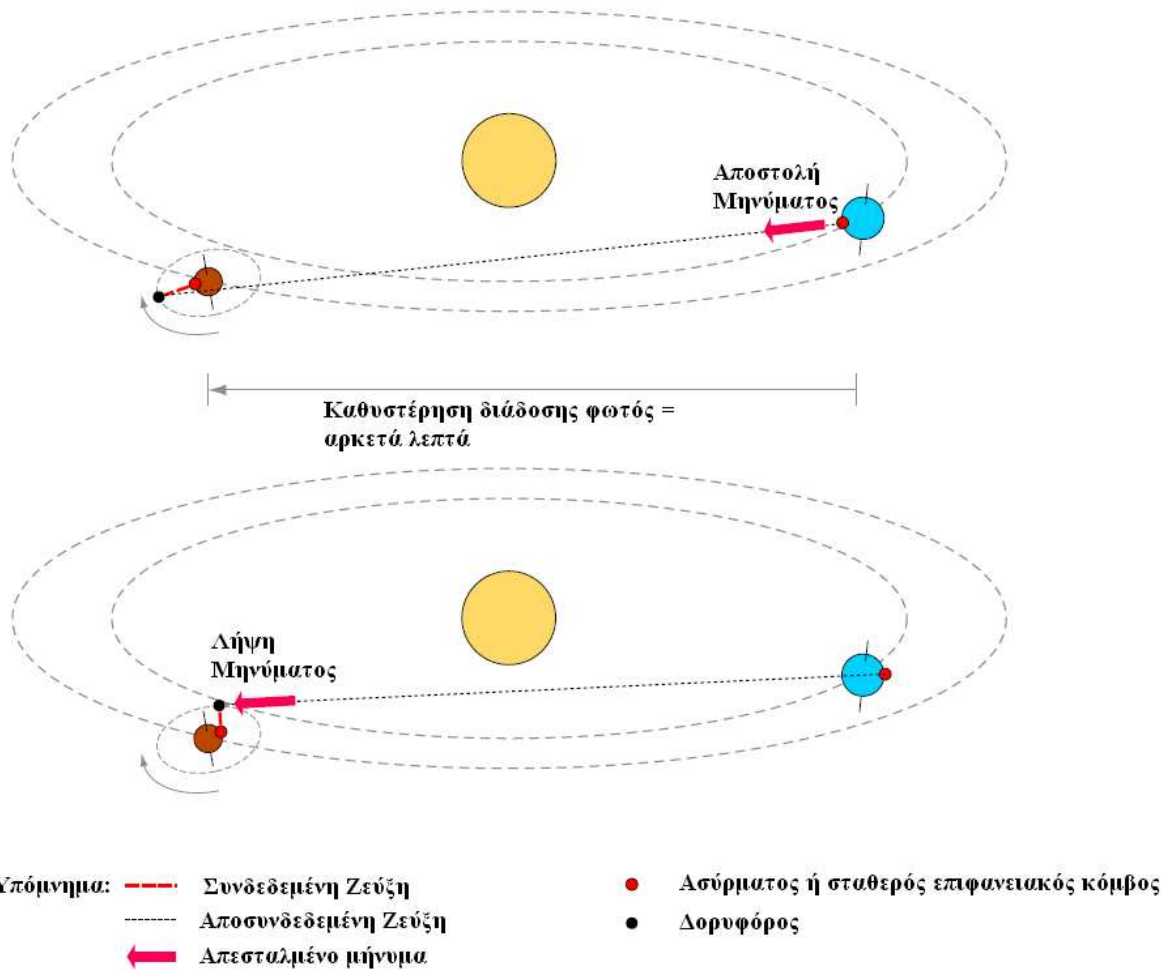
Οι δικτυακοί κόμβοι μπορεί να χρειαστεί να επικοινωνήσουν κατά τη διάρκεια ευκαιριακών επαφών (*opportunistic contacts*), κατά τις οποίες ο αποστολέας και ο παραλήπτης έρχονται σε επαφή σε μη προγραμματισμένους χρόνους. Κινούμενοι άνθρωποι, οχήματα, αεροπλάνα, δορυφόροι ή και πλανήτες μπορούν να έλθουν σε επαφή και να ανταλλάξουν πληροφορίες όταν τύχει να βρεθούν σε οπτική επαφή (*line-of-sight*) και αρκετά κοντά για να επικοινωνήσουν χρησιμοποιώντας τη διαθέσιμη (συχνά περιορισμένη) ισχύ τους.



Υπόμνημα: --- Ευκαιριακή επαφή ← Κατεύθυνση κίνησης

Σχήμα 1-9: Επικοινωνία κατά τη διάρκεια καιροσκοπικής επαφής.

Στο διάστημα, σχεδόν τα πάντα είναι σε κίνηση και οι καθυστερήσεις διάδοσης είναι σημαντικές (δεκάδες λεπτά μέσα στο ηλιακό σύστημα). Αν οι πιθανοί κόμβοι επικοινωνίας κινούνται σε προβλέψιμες διαδρομές, μπορούν να προβλεφθούν οι μελλοντικές τους θέσεις και έτσι να προγραμματιστούν οι μελλοντικές επικοινωνιακές τους σύνοδοι. Οι προγραμματισμένες επαφές μπορεί να εμπλέκουν αποστολή μηνυμάτων μεταξύ κόμβων χωρίς οπτική επαφή (Σχήμα 1-10). Μπορεί ακόμα να εμπλέκουν αποθήκευση πληροφοριών μέχρι να μπορεί να προωθηθεί, ή μέχρι ο ρυθμός ανάγνωσης της εφαρμογής λήψης να φθάσει το ρυθμό αποστολής δεδομένων. Οι προγραμματισμένες επαφές απαιτούν συγχρονισμό σε όλη την έκταση του DTN.



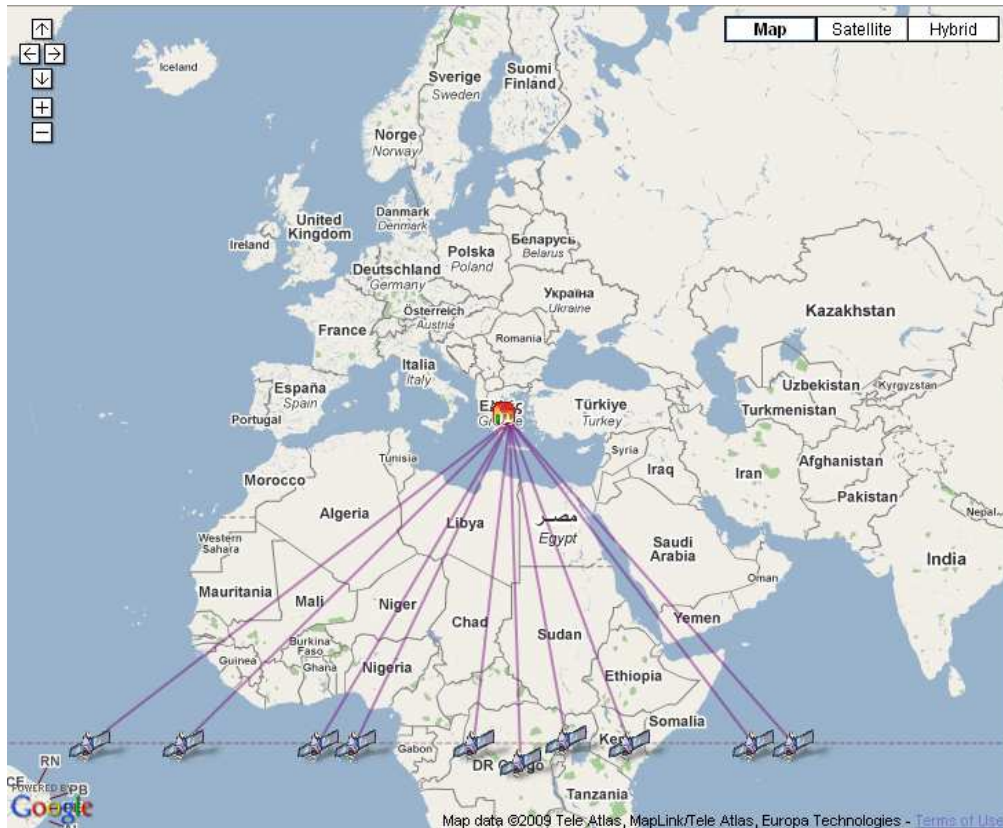
Σχήμα 1-10: Οι προγραμματισμένες επαφές εμπλέκουν και αποστολή μηνυμάτων χωρίς οπτική επαφή.

1.5. Διαπλανητικό Δίκτυο Γης-Σελήνης

Ακολουθεί μια σύντομη αναφορά σε ένα υποθετικό διαπλανητικό δίκτυο μεταξύ Γης και Σελήνης που και θα αναλυθεί στα επόμενα κεφάλαια. Το σενάριο αυτό, αν και απλοϊκό για τα δεδομένα της τρέχουσας παγκόσμιας ερευνητικής δραστηριότητας, θα αποτελέσει τη βάση για ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις των οποίων οι εφαρμογές και προεκτάσεις γενικεύονται στο σύνολο του πλανητικού συστήματος. Εξάλλου, στη βάση του Διαπλανητικού Διαδικτύου βρίσκεται η χρήση αναμεταδοτών (relay) κοντά στον πλανήτη του σταθμού βάσης ως πρώτου κόμβου του διαπλανητικού δικτύου. Το ρόλο αυτό φυσικά, μπορούν να παίξουν κατά κύριο λόγο τεχνητοί δορυφόροι και, στη συνέχεια, και οι φυσικοί δορυφόροι (φεγγάρια) του πλανήτη.

Το διαπλανητικό αυτό δίκτυο αποτελείται από ένα επίγειο σταθμό βάσης στην Αθήνα και ένα σύνολο γεωστατικών δορυφόρων που τον εξυπηρετούν. Η τοπολογία του

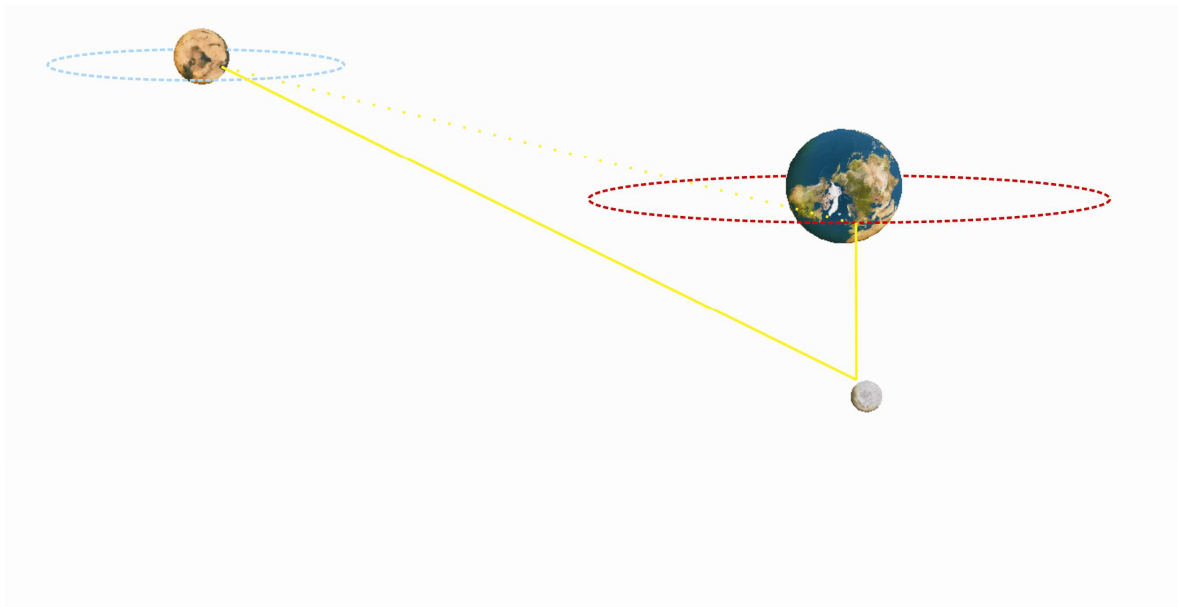
δικτύου μέχρι τους δορυφόρους φαίνεται στο Σχήμα 1-11. Στη συνέχεια οι δορυφόροι αναμεταδίδουν το σήμα που έχουν λάβει από τον επίγειο σταθμό προς το σταθμό στη Σελήνη ενώ τα δεδομένα επιστρέφουν στη Γη ακολουθώντας την αντίστροφη πορεία.



Σχήμα 1-11: Τοπολογία δικτύου σταθμού βάσης δορυφόρων.

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης γεωστατικών δορυφόρων είναι πολλαπλά: παρέχουν μεγάλη περιοχή κάλυψης, είναι σταθεροί και παρουσιάζουν ελάχιστη ολίσθηση Doppler. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα, όμως, που παρέχει η χρήση δορυφόρων ως αναμεταδοτών για επικοινωνία με τη Σελήνη είναι ότι σε περίπτωση απώλειας κάποιου μηνύματος και ανάγκης αναμετάδοσης αυτή δεν θα χρειαστεί να γίνει από τη Γη, εφόσον το μήνυμα έχει φθάσει ακέραιο στο δορυφόρο. Έτσι ο χρόνος αναμετάδοσης μειώνεται σημαντικά. Ταυτόχρονα αναγεννώντας τα σήματα σε δορυφόρους που βρίσκονται έξω από την ατμόσφαιρα της Γης (η γεωστατική τροχιά είναι περίπου στα 37786 km ενώ η ατμόσφαιρα φτάνει μέχρι το πολύ 10000 km) η αναμετάδοση δεν υποφέρει από απώλειες λόγω ατμοσφαιρικών φαινομένων (απώλειες νεφώσεων και βροχόπτωσης, απώλειες λόγω διάδοσης στην ατμόσφαιρα και την ιονόσφαιρα, απώλειες λόγω αποπόλωσης του Η/Μ κύματος κατά τη διάδοση στην ατμόσφαιρα) αλλά μόνο από απώλειες ελευθέρου χώρου στο διάστημα.

Ένα παράδειγμα της χρησιμότητας αυτού του δικτύου, πέραν του προφανούς της επικοινωνίας Γης-Σελήνης, φαίνεται στο Σχήμα 1-12. Η επικοινωνία με τον Άρη με χρήση των πρωτοκόλλων του DTN είναι ένας από τους πρώτους στόχους που έχει θέση η επιστημονική κοινότητα που ασχολείται με την εξέλιξη του IPN. Ο λόγος είναι προφανής: ένα πλήθος διαστημικών προγραμμάτων ασχολείται με τη μελέτη του Άρη με αποτέλεσμα μεγάλος αριθμός δορυφόρων αλλά και οχημάτων εξερεύνησης της επιφάνειας (rovers) να βρίσκονται αυτή τη στιγμή στον Άρη. Η δημιουργία τηλεπικοινωνιακής υποδομής που θα φθάνει μέχρι τον Άρη θα δώσει τη δυνατότητα στους επιστήμονες να επικοινωνούν απρόσκοπτα με τις επιφανειακές και τροχιακές αποστολές στον πλανήτη. Η Σελήνη, λοιπόν, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κόμβος αναμετάδοσης για τις στιγμές που βρίσκεται σε οπτική επαφή με τον Άρη ή κάποιον από τους δορυφόρους του ενώ ο επίγειος σταθμός δεν έχει οπτική επαφή.



- Υπόμνημα:
 - - - Γεωστατική τροχιά (δορυφόροι)
 ●●● Αποσυνδεδεμένη ζεύξη
 ——— Συνδεδεμένη ζεύξη
 - - - Δορυφόροι Άρη

Σχήμα 1-12: Επικοινωνία Γης-Άρη με χρήση της Σελήνης ως ενδιάμεσο κόμβο.

Κεφάλαιο 2: Ανάλυση Διαπλανητικού Δικτύου Γης- Σελήνης

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε σύντομη αναφορά στην τοπολογία ενός δικτύου Γης-Σελήνης αλλά και στις χρήσεις που θα μπορούσε να έχει ένα τέτοιο δίκτυο. Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί η τοπολογία του δικτύου αυτού και το ισοζύγιο ισχύος της ζεύξης (link budget analysis) για ένα σύνολο επιλεγμένων δορυφόρων. Επίσης μετά από σύντομη αναφορά στους περιορισμούς που σχετίζονται με τη χωρητικότητα των δορυφόρων και στην αναμενόμενη σχετική τάση, θα παρουσιαστούν προτάσεις για την αποδοτικότερη αξιοποίησή τους που βασίζονται στη διαφορά ώρας των διαφόρων Ευρωπαϊκών πόλεων.

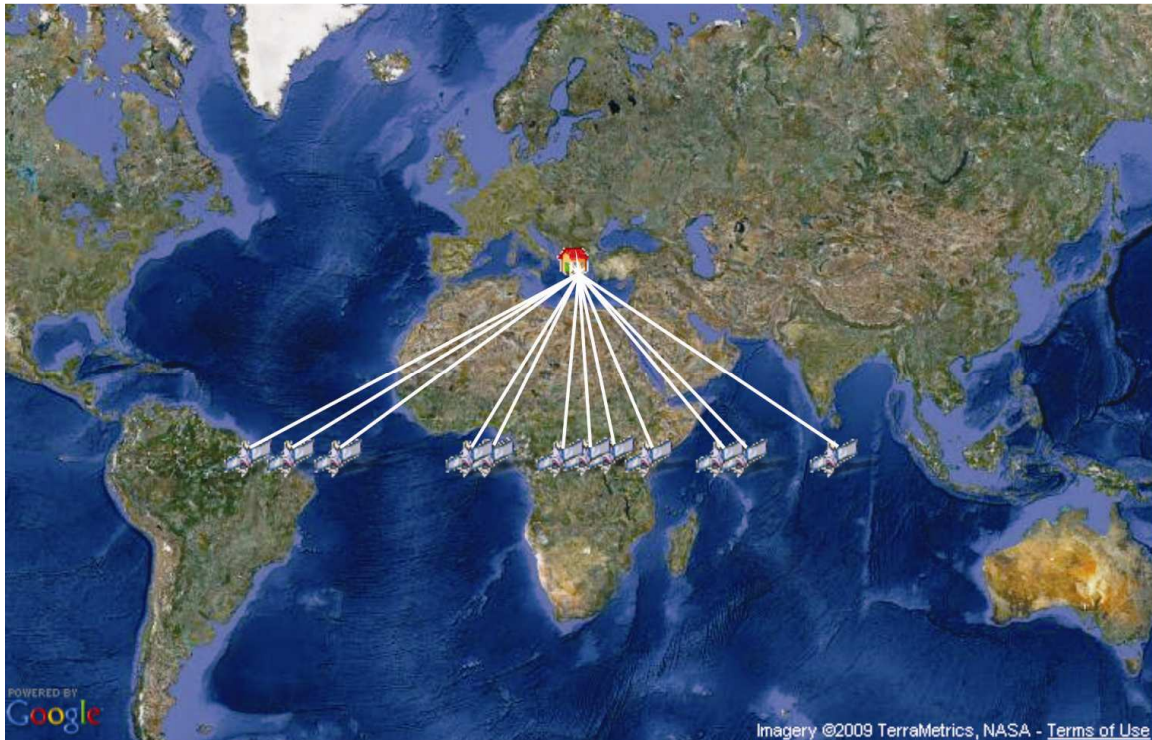
2.1. Τοπολογία δικτύου Γης-Σελήνης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται αναλυτικά οι σταθμοί βάσης, οι δορυφόροι και του τελικός προορισμός (Σελήνη) του δικτύου Γης- Σελήνης.

2.1.1. Επίγειοι σταθμοί βάσης

Το δίκτυο που θα περιγραφεί εξυπηρετεί ένα σταθμό βάσης που βρίσκεται στην Ελλάδα και συγκεκριμένα στην Αθήνα (Γεωγραφικό πλάτος: 37.9°, Γεωγραφικό μήκος: 23.7°) (Σχήμα 2-1). Ο σταθμός αυτός αποστέλλει δεδομένα προς τη Σελήνη είτε ως τελικό προορισμό (πχ. Διαστημικός σταθμός που έχει έδρα τη Σελήνη) είτε ως πύλη (gateway) προς το ευρύτερο Διαπλανητικό Διαδίκτυο όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τα δεδομένα αυτά αντιμετωπίζονται κατά τον ίδιο τρόπο ανεξαρτήτως προορισμού· επομένως στο εξής δεν θα γίνεται διάκριση μεταξύ τους και θα χαρακτηρίζονται ως *όγκος ζήτησης (demand volume)*. Ο όγκος αυτός των δεδομένων αφορά πληροφορίες που είτε αποστέλλονται προς τη Σελήνη είτε λαμβάνονται από αυτή.

Παράλληλα με το διαπλανητικό σταθμό βάσης στην Αθήνα, λειτουργούν και άλλοι δορυφορικοί σταθμοί στην Ευρώπη, που θεωρείται ότι συμμετέχουν στην κίνηση προς τους δορυφόρους αλλά όχι και στη διαπλανητική κίνηση. Η κίνηση που παράγουν οι υπόλοιποι σταθμοί της Ευρώπης έχει προορισμό κάποιον άλλο επίγειο σταθμό ή συνδρομητή. Πέρα, λοιπόν, από τη δρομολόγηση της διαπλανητικής κίνησης, οι δορυφόροι επιφορτίζονται και με την αναμετάδοση αυτών των δεδομένων.



Σχήμα 2-1: Διαπλανητικός σταθμός βάσης Αθήνας και οι γεωστατικοί δορυφόροι που τον εξυπηρετούν.

2.1.2. Δορυφόροι

Για τους σκοπούς της διαπλανητικής επικοινωνίας θα χρησιμοποιηθούν 10 γεωστατικοί δορυφόροι των οποίων η επιφάνεια κάλυψης εκτείνεται σε όλη την Ευρώπη. Επιλέχθηκαν γεωστατικοί δορυφόροι για την τοπολογία του δικτύου λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων που. Τα πλεονεκτήματα αυτά είναι:

- Ο δορυφόρος φαίνεται σταθερός από τους επίγειους σταθμούς που βρίσκονται στην περιοχή κάλυψης. Με τον τρόπο Επομένως ελαχιστοποιούνται οι λειτουργικές απαιτήσεις των επίγειων σταθμών εδάφους διότι, αφενός η παρακολούθηση της θέσης του δορυφόρου είναι απλή, και αφετέρου, τα χαρακτηριστικά μετάδοσης (σε ό,τι αφορά την εξάρτησή τους από την απόσταση πομπού και δέκτη) δεν μεταβάλλονται.
- Η κάλυψη της Γης που παρέχουν οι γεωστατικοί δορυφόροι είναι επαρκής για τις πλέον πυκνοκατοικημένες περιοχές του πλανήτη (μέχρι Γεωγραφικό πλάτος $+75^\circ$, ή -75°).

- Οι δορυφορικές ζεύξεις μέσω γεωστατικών δορυφόρων παρουσιάζουν ελάχιστη ολίσθηση συχνότητας Doppler και προβλέψιμες παρεμβολές με άλλα επίγεια τηλεπικοινωνιακά συστήματα λόγω της σταθερής γεωμετρίας.

Οι δορυφόροι επιλέχθηκαν σε αποστάσεις των 5-10 μοιρών. Για μεγαλύτερη αξιοπιστία χρησιμοποιήθηκαν τα τροχιακά χαρακτηριστικά πραγματικών τηλεπικοινωνιακών δορυφόρων θεωρώντας, όμως, ότι μπορούν να εξυπηρετήσουν ολόκληρη τη περιοχή κάλυψής τους (στην πραγματικότητα περιορίζονται για αποφυγή παρεμβολών) και φυσικά ότι δρομολογούν και διαπλανητική κίνηση. Οι δορυφόροι που επιλέχθηκαν φαίνονται στο Σχήμα 2-2 και τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους στον Πίνακα 2-1 [8], όπου εμφανίζεται και η απόσταση κάθε δορυφόρου από το διαπλανητικό σταθμό βάσης της Αθήνας (Παράρτημα 2.4.2).



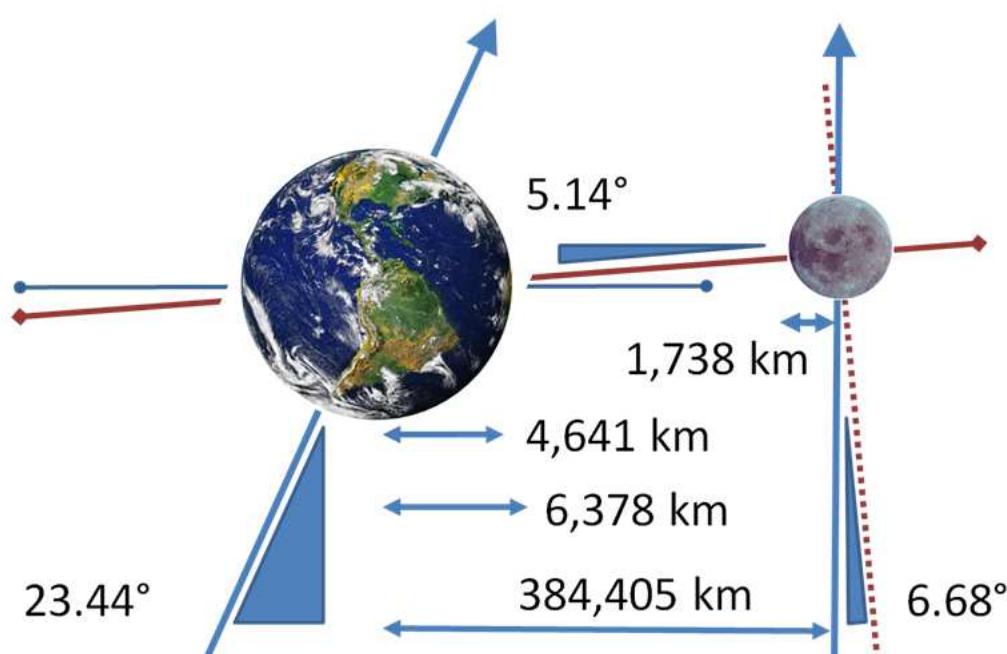
Σχήμα 2-2: Οι γεωστατικοί δορυφόροι του διαπλανητικού δικτύου.

Δορυφόρος	<u>INTELSAT</u> <u>901</u>	<u>HISPASAT</u> <u>1C</u>	<u>THOR 2R</u>	<u>EUTELSAT</u> <u>W1</u>	<u>ASTRA 1L</u>	<u>INMARSAT</u> <u>4-F2</u>	<u>ARABSAT</u> <u>3A</u>	<u>HELLAS-</u> <u>SAT 2</u>	<u>INTELSAT</u> <u>706</u>	<u>INTELSAT</u> <u>904</u>
Γεωγραφικό πλάτος:	-0.01°	-0.07°	0°	0°	0.1°	1.69°	-0.58°	0.02°	0.02°	0.02°
Γεωγραφικό μήκος:	-17.99°	-30.12°	-0.72°	9.98°	19.19°	25.1°	30.31°	39.08°	54.85°	59.99°
Κλίση τροχιάς:	-6° 44' 8"	-6° 45' 45"	-6° 58' 3"	-7° 1' 56"	-6° 56' 29"	-5° 9' 13"	-7° 42' 6"	-6° 59' 37"	-6° 53' 34"	-6° 51' 1"
Αζιμούθιο:	235.43°	245.76°	216.49°	201.71°	187.39°	177.7°	169.51°	155.94°	135.51°	129.96°
Γωνία ανύψωσης:	+28.43°	+19.47°	+39.13°	+43.7°	+45.86°	+47.89°	+44.83°	+43.19°	+35.39°	+32.14°
Ύψος [km]:	35776.03	35794	35776.59	35773.57	35773.41	35777.89	35780.53	35774.65	35772.99	35773.06
Ταχύτητα [km/s]:	0	0	0	0	0	0.08	0.01	0	0	0
Απόσταση [km]	40440.2	38742.75	37838.21	37492.15	37339.62	37206.81	37418.64	37530.14	38135.32	38410.62

Πίνακας 2-1: Χαρακτηριστικά γεωστατικών δορυφόρων.

2.1.3. Σελήνη

Η Σελήνη είναι ο μοναδικός φυσικός δορυφόρος της Γης και ο πέμπτος μεγαλύτερος φυσικός δορυφόρος του ηλιακού συστήματος. Αποτελείται από στερεά υλικά με σύσταση παρόμοια με αυτή της Γης. Είναι το φωτεινότερο σώμα μετά τον Ήλιο επειδή είναι και το κοντινότερο στη Γη ουράνιο σώμα. Εξαιτίας αυτής της εγγύτητας, η Σελήνη έχει ισχυρή βαρυτική επίδραση στη Γη, προκαλώντας φαινόμενα όπως οι παλίρροιες αλλά και επηρεάζοντας την κλίση του άξονα περιστροφής της.



Σχήμα 2-3: Γη και Σελήνη. Ακτίνες, απόσταση, κλίση τροχιάς.

Η μέση απόσταση Γης - Σελήνης είναι 384.405 χιλιόμετρα (παρατηρείται ότι αυτή η απόσταση αυξάνει κάθε χρόνο κατά μερικά cm). Η διάμετρος της σελήνης είναι 3.476 km (περίπου το 1/4 της γήινης) (Σχήμα 2-3). Η βαρύτητα στην επιφάνεια της Σελήνης έχει μέγεθος το 1/6 περίπου αυτής της Γης. Περιστρέφεται περί τον ελαφρώς κεκλιμένο άξονά της σε 27 ημέρες 7 ώρες και 43 λεπτά, ακριβώς στην ίδια διάρκεια που διαρκεί η περιφορά της γύρω από τη Γη. Αυτός ο χρονικός συντονισμός των δύο κινήσεων είναι και ο λόγος που από τη Γη φαίνεται πάντα η ίδια όψη της, κάτι που οφείλεται στην βαρυτική έλξη από τη Γη. Η Γη και η Σελήνη βαρυτικά είναι ένα ενιαίο σώμα με κοινό βαρυτικό κέντρο. Συνέπεια των ανωτέρω είναι ότι ορατό στη γη είναι το 59% της επιφάνειας της Σελήνης.

Αυτό απλοποιεί την υλοποίηση διαστημικού σταθμού στη Σελήνη, αφού, εφόσον κατασκευαστεί στην ορατή από τη Γη πλευρά της Σελήνης ένας διαστημικός σταθμός θα είναι πάντα σε οπτική επαφή με τους σταθμούς στη Γη και κάποιους δορυφόρους της. Ωστόσο, πρέπει να ληφθεί υπόψη τόσο η περιστροφή της Γης όσο και η περιφορά της Σελήνης για να υπολογιστεί η χρονική περίοδος της οπτικής επαφής των δορυφόρων του διαπλανητικού δικτύου με το σταθμό στη Σελήνη. Επιπλέον ανάλογα με τη θέση της Σελήνης η απόστασή της από τους των δορυφόρους μεταβάλλεται, χαρακτηριστικό που πρέπει να ληφθεί υπόψη για την αποδοτική σχεδίαση του δικτύου. Η συνολική τοπολογία του Διαπλανητικού δικτύου με το σύνολο των πιθανών διαδρομών φαίνεται στο Σχήμα 2-4.



Σχήμα 2-4: Τοπολογία διαπλανητικού δικτύου και πιθανές διαδρομές των δεδομένων.

2.2. Χωρητικότητα δορυφόρων

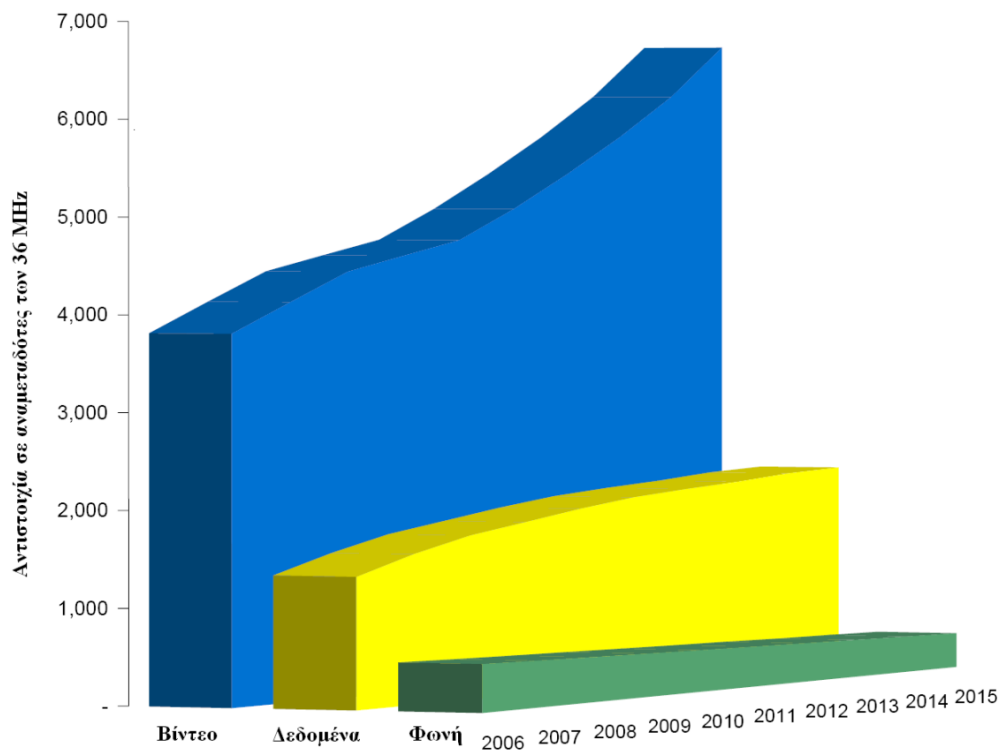
Αναθέτοντας την υποστήριξη νέων υπηρεσιών στους υπάρχοντες δορυφόρους πρέπει να ληφθεί υπόψη η διαθέσιμη χωρητικότητα αυτών καθώς και οι ενδεχόμενες

μελλοντικές απαιτήσεις. Για λόγους απλοποίησης αλλά χωρίς βλάβη της γενικότητας, στο μοντέλο του Διαπλανητικού Διαδικτύου θεωρήθηκαν όλοι οι δορυφόροι που απαρτίζουν το δίκτυο πανομοιότυποι. Επίσης, το σύνολο των 10 δορυφόρων που ανήκουν στο δίκτυο θεωρείται ότι εξυπηρετεί *όλη* τη δορυφορική ζήτηση της Ευρώπης αναλογικά. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους φαίνονται στον Πίνακα 2-2 (χαρακτηριστικά του Hellas Sat II) [9].

EIRP	53 dBw (στο κέντρο της δέσμης)
G/T	6 dB/K
Αναμεταδότες	30 των 36 MHz

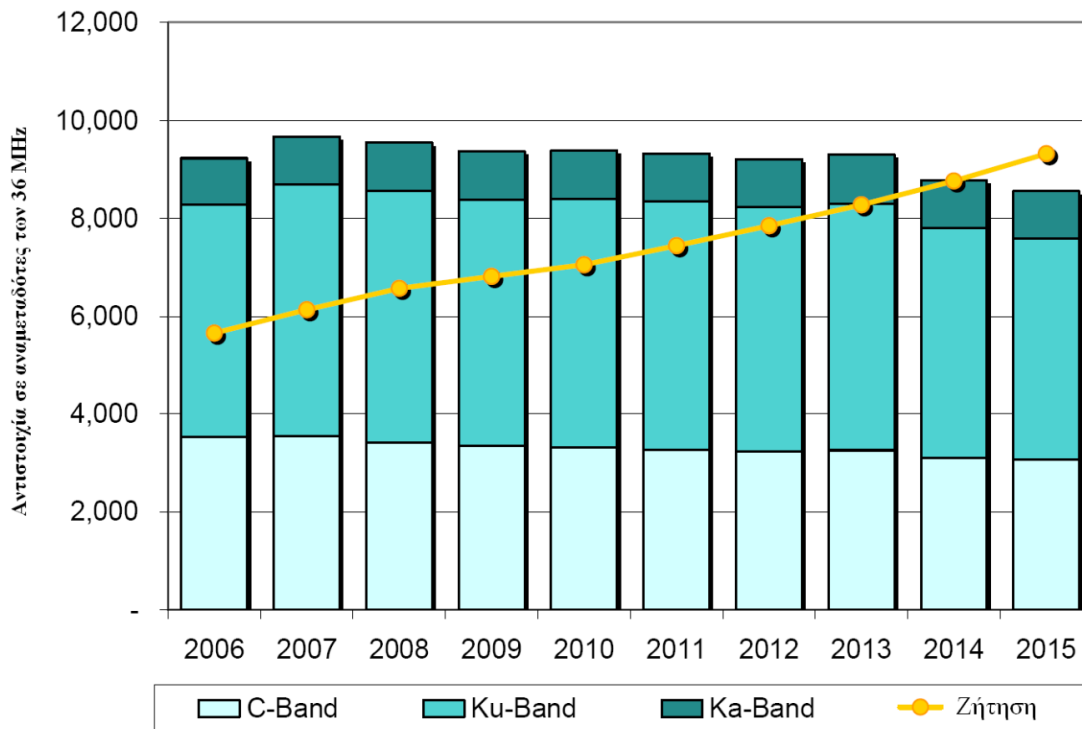
Πίνακας 2-2: Τεχνικά χαρακτηριστικά γεωστατικών δορυφόρων.

Η χωρητικότητα των δορυφόρων είναι λοιπόν περιορισμένη. Αυτό γίνεται αντιληπτό από το γεγονός ότι κάθε αναμεταδότης μπορεί να μεταδώσει το πολύ 10 με 12 τηλεοπτικούς σταθμούς κανονικής ευκρίνειας (Standard Definition), ενώ όταν πρόκειται για τηλεοπτικά προγράμματα υψηλής ευκρίνειας το πλήθος αυτό μειώνεται σε 4-6 κανάλια ανά αναμεταδότη [10]. Επιπλέον, σύμφωνα με τις προβλέψεις της εταιρείας συμβούλου σε θέματα τεχνολογίας Futron για την περίοδο 2006 με 2015 [11] η ζήτηση δορυφορικής χωρητικότητας τόσο για μεταφορά βίντεο όσο και δεδομένων θα αυξάνει με ρυθμό > 5% κάθε χρόνο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-5. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι για να εξυπηρετηθούν οι ανάγκες των χρηστών απαιτείται η σταδιακή αύξηση της χωρητικότητας των δορυφόρων που βρίσκονται σε τροχιά ή η εκμετάλλευση νέων δορυφόρων.



Σχήμα 2-5: Πρόβλεψη για τις απαιτήσεις σε αναμεταδότες εύρους ζώνης 36 MHz για την εξυπηρέτηση των αναγκών φωνής, βίντεο και δεδομένων από το 2006 έως το 2015.

Η συσχέτιση προσφοράς και ζήτησης χωρητικότητας είναι το κρίσιμο ζητούμενο. Η ίδια μελέτη [11] λαμβάνοντας υπόψη τους δορυφόρους που βρίσκονται ήδη σε τροχιά, τις νέες παραγγελίες δορυφόρων και τις προσδοκώμενες αντικαταστάσεις, καταλήγει στο ότι το πλεόνασμα της προσφοράς υποχωρεί, με την παγκόσμια χρησιμοποίηση της δορυφορικής χωρητικότητας να φθάνει για πρώτη φορά το 60 % το 2006 και τις προβλέψεις για τα επόμενα χρόνια να δείχνουν ότι το 2014 δεν θα καλύπτεται πλέον η ζήτηση (Σχήμα 2-6). Αν και η υψηλής χωρητικότητας Ka ζώνη έκανε την εμφάνισή της στη Βόρεια Αμερική, στην Ευρώπη η πρώτη εκτόξευση δορυφόρου που θα λειτουργεί πλήρως σε αυτή τη ζώνη θα γίνει το 2011 [12]. Αυτό σημαίνει ότι υπό τις υπάρχουσες συνθήκες και τεχνολογικές δυνατότητες, σε λίγα χρόνια η προσφερόμενη χωρητικότητα από τους δορυφόρους δεν θα είναι επαρκής. Επομένως, πρέπει να εξευρεθούν νέοι αποδοτικοί τρόποι διαχείρισής της.



Σχήμα 2-6: Προβλέψεις για την προσφορά και τη ζήτηση χωρητικότητας δορυφορικών δικτύων από το 2006 – 2015.

Από τα προηγούμενα γίνεται φανερό ότι η χωρητικότητα των δορυφορικών ζεύξεων είναι ένας παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τη σχεδίαση του Διαπλανητικού Διαδικτύου. Για να είναι εφικτή η εξυπηρέτηση των διαπλανητικών συνδέσεων πρέπει να ληφθούν μέτρα ώστε να εξασφαλιστεί η βιωσιμότητα του διαπλανητικού δικτύου σε βάθος χρόνου αλλά και η απρόσκοπτη λειτουργία των υπόλοιπων υπηρεσιών των δορυφόρων. Η αύξηση της χωρητικότητας των δορυφόρων είναι μια ακριβή και χρονοβόρα λύση και έτσι κρίνεται μη ικανοποιητική. Ωστόσο, με χρήση των κατάλληλων αλγορίθμων δρομολόγησης είναι εφικτό να κατευθυνθεί η κίνηση προς τη Σελήνη από δορυφόρους που διαθέτουν περίσσεια χωρητικότητας. Ένας αποδοτικός τρόπος για να γίνει αυτό είναι η αξιοποίηση της διαφοράς ώρας των περιοχών, τις οποίες καλύπτουν υπό τη μεγαλύτερη γωνία ανύψωσης οι δορυφόροι, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια.

2.3. Επιλογή δορυφόρου

Στην παράγραφο αυτή θα σχολιαστεί η επιλογή του καταλληλότερου δορυφόρου για τη δρομολόγηση της διαπλανητικής ζήτησης. Ένα κριτήριο επιλογής θα μπορούσε να είναι η ελάχιστη απόσταση, που εξασφαλίζει και τη μικρότερη εξασθένιση. Ωστόσο δεν είναι το αποδοτικότερο. Αντιθέτως, λαμβάνοντας υπόψη τις ώρες αιχμής της τηλεπικοινωνιακής κίνησης αλλά και τη διαφορά ώρας των χωρών της Ευρώπης προκύπτουν ενδιαφέροντα μοντέλα δρομολόγησης.

2.3.1. Βέλτιστη διαδρομή

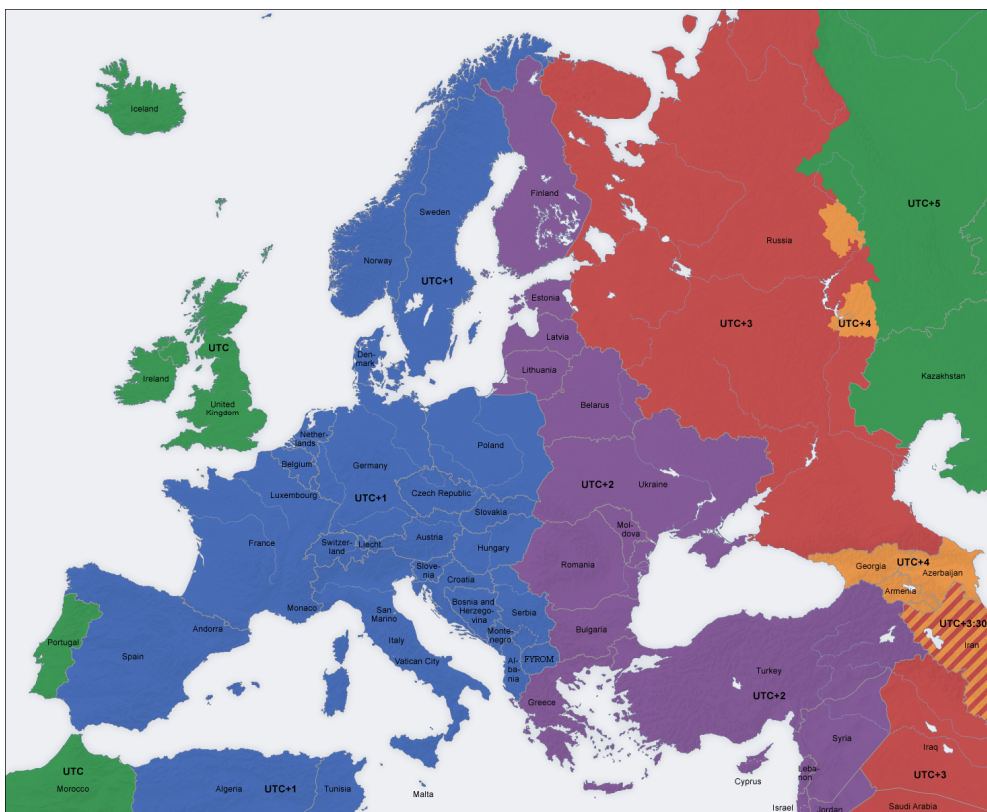
Σύμφωνα με ισολογισμό ισχύος για το Διαπλανητικό Δίκτυο Γης- Σελήνης που παρουσιάζεται στο Παράρτημα 2.4.3, και θεωρώντας συνθήκες καθαρού ουρανού προκύπτει ότι η ποιότητα της προσφερόμενης υπηρεσίας (Qos-Quality of Service) εξαρτάται άμεσα από το μήκος της επιλεγμένης διαδρομής. Επικεντρώνοντας την προσοχή στο τμήμα του δικτύου από το Διαπλανητικό σταθμό της Αθήνας μέχρι τη Σελήνη, γίνεται φανερό ότι υποψήφιες διαδρομές προς επιλογή είναι αυτές με το μικρότερο μήκος ζεύξης. Κατ'επέκταση, στην υποθετική περίπτωση όπου υπάρχει ενδιαφέρον για την εγκατάσταση μιας διαπλανητικής ζεύξης μεταξύ Αθήνας-Σελήνης, ως υποψήφιος ενδιάμεσος κόμβος θα πρέπει να επιλεγεί ο δορυφόρος που φαίνεται από το επίγειο σταθμό βάσης με τη μεγαλύτερη γωνία ανύψωσης, δηλαδή ο INMARSAT 4 F-2.

Στο υποθετικό σενάριο κατά το οποίο όλοι οι υπόλοιποι σταθμοί βάσης της Ευρώπης επιλέγουν με αυτό το κριτήριο το δορυφόρο που θα χρησιμοποιήσουν για επικοινωνία με άλλους επίγειους σταθμούς ή συνδρομητές προκύπτει ότι κάθε χώρα της Ευρώπης χρησιμοποιεί ένα ή δύο από το σύνολο των 10 δορυφόρων για τις ανάγκες της- υποθέτοντας όπως έχει αναφερθεί, ότι η Ευρώπη εξυπηρετείται από αυτούς μόνο τους δορυφόρους. Έχοντας αυτό ως δεδομένο κρίνεται σκόπιμο να μην ακολουθηθεί η ίδια στρατηγική για το Διαπλανητικό Διαδίκτυο ώστε να μην επιφορτίζεται με το σύνολο της διαπλανητικής κίνησης πάντα ο ίδιος δορυφόρος, ειδικά όταν αυτός εξυπηρετεί μια χώρα κατά την ώρα αιχμής της τηλεπικοινωνιακής της κίνησης. Εξάλλου όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο, η χωρητικότητα των δορυφόρων καθώς επίσης και οι

ενεργειακοί τους πόροι είναι περιορισμένοι επομένως, είναι αναγκαία η βέλτιστη χρησιμοποίησή τους.

2.3.2. Μοντέλο κίνησης και διαφορά ώρας

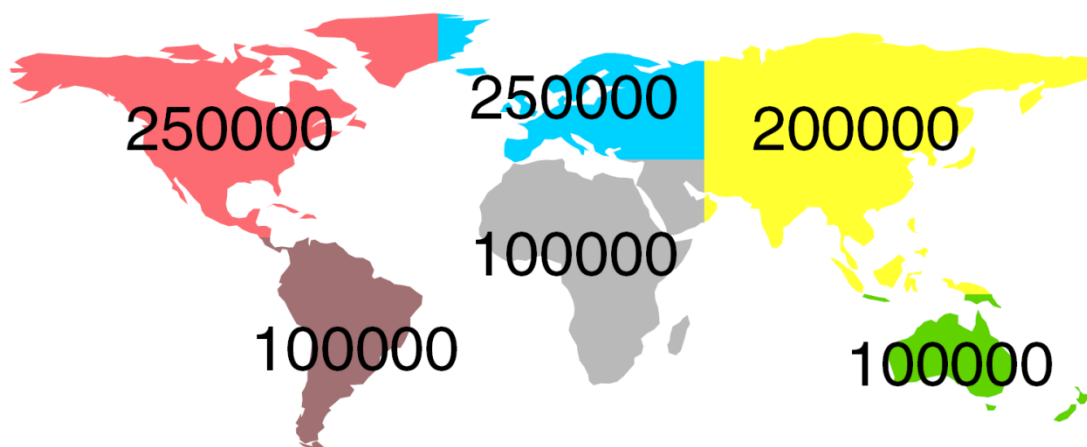
Το σκεπτικό του αλγόριθμου δρομολόγησης που υιοθετήθηκε βασίζεται στις διαφορές ώρας των χωρών της Ευρώπης. Στο Σχήμα 2-10 φαίνεται ότι η Ευρώπη χωρίζεται κατά τους χειμερινούς μήνες σε 4 ζώνες ώρας ενώ τους θερινούς σε 5 ζώνες. Στην πρώτη ζώνη με ώρα UTC (Coordinated Universal Time- Παγκόσμια Συγχρονισμένη Ώρα) ανήκουν η Μεγάλη Βρετανία, η Πορτογαλία και η Ισλανδία. Ώρα UTC+1 έχουν οι χώρες της Κεντρικής και Βόρειας Ευρώπης (Ισπανία, Γαλλία, Γερμανία, Ελβετία, Τσεχία, Σουηδία, Νορβηγία κλπ). Οι χώρες της Ανατολικής Ευρώπης (Ελλάδα, Μολδαβία, Βουλγαρία, Φινλανδία κλπ) και οι Τουρκία έχουν ώρα UTC+2. Τέλος το κομμάτι της Ρωσίας που ανήκει στην Ευρώπη έχει ώρα UTC+3.



Σχήμα 2-7: Ζώνες ώρας Ευρώπης και Ανατολικής Ασίας.

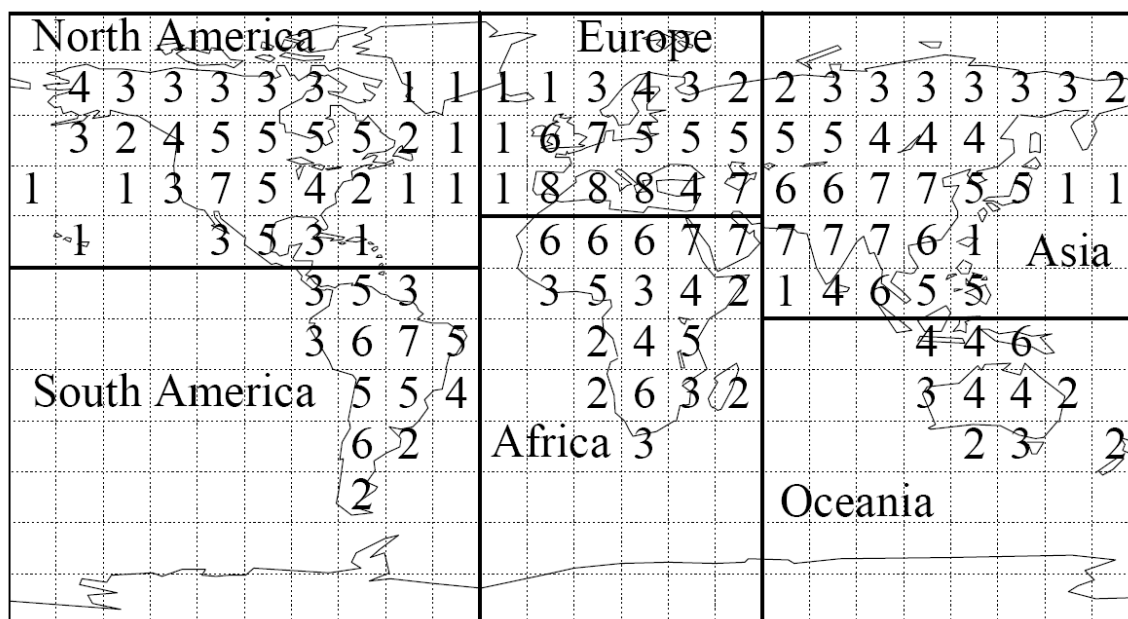
Στη συνέχεια, θα παρουσιαστεί ένα παγκόσμιο μοντέλο κίνησης για τη δορυφορική ζήτηση από το οποίο θα εξαχθούν τα δεδομένα για τη ζήτηση για δορυφορικές υπηρεσίες στην Ευρώπη. Στη συνέχεια η ζήτηση αυτή θα ληφθεί υπόψη στην ανάλυση για να προσδιοριστεί η βέλτιστη διαδρομή της Διαπλανητικής κίνησης.

Σύμφωνα με τις παραπομπές [13], [14] και την ανάλυση της [15], θεωρώντας ένα εκατομμύριο συνδρομητές δορυφορικών υπηρεσιών στον κόσμο η κατανομή τους στις 6 ηπείρους θα είναι αυτή του Σχήματος 2-8. Σε κάθε ήπειρο έχει προς το παρόν θεωρηθεί ομοιόμορφη κατανομή των συνδρομητών. Με βάση αυτή την κατανομή, στην Ευρώπη αντιστοιχεί το ένα τέταρτο της παγκόσμιας κίνησης προς δορυφορικά συστήματα. Υποθέτοντας ζήτηση μιας υπηρεσίας (πχ, τηλεφωνία ή τηλεόραση) με σταθερή μέση δραστηριότητα 5 mErl για το σύνολο των συνδρομητών η συνολική παγκόσμια προσφερόμενη δορυφορική κίνηση είναι $A=5000$ Erl. Έτσι προκύπτει ότι η ζήτηση για δορυφορικές υπηρεσίες (εκτός του Διαπλανητικού Διαδικτύου) για την Ευρώπη ανέρχεται στα 1250 Erlang.



Σχήμα 2-8: Παγκόσμια κατανομή 1000000 συνδρομητών δορυφορικών υπηρεσιών στις 6 ηπείρους.

Τα ανωτέρω δεδομένα αφορούν ομοιόμορφη κατανομή των συνδρομητών στην Ευρώπη. Από τη μελέτη [16], στην οποία προβλέπεται η αναμενόμενη κίνηση για MSS (Mobile Satellite Services), προκύπτει για το έτος 2005 η κατανομή της έντασης της κίνησης που φαίνεται στο Σχήμα 2-9. Υιοθετώντας αυτή τη μελέτη για το έτος 2005, εξάγεται και η χωρική κατανομή της ζήτησης για την Ευρώπη. Αναλογικά μπορεί να βρεθεί η ένταση της κίνησης για κάθε χώρα της Ευρώπης με βάση τον Πίνακα 2-3.

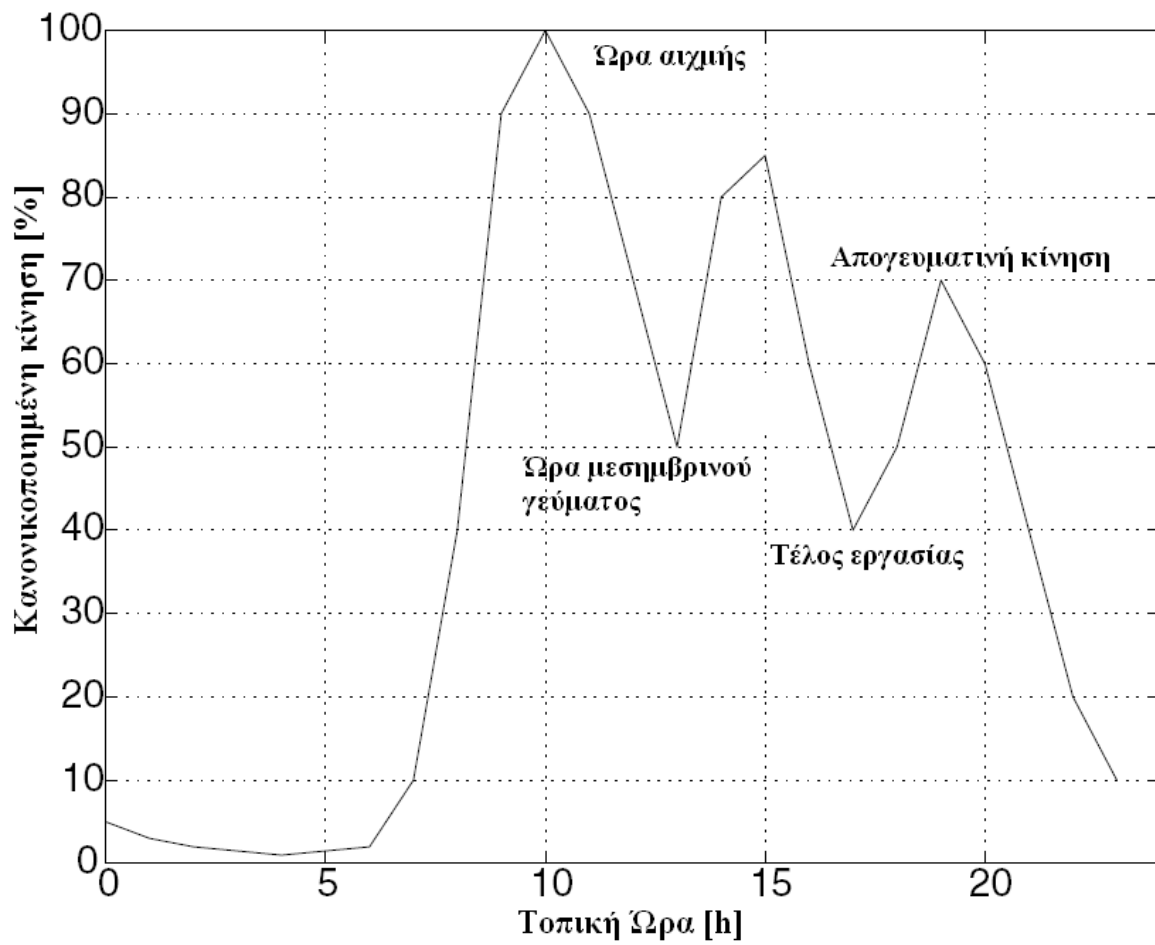


Σχήμα 2-9: Ένταση δορυφορικής κίνησης για το 2005 [16].

Επίπεδο Έντασης	1	2	3	4	5	6	7	8
Κίνηση (εκατομμύρια λεπτά/χρόνο)	1.6	6.4	16	32	95	191	239	318

Πίνακας 2-3: Επίπεδα έντασης κίνησης και αντιστοιχία σε εκατ. λεπτά/χρόνο για το 2005 [16].

Τέλος, έχοντας υποθέσει μια παγκόσμια σταθερή δραστηριότητα 5 mErI για όλους τους χρήστες, δεν έχουν ληφθεί υπόψη οι μεταβολές της ζήτησης κατά τη διάρκεια της ημέρας. Θεωρώντας τις ανωτέρω τιμές ως τιμές αιχμής, καθίσταται αναγκαία η εύρεση μιας χρονικής κατανομής της δορυφορικής ζήτησης. Από την κατανομή αυτή θα προσδιοριστούν οι ώρες αιχμής της τηλεπικοινωνιακής κίνησης για κάθε χώρα και, στη συνέχεια, με χρήση μοντέλων πολλαπλής ώρας αιχμής και πολλαπλής περιόδου (βλ. Κεφάλαιο 3) θα γίνει η βέλτιστη δρομολόγηση της Διαπλανητικής ζήτησης. Χωρίς βλάβη της γενικότητας μπορεί να θεωρηθεί η ίδια χρονική κατανομή της ζήτησης κατά τη διάρκεια μιας ημέρας για κάθε χώρα της Ευρώπης η οποία φαίνεται στο Σχήμα 2-10 [15]. Αν και υποτέθηκε κοινή η κατανομή για όλες τις χώρες της Ευρώπης, αυτή αφορά την τοπική ώρα κάθε χώρας. Αυτό σημαίνει ότι ανάγοντας την κατανομή αυτή για κάθε χρονική ζώνη σε ένα κοινό χρόνο αναφοράς, προκύπτει ότι οι ώρες αιχμής δεν ταυτίζονται αλλά παρουσιάζουν απόκλιση μίας έως και τεσσάρων ωρών. Αυτή η παρατήρηση οδηγεί στην υιοθέτηση πρωτοκόλλων πολλαπλής ώρας που έχουν χρησιμοποιηθεί σε επίγεια δίκτυα τηλεφωνίας και ATM δίκτυα [17], [18], [19].



Σχήμα 2-10: Κανονικοποιημένη ημερήσια δραστηριότητα για τις χώρες της Ευρώπης.

2.4. Παραρτήματα

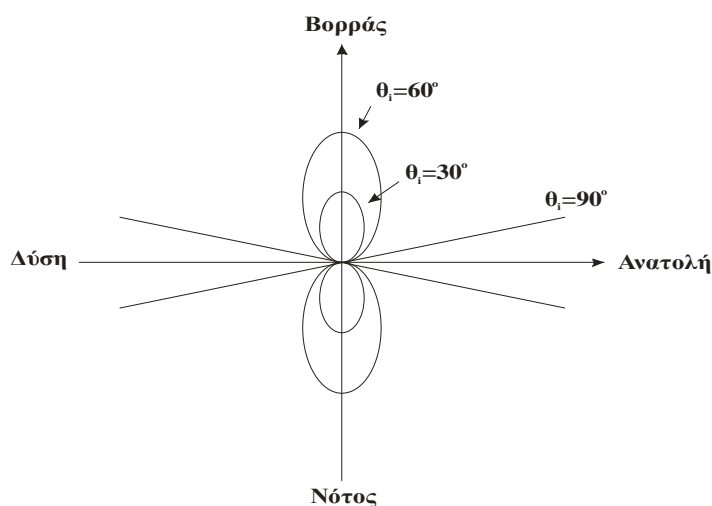
Παράρτημα 2.4.1: Γεωσύγχρονοι και γεωστατικοί δορυφόροι

Ο όρος *γεωσύγχρονος δορυφόρος* προσδιορίζει το δορυφόρο που έχει περίοδο περιστροφής ίση με την περίοδο περιστροφής της Γης, δηλαδή $T = 23h 56 \text{ min } 4.1 \text{ sec}$.

Από τη σχέση $T = 2\pi \sqrt{\frac{(R+h)^3}{GM}}$, όπου G η παγκόσμια σταθερά της βαρύτητας, M η μάζα της Γης, R η ακτίνα της Γης και h το υψόμετρο εγκατάστασης ενός γεωσύγχρονου δορυφόρου το υψόμετρο της γεωσύγχρονης τροχιάς προκύπτει 37.786 km. Η ταχύτητα ενός γεωσύγχρονου δορυφόρου στην τροχιά αυτή προκύπτει ίση με 3075 m/s. Τόσο η κλίση όσο και η εκκεντρότητα της γεωσύγχρονης τροχιάς μπορούν να έχουν οποιαδήποτε τιμή.

Το *ίχνος του δορυφόρου* επί της επιφάνειας της Γης ορίζεται ως η καμπύλη που διαγράφεται από το σημείο όπου η ευθεία που ενώνει το κέντρο της Γης με το δορυφόρο τέμνει τη γήινη επιφάνεια.

Στο σχήμα A-1 φαίνεται το *ίχνος* ενός γεωσύγχρονου δορυφόρου που εκτελεί κυκλική τροχιά (δηλ. έχει μηδενική εκκεντρότητα) για τρεις διαφορετικές γωνίες κλίσης (90° , 60° , 30°). Είναι σαφές ότι, για κλίση 90° , το *ίχνος* του δορυφόρου είναι μια ευθεία επί της γήινης επιφάνειας. Αντίστοιχα, φαίνονται τα σχήματα και για τις άλλες κλίσεις. Στην περίπτωση όπου η κλίση γίνει 0° , το *ίχνος* εκφυλίζεται σε ένα σημείο, και τότε ο δορυφόρος είναι γεωστατικός.



Σχήμα A-1: *Ίχνος δορυφόρου.*

Ο γεωστατικός δορυφόρος είναι ο γεωσύγχρονος δορυφόρος του οποίου η τροχιά έχει μηδενική εκκεντρότητα και κλίση. Σύμφωνα με την προηγούμενη παράγραφο, εφόσον το επίπεδο της τροχιάς του δορυφόρου είναι το ισημερινό επίπεδο, η τροχιά του είναι κυκλική και η ταχύτητα περιστροφής του ταυτίζεται με αυτή της Γης, ο δορυφόρος φαίνεται από τον επίγειο σταθμό ως ένα σταθερό σημείο στον ουρανό. Ωστόσο, οι γεωστατικοί δορυφόροι εμφανίζουν μικρή ολίσθηση κίνησης έτσι ώστε η τροχιά τους να παρουσιάζει μια μικρή κλίση $\theta_i \neq 0$. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται σε φαινόμενα έλξεων από τον ήλιο ή από τη σελήνη και, αν δεν ληφθεί πρόνοια, μπορεί να δημιουργήσει γωνία κλίσης αρκετών μοιρών κατά τη διάρκεια ενός έτους. Για το λόγο αυτό, η τροχιά του γεωστατικού δορυφόρου διορθώνεται περιοδικά ώστε να παραμένει στο ισημερινό επίπεδο.

Εκτός από τα πλεονεκτήματα της γεωστατικής τροχιάς που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.1.2 υπάρχουν και μειονεκτήματα. Συγκεκριμένα:

- Η χρονική καθυστέρηση της μετάδοσης είναι σημαντική (της τάξης των 250ms ανά απλή διαδρομή) λόγω της μεγάλης απόστασης μεταξύ δορυφόρου και επίγειου σταθμού, δυσκολεύοντας τις αμφίδρομες επικοινωνίες πραγματικού χρόνου.
- Κατά τα διαστήματα όπου ο ήλιος βρίσκεται μέσα στο εύρος του κύριου λοβού ακτινοβολίας του επίγειου σταθμού, οπότε αποτελεί ισχυρή πηγή θορύβου, παρατηρείται μείωση της ποιότητας της επικοινωνίας. Πάντως τα μικρά αυτά χρονικά διαστήματα ελάττωσης της ποιότητας των ζεύξεων είναι προβλέψιμα.
- Οι γεωστατικοί δορυφόροι δεν καλύπτουν περιοχές της Γης με γεωγραφικό πλάτος μεγαλύτερο των 75° . Αντίθετα, οι περιοχές αυτές καλύπτονται από δορυφόρους που κινούνται σε τροχιές που εμφανίζουν σημαντικές κλίσεις. Στην περίπτωση αυτή, απαιτείται μια σειρά δορυφόρων για την εξυπηρέτηση μιας περιοχής, ενώ ο επίγειος σταθμός πρέπει να διαθέτει ειδικό σύστημα παρακολούθησης δορυφόρων. Με τον τρόπο αυτό, όταν ένας δορυφόρος εξέρχεται από την περιοχή κάλυψης εντός της οποίας βρίσκεται ο επίγειος σταθμός, ο επόμενος δορυφόρος πρέπει να εισέρχεται

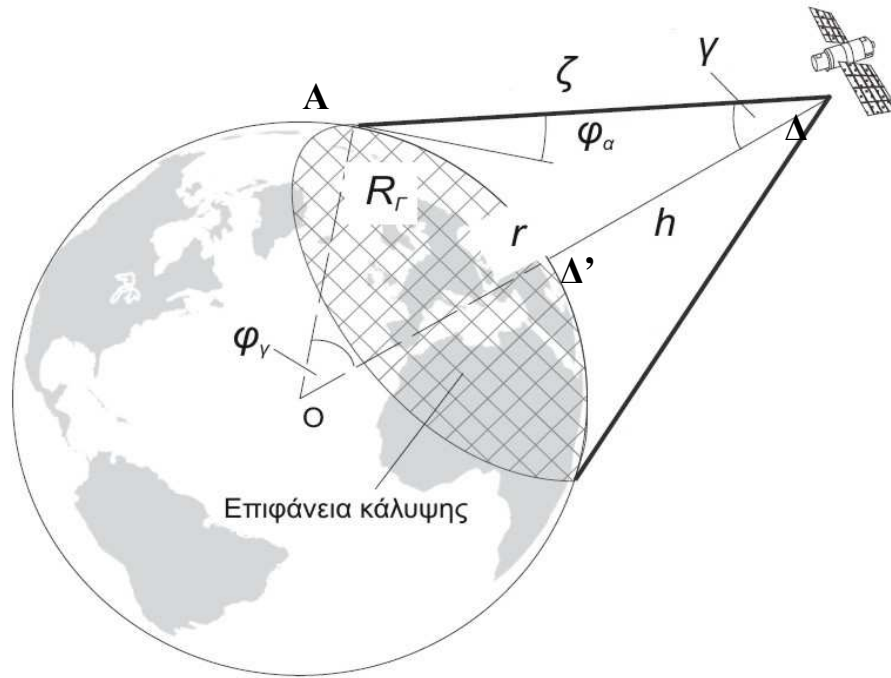
στην περιοχή κάλυψης και η δορυφορική ζεύξη του επίγειου σταθμού να περιάγεται στο νέο δορυφόρο.

- Οι γεωστατικοί δορυφόροι παρουσιάζουν αβεβαιότητα της τάξης μερικών εκατοστών της μοίρας ως προς την ακριβή τους θέση, που οφείλεται στην ελαφρά εκκεντρότητα της τροχιάς τους. Αυτό σημαίνει ότι η θέση του δορυφόρου προσδιορίζεται με αβεβαιότητα +40Km επί της τροχιάς του.
- Τέλος, λόγω κυρίως της μεγάλης απόστασης, οι γεωστατικοί δορυφόροι δεν προτείνονται προς το παρών για εφαρμογές δορυφορικών κινητών τηλεπικοινωνιών.

Παράρτημα 2.4.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά γεωστατικών δορυφόρων

Θα εξετασθούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της γεωστατικής τροχιάς καθώς, επίσης, και άλλες παράμετροι:

- Η *περιοχή κάλυψης*, δηλαδή η περιοχή της επιφάνειας της Γης από την οποία ο δορυφόρος φαίνεται με γωνία ανύψωσης μεγαλύτερη από μια προκαθορισμένη τιμή κατωφλίου ϕ_a . Γωνία ανύψωσης είναι η γωνία που σχηματίζεται από την εφαπτομένη στην επιφάνεια της Γης στο σημείο A και από την ευθεία που ενώνει τον επίγειο σταθμό A με το δορυφόρο (Σχήμα B-1).
- Η πραγματική ή *υπό κλίση απόσταση* του επίγειου σταθμού από το δορυφόρο ζ που συνδέεται άμεσα με τις χρονικές καθυστερήσεις και τις αποσβέσεις της τηλεπικοινωνιακής ζεύξης.
- Το χρονικό διάστημα κατά το οποίο ένας δορυφόρος είναι ορατός από τον επίγειο σταθμό με γωνία ανύψωσης μεγαλύτερη από μια προκαθορισμένη τιμή (εξαρτάται από την απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας).
- Η σχέση του αζιμούθιου (Σχήμα B-2) με τις γεωγραφικές συντεταγμένες του επίγειου σταθμού και του ίχνους του δορυφόρου.



Σχήμα Β-1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά γεωστατικού δορυφόρου.

Στο Σχήμα Β-1 φαίνεται η επιφάνεια κάλυψης του γεωστατικού δορυφόρου. Από κάθε σημείο αυτής ο δορυφόρος φαίνεται υπό γωνία ανύψωσης μεγαλύτερη από την προκαθορισμένη τιμή φ_{α} .

Ισχύει

$$\gamma = 90^{\circ} - \varphi_{\alpha} - \varphi_{\Gamma} \quad (\text{B.1})$$

Με εφαρμογή του νόμου των ημιτόνων στο τρίγωνο ΟΑΔ, οι γωνίες φ_{α} και φ_{Γ} συνδέονται μέσω των σχέσεων

$$\varphi_{\Gamma} = \cos^{-1} \left(\frac{R_{\Gamma} \cos \varphi_{\alpha}}{R_{\Gamma} - h} \right) - \varphi_{\alpha} \quad (\text{B.2})$$

$$\varphi_{\alpha} = \tan^{-1} \left(\frac{\cos \varphi_{\Gamma} - R_{\Gamma} / (R_{\Gamma} + h)}{\sin \varphi_{\Gamma}} \right) \quad (\text{B.3})$$

Επιπλέον, η επίκεντρη γωνία κάλυψης φ_{Γ} συνδέεται με τις γεωγραφικές συντεταγμένες του επίγειου σταθμού και του ίχνους του δορυφόρου επί της επιφάνειας της Γης μέσω της σχέσης

$$\varphi_{\Gamma} = \cos^{-1} [\cos \theta_e \cos \varphi_{es}] \quad (\text{B.4})$$

όπου

$$\varphi_{es} = |\varphi_e - \varphi_s| \quad (\text{B.5})$$

και θ_e το γεωγραφικό πλάτος του επίγειου σταθμού, ϕ_e το γεωγραφικό μήκος του επίγειου σταθμού, ϕ_s το γεωγραφικό μήκος του ίχνους του δορυφόρου (Δ' στο Σχήμα B-1).

Η επιφάνεια κάλυψης υπολογίζεται από το ολοκλήρωμα:

$$E_{καλ} = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\varphi_r} d\theta [R_r^2 \sin \theta] = 2\pi R_r^2 (1 - \cos \varphi_r) \quad (B.6)$$

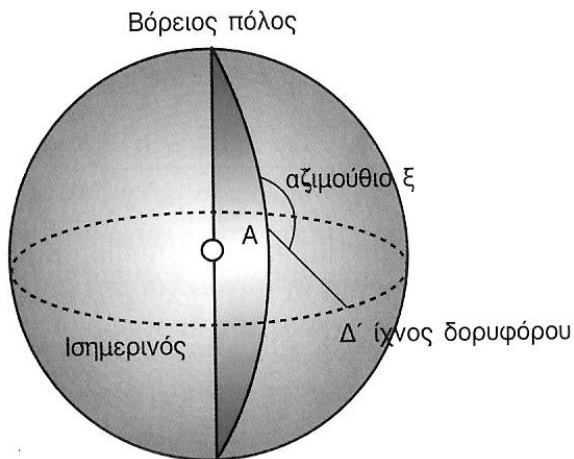
Αφού η συνολική επιφάνεια της Γης είναι $E_r=4\pi R_r^2$, το κλάσμα της επιφάνειας κάλυψης προκύπτει:

$$\frac{E_{καλ}}{E_r} = \frac{1}{2} (1 - \cos \varphi_r) \quad (B.7)$$

Η υπό κλίση απόσταση ζ του επίγειου σταθμού A από το δορυφόρο Δ με τη βοήθεια του νόμου των συνημιτόνων στο τρίγωνο OAD εκφράζεται από τη σχέση:

$$\zeta = \sqrt{(R_r \sin \varphi_\alpha)^2 + 2R_r h + h^2} - R_r \sin \varphi_\alpha \quad (B.8)$$

Η απόσταση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική διότι καθορίζει τόσο τη χρονική καθυστέρηση κατά τη μετάδοση των σημάτων όσο και την απόσβεση των μεταδιδόμενων σημάτων. Οι παράγοντες αυτοί λαμβάνονται σοβαρά υπόψη κατά τη σχεδίαση κάθε τηλεπικοινωνιακού συστήματος.



Σχήμα B-2: Ίχνος δορυφόρου – αζιμούθιο.

Το αζιμούθιο του δορυφόρου ξ σε ένα δεδομένο σημείο (Σχήμα B-2) είναι η γωνία που σχηματίζεται από την ευθεία που ενώνει τον επίγειο σταθμό με το ίχνος του

δορυφόρου Δ' και τη διεύθυνση του βορρά. Η γωνία ξ μετριέται κατά την ωρολογιακή φορά. Το αζιμούθιο υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$F = \tan^{-1}(\sin \theta_e / \sin \theta_e) \text{ και} \quad (\text{B.9})$$

- $\xi = 180^\circ + F$, όταν ο δορυφόρος βρίσκεται δυτικά του επίγειου σταθμού και αναφέρεται στο βόρειο ημισφαίριο
- $\xi = 180^\circ - F$, όταν ο δορυφόρος βρίσκεται ανατολικά του επίγειου σταθμού και αναφέρεται στο βόρειο ημισφαίριο
- $\xi = 360^\circ - F$, όταν ο δορυφόρος βρίσκεται δυτικά του επίγειου σταθμού και αναφέρεται στο νότιο ημισφαίριο
- $\xi = F$, όταν ο δορυφόρος βρίσκεται ανατολικά του επίγειου σταθμού και αναφέρεται στο νότιο ημισφαίριο

Τέλος, εφόσον η κίνηση του δορυφόρου γίνεται σε υψόμετρο h πάνω από την επιφάνεια της Γης (Σχήμα Β-1), ο δορυφόρος διέρχεται πάνω από τον επίγειο σταθμό με γωνία ανύψωσης μεγαλύτερη από μία προκαθορισμένη τιμή ϕ_r για χρονικό διάστημα ίσο προς:

$$\tau = \frac{\phi_r}{\pi} = \frac{T}{|1 \mp (T_r/T_\Delta)|} \quad (\text{B.10})$$

όπου T_r η περίοδος περιστροφής της Γης και T_Δ η περίοδος περιστροφής του δορυφόρου γύρω από τη Γη. Η σχέση αυτή είναι γενική και στην περίπτωση των γεωστατικών δορυφόρων προφανώς $T_r = T_\Delta$ και συνεπώς $\tau = \infty$.

Παράρτημα 2.4.3: Ισοζύγιο ισχύος (Link-budget Analysis)

Το πρώτο βήμα κατά τη σχεδίαση ενός δορυφορικού δικτύου είναι η ανάλυση του ισοζυγίου ισχύος της δορυφορικής ζεύξης (link budget analysis). Ο ισολογισμός ισχύος της ζεύξης θα προσδιορίσει το μέγεθος των απαιτούμενων κεραιών, τις απαιτήσεις σε ενισχυτές ισχύος, τη διαθεσιμότητα της ζεύξης και το ποσοστό σφαλμάτων μπιτ (BER).

Το μέγεθος της ισχύος που φθάνει στον τελικό προορισμό μιας δορυφορικής ζεύξης καθορίζει την ικανότητα του δέκτη να αναπαράγει αξιόπιστα τη μεταδιδόμενη

πληροφορία. Η ισχύς, P_R που λαμβάνεται στο δέκτη όταν δεν υπάρχουν άλλες απώλειες εκτός από αυτές του ελευθέρου χώρου είναι [20]:

$$P_R = P_T G_T G_R \frac{\lambda^2}{(4\pi R)^2} \quad (\Gamma.1)$$

όπου P_T η ισχύς εκπομπής της κεραίας, G_T το κέρδος της κεραίας εκπομπής, G_R το κέρδος της κεραίας λήψης, λ το μήκος κύματος του φέροντος και R η απόσταση πομπού δέκτη.

Από την ανωτέρω σχέση, θεωρώντας ίσα τα κέρδη των κεραιών όλων των δορυφόρων του υπό εξέταση δικτύου, κοινή τη φέρουσα συχνότητα και ίδια ισχύ εκπομπής, γίνεται φανερό ότι η ισχύς λήψης στον πομπό του δορυφόρου (ή του σταθμού βάσης στην κάτω ζεύξη) εξαρτάται μόνο από το μήκος της διαδρομής. Η μικρότερη διαδρομή αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη ισχύ λήψης.

Τα προηγούμενα ισχύουν έχοντας θεωρήσει ότι δεν υπάρχουν άλλες απώλειες εκτός από αυτές του ελευθέρου χώρου. Στη γενική περίπτωση η Σχέση (Γ.1) γράφεται:

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R}{L} \quad (\Gamma.2)$$

όπου

$$L = L_{\varepsilon\chi} L_v = L_{\varepsilon\chi} \cdot \prod_{i=1}^6 (L_i) \quad (\Gamma.3)$$

$L_{\varepsilon\chi}$ οι απώλειες ελευθέρου χώρου, L_1 οι απώλειες μεταξύ της εξόδου του πομπού και της κεραίας εκπομπής, L_2 οι απώλειες λόγω διάδοσης στην ατμόσφαιρα και την ιονόσφαιρα, L_3 οι απώλειες νεφώσεων και βροχόπτωσης, L_4 οι απώλειες που οφείλονται σε αποπόλωση του Η/Μ κύματος κατά τη διάδοση, L_5 οι απώλειες αποπροσανατολισμού των κεραιών που οφείλονται κυρίως σε ατελή σταθεροποίηση του γεωστατικού δορυφόρου ή τοποθέτηση του επίγειου σταθμού κοντά στα όρια της κάλυψης και L_6 οι απώλειες μεταξύ της κεραίας και της εισόδου το δέκτη.

Κεφάλαιο 3: Σχεδίαση και μοντελοποίηση δικτύων πολλαπλής-ώρας και πολλαπλής-περιόδου

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν μοντέλα σχεδίασης δικτύων πολλαπλής ώρας και πολλαπλής περιόδου τα οποία και θα χρησιμοποιηθούν στο Διαπλανητικό Δίκτυο. Υπάρχουν δύο σημαντικές κατηγορίες προβλημάτων σχεδίασης δικτύων που θα συζητηθούν στο κεφάλαιο αυτό: 1) πολλαπλής ώρας αιχμής (multi-busy-hour), ή πολλαπλής ώρας, και 2) πολλαπλής χρονικής περιόδου (multi-time-period), πολλαπλής περιόδου οργάνωσης (multi-planning-period), ή απλά πολλαπλής περιόδου (multi-period) [21].

Η πολλαπλή ώρα αναφέρεται στη θεώρηση διαφορετικών μητρών κίνησης για διαφορετικές ώρες κατά τη διάρκεια μιας ημέρας. Η «πολλαπλής ώρας αιχμής» συμπεριφορά της κίνησης παρατηρείται ειδικά όταν το δίκτυο εκτείνεται σε περιοχές διαφορετικών ζωνών ώρας και παρουσιάζει διαφορετικές αιχμές για τις διαφορετικές απαιτήσεις σε διαφορετικούς χρόνους, δηλ., μη-σύμπτωση των ωρών αιχμής. Ενδεικτικά, αυτό συμβαίνει στις ηπειρωτικές ΗΠΑ λόγω πολλαπλών ζωνών ώρας. Ας θεωρηθεί η τηλεφωνική κίνηση στις 8:00 πμ το πρωί στην ανατολική ζώνη ώρας στις ΗΠΑ για πόλεις της ανατολικής ακτής όπως η Νέα Υόρκη, η Βοστώνη, και η Ουάσιγκτον. Η κίνηση αναμένεται να αυξηθεί μεταξύ των πόλεων της ανατολικής ακτής (λόγω των γραφείων που ανοίγουν στις 8:00 πμ), αλλά είναι απίθανο να παρατηρηθεί τηλεπικοινωνιακή κίνηση μεταξύ πόλεων της ανατολικής και της δυτικής ακτής (όπου βρίσκονται πόλεις όπως το Σαν Φρανσίσκο, το Σιάτλ, και το Λος Άντζελες), ή μεταξύ των πόλεων στη δυτική ακτή όπου η τοπική ώρα είναι 3:00 πμ. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι με δρομολόγηση που είναι δυναμική ή τουλάχιστον χρονομεταβλητή κατά τη διάρκεια της ημέρας καθίσταται εκμεταλλεύσιμη η προηγουμένως αχρησιμοποίητη χωρητικότητα του δικτύου. Για παράδειγμα, μια κλήση στις 8:00 πμ μεταξύ Βοστώνης και Ουάσιγκτον (και οι δύο πόλεις βρίσκονται στην ανατολική ακτή), μπορεί ενδεχομένως να δρομολογηθεί μέσω του Σαν Φρανσίσκο (πόλη που βρίσκεται στη δυτική ακτή). Άλλωστε, με την εκμετάλλευση της μη-σύμπτωσης των ωρών αιχμής σε συνδυασμό με δυναμική (χρονικά εξαρτημένη) δρομολόγηση, υλοποιήθηκε στα μέσα του 80 για πρώτη φορά το πρωτόκολλο δυναμικής δρομολόγησης για το τηλεφωνικό δίκτυο των ηπειρωτικών ΗΠΑ αποκαλούμενο “δυναμική

μη-ιεραρχική δρομολόγηση” (DNHR-dynamic non-hierarchical routing). Επιπλέον, υπολογίστηκε ότι το δίκτυο DNHR επιτύγχανε μείωση του κόστους της τάξης του 16% σε σχέση με ένα δίκτυο που χρησιμοποιούσε την αρχική ιεραρχική δρομολόγηση παρέχοντας την ίδια ποιότητα υπηρεσίας [19]. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα μοντέλα πολλαπλής ώρας εμφανίζονται κυρίως στο σχεδιασμό δικτύων κίνησης ή υπηρεσιών εφαρμογής.

Υπάρχει ακόμα μια κατηγορία σχεδιαστικών προβλημάτων όπου ο παράγοντας χρόνος διαδραματίζει σημαντικό ρόλο. Τα προβλήματα αυτά αναφέρονται ως προβλήματα σχεδίασης δικτύου (network planning) ή προβλήματα σχεδίασης χωρητικότητας δικτύου (capacity planning) και προκύπτουν κατά τη σχεδίαση δικτύων μεταγωγής όταν αυτά εξετάζονται κατά τη διάρκεια μιας περιόδου σχεδίασης ή ενός χρονικού ορίζοντα. Για παράδειγμα, ολόκληρη η περίοδος σχεδίασης θα μπορούσε να είναι δύο χρόνια και να διαιρείται σε τριμηνιαίες χρονικές περιόδους, έτσι ώστε να υπάρχει νέα ζήτηση σε κάθε περίοδο. Ανάλογα με τις δυνατότητες που παρέχονται από την τεχνολογία δικτύωσης και το σύστημα διαχείρισης του δικτύου, μπορεί να διατίθεται νέα χωρητικότητα σε κάθε περίοδο ή η νέα χωρητικότητα να είναι διαθέσιμη μόνο μετά την πάροδο, παραδείγματος χάρη, τριών χρονικών περιόδων. Επιπλέον, η δρομολόγηση σε δίκτυα μεταγωγής που γίνεται σε μια περίοδο μπορεί να είναι ή και να μην είναι αναδιατάξιμη σε μια επόμενη περίοδο-πράγμα που εξαρτάται μερικώς από το κόστος αναδιάταξης της δρομολόγησης. Κατά συνέπεια, ένας στόχος θα μπορούσε να είναι ο καθορισμός του βέλτιστου δικτυακού κόστους κατά τη διάρκεια πολλαπλών περιόδων. Τα προβλήματα πολλαπλής-περιόδου έχουν και αυτά πολλαπλές μήτρες ζήτησης. Σε αντίθεση όμως με την περίπτωση της πολλαπλής ώρας, παρουσιάζονται νέοι ή αθροιστικοί όγκοι ζήτησης σε κάθε περίοδο (προστίθενται δηλαδή σε αυτούς των προηγούμενων περιόδων) που πρέπει να δρομολογηθούν στα δίκτυα. Τέτοιες καταστάσεις είναι κοινές στα δίκτυα μεταγωγής.

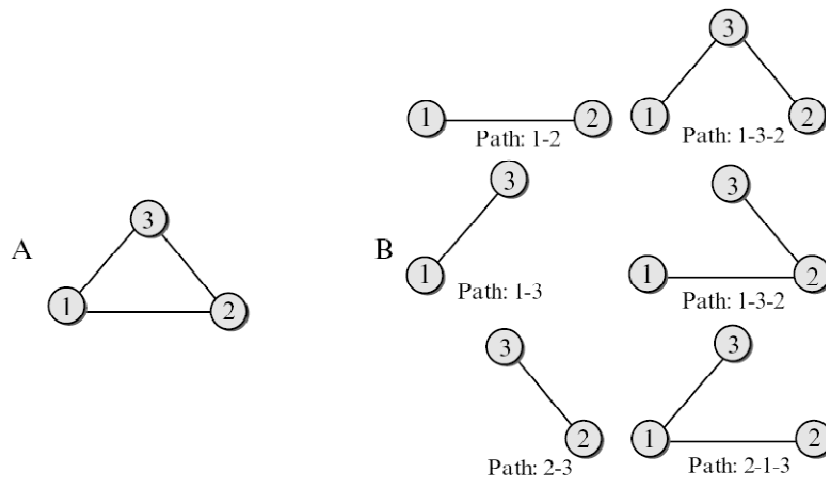
3.1. Σχεδίαση πολλαπλής-ώρας

Στην παράγραφο αυτή, θα παρουσιαστούν διάφορες παραλλαγές προβλημάτων πολλαπλής ώρας ανάλογα με τις δυνατότητες της τεχνολογίας δικτύωσης. Αρχικά

παρουσιάζεται ένα παράδειγμα που καταδεικνύει το όφελος της θεώρησης πολλαπλών ωρών σε ένα δίκτυο.

3.1.1. Απεικόνιση μοντελοποίησης προβλημάτων πολλαπλής ώρας

Καταρχήν, θα παρουσιαστεί ένα παράδειγμα σχεδίασης θεωρώντας ένα δίκτυο τριών κόμβων με αμφίδρομη κίνηση όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-1. Έστω ότι δίνονται οι όγκοι ζήτησης για τρεις διαφορετικές ώρες κατά τη διάρκεια της ημέρας (πρωί, απόγευμα, βράδυ)· αυτό το πρόβλημα αναφέρεται ως πρόβλημα σχεδίασης τριών ωρών. Θα χρησιμοποιηθεί ο όρος *χρονικό παράθυρο* αντί της *ώρας* δεδομένου ότι δεν αναφέρεται απαραίτητα σε κάθε ώρα μιας ημέρας. Προφανώς, σε αυτό το παράδειγμα υπάρχουν τρία χρονικά παράθυρα (όχι πραγματικά ώρες). Οι όγκοι ζήτησης δίνονται στον Πίνακα 3-1.



Σχήμα 3-11: Α) Δίκτυο τριών κόμβων. Β) Οι πιθανές διαδρομές (paths) για το δίκτυο 3 κόμβων.

Υπάρχει ένα λεπτό σημείο για τη μήτρα κίνησης προβλημάτων πολλαπλής-ώρας. Ο όγκος ζήτησης για ένα συγκεκριμένο χρονικό παράθυρο (ώρα) αφορά μόνο το παράθυρο αυτό, δηλαδή εξαφανίζεται και δεν προστίθεται στο επόμενο χρονικό παράθυρο. Κατά συνέπεια, αυτό το σενάριο είναι εφαρμόσιμο κυρίως σε δίκτυα κίνησης όπως τα δίκτυα IP ή τα δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος (circuit-switched networks). Ως ανάλογο πρόβλημα μπορεί να θεωρηθεί η οδική κυκλοφορία που μπορεί να έχει διαφορετικό όγκο κίνησης κατά τη διάρκεια της ημέρας. Το ερώτημα που ανακύπτει είναι πόση χωρητικότητα απαιτείται για να ικανοποιηθούν οι όγκοι ζήτησης του προβλήματος πολλαπλής ώρας.

Ζεύγος Ζήτησης	Πρωί (Π)	Απόγευμα (Α)	Βράδυ (Β)
{1,2}	5	11	8
{1,3}	6	13	6
{2,3}	10	2	7

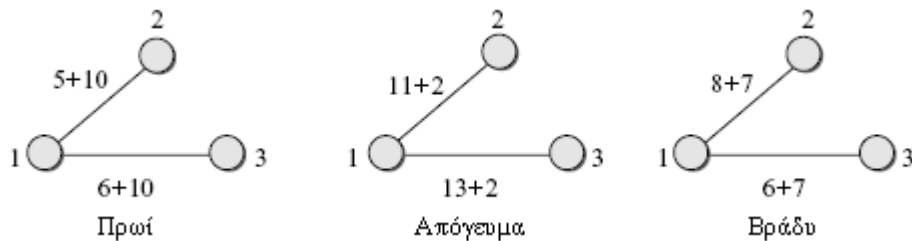
Πίνακας 3-1: Δεδομένα για το πρόβλημα σχεδίασης τριών ωρών (Δίκτυο τριών κόμβων)

Για να γίνει κατανοητό το πρόβλημα σχεδιασμού χωρητικότητας πολλαπλής-ώρας, έχει υποτεθεί για το παράδειγμα ότι η χωρητικότητα των συνδέσεων είναι μια συνεχής μεταβλητή και το μοναδιαίο κόστος χωρητικότητας σε κάθε σύνδεση είναι 1, κατά συνέπεια, το συνολικό κόστος του δικτύου δεν είναι παρά η συνολικά απαιτούμενη χωρητικότητα. Προκειμένου να ληφθεί η ελάχιστη χωρητικότητα, μια δυνατότητα είναι να ληφθούν υπόψη οι αιχμές των όγκων ζήτησης κατά τη διάρκεια όλων των χρονικών περιόδων, για κάθε ζεύγος ζήτησης χωριστά. Κατά συνέπεια για το {1,2}, έχουμε έναν όγκο ζήτησης 11 ($= \max\{5, 11, 8\}$) (μονάδες), ομοίως, ο μέγιστος όγκος ζήτησης είναι 13 και 10 για τα ζεύγη {1,3} και {2,3}, αντίστοιχα. Εάν τώρα ληφθεί υπόψη μόνο αυτός ο μέγιστος όγκος, έχουμε στην ουσία μια ώρα αιχμής, και μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον κανόνα κατανομής ελάχιστης διαδρομής (βλ. Παράρτημα 3.3.1) για να καθορίσουμε τη συνολική χωρητικότητα που απαιτείται. Αυτή προκύπτει ότι είναι 34 ($= 11+13+10$) μονάδες.

Εξετάζοντας χωριστά τους όγκους ζήτησης, μπορεί να δειχτεί ότι το βέλτιστο κόστος του δικτύου είναι χαμηλότερο σε σύγκριση με το κόστος που προκύπτει όταν εξετάζονται ως μήτρα ζήτησης μιας ώρας αιχμής. Για αυτό το παράδειγμα, το βέλτιστο κόστος δικτύου είναι 27.5 ($= 11.5 + 12.5 + 3.5$) εάν ληφθεί υπόψη ότι η κατανομή της ροής επί των διαφορετικών διαδρομών μπορεί να διαφέρει από το ένα χρονικό παράθυρο στο άλλο. Η σχετική βέλτιστη κατανομή ροής επί των διαφορετικών διαδρομών παρουσιάζεται στον πίνακα 3-2. Να σημειωθεί ότι οι ροές υποτέθηκαν πλήρως αναδιατάξιμες ανεξάρτητα από το χρόνο της ημέρας. Επίσης βλέπουμε ότι ο κανόνας κατανομής ελάχιστης διαδρομής, που ισχύει στην περίπτωση της μήτρας ενιαίας ζήτησης, δεν ισχύει για το πρόβλημα πολλαπλής ώρας.

Ζεύγος Ζήτησης	Διαδρομή	Πρωί (Π): ροή	Απόγευμα (Α):ροή	Βράδυ (Β): ροή
{1,2}	1-2	5.0	11.0	8.0
	1-3-2	—	—	—
{1,3}	1-3	6.0	12.5	6.0
	1-2-3	—	0.5	—
{2,3}	2-3	3.5	2.0	3.5
	2-1-3	6.5	—	3.5

Πίνακας 3-2: Λύση για δίκτυο τριών κόμβων: όγκος ζήτησης πολλαπλής ώρας (πλήρως αναδιατάξιμη)



Σχήμα 3-2: Μη-διακλαδιζόμενη λύση για τρεις κόμβους.

Θα παρουσιαστούν στη συνέχεια δύο παραλλαγές αυτού του προβλήματος σχεδίασης. Αρχικά εξετάζεται η παραλλαγή όπου ο όγκος ζήτησης για ένα ζεύγος ζήτησης δεν είναι διαχωρίσιμος σε πολλαπλές διαδρομές κατά τη διάρκεια ενός χρονικού παραθύρου, αυτό αποκαλείται *μη-διακλαδιζόμενη δρομολόγηση*. Ωστόσο παρέχεται η ευελιξία η μη-διακλαδιζόμενη διαδρομή που επιλέχτηκε να μπορεί να διαφέρει από το ένα χρονικό παράθυρο στο άλλο για ένα συγκεκριμένο ζεύγος ζήτησης-αυτό μπορεί να αναφερθεί ως *αδιαίρετη (μη-διακλαδιζόμενη) επαναπροσδιορίσιμη (αναδιατάξιμη) διαμόρφωση (unsplittable rearrangeable configuration)*. Μια δεύτερη παραλλαγή είναι να μην παρέχεται η δυνατότητα επαναπροσδιορισμού μη-διακλαδιζόμενης διαδρομής από το ένα χρονικό παράθυρο στο άλλο (*unsplittable nonrearrangeable configuration*). Και για τις δύο αυτές παραλλαγές, η βέλτιστη λύση είναι να δρομολογηθεί ο όγκος της ζήτησης για το {2,3} μέσω της διαδρομής 2-1-3 ανεξάρτητα από την ώρα της ημέρας (Σχήμα 3-2) (αυτό αποτελεί βεβαίως μια διαφορετική λύση από τη διαχωρίσιμη πλήρως-αναδιατάξιμη περίπτωση που συζητήθηκε ήδη). Απαιτούνται 15 μονάδες χωρητικότητας στη ζεύξη 1-2 και 16 μονάδες στη ζεύξη 1-3, κατά συνέπεια απαιτούνται συνολικά 31 μονάδες για να δρομολογηθεί όλη η κίνηση. Πρέπει να σημειωθεί ότι για αυτό το παράδειγμα η βέλτιστη απόφαση είναι η ίδια και για τις δύο παραλλαγές (*unsplittable+rearrangeable* και

unsplittable+ nonrearrangeable), αν και η βέλτιστη λύση για τις δύο παραλλαγές μπορεί γενικά να διαφέρει. Συμπτωματικά, η περίπτωση του unsplittable non-reconfigurable σχεδιασμού λαμβάνοντας υπόψη κίνηση πολλαπλής ώρας οδηγεί σε φτηνότερο σχεδιασμό σε σχέση με την περίπτωση που χρησιμοποιήθηκε η -ενιαία μέγιστης ώρας αιχμής - κυκλοφορία για το σχεδιασμό του δικτύου (που μοιάζει με unsplittable non-reconfigurable υλοποίηση).

Οι παραλλαγές που παρουσιάστηκαν δίνουν την εντύπωση ότι η επιλογή της διαχωρίσιμης δρομολόγησης, με επιτρεπτή την αναδιάταξη για διαφορετικά χρονικά παράθυρα κατά τη διάρκεια της ημέρας, οδηγεί στον πιο οικονομικό σχεδιασμό. Ωστόσο το πλεονέκτημα αυτό είναι υπαρκτό μόνο όταν οι όγκοι ζήτησης μεταξύ διαφορετικών ζευγών κόμβων εμφανίζουν μέγιστο τους σε διαφορετικά χρονικά παράθυρα κατά τη διάρκεια της ημέρας λόγω μη σύμπτωσης των ωρών αιχμής.

3.1.2. Μοντέλα διαστασιολόγησης πολλαπλής ώρας

Πρώτα παρουσιάζεται η περίπτωση όπου οι διαδρομές και οι ροές είναι πλήρως αναδιατάξιμες μεταξύ χρονικών παραθύρων και θεωρούνται αρθρωτές (modular) μεταβλητές για τη χωρητικότητα των ζεύξεων (σε αντίθεση με το σχήμα (3-1) όπου οι χωρητικότητες θεωρήθηκαν συνεχείς μεταβλητές). Με χρήση του δείκτη t σηματοδοτείται η χρονική μεταβλητότητα έτσι ώστε να ενσωματωθεί στους όγκους ζήτησης η εξάρτηση από την ώρα της ημέρας. Δεδομένου ότι ο όγκος της ροής και η διαδρομή που επιλέχθηκε μπορεί να διαφέρουν σε διαφορετικούς χρόνους της ημέρας, είναι αναγκαίο το διάνυμα ροής x να απεικονίζει και αυτή τη διαφοροποίηση. Τέλος, η χωρητικότητα y μιας ζεύξης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε όλα τα χρονικά παράθυρα, αφού οι μεταβλητές της χωρητικότητας δεν εξαρτώνται από το χρόνο. Ολόκληρο το μοντέλο παρουσιάζεται παρακάτω.

Αρθρωτές ζεύξεις (Modular links), Πολλαπλή ώρα, Αναδιατάξιμο

δείκτες:

$d = 1, 2, \dots, D$ ζήτηση

$t = 1, 2, \dots, T$ ώρες αιχμής κίνησης

$p = 1, 2, \dots, P_d$ υποψήφιες διαδρομές για τη ζήτηση d

$e = 1, 2, \dots, E$ ζεύξεις

σταθερές:

$\delta_{edp} = 1$, αν η ζεύξη e ανήκει στη διαδρομή p φέροντας τη ζήτηση d ; 0, αλλιώς
 h_{dt} όγκος της ζήτησης d το χρόνο t
 ξ_e κόστος ενός module χ^2 ρητικότητας
 M μέγεθος του module της χ^2 ρητικότητας ζεύξης

μεταβλητές:

x_{dpt} η ροή που κατανεμήθηκε στη διαδρομή p το χρόνο t (συνεχής, μη-αρνητική)
 y_e η χ^2 ρητικότητα της ζεύξης e εκφρασμένη σε modules (μη-αρνητικός ακέραιος)

σκοπός

ελαχιστοποίηση $F = \sum_e \xi_e y_e$ (3.1.1α)

περιορισμοί

$\sum_p x_{dpt} = h_{dt}, \quad d = 1, 2, \dots, D \quad t = 1, 2, \dots, T$ (3.1.1β)

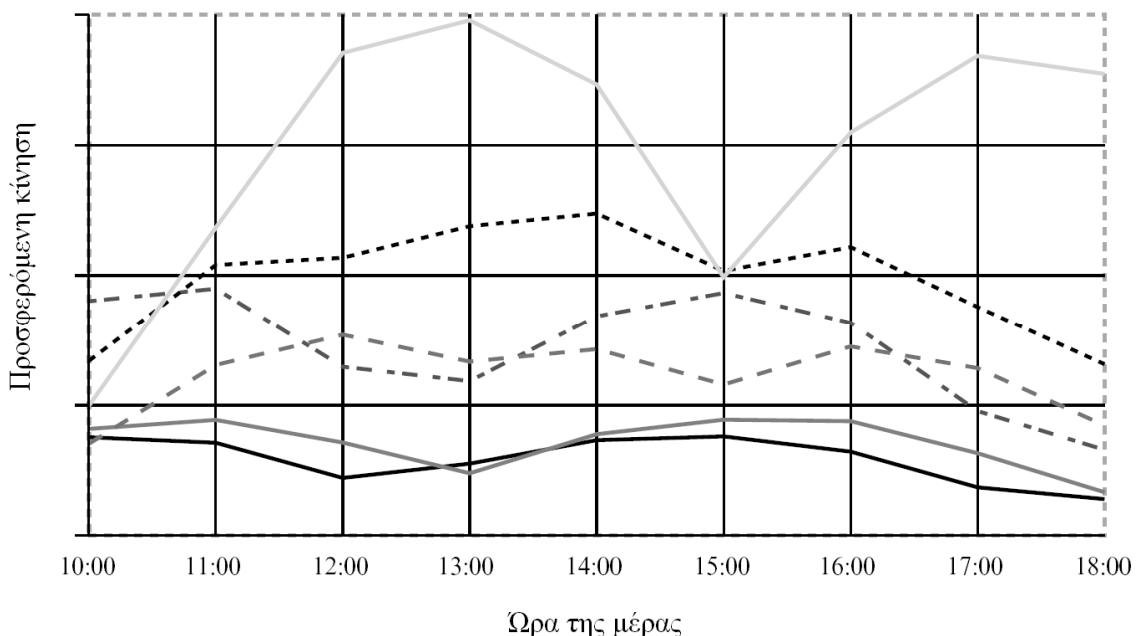
$\sum_d \sum_p \delta_{edp} x_{dpt} \leq M y_e, \quad e = 1, 2, \dots, E \quad t = 1, 2, \dots, T.$ (3.1.1γ)

Η (3.1.1β) καθορίζει ένα ξεχωριστό σύνολο περιορισμών για κάθε ώρα t . Το φορτίο της ζεύξης στο αριστερό σκέλος της (3.1.1γ) υπολογίζεται ξεχωριστά για κάθε ώρα t , και πρέπει να ικανοποιείται από τη χ^2 ρητικότητα που απαιτείται για κάθε ζεύξη e ανεξαρτητάς της ώρας της ημέρας αφού ο περιορισμός της χ^2 ρητικότητας (3.1.1γ) στην πραγματικότητα σφραγίζει της μεταβλητές της ροής x_{dp} κατά τη διάρκεια διαφορετικών ωρών. Το σύνολο των υποψήφιων διαδρομών θεωρείται ίδιο για κάθε ώρα. Αν το σύνολο των υποψήφιων διαδρομών είναι διαφορετικό από μια ώρα στην επόμενη, τότε ο δείκτης του χρόνου t μπορεί να ενσωματωθεί στη περιγραφή του συνόλου των διαδρομών. Επιπρόσθετα, η σταθερά της ζεύξης-διαδρομής δ μπορεί να αντικατοπτρίσει αυτή την αλλαγή χ^2 ρητικής να απαιτείται σημαντική αλλαγή στην αναπαράσταση του παραπάνω μοντέλου.

Μπορεί ακόμα να σημειωθεί ότι η περίπτωση της συνεχούς μεταβλητής της χ^2 ρητικότητας εξετάζεται εύκολα με την χαλάρωση της απαίτησης για αρθρικές (modular) μεταβλητές χ^2 ρητικότητας. Από προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού είναι γνωστό ότι η συνεχής περίπτωση είναι λιγότερο χρονοβόρα σε επίλυση σε σχέση με

την περίπτωση κατά την οποία κάποιες μεταβλητές, όπως οι μεταβλητές της χωρητικότητας, παίρνουν ακέραιες τιμές [22].

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι όγκοι της ζήτησης μπορεί να διαφέρουν σημαντικά από ώρα σε ώρα στο πρόβλημα πολλαπλής ώρας, κυρίως λόγω μη σύμπτωσης των ωρών αιχμής. Στο σχήμα 3-3 όπου φαίνεται η μεταβολή της κίνησης από της 10:00 το πρωί μέχρι της 18:00 το απόγευμα (EST-Eastern Standard Time,) για επιλεγμένο σύνολο ζευγών ζήτησης ενός δικτύου κίνησης 10 κόμβων. Σημειώνεται ότι κάποια ζευγάρια παρουσιάζουν ένα «βύθισμα» στις 15:00- αυτό αφορά πόλεις που βρίσκονται σε PST (Pacific Standard Time, ζώνη ώρας δυτικής ακτής ΗΠΑ) ζώνη ώρας όπου η τοπική ώρα είναι 12 το μεσημέρι.



Σχήμα 3-3: Φορτίο ανά ζευγάρι επιλεγμένων πόλεων. Μεταβολή της κίνησης για ένα επιλεγμένο σύνολο ζευγών πόλεων κατά τη διάρκεια μιας μέρας για ένα δίκτυο που εκτείνεται στις Ηπειρωτικές ΗΠΑ (ώρα σε Ανατολική Ζώνη ώρας στις ΗΠΑ).

Επιστρέφοντας στο μοντέλο (3.1.1) θα μελετηθεί μια σημαντική παραλλαγή του προβλήματος όταν ο όγκος της ζήτησης δεν μπορεί να διαχωριστεί σε πολλαπλές διαδρομές (μη διακλαδιζόμενη δρομολόγηση) μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό παράθυρο, αλλά μπορεί να επιλεχθεί διαφορετική διαδρομή για την αδιαίρετη ροή σε επόμενο χρονικό παράθυρο. Αυτό παρουσιάστηκε στο παράδειγμα με τους τρεις κόμβους στο εδάφιο 3.1.1 (για την περίπτωση όπου η μεταβλητή της χωρητικότητας της ζεύξης ήταν συνεχής). Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το γενικό μοντέλο παρακάτω με την

εισαγωγή της δυαδικής μεταβλητής u για την επιλογή μιας διαδρομής κατά τη διάρκεια συγκεκριμένου χρονικού παραθύρου.

Αρθρωτές ζεύξεις, Πολλαπλή ώρα, Αναδιατάξιμο, Αδιαίρετο μεταβλητές:

u_{dpt} δυαδική μεταβλητή που αναφέρεται στη ροή που έχει ανατεθεί στη διαδρομή p της ζήτησης d στο χρόνο t

y_e η χωρητικότητα της ζεύξης e εκφρασμένη σε modules (μη-αρνητικός ακέραιος)

σκοπός

ελαχιστοποίηση $F = \sum_e \xi_e y_e$ (3.1.2α)

περιορισμοί

$\sum_p u_{dpt} = 1, \quad d = 1, 2, \dots, D \quad t = 1, 2, \dots, T$ (3.1.2β)

$\sum_d h_{dt} \sum_p \delta_{edp} u_{dpt} \leq M y_e, \quad e = 1, 2, \dots, E \quad t = 1, 2, \dots, T.$ (3.1.2γ)

Ένας ακόμα περιορισμός που μπορεί να μπει στο πρόβλημα είναι η μη-αναδιαταξιμότητα μεταξύ χρονικών παραθύρων, δηλαδή η επιλεγμένη διαδρομή παραμένει αμετάβλητη ανεξάρτητα από την ώρα της ημέρας. Ωστόσο, η χωρητικότητα πρέπει ακόμα να λαμβάνει υπόψη και να αντικατοπτρίζει τη μεταβολή στον όγκο της ζήτησης από ώρα σε ώρα.

Αρθρωτές ζεύξεις, Πολλαπλή ώρα, Μη-Αναδιατάξιμο, Αδιαίρετο μεταβλητές:

u_{dp} δυαδική μεταβλητή που αναφέρεται στη ροή που έχει ανατεθεί στη διαδρομή p της ζήτησης d

y_e η χωρητικότητα της ζεύξης e εκφρασμένη σε modules (μη-αρνητικός ακέραιος)

σκοπός

ελαχιστοποίηση $F = \sum_e \xi_e y_e$ (3.1.3α)

περιορισμοί

$$\sum_p u_{dp} = 1, \quad d = 1, 2, \dots, D \quad (3.1.3\beta)$$

$$\sum_d h_{dt} \sum_p \delta_{edp} u_{dp} \leq My_e, \quad e = 1, 2, \dots, E. \quad (3.1.3\gamma)$$

Αφαιρώντας το δείκτη t από το διάνυσμα επιλογής διαδρομής \mathbf{u} , το μοντέλο (3.1.2) μετατρέπεται στο (3.1.3) για αντιμετώπιση της μη-αναδιαταξιμότητας. Ωστόσο το μοντέλο (3.1.3) δεν είναι το ίδιο με την περίπτωση μήτρας κίνησης με επιλογή μιας μοναδικής ώρας αιχμής για όλες τις ώρες. Αυτό γίνεται φανερό από το γεγονός ότι λαμβάνουμε τον όγκο ζήτησης:

$$\widehat{h}_d = \max \{h_{dt} : t = 1, 2, \dots, T\},$$

που είναι το μέγιστο του όγκου ζήτησης στη διάρκεια του χρόνου για κάθε ζήτηση d , δηλαδή, στην ουσία, ο \widehat{h}_d αντιστοιχεί σε μια μοναδική μέγιστη ώρα αιχμής. Από την άλλη πλευρά, για κάθε e ($e=1,2,\dots,E$) και t ($t=1,2,\dots,T$), έχουμε:

$$\sum_d h_{dt} \sum_p \delta_{edp} u_{dp} \leq \sum_d \widehat{h}_d \sum_p \delta_{edp} u_{dp}$$

Επομένως, η χωρητικότητα σε μια ζεύξη e για τον όρο στο αριστερό σκέλος της ανίσωσης μπορεί να είναι μικρότερη από τη χωρητικότητα για τον όρο του δεξιού μέλους, και αυτό ισχύει τουλάχιστον για κάποιες ζεύξεις ελαχιστοποιώντας το κόστος. Συμπτωματικά, ήδη από το παράδειγμα της ενότητας 3.1.1 έχει απεικονισθεί η διαφορά κόστους μεταξύ της μήτρας ζήτησης μιας ώρας αιχμής και αυτής της πολλαπλής-ώρας αιχμής (χωρίς αναδιαταξιμότητα).

	Μοντέλο (3.1.1) Αναδιατάξιμο	Μοντέλο (3.1.2) Αναδιατάξιμο, Αδιαίρετο	Μοντέλο (3.1.3) Μη-Αναδιατάξιμο, Αδιαίρετο
Αριθμός μεταβλητών δρομολόγησης/ροής	$DT\bar{P}$. (συνεχείς)	$DT\bar{P}$. (δυναδικές)	$D\bar{P}$. (δυναδικές)
Αριθμός μεταβλητών χωρητικότητας	E (ακέραιος)	E (ακέραιος)	E (ακέραιος)
Αριθμός περιορισμών	$DT+ET$	$DT+ET$	$D+ET$

Πίνακας 3-3: Σύγκριση μοντέλων πολλαπλής-ώρας

Τέλος θα εξεταστεί ο αντίκτυπος του μεγέθους προβλήματος από την πλευρά του αριθμού των μεταβλητών και περιορισμών. Για τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν μέχρι τώρα σε αυτή την ενότητα, οι πληροφορίες αυτές φαίνονται στον πίνακα 3-3 υποθέτοντας ότι ο μέσος αριθμός υποψήφιας διαδρομών για κάθε ζήτηση συμβολίζεται με \bar{P} . Είναι αξιοσημείωτο ότι η εισαγωγή του παράγοντα του χρόνου αυξάνει τόσο τον αριθμό των μεταβλητών δρομολόγησης/ ροής όσο και τον αριθμό των περιορισμών που με τη σειρά του σημαίνει ότι τα προβλήματα που προκύπτουν είναι πολύ μεγαλύτερα σε μέγεθος. Ένα σημαντικό σημείο είναι το πλήθος των μητρών ζήτησης για τις ώρες αιχμής που χρησιμοποιείται στη πράξη. Αυτό καθορίζεται με τη διεξαγωγή στατιστικής ανάλυσης για το προσδιορισμό της σημασίας της μεταβολής της ζήτησης ώστε να περιοριστεί το πλήθος των χρονικών παραθύρων από 24 ώρες για μια μέρα σε ένα πιο εύχρηστο νούμερο. Για παράδειγμα, στο σχεδιασμό DNHR δικτύων μεταγωγής κυκλώματος, οι 24 ώρες μιας καθημερινής μπορούν να περιοριστούν σε 10 χρονικά παράθυρα αιχμής (“load set periods”-περίοδοι φόρτου) και οι 24 ώρες μιας ημέρας του σαββατοκύριακου σε 5 περιόδους φόρτου [19]. Βρέθηκε πιο συγκεκριμένα ότι αυτό το σύνολο των 15 περιόδων φόρτου για όλη την εβδομάδα περιλαμβάνει το σύνολο της μεταβλητότητας του φορτίου στη διάρκεια της ημέρας και οδηγεί σε αποδοτικό σχεδιασμό του δικτύου.

3.1.3. Πολλαπλές υπηρεσίες

Εκτός από τις πολλαπλές ώρες αιχμής, μερικές φορές υπάρχει η ανάγκη θεώρησης και διαφορετικών τύπων υπηρεσίας σε κάθε ώρα αιχμής που μοιράζονται την ίδια χωρητικότητα στο δίκτυο. Αυτό προσθέτει ακόμα μια διάσταση στις παραλλαγές των προβλημάτων σχεδίασης δικτύου που θα αντιμετωπιστούν. Με σκοπό τη μοντελοποίηση της σχεδίασης δικτύων, οι τύποι των υπηρεσιών μπορεί να είναι φωνή, δεδομένα, και βίντεο ή και άλλου τύπου υπηρεσίες που μπορεί να είναι διαθέσιμες για τους τελικούς χρήστες.

Υπάρχουν δύο τρόποι αντιμετώπισης των πολλαπλών υπηρεσιών. Αν όλες οι υπηρεσίες μπορούν να διαμοιραστούν πλήρως τη χωρητικότητα, τότε διαφορετικοί τύποι υπηρεσιών μπορούν να τοποθετηθούν σε μια τάξη υπηρεσιών (service class) για τους σκοπούς της σχεδίασης του δικτύου. Για παράδειγμα, αν υπάρχουν I τάξεις υπηρεσιών,

τότε και οι μήτρες ζήτησης για κάθε ώρα αιχμής είναι I , δηλαδή συνολικά οι μήτρες κίνησης είναι $I \times T$. Από τον πίνακα 3-3 φαίνεται ότι αυτή η αλλαγή έχει αντίκτυπο και στον αριθμό των μεταβλητών και των περιορισμών. Ένα δίκτυο (και μια τεχνολογία) ικανό να αντιμετωπίζει με πλήρη διαμοιρασμό της χωρητικότητας τις διαφορετικές υπηρεσίες επιτρέπει την επιλογή ενός συναθροισμένου όγκου ζήτησης για όλες τις υπηρεσίες μαζί (για κάθε ζευγάρι ζήτησης) αντί να αντιμετωπίζει χωριστά κάθε υπηρεσία. Αυτό επιτρέπει τη χρήση μιας μοντελοποίησης όπως η 3.1.1 όπου οι πολλαπλές υπηρεσίες θα έχουν εκφυλιστεί/συναθροιστεί σε μια τάξη υπηρεσιών.

Από την άλλη πλευρά, σε πολλές περιπτώσεις, όταν η χωρητικότητα διαμοιράζεται μεταξύ διαφορετικών υπηρεσιών οι υπηρεσίες μπορεί να μην συνδυάζονται, ή ακόμα διαφορετικές εμπορικές μονάδες του παρόχου του δικτύου μπορεί να επιθυμούν η ζήτηση για κάθε εμπορική μονάδα να προσημειώνεται ή να παρέχεται χωριστά για τις απαιτήσεις της σχεδίασης του δικτύου (πχ για ευκολία στη διαχείριση). Αυτή είναι συνήθως η περίπτωση όπου για κάθε υπηρεσία (και κάθε ζήτηση), απαιτείται να δημιουργηθεί ένα διαφορετικό εικονικό μονοπάτι (virtual path-tunnel), ή θεωρούνται αρθρωτές (modular) οι ροές για το διαχωρισμό των υπηρεσιών. Μια παραλλαγή της μοντελοποίησης (3.1.2) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περίπτωση των πολλαπλών υπηρεσιών. Εισάγεται ο δείκτης i για να συμπεριληφθεί η διάσταση της τάξης υπηρεσίας όπου χρησιμοποιείται η έννοια του tunnelling για τη διαφοροποίηση των τάξεων υπηρεσίας (service classes).

Αρθρωτές ζεύξεις, Πολλαπλή ώρα/πολλαπλές υπηρεσίες, Αναδιατάξιμο, Αδιαίρετο

δείκτες:

$d = 1, 2, \dots, D$ ζήτηση

$i = 1, 2, \dots, I$ υπηρεσίες

$t = 1, 2, \dots, T$ ώρες αιχμής κίνησης

$p = 1, 2, \dots, P_{dti}$ υποψήφιες διαδρομές για τη ζήτηση d το χρόνο t για την υπηρεσία i

$e = 1, 2, \dots, E$ ζεύξεις

σταθερές:

$\delta_{edpti} = 1$, αν η ζεύξη e ανήκει στη διαδρομή p πραγματοποιώντας τη ζήτηση d για την υπηρεσία i στο χρονικό παράθυρο t ; 0, αλλιώς

h_{dti} όγκος της ζήτησης d , της υπηρεσίας i , το χρόνο t

ξ_e κόστος ενός module χωρητικότητας

M μέγεθος του module της χωρητικότητας της ζεύξης

μεταβλητές:

u_{dpti} δυαδική μεταβλητή που αναφέρεται στη ροή που έχει ανατεθεί στη διαδρομή p της υπηρεσίας i για τη ζήτηση d στο χρόνο t

y_e η χωρητικότητα της ζεύξης e εκφρασμένη σε modules (μη-αρνητικός ακέραιος)

σκοπός

$$\text{ελαχιστοποίηση } F = \sum_e \xi_e y_e \quad (3.1.4\alpha)$$

περιορισμοί

$$\sum_p u_{dpti} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, I \quad d = 1, 2, \dots, D \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (3.1.4\beta)$$

$$\sum_d \sum_i h_{dti} \sum_p \delta_{edpti} u_{dpti} \leq M y_e, \quad e = 1, 2, \dots, E \quad t = 1, 2, \dots, T. \quad (3.1.4\gamma)$$

Είναι πιθανό το σύνολο των υποψήφιων διαδρομών να είναι ίδιο για διαφορετικά χρονικά παράθυρα κατά τη διάρκεια της ημέρας και για διαφορετικές υπηρεσίες για ένα συγκεκριμένο ζεύγος ζήτησης (μπορεί να απεικονισθεί αλλάζοντας το P_{dti} σε P_d · συνεπώς και το δ_{edpti} μπορεί να αντικατασταθεί με δ_{edp} . Είναι ακόμα αξιοσημείωτο ότι η εισαγωγή του δείκτη τάξης υπηρεσίας i δεν είναι στην πραγματικότητα υποχρεωτική αν επαναπροσδιοριστεί η έννοια της ίδιας της ζήτησης d να προσδιορίζει μοναδικά μια υπηρεσία και ένα ζεύγος ζήτησης. Μια άλλη παραλλαγή είναι να θεωρήσουμε αρθρωτή κατανομή της ροής για διαφορετικές ζητήσεις και υπηρεσίες, αλλά αυτό θα συζητηθεί αργότερα στο κεφάλαιο γιατί είναι πιο κατάλληλο να μελετηθεί στα πλαίσια της πολλαπλής περιόδου και όχι της πολλαπλής ώρας.

3.1.4. Αλγοριθμική προσέγγιση

Οι λύτες προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού (Linear Programming-LP) και προγραμματισμού ανάμεικτων ακεραίων (Mixed Integer Programming-MIP) που κυκλοφορούν στο εμπόριο μπορούν ενδεχομένως να χρησιμοποιηθούν για τη λύση προβλημάτων μικρού ή μεσαίου μεγέθους, ωστόσο είναι επιθυμητές αποδοτικότερες προσεγγίσεις για προβλήματα μεγάλης κλίμακας. Υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις εξειδικευμένες σε προβλήματα μεγάλης κλίμακας. Εδώ θα παρουσιαστεί η μέθοδος που

βασίζεται στη δυική προσέγγιση με Λαγκρανζιανή χαλάρωση (**Langrangian-Relaxation (LR) based Dual Approach**) για το μοντέλο (3.1.4).

Στη προσέγγιση αυτή το πρωτεύον πρόβλημα μετασχηματίζεται με τη χαλάρωση των περιορισμών (ή ενός υποσυνόλου αυτών) και στη συνέχεια λύνεται στο χώρο των δυικών μεταβλητών [22]. Για το μοντέλο (3.1.4), παίρνουμε το δυικό ως προς το (3.1.5γ) συσχετίζοντας τους δυικούς πολλαπλασιαστές π_{et} . Η Λαγκρανζιανή είναι:

$$\begin{aligned} L(\mathbf{u}, \mathbf{y}; \boldsymbol{\pi}) &= \sum_e \xi_e y_e + \sum_e \sum_t \pi_{et} (\sum_d \sum_i h_{dti} \sum_p \delta_{edpti} u_{dpti} - M y_e) \Leftrightarrow \\ L(\mathbf{u}, \mathbf{y}; \boldsymbol{\pi}) &= \sum_e (\xi_e - M \sum_t \pi_{et}) y_e + \sum_t \sum_d \sum_i h_{dti} \sum_p \sum_e \pi_{et} \delta_{edpti} u_{dpti} \end{aligned}$$

Από την αναδιάταξη των όρων που έγινε παραπάνω, είναι φανερό ότι όταν δοθεί ο δυικός πολλαπλασιαστής $\pi (\geq 0)$, η Λαγκρανζιανή μπορεί να αναλυθεί σε δύο ξεχωριστά υποπροβλήματα, εκ των οποίων το ένα εμπλέκει το \mathbf{u} και το άλλο το \mathbf{y} . Το δυικό πρόβλημα είναι η μεγιστοποίηση του $W(\boldsymbol{\pi})$ ως προς το $\pi \geq 0$, όπου $W(\boldsymbol{\pi}) = \min_{\mathbf{u}, \mathbf{y}} L(\mathbf{u}, \mathbf{y}; \boldsymbol{\pi})$. Έστω στη δυϊκή επανάληψη k ο δυικός πολλαπλασιαστής συμβολίζεται με $\boldsymbol{\pi}^k = (\pi_{et}^k: e = 1, 2, \dots, E, t = 1, 2, \dots, T)$. Τότε, στην k -οστή επανάληψη, ένα μέρος του τελευταίου όρου που σχετίζεται με το \mathbf{u} στην έκφραση της Λαγκρανζιανής, γράφεται:

$$\zeta_{dpti} = \sum_e \pi_{et}^k \delta_{edpti} \quad d = 1, 2, \dots, D \quad t = 1, 2, \dots, T \quad i = 1, 2, \dots, I \quad p = 1, 2, \dots, P_{dti} \quad (3.1.5)$$

Κατά συνέπεια, ο δυικός πολλαπλασιαστής $\boldsymbol{\pi}^k$ είναι ο μοναδικός συνεισφέρων στον προσδιορισμό του κόστους, ζ_{dpti} , της διαδρομής p για κάθε d, t, i (στην k -οστή επανάληψη). Για λόγους σαφήνειας, αυτή η εξάρτηση από το $\boldsymbol{\pi}^k$ υποδεικνύεται γράφοντας $\zeta_{dpti}(\boldsymbol{\pi}^k)$ δηλαδή: $\zeta_{dpti}(\boldsymbol{\pi}^k) = \sum_e \pi_{et}^k \delta_{edpti}$ για κάθε d, t, i, p . Από τον περιορισμό (3.1.4β), γίνεται φανερό ότι το υποπρόβλημα που αφορά το \mathbf{u} μπορεί να υποδιαιρεθεί περαιτέρω σε αποσυνδεδεμένα υποπροβλήματα για κάθε d, t, i εφόσον δεν υπάρχει καμία σχέση (από άποψη περιορισμών) που να συνδέει τα d, t, i . Δηλαδή το ατομικό υποπρόβλημα είναι:

$$\begin{aligned} \text{ελαχιστοποίηση} \quad & \sum_p \zeta_{dpti}(\boldsymbol{\pi}^k) u_{dpti} \\ \text{με τον περιορισμό} \quad & \sum_p u_{dpti} = 1 \quad (u_{dpti} \text{ δυαδικός}) \end{aligned} \quad (3.1.6)$$

για κάθε d, t, i ξεχωριστά. Αυτό λύνεται εύκολα δεδομένου ότι για κάθε ατομικό υποπρόβλημα, πρέπει να αναγνωρισθεί η διαδρομή p για την οποία το κόστος διαδρομής $z_{dpti}(\boldsymbol{\pi}^k)$ είναι το ελάχιστο και τότε γίνεται η αντίστοιχη u_{dpti} ίση με 1, δηλ. η μικρότερη διαδρομή (που υπαγορεύεται από την τρέχουσα τιμή του $\boldsymbol{\pi}^k$) για κάθε d, t, i .

Επιπρόσθετα, το υποπρόβλημα που αφορά το \mathbf{y} μπορεί επίσης να υποδιαιρεθεί σε ατομικά υποπροβλήματα για κάθε ζεύξη e :

$$\begin{array}{ll} \text{ελαχιστοποίηση} & (\xi_e - M \sum_t \pi_{et}^k) y_e \\ \text{με τον περιορισμό} & y_e \geq 0 \end{array} \quad (3.1.7)$$

Η λύση του παραπάνω υποπροβλήματος έχει μία ιδιαιτερότητα γιατί το y_e είναι άπειρο (∞) αν ισχύει η συνθήκη $\xi_e < M \sum_t \pi_{et}^k$. Στην πραγματικότητα, κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου, αρκεί η χρήση μια μεγάλης τιμής ως άνω όριο για το y_e (αντί για το άπειρο) για να διατηρηθεί συνολικά εφικτό το αρχικό (πρωτεύων) πρόβλημα (3.1.4). Με y_e συμβολίζεται η χωρητικότητα της ζεύξης e , που θέλουμε να προσδιορίσουμε, ταυτόχρονα όμως, η τιμή της y_e ως λύση του υποπροβλήματος (3.1.7) δεν προορίζεται για το αρχικό πρόβλημα, παρά μόνο για το εξαρτημένο από το $\boldsymbol{\pi}$ δυϊκό υποπρόβλημα στην k -οστή επανάληψη.

Στη συνέχεια θα προσδιοριστεί η δυϊκή υποκλίση (dual subgradient). Έστω ότι στην k -οστή επανάληψη του δυϊκού προβλήματος, ο δείκτης της διαδρομής που λύνει το ατομικό υποπρόβλημα (3.1.6) στο \mathbf{u} συμβολίζεται με \widehat{p}_k και η βέλτιστη y_e για το υποπρόβλημα (3.1.7) συμβολίζεται με \widehat{y}_e^k , τότε η δυϊκή υποκλίση στην k -οστή επανάληψη δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\partial W(\boldsymbol{\pi})}{\partial \pi_{et}} \Big|_{\boldsymbol{\pi} = \boldsymbol{\pi}^k} = \sum_d \sum_i h_{diti} \delta_{ed\widehat{p}_k ti} - M \widehat{y}_e^k, \quad e = 1, 2, \dots, E \quad t = 1, 2, \dots, T. \quad (3.1.8)$$

Τα υπόλοιπα επαναληπτικά βήματα για την ενημέρωση του δυϊκού πολλαπλασιαστή $\boldsymbol{\pi}$ (≥ 0) φαίνονται στον παρακάτω αλγόριθμο [21]:

Δυϊκός αλγόριθμος βασισμένος στη Λαγκρανζιανή Χαλάρωση (LR) [21]

Βήμα 0: Επιλογή ενός αρχικού π^0 , k_{max} και $\rho_{maxiter}$. Θέτουμε $\rho = 2$, $\rho_{min} = 0.005$, $k = 0$, $\rho_{iter} = 0$, $F^{best} = \infty$.

Βήμα 1: $k := k + 1$, $\rho_{iter} := \rho_{iter} + 1$.

Δεδομένου του π^k , λύνουμε τα υποπροβλήματα (3.1.6) και (3.1.7) ξεχωριστά για να πάρουμε τις λύσεις \widehat{p}_k (ο δείκτης της διαδρομής που λύνει το υποπρόβλημα για το u) και \widehat{y}_e^k

Βήμα 2: Χρησιμοποιούμε το \widehat{p}_k για να υπολογίσουμε την εφικτή y_e^k (ακέραιος αριθμός) που ικανοποιεί την $\sum_d \sum_i h_{diti} \sum_p \delta_{edpti} u_{dpti} \leq M y_e$.

Χρησιμοποιούμε τα u^k και y_e^k για να υπολογίσουμε την πρωτεύουσα συνάρτηση F .

Αν $F < F^{best}$ τότε $F^{best} := F$, $y^{best} := y_e^k$, $\bar{W} := F^{best}$

Αν $(\rho_{iter} > \rho_{maxiter})$ τότε ξεκίνα $\rho = \max\{\rho/2, \rho_{min}\}$; $\rho_{iter} = 0$ τέλος

Βήμα 3: Χρησιμοποίησε της λύσεις \widehat{p}_k και \widehat{y}_e^k για τον υπολογισμό της υποκλίσης, της δυϊκής συνάρτησης, το βήματος και τις δυϊκής μεταβλητής.

Βήμα 4: Αν $k > k_{max}$, σταματάμε · διαφορετικά επιστρέφουμε στο βήμα 1.

3.1.5. Δρομολόγηση πολλαπλής-ώρας σε δίκτυο δεδομένης χωρητικότητας

Η περίπτωση αυτή αναφέρεται στην κατάσταση κατά την οποία το δίκτυο έχει ήδη συγκεκριμένη χωρητικότητα αλλά πρέπει να ληφθούν υπόψη οι πολλαπλές ώρες αιχμής των απαιτήσεων της ζήτησης για βελτιστοποίηση της δρομολόγησης/ροής και/ή εγκατάσταση εικονικών διαδρομών (virtual tunnel) και αναδιάταξη κατά τη διαχείριση της χωρητικότητας του δικτύου. Πρώτα θα παρουσιαστεί η περίπτωση όπου η διαδρομή/ροή είναι αναδιατάξιμες από το ένα χρονικό παράθυρο στο επόμενο, με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους δρομολόγησης. Έτσι, σε αντιστοιχία με το πρόβλημα διαστασιολόγησης (3.1.1), το μοντέλο έχει ως εξής.

Πολλαπλή ώρα, Αναδιατάξιμο, Δεδομένη χωρητικότητα

δείκτες:

$d = 1, 2, \dots, D$ ζήτηση

$t = 1, 2, \dots, T$ ώρες αιχμής κίνησης

$p = 1, 2, \dots, P_d$ υποψήφιες διαδρομές για τη ζήτηση d

$e = 1, 2, \dots, E$ ζεύξεις

σταθερές:

$\delta_{edp} = 1$, αν η ζεύξη e ανήκει στη διαδρομή p φέροντας τη ζήτηση d ; 0, αλλιώς

h_{dt} όγκος της ζήτησης d το χρόνο t

ζ_{dpt} μοναδιαίο κόστος δρομολόγησης στη διαδρομή p για τη ζήτηση d στο χρόνο t

c_e χωρητικότητα της ζεύξης e

μεταβλητές:

x_{dpt} η ροή που καταναμήθηκε στη διαδρομή p το χρόνο t (συνεχής, μη-αρνητικός)

σκοπός

ελαχιστοποίηση $F = \sum_d \sum_p \zeta_{dpt} x_{dpt}$ (3.1.9α)

περιορισμοί

$\sum_p x_{dpt} = h_{dt}, \quad d = 1, 2, \dots, D \quad t = 1, 2, \dots, T$ (3.1.9β)

$\sum_d \sum_p \delta_{edp} x_{dpt} \leq c_e, \quad e = 1, 2, \dots, E \quad t = 1, 2, \dots, T.$ (3.1.9γ)

Στην παραπάνω μοντελοποίηση, υποθέτουμε ότι το πρόβλημα έχει λύση (διαφορετικά, πρέπει να προστεθεί χωρητικότητα το συντομότερο δυνατόν!!). Μετά από προσεκτική παρατήρηση του παραπάνω μοντέλου, είναι φανερό ότι λόγω της αναδιαταξιμότητας, το πρόβλημα βελτιστοποίησης για τη δρομολόγηση μπορεί να λυθεί χωριστά για κάθε χρονικό παράθυρο δεδομένου ότι δεν υπάρχει κανένας περιορισμός που να εμπλέκει διαφορετικά χρονικά παράθυρα μεταξύ τους όταν η χωρητικότητα έχει δοθεί. Για αυτό το λόγο δεν είναι απαραίτητο να περιληφθεί στη συνάρτηση (3.1.9α) άθροιση προς το χρόνο t .

Υπάρχει ακόμα η πιθανότητα το πρόβλημα να είναι τέτοιο που το δίκτυο να μην έχει επαρκή χωρητικότητα για να εξυπηρετήσει τη ζήτηση. Αυτή η κατάσταση προκύπτει πρώτιστα σε δίκτυα κίνησης (traffic networks), ειδικά σε δίκτυα απόφραξης (blocking

networks), όπου δεν γίνεται δεκτή όλη η τηλεπικοινωνιακή κίνηση. Για την εξασφάλιση ύπαρξης λύσης της μαθηματικής μοντελοποίησης αρχικά φαίνεται ορθή η χρήση του:

$$\sum_p x_{dpt} \leq h_{dt}, \quad d = 1, 2, \dots, D \quad t = 1, 2, \dots, T$$

στη θέση του περιορισμού (3.1.9β) στο μοντέλο (3.1.9). Ωστόσο αυτό θα οδηγήσει σε μια βέλτιστη λύση όπου το διάνυσμα κατανομής της ροής \mathbf{x} θα είναι ίσο με 0! Αυτό συμβαίνει διότι η συνάρτηση ελαχιστοποιείται και οι συντελεστές κόστους ζ_{dpt} είναι μη αρνητικοί. Έτσι, σε δίκτυα κίνησης (traffic networks) όπου υπάρχει το ενδεχόμενο να απορρίπτεται μέρος της κίνησης, μια πιο πρακτική προσέγγιση είναι να τεθεί ως στόχος η μεγιστοποίηση του κέρδους [23]. Γενικεύοντας θα παρουσιαστεί το πρόβλημα βελτιστοποίησης του κέρδους παρουσία πολλαπλών υπηρεσιών. Για κάθε τύπο υπηρεσίας και κάθε ζήτηση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί διαφορετικός μοναδιαίος συντελεστής βάρους του κέρδους. Επιπρόσθετα, θα ληφθεί υπόψη και το βάρος κάθε τύπου υπηρεσίας ως προς το εύρος ζώνης.

Χρονικά εξαρτημένη, πολλαπλών υπηρεσιών μεγιστοποίηση κέρδους σταθερές:

h_{dti} επιθυμητός όγκος της ζήτησης d για την υπηρεσία i το χρόνο t
 η_{dti} μοναδιαίο κέρδος για τη ζήτηση d το χρόνο t για την υπηρεσία i
 L_i μοναδιαίο εύρος ζώνης για την υπηρεσία i

μεταβλητές:

x_{dpti} η ροή που καταναμήθηκε στη διαδρομή p για τη ζήτηση d
το χρόνο t (συνεχής, μη-αρνητικός) για την υπηρεσία i

σκοπός

$$\text{μεγιστοποίηση } F = \sum_d \sum_i \sum_p \eta_{dti} x_{dpti} \quad (3.1.10\alpha)$$

περιορισμοί

$$\sum_p x_{dpti} \leq h_{dti}, \quad i = 1, 2, \dots, I \quad d = 1, 2, \dots, D \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (3.1.10\beta)$$

$$\sum_i L_i \sum_d \sum_p \delta_{edp} x_{dpti} \leq c_e, \quad e = 1, 2, \dots, E \quad t = 1, 2, \dots, T. \quad (3.1.10\gamma)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο γενικός στόχος είναι η μεγιστοποίηση του κέρδους όπου το μοναδιαίο κέρδος είναι εξαρτημένο από την υπηρεσία, αλλά όχι και από τη διαδρομή. Όμοια με το (3.1.9), το μοντέλο μεγιστοποίησης του κέρδους (3.1.10) μπορεί να λυθεί ανεξάρτητα για κάθε χρονικό παράθυρο ούτως ώστε να προσδιοριστεί η καλύτερη δρομολόγηση και ροή για κάθε χρονική στιγμή αφού δεν υπάρχουν περιορισμοί που να εμπλέκουν διαφορετικά χρονικά παράθυρα· έτσι δεν απαιτείται άθροιση ως προς το t στη συνάρτηση βελτιστοποίησης. Δεδομένου ότι το μοναδιαίο κέρδος και ο όγκος της ζήτησης εξαρτώνται από το χρόνο, η βέλτιστη διαδρομή/ροή που επιφέρει τη μεγιστοποίηση του κέρδους θα διαφέρει από ώρα σε ώρα. Μια σημαντική παρατήρηση για το (3.1.10) είναι η δικαιοσύνη για τις υπηρεσίες και τη ζήτηση μπορεί να πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τη μεγιστοποίηση του κέρδους.

3.2. Σχεδίαση πολλαπλής-περιόδου

Η σχεδίαση πολλαπλής περιόδου (ΣΠΠ) αναφέρεται σε προβλήματα σχεδίασης δικτύων που εκτείνονται σε ένα χρονικό ορίζοντα εβδομάδων, μηνών, και μερικές φορές ακόμα και αρκετών χρόνων. Γενικά, τα μοντέλα ΣΠΠ είναι κυρίως εφαρμόσιμα σε δίκτυα μεταγωγής ενώ η σχεδίαση πολλαπλής ώρας εφαρμόζεται σε δίκτυα κίνησης (όπως είναι τα δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος ή τα δίκτυα IP). Μια σημαντική διαφορά μεταξύ πολλαπλής-περιόδου και πολλαπλής-ώρας είναι ο τρόπος ερμηνείας του όγκου ζήτησης. Στην περίπτωση πολλαπλής-ώρας, ο όγκος της ζήτησης αλλάζει από ώρα σε ώρα και η ζήτηση μιας προηγούμενης ώρας εξαφανίζεται με την εμφάνιση της καινούριας. Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση της πολλαπλής περιόδου, ο όγκος της ζήτησης για κάθε χρονική περίοδο είναι καινούριος, με την έννοια ότι *προστίθεται* στον όγκο ζήτησης που υπήρχε σε προηγούμενες περιόδους. Αυτή η νεότητα στη ζήτηση σε επόμενες χρονικές περιόδους είναι συχνά καλύτερα αντιληπτή ως *επαυξητικός* όγκος ζήτησης.

Εξετάζοντας τα προβλήματα πολλαπλής περιόδου, υπάρχουν σημαντικά θέματα που πρέπει να εξεταστούν (πέραν του επαυξητικού όγκου ζήτησης): 1) το κόστος του συστήματος μπορεί να αλλάζει με το χρόνο (π.χ., λόγω έκπτωσης), 2) η ζήτηση που δρομολογείται σε ένα χρονικό παράθυρο μπορεί να έχει κόστος συντήρησης σε επόμενο χρονικό παράθυρο, και 3) επέκταση της χωρητικότητας μπορεί να επιτευχθεί σε ολόκληρο το χρονικό ορίζοντα. Στην ενότητα αυτή θα εξεταστούν προβλήματα σχετικά με όλες αυτές τις πτυχές.

3.2.1. Προγραμματισμός χωρητικότητας (Capacity Planning)

Μια σημαντική πτυχή του ΣΠΠ είναι ότι ο όγκος της ζήτησης που δίνεται σε κάθε χρονική περίοδο είναι επαυξητικός όγκος ζήτησης. Κάθε όγκος ζήτησης σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο πρέπει να δρομολογηθεί σε αυτό το χρόνο χρησιμοποιώντας τις διαθέσιμες διαδρομές και τη διαθέσιμη χωρητικότητα σε αυτή τη χρονική περίοδο, δηλ. δεν επιτρέπεται η αναδιαταξιμότητα (αργότερα θα εξεταστεί η περίπτωση που αυτός ο περιορισμός αίρεται). Επιπρόσθετα, μπορούν να υπάρξουν δύο συστατικά κόστους: το ένα για την εγκατάσταση νέας χωρητικότητας σε μια ζεύξη, και το

άλλο για τη συντήρηση της υπάρχουσας χωρητικότητας που εγκαταστάθηκε σε προηγούμενες περιόδους. Στην ανάλυση έχει υποτεθεί μόνο ένας τύπος module ζήτησης.

ΣΠΠ, Αρθρωτές ζεύξεις

δείκτες:

$d = 1, 2, \dots, D$ ζήτηση

$t, \tau = 1, 2, \dots, T$ περίοδοι σχεδίασης

$p = 1, 2, \dots, P_{dt}$ υποψήφιες διαδρομές για τη ζήτηση d την περίοδο τ

$e = 1, 2, \dots, E$ ζεύξεις

σταθερές:

$\delta_{edp\tau} = 1$, αν η ζεύξη e ανήκει στη διαδρομή p φέροντας τη ζήτηση d την περίοδο τ ;

0, αλλιώς

$h_{dt} (\geq 0)$ επαυξητικός όγκος ζήτησης για τη ζήτηση d την περίοδο τ

$\xi'_{e\tau}$ κόστος εγκατάστασης ενός module χωρητικότητας στη ζεύξη e την περίοδο τ

$\xi''_{e\tau}$ κόστος συντήρησης ενός module χωρητικότητας στη ζεύξη e την περίοδο τ

για χωρητικότητα που εγκαταστάθηκε σε προηγούμενες περιόδους

M μέγεθος του module της χωρητικότητας ζεύξης

μεταβλητές:

$x_{dp\tau}$ (μη-αρνητική) η ροή που καταναμήθηκε στη διαδρομή p για τη ζήτηση d το χρόνο τ

$y_{e\tau}$ η (νέα) χωρητικότητα της ζεύξης e εκφρασμένη σε modules (μη-αρνητικός ακέραιος) που απαιτείται το χρόνο τ

σκοπός

$$\text{ελαχιστοποίηση } F = \sum_{\tau} \sum_e (\xi'_{e\tau} y_{e\tau} + \xi''_{e\tau} \sum_{t < \tau} y_{e\tau}) \quad (3.2.1\alpha)$$

περιορισμοί

$$\sum_p x_{dp\tau} = h_{dt}, \quad d = 1, 2, \dots, D \quad \tau = 1, 2, \dots, T \quad (3.2.1\beta)$$

$$\sum_d \sum_p \delta_{edp\tau} x_{dp\tau} \leq M y_{e\tau}, \quad e = 1, 2, \dots, E \quad \tau = 1, 2, \dots, T. \quad (3.2.1\gamma)$$

Αξίζει να σημειωθούν μερικές παρατηρήσεις για τη συνάρτηση κόστους. Αρχικά είναι εμφανές ότι περιλαμβάνει τόσο το κόστος εγκατάστασης της ζεύξης όσο και το κόστος συντήρησής της. Στη σχεδίαση και στον προγραμματισμό μεγάλων δικτύων, το κόστος εγκατάστασης της ζεύξης λαμβάνεται υπόψη στην αρχική επένδυση κεφαλαίου (CapEx-Capital expenditure) ενώ το κόστος συντήρησης της σύνδεσης ανήκει στο κόστος

λειτουργίας (OpEx-Operational expenditure). Συνήθως τα CapEx και OpEx είναι στη δικαιοδοσία διαφορετικών δημοσιονομικών αρχών και οργανισμών μέσα σε έναν πάροχο δικτύου. Το παραπάνω μοντέλο δείχνει ότι μερικές φορές είναι απαραίτητο να θεωρηθούν δυο διαφορετικές δημοσιονομικές πολιτικές κάτω από ένα ενοποιημένο μοντέλο για να υπολογιστεί το συνολικό κόστος του δικτύου, ειδικά σε προβλήματα πολλαπλής περιόδου.

Υπάρχει ωστόσο κι άλλος τρόπος να αναπαρασταθεί το κόστος αναδιατάσσοντας τους όρους με χρήση της ακόλουθης ερμηνείας του κόστους ζεύξης: η εγκατάσταση χωρητικότητας την περίοδο t , θα επισύρει κόστος συντήρησης σε όλες τις ακόλουθες περιόδους (συμπεριλαμβανομένης και της t) μέχρι το τέλος του χρονικού ορίζοντα σχεδίασης. Τότε, η συνολική χωρητικότητα της ζεύξης, $y_{e\tau}$, έχει το ακόλουθο μοναδιαίο κόστος:

$$\xi'_{e\tau} + \sum_{t \geq \tau} \xi''_{e\tau}$$

Κατά συνέπεια, το συνολικό κόστος, που δίνεται στην (3.2.1α), μπορεί να γραφτεί:

$$F = \sum_{\tau} \sum_e \xi_{e\tau} y_{e\tau} \quad \text{όπου} \quad \xi_{e\tau} := \xi'_{e\tau} + \sum_{t \geq \tau} \xi''_{e\tau} . \quad (3.2.2)$$

Το όφελος γράφοντας τη συνάρτηση κόστους (3.2.2) σε αυτή τη μορφή είναι ότι γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι το σχεδιαστικό πρόβλημα, ελαχιστοποίηση της (3.2.2) υπό τους περιορισμούς (3.2.1β) και (3.2.1γ) (με μη-αρνητικές μεταβλητές), μπορεί στην πραγματικότητα να χωριστεί σε T ανεξάρτητα προβλήματα! Επιπλέον, η συγκεντρωτική συνιστώσα κόστους, $\xi_{e\tau}$, παρέχει μια αίσθηση ότι παρότι οι CapEx και OpEx συνιστώσες κόστους απαιτείται να ληφθούν υπόψη για ολόκληρη τη περίοδο σχεδίασης, για τους σκοπούς της σχεδίασης δεν είναι πάντα απαραίτητο να μοντελοποιηθούν χωριστά, τουλάχιστον για μοντέλα όπως το (3.2.1).

Το γεγονός ότι το παραπάνω μοντέλο μπορεί να χωριστεί σε T ανεξάρτητα προβλήματα εγείρει ερωτήματα ως προς το αν τα μοντέλα πολλαπλής-περιόδου είναι απαραίτητα. Θα σχολιασθούν λοιπόν δύο βασικά προβλήματα που σχετίζονται με το μοντέλο (3.2.1).

Στο παραπάνω μοντέλο, έχει γίνει η υπόθεση ότι η επιπρόσθετη κίνηση είναι μη-αρνητική, πράγμα που σημαίνει αύξηση των αναγκών του δικτύου κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα της σχεδίασης. Ωστόσο, υπάρχει το ενδεχόμενο ο όγκος ζήτησης που εμφανίστηκε σε προηγούμενη περίοδο να μην είναι απαραίτητος σε μελλοντικές περιόδους (αρνητική ανάπτυξη του δικτύου), για παράδειγμα, αποσύνδεση κυκλωμάτων

που έχουν εγκατασταθεί σε μια περίοδο σε επόμενη περίοδο σε δίκτυα μεταγωγής ή αποσύνδεση συνδρομητών σε δίκτυα δορυφορικών υπηρεσιών. Ένας τρόπος να συμπεριληφθεί και αυτή η περίπτωση είναι με $h_{d\tau} \leq 0$ που συνεπάγεται αλλαγή σε όγκους ζήτησης που έχουν δρομολογηθεί στο παρελθόν και άρα πρέπει να επιτραπεί και $x_{d\rho\tau} \leq 0$ στο μοντέλο [24]! Εντούτοις, είναι αναγκαίο να εξασφαλιστεί ότι η μείωση είναι μόνο σε διαδρομές που είχαν θετική ροή στις προηγούμενες περιόδους. Για να γίνει αυτό, η απαίτηση κάθε ροή $x_{d\rho\tau}$ να είναι μη-αρνητική, αντικαθίσταται με την ακόλουθη συνθήκη:

$$\sum_{t \leq \tau} x_{d\rho\tau} \geq 0 \quad \tau = 1, 2, \dots, T$$

μαζί με την διαπίστωση ότι ο δείκτης ρ της διαδρομής, σε αυτή την περίπτωση, αναφέρεται στην ακριβώς ίδια διαδρομή από τη μια χρονική περίοδο στην επόμενη για την ίδια ζήτηση d . Η ενσωμάτωση αυτού του περιορισμού στο (3.2.1) συνεπάγεται τη μη δυνατότητα χωρισμού του τροποποιημένου προβλήματος σχεδίασης σε T ανεξάρτητα σχεδιαστικά προβλήματα! Αν και η νέα αυτή συνθήκη ικανοποιεί το εφικτό του προβλήματος, ο περιορισμός στη δρομολόγηση της ζήτησης (δηλ., η δρομολόγηση για κάθε νέο αθροιστικό όγκο ζήτησης να γίνεται περίοδο-περίοδο) δεν διατηρείται πλέον, με άλλα λόγια, είναι επιτρεπτή η αναδιάταξη της δρομολογούμενης ζήτησης από μια περίοδο στην επόμενη. Αν και αυτή η ελαστικότητα είναι καλή από άποψη μοντελοποίησης, η επιλογή της αναδιάρθρωσης μπορεί να μην είναι εφικτή/επιτρεπτή σε πολλά πραγματικά δίκτυα μεταγωγής.

Στη συνέχεια της ενότητας έχει υποθεθεί ότι ο επαυξητικός όγκος ζήτησης είναι $h_{d\tau} \geq 0$ και ότι δεν είναι εφικτή η αναδιάταξη της δρομολογούμενης ζήτησης από μια περίοδο στην επόμενη. Κατά συνέπεια, επανέρχεται στο προσκήνιο το πρόβλημα (3.2.1) και το γεγονός ότι το πρόβλημα αυτό μπορεί να χωριστεί σε T ανεξάρτητα προβλήματα μιας περιόδου. Για αυτό το λόγο, θα παρουσιαστεί ένας άλλος σημαντικός λόγος που οδηγεί στη θεώρηση μοντέλων πολλαπλής περιόδου αντί για μοντέλα πολλών ανεξάρτητων απλών περιόδων.

Μελετώντας προσεχτικά το μοντέλο (3.2.1) γίνεται φανερό ότι αυτό το μοντέλο δεν παράγει απαραίτητα βέλτιστες λύσεις από τη σκοπιά της συνολικής χωρητικότητας του δικτύου κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα σχεδίασης. Για παράδειγμα, από την (3.2.1γ) είναι εύκολα αντιληπτό ότι λόγω της κβάντισης της εγκατεστημένης χωρητικότητας, δεν εξαντλείται το σύνολο της χωρητικότητας που εγκαταστάθηκε την

προηγούμενη περίοδο με τη δρομολόγηση της ζήτησης σε εκείνη την περίοδο. Κατά συνέπεια υπάρχει σημαντική πιθανότητα μέρος της χωρητικότητας να υπολείπεται και να είναι διαθέσιμο από μια χρονική περίοδο στην επόμενη για να χρησιμοποιηθεί στη δρομολόγηση ροών σε μελλοντικές περιόδους· αυτή η πτυχή δεν αντιμετωπίζεται ρητά στο παραπάνω μοντέλο. Επομένως, στην πραγματικότητα, υπάρχει μια φυσική σύζευξη μεταξύ των περιόδων στην ΣΠΠ.

Για την απεικόνιση της επίδρασης της υπολειπόμενης χωρητικότητας από μια περίοδο για χρήση σε μελλοντικές περιόδους, συμβολίζουμε με $\underline{y}_{e\tau}$ το φορτίο της ζεύξης e την περίοδο τ ($\tau = 1, 2, \dots, T$). Επιπρόσθετα, συμβολίζουμε με $\hat{y}_{e\tau} \geq 0$ ($\tau = 1, 2, \dots, T$) την υπολειπόμενη χωρητικότητα στη ζεύξη e την περίοδο τ . Με \hat{y}_{e0} συμβολίζεται η χωρητικότητα που είναι διαθέσιμη στην αρχή του κύκλου σχεδίασης. Στο τέλος του χρόνου $\tau = 1$, κάθε νέος, επαυξητικός όγκος ζήτησης πρέπει να ικανοποιηθεί χρησιμοποιώντας την ήδη διαθέσιμη χωρητικότητα στην αρχή αυτής της περιόδου συν την όποια νέα χωρητικότητα που θα προστεθεί την περίοδο αυτή. Έτσι, προκύπτει η ακόλουθη συνθήκη που πρέπει να ικανοποιείται για το φορτίο μιας ζεύξης το χρόνο $\tau = 1$:

$$\underline{y}_{e1} \leq \hat{y}_{e0} + My_{e1}, \quad e = 1, 2, \dots, E$$

Τότε, το περίσσευμα της χωρητικότητας (αν υπάρχει) στο τέλος της περιόδου $\tau = 1$ είναι διαθέσιμο στην περίοδο $\tau = 2$, και αυτή η περίσσεια χωρητικότητας γράφεται:

$$\hat{y}_{e1} = \hat{y}_{e0} + My_{e1} - \underline{y}_{e1}, \quad e = 1, 2, \dots, E$$

Όμοια, στο τέλος της περιόδου $\tau = 2$, η συνθήκη για το φορτίο της ζεύξης και η υπολειπόμενη χωρητικότητα γράφονται:

$$\underline{y}_{e2} \leq \hat{y}_{e1} + My_{e2}, \quad e = 1, 2, \dots, E$$

$$\hat{y}_{e2} = \hat{y}_{e1} + My_{e2} - \underline{y}_{e2}, \quad e = 1, 2, \dots, E$$

αντίστοιχα. Γενικεύοντας, έχουμε:

$$\underline{y}_{e\tau} \leq \hat{y}_{e,\tau-1} + My_{e\tau}, \quad e = 1, 2, \dots, E \quad \tau = 1, 2, \dots, T$$

$$\hat{y}_{e\tau} = \hat{y}_{e,\tau-1} + My_{e\tau} - \underline{y}_{e\tau}, \quad e = 1, 2, \dots, E \quad \tau = 1, 2, \dots, T.$$

Ουσιαστικά, πρέπει να ενταχθούν αυτά τα δύο σύνολα σχέσεων στο μοντέλο (3.2.1) για να ληφθεί υπόψη η επαναχρησιμοποίηση της υπολειπόμενης χωρητικότητας από μια περίοδο στην επόμενη. Με αντικατάσταση, μπορεί να ξαναγραφεί το περίσσευμα της χωρητικότητας σε μια περίοδο τ (για κάθε ζεύξη e) ως εξής:

$$\begin{aligned}
\hat{y}_{e\tau} &= \hat{y}_{e,\tau-1} + My_{e\tau} - \underline{y}_{e\tau} = \\
&= \hat{y}_{e,\tau-2} + My_{e,\tau-1} - \underline{y}_{e,\tau-1} + My_{e\tau} - \underline{y}_{e\tau} = \\
&= \hat{y}_{e,\tau-3} + My_{e,\tau-2} - \hat{y}_{e,\tau-2} + My_{e,\tau-1} - \underline{y}_{e,\tau-1} + My_{e\tau} - \underline{y}_{e\tau} = \\
&= \dots = \\
&= \hat{y}_{e0} + My_{e\tau} - \underline{y}_{e\tau} + \sum_{t=1}^{\tau-1} (My_{e\tau} - \underline{y}_{e\tau}).
\end{aligned}$$

Αναδιατάσσοντας, γίνεται:

$$\hat{y}_{e\tau} + \underline{y}_{e\tau} = \hat{y}_{e0} + My_{e\tau} + \sum_{t=1}^{\tau-1} (My_{e\tau} - \underline{y}_{e\tau}).$$

Επειδή η υπολειπόμενη χωρητικότητα είναι μη-αρνητική, καταλήγουμε στην ακόλουθη ανισότητα:

$$\underline{y}_{e\tau} \leq \hat{y}_{e0} + My_{e\tau} + \sum_{t=1}^{\tau-1} (My_{e\tau} - \underline{y}_{e\tau}).$$

Τέλος, γράφοντας την αρχική υπολειπόμενη χωρητικότητα με $\hat{y}_{e0} = My_{e0} - \underline{y}_{e0}$ για την περίοδο $\tau = 0$, αν υπάρχει (και 0, διαφορετικά), η ανισότητα γίνεται:

$$\underline{y}_{e\tau} \leq My_{e\tau} + \sum_{t<\tau} (My_{e\tau} - \underline{y}_{e\tau}).$$

Αποδεικνύεται έτσι ότι δεν χρειάζεται να εισαχθούν ρητά στο μοντέλο μεταβλητές για την υπολειπόμενη χωρητικότητα.

Ένας ακόμα παράγοντας στη σχεδίαση δικτύων μεταγωγής είναι ότι μερικές φορές είναι πιθανό να υπάρχει ξεχωριστό ανά μονάδα κόστος δρομολόγησης επί της ίδιας χωρητικότητας σε μια χρονική περίοδο. Ενσωματώνοντας το κόστος δρομολόγησης και λαμβάνοντας υπόψη το θέμα της υπολειπόμενης χωρητικότητας, προκύπτει το ακόλουθο μοντέλο.

ΣΠΠ, Αρθρωτές ζεύξεις, Κόστος δρομολόγησης, Επαναχρησιμοποίηση Χωρητικότητας σταθερές:

- $\xi'_{e\tau}$ κόστος εγκατάστασης ενός module χωρητικότητας στη ζεύξη e την περίοδο τ
 - $\xi''_{e\tau}$ κόστος συντήρησης ενός module χωρητικότητας στη ζεύξη e την περίοδο τ για χωρητικότητα που εγκαταστάθηκε σε προηγούμενες περιόδους
 - ζ_{dpt} μοναδιαίο κόστος δρομολόγησης στη διαδρομή p για τη ζήτηση d το χρόνο τ
- μεταβλητές:**

- x_{dpt} (μη-αρνητική) η ροή που καταναμήθηκε στη διαδρομή p για τη ζήτηση d το χρόνο τ
- $y_{e\tau}$ η (νέα) χωρητικότητα της ζεύξης e εκφρασμένη σε modules (μη-αρνητικός ακέραιος) που απαιτείται το χρόνο τ

$\underline{y}_{e\tau}$ η ροή στη ζεύξη e το χρόνο τ λόγω της δρομολόγησης της νέας ζήτησης για για αυτή τ ην περίοδο.

σκοπός

$$\text{ελαχιστοποίηση } F = \sum_{\tau} \sum_e (\xi'_{e\tau} y_{e\tau} + \xi''_{e\tau} \sum_{t < \tau} y_{e\tau}) + \sum_{\tau} \sum_d \sum_p \zeta_{dpt} x_{dpt} \quad (3.2.3\alpha)$$

περιορισμοί

$$\sum_p x_{dpt} = h_{d\tau}, \quad d = 1, 2, \dots, D \quad \tau = 1, 2, \dots, T \quad (3.2.3\beta)$$

$$\sum_d \sum_p \delta_{edp\tau} x_{dpt} = \underline{y}_{e\tau}, \quad e = 1, 2, \dots, E \quad \tau = 1, 2, \dots, T. \quad (3.2.3\gamma)$$

$$\underline{y}_{e\tau} \leq M y_{e\tau} + \sum_{t < \tau} (M y_{e\tau} - \underline{y}_{e\tau}), \quad e = 1, 2, \dots, E \quad \tau = 1, 2, \dots, T. \quad (3.2.3\delta)$$

Η σχέση (3.2.3δ) μπορεί να ξαναγραφεί ως εξής:

$$0 \leq \sum_{t \leq \tau} (M y_{e\tau} - \underline{y}_{e\tau})$$

που ισοδυναμεί με:

$$\sum_{t \leq \tau} \underline{y}_{e\tau} \leq \sum_{t \leq \tau} M y_{e\tau}.$$

Τώρα, αντικαθιστώντας το $\underline{y}_{e\tau}$ από την (3.2.3γ), προκύπτει:

$$\sum_{t \leq \tau} \sum_d \sum_p \delta_{edp\tau} x_{dpt} \leq \sum_{t \leq \tau} M y_{e\tau} \quad e = 1, 2, \dots, E \quad \tau = 1, 2, \dots, T \quad (3.2.4)$$

Επιλέχθηκε να διατηρηθεί η μορφή (3.2.3δ) στο παραπάνω μοντέλο γιατί καταδεικνύει τη λογική σχέση και την εξέλιξη στο χρόνο μεταξύ της νέας χωρητικότητας, της υπολειπόμενης χωρητικότητας, και του φορτίου ζεύξης. Ωστόσο, ελαχιστοποιώντας την (3.2.3α) με τους περιορισμούς (3.2.3β) και (3.2.4) ισοδυναμεί με ολόκληρο το πρόβλημα (3.2.3) αποφεύγοντας εξολοκλήρου τη χρήση της μεταβλητής φορτίου ζεύξης $\underline{y}_{e\tau}$.

Η ενότητα αυτή ολοκληρώνεται με την παρουσίαση ενός προβλήματος σχεδίασης πολλαπλής-περιόδου στο οποίο είναι επιτρεπτή η αναδιάταξη της δρομολόγησης της ζήτησης από μια περίοδο σε επόμενη. Κατά συνέπεια, σε κάθε χρονική περίοδο οι όγκοι ζήτησης θεωρούνται συσσωρευτικοί όγκοι ζήτησης των περιόδων μέχρι τότε, συμπεριλαμβανομένης και της τρέχουσας. Λόγω της αναδιαταξιμότητας αλλάζει και η σημασία της κατανομής της ροής x_{dpt} . Το μοντέλο είναι το ακόλουθο:

ΣΠΠ, Αρθρωτές ζεύξεις, Αναδιατάξιμο

σταθερές:

- $h_{dt} (\geq 0)$ επαυξητικός όγκος ζήτησης για τη ζήτηση d την περίοδο τ
 $\xi'_{e\tau}$ κόστος εγκατάστασης ενός module χωρητικότητας στη ζεύξη e την περίοδο τ
 $\xi''_{e\tau}$ κόστος συντήρησης ενός module χωρητικότητας στη ζεύξη e την περίοδο τ
για χωρητικότητα που εγκαταστάθηκε σε προηγούμενες περιόδους
 ζ_{dpt} μοναδιαίο κόστος δρομολόγησης στη διαδρομή p του *συσσωρευτικού* όγκου ζήτησης για τη ζήτηση d το χρόνο τ

μεταβλητές:

- x_{dpt} (μη-αρνητική) η ροή που καταναμήθηκε στη διαδρομή p για τη δρομολόγηση του *συσσωρευτικού* όγκου ζήτησης για τη ζήτηση d το χρόνο τ
 $y_{e\tau}$ η (νέα) χωρητικότητα της ζεύξης e εκφρασμένη σε modules (μη-αρνητικός ακέραιος) που απαιτείται το χρόνο τ

σκοπός

$$\text{ελαχιστοποίηση } F = \sum_{\tau} \sum_e (\xi'_{e\tau} y_{e\tau} + \xi''_{e\tau} \sum_{t < \tau} y_{e\tau}) + \sum_{\tau} \sum_d \sum_p \zeta_{dpt} x_{dpt} \quad (3.2.5\alpha)$$

περιορισμοί

$$\sum_p x_{dpt} = \sum_{t \leq \tau} h_{dt}, \quad d = 1, 2, \dots, D \quad \tau = 1, 2, \dots, T \quad (3.2.3\beta)$$

$$\sum_d \sum_p \delta_{edpt} x_{dpt} \leq \sum_{t \leq \tau} M y_{e\tau}, \quad e = 1, 2, \dots, E \quad \tau = 1, 2, \dots, T. \quad (3.2.3\gamma)$$

3.2.2. Δρομολόγησης ροής σε προβλήματα πολλαπλής περιόδου

Όταν ένα δίκτυο μεταγωγής έχει ήδη εγκατεστημένη χωρητικότητα ή είναι διαθέσιμη προβολή της ζήτησης στην εγκατεστημένη χωρητικότητα κατά τη διάρκεια πολλαπλών χρονικών περιόδων, πρόκειται για σχεδιαστικό πρόβλημα δρομολόγησης ζήτησης πολλαπλής περιόδου με ελάχιστο κόστος. Το πρόβλημα αυτό αναφέρεται κλασικά ως πρόβλημα *δρομολόγησης κυκλώματος*, ή πρόβλημα τηλεπικοινωνιακού φορτίου [24]. Εδώ θα χρησιμοποιηθεί ο όρος *δρομολόγηση ροής*. Η προβαλλόμενη ζήτηση μπορεί να προέρχεται από επαναποστολή ή από καινούργια ζήτηση στο μέλλον. Το κόστος δρομολόγησης μπορεί να έχει έναν εκπτώτικο παράγοντα από μια χρονική περίοδο στην επόμενη, κατά συνέπεια είναι σημαντικό να θεωρηθεί ένας τέτοιος παράγοντα στο κόστος δρομολόγησης. Ξανά, όπως προηγουμένως, ο όγκος ζήτησης σε

μια περίοδο θα σημαίνει νέα/προσθετική ζήτηση για τη συγκεκριμένη περίοδο. Πρώτα παρουσιάζεται η περίπτωση κατά την οποία η δρομολόγηση της ζήτησης σε μια περίοδο δεν μπορεί να επαναδρομολογηθεί σε επόμενη περίοδο.

ΣΠΠ, Δρομολόγηση ροής

δείκτες:

$d = 1, 2, \dots, D$ ζήτηση
 $\tau = 1, 2, \dots, T$ χρονικός ορίζοντας
 $p = 1, 2, \dots, P_{dt}$ υποψήφιες διαδρομές για τη ζήτηση d την περίοδο τ
 $e = 1, 2, \dots, E$ ζεύξεις

σταθερές:

$\delta_{edp\tau} = 1$, αν η ζεύξη e ανήκει στη διαδρομή p φέροντας τη ζήτηση d την περίοδο τ ;
 0, αλλιώς
 h_{dt} όγκος ζήτησης για τη ζήτηση d την περίοδο τ
 ζ_{dpt} μοναδιαίο κόστος (με την έκπτωση) δρομολόγησης στη διαδρομή p του
 συσσωρευτικού όγκου ζήτησης για τη ζήτηση d το χρόνο τ
 $c_{e\tau}$ νέα χωρητικότητα στη ζεύξη e την περίοδο τ

μεταβλητές:

x_{dpt} (μη-αρνητική) η ροή που καταναμήθηκε στη διαδρομή p για τη ζήτηση d
 το χρόνο τ
 $\underline{y}_{e\tau}$ το φορτίο στη ζεύξη e το χρόνο τ λόγω της νέας ζήτησης το χρόνο τ

σκοπός

$$\text{ελαχιστοποίηση } F = \sum_{\tau} \sum_d \sum_p \zeta_{dpt} x_{dpt} \quad (3.2.6\alpha)$$

περιορισμοί

$$\sum_p x_{dpt} = h_{dt}, \quad d = 1, 2, \dots, D \quad \tau = 1, 2, \dots, T \quad (3.2.6\beta)$$

$$\sum_d \sum_p \delta_{edp\tau} x_{dpt} = \underline{y}_{e\tau}, \quad e = 1, 2, \dots, E \quad \tau = 1, 2, \dots, T \quad (3.2.6\gamma)$$

$$\underline{y}_{e\tau} \leq c_{e\tau} + \sum_{t < \tau} (c_{e\tau} - \underline{y}_{e\tau}), \quad e = 1, 2, \dots, E \quad \tau = 1, 2, \dots, T. \quad (3.2.6\delta)$$

Αξιοσημείωτη είναι η ομοιότητα μεταξύ των σχέσεων (3.2.6δ) και (3.2.3δ). Υπάρχει και άλλος τρόπος για να γραφτεί το παραπάνω μοντέλο, επαναπροσδιορίζοντας τη χωρητικότητα σε μια περίοδο ως την συσσωρευτική χωρητικότητα ως τότε

συμπεριλαμβανομένης της τρέχουσας περιόδου. Κατά συνέπεια, το παραπάνω μοντέλο μπορεί να ξαναγραφτεί χωρίς τη χρήση της μεταβλητής φορτίου ζεύξης ως εξής:

ΣΠΠ, Δρομολόγηση ροής- Τροποποιημένο

σταθερές (τροποποιημένες):

$C_{e\tau}$ συσσωρευτική χωρητικότητα στη ζεύξη e την περίοδο τ ($C_{e\tau} = \sum_{t \leq \tau} c_{e\tau}$)

μεταβλητές:

$x_{d\tau}$ (μη-αρνητική) η ροή που καταναμήθηκε στη διαδρομή p για τη ζήτηση d το χρόνο τ

σκοπός

ελαχιστοποίηση $F = \sum_{\tau} \sum_d \sum_p \zeta_{d\tau} x_{d\tau}$ (3.2.7α)

περιορισμοί

$\sum_p x_{d\tau} = h_{d\tau}, \quad d = 1, 2, \dots, D \quad \tau = 1, 2, \dots, T$ (3.2.7β)

$\sum_{t \leq \tau} \sum_d \sum_p \delta_{ed\tau} x_{d\tau} = C_{e\tau}, \quad e = 1, 2, \dots, E \quad \tau = 1, 2, \dots, T.$ (3.2.7γ)

Αξιοσημείωτος είναι ο τρόπος με τον οποίο χρησιμοποιούνται τα t και τ (ως δείκτες) για να ικανοποιηθεί το εφικτό των ζεύξεων στο χρόνο. Ένας κίνδυνος που υπάρχει και με τα δύο μοντέλα, (3.2.6) και (3.2.7), είναι ότι το πρόβλημα μπορεί να μην είναι επιλύσιμο όταν αναζητείται λύση για όλο το χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού, αφού είναι πιθανό να μην υπάρχει επαρκής χωρητικότητα διαθέσιμη σε κάποια μελλοντική περίοδο για να εξυπηρετηθεί η ζήτηση. Ενώ σε μοντέλα μιας περιόδου η (feasibility) βιωσιμότητα είναι εύκολο να εξασφαλιστεί, είναι μάλλον δύσκολο να προβλεφθεί για πολλαπλές χρονικές περιόδους. Κατά συνέπεια, είναι επιθυμητή η εισαγωγή μιας τεχνητής μεταβλητής διαδρομής (για κάθε ζήτηση και περίοδο) με υψηλό κόστος για να διατηρείται η ευστάθεια του μοντέλου (από μαθηματική άποψη).

ΣΠΠ, Δρομολόγηση ροής- Τροποποιημένο 2

σταθερές:

$C_{e\tau}$ συσσωρευτική χωρητικότητα στη ζεύξη e την περίοδο τ ($C_{e\tau} = \sum_{t \leq \tau} c_{e\tau}$)
 Δ μια μεγάλη θετική τιμή ποινής

μεταβλητές:

x_{dpt} (μη-αρνητική) η ροή που καταναμήθηκε στη διαδρομή p για τη ζήτηση d το χρόνο τ

$\tilde{x}_{d\tau}$ (μη-αρνητική) η ροή σε μια τεχνητή διαδρομή για τη ζήτηση d το χρόνο τ

σκοπός

$$\text{ελαχιστοποίηση } F = \sum_{\tau} \sum_d \sum_p \zeta_{dpt} x_{dpt} + \sum_{\tau} \sum_d \Delta \tilde{x}_{d\tau} \quad (3.2.8\alpha)$$

περιορισμοί

$$\sum_p x_{dpt} + \tilde{x}_{d\tau} = h_{d\tau}, \quad d = 1, 2, \dots, D \quad \tau = 1, 2, \dots, T \quad (3.2.8\beta)$$

$$\sum_{t \leq \tau} \sum_d \sum_p \delta_{edp\tau} x_{dpt} \leq C_{e\tau}, \quad e = 1, 2, \dots, E \quad \tau = 1, 2, \dots, T. \quad (3.2.8\gamma)$$

Τώρα το $\tilde{x}_{d\tau} = h_{d\tau}$ ($d = 1, 2, \dots, D$ και $\tau = 1, 2, \dots, T$) είναι μια εφικτή λύση που ικανοποιεί τους περιορισμούς στο παραπάνω πρόβλημα (βέβαια, σε ένα πολύ ψηλό τεχνητό κόστος). Αν το δίκτυο διαθέτει αρκετή χωρητικότητα για να ικανοποιήσει όλη τη ζήτηση, οι τεχνητές μεταβλητές $\tilde{x}_{d\tau}$ θα πάρουν την τιμή 0 στην τελική λύση. Αν, από την άλλη πλευρά, κάποιες $\tilde{x}_{d\tau}$ είναι θετικές στην τελική λύση, αυτό χρησιμεύει ως ένδειξη ότι το δίκτυο δεν έχει αρκετή χωρητικότητα για να δρομολογήσει όλη τη ζήτηση και χρειάζεται να επιλθθούν μοντέλα όπως το (3.2.3) για να προσδιοριστεί η επιπλέον χωρητικότητα που απαιτείται (και πού αυτή απαιτείται).

Αυτό οδηγεί σε μία ακόμα εύκολα αντιληπτή περίπτωση που βρίσκεται ανάμεσα στα (3.2.3) και (3.2.7). Έστω ένα δίκτυο μεταγωγής, στο οποίο ο χρονικός ορίζοντας προγραμματισμού εκτείνεται σε 10 περιόδους από τις οποίες στις 3 πρώτες δεν μπορεί να προστεθεί χωρητικότητα. Αυτό είναι πιθανό λόγω του χρόνου στέρησης που υπάρχει στην εγκατάσταση νέας χωρητικότητας. Το μοντέλο (3.2.3) μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτή την περίπτωση με μια μικρή αλλαγή. Έστω \hat{T} (όπου $\hat{T} < T$) η περίοδος του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού πριν από την οποία δεν μπορεί να προστεθεί χωρητικότητα. Τότε μπορεί να γίνει χρήση του μοντέλου (3.2.3) με τους ακόλουθους περιορισμούς:

$$y_{e\tau} = 0 \quad \tau = 1, 2, \dots, \hat{T} - 1$$

για να συμπεριληφθεί η περίπτωση κατά την οποία δεν μπορεί να προστεθεί χωρητικότητα πριν την περίοδο \hat{T} .

Τέλος θα σχολιαστούν συνοπτικά δύο επιπρόσθετες περιπτώσεις: 1) δρομολόγηση ροής που έγινε σε μια προηγούμενη περίοδο να διακοπεί σε μελλοντική, και 2) αναδιαταξιμότητα δρομολόγησης ροής μεταξύ περιόδων.

Η πρώτη περίπτωση, θεωρώντας αρνητική ζήτηση ($h_{d\tau} < 0$) σε κάποιες περιόδους, μπορεί να χειριστεί παρόμοια με την αντίστοιχη περίπτωση στα πλαίσια του προγραμματισμού χωρητικότητας που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.2.1.

Για τη δεύτερη περίπτωση, είναι απαραίτητο να επαναδιατυπωθεί ο περιορισμός για τη ροή της ζήτησης από το (3.2.8β) και γίνει ως εξής:

ΣΠΠ, Αναδιατάξιμη δρομολόγηση ροής

σταθερές:

$C_{e\tau}$ συσσωρευτική χωρητικότητα στη ζεύξη e την περίοδο τ ($C_{e\tau} = \sum_{t \leq \tau} c_{e\tau}$)
 Δ μια μεγάλη θετική τιμή ποινής

μεταβλητές:

$x_{d\tau}$ (μη-αρνητική) η ροή που καταναμήθηκε στη διαδρομή p για τη ζήτηση d το χρόνο τ (συμπεριλαμβάνει την αναδιατεταγμένη)

$\tilde{x}_{d\tau}$ (μη-αρνητική) η ροή σε μια τεχνητή διαδρομή για τη ζήτηση d το χρόνο τ

σκοπός

$$\text{ελαχιστοποίηση } F = \sum_{\tau} \sum_d \sum_p \zeta_{dpt} x_{dpt} + \sum_{\tau} \sum_d \Delta \tilde{x}_{d\tau} \quad (3.2.9\alpha)$$

περιορισμοί

$$\sum_p x_{dpt} + \tilde{x}_{d\tau} = \sum_{t \leq \tau} h_{d\tau}, \quad d = 1, 2, \dots, D \quad \tau = 1, 2, \dots, T \quad (3.2.9\beta)$$

$$\sum_d \sum_p \delta_{edp\tau} x_{dpt} \leq C_{e\tau}, \quad e = 1, 2, \dots, E \quad \tau = 1, 2, \dots, T. \quad (3.2.9\gamma)$$

3.3. Παραρτήματα

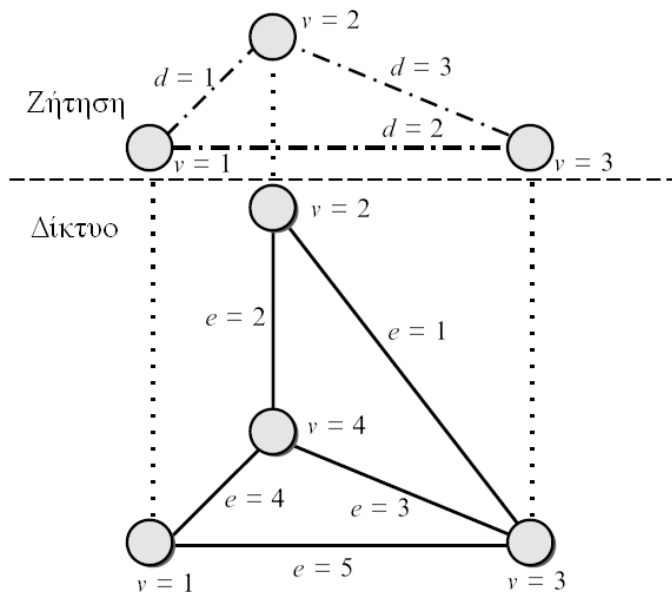
Παράρτημα 3.3.1: Προβλήματα διαστασιολόγησης

Αρχικά πρέπει να εισαχθούν κάποιοι γενικοί όροι για τα προβλήματα σχεδίασης δικτύου. Ο όρος *κόμβος* είναι ένας εύχρηστος γενικός όρος για αναφορά σε διαφορετικούς τύπους συσκευών δρομολόγησης ή μεταγωγής σε ένα δίκτυο. Ο *όγκος ζήτησης* αναφέρεται είτε στον μεταφερόμενο όγκο πληροφορίας (όπως στο Internet ή το τηλεφωνικό δίκτυο) ή στο απαιτούμενο εύρος ζώνης (όπως στο SONET) μεταξύ ενός ζεύγους κόμβων, ανάλογα με το είδος του δικτύου. Ένα τέτοιο ζευγάρι κόμβων ονομάζεται *ζεύγος ζήτησης*, ή απλά *ζήτηση*. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην ανάλυση που ακολουθεί η ζήτηση έχει θεωρηθεί *αμφίδρομη* (χωρίς κατεύθυνση), δηλαδή «μεταξύ» των κόμβων και όχι «από ένα κόμβο προς κάποιον άλλο». Λαμβάνοντας υπόψη όλους τους κόμβους ενός δικτύου, εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι οι όγκοι ζήτησης ανάμεσα σε κάθε ζευγάρι ζήτησης μπορούν να απεικονισθούν σε ένα πίνακα που ονομάζεται *μήτρα όγκου ζήτησης* ή *μήτρα όγκου κίνησης* (ή πιο απλά *μήτρα ζήτησης/κίνησης*). Τέλος εισάγονται οι όροι της *μονάδας όγκου ζήτησης* (Demand Volume Unit-DVU) και *μονάδας χωρητικότητας ζεύξης* (Link Capacity Unit-LCU). Κάθε ζήτηση χαρακτηρίζεται από τον όγκο ζήτησης μετρημένο σε DVU. Ένα DVU, ανάλογα με το δίκτυο που περιγράφεται, μπορεί να είναι για παράδειγμα rps (packets per second-πακέτα το δευτερόλεπτο), ή Erlang, ή (κβαντισμένος) ρυθμός μετάδοσης. Όμοια, το LCU είναι η μονάδα μέτρησης της χωρητικότητας μιας ζεύξης και διαφέρει ανάλογα με το στρώμα του δικτύου μεταφοράς που περιγράφεται. Προφανώς πρέπει τα δύο μεγέθη να μετρώνται στις ίδιες μονάδες για συγκεκριμένη περιγραφή.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί ένα απλό πρόβλημα διαστασιολόγησης δικτύου. Μέσω αυτού του παραδείγματος θα οριστούν τα μεγέθη και οι συμβολισμοί που εμπλέκονται στη κατάστρωση ενός προβλήματος διαστασιολόγησης. Η δομή του δικτύου φαίνεται στο κάτω μέρος του σχήματος Γ-1 και αποτελείται από $V=4$ κόμβους ($v=1,2,3,4$) και $E=5$ ζεύξεις ($e=1,2,3,4,5$) (μη κατευθυντικές). Όπως φαίνεται στο πάνω μέρος του σχήματος Γ-1, υπάρχουν $D=3$ ζητήσεις ($d=1,2,3$). Στο σχήμα έχει σχεδιαστεί μια τεχνητή διακεκομμένη γραμμή μεταξύ του πάνω και του κάτω μέρους του σχήματος Γ-1 για να

φαίνεται η αντιστοιχία των κόμβων ζήτησης στα δύο σχήματα. Ο κόμβος $v=4$ δεν είναι τελικός κόμβος κάποιας ζήτησης, και γι' αυτό αποκαλείται ενδιάμεσος κόμβος.

Η χωρητικότητα μιας ζεύξης e ($e = 1, 2, \dots, E$) θα συμβολίζεται με c_e όταν η χωρητικότητα είναι δεδομένη. Από την άλλη πλευρά, για συγκεκριμένα σχεδιαστικά προβλήματα, η χωρητικότητα μιας ζεύξης δεν δίνεται, αλλά αποτελεί μεταβλητή της σχεδίασης. Για παράδειγμα, τέτοιο πρόβλημα είναι η σχεδίαση δικτύου που απαιτείται ο προσδιορισμός των ροών της ζήτησης και οι χωρητικότητες των ζεύξεων για τη μεταφορά του όγκου ζήτησης, το οποίο καλείται *πρόβλημα διαστασιολόγησης*. Όταν η χωρητικότητα της ζεύξης είναι μεταβλητή, θα χρησιμοποιείται ο συμβολισμός y_e . Ως μονάδα μέτρησης της χωρητικότητας θα χρησιμοποιηθεί η μονάδα χωρητικότητας ζεύξης (LCU). Σε μια μονάδα χωρητικότητας (ή 1 LCU) στη ζεύξη e αντιστοιχεί μοναδιαίο κόστος $\xi_e (\geq 0)$.

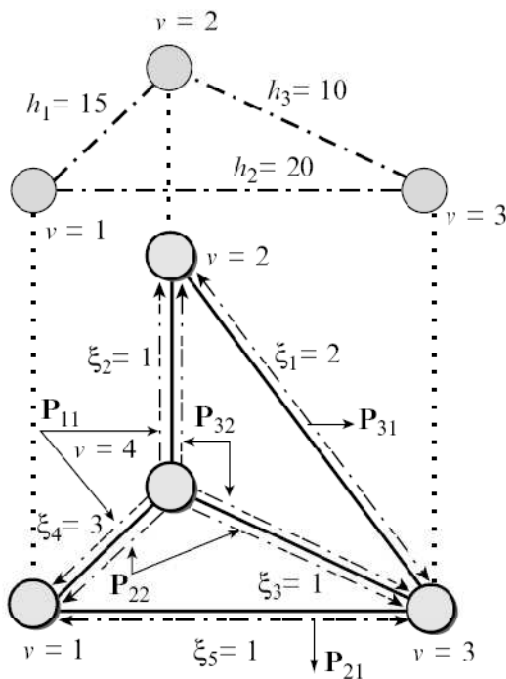


Σχήμα 3-4: Παράδειγμα δικτύου τεσσάρων κόμβων.

Κάθε ζήτηση d ($d=1, 2, \dots, D$) χαρακτηρίζεται από τον όγκο ζήτησης που συμβολίζεται με h_d . Ο όγκος ζήτησης, όπως αναφέρθηκε, μετριέται σε DVU. Για παράδειγμα, αν το DVU δίνεται σε Mbps, τότε για λόγους συμβατότητας, και το LCU πρέπει να αναπαρίσταται σε Mbps.

Στο Σχήμα 3-5 απεικονίζονται τα μοναδιαία κόστη και οι όγκοι ζήτησης κάθε ζεύξης και ζήτησης αντίστοιχα. Σε κάθε ζήτηση d ορίζεται ένα σύνολο διαδρομών που μπορεί να μεταφέρει τη ροή (= ο όγκος ζήτησης που μεταφέρεται σε μία διαδρομή). Για τη ζήτηση d ο συνολικός αριθμός των ορισμένων διαδρομών είναι P_d και απαριθμούνται με p από την

πρώτη διαδρομή μέχρι το συνολικό αριθμό των διαδρομών, δηλ. $p=1,2,\dots, P_d$. Η ακολουθία αυτή ονομάζεται λίστα υποψήφιων διαδρομών για τη ζήτηση d . Η λίστα διαδρομών, για να αντιστοιχηθεί με τη ζήτηση d , γράφεται και $P_d = (P_{d1}, P_{d2}, \dots, P_{dP_d})$. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι κάθε διαδρομή P_{dp} ($p=1,2,\dots,P_d$) ενώνει τους τελικούς κόμβους (πηγή και προορισμό) της ζήτησης d . Κάθε διαδρομή περιγράφεται από το σύνολο των ζεύξεων που την απαρτίζουν. Οι όγκοι ζήτησης μεταφέρονται σε ροές που ανατίθενται σε διαδρομές από τη λίστα διαδρομών. Η ροή που μεταφέρει τη ζήτηση d στη διαδρομή p συμβολίζεται με x_{dp} ($p=1,2,\dots,P_d$).



Σχήμα 3-5: Παράδειγμα δικτύου τεσσάρων κόμβων: Κόστη ζεύξης, όγκοι ζήτησης και διαδρομές.

Στο παράδειγμα του σχήματος 3-5 η ζήτηση $d=1$ επιτρέπεται να χρησιμοποιεί μόνο μία διαδρομή, την $P_{11} = \{2,4\}$, δηλαδή τη διαδρομή που αποτελείται από τις ζεύξεις 2 και 4 όπως φαίνονται στο Σχήμα 3-4. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει μόνο μια μεταβλητή ροής, η x_{11} . Ομοίως φαίνονται οι διαθέσιμες διαδρομές και για τις υπόλοιπες ζητήσεις. Εφόσον οι όγκοι ζήτησης για κάθε ζήτηση d πρέπει να μεταφερθούν από ροές στις υποψήφιες διαδρομές, μπορούν να γραφούν για το παράδειγμα του σχήματος 3-5 οι ακόλουθες εξισώσεις, γνωστές ως περιορισμοί της ζήτησης:

$$\begin{aligned}
 x_{11} &= 15 \\
 x_{21} + x_{22} &= 20 \\
 x_{31} + x_{32} &= 10
 \end{aligned}
 \tag{3.3.1}$$

Οι περιορισμοί (3.3.1) για τη ζήτηση μπορούν να γραφούν και σε γενικότερη μορφή. Έστω το διάνυσμα των ροών για τη ζήτηση d το οποίο συμβολίζεται με $x_d = (x_{d1}, x_{d2}, \dots, x_{dP_d})$ (για το συμβολισμό των διανυσμάτων χρησιμοποιείται η **έντονη** γραφή) με δείκτες διαδρομής $p=1,2,\dots,P_d$. Για κάθε ζήτηση d προκύπτει

$$x_{d1} + x_{d2} + \dots + x_{dP_d} = h_d$$

Και με χρήση του τελεστή άθροισης γίνεται

$$\sum_{p=1}^{P_d} x_{dp} = h_d, \quad d = 1, 2, \dots, D \quad (3.3.2)$$

Η σχέση (3.3.2), εφόσον η άθροιση γίνεται πάντα στο σύνολο των διαθέσιμων διαδρομών για κάθε ζήτηση d , γράφεται και

$$\sum_p x_{dp} = h_d, \quad d = 1, 2, \dots, D \quad (3.3.3)$$

Όπως είναι αναμενόμενο υπάρχει και ένα δεύτερο σύνολο περιορισμών που εξασφαλίζει ότι για κάθε ζεύξη e , οι ροές που τη χρησιμοποιούν δεν ξεπερνούν τη χωρητικότητα c_e (ή y_e , αν η χωρητικότητα ζεύξης είναι μεταβλητή). Αυτοί οι περιορισμοί ονομάζονται *περιορισμοί χωρητικότητας*. Η απαίτηση αυτή οδηγεί στις ακόλουθες ανισότητες για το δίκτυο των τεσσάρων κόμβων:

$$\begin{array}{rcl} & x_{31} & \leq y_1 \\ x_{11} & & + x_{32} \leq y_2 \\ & x_{22} & + x_{32} \leq y_3 \\ x_{11} & + x_{22} & \leq y_4 \\ & x_{21} & \leq y_5 \end{array} \quad (3.3.4)$$

Τα αθροίσματα στο αριστερό σκέλος των παραπάνω ανισοτήτων ονομάζονται *φορτία ζεύξης*, καθότι εκφράζουν τη συνολική ροή για μία ζεύξη σε DVU.

Γενικά, για την καταγραφή των φορτίων των ζεύξεων, είναι απαραίτητο να είναι γνωστή η σχέση μεταξύ ζεύξεων και διαδρομών. Η σχέση αυτή μπορεί να προσδιοριστεί με τη χρήση των συντελεστών ζεύξης-διαδρομής που παίρνουν τιμές 0 ή 1 όπως φαίνεται στον Πίνακα 3-4. Οι συντελεστές είναι μια ένδειξη για το ποιές μεταβλητές κίνησης θα βρίσκονται στο αριστερό σκέλος κάθε ανισότητας στην (3.3.4). Για παράδειγμα, η πρώτη διαδρομή για τη ζήτηση $d=1$, η διαδρομή P_{11} δεν χρησιμοποιεί τη ζεύξη $e=1$, άρα ο αντίστοιχος συντελεστής θα είναι 0. Αντίθετα η διαδρομή αυτή αποτελείται από τις ζεύξεις 2 και 4, και οι αντίστοιχοι συντελεστές στον πίνακα θα είναι 1.

e/P_{dp}	$P_{11}=\{2,4\}$	$P_{21}=\{5\}$	$P_{22}=\{3,4\}$	$P_{31}=\{1\}$	$P_{32}=\{2,3\}$
1	0	0	0	1	0
2	1	0	0	0	1
3	0	0	1	0	1
4	1	0	1	0	0
5	0	1	0	0	0

Πίνακας 3-4: Συντελεστές ζεύξης-διαδρομής για το παράδειγμα των τεσσάρων κόμβων.

Η πληροφορία αυτή μπορεί να παρουσιαστεί συνοπτικότερα με την εισαγωγή ενός νέου συμβόλου δ . Ο συντελεστής δ_{edp} ορίζεται για κάθε τριάδα (e, d, p) όπου $e=1,2,\dots,E$, $d=1,2,\dots,D$ και $p=1,2,\dots,P_d$ ως εξής:

$$\delta_{edp} = \begin{cases} 1 & \text{αν η ζεύξη } e \text{ ανήκει στη διαδρομή } p \text{ για τη ζήτηση } d \\ 0 & \text{διαφορετικά.} \end{cases} \quad (3.3.5)$$

Με χρήση των νεοεισηγμένων συντελεστών το φορτίο μιας ζεύξης e μπορεί να γραφτεί με τη γραμμική σχέση

$$\sum_d \sum_p \delta_{edp} x_{dp}.$$

Με χρήση του παραπάνω συμβολισμού οι περιορισμοί της χωρητικότητας μπορούν να γραφτούν γενικά

$$\sum_d \sum_p \delta_{edp} x_{dp} \leq y_e, \quad e = 1, 2, \dots, E \quad (3.3.6)$$

Στη γενική του μορφή, ένα πρόβλημα διαστασιολόγησης με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους της χωρητικότητας, διατυπώνεται ως εξής:

ελαχιστοποίηση

Συνάρτηση στόχος/κόστους:

$$F = \sum_e \xi_e y_e$$

υπό τους περιορισμούς

Περιορισμοί ζήτησης:

$$\sum_p x_{dp} = h_d, \quad d = 1, 2, \dots, D$$

Περιορισμοί χωρητικότητας:

$$\sum_d \sum_p \delta_{edp} x_{dp} \leq y_e, \quad e = 1, 2, \dots, E$$

Μεταβλητές χωρητικότητας:

$$x \geq 0, \quad y \geq 0.$$

Για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων και τον προσδιορισμό της βέλτιστης λύσης χρησιμοποιείται ο κανόνας της ελάχιστης διαδρομής για προβλήματα διαστασιολόγησης (Shortest-Path Allocation Rule for DP) [21]:

Όλος ο όγκος ζήτησης για κάθε ζήτηση κατανέμεται στην μικρότερη διαδρομή, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος των ζεύξεων και τη λίστα των υποψήφιων διαδρομών. Αν υπάρχουν περισσότερες από μία ελάχιστες διαδρομές για μία ζήτηση, τότε ο όγκος ζήτησης μπορεί να χωριστεί μεταξύ των συντομότερων διαδρομών με τυχαίο τρόπο.

Κεφάλαιο 4: Προσομοιώσεις και αριθμητικά αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό θα προσαρμοστούν τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο σε ένα διαπλανητικό δίκτυο. Συγκεκριμένα θα χρησιμοποιηθεί το διαπλανητικό δίκτυο Γης-Σελήνης που παρουσιάστηκε στο δεύτερο κεφάλαιο. Σκοπός της χρήσης των μοντέλων αυτών είναι η βέλτιστη δρομολόγηση της διαπλανητικής πληροφορίας με γνώμονα την περιορισμένη χωρητικότητα των δορυφόρων. Για την επίτευξη αυτού του στόχου αποτελεί κομβική επιλογή η δρομολόγηση με χρήση των μοντέλων πολλαπλής ώρας λόγω των πολλαπλών ωρών αιχμής στις περιοχές που εξυπηρετούν οι δορυφόροι.

Από τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν θα χρησιμοποιηθούν εκείνα που ταιριάζουν καλύτερα στις ανάγκες του προβλήματος. Για λόγους πληρότητας θα επαναδιατυπωθεί το μοντέλο και προσαρμοσμένο στα δεδομένα του δικτύου καθώς και ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυσή του.

4.1. Διατύπωση του προβλήματος

Αυτό το μοντέλο προκύπτει ως μέρος της σχεδίασης ενός αλγόριθμου δρομολόγησης κίνησης σε ένα διαπλανητικό δίκτυο. Στο σχεδιαστικό αυτό πρόβλημα, η επιλογή της διαδρομής αφορά στην επιλογή του δορυφόρου που θα εξυπηρετήσει τη διαπλανητική ζήτηση μεταξύ δύο κόμβων (Γη και Σελήνη). Θα χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθοι συμβολισμοί:

δείκτες:

$d = 1, 2, \dots, D$ ζήτηση (ζεύγος ζήτησης)

$i = 1, 2, \dots, I$ υπηρεσίες

$t = 1, 2, \dots, T$ ώρες αιχμής κίνησης

$p = 1, 2, \dots, P_{dti}$ υποψήφιος διαδρομές για τη ζήτηση d το χρόνο t για την υπηρεσία i

$e = 1, 2, \dots, E$ ζεύξεις

σταθερές:

$\delta_{edpti} = 1$, αν η ζεύξη e ανήκει στη διαδρομή p πραγματοποιώντας τη ζήτηση d

για την \mathbb{Z} πηρεσία i στο χρονικό παράθυρο t ; 0,αλλιώς

h_{dti} όγκος της ζήτησης d , της \mathbb{Z} πηρεσίας i , το χρόνο t

ξ_e κόστος ενός module χ ρητικότητας

M μέγεθος του module της χ ρητικότητας της ζεύξης

μεταβλητές:

u_{dpti} δ \mathbb{Z} αδική μεταβλητή που αναφέρεται στη ροή που έχει ανατεθεί στη διαδρομή p της \mathbb{Z} πηρεσίας i για τη ζήτηση d στο χρόνο t

y_e η χ ρητικότητα της ζεύξης e εκφρασμένη σε modules (μη-αρνητικός ακέραιος)

Το πρόβλημα διαστασιολόγησης πολλαπλής ώρας για το δίκτυο διατυπώνεται ως εξής.

Πρόβλημα (Π)

$$\text{ελαχιστοποίηση } F = \sum_e \xi_e y_e \quad (4.1\alpha)$$

Πό τους περιορισμούς:

$$\sum_p u_{dpti} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, I \quad d = 1, 2, \dots, D \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (4.1\beta)$$

$$\sum_d \sum_i h_{dti} \sum_p \delta_{edpti} u_{dpti} \leq M y_e, \quad e = 1, 2, \dots, E \quad t = 1, 2, \dots, T. \quad (4.1\gamma)$$

$$u_{dpti} = 0 \text{ ή } 1, \quad i = 1, 2, \dots, I \quad d = 1, 2, \dots, D \quad t = 1, 2, \dots, T \quad e = 1, 2, \dots, E \quad (4.1\delta)$$

$$y_e \geq 0 \text{ και ακέραιος, } \quad e = 1, 2, \dots, E \quad (4.1\epsilon)$$

Το πρόβλημα που ορίζεται από τις εξισώσεις (4.1α)-(4.1ε), θα αναφέρεται ως πρόβλημα (Π). Στο πρόβλημα (Π), η συνάρτηση F (4.1α) αναπαριστά το συνολικό κόστος χ ρητικότητας δικτύου επί όλων των ζεύξεων που στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί. Ελαχιστοποιώντας τις απαιτήσεις χ ρητικότητας των ζεύξεων ελαχιστοποιείται άμεσα και η απαιτούμενη χ ρητικότητα στο δορυφόρο για την εξπληρέτηση της \mathbb{Z} πηρεσίας. Οι περιορισμοί (4.1β) και (4.1δ) αφορούν στην επιλογή μιας διαδρομής (από το πλήθος των διαθέσιμων διαδρομών) για τη δρομολόγηση όλης της ζήτησης h_{dti} ενός ζεύγους ζήτησης τις διάφορες ώρες της ημέρας για μια \mathbb{Z} πηρεσία. Πρόκειται δηλαδή για μη-διακλαδιζόμενη δρομολόγηση, όπως απαιτείται από τα πρότυπα του διαπλανητικού διαδικτύου (μεταγωγή ολόκληρου μηνύματος και όχι πακέτων). Το αριστερό σκέλος της

(4.1γ) είναι η συνολική ροή στη ζεύξη e την ώρα t για τη δρομολόγηση της ζήτησης h_{dti} για τα διάφορα ζεύγη ζήτησης και υπηρεσίες την ώρα t . Το δεξί σκέλος της (4.1γ) ορίζει ότι απαιτούνται y_e μονάδες χωρητικότητας στη ζεύξη e ώστε να ικανοποιείται η συνολική ροή στη ζεύξη για όλες τις ώρες από το συνολικό εύρος ζώνης στη ζεύξη που είναι ίσο με My_e . Τέλος η (4.1ε) ορίζει ότι η μεταβλητή της χωρητικότητας παίρνει μόνο ακέραιες τιμές.

4.2. Επίλυση με Lagrangian Relaxation based Dual Approach

Θα παρουσιαστεί η μέθοδος επίλυσης του προβλήματος που βασίζεται στη δυική προσέγγιση με Λαγκρανζιανή χαλάρωση (Lagrangian-Relaxation (LR) based Dual Approach) για το μοντέλο. Όπως ειπώθηκε και στο τρίτο κεφάλαιο στη προσέγγιση αυτή το πρωτεύον πρόβλημα μετασχηματίζεται με τη χαλάρωση των περιορισμών (ή ενός υποσυνόλου αυτών) και στη συνέχεια λύνεται στο χώρο των δυικών. Τα υποπροβλήματα της χωρητικότητας χρίζουν, όπως συζητήθηκε και στο τρίτο κεφάλαιο, άνω φράγματος. Οποιοσδήποτε αρκετά μεγάλος αριθμός που διατηρεί βιώσιμο το πρόβλημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως άνω φράγμα. Έτσι για τις μεταβλητές της χωρητικότητας y ισχύει:

$$y_e \leq \hat{y}_e \quad e = 1, 2, \dots, E \quad (4.2)$$

Έστω $\pi = (\pi_{et})$ οι δυικοί πολλαπλασιαστές που σχετίζονται με τον περιορισμό (4.1γ). Η Λαγκρανζιανή είναι:

$$\begin{aligned} L(u, y; \pi) &= \sum_e \xi_e y_e + \sum_e \sum_t \pi_{et} (\sum_d \sum_i h_{dti} \sum_p \delta_{edpti} u_{dpti} - M y_e) \Leftrightarrow \\ L(u, y; \pi) &= \sum_e (\xi_e - M \sum_t \pi_{et}) y_e + \sum_t \sum_d \sum_i h_{dti} \sum_p (\sum_e \pi_{et} \delta_{edpti}) u_{dpti} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Το δυικό πρόβλημα (Δ) ορίζεται ως εξής:

$$u_\Delta = \max_{\pi \geq 0} W(\pi), \quad (4.4)$$

Όπου

$$W(\pi) = \min_{u, y} L(u, y; \pi). \quad (4.5)$$

Για δεδομένο π η Λαγκρανζιανή χωρίζεται σε u και y και η (4.3) απλοποιείται σε δύο ανεξάρτητα υποπροβλήματα, δηλαδή,

$$\min_{u,y} L(u, y; \pi) = \min_y L_1(y; \pi) + \min_u L_2(u; \pi) = W_1(\pi) + W_2(\pi), \quad (4.6)$$

όπου

$$W_1(\pi) = \min_y L_1(y; \pi) = \min_y \{ \sum_e (\xi_e - M \sum_t \pi_{et}) y_e \mid 0 \leq y \leq \hat{y} \}, \quad (4.7)$$

και

$$\begin{aligned} W_2(\pi) &= \min_u L_2(u; \pi) = \\ &= \min_u \left\{ \sum_t \sum_d \sum_i h_{dti} \sum_p (\sum_e \pi_{et} \delta_{edpti}) u_{dpti} \mid \sum_p u_{dpti} = 1, \quad i = \right. \\ &1, 2, \dots, I \quad d = 1, 2, \dots, D \quad t = 1, 2, \dots, T; \quad u_{dpti} = 0 \text{ ή } 1, \quad i = 1, 2, \dots, I \quad d = \\ &1, 2, \dots, D \quad t = 1, 2, \dots, T \quad e = 1, 2, \dots, E \} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Στο υποπρόβλημα (4.7) παρατηρούμε ότι η $L_1(y; \pi)$ διαχωρίζεται περαιτέρω σε κάθε ζεύξη διότι έχει περιορισμούς που αφορούν μόνο τη μεταβλητή της χωρητικότητας κάθε ζεύξης. Έτσι η λύση του (4.8) μπορεί να βρεθεί εύκολα θέτοντας

$$y_e^*(\pi) = \begin{cases} 0, & \text{για } \xi_e \geq M \sum_t \pi_{et} \\ \hat{y}_e, & \text{για } \xi_e < M \sum_t \pi_{et} \end{cases} \quad (4.9)$$

Το υποπρόβλημα (4.8) είναι επίσης διαχωρίσιμο για κάθε t, d, i αφού δεν υπάρχει περιορισμός που να συσχετίζει τα t, d και i . Η λύση προκύπτει εύκολα θέτοντας 1 τη μεταβλητή για τη διαδρομή που παρουσιάζει το ελάχιστο «κόστος διαδρομής» $\sum_e \pi_{et} \delta_{edpti}$ μεταξύ όλων των διαδρομών για τα συγκεκριμένα t, d και i . Ο δείκτης αυτής της διαδρομής συμβολίζεται με p^* έτσι ώστε $u_{dp^*ti} = 1$.

Επειδή η συνάρτηση (4.4) του δυικού προβλήματος (Δ) δεν είναι διαφορίσιμη, για την επίλυσή του χρησιμοποιείται προσέγγιση υποκλίσης. Αυτή είναι μια επαναληπτική μέθοδος επί της δυικής μεταβλητής π . Ο πλήρης αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση το προβλήματος είναι ο ακόλουθος.

Βήμα 0: Επιλογή ενός αρχικού π^0 , k_{max} και $\rho_{maxiter}$. Θέτει:

$$\rho = 2, \rho_{min} = 0.005, k = 0, \rho_{iter} = 0, F^{best} = \infty.$$

Βήμα 1: $k := k + 1, \rho_{iter} := \rho_{iter} + 1.$

Δεδομένου του π^k (το π στην επανάληψη k), λύνει τα υποπροβλήματα (4.7) και (4.8) ξεχωριστά για να πάρει τις λύσεις $u_{dp^*ti}(\pi^k) = 1$ και $y_e^*(\pi^k)$.

Βήμα 2: Χρησιμοποιεί το $u_{dp^*ti}(\pi^k) = 1$ για να υπολογίσει από τον περιορισμό (4.1γ) μια βιώσιμη λύση y που ικανοποιεί την $\sum_d \sum_i h_{dti} \sum_p \delta_{edpti} u_{dpti} \leq M y_e$.

Χρησιμοποιεί τα $u_{dp^*ti}(\pi^k) = 1$ και y για να υπολογίσει την πρωτεύουσα συνάρτηση F .

$$\text{Αν } F < F^{best} \text{ τότε } F^{best} := F, \mathbf{u}^{best} := \mathbf{u}, \mathbf{y}^{best} := \mathbf{y}, \bar{W} := F^{best}$$

$$\text{Αν } (\rho_{iter} > \rho_{maxiter}) \text{ τότε } \rho = \max\{\rho/2, \rho_{min}\}; \rho_{iter} = 0 \text{ τέλος.}$$

Βήμα 3: Χρησιμοποιεί τις λύσεις των υποπροβλημάτων (4.7) και (4.8) για τον υπολογισμό:

Της δυικής υποκλίσης από τη σχέση

$$\nabla W(\pi) = \sum_d \sum_i h_{dti} \delta_{edp^*ti} u_{dp^*ti}(\pi) - M y_e^*(\pi), \quad e = 1, 2, \dots, E \quad t = 1, 2, \dots, T. \quad (4.10)$$

Το δυικό πολλαπλασιαστή π

$$\pi_{et} \leftarrow \max\{0, \pi_{et} + \lambda \pi_{et}\}, \quad e = 1, 2, \dots, E \quad t = 1, 2, \dots, T, \quad (4.11)$$

όπου το βήμα λ δίνεται από την

$$\lambda = \rho \frac{\bar{W} - W(\pi)}{\|\nabla W(\pi)\|^2} \text{ με } \bar{W} \text{ ένα άνω φράγμα της δυικής συνάρτησης και η}$$

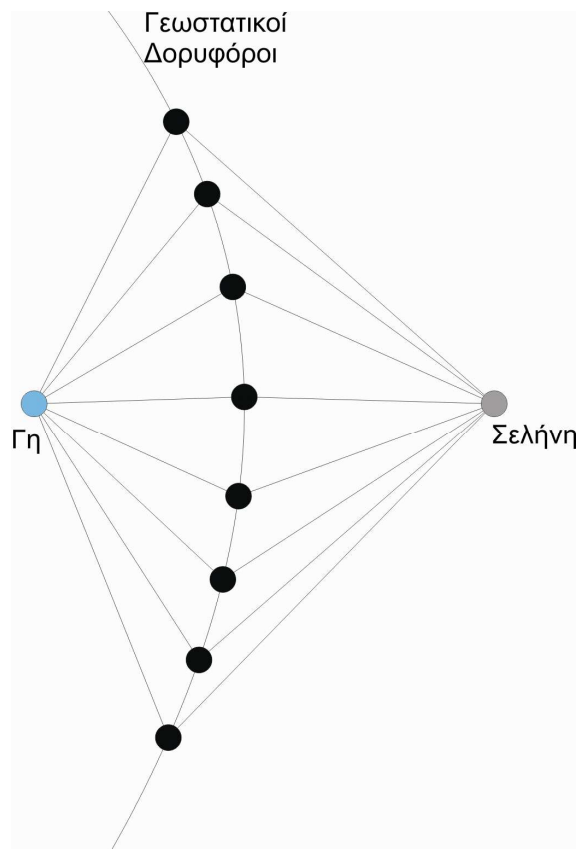
παράμετρος ρ έχει επιλεγθεί ώστε $0 < \rho \leq 2$.

Βήμα 4: Αν $k > k_{max}$, σταματάει· διαφορετικά επιστρέφει στο βήμα 1.

4.3. Αποτελέσματα

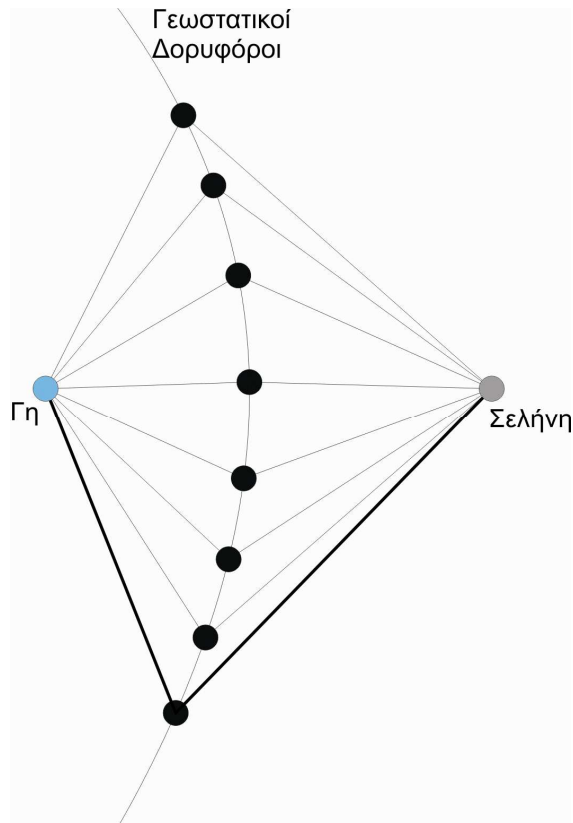
Ο αλγόριθμος αυτός υλοποιήθηκε στο Matlab και εφαρμόστηκε στο δίκτυο Γης-Σελήνης που περιγράφηκε στο 2^ο κεφάλαιο (Σχήμα 4-1). Το κόστος, ξ_e , κάθε ζεύξης θεωρήθηκε ότι αποτελείται από δύο στοιχεία: το κόστος τερματισμού (για κάθε άκρο) και το κόστος λόγω της απόστασης. Δηλαδή:

$$\xi_e = 2 \times C_{termin} + A \times D_e$$



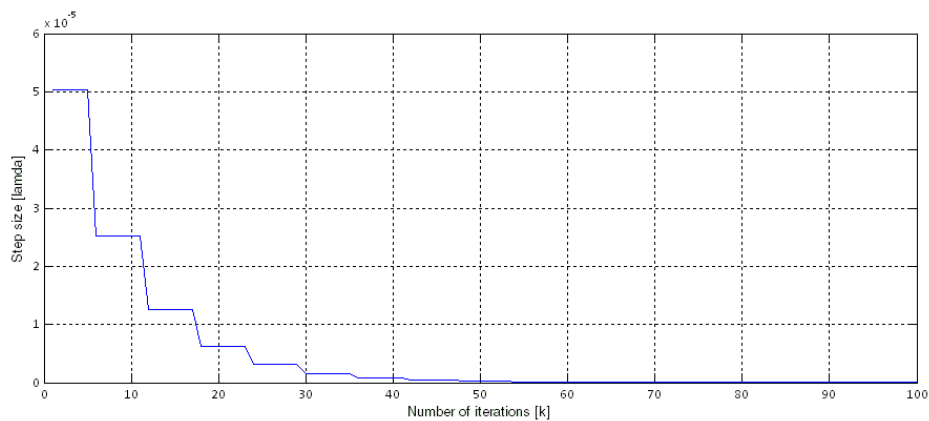
Σχήμα 4-1: Το δίκτυο Γης-Σελήνης.

Θεωρήθηκαν τυχαίες τιμές της διαπλανητικής κίνησης για τρία χρονικά παράθυρα κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η επιλογή της διαδρομής κατά την ώρα αιχμής στην Αθήνα φαίνεται στο Σχήμα 4-2 με έντονη γραμμή. Ο αλγόριθμος απέδωσε αντίστοιχα αποτελέσματα αυξάνοντας των αριθμών των χρονικών παραθύρων κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ενδιαφέροντα αποτελέσματα αναμένονται κατά την επέκταση του αλγορίθμου αυτού για μεγαλύτερο πλήθος σταθμών βάσης και υπηρεσιών, πράγμα που ξεφεύγει από τα πλαίσια αυτής της διπλωματικής και αποτελεί αντικείμενο για μελλοντική έρευνα.

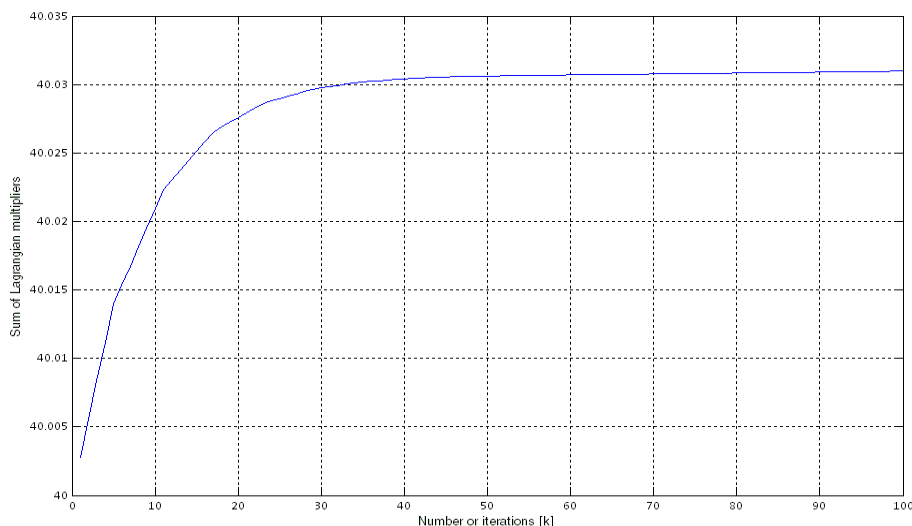


Σχήμα 4-2: Επιλογή διαδρομής για ώρα αιχμής Αθήνας.

Τέλος στα Σχήματα 4-3 και 4-4 απεικονίζεται η ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου. Στο Σχήμα 4-3 φαίνεται το άθροισμα των δυικών πολλαπλασιαστών, $\pi_{\epsilon\tau}$, το οποίο συγκλίνει σε μία σταθερή τιμή μετά από 55 περίπου επαναλήψεις του αλγορίθμου. Το ίδιο φαίνεται και για το μέγεθος του βήματος, λ , στο Σχήμα 4-3 το οποίο μηδενίζεται μετά από ίδιο αριθμό επαναλήψεων. Η ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου αυτού είναι αρκετά υψηλή. Αυτό οφείλεται στο μέγεθος του δικτύου, το οποίο έχει υποτεθεί αρκετά μικρό για τα δεδομένα της προσομοίωσης.



Σχήμα 4-3: Ταχύτητα σύγκλισης. Μέγεθος βήματος συναρτήσει αριθμού επαναλήψεων.



Σχήμα 4-4: Ταχύτητα σύγκλισης. Δυικοί πολλαπλασιαστές και αριθμός επαναλήψεων.

4.4. Συμπεράσματα

Η χρήση μοντέλων πολλαπλής ώρας για τη βέλτιστη χρησιμοποίηση της χωρητικότητας των δορυφορικών δικτύων (κατά την προσθήκη νέων υπηρεσιών, όπως το Διαπλανητικό Διαδίκτυο), κρίνεται αποτελεσματική. Ο αλγόριθμος που προτάθηκε για τη διαστασιολόγηση του δικτύου αποδίδει πολύ ικανοποιητικά για τα δεδομένα δορυφορικών δικτύων. Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχει πλήθος επεκτάσεων για το μοντέλο που παρουσιάστηκε. Η πρώτη και πιο εμφανής είναι η εφαρμογή του στο σύνολο των δορυφορικών σταθμών και των υπηρεσιών που τους παρέχονται ώστε η αξιοποίηση της χωρητικότητας να είναι ακόμα πιο αποτελεσματική. Μια εξίσου ενδιαφέρουσα υλοποίηση θα ήταν αυτή του μακροχρόνιου προγραμματισμού της χωρητικότητας με χρήση των μοντέλων πολλαπλής περιόδου που αναπτύχθηκαν στο τρίτο κεφάλαιο.

Βιβλιογραφία

- [1] Andrew S. Tanenbaum, *Computer Networks.*: Prentice Hall, 2003.
- [2] Keith Ross James F. Kurose, *Computer Networking.*: Pearson Education, 2003.
- [3] et. al. V. Cerf, "Interplanetary Internet (IPN): Architectural Definition," May 2001.
- [4] et. al. S. Burleigh, "Delay-Tolerant Networking -- An Approach to Interplanetary Internet," *IEEE Communications Magazine*, June 2003.
- [5] et. al. M. Mathis, "The macroscopic behavior of the TCP congestion avoidance algorithm," *Computer Communication Review*, vol. 27, July 1997.
- [6] V. Paxson, "Measurement and analysis of end-to-end Internet dynamics," *Ph.d. Thesis, University of California, Berkley*, April 1997.
- [7] F. Warthman, *Delay Tolerant Networks (DTNs): A tutorial*.
- [8] N2YO. [Online]. <http://www.n2yo.com>
- [9] Hellas Sat Corp., "Hellas-Sat 2 User's Manual," September 2005.
- [10] Telesat Corporation, "Telesat's Canadian Satellite Capacity and Services Plan for the 17 GHz BSS Orbital Resources at 111.1°WL and 113°WL," March 2009.
- [11] Futron Corporation, "Satellites Services Demand- The future in High Def," June 9, 2006.
- [12] Eutelsat Communications, "Eutelsat to drive satellite broadband to new frontiers with first full Ka-band satellite infrastructure," Paris, January 2008.
- [13] A. Jahn, E. Lutz, and M. Werner A. Bottcher, "Analysis of basic system parameters of communication networks based on low earth orbit satellites," *International Journal of Satellite Communications*, Jan./Feb. 1994.
- [14] A. Jahn, E. Lutz, B. Schmidt, and M. Werner A. Bottcher, "Networking requirements for user oriented LEO satellite systems," *ESA Study No. 9732/91/NL/RE, Final Report*, Feb. 1993.
- [15] Markus Werner, "Routing and Dimensioning in Satellite Networks with Dynamic Topology," *Lehrstuhl fur Kommunikationsnetze, Technische Universitat Munchen*, Jan.

2002.

- [16] M. D. Violet, "The development and application of a cost per minute metric for the evaluation of mobile satellite systems in a limited-growth voice communications market," *Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology*, Sept. 1995.
- [17] D. Medhi, "Multi-hour, multi-traffic class network design for virtual path-based dynamically reconfigurable wide-area ATM networks," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 3, 1995.
- [18] D. Medhi and D. Tipper, "Some approaches to solving a multi-hour broadband network capacity design problem with single-path routing," *Telecommunication Systems*, vol. 13, 2000.
- [19] G. R. Ash., *Dynamic Routing in Telecommunication Networks.*: McGraw-Hill, 1997.
- [20] Χ. Καψάλης Π. Κωττής, *Δορυφορικές Επικοινωνίες.*: Εκδόσεις Τζιόλα, 2006.
- [21] Deepankar Medhi Michal Pióro, *Routing, Flow, and Capacity Design in Routing, Flow, and Capacity Design.*: Morgan Kaufmann, 2004.
- [22] Dimitris P. Bertsekas, *Network Optimization: Continuous and Discrete Models.*: Athena Scientific, 1998.
- [23] F. Chang, "Routing-sequence optimization for circuit-switched networks," *AT&T Technical Journal*, vol. 68, May/June 1989.
- [24] K. T. Medhi, J. L. Strand, R. G. Cox, and S. Chen D. N. Lee, "Solving large telecommunications Solving large telecommunications," *AT&T Technical Journal*, May/June 1989.