ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΣΕΡΡΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Δίκτυα Η/Υ ΙΙ

Κωνσταντίνος Σ. Χειλάς
Καθηγητής Εφαρμογών

Τομέας Τηλεπικοινωνιών & Δικτύων

Σέρρες, 2007

… αυτό το δίχτυ(ο) έχει ονόματα πολλά …

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ III

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1-1

2. ΜΙΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΓΡΑΦΩΝ 2-1

2.1. ΘΕΩΡΙΑ ΓΡΑΦΩΝ & ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ 2-1

2.1.1. Τοπολογία 2-1

2.2. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΩΡΙΑ. 2-3

2.2.1. Διγράφοι και κατευθυνόμενοι γράφοι (digraphs & weighted graphs) 2-5

2.2.2. Δέντρα (Trees) 2-6

2.2.3. Spanning Tree 2-7

2.2.4. Minimal Spanning Tree 2-9

2.3. ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΤΟΥ ΕΛΑΧΙΣΤΟΥ ΜΟΝΟΠΑΤΙΟΥ. 2-11

2.3.1. Ο αλγόριθμος του Dijkstra 2-12

2.3.2. Ο αλγόριθμος Bellman - Ford 2-12

3. ΔΙΑΔΙΚΤΥΩΣΗ 3-1

3.1. ΔΙΑΔΙΚΤΥΩΣΗ (INTERNETWORKING) 3-1

3.2. ΔΙΑΔΙΚΤΥΩΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΠΕΔΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΩΝ 3-2

3.3. Η ΔΙΑΔΙΚΤΥΩΣΗ ΣΤΟ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ 3-4

3.3.1. Προώθηση (forwarding) και δρομολόγηση (routing) 3-6

3.3.2. Routing Domain 3-6

3.4. ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ 3-7

3.5. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ 3-8

3.5.1. Μερικά σημαντικά πρωτόκολλα δρομολόγησης 3-9

4. ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ…… 4-1

4.1. ΑΡΧΕΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ 4-1

4.1.1. Fixed routing 4-1

4.1.2. Adaptive routing 4-4

4.2. ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ (AUTONOMOUS SYSTEMS) 4-7

4.3. ROUTING INFORMATION PROTOCOL 4-8

4.4. ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΤΟΥ RIP 4-10

4.4.1. Σταδιακή ανανέωση (incremental update) 4-10

4.4.2. Αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου 4-11
4.4.3. Το πρόβλημα του να μετρήσεις ως το άπειρο. 4-11
4.4.4. Μορφή των RIP πακέτων 4-13
4.4.5. Περιορισμοί του RIP 4-13
4.5. LINK-STATE ROUTING 4-15
4.5.1. Όταν το δίκτυο πλημμυρίζει 4-16
4.5.2. Πλεονεκτήματα 4-17
4.5.3. Μειονεκτήματα 4-17
4.6. OSPF (OPEN SHORTEST PATH FIRST) 4-18
4.6.1. Το κόστος των ζεύξεων 4-21
4.7. PATH-VECTOR PROTOCOLS 4-23
4.8. BORDER GATEWAY PROTOCOL – BGP 4-24

5. Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΕΝΟΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΤΗ 5-1

5.1. ΓΕΝΙΚΑ 5-1
5.2. Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΡΟΩΘΗΣΗΣ 5-4
5.3. PROCESS SWITCHING 5-5
5.4. FAST SWITCHING 5-8
5.5. INDEPENDENT SWITCHING PROCESSOR 5-11
5.6. MULTIPLE INTERFACE SWITCHING PROCESSORS 5-12
5.6.1. The Route Processor 5-13
5.6.2. Συμπεριφορά σε πακέτα που απευθύνονται στον ίδιο 5-13

6. MULTICASTING 6-1

6.1. ΟΙ ΑΝΑΓΚΕΣ ΤΩΝ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ 6-1
6.2. MULTICASTING 6-3
6.3. ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΓΙΑ MULTICASTING 6-6
6.4. IP MULTICASTING 6-9
6.5. INTERNET GROUP MANAGEMENT PROTOCOL (IGMP) 6-10
6.5.1. Πώς λειτουργεί όμως το IGMP; 6-10

7. DIGITAL SUBSCRIBER LINE 7-1

7.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 7-1
7.2. ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΤΟ ADSL 7-1
7.3. ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ADSL 7-3
7.4. Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ADSL 7-6
7.5. Η ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΟΥ ADSL 7-8
7.5.1. DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer) 7-9
7.5.2. SPLITTER: (Διαχωριστής) 7-9
7.5.3. DSL modem 7-10
7.6. ΣΗΜΑΤΟΔΟΣΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ 7-11

7.6.1. CAP (Carrierless Amplitude and Phase modulation) *7-11*
7.6.2. DMT (Discrete MultiTone) *7-12*
7.7. ΆΛΛΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ DSL 7-15
7.7.1. HDSL *7-15*
7.7.2. SDSL *7-16*
7.7.3. HDSL-2 ..... *7-17*
7.7.4. G.SHDSL *7-17*
7.7.5. ISDN Digital Subscriber Line *7-18*
7.7.6. VDSL *7-18*
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 8-1

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σημερινή αρχιτεκτονική του Διαδικτύου αποτελείται από ένα δίκτυο κορμού (backbone) το οποίο διαχειρίζονται λίγοι παροχείς (providers) της υπηρεσίας. Αυτοί ονομάζονται Network Service Providers – NSPs. Όπως κάθε δίκτυο κορμού, αποτελείται από ένα ταχύτατο δίκτυο μεταγωγής πακέτων του οποίου οι γραμμές συνδέονται με δρομολογητές (routers) πολύ υψηλών επιδόσεων. Τα δίκτυα των NSPs επικοινωνούν και συνδέονται μεταξύ τους σε σημεία που ονομάζονται exchange points. Οι τοπικοί παροχείς της υπηρεσίας, ISPs, έχουν τα δικά τους δίκτυα και συμβόλαια συνεργασίας με τους NSPs για την αποστολή των πακέτων τους σε μεγάλες αποστάσεις. Τέλος κάθε εταιρεία, ίδρυμα ή οργανισμός έχει το ιδιωτικό του δίκτυο που αποτελείται συνήθως από ένα ή περισσότερα τοπικά δίκτυα (LANs), διασυνδεδεμένα μεταξύ τους. Για τη σύνδεσή τους με το διαδίκτυο χρησιμοποιούν έναν ή περισσότερους ISPs.

Στην Ελλάδα υπάρχουν αντίστοιχα τοπικοί ISPs που έχουν συμβόλαια σύνδεσης με μεγάλους παροχείς στην Ευρώπη και τις ΗΠΑ, και πουλάνε τις υπηρεσίες τους στην ελληνική αγορά. Ειδικά για την παροχή Internet υπηρεσιών στην ακαδημαϊκή και ερευνητική κοινότητα της χώρας υπεύθυνο είναι το ΕΔΕΤ - Εθνικό Δίκτυο Έρευνας και Τεχνολογίας. Σκοπός του ΕΔΕΤ είναι να διασυνδέει όλα τα Πανεπιστήμια και Ερευνητικά Κέντρα της χώρας καθώς και τα τμήματα έρευνας και ανάπτυξης άλλων οργανισμών σε υψηλές ταχύτητες μετάδοσης και με αξιοπιστία.

Το ΕΔΕΤ - το Εθνικό Δίκτυο Έρευνας και Τεχνολογίας - καλύπτει σήμερα τις όλο και μεγαλύτερες απαιτήσεις της Ελληνικής Ακαδημαϊκής και Ερευνητικής Κοινότητας για υψηλού επιπέδου υπηρεσίες δικτύων κορμού τύπου Internet, παρέχοντας υπηρεσίες εθνικής και διεθνούς διασύνδεσης σε όλα τα Ιδρύματα Τριτοβάθμιας Εκπαίδευσης και τα Ερευνητικά Κέντρα της χώρας.

Επιπλέον, υποστηρίζει προηγμένα ερευνητικά έργα και συνεργασίες της Ακαδημαϊκής και Ερευνητικής Κοινότητας της χώρας με την Ευρωπαϊκή βιομηχανία στα πλαίσια του 5ου Προγράμματος Πλαισίου για την Έρευνα & Τεχνολογία (πρόγραμμα Information Society Technologies - IST), σαν αναπόσπαστο μέρος του Πανευρωπαϊκού Ερευνητικού Δικτύου TEN-155.

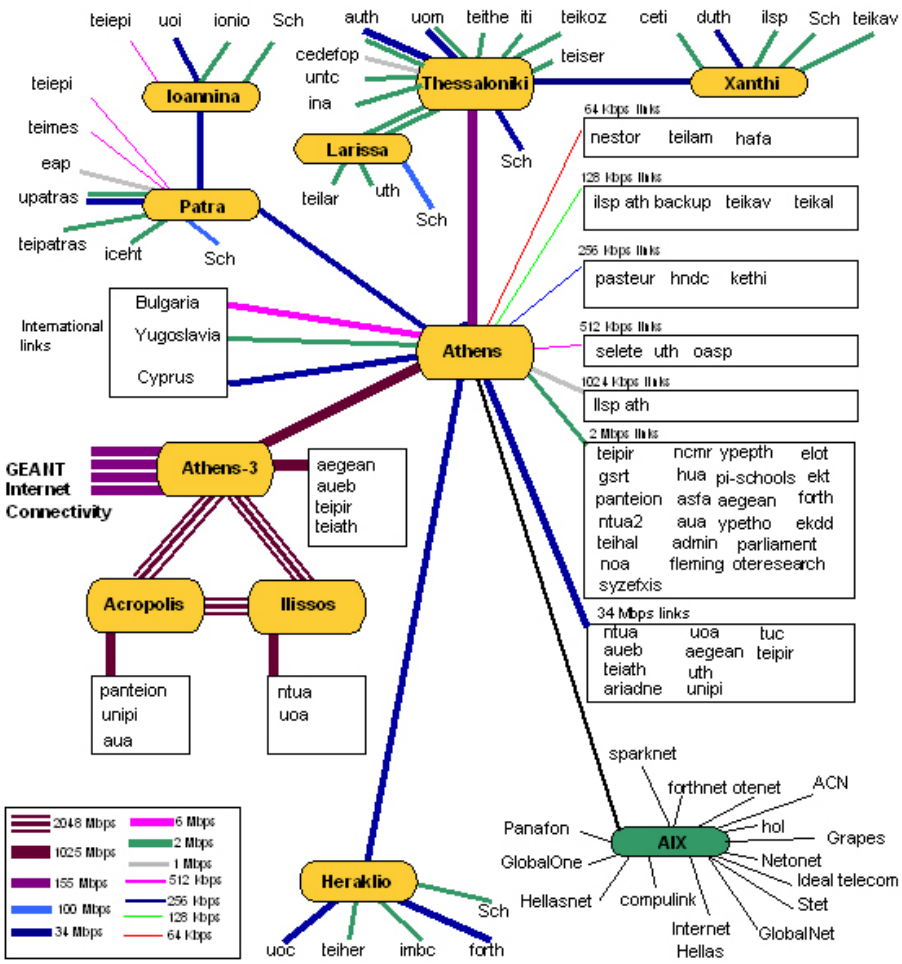
Το δίκτυο κορμού της Ακαδημαϊκής και Ερευνητικής Κοινότητας ξεκίνησε το 1995 σαν έργο της Γενικής Γραμματείας Έρευνας & Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) του Υπουργείου Ανάπτυξης. Το 1998 δημιουργήθηκε η ΕΔΕΤ Α.Ε., ο φορέας διαχείρισης του ΕΔΕΤ, σαν εταιρεία Τεχνολογικής Ανάπτυξης της ΓΓΕΤ κατά το πρότυπο των Εθνικών Ερευνητικών Δικτύων (National Research Networks) των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Σήμερα εξυπηρετεί περισσότερα από 60 ιδρύματα (όλα τα ΑΕΙ, τα Ερευνητικά Κέντρα του Υπουργείου Ανάπτυξης και όλα τα ΤΕΙ της χώρας) με περισσότερους από 150.000 χρήστες (περίπου το 50% της κοινότητας των Ελλήνων χρηστών του Internet). Η ανάπτυξη και λειτουργία του ΕΔΕΤ συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση και το Ελληνικό Δημόσιο μέσω της ΓΓΕΤ και μέσω του Υπουργείου Παιδείας (πάνω από το 80% της κίνησης προέρχεται από Πανεπιστήμια και άλλα εκπαιδευτικά ιδρύματα). Το δίκτυο κορμού του ΕΔΕΤ περιλαμβάνει σήμερα (2002) επτά κύριους κόμβους στις πόλεις Αθήνα, Θεσσαλονίκη, Πάτρα, Ιωάννινα, Ξάνθη Ηράκλειο, Λάρισα. Ο κύριος δικτυακός άξονας του ΕΔΕΤ (Αθήνα, Θεσσαλονίκη) έχει ταχύτητα 155 Mbps. Οι υπόλοιποι δικτυακοί άξονες έχουν ταχύτητα 34 Mbps. Η διεθνής διασύνδεση του ΕΔΕΤ έχει σήμερα ταχύτητα 2 x 155 Mbps.

Ο κόμβος Athens Internet Exchange (AIX) προσφέρει τοπική διασύνδεση (peering) μεταξύ των δικτύων των μεγαλύτερων εταιρειών παροχής υπηρεσιών Internet (ISP) στη χώρα μας, συμβάλλοντας τα μέγιστα στην ανάπτυξη του Internet στην Ελλάδα. Η υπηρεσία διασύνδεσης προσφέρεται από την ΕΔΕΤ ΑΕ, την οποία οι εμπορικοί φορείς θεωρούν Οντότητα Κοινής Εμπιστοσύνης (Third Trusted Party) κάτω από την επίβλεψη της Εθνικής Επιτροπής Τηλεπικοινωνιών & Ταχυδρομείων.

Σχήμα 1-1 *Όψη της τοπολογίας του δικτύου GRNET (πηγή: www.grnet.gr)*

Το ΕΔΕΤ συμμετέχει ενεργά στο Πανευρωπαϊκό Δίκτυο TEN-155. Το TEN-155 συγχρηματοδοτείται από το πρόγραμμα Quantum της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (Γενική Διεύθυνση XIII). Η διαχείριση του έχει ανατεθεί στον οργανισμό DANTE UK (εταιρεία που συστάθηκε από τα Εθνικά Ερευνητικά Δίκτυα της Ευρώπης). Προσφέρει υψηλής ποιότητας και ταχύτητας υπηρεσίες στην Ευρωπαϊκή Ακαδημαϊκή & Ερευνητική κοινότητα, αποτελεί δε ένα από τα σημαντικότερα τμήματα του παγκόσμιου INTERNET σαν φορέας διασύνδεσης όλων των Εθνικών Ερευνητικών Δικτύων των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, της Κεντροανατολικής Ευρώπης, του Ισραήλ (MACHBA) και της Κύπρου (CYNET). Η διεθνής διασύνδεση του ΕΔΕΤ μέσω του προγράμματος TEN-155 έχει σήμερα ταχύτητα 2 x 155 Mbps.

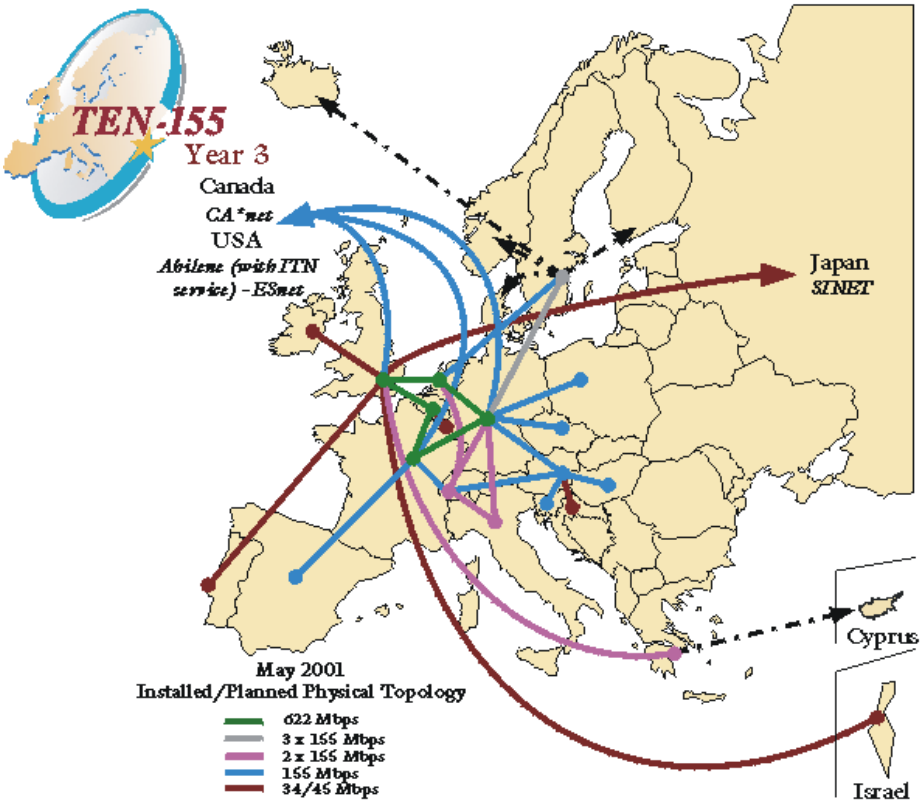
Το πρόγραμμα Q-MED (Quality Network Technology for User Oriented Multimedia in the Eastern Mediterranean Region) αποσκοπεί στο να εντάξει στον Ευρωπαϊκό Δικτυακό κορμό (δίκτυο TEN-155) τα Ακαδημαϊκά και Ερευνητικά Δίκτυα του Ισραήλ (MACHBA) και της Κύπρου (CYNET). Το ΕΔΕΤ συμμετέχει στο πρόγραμμα αυτό από τη γέννησή του παίζοντας καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη και τη λειτουργία του.



Σχήμα 1-2 *Η τοπολογία του δικτύου της ΕΔΕΤ (πηγή: www.grnet.gr)*

Το δίκτυο κορμού του Q-MED αποτελείται από μια γραμμή ταχύτητας 34 Mbps από το Ισραήλ στον κόμβο του TEN-155 στο Λονδίνο, και μια γραμμή ταχύτητας 4 Mbps από την Κύπρο στον κόμβο του TEN-155 στην Αθήνα.

Η ΕΔΕΤ Α.Ε. με τα άλλα δίκτυα του TEN-155 έχει συνυπογράψει συμφωνητικά (Memoranda of Understanding-MoU) με το δίκτυο κορμού ABILENE και την κοινοπραξία των 160 Αμερικανικών Πανεπιστημίων UCAID (University Corporation for Advanced Internet Development). Με τις συμφωνίες αυτές το ΕΔΕΤ θα έχει πρόσβαση στο Internet2 μέσω του σημείου πρόσβασης (PoP) του Σικάγου και θα μετέχει σε κοινά πειράματα με τους Ευρωπαϊκούς και Αμερικανικούς φορείς που εμπλέκονται στο Internet2.



Σχήμα 1-3 *Τοπολογία του δικτύου TEN-155 (πηγή: www.grnet.gr)*

Έτσι λοιπόν για να επικοινωνήσουν δύο υπολογιστές στο Internet εμπλέκονται πολλά δίκτυα κορμού που εκτός των άλλων πρέπει να είναι συνδεδεμένα και μεταξύ τους. Αυτό συμβαίνει σε διάφορα σημεία. Για παράδειγμα στην Ελλάδα τα δίκτυα συνδέονται κυρίως σε κόμβους στην Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη. Μέσω της Αθήνας συνδέονται στο Dante (UK) και από εκεί στις ΗΠΑ μέσω Νέας Υόρκης ή Σικάγου. Τα σημεία αυτά ονομάζονται POPs (Points of Presence), MAEs (Metropolitan Area Ethernets), NAPs (Network Access Points), ή IEPs (Internet Exchange Points). Στα σημεία αυτά διασυνδέονται οι μεγάλοι «παίκτες» του χώρου.

Ο όγκος των δεδομένων που κινούνται στο Internet αυξάνεται διαρκώς. Η χρήση των κλασσικών διαδικτυακών εφαρμογών, όπως το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο (e-mail) και η μεταφορά αρχείων (fire transfer) εμπλουτίζονται διαρκώς. Αυτό όμως που οδηγεί τις εξελίξεις και την ανάπτυξη είναι ο

Παγκόσμιος ιστός (www), που προσφέρει εφαρμογές που απαιτούν απόκριση σε πραγματικό χρόνο. Τέτοιες είναι η μετάδοση φωνής, εικόνων και πολύ περισσότερο το video.

Το διαδίκτυο λειτουργεί ουσιαστικά μέσω μεταγωγής πακέτων (packet switching) με τους δρομολογητές (routers) να λειτουργούν ως μεταγωγείς (switches). Το πρόβλημα είναι ότι αυτή η τεχνολογία δεν σχεδιάστηκε για να χειρίζεται φωνή και video. Είναι χαρακτηριστικό ότι κατά τη μετάδοση πακέτων, απώλειες της τάξης του 10% γίνονται αντιληπτές από τον χρήστη. Επίσης, απώλειες πακέτων της τάξης του 50% κάνουν κάποια εφαρμογή άχρηστη. Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι απώλειες πακέτων της τάξης του 30% δεν μπορούν να χαρακτηριστούν σπάνιες.

Ένα μεγάλο ποσοστό του προβλήματος εισάγεται από τους ίδιους τους δρομολογητές. Οι συσκευές αυτές μεταξύ άλλων πρέπει να γνωρίζουν πληροφορίες για το δίκτυο όπως ποια είναι η φθηνότερη, η συντομότερη, ή και πιο αξιόπιστη διαδρομή για κάποιον παραλήπτη των πακέτων που δρομολογούν. Πρέπει επίσης να επιλέγουν τη διαδρομή με βάση τα παραπάνω κριτήρια αλλά και την πληροφορία που περιέχουν τα πακέτα – δεδομένα σχετικά με την επιθυμία του χρήστη να λάβει κάποια συγκεκριμένη ποιότητα υπηρεσίας. Η ικανότητα του δρομολογητή να επεξεργάζεται και να διακινεί πακέτα με πολύ υψηλούς ρυθμούς είναι κυρίως θέμα του επεξεργαστή και του σχεδιασμού του λειτουργικού του. Η ικανότητά του όμως να ανταλλάσσει πληροφορίες με άλλους δρομολογητές χωρίς να επιβαρύνει το δίκτυο και να αντιλαμβάνεται την τοπολογία και την ποιότητα του δικτύου ώστε να ελέγχει την παροχή δεδομένων σύμφωνα με τις απαιτήσεις των χρηστών, είναι αποτέλεσμα της χρήσης των καταλλήλων αλγορίθμων και πρωτοκόλλων που θα μας απασχολήσουν παρακάτω.

Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι η υλοποίηση δικτύων με έλεγχο της παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service – QoS), όπως το ATM, λύνουν κάποια από τα θέματα. Ο κύριος όγκος όμως της διακίνησης πληροφορίας σήμερα στο Internet γίνεται από δρομολογητές.

2. Μια εισαγωγή στη θεωρία των γράφων

2.1. Θεωρία Γράφων & το Πρόβλημα της Ελάχιστης Διαδρομής

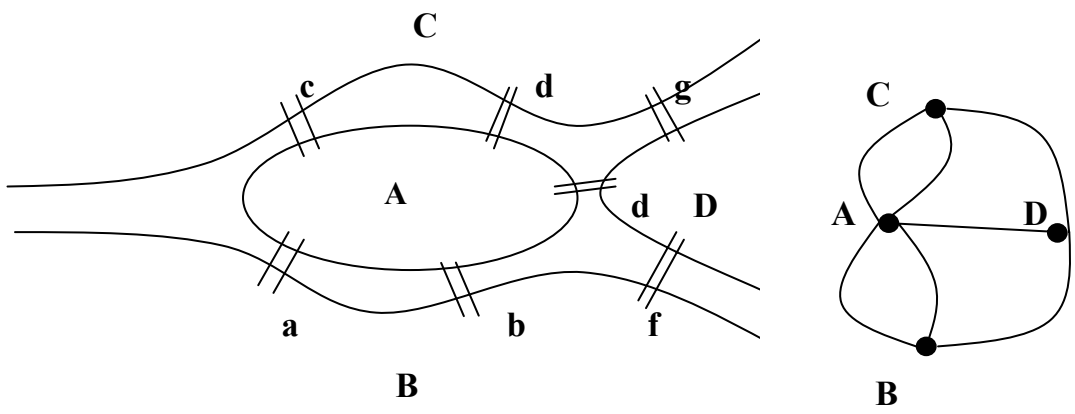
Ένας φυσικός τρόπος αναπαράστασης των δικτύων είναι γραφήματα τα οποία ως ακμές (edges) έχουν τις τηλεπικοινωνιακές γραμμές και ως κόμβους (vertices) τις διάφορες συσκευές μεταγωγής (switches). Θα αναφερθούμε εν συντομία σε κάποια στοιχεία από τη θεωρία των γραφών, μια και έχει χρησιμοποιηθεί ιδιαίτερα στο σχεδιασμό δικτύων αλλά και των αλγορίθμων δρομολόγησης. Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματά που αντιμετωπίζονται είναι το πρόβλημα της εύρεσης της συντομότερης διαδρομής μεταξύ δύο σημείων.

2.1.1. Τοπολογία

Η Τοπολογία είναι το μέρος εκείνο της Γεωμετρίας, το οποίο ασχολείται με ιδιότητες των γεωμετρικών σχημάτων, οι οποίες διατηρούνται αναλλοίωτες κατά τις τοπολογικές απεικονίσεις. Θεωρείστε ότι, για λόγους εποπτείας, περιοριζόμαστε σε περιγραφές που συμβαίνουν στο συνήθη τρισδιάστατο χώρο. Τότε κάθε γεωμετρικό σχήμα είναι ένα σύνολο σημείων. Κάθε σημείο χαρακτηρίζεται από μια τριάδα πραγματικών αριθμών, σε ένα σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων. Για να γίνει αντιληπτή η έννοια της τοπολογικής απεικονίσεως φανταστείτε ένα σχήμα Φ κατασκευασμένο από ελαστικό. Τότε η εφαρμογή τοπολογικής απεικονίσεως επί του Φ, είναι ισοδύναμη με την παραμόρφωση του Φ με τέτοιον τρόπο ώστε να μη διαρραγεί το ελαστικό, ούτε να κλείσουν τελείως τυχόν υπάρχοντα κενά.

Αν ένα σχήμα αφού υποστεί τοπολογική απεικόνιση συμπίπτει με άλλο, καλείται **τοπολογικώς ισοδύναμο** ή **ομόμορφο** προς το δεύτερο. Για παράδειγμα, ο κύβος και η σφαίρα είναι ομόμορφα σχήματα ενώ η πλήρης σφαίρα και ο σφαιρικός φλοιός δεν είναι. Ο σφαιρικός φλοιός δημιουργείται εάν από πλήρη σφαίρα αφαιρεθεί μικρότερη ομόκεντρη σφαίρα.

Ένα παράδειγμα τοπολογικού προβληματισμού είναι το πρόβλημα των γεφυρών του Könisberg (σήμερα Kaliningrad). Ο Leonard Euler (1707 - 1983) ρωτήθηκε κάποτε αν μπορεί να υποδείξει περίπατο διαμέσου της πόλεως του Könisberg, ο οποίος να διέρχεται από όλες τις γέφυρες της πόλης μία μόνο φορά.



Σχήμα 2-1 Οι γέφυρες του Könisberg και ο αντίστοιχος γράφος

Όπως είναι προφανές, ο περίπατος πρέπει να αρχίσει ή να περατωθεί σε μια από τις περιοχές που συνδέονται με τρεις γέφυρες. Αυτό διότι ο περιπατητής πρέπει να διαβεί τις δύο από τις τρεις προς την ίδια κατεύθυνση και την τρίτη αντιστρόφως. Το ίδιο ισχύει και για τις τρεις περιοχές που διαθέτουν τρεις γέφυρες. Ένας περίπατος όμως έχει μια αρχή και ένα τέλος. Ως εκ τούτου το ζητούμενο είναι αδύνατο.

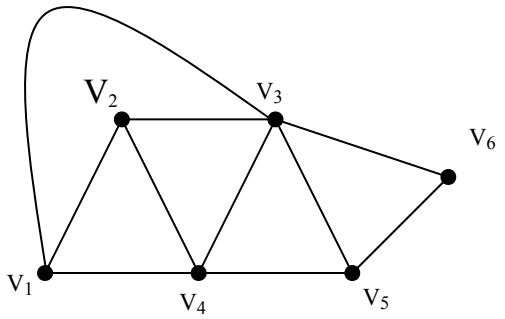
Το πρόβλημα αυτό, που έχει αρνητική λύση, ανήκει εις την τοπολογία και δεν μεταβάλλεται καθόλου αν κάποιος σχεδιάσει το διάγραμμα πάνω σε ελαστικό ύφασμα και το παραμορφώσει με οποιονδήποτε τρόπο, υπό την προϋπόθεση ότι δεν θα διαρραγεί καμία από τις γέφυρες. Δηλαδή δεν συμβαίνει καμία

αλλαγή στο πρόβλημα εάν μεταβληθεί το σχήμα ή το μέγεθος των γεφυρών, του ποταμού και των τμημάτων της γης, και γενικά εάν δεν αλλάξει η μεταξύ τους διασύνδεση. Παρατηρήστε αν και κατά πόσο επηρεάζει τη λύση του προβλήματος το πλάτος των ποταμών. Το ίδιο για το μέγεθος ή το σχήμα της ξηράς. Αν αντικαταστήσουμε τα τμήματα της γης με κόμβους και τις γέφυρες με ακμές θα προκύψει ένα σχήμα που αποτελεί το γράφημα ή γράφο που περιγράφει την τοπολογία του προβλήματος.

2.2. Στοιχεία από τη θεωρία.

Ένας γράφος G (V,E) αποτελείται από δύο σύνολα αντικειμένων. Το σύνολο V των **κόμβων** του (vertices ή nodes) και το σύνολο E των **ακμών** του (edges). Κάθε ακμή ορίζεται ως ένα μη διατεταγμένο ζεύγος δύο κόμβων. Οι γράφοι σχεδιάζονται αναπαριστώντας τους κόμβους με σημεία ή κύκλους και τις ακμές ως γραμμές που συνδέονται τα σημεία. Για παράδειγμα στο σχήμα έχουμε ένα γράφο όπου το σύνολο V αποτελείται από $\{V_1,V_2,V_3,V_4,V_5,V_6\}$ και το σύνολο E αποτελείται από $\{(V_1,V_2), (V_1,V_3), (V_2,V_3), (V_1,V_4), (V_2,V_4), (V_3,V_4), (V_3,V_5), (V_4,V_5), (V_3,V_6), (V_5,V_6)\}$.

Το μέγεθος ενός γράφου χαρακτηρίζεται από τον αριθμό των κόμβων του |V| που ονομάζεται **τάξη** (order) του G, και τον αριθμό των ακμών |E| που ονομάζεται **μέγεθος** (size) του G. Οι επιδόσεις αλγορίθμων πάνω σε γράφους μετρώνται ως προς αυτές τις δύο παραμέτρους.



$$
\begin{array}{c|cccccc}
 & V1 & V2 & V3 & V4 & V5 & V6 \\
\hline
V1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
V2 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
V3 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\
V_4 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\
V_5 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\
V_6 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0
\end{array}
$$

Σχήμα 2-2 *Γράφος και Πίνακας Γειτνίασης*

Επίσης ένας γράφος μπορεί να αναπαρασταθεί με έναν πίνακα, που ονομάζεται πίνακας γειτνίασης (**adjacency matrix)**. Ο πίνακας έχει μέγεθος V x V και ορίζεται ως εξής:

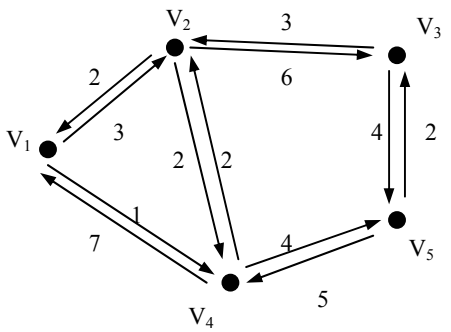
$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \alpha\nu\,(i,j) \in \mathrm{E} \\ 0, & \sigma\varepsilon\ \kappa\alpha\theta\varepsilon\ \alpha\lambda\lambda\eta\ \pi\varepsilon\rho\iota\pi\tau\omega\sigma\eta \end{cases} \qquad (2.1)$$

Το 1 δηλαδή εμφανίζεται όπου υπάρχει ακμή που συνδέει τους δύο κόμβους. Οι κόμβοι αυτοί ονομάζονται **γειτονικοί** (adjacent) μεταξύ τους. Η ακμή (i, j) είναι **προσπίπτουσα** (incident) στους κόμβους i και j. Δύο ακμές προσπίπτουσες στο ίδιο ζεύγος κόμβων ονομάζονται παράλληλες. Μία ακμή προσπίπτουσα στον ίδιο κόμβο ονομάζεται **βρόγχος** (loop). Ένας γράφος χωρίς βρόγχους και παράλληλες ακμές ονομάζεται **απλός γράφος** (simple graph).
Ένα μονοπάτι (path), από τον κόμβο i στον κόμβο j είναι μία αλληλουχία κόμβων και ακμών που ξεκινά από τον κόμβο i και καταλήγει στον j με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε ακμή να είναι προσπίπτουσα στον προηγούμενο και τον επόμενο κόμβο. Όταν το μονοπάτι περνάει μία μόνο φορά από κάθε κόμβο και ακμή ονομάζεται **μονοπάτι** (simple path). Σε απλό γράφο, ένα μονοπάτι μπορεί να οριστεί απλά ως αλληλουχία κόμβων με τέτοιο τρόπο που κάθε κόμβος να είναι γειτονικός στον προηγούμενο και τον επόμενο. Για τον γράφο του παραπάνω σχήματος ένα πιθανό μονοπάτι από τον κόμβο 1 στον κόμβο 6 είναι το V_1, V_2, V_3, V_6. Για τους ίδιους κόμβους το πιο σύντομο μονοπάτι είναι το V_1, V_3, V_6 γιατί περιέχει μόνο δύο ακμές. Αυτό αποτελεί και την απόσταση των κόμβων. **Κυκλικό** είναι το μονοπάτι που ξεκινά και καταλήγει στον ίδιο κόμβο. Τέλος, ένας γράφος λέγεται **συνδεδεμένος** (connected) αν υπάρχει μονοπάτι μεταξύ δύο οποιονδήποτε κόμβων του και **επίπεδος** αν μπορεί να σχεδιαστεί σε ένα επίπεδο χωρίς να τέμνεται καμία ακμή του από κάποια άλλη.

2.2.1. Διγράφοι και κατευθυνόμενοι γράφοι (digraphs & weighted graphs)

Ένας **κατευθυνόμενος** (directed) γράφος ή **διγράφος** (digraph) G(V, E) αποτελείται από ένα σύνολο κόμβων V και ένα σύνολο ακμών E, όπου κάθε ακμή ορίζεται ως ένα **διατεταγμένο** (ordered) ζεύγος κόμβων. Οι διγράφοι απεικονίζονται αναπαριστώντας τους κόμβους με τελείες ή κύκλους και τις ακμές ως βέλη. Η φορά του βέλους δείχνει τη φορά της ακμής. Επιτρέπεται η ύπαρξη παράλληλων ακμών υπό την προϋπόθεση ότι δείχνουν σε αντίθετες φορές. Είναι προφανής η χρησιμότητά τους στην αναπαράσταση τηλεπικοινωνιακών δικτύων, όπου κάθε ακμή αναπαριστά τη ροή των δεδομένων προς μία διεύθυνση μεταξύ των κόμβων του δικτύου.

Μπορούμε κι εδώ να κατασκευάσουμε τον **πίνακα γειτνίασης** (adjacency matrix). Αυτός όμως θα είναι συμμετρικός μόνο αν κάθε ακμή έχει και την παράλληλή της.



$$\begin{array}{c|ccccc} & V_1 & V_2 & V_3 & V_4 & V_5 \\ \hline V_1 & 0 & 3 & 0 & 1 & 0 \\ V_2 & 2 & 0 & 6 & 2 & 0 \\ V_3 & 0 & 3 & 0 & 0 & 4 \\ V_4 & 7 & 2 & 0 & 0 & 4 \\ V_5 & 0 & 0 & 2 & 5 & 0 \end{array}$$

Σχήμα 2-3 *Κατευθυνόμενος γράφος και πίνακας γειτνίασης*

Ένας γράφος που έχει κάθε ακμή του συσχετισμένη με έναν αριθμό λέγεται weighted graph ή weighted digraph. Ο πίνακας γειτονίας A = (a ; j) ορίζεται ως εξής:

$$a_{ij} = \begin{cases} w_{ij}, & \alpha\nu\ (i,j) \in \mathrm{E} \\ 0, & \sigma\varepsilon\ \kappa\alpha\theta\varepsilon\ \alpha\lambda\lambda\eta\ \pi\varepsilon\rho\iota\pi\tau\omega\sigma\eta \end{cases} \qquad (2.2)$$

Όπου w_{ij} είναι ο συντελεστής βάρους που ορίστηκε για την ακμή (i, j). Σε αυτή την περίπτωση το μήκος ενός μονοπατιού είναι το άθροισμα των βαρών των ακμών προς την κατεύθυνση της κίνησης. Είναι προφανές ότι η μικρότερη απόσταση μεταξύ δύο κόμβων και το μικρότερο μήκος μονοπατιού μεταξύ των ίδιων κόμβων δεν είναι απαραίτητα η ίδια διαδρομή, π.χ. V_1, V_2, V_3 και V_1, V_4, V_5, V_3.

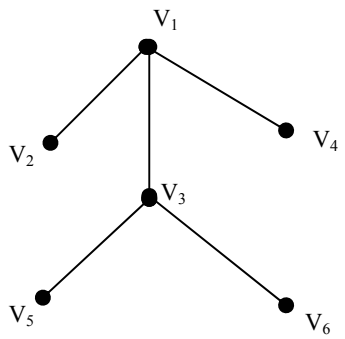
2.2.2. Δέντρα (Trees)

Τα δέντρα είναι τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα υποσύνολα των γράφων. Βρίσκουν πολλές εφαρμογές στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα αλλά και γενικότερα στην επιστήμη της πληροφορικής. Στο σχήμα φαίνεται ένα παράδειγμα δέντρου. Υπάρχουν αρκετοί ορισμοί του δέντρου:

Δέντρο είναι ένας απλός γράφος που ικανοποιεί τη σχέση: αν i και j είναι κόμβοι του T υπάρχει ένα μοναδικό απλό μονοπάτι από το i στο j.

Ένας απλός γράφος N κόμβων είναι δέντρο αν έχει N-1 ακμές και καθόλου κύκλους.

Ένας απλός γράφος N κόμβων είναι δέντρο αν έχει N-1 ακμές και είναι συνδεδεμένος.



Σχήμα 2-4 *Ένα δέντρο με ρίζα το V_1*

Ένας από τους κόμβους του δέντρου ορίζεται ως **ρίζα** (root). Συνήθως τοποθετείται στην κορυφή του γραφήματος. Κάτω από τη ρίζα και στο ίδιο επίπεδο μεταξύ τους, τοποθετούνται οι κόμβοι που είναι γειτονικοί – προσκείμενοι (adjacent) στη ρίζα. Αυτοί οι κόμβοι απέχουν προφανώς από τη

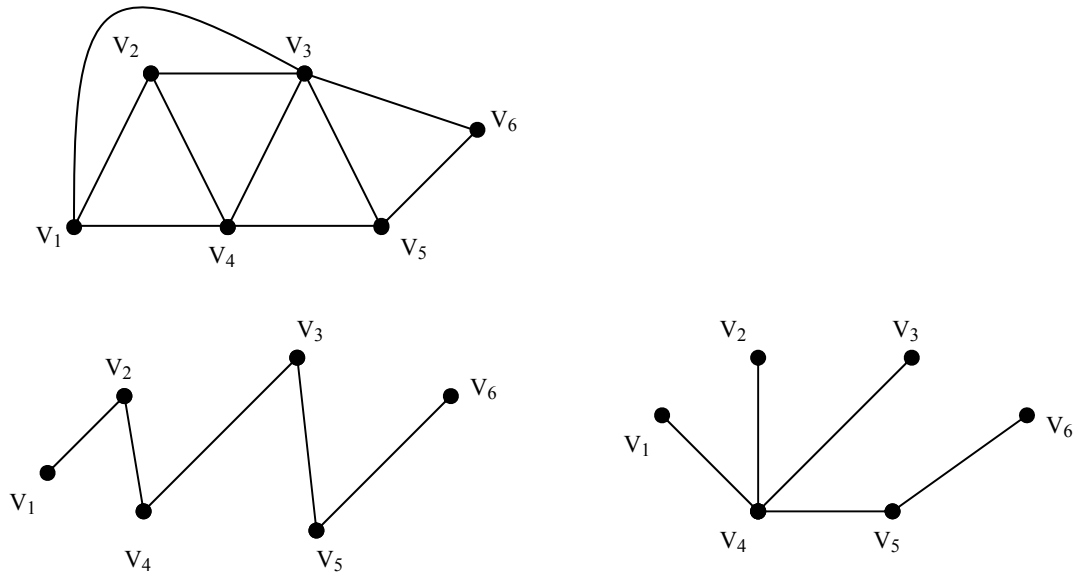
ρίζα απόσταση 1. Κάτω από αυτούς τοποθετούνται οι κόμβοι που είναι γειτονικοί με τους κόμβους του 1ου επιπέδου και απέχουν από τη ρίζα απόσταση 2. Αυτό συνεχίζεται ανάλογα με το μέγεθος του δέντρου. Κάθε κόμβος, εκτός από τη ρίζα, έχει ένα μόνο κόμβο **γονέα** (parent), που είναι ο γειτονικός κόμβος κοντύτερα στη ρίζα. Κάθε κόμβος έχει κανένα ή περισσότερους κόμβους **παιδιά** (child), που είναι οι γειτονικοί του κόμβοι καθώς απομακρυνόμαστε από τη ρίζα. Ένας κόμβος χωρίς παιδιά καλείται **φύλλο** (leaf). Κατά σύμβαση η ρίζα αναφέρεται ως επίπεδο μηδέν.

2.2.3. Spanning Tree

Ο **υπογράφος** G΄ (subgraph) ενός γράφου G προκύπτει αν από τον γράφο G επιλέξουμε κάποιο αριθμό ακμών με τέτοιο τρόπο ώστε για κάθε ακμή που επιλέγεται να επιλέγονται και οι προσκείμενοί της κόμβοι. Εκφράζοντας αυτό με σχέσεις μπορούμε να πούμε ότι με δοσμένο ένα γράφο G (V, E), ο γράφος G΄(V΄, E΄) είναι υπογράφος του G αν: $V' \subseteq V$ και $E' \subseteq E$, και για κάθε ακμή $e' \in E'$, αν e΄ είναι προσκείμενη στους v΄ και w΄ τότε $v, w' \in V'$.

Ένας υπογράφος T ενός γράφου G ονομάζεται **spanning tree** του G, αν ο T είναι δέντρο και περιλαμβάνει όλους τους κόμβους του G. Με άλλα λόγια ένα spanning tree T προκύπτει από τον G αν αφαιρέσουμε ακμές από τον G με τέτοιο τρόπο ώστε να αφαιρεθούν οι κύκλοι αλλά ο γράφος να παραμείνει συνδεδεμένος. Γενικά για κάθε γράφο G δεν υπάρχει μόνο ένα spanning tree.

Το πρόβλημα της εύρεσης ενός spanning tree για ένα γράφο G έχει μελετηθεί εκτενώς. Μία από τις πιο γνωστές προσεγγίσεις στο πρόβλημα αυτό είναι η μέθοδος BFS (breadth – first search). Ο αλγόριθμος δρομολόγησης του συντομότερου μονοπατιού του Dijkstra, βασίζεται στη μέθοδο αυτή. Η ιδέα πίσω από τη μέθοδο BFS είναι να γίνεται πρώτα η επεξεργασία όλων των κόμβων ενός επιπέδου πριν προχωρήσουμε στο επόμενο. Η μέθοδος επιλέγει έναν κόμβο x που τον ορίζουμε ως επίπεδο 0. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένας γράφος και δύο εναλλακτικά spanning trees για αυτόν.

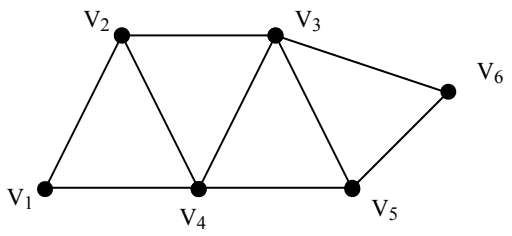


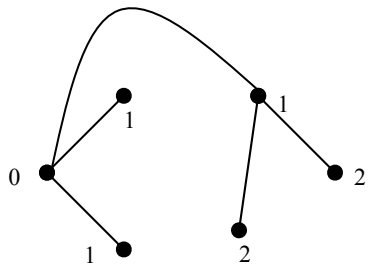
Σχήμα 2-5 *Δύο διαφορετικά spanning trees για τον ίδιο γράφο*

Όλοι οι γειτονικοί στον x κόμβοι, προφανώς ανήκουν στο επίπεδο 1. Έστω V_{i1}, V_{i2}, … V_{ir} οι κόμβοι στο επίπεδο i. Όλοι οι κόμβοι που είναι γειτονικοί του V_{i1} και δεν ανήκουν σε κανένα από τα επίπεδα 1, 2, …, i, ορίζονται ότι είναι στο επίπεδο (i+1). Το ίδιο γίνεται για όλους τους κόμβους που είναι γειτονικοί στον V_{i2}, και ούτω καθεξής έως ότου να ελεγχθούν όλοι οι κόμβοι του δέντρου.

Μία ευτυχής σύμπτωση του αλγορίθμου BFS είναι ότι βρίσκει την απόσταση του συντομότερου μονοπατιού από έναν δεδομένο κόμβο εκκίνησης προς όλους τους άλλους κόμβους. Η απόσταση συντομότερου μονοπατιού (shortest – path distance) δ(s, u) από τον κόμβο s στον κόμβο u είναι ο ελάχιστος αριθμός ακμών που πρέπει να διανύσουμε από τον s στον u.

Με αυτή τη σκέψη μπορεί κανείς να πει ότι κάθε επίπεδο i ενός spanning tree περιλαμβάνει όλους εκείνους και μόνο εκείνους τους κόμβους που η ελάχιστη απόσταση μονοπατιού από τον ριζικό κόμβο είναι i.





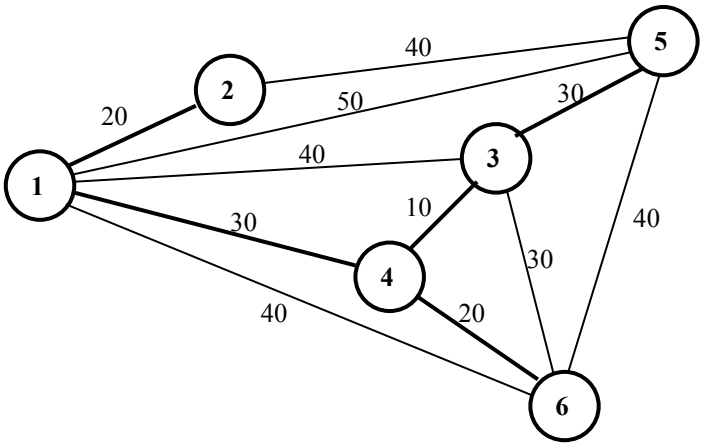
2.2.4. Minimal Spanning Tree

Το μικρότερο spanning tree είναι εκείνο που από όλα τα πιθανά spanning trees ενός δικτύου έχει το μικρότερο συνολικό μήκος ακμών. Για να κατανοήσετε καλύτερα την έννοια του δέντρου αυτού θα χρησιμοποιήσουμε το παράδειγμα μιας εταιρείας που θέλει να συνδέσει πέντε δορυφορικούς πελάτες της με ένα καινούργιο κεντρικό υπολογιστικό σύστημα. Για τη σύνδεση χρειάζονται κάποιες ειδικές τηλεπικοινωνιακές γραμμές. Αυτές θα τις εγκαταστήσει η τηλεπικοινωνιακή εταιρεία. Η ιδανική λύση θα ήταν να συνδέσουμε κάθε πελάτη με το σύστημα μέσω μιας ξεχωριστής αφιερωμένης γραμμής. Η εγκατάσταση όμως τέτοιων γραμμών είναι ιδιαίτερα ακριβή. Για το λόγο αυτό και για να ελαττώσει το κόστος, το συμβούλιο της εταιρείας, απαιτεί το συνολικό μήκος των γραμμών να είναι το μικρότερο δυνατό. Για να το επιτύχει αυτό αποφασίζει να συνδέσει κάποιους χρήστες άμεσα στο σύστημα ενώ κάποιοι άλλοι θα πρέπει να συνδεθούν μέσω των πρώτων. Η εύρεση της διαδρομής που διασυνδέει όλους τους χρήστες στο σύστημα, είτε άμεσα είτε έμμεσα, μέσω των γραμμών με το μικρότερο δυνατό συνολικό μήκος, ισοδυναμεί με την εύρεση του μικρότερου spanning tree.

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για να βρεθεί το minimal spanning tree είναι πολύ απλός. Αποτελείται από τα εξής δύο βήματα:

Ξεκινάμε από έναν κόμβο που τον επιλέγουμε τυχαία. Από όλους τους γειτονικούς του κόμβους επιλέγουμε τον κοντινότερο. Οι δύο αυτοί ονομάζονται πλέον συνδεδεμένοι (connected) και οι υπόλοιποι ασύνδετοι (unconnected).

Βρίσκουμε τον ασύνδετο κόμβο που είναι πιο κοντά σε οποιονδήποτε από τους συνδεδεμένους κόμβους. Αν υπάρχουν περισσότεροι από ένας ασύνδετοι κόμβοι με ίσες αποστάσεις από τους συνδεδεμένους, τότε επιλέγουμε έναν από αυτούς τυχαία. Εντάσσουμε αυτόν τον κόμβο στο σύνολο των συνδεδεμένων. Επαναλαμβάνουμε αυτό το βήμα μέχρι να συνδεθούν όλοι οι κόμβοι.



Σχήμα 2-6 *Το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο που απαιτείται για την πλήρη διασύνδεση των χρηστών μεταξύ τους. Οι αριθμοί είναι σε Km. Οι έντονες γραμμές είναι το minimal spanning tree.*

Με βάση τον παραπάνω αλγόριθμο και αν ξεκινήσουμε από τον κόμβο 1, τότε διαδοχικά θα συνδεθούν οι κόμβοι: 2, 4, 3, 6, 5. Επαληθεύστε μόνοι σας ότι από όποιον κόμβο κι αν ξεκινήσετε το minimal spanning tree που προκύπτει είναι το ίδιο. Το συνολικό του μήκος προκύπτει 110, ενώ αν κατασκευάζαμε όλες τις ζεύξεις το συνολικό μήκος θα ήταν 350. Προφανώς η δεύτερη λύση θα είχε και υπερ-τριπλάσιο κόστος υλοποίησης αλλά και διατήρησης.

Ο παραπάνω αλγόριθμος θεωρείται ένας “greedy” αλγόριθμος διότι σε κάθε στάδιό του υλοποιεί την καλύτερη δυνατή επιλογή που μπορεί να κάνει εκείνη τη στιγμή. Ακολουθώντας αυτή την τακτική επιτυγχάνεται η βέλτιστη λύση. Παρόμοιες περιπτώσεις, όπου δηλαδή ένας greedy αλγόριθμος παρέχει τη βέλτιστη λύση, είναι σπάνιες. Παρόλα αυτά οι greedy αλγόριθμοι αποτελούν για πολλά προβλήματα εξαιρετικές ευριστικές μεθόδους (heuristics).

2.3. Καθορισμός του μήκους του ελάχιστου μονοπατιού.

Ένα δίκτυο μεταγωγής πακέτων μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ένας διγράφος. Κάθε στοιχείο μεταγωγής στο δίκτυο μπορεί να θεωρηθεί ως κόμβος του γράφου, ενώ κάθε τηλεπικοινωνιακή γραμμή που συνδέει το στοιχείο με άλλα να θεωρηθεί ακμή. Σε αυτό το δίκτυο πρέπει να ληφθεί μία απόφαση για το πως θα δρομολογηθούν τα πακέτα από έναν κόμβο σε έναν άλλο. Αυτό ισοδυναμεί με την εύρεση ενός μονοπατιού σε ένα γράφο. Όπως είναι προφανές, λόγοι οικονομίας μας ωθούν να επιλέξουμε από όλα τα δυνατά μονοπάτια το συντομότερο. Στην πραγματικότητα, όλα τα δίκτυα πακέτων, βασίζουν τις αποφάσεις δρομολόγησης σε κάποιο κριτήριο ελάχιστου κόστους. Αν το κριτήριο είναι να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των αλμάτων (hops) από έναν κόμβο σε άλλον, όπου κάθε άλμα (ακμή) έχει τιμή 1, τότε το πρόβλημα ισοδυναμεί με την εύρεση της ελάχιστης απόστασης (minimum path distance) μεταξύ δύο κόμβων.

Συνήθως με κάθε άλμα συσχετίζεται ένα κόστος. Αυτό μπορεί να είναι αντιστρόφως ανάλογο με τη χωρητικότητα της γραμμής, ανάλογο με τον τρέχοντα τηλεπικοινωνιακό φόρτο της γραμμής ή κάποιο συνδυασμό. Μπορεί το κόστος να περιλαμβάνει άλλα κριτήρια, όπως το οικονομικό κόστος χρήσης κάθε γραμμής. Σε κάθε περίπτωση, αυτά τα κόστη, αποτελούν τα δεδομένα εισόδου σε έναν αλγόριθμο εύρεσης της διαδρομής με το ελάχιστο κόστος. Η θέση του προβλήματος μπορεί να είναι ως εξής:

Έστω ένα δίκτυο με κόμβους που συνδέονται με ζεύξεις διπλής κατεύθυνσης. Κάθε ζεύξη έχει κάποιο κόστος συνδεδεμένο με κάθε κατεύθυνση. Ορίζουμε το κόστος ενός μονοπατιού μεταξύ δύο κόμβων ως το άθροισμα των ζεύξεων από τις οποίες διερχόμαστε. Για κάθε ζεύγος κόμβων βρείτε το μονοπάτι με το μικρότερο κόστος.

Σημειώνουμε ότι το κόστος μπορεί να είναι διαφορετικό για κάθε κατεύθυνση. Το πρόβλημα αντιστοιχεί με την εύρεση του μονοπατιού ελάχιστου μήκους (minimum path length) για διγράφο με βάρη.

Οι περισσότεροι αλγόριθμοι ελάχιστου μήκους που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα, αποτελούν παραλλαγές δύο κοινών αλγορίθμων. Είναι οι αλγόριθμοι του Dijkstra και των Bellman – Ford.

2.3.1. Ο αλγόριθμος του Dijkstra

Βρες τα κοντινότερα μονοπάτια από έναν δοσμένο κόμβο προς όλους τους άλλους κόμβους, κατασκευάζοντας τα μονοπάτια αυξάνοντας σταδιακά το μήκος τους. Κάθε κόμβος πρέπει να έχει πλήρη γνώση της τοπολογίας και του κόστους των γραμμών του δικτύου. Επειδή ο αλγόριθμος υπολογίζει όλα τα δυνατά μονοπάτια από κάθε κόμβο προς κάθε άλλο κόμβο πρέπει να εκτελέσει $|V|^2$ επαναλήψεις.

2.3.2. Ο αλγόριθμος Bellman - Ford

Βρες τα συντομότερα μονοπάτια από ένα δοσμένο αρχικό κόμβο με τον περιορισμό τα μονοπάτια να περιέχουν το πολύ μία ζεύξη, μετά βρες τα κοντινότερα μονοπάτια με τον περιορισμό τα μονοπάτια να περιέχουν το πολύ δύο ζεύξεις, κ.ο.κ.

Βασίζεται μόνο στη γνώση που έχει κάθε κόμβος για τους γειτονικούς του και το σχετικό κόστος μετάβασης σε αυτούς.

3. Διαδικτύωση

3.1. Διαδικτύωση (internetworking)

Διαδικτύωση είναι η διασύνδεση υπολογιστικών συστημάτων μέσω τηλεπικοινωνιακών δικτύων, με σκοπό τον διαμοιρασμό των πόρων και των υπηρεσιών τους. Αυτά τα δίκτυα μπορεί να είναι δημόσια ή ιδιωτικά, τοπικά (LAN) ή ευρείας περιοχής (WAN).

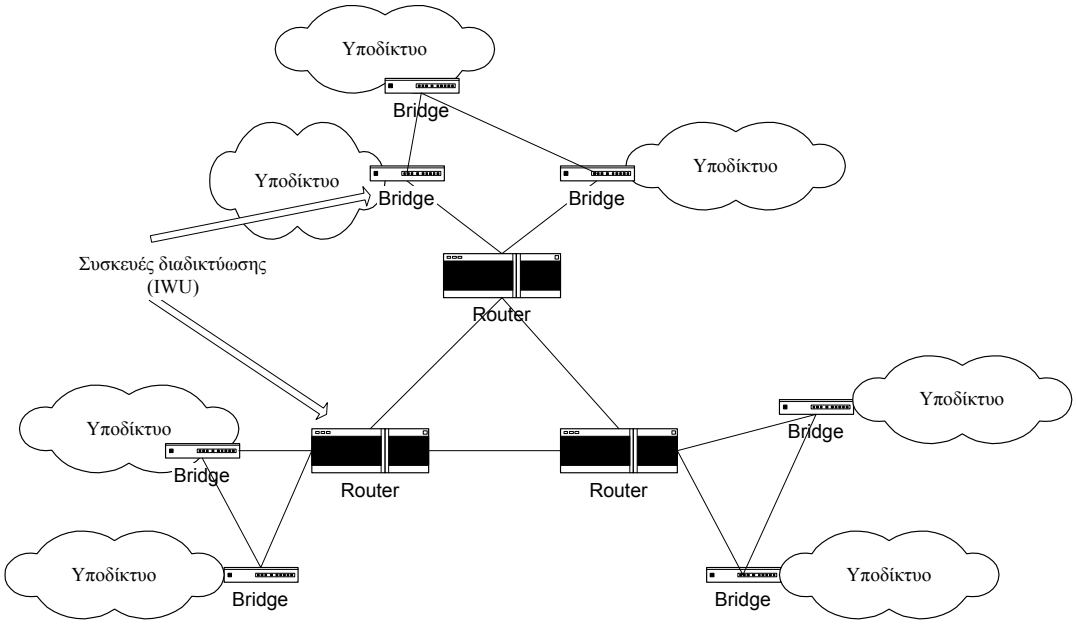
Η διαδικτύωση είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ικανοποιητική λειτουργία των τηλεπικοινωνιακών δικτύων για πολλούς λόγους. Όλοι τους περιστρέφονται γύρω από την ιδέα του περιορισμού των πακέτων (packet containment). Καταρχήν, είναι ουσιαστικά αδύνατο στον οποιονδήποτε να διαχειριστεί ένα μονολιθικό γιγαντιαίο δίκτυο μιας επιχείρησης ή μιας ομάδας επιχειρήσεων. Τα δίκτυα λειτουργούν έτσι ώστε να μεταδίδουν κάποια πληροφορία προς ένα χρήστη ή μια ομάδα χρηστών. Είναι απίθανο κάποιος που στέλνει μια πληροφορία σε ένα δίκτυο να θέλει να τη λάβουν όλοι. Η ιδέα αυτή εξελίχθηκε και βελτιώθηκε στα τηλεφωνικά δίκτυα. Εκεί η επικοινωνία περιορίζεται (contained) μεταξύ δύο μόνο χρηστών ή το πολύ σε μια κλειστή ομάδα χρηστών. Δεύτερον ο χρήστης πολλών δικτύων μπορεί να αποφασίσει αν θα απομονώσει μεταξύ τους τα δίκτυα ή αν θα τα συνδέσει όταν χρειάζεται. Η απομόνωση ενός δικτύου είναι κρίσιμος παράγοντας στη λειτουργία τους. Η λειτουργία ή μη του ενός δεν πρέπει να επηρεάζει τα υπόλοιπα. Ένας άλλος παράγοντας που υπεισέρχεται είναι η ασφάλεια. Τρίτον, μερικά δίκτυα είναι έτσι σχεδιασμένα ώστε η κίνηση που δημιουργεί ένας χρήστης να λαμβάνεται από όλους τους άλλους. Είναι σημαντικός ο περιορισμός αυτής της κίνησης σε κλειστές ομάδες χρηστών ώστε να μην επηρεάζονται οι πόροι του δικτύου.

Για να συνδεθούν όμως τα δίκτυα μεταξύ τους χρειάζεται μια μέθοδος που να βρίσκει το δρόμο (path) από το ένα δίκτυο στο άλλο. Το πρόβλημα δεν είναι

τόσο απλό. Δεν αρκεί να βρεθεί μόνο ο δρόμος που θα ενώνει μεταξύ τους τις συσκευές του δικτύου (routers, servers, …). Ο δρόμος αυτός πρέπει να είναι και ο καλύτερος.

Η έννοια του βέλτιστου μονοπατιού (best path) ορίζεται ανάλογα με αυτό που ο καθένας θεωρεί σημαντικό στη διαδικασία εξυπηρέτησης της κίνησης στο δίκτυο. Αν τα πακέτα που κινούνται στο δίκτυο μεταφέρουν την πληροφορία μιας τραπεζικής πράξης, καλύτερος είναι ο δρόμος που παρέχει ασφάλεια. Αν πάλι μας ενδιαφέρει να μεταφέρουμε ένα video σε πραγματικό χρόνο, καλύτερος είναι ο δρόμος με τη μικρότερη και σταθερότερη καθυστέρηση (delay).

Υπάρχουν λοιπόν διαδικασίες στα δίκτυα που ανακαλύπτουν την καλύτερη διαδρομή (route discovery) μεταξύ δύο ή περισσότερων κόμβων ενός διαδικτύου.



Σχήμα 3-1 *Ένα δαιδίκτυο με τις συσκευές διαδικτύωσης*

3.2. Διαδικτύωση και επίπεδα πρωτοκόλλων

Μονάδα διαδικτύωσης (IWU - **internetworking unit**) λέγεται κάθε συσκευή που εκτελεί τη λειτουργία της αναμετάδοσης (relaying) μεταξύ δικτύων.

Πιθανόν να διαθέτει και μηχανισμούς ανακάλυψης της καλύτερης διαδρομής μεταξύ κόμβων.

Τα δίκτυα συνήθως ονομάζονται **υποδίκτυα** (subnetworks ή subnets). Ο όρος αυτός δεν σημαίνει ότι εκτελούν λιγότερες λειτουργίες ή ότι είναι υποδεέστερα κατά οποιονδήποτε τρόπο από ένα δίκτυο. Σημαίνει απλά ότι τα υποδίκτυα συνεισφέρουν στη λειτουργία του δικτύου. Με άλλα λόγια τα υποδίκτυα είναι τα κομμάτια που αποτελούν ένα δίκτυο.

Τα υποδίκτυα συνδέονται μεταξύ τους μέσω συσκευών διαδικτύωσης. Η λειτουργία μιας IWU είναι διαφανής στον τελικό χρήστη. Οι συσκευές που αποτελούν μονάδες διαδικτύωσης συνήθως δεν εκτελούν άλλη λειτουργία. Είναι πολύ σπάνιο κάποια εφαρμογή που έχει σχέση με τελικό χρήστη να εκτελείται σε μονάδα διαδικτύωσης. Έτσι η συσκευή αυτή ασχολείται αποκλειστικά με τη διαχείριση της κυκλοφορίας μεταξύ δικτύων. Οι IWU είναι συνήθως γνωστές με άλλα ονόματα, όπως: router, bridge, gateway.

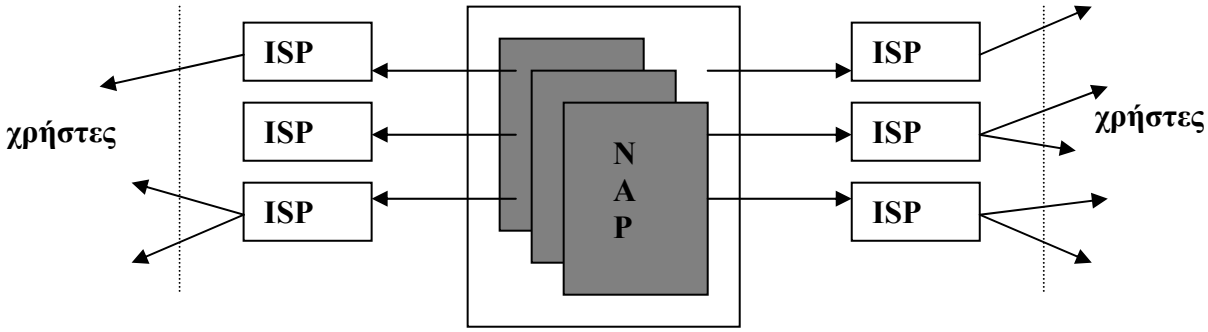
Οι παραπάνω συσκευές μπορούν να διαχωριστούν μεταξύ αν τις θεωρήσει κανείς ανάλογα με το επίπεδο πρωτοκόλλου (OSI/ISO layered protocol model) στο οποίο λειτουργούν.

Οι **γέφυρες (bridges)** λειτουργούν στο δεύτερο επίπεδο (data link layer). Συνήθως χρησιμοποιούν τη φυσική διεύθυνση (media access control address - MAC) για την αναμετάδοση των μηνυμάτων. Η λειτουργία αυτή τους επιτρέπει να μεταδίδουν πακέτα μεταξύ τοπικών δικτύων. Γενικά, μια γέφυρα είναι μια φτηνή συσκευή με λίγες λειτουργίες που συνδέει μεταξύ τους όμοια τοπικά (LAN) δίκτυα (π.χ. Ethernet). Υπάρχουν όμως και γέφυρες που διασυνδέουν και διαφορετικά τοπικά δίκτυα όπως για παράδειγμα Ethernet, Token Ring και FDDI. Οι γέφυρες δεν διασυνδέουν τοπικά δίκτυα με δίκτυα ευρείας περιοχής.

Οι **δρομολογητές (routers)** λειτουργούν στο τρίτο επίπεδο επειδή χρησιμοποιούν διευθύνσεις επιπέδου δικτύου, για παράδειγμα IP διευθύνσεις. Διαθέτουν περισσότερες ικανότητες από τις γέφυρες, όπως έλεγχο ροής (flow control) και διεπαφές με δίκτυα ευρείας περιοχής, όπως το Frame Relay.

Ο όρος **gateway** χρησιμοποιείται για να περιγράψει μια οντότητα, που μπορεί να είναι είτε μηχανή είτε λογισμικό και η οποία εκτός από την αναμετάδοση

πακέτων μεταξύ δικτύων μπορεί να λειτουργήσει και ως μετατροπέας πρωτοκόλλων.



Σχήμα 3-2 *Ιεραρχία διαδικτύων στο Διαδίκτυο*

3.3. Η διαδικτύωση στο Διαδίκτυο

Όταν ξεκίνησε το Internet υπήρχαν συνδεδεμένοι πολύ λίγοι κόμβοι και πολύ λίγοι υπολογιστές σε αυτό. Με τα χρόνια μεγάλωσε ραγδαία και έφτασε στο μέγεθος που γνωρίζουμε σήμερα. Αν και είναι βολικό να σκεφτόμαστε ότι το Internet αποτελείται από ένα δίκτυο κορμού (backbone) δεν υπάρχει κάποια μοναδική δικτυακή υποδομή που να εκτελεί αυτή την υπηρεσία. Για παράδειγμα, μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του ΄80 το Ίδρυμα NSF (National Science Foundation) είχε αναλάβει τη χρηματοδότηση αυτού που θα φανταζόμασταν ως δίκτυο κορμού για το Internet στις ΗΠΑ. Την εποχή εκείνη όμως άρχισε να μεταβιβάζει την υπηρεσία αυτή σε ιδιωτικές επιχειρήσεις όπως οι ANS, MCI, Sprint, BBN, PSI κ.α. Οι εμπορικές αυτές εταιρείες κατασκεύασαν δίκτυα πολύ υψηλών ταχυτήτων μεταξύ των Πολιτειών. Ένα μέρος αυτών των δικτύων διατίθεται για τη λειτουργία του Internet. Έτσι οι εταιρείες αυτές αποτελούν παροχείς ISPs (Internet Service Providers) της υπηρεσίας είτε σε άλλες μικρότερες εταιρείες ISPs είτε απευθείας σε μεγάλους δικούς τους πελάτες. Όλοι αυτοί ενοικιάζουν ουσιαστικά τη χρήση των ταχύτατων δικτύων που έχουν κατασκευαστεί. Είναι προφανές ότι οι μικρότεροι ISPs νοικιάζουν τη χρήση των δικών τους δικτύων στους δικούς τους πελάτες κ.ο.κ.

Στην Ελλάδα υπάρχουν αντίστοιχα τοπικοί ISPs που έχουν συμβόλαια σύνδεσης με μεγάλους παροχείς στην Ευρώπη και τις ΗΠΑ, και πουλάνε τις υπηρεσίες τους στην ελληνική αγορά. Ειδικά για την παροχή Internet υπηρεσιών στην ακαδημαϊκή και ερευνητική κοινότητα της χώρας υπεύθυνο είναι το ΕΔΕΤ - Εθνικό Δίκτυο Έρευνας και Τεχνολογίας. Σκοπός του ΕΔΕΤ είναι να διασυνδέει όλα τα Πανεπιστήμια και Ερευνητικά Κέντρα της χώρας καθώς και τα τμήματα έρευνας και ανάπτυξης άλλων οργανισμών σε υψηλές ταχύτητες μετάδοσης και με αξιοπιστία.

Έτσι λοιπόν για να επικοινωνήσουν δύο υπολογιστές στο Internet εμπλέκονται πολλά δίκτυα κορμού που εκτός των άλλων πρέπει να είναι συνδεδεμένα και μεταξύ τους. Αυτό συμβαίνει σε διάφορα σημεία. Για παράδειγμα στην Ελλάδα τα δίκτυα συνδέονται κυρίως σε κόμβους στην Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη. Μέσω της Αθήνας συνδέονται στο Dante (UK) και από εκεί στις ΗΠΑ μέσω Νέας Υόρκης ή Σικάγου. Τα σημεία αυτά ονομάζονται POPs (Points of Presence), MAEs (Metropolitan Area Ethernets), NAPs (Network Access Points), ή IEPs (Internet Exchange Points). Στα σημεία αυτά διασυνδέονται οι μεγάλοι «παίκτες» του χώρου.

Όπως περιμένει κανείς στα σημεία αυτά η λειτουργία της διασύνδεσης εξυπηρετείται από μεγάλους δρομολογητές που ονομάζονται **“core” routers**. Οι δρομολογητές αυτοί πρέπει να λειτουργούν με ταχύτητες το λιγότερο 100Mbps, ενώ οι μεταξύ τους διασυνδέσεις υλοποιούνται με δίκτυα πολύ μεγαλύτερων ταχυτήτων όπως το SONET. Εκτός από την ταχύτητα των δικτύων τα οποία διασυνδέουν, οι δρομολογητές αυτοί πρέπει να εκτελούν πολύ γρήγορη επεξεργασία των διευθύνσεων και να αποφασίζουν για τη δρομολόγηση των πακέτων. Η αύξηση των διευθύνσεων στο Internet οδήγησε σε δραματική αύξηση του μεγέθους των πινάκων διευθύνσεων που διαθέτουν οι δρομολογητές στη μνήμη τους. Η διεύθυνση του παραλήπτη σε κάθε πακέτο που εισέρχεται σε έναν δρομολογητή, συγκρίνεται με τις καταχωρήσεις διευθύνσεων στη μνήμη του και λαμβάνεται η απόφαση δρομολόγησης. Ένα επιπλέον φορτίο στη λειτουργία των δρομολογητών αποτελεί και η ανακάλυψη μονοπατιών που δεν υπάρχουν στη μνήμη του. Αυτή συνήθως γίνεται με μια

διαδικασία «διαφήμισης», κατά την οποία κάθε δρομολογητής κοινοποιεί στους γείτονές του τους πίνακες διευθύνσεών του.

3.3.1. Προώθηση (forwarding) και δρομολόγηση (routing)

Οι συσκευές διαδικτύωσης, όπως οι γέφυρες και οι δρομολογητές, χρησιμοποιούν συνήθως δύο ειδών πρωτόκολλα. Το πρώτο (έστω πρωτόκολλο Α) έχει ως καθήκον του να μεταδίδει τα πακέτα από μια πηγή προς έναν προορισμό. Το δεύτερο (έστω πρωτόκολλο Β) γνωρίζει πώς να βρίσκει τη διαδρομή για να πάνε τα πακέτα από την πηγή στον προορισμό. Οι διαδικασίες για τις οποίες είναι υπεύθυνα τα δύο πρωτόκολλα είχαν κατά καιρούς διάφορες ονομασίες. Σύμφωνα με την ορολογία που έχει επικρατήσει, η διαδικασία που περιγράφεται από το πρωτόκολλο Α λέγεται **προώθηση** (**forwarding**), ενώ η διαδικασία που περιγράφεται από το πρωτόκολλο Β λέγεται **δρομολόγηση** (**routing**). Έτσι μπορούμε περιληπτικά να πούμε ότι:

Forwarding: είναι η χρήση πινάκων δρομολόγησης ώστε να ληφθεί η κατάλληλη απόφαση προώθησης.

Routing: είναι η διαφήμιση των διαδρομών, ώστε να αποκτηθεί η γνώση για την κατασκευή των πινάκων δρομολόγησης, που θα χρησιμοποιήσει το πρωτόκολλο προώθησης.

3.3.2. Routing Domain

Υπάρχει μια οντότητα που χρησιμοποιείται από τους διαχειριστές των δικτύων για καθαρά διαχειριστικούς λόγους. Βάσει αυτής ορίζεται μια περιοχή δικτύου με την οποία συσχετίζονται συγκεκριμένα δίκτυα και υποδίκτυα. Μια μικρή περιοχή αποτελείται από λίγα υποδίκτυα, μια μεγάλη από πολλά. Σκοπός της ύπαρξης της περιοχής αυτής είναι να ορίσει τα όρια μέσα στα οποία μπορεί να μεταδίδεται μια πληροφορία. Υπάρχει λοιπόν κι εδώ η έννοια του περιορισμού των πακέτων (packet containment).

Τα domains χρησιμοποιούνται για διαχείριση της ασφάλειας σε δίκτυα. Μέσω αυτών ορίζονται περιοχές εμπιστοσύνης (**trusted domains**) μεταξύ δικτύων

και χρηστών. Στα όρια μιας τέτοιας περιοχής υπάρχει συνήθως ένας firewall που ελέγχει ποια πακέτα μπορούν να περνάνε και ποια όχι εντός της περιοχής.
Μια άλλη χρήση των domains είναι υλοποίηση ενός συστήματος πληροφόρησης το οποίο μετρά, επεξεργάζεται, καταχωρεί και χρεώνει της υπηρεσίες ενός δικτύου. Είναι προφανές ότι αν ο διαχειριστής ενός δικτύου δεν γνωρίζει τα ποσά της κίνησης μέσα στο δίκτυο και δεν μπορεί να τα καταλογίσει σε συγκεκριμένους χρήστες, δεν μπορεί να χρεώσει τους χρήστες αυτούς για την παρεχόμενη υπηρεσία.
Συνήθως τα domains ορίζονται εντός ενός δικτύου με μια ιεραρχική δομή, **hierarchical routing domains**. Κάθε υποπεριοχή διασυνδέεται με τις υπόλοιπες μέσω δρομολογητών. Αυτοί είναι υπεύθυνοι για τη «διαφήμιση» και το φιλτράρισμα της πληροφορίας μεταξύ των domains.

3.4. Πρωτόκολλα δρομολόγησης

Στα περισσότερα δίκτυα χρησιμοποιούνται περισσότερα του ενός πρωτόκολλα δρομολόγησης. Υπάρχουν πολλοί λόγοι για αυτό. Ο πρώτος προφανής λόγος είναι ότι τα πρωτόκολλα δρομολόγησης βελτιώνονται διαρκώς. Έτσι αν αγοράσουμε σήμερα έναν δρομολογητή με κάποιο πρωτόκολλο δρομολόγησης, σύντομα θα κυκλοφορήσει η βελτιωμένη του έκδοση. Από την άλλη τα πρωτόκολλα προκύπτουν είτε από τα εργαστήρια ενός κατασκευαστή είτε από την έρευνα ενός οργανισμού τυποποίησης. Πολλές φορές δεν υπάρχει ένα πρωτόκολλο που να είναι σαφώς καλύτερο και να κατακτήσει την αγορά. Έτσι είμαστε υποχρεωμένοι να χρησιμοποιούμε περισσότερα του ενός πρωτόκολλα. Υπάρχουν ακόμη δίκτυα τα οποία λόγω του τρόπου λειτουργίας τους αποδίδουν καλύτερα με συγκεκριμένα πρωτόκολλα δρομολόγησης. Τα δίκτυα αυτά ενδέχεται να συνδέονται με άλλα δίκτυα μέσω διαφορετικής τεχνολογίας. Έτσι οι συνοριακοί δρομολογητές είναι υποχρεωμένοι να υποστηρίζουν τουλάχιστον δύο διαφορετικά πρωτόκολλα. Ένα για την εσωτερική κι ένα για τη εξωτερική επικοινωνία. Τέλος κάθε δίκτυο έχει τα δικά του κριτήρια δρομολόγησης. Άλλο ενδιαφέρεται για την καλύτερη διαδρομή, άλλο για την

φθηνότερη κι άλλο για την ασφαλέστερη. Σαν αποτέλεσμα όλων των παραπάνω διαφορετικών αναγκών, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης είναι έτσι σχεδιασμένα ώστε να καλύπτουν καλύτερα κάποιες ειδικές ανάγκες. Έτσι συνήθως χρησιμοποιούνται περισσότερες από μια προσεγγίσεις.

3.5. Αλγόριθμοι δρομολόγησης

Οι δρομολογητές και οι γέφυρες χρησιμοποιούν τη διαδικασία της διαφήφισης των διαδρομών (**route advertisement**) για να υπολογίζουν τις διαδρομές και τις εγγραφές των πινάκων δρομολόγησης. Οι διαδρομές υπολογίζονται με τη χρήση κατάλληλων αλγορίθμων δρομολόγησης, που τους κάνουν ιδιαίτερα σημαντικό κομμάτι για όλη τη διαδικασία δρομολόγησης. Υπάρχουν πέντε στόχοι κατά το σχεδιασμό των αλγορίθμων δρομολόγησης[1].

Ο κυρίαρχος στόχος είναι η **ακρίβεια** (**accuracy**). Ένας αλγόριθμος μπορεί να είναι πολύ γρήγορος, πολύ ανθεκτικός ή να καταναλώνει λίγους πόρους. Αν όμως δεν καταφέρνει να υπολογίσει σωστά τη διαδρομή ώστε τα πακέτα του αποστολέα να φτάσουν στον παραλήπτη, είναι στην ουσία άχρηστος.

Από τη στιγμή που η διαδικασία της δρομολόγησης προσθέτει υπολογιστικό φόρτο στη δικτυακή συσκευή που την εκτελεί, σημαντικός παράγοντας για την υιοθέτηση ενός αλγορίθμου είναι η **απλότητα** (**simplicity**).

Οι συσκευές του δικτύου πρέπει να ανταποκρίνονται σωστά στις δύσκολες συγκυρίες ενός δικτύου, όπως οι καταστάσεις συμφόρησης. Σε περιπτώσεις μεγάλης κίνησης ή μη αναμενόμενων τύπων πακέτων ο δρομολογητής ή η γέφυρα δεν πρέπει να καταρρέουν. Ακόμη κι αν δεν καταφέρουν να ανταποκριθούν, δεν πρέπει να χάσουν παντελώς την ικανότητα δρομολόγησης. Πρέπει δηλαδή να διαθέτουν μεγάλη **αντοχή** (**robustness**).

Ένας άλλος στόχος της σχεδίασης ενός αλγορίθμου είναι η ταχεία **σύγκλιση** (**convergence**). Αυτή είναι ένα μέτρο της ταχύτητας με την οποία ανταποκρίνονται οι συσκευές διαδικτύωσης σε κάποια αλλαγή στη δομή του

---

[1] Thomas M, OSPF Network Design Solutions, Cisco Press, Macmillan Technical Publishing, 1998.

δικτύου. Επίσης πόσο γρήγορα διαθέτουν ενημερωμένους και σύμφωνους μεταξύ τους πίνακες δρομολόγησης.

Ο τελευταίος στόχος είναι η **ευελιξία** (**flexibility**). Ένας αλγόριθμος δρομολόγησης πρέπει να είναι ευέλικτος υπό την έννοια ότι θα πρέπει να υποστηρίζει εναλλακτικά δρομολόγια κίνησης, ιεραρχικές δομές δικτύων, προκαθορισμένα δρομολόγια, κ.α.

3.5.1. Μερικά σημαντικά πρωτόκολλα δρομολόγησης

Τα δημόσια και ιδιωτικά δίκτυα χρησιμοποιούν σήμερα διάφορα πρωτόκολλα δρομολόγησης. Κάποια από αυτά είναι διεθνή πρότυπα. Άλλα χρησιμοποιούνται μόνο από τις συσκευές διαδικτύωσης συγκεκριμένων κατασκευαστών. Τα πιο γνωστά και δημοφιλή είναι τα εξής:

GGP: Gateway-to-Gateway Protocol. Είναι στην ουσία το πρώτο πρωτόκολλο δρομολόγησης που χρησιμοποιήθηκε στο Internet (ARPAnet). Σήμερα δεν χρησιμοποιείται πουθενά λόγω περιορισμών στη λειτουργία και του μεγάλου overhead που εισάγει στο δίκτυο.

EGP: External Gateway Protocol. Είναι το πρωτόκολλο που αντικατέστησε το GGP δεν χρησιμοποιείται όμως σήμερα.

RIP: Routing Information Protocol. Είναι το πρότυπο που ανέπτυξε η εταιρεία Xerox για χρήση σε τοπικά δίκτυα. Χρησιμοποιείται σήμερα ευρύτατα με διάφορες παραλλαγές.

OSPF: Open Shortest Path First. Ξεπέρασε πολλά από τα προβλήματα του RIP. Χρησιμοποιείται κι αυτό ευρύτατα σήμερα.

IS-IS: Intermediate System to Intermediate System. Σχεδιάστηκε από την Digital και αποτελεί το αντίστοιχο του OSPF στη στοίβα πρωτοκόλλων του OSI. Όπως και πολλά άλλα πρωτόκολλα του OSI δεν χρησιμοποιείται σχεδόν καθόλου.

BGP: Border Gateway Protocol. Κάνει διαφήμιση διαδρομών (route advertising) μεταξύ περιοχών δρομολόγησης (routing domains) στο Internet. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται στη διασύνδεση μεταξύ ISPs. Ξεπερνά τους περιορισμούς του EGP.

IDRP: InterDomain Routing Protocol. Είναι κι αυτό βασισμένο στο OSI.

PNNI: Private Network-to-Network Interface. Χρησιμοποιείται κυρίως σε δίκτυα τεχνολογίας ATM. Εκτελεί δύο κύριες λειτουργίες. Διαφήμιση διαδρομών και ανάλυση τοπολογίας του δικτύου και δεύτερον διαχείριση συνδέσεων (δημιουργία και απόλυση συνδέσεων ATM).

IGRP: InterGateway Routing Protocol και **Enhanced IGRP (EIGRP).** Είναι τα ιδιωτικά (proprietary) πρωτόκολλα δρομολόγησης της εταιρείας Cisco. Είναι παρόμοια με το RIP αλλά διαθέτουν και πολλές επιπλέον λειτουργίες.

4. Πρωτόκολλα Δρομολόγησης

Τα διαδίκτυα λειτουργούν με τη χρήση δρομολογητών που προωθούν IP πακέτα από τον ένα δρομολογητή στον άλλο, πάνω σε μια προεπιλεγμένη διαδρομή που οδηγεί από τον αποστολέα των πακέτων στον παραλήπτη. Για το λόγο αυτό οι δρομολογητές πρέπει να έχουν κάποια εικόνα της τοπολογίας του διαδικτύου και του καλύτερου μονοπατιού που πρέπει να ακολουθηθεί σε κάθε περίπτωση. Την πληροφορία αυτή την παρέχουν τα πρωτόκολλα δρομολόγησης.

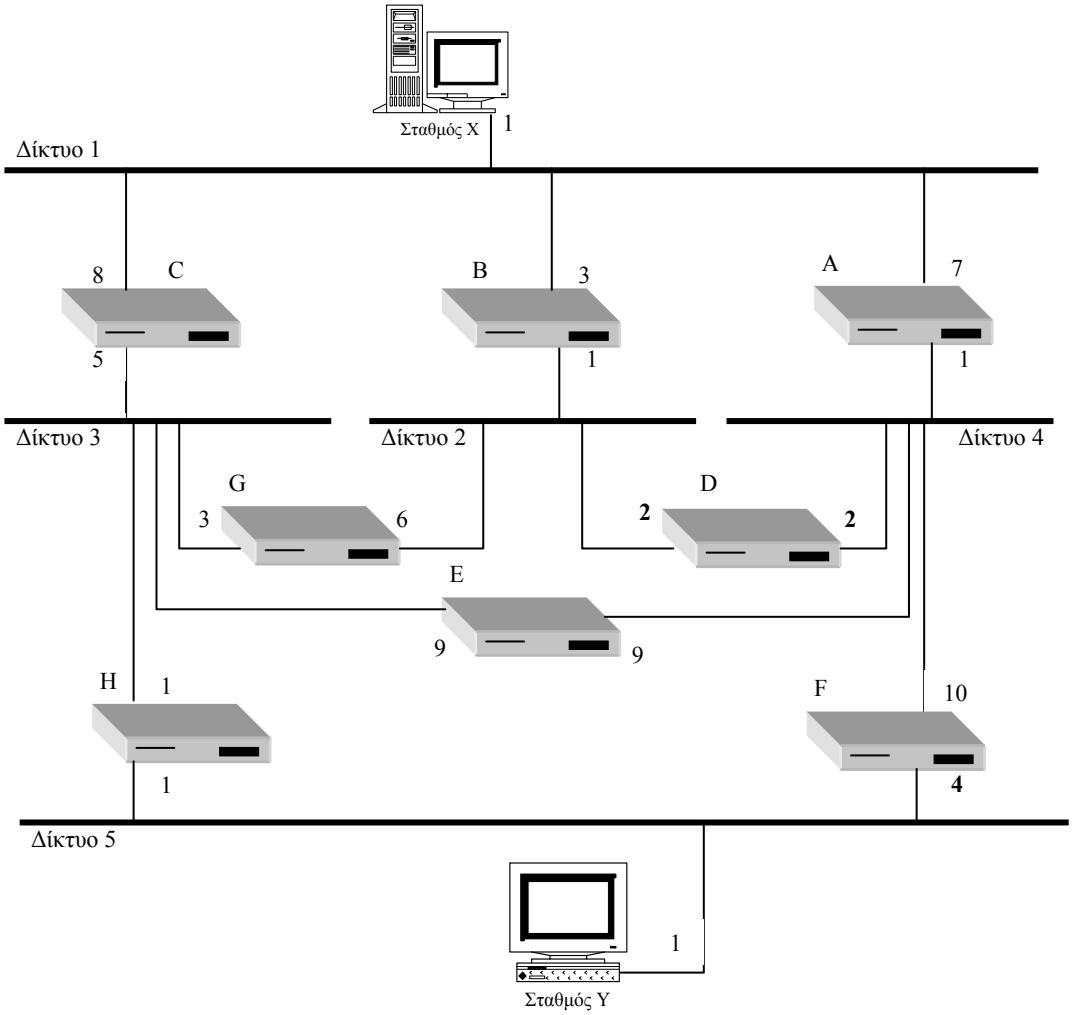
4.1. Αρχές δρομολόγησης

Ένας δρομολογητής λειτουργεί σε αντιστοιχία με κάθε κόμβο μεταγωγής πακέτων. Απλά ο δρομολογητής ασχολείται με τη μεταγωγή με τη μέθοδο datagrams που είναι μεταγωγή χωρίς σύνδεση. Σε κάθε περίπτωση ένας δρομολογητής πρέπει να έχει γνώση της τοπολογίας του δικτύου στο οποίο ανήκει καθώς και τον συνθηκών που επικρατούν σε αυτό το δίκτυο. Οι αποφάσεις δρομολόγησης που παίρνει ένας δρομολογητής βασίζονται σε κάποιο **κριτήριο ελάχιστου κόστους** (least-cost criterion). Τέτοιο κριτήριο μπορεί να είναι ο αριθμός των αλμάτων (hops) που απαιτούνται για μια διαδρομή, η χωρητικότητα των ζεύξεων, ο τηλεπικοινωνιακός φόρτος των ζεύξεων ή ακόμα και το οικονομικό κόστος χρήσης κάθε ζεύξης. Κάθε μια από τις παραπάνω παραμέτρους θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως είσοδος σε κάποιον αλγόριθμο δρομολόγησης.

4.1.1. Fixed routing

Σε απλές διαδρομές δικτύων μπορεί να χρησιμοποιούνται συγκεκριμένες διαδρομές. Για κάθε ζεύγος κόμβων στο δίκτυο ορίζουμε μια συγκεκριμένη

διαδρομή. Η διαδρομή αυτή θα αλλάξει μόνον εφόσον έχουμε κάποια αλλαγή στην τοπολογία του δικτύου. Με τη λογική αυτή το κόστος των διαδρομών δεν μπορεί να συνδεθεί με κάποια δυναμικά μεταβαλλόμενη μεταβλητή όπως είναι η κίνηση στη γραμμή. Θα μπορούσε πιθανόν να συνδεθεί με μια εκτίμηση της μέσης αναμενόμενης κίνησης ανά ζεύξη.



Σχήμα 4-1 *Ένα δίκτυο με τα κόστη των συνδέσεων*

Αν υποθέσουμε ότι έχουμε το δίκτυο του παραπάνω σχήματος τότε μια πιθανή έκφραση της σταθερής δρομολόγησης φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Κάθε δρομολογητής διαθέτει έναν πίνακα που έχει μια καταχώρηση για κάθε δίκτυο της δομής. Δεν χρειάζεται να έχει μια καταχώρηση για κάθε σταθμό. Αν αναλογιστούμε τη δομή μιας IP διεύθυνσης θα δούμε ότι αποτελείται από δύο μέρη, το τμήμα του δικτύου και το τμήμα του σταθμού (host). Για να

επικοινωνήσουμε με έναν υπολογιστή αρκεί να ξέρουμε πώς να στείλουμε τα πακέτα στο δίκτυο που ανήκει. Ο δρομολογητής που είναι άμεσα συνδεδεμένος με το δίκτυο προορισμού, ξέρει πώς να βρει το σταθμό-παραλήπτη.

Κάθε καταχώρηση στον πίνακα δρομολόγησης περιέχει ένα δίκτυο και τον αμέσως επόμενο δρομολογητή στο δρόμο μας προς αυτό το δίκτυο. Δεν χρειάζεται να αποθηκεύεται ολόκληρη η διαδρομή. Αρκεί για κάθε προορισμό να ξέρουμε τον επόμενο κόμβο. Αν για παράδειγμα η διαδρομή από τον κόμβο F προς το δίκτυο 2 του σχήματος αρχίζει μέσω του δρομολογητή H, τότε η διαδρομή από τον F προς το 2 είναι η F-H-G.

Router A Table

Network	Router
1	D
2	D
3	D
4	—
5	F

Router D Table

Network	Router
1	B
2	—
3	G
4	—
5	F

Router G Table

Network	Router
1	B
2	—
3	—
4	D
5	H

Router B Table

Network	Router
1	—
2	—
3	G
4	D
5	G

Router E Table

Network	Router
1	D
2	D
3	—
4	—
5	H

Router H Table

Network	Router
1	C
2	G
3	—
4	G
5	—

Router C Table

Network	Router
1	—
2	B
3	—
4	A
5	H

Router F Table

Network	Router
1	H
2	H
3	H
4	—
5	—

Host X Table

Network	Router
1	—
2	B
3	B
4	A
5	A

Σχήμα 4-2 *Οι πίνακες δρομολόγησης των συσκευών του προηγούμενου σχήματος*

Αντίστοιχα μπορεί να χρειαζόμαστε πίνακες δρομολόγησης και στους σταθμούς (hosts) Ειδικά αν το δίκτυο στο οποίο είναι συνδεδεμένοι, διασυνδέεται με τα υπόλοιπα δίκτυα μέσω δύο ή περισσοτέρων δρομολογητών. Είναι προφανές ότι να η σύνδεση με τον υπόλοιπο κόσμο γίνεται μέσω ενός μόνο δρομολογητή, είναι περιττή η ύπαρξη πίνακα δρομολόγησης στους σταθμούς εφόσον δεν υπάρχουν εναλλακτικές διαδρομές.

4.1.2. Adaptive routing

Όλοι οι δρομολογητές χρησιμοποιούν κάποια διαδικασία προσαρμογής σε αλλαγές που συμβαίνουν στο περιβάλλον του διαδικτύου τους. Τα κύρια αίτια που επηρεάζουν τις αποφάσεις δρομολόγησης είναι:

Η αστοχία (**failure**) μιας δικτυακής συσκευής. Όταν ένας δρομολογητής ή ένα ολόκληρο δίκτυο καταρρέει, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως τμήμα μιας διαδρομής δρομολόγησης.

Η συμφόρηση (**congestion**) μιας ζεύξης. Όταν ένα κομμάτι ενός δικτύου παρουσιάζει έντονη συμφόρηση, είναι επιθυμητό να δρομολογήσουμε τα πακέτα γύρω από αυτό κι όχι μέσα από αυτό. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγουμε πολλές φορές και καταστάσεις ανεπανόρθωτης συμφόρησης όταν όλο και περισσότερα πακέτα καταφθάνουν στο προβληματικό δίκτυο.

Υπάρχουν αρκετά σημεία που πρέπει να προσεχθούν και που πιθανόν αποτελούν οπισθέλκουσες δυνάμεις στη χρήση προσαρμοζόμενης δρομολόγησης.

Η απόφαση δρομολόγησης είναι πολύ πιο σύνθετη. Έτσι επιβαρύνεται η επεξεργαστική ισχύς και ικανότητα του δρομολογητή.

Στις περισσότερες περιπτώσεις οι πληροφορίες για την κατάσταση ενός δικτύου αλλού συλλέγονται κι αλλού χρησιμοποιούνται. Όσο περισσότερη πληροφορία κι όσο πιο συχνά ανταλλάσσεται τόσο καλύτερες είναι οι αποφάσεις δρομολόγησης. Η ίδια όμως η διακίνηση της πληροφορίας γίνεται μέσα στο δίκτυο και μπορεί να προκαλεί μεγάλη επιβάρυνση.

Μια τακτική προσαρμογών μπορεί να είναι πολύ γρήγορη, δημιουργώντας καταστάσεις ταλαντώσεων στο δίκτυο, ή πολύ αργή ώστε όταν λαμβάνεται να είναι άσχετη με την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου και πιθανόν πλέον ακατάλληλη. Έστω για παράδειγμα ότι μια στρατηγική προσαρμοζόμενης δρομολόγησης αντιδρά πολύ γρήγορα στις καταστάσεις του δικτύου. Στην περίπτωση αυτή μια μικρή διακύμανση στο φορτίο μιας ζεύξης μπορεί να αναγκάσει κάποιους δρομολογητές να αναδρομολογήσουν τα πακέτα τους προς μια άλλη. Η ενέργεια αυτή αρχικά θα φορτώσει απότομα τη νέα ζεύξη. Η

αύξηση αυτή μπορεί να προκαλέσει νέα αναδρομολόγηση των πακέτων στην προηγούμενη ζεύξη και ούτω καθεξής.

Επίσης μια τέτοια τακτική μπορεί να προκαλέσει παθολογικές καταστάσεις στο δίκτυο όπως το fluttering και το looping.

Η έννοια του **fluttering** αναφέρεται σε ραγδαίες διακυμάνσεις στη δρομολόγηση. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να προκληθεί ακόμη και από δρομολογητές που επιχειρούν να εφαρμόσουν διαμοιρασμό (splitting) ή εξισορρόπηση (balancing) φορτίου. Όταν μετά την διαδικασία επιλογής του επόμενου άλματος (Next-Hop), παραμένουν περισσότερες από μια διαδρομές ως πιθανή επιλογή για τον δρομολογητή, αυτός μπορεί να επιλέξει να μοιράσει το φορτίο μεταξύ δύο ή περισσοτέρων (RFC 1812)[2]. Η ενέργεια αυτή μπορεί να οδηγήσει σε περίεργες συμπεριφορές, όπως κάποια πακέτα να διανύουν πολύ μεγαλύτερες διαδρομές εντός του δικτύου.

Ακόμα πιο σοβαρό φαινόμενο είναι το **looping**. Όπως υποδεικνύει και το όνομά του πρόκειται για εκείνη την κατάσταση κατά την οποία κάποια ή όλα τα πακέτα επιστρέφουν στον δρομολογητή που τα εξέπεμψε. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται κυρίως σε αλλαγές στη διασυνδεσιμότητα του δικτύου που δεν φτάνουν εγκαίρως σε όλους τους κόμβους του.

Παρά τα προβλήματα, η προσαρμοζόμενη δρομολόγηση έχει προτερήματα σε σχέση με την προκαθορισμένη για δύο κυρίως λόγους.

Βελτιώνει την απόδοση του δικτύου, όπως την αντιλαμβάνεται ο τελικός χρήστης.

Βοηθά στον έλεγχο της συμφόρησης (congestion control).

Ένας βολικός τρόπος για να κατατάξουμε τις διάφορες στρατηγικές προσαρμοζόμενης δρομολόγησης είναι με βάση την πηγή από την οποία προέρχονται οι πληροφορίες για την κατάσταση του δικτύου. Η πηγή αυτή μπορεί να είναι τοπική, οι γειτονικοί κόμβοι ή όλοι οι κόμβοι του δικτύου.

Ένα παράδειγμα τοπικής πληροφορίας είναι ο δρομολογητής ο οποίος δρομολογεί τα πακέτα προς τον έξω κόσμο με βάση την ουρά αναμονής Q, που

---

[2] RFC 1812, Requirements for IP Version 4 Routers, June 1995.

έχει προς κάθε κατεύθυνση. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα την εξισορρόπηση της κίνησης προς τον έξω κόσμο. Δεν μας εγγυάται όμως ότι η δρομολόγηση προς την κατεύθυνση με την μικρότερη ουρά αναμονής θα είναι και η κατεύθυνση προς τον παραλήπτη των πακέτων. Μια βελτίωση μπορεί να γίνει αν συνυπολογίσουμε και τη σωστή κατεύθυνση. Στην περίπτωση αυτή κάθε δίκτυο που συνδέεται με έναν δρομολογητή θα έχει κάποια πόλωση B_i προς κάθε δίκτυο προορισμού i. Τώρα για κάθε datagram που εισέρχεται στον δρομολογητή μας και κατευθύνεται προς το δίκτυο i, ο δρομολογητής θα επιλέγει τη ζεύξη για την οποία ελαχιστοποιείται το άθροισμα $Q+B_i$.

Τα συστήματα που χρησιμοποιούν μόνο τοπική πληροφορία χρησιμοποιούνται σπάνια. Ο λόγος είναι ότι δεν χρησιμοποιούν πληροφορίες από τους γειτονικούς κόμβους ή ακόμα κι από απομακρυσμένους δρομολογητές, οπότε δεν έχουν τη δυνατότητα να βελτιώσουν τις επιλογές δρομολόγησης με βάση τα γεγονότα του έξω κόσμου. Αντίθετα τεχνικές που λαμβάνουν υπόψη τους και τις πληροφορίες του έξω κόσμου χρησιμοποιούνται ευρύτατα και επωφελούνται από τις πληροφορίες που έχουν οι υπόλοιποι δρομολογητές για καθυστερήσεις ή διακοπές στις ζεύξεις. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούν πληροφορίες μόνο από γειτονικούς κόμβους λέγονται αλγόριθμοι **distance-vector**. Όμοια αυτές που χρησιμοποιούν πληροφορίες από όλους τους δρομολογητές λέγονται **link-state** αλγόριθμοι. Σε κάθε περίπτωση απαιτείται η ύπαρξη ενός πρωτοκόλλου δρομολόγησης για την ανταλλαγή της πληροφορίας.

Ο πραγματικός μηχανισμός δρομολόγησης είναι ανεξάρτητος από το πρωτόκολλο δρομολόγησης κι ακόμα ανεξάρτητος από το αν υπάρχει ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης ή αν υπάρχει μια πολιτική προεπιλεγμένων διαδρομών. Τα βάρη των ζεύξεων στο πρώτο σχήμα και οι πίνακες δρομολόγησης θα μπορούσαν να είναι αποτέλεσμα δυναμικών αλλαγών στο δίκτυο και επομένως στους πίνακες δρομολόγησης.

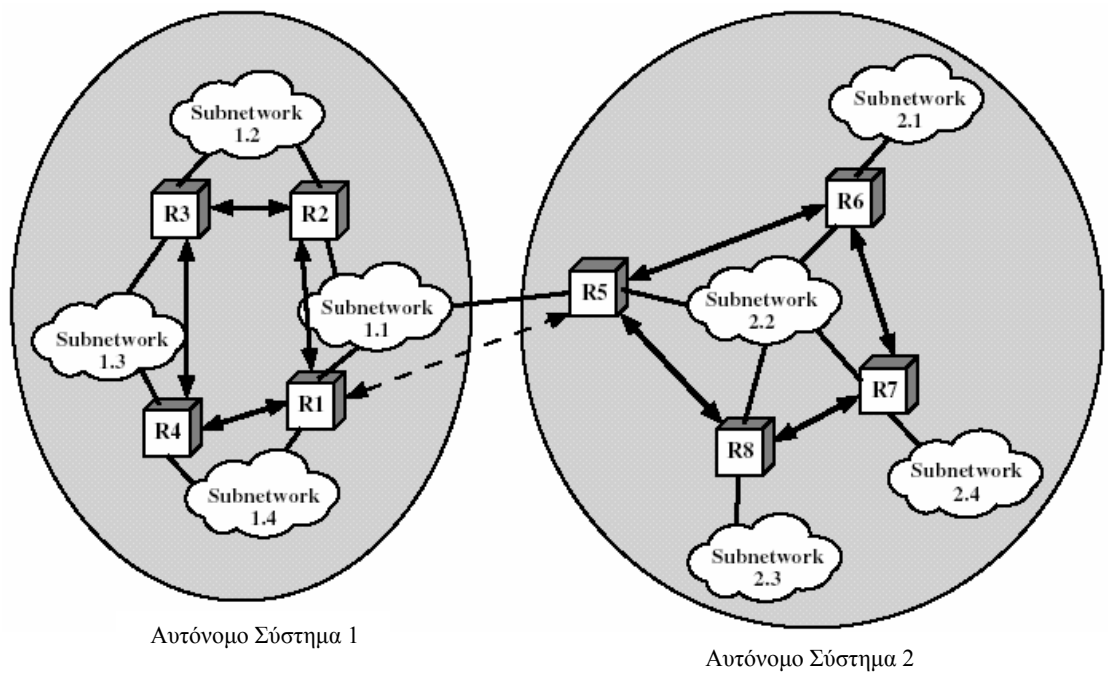
4.2. Αυτόνομα Συστήματα (Autonomous Systems)

Αυτόνομο Σύστημα (ΑΣ) θα ονομάσουμε εκείνο που έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Αποτελείται από μια ομάδα δρομολογητών που ανταλλάσσουν πληροφορίες μέσω ενός κοινού πρωτοκόλλου δρομολόγησης
- Είναι ένα σύνολο δρομολογητών και δικτύων που τα διαχειρίζεται ένας μόνο οργανισμός.
- Εκτός από τις περιπτώσεις αστοχίας (failure), ένα ΑΣ είναι συνδεδεμένο (με την θεωρητική έννοια του συνδεδεμένου γράφου).

Το κοινό πρωτόκολλο δρομολόγησης αναφέρεται ως **εσωτερικό πρωτόκολλο δρομολόγησης** (interior routing protocol - IRP), και χρησιμοποιείται για τη μεταφορά πληροφορίας μεταξύ δρομολογητών εντός του ΑΣ.

Υπάρχει βέβαια η περίπτωση να υπάρχει ένα διαδίκτυο που να αποτελείται από διάφορα ΑΣ. Κάθε ένα από αυτά μπορεί να χρησιμοποιεί το δικό του εσωτερικό πρωτόκολλο δρομολόγησης. Επειδή όμως μιλήσαμε για διαδικτύωση θα υπάρχει σε κάθε ΑΣ, τουλάχιστον ένας δρομολογητής που θα είναι υπεύθυνος για τη διασύνδεση του δικού του ΑΣ με κάποιο άλλο. Η διασύνδεση αυτή πιθανόν αν γίνεται μέσω κάποιου δικτύου ευρείας περιοχής (WAN). Σε κάθε περίπτωση ο συνοριακός αυτός δρομολογητής θα πρέπει να διαθέτει ένα μηχανισμό, ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης, με το οποίο θα ανταλλάσσει πληροφορίες δρομολόγησης με τα εξωτερικά προς αυτόν ΑΣ. Το πρωτόκολλο δρομολόγησης που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά πληροφορίας μεταξύ δρομολογητών που ανήκουν σε διαφορετικά ΑΣ, ονομάζεται **εξωτερικό πρωτόκολλο δρομολόγησης** (exterior routing protocol - ERP). Ένα εξωτερικό πρωτόκολλο δρομολόγησης χρειάζεται να μεταδίδει πολύ λιγότερη πληροφορία γιατί ο συνοριακός δρομολογητής αρκείται να δρομολογήσει τα πακέτα του προς το κατάλληλο ΑΣ, του οποίου οι δρομολογητές γνωρίζουν πώς να βρουν τον παραλήπτη των πακέτων.



Σχήμα 4-3 *Η διαδικτύωση δύο αυτόνομων συστημάτων*

Πολλές φορές χρησιμοποιούνται οι όροι IGP (interior gateway protocol) και EGP (exterior gateway protocol). Τα ονόματα αυτά όμως ανήκουν επίσης σε συγκεκριμένα πρωτόκολλα και η χρήση τους εδώ μπορεί να προκαλέσει σύγχυση.

4.3. Routing Information Protocol

Το RIP - Routing Information Protocol[3] είναι από τα πιο απλά αλλά και τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα εσωτερικά πρωτόκολλα δρομολόγησης. Επίσης είναι ένα χαρακτηριστικό πρωτόκολλο του τύπου distance-vector.

Προϋπόθεση της δρομολόγησης με χρήση διανυσμάτων απόστασης (distance-vector routing) είναι κάθε δρομολογητής να ανταλλάσσει πληροφορίες με τους γείτονές του. Κάθε κόμβος x χρησιμοποιεί τρία διανύσματα (vectors):

[3] RFC 1058, Routing Information Protocol, June 1988.

link-cost vector $$\mathbf{W}_x = \begin{bmatrix} w(x,1) \\ .... \\ w(x,M) \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

M: ο αριθμός των δικτύων με τα οποία ο x συνδέεται άμεσα.

distance vector για τον κόμβο x $$\mathbf{L}_x = \begin{bmatrix} L(x,1) \\ .... \\ L(x,N) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

L(x,j): η τρέχουσα εκτίμηση για την ελάχιστη καθυστέρηση από τον κόμβο x στο δίκτυο j.

N: ο αριθμός των δικτύων.

next-hop vector για τον κόμβο x $$\mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} R(x,1) \\ ... \\ R(x,N) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

R(x,j): ο επόμενος δρομολογητής στην διαδρομή με την ελάχιστη καθυστέρηση από τον κόμβο x για το δίκτυο j.

Περιοδικά (κάθε 30 δευτερόλεπτα) κάθε κόμβος επικοινωνεί με τους γείτονές του στέλνοντας το διάνυσμα απόστασης L που έχει ο ίδιος για κάθε δίκτυο. Με βάση την πληροφορία των διανυσμάτων απόστασης (distance vector) ο δρομολογητής ανανεώνει και τα άλλα δύο διανύσματα ως εξής:

$$L(x,j) = \underset{y \in A}{Min}\left[L(y,j) + w(x, N_{xy}) \right] \quad (4.4)$$

όπου:

A: οι γειτονικοί κόμβοι του x

N_{xy}: ένα δίκτυο που συνδέει τον κόμβο x και τον δρομολογητή y.

R(x,j) = y

όπου y εκείνο για το οποίο ελαχιστοποιείται η παραπάνω έκφραση.

Η αρχικοποίηση του κάθε κόμβου γίνεται με τη συνθήκη:

$$L(x,j) = \begin{cases} w(x,j) & \text{για } j \text{ γειτονα του } x \\ \infty & \text{για καθε αλλο} \end{cases} \quad (4.5)$$

Με άλλα λόγια ο κόμβος x αντιμετωπίζει το δρομολογητή y σαν το επόμενο άλμα για έναν προορισμό j αν ο y είναι εκείνος για τον οποίο ελαχιστοποιείται η έκφραση (4.4).

Ο αλγόριθμος δρομολόγησης που χρησιμοποιεί το RIP είναι στην ουσία μια κατανεμημένη έκδοση του αλγορίθμου Bellman – Ford[4]. Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά ως ο αρχικός αλγόριθμος δρομολόγησης στο ARPANET.

4.4. Λεπτομέρειες του RIP

4.4.1. Σταδιακή ανανέωση (incremental update)

Είπαμε ότι το RIP ανανεώνει τους πίνακες δρομολόγησης του δρομολογητή μόλις λάβει τις ενημερώσεις από όλους τους γείτονες. Κάνουμε λοιπόν τη σιωπηρή παραδοχή ότι όλες οι ενημερώσεις φτάνουν μέσα σε ένα πολύ στενό χρονικό παράθυρο αφού η λειτουργία του πρωτοκόλλου γίνεται ασύγχρονα. Γιατί; Τα πακέτα του RIP στέλνονται με τη χρήση UDP που δεν μπορεί να εγγυηθεί την παράδοση. Έτσι κάποια πακέτα ενδέχεται να μην φτάσουν καθόλου.

Για τους λόγους αυτούς το RIP λειτουργεί βηματικά. Ανανεώνει τους πίνακες δρομολόγησης κάθε φορά που λαμβάνει ενημέρωση από ένα γείτονά του. Αυτό γίνεται με βάση του παρακάτω κανόνες:

Αν το εισερχόμενο διάνυσμα απόστασης περιέχει ένα καινούργιο δίκτυο προορισμού, η πληροφορία εισάγεται στους πίνακες δρομολόγησης.

Αν ο κόμβος λάβει μια διαδρομή με μικρότερη καθυστέρηση προς έναν προορισμό αντικαθιστά την υπάρχουσα διαδρομή.

Αν ο κόμβος λάβει ένα διάνυσμα με ανανεωμένα στοιχεία από κάποιον γείτονα για τον οποίο υπάρχουν μια ή περισσότερες καταχωρήσεις στους πίνακες δρομολόγησης τότε ανανεώνει όλες αυτές τις καταχωρήσεις με βάση τη νέα πληροφορία.

---

[4] Distributed Bellman-Ford (D. Bertsekas and R. Gallagher. Data Networks, pp. 297-333. Prentice Hall, Inc., 1987.)

4.4.2. Αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου

Πως ένας κόμβος του δικτύου αντιλαμβάνεται ότι κάποιος άλλος έχει καταρρεύσει; Ο μηχανισμός που χρησιμοποιεί το RIP είναι ο εξής: κάθε δρομολογητής πρέπει να στέλνει τα ενημερωμένα διανύσματα απόστασης κάθε 30 δευτερόλεπτα προς όλους τους γείτονές του. Αν ένας κόμβος Κ του δικτύου δεν λάβει καμία ενημέρωση από κάποιον Ν από τους γείτονές του για 180 δευτερόλεπτα σημαδεύει τη διαδρομή αυτή ως μη ισχύουσα. Κάνει δηλαδή την υπόθεση ότι επειδή δεν έμαθε νέα του Ν, είτε ο Ν έχει καταρρεύσει είτε η ζεύξη προς αυτόν έχει κάποιο πρόβλημα. Αν ο κόμβος Ν που κατέρρευσε ήταν το επόμενο βήμα προς κάποιο δίκτυο i, τότε ο Κ περιμένει να λάβει ένα διάνυσμα ανανέωσης από οποιονδήποτε γείτονα του για να δει αν του προσφέρει εναλλακτική διαδρομή προς το i. Αν ναι, τότε ανανεώνει τον πίνακα δρομολόγησης. Αν όχι ή μέχρι να λάβει κάποια τέτοια ενημέρωση, θέτει την απόσταση που έχει για εκείνη τη διαδρομή (μέσω του Κ) άπειρη.

4.4.3. Το πρόβλημα του να μετρήσεις ως το άπειρο.

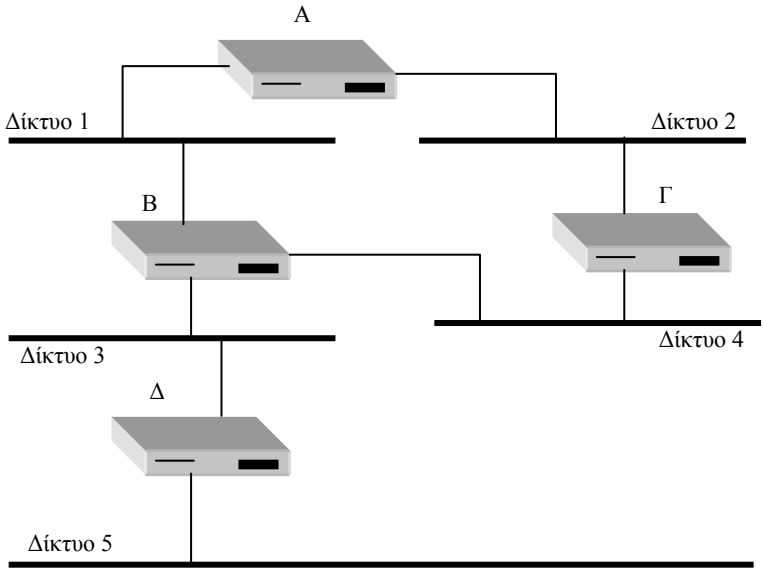
Από τα πιο σοβαρά προβλήματα στο RIP είναι η αργή απόκριση σε μια αλλαγή τοπολογίας του δικτύου. Έστω η τοπολογία του παρακάτω σχήματος όπου τα κόστη κάθε ζεύξης είναι ίσα με 1. Ο Β έχει μια απόσταση 2 από το δίκτυο 5 με επόμενο άλμα τον Δ, ενώ οι Α και Γ έχουν απόσταση 3 από το 5 με επόμενο άλμα τον Β. Έστω τώρα ότι ο Δ καταρρέει. Θα συμβούν τα ακόλουθα.

Ο Β αντιλαμβάνεται ότι ο Δ έχει καταρρεύσει (επειδή δεν του στέλνει ενημέρωση για 180 δευτερόλεπτα). Έχει όμως την πληροφορία από τους Α και Γ ότι η απόστασή τους από το 5 είναι 3 και ενημερώνει τη δική του σε 4. Στην επόμενη επικοινωνία του με τους Α και Γ διαφημίζει αυτή του την πληροφορία.

Οι Α και Γ λαμβάνουν τη νέα απόσταση του δικτύου 5 από τον Β και ανανεώνουν τα δικά τους διανύσματα απόστασης στην τιμή 5 (4 από τον Β συν την απόστασή τους από τον Β).

Ο Β λαμβάνει την νέα απόσταση από τους Α και Γ και υπολογίζει τη νέα του απόσταση από το δίκτυο 5 σε 6.

Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρις ότου η απόσταση του Β από το 5 να γίνει άπειρη. Προφανώς μια τέτοια μέτρηση είναι αδύνατη. Για το λόγο αυτό στο RIP θεωρείται ως τιμή απείρου η απόσταση 16. Μόλις η απόσταση για κάποιο δίκτυο φτάσει στην τιμή αυτή, ο κόμβος συμπεραίνει ότι η πρόσβαση σε αυτό το δίκτυο είναι αδύνατη. Ακόμη και σε αυτή την περίπτωση με δεδομένο το γεγονός ότι οι ενημερώσεις έχουν χρονική απόσταση 30 δευτερολέπτων το εν λόγω δίκτυο θα ενημερωθεί πλήρως για την αστοχία του δρομολογητή Δ μετά από 8 έως 16 λεπτά.



Σχήμα 4-4 *Το πρόβλημα counting-to-infinity*

Το πρόβλημα **counting-to-infinity** δημιουργείται από την παρεξήγηση μεταξύ του Α και του Β (ή μεταξύ του Γ και του Β) ότι ο καθένας μπορεί να φτάσει στο δίκτυο 5 μέσω του άλλου. Το πρόβλημα αυτό παρακάμπτεται με τη χρήση του κανόνα **split horizon**. Σύμφωνα με αυτόν είναι περιττό να στέλνεις πληροφορία σχετικά με την πρόσβαση προς κάποιο δίκτυο πίσω στον κόμβο από τον οποίο την πήρες. Αυτό είναι ενδεχομένως προφανές από τη στιγμή που αυτός που στέλνει πληροφορία για κάποιο δίκτυο είναι κοντύτερα σε αυτό από εσένα. Η χρήση του κανόνα επιταχύνει δραματικά την απαλοιφή μιας προβληματικής διαδρομής από την τοπολογία του δικτύου (180 δευτερόλεπτα).

Με μια μικρή αύξηση στο μέγεθος των μηνυμάτων του, το RIP προσφέρει μια ακόμη ταχύτερη απόκριση χρησιμοποιώντας τον κανόνα **poisoned reverse**. Αυτός διαφέρει από τον προηγούμενο γιατί σε περίπτωση που έχει μια μέτρηση με μήκος 16 στέλνει ενημέρωση στους γείτονες από τους έμαθε για αυτή τη διαδρομή. Αν δύο δρομολογητές στέλνουν αντίθετη ενημέρωση για μια διαδρομή με μέτρηση 16, διακόπτουν αυτόματα το βρόγχο.

4.4.4. Μορφή των RIP πακέτων

Τα πακέτα του RIP μεταφέρονται μέσω UDP και χρησιμοποιούν την πόρτα 520. Το σχήμα δείχνει τη μορφή ενός πακέτου RIP. Κάθε πακέτο ξεκινά με μια επικεφαλίδα που έχει τα ακόλουθα πεδία.

Command: Έχει την τιμή 1 για πακέτο-αίτηση και 2 για πακέτο-απάντηση. Οι ανανεώσεις της δρομολόγησης στέλνονται ως απαντήσεις είτε κάποιος αιτήθηκε είτε όχι για αυτές. Όταν ένας κόμβος ξεκινά για πρώτη φορά, εκπέμπει μια αίτηση RIP. Όποιος δρομολογητής τη λάβει απαντά αμέσως.

Version: Έχει την τιμή 1 για το αρχικό RIP, και 2 για το RIP-2.

Ακολουθούν μια ή περισσότερες ομάδες δεδομένων τα οποία είναι οι αποστάσεις των μονοπατιών για συγκεκριμένα δίκτυα. Τα σχετικά πεδία είναι:

IP address: Μια IP διεύθυνση η οποία έχει ένα μη μηδενικό στέλεχος δικτύου και ένα μηδενικό στέλεχος σταθμού (host). Έτσι καθορίζεται μοναδικά ένα συγκεκριμένο δίκτυο.

Metric: Η απόσταση του μονοπατιού από αυτόν τον δρομολογητή ως το εν λόγω δίκτυο.

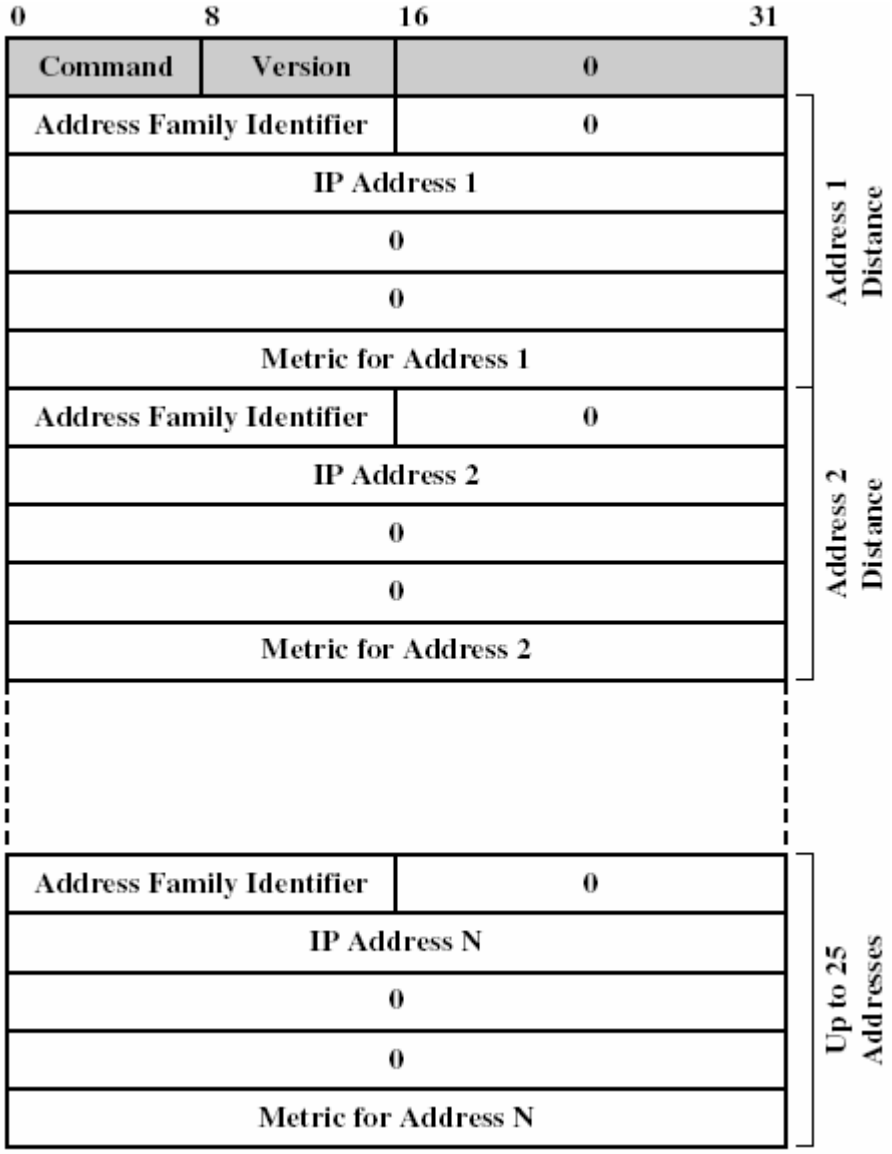
Η τυπική διαδικασία του πρωτοκόλλου προβλέπει κόστος για κάθε ζεύξη ίσο με 1, ώστε το metric να είναι ο αριθμός των αλμάτων για κάθε δίκτυο.

4.4.5. Περιορισμοί του RIP

Το RIP χρησιμοποιείται ευρύτατα, ειδικά σε μικρά διαδίκτυα, κυρίως λόγω της απλότητας του. Έχει όμως κάποιους περιορισμούς.

Καθώς τα διαδίκτυα μεγαλώνουν υπάρχει πρόβλημα να προσεγγίσει προορισμούς με μέτρηση μεγαλύτερη από 15. Αυτό κάνει το RIP ακατάλληλο

για μεγάλες τοπολογίες δικτύων. Από την άλλη, αν μεγάλωνε ο αριθμός περιγραφής του απείρου, θα ήταν χρονοβόρα η απόκριση του πρωτοκόλλου κατά την αρχικοποίηση των δρομολογητών ή σε οποιαδήποτε αλλαγή στην τοπολογία.



Σχήμα 4-5 *Μορφή των RIP πακέτων*

Η απλοποιημένη διαδικασία μέτρησης των μονοπατιών δεν καταφέρνει πάντα να δημιουργήσει τους βέλτιστους πίνακες δρομολόγησης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να στέλνονται πακέτα πάνω από αργές ή ακριβές ζεύξεις, ενώ υπάρχουν καλύτερες διαδρομές.

Οι συσκευές που χρησιμοποιούν RIP, δέχονται πακέτα ανανέωσης από οποιαδήποτε άλλη συσκευή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα κάποιες συσκευές που δεν είναι σωστά ρυθμισμένες να προκαλούν προβλήματα σε όλο το δίκτυο.

4.5. Link-State Routing

Όπως ήδη αναφέραμε οι αλγόριθμοι δρομολόγησης που λειτουργούν με τη χρήση διανύσματος απόστασης (distance vector), περιορίζουν την ανταλλαγή πληροφορίας κάθε δρομολογητή με τους γειτονικούς του. Στην περίπτωση της δρομολόγησης με βάση την κατάσταση των ζεύξεων (link state), κάθε δρομολογητής ανταλλάσσει πληροφορία με όλους τους δρομολογητές του διαδικτύου στο οποίο ανήκει.

Πίνακας 4-1: *Σύγκριση των πρακτικών δρομολόγησης*

Distance-Vector Routing	**Link-State Routing**
Κάθε δρομολογητής στέλνει πληροφορίες δρομολόγησης στους γείτονές του	Κάθε δρομολογητής στέλνει πληροφορίες δρομολόγησης σε κάθε άλλο δρομολογητή του δικτύου.
Η πληροφορία που στέλνει είναι μια εκτίμηση του κόστους των μονοπατιών για κάθε δίκτυο	Η πληροφορία που στέλνει είναι ακριβής υπολογισμός του «κόστους» της σύνδεσής του με τα γειτονικά δίκτυα
Η πληροφορία αποστέλλεται σε κανονική περιοδική βάση.	Η πληροφορία στέλνεται όταν υπάρχουν αλλαγές.
Ο δρομολογητής καθορίζει την πληροφορία για το επόμενο άλμα (next-hop) χρησιμοποιώντας τον κατανεμημένο αλγόριθμο Bellman-Ford με βάση την εκτίμηση που έχει λάβει για το κόστος των μονοπατιών.	Ο δρομολογητής πρώτα κατασκευάζει μια περιγραφή της τοπολογίας του διαδικτύου του και μετά μπορεί να χρησιμοποιήσει οποιονδήποτε αλγόριθμο για να καθορίσει τις πληροφορίες του επόμενου άλματος.

Η διαδικασία μέσω της οποίας γίνεται αυτό είναι η εξής: Κάθε δρομολογητής κατά τη διαδικασία αρχικοποίησής του εκτιμά την κατάσταση και το κόστος

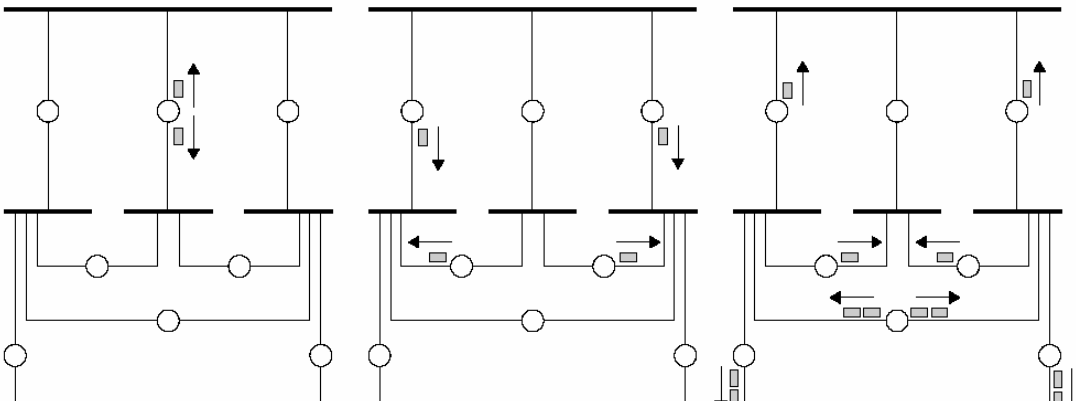
για κάθε μια από τις ζεύξεις που συνδέονται στα interfaces του. Έπειτα αποστέλλει το κόστος αυτό σε κάθε δρομολογητή εντός του διαδικτύου στο οποίο λειτουργεί. Από τη στιγμή εκείνη ελέγχει διαρκώς τις ζεύξεις του και αν υπάρξει σημαντική αλλαγή είτε στην κατάστασή τους (διακοπή, νέα ζεύξη,…) είτε στο κόστος τους (ελάττωση της κίνησης, μείωση του οικονομικού κόστους χρήσης, κ.α.) ξαναστέλνει τη νέα πληροφορία σε όλους τους υπόλοιπους.

Πως λειτουργεί ο δρομολογητής ως παραλήπτης της πληροφορίας κόστους; Σε αντίθεση με τη δρομολόγηση με διάνυσμα απόστασης, στην περίπτωση της δρομολόγησης με βάση το κόστος των ζεύξεων κάθε δρομολογητής έχει μια συνολική εικόνα του δικτύου στο οποίο λειτουργεί. Με βάση τις πληροφορίες που συλλέγει μπορεί να κατασκευάσει την τοπολογία του δικτύου και από αυτή να υπολογίσει μόνος του τη διαδρομή ελάχιστου μονοπατιού για κάθε προορισμό. Οι δρομολογητές είναι ελεύθεροι να επιλέξουν τον αλγόριθμο που θα χρησιμοποιήσουν. Συνήθως όμως χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος του Dijkstra[5]. Αφού υπολογίσουν την ελάχιστη διαδρομή, κατασκευάζουν τους πίνακες δρομολόγησης που περιέχουν το πρώτο άλμα προς κάθε προορισμό.

4.5.1. Όταν το δίκτυο πλημμυρίζει

Ποια είναι η διαδικασία μέσω της οποίας τα πακέτα ενημέρωσης κάθε δρομολογητή φτάνουν σε όλους τους υπόλοιπους του διαδικτύου του; Η διαδικασία είναι γνωστή ως **flooding** (πλημμύρισμα) και είναι η εξής: Κάθε δρομολογητής στέλνει ένα πακέτο ενημέρωσης σε κάθε γείτονά του. Κάθε γείτονας επανεκπέμπει το πακέτο που έλαβε προς κάθε κατεύθυνση εκτός από αυτή από την οποία το έλαβε. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται χωρίς περιορισμό.

[5] E. Dijkstra. A note on the two problems in connection with graphs. Numer. Math.,1:269-271,1959.



Σχήμα 4-6 *Η διαδικασία του flooding*

Είναι προφανές ότι μέσα από τη διαδικασία αυτή πολλά πακέτα θα ξαναγυρίσουν στον αρχικό αποστολέα τους επιβαρύνοντας με τον τρόπο αυτό το δίκτυο. Ένας τρόπος για να μην πολλαπλασιάζονται τα πακέτα προς κατευθύνσεις που δεν χρειάζεται είναι οι κόμβοι να θυμούνται να μην εκπέμψουν πακέτα που έχουν ήδη στείλει.

4.5.2. Πλεονεκτήματα

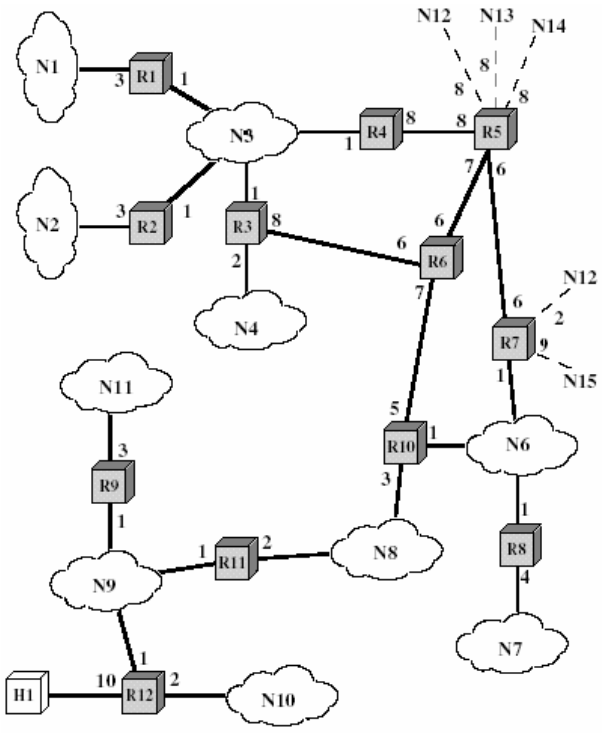
Με τη διαδικασία του flooding δοκιμάζονται όλες οι πιθανές διαδρομές του δικτύου. Έτσι όποια κι αν είναι η κατάσταση συσκευών και ζεύξεων, η πληροφορία θα φτάσει στους παραλήπτες μέσω εναλλακτικών διαδρομών. Αυτό ενισχύει την αντοχή (robustness) του δικτύου σε καταστάσεις φόρτισης.

Επειδή δοκιμάζονται όλες οι διαδρομές, τουλάχιστον μια θα είναι η ελάχιστη. Επομένως η διαδικασία αυτή ενημερώνει όλες τις συσκευές του δικτύου με τον πιο γρήγορο τρόπο.

Τα πακέτα φτάνουν σε όλους του κόμβους του δικτύου είτε είναι άμεσα είτε έμμεσα συνδεδεμένοι στην πηγή. Άρα όλοι λαμβάνουν την πληροφορία και όλοι έχουν τη δυνατότητα να κατασκευάσουν πίνακες δρομολόγησης.

4.5.3. Μειονεκτήματα

Η διαδικασία δημιουργεί λόγω της φύσης της μεγάλο φορτίο κίνησης στο δίκτυο το οποίο είναι ευθέως ανάλογο της διαδυνδεσιμότητας του δικτύου.

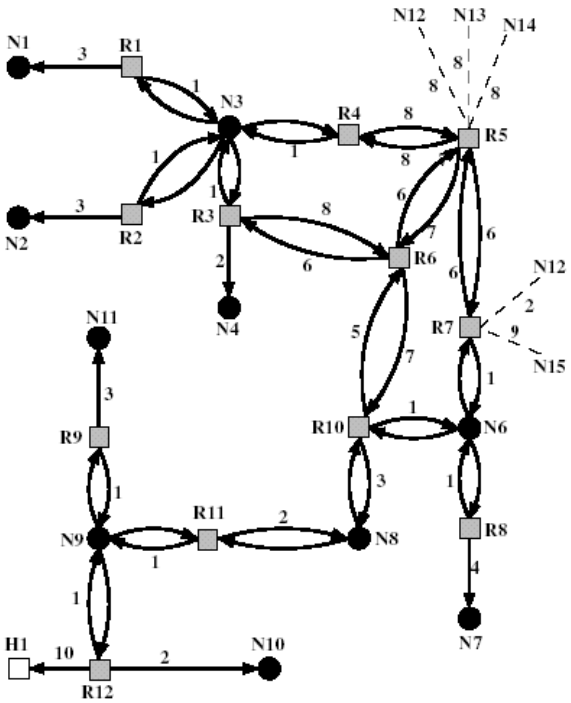


Σχήμα 4-7 *Ένα σύνθετο δίκτυο*

4.6. OSPF (Open Shortest Path First)[6]

Το πρωτόκολλο OSPF είναι από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα δρομολόγησης σε εσωτερικά δίκτυα. Η διαδικασία λειτουργίας του είναι παρόμοια με τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που χρησιμοποιούν την κατάσταση των ζεύξεων. Κάθε δρομολογητής στέλνει ενημέρωση για την κατάσταση των ζεύξεών του προς όλο το δίκτυο. Όποιος τη λαμβάνει επιβεβαιώνει τη λήψη προς τον ενδιάμεσο αποστολέα. Είναι προφανές ότι η διαδικασία αυτή ανταλλαγής μηνυμάτων επιβαρύνει το δίκτυο με επιπλέον κίνηση. Κάθε δρομολογητής του δικτύου από την πληροφορία που συλλέγει υπολογίζει την τοπολογία του δικτύου και τα ελάχιστα μονοπάτια για κάθε διαδρομή και διατηρεί όλα αυτά σε μια βάση δεδομένων. Η βάση αυτή εκφράζεται ως κατευθυνόμενος γράφος (directed graph) του οποίου τα στοιχεία έχουν ως εξής:

[6] RFC 1583, OSPF version 2, March 1994



Σχήμα 4-8 *Ο γράφος που αντιστοιχεί στο δίκτυο του σχήματος 3-6*

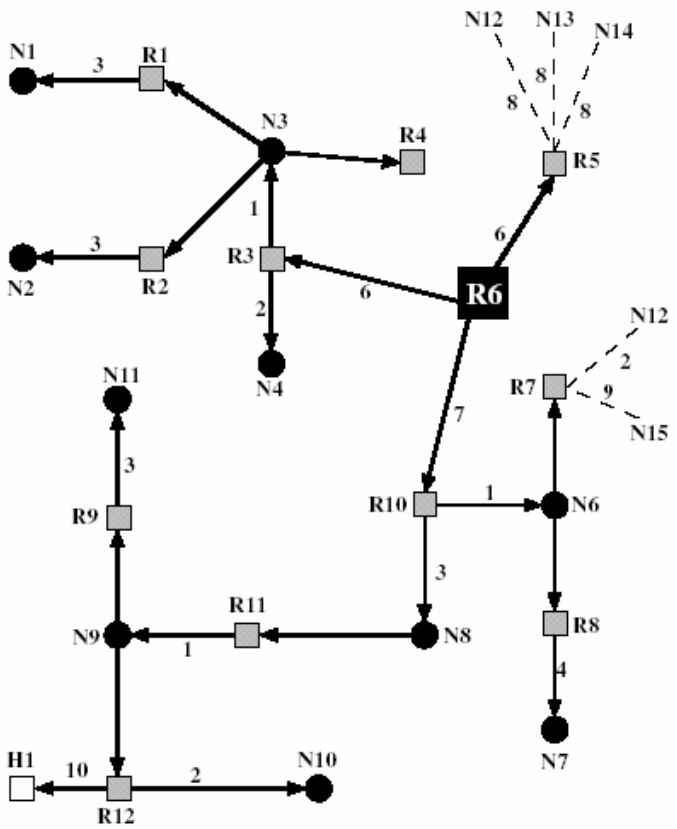
Οι κόμβοι του γράφου είναι είτε οι δρομολογητές είτε τα δίκτυα που αποτελούν το διαδίκτυο. Τα δίκτυα χαρακτηρίζονται σαν **transit** αν δεν περιλαμβάνουν πηγές ή παραλήπτες πληροφορίας και σαν **stub** αν δεν είναι transit.

Οι ακμές του γράφου μπορούν είτε να συνδέουν δύο δρομολογητές μεταξύ τους είτε έναν δρομολογητή με ένα δίκτυο. Οι ακμές που ξεκινούν από δρομολογητή χαρακτηρίζονται με ένα βάρος που είναι το κόστος χρήσης της ζεύξης. Οι ακμές που ξεκινάνε από δίκτυο δεν έχουν βάρος το οποίο θεωρείται ίσο με μηδέν. Άλλοι κανόνες που ισχύουν για τη μετατροπή μιας τοπολογίας δικτύου σε κατευθυνόμενο γράφο είναι οι εξής:

Δύο δρομολογητές συνδεδεμένοι απευθείας μεταξύ τους αναπαριστώνται με ένα ζεύγος ακμών, μια προς κάθε διεύθυνση (π.χ. οι 6 και 7).

Όταν σε ένα δίκτυο συνδέονται πολλοί δρομολογητές τότε κάθε ένας τους αναπαρίσταται με μια αμφίδρομη σύνδεση με τον κόμβο που παριστάνει το δίκτυο (π.χ. οι 1, 2, 3 και 4 που συνδέονται στο δίκτυο 3).

Αν σε ένα δίκτυο συνδέεται μόνο ένας δρομολογητής, η σύνδεση αυτή είναι μια σύνδεση τύπου stub (π.χ. το δίκτυο 7).



Σχήμα 4-9 *Το spanning tree του προηγούμενου δικτύου με ρίζα τον R6*

Μια τερματική συσκευή όπως ένας υπολογιστής που συνδέεται απευθείας σε ένα δρομολογητή αναπαρίσταται στον γράφο επίσης σαν μια σύνδεση stub (π.χ. ο υπολογιστής 1).

Όταν ένας δρομολογητής συνδέεται με ένα άλλο αυτόνομο σύστημα, τότε η ελάχιστη διαδρομή προς δίκτυα ή συσκευές που ανήκουν στο σύστημα αυτό, υπολογίζεται με βάση ένα εξωτερικό πρωτόκολλο δρομολόγησης. Η σύνδεση προς ένα άλλο αυτόνομο σύστημα αναπαρίσταται ως σύνδεση τύπου stub με μια ακμή προς τον δρομολογητή με το γνωστό κόστος μονοπατιού (π.χ. τα δίκτυα 12 έως 15).

Στο σχήμα φαίνεται η διαδρομή ελάχιστου μονοπατιού που αντιστοιχεί για τον δρομολογητή 6 και η οποία απεικονίζεται σαν spanning tree. Το δένδρο αυτό

που συνδέει το δρομολογητή 6, με όλα τα υπόλοιπα στοιχεία του διαδικτύου του, αποθηκεύεται με τη μορφή ενός πίνακα δρομολόγησης που για κάθε προορισμό αναφέρει τον κόμβο που είναι το επόμενο άλμα.

4.6.1. Το κόστος των ζεύξεων

Τα κόστη που συσχετίζονται με κάθε ζεύξη και κάθε άλμα αναφέρονται και ως routing metrics, είναι δηλαδή κατά κάποιον τρόπο το μετρικό σύστημα των δρομολογητών. Το OSPF χρησιμοποιεί ένα ευέλικτο σύστημα μετρήσεων που βασίζεται στην έννοια του Τύπου Υπηρεσίας (TOS – Type of Service). Σε αυτό δημιουργούνται κατηγορίες (τύποι) υπηρεσιών.

Normal (TOS 0): Το προκαθορισμένο σύστημα μέτρησης, το οποίο αντιλαμβάνονται όλοι οι δρομολογητές και οι τιμές του καθορίζονται από τον διαχειριστή του δικτύου. Η απλούστερη τιμή είναι η μονάδα που έχει σαν αποτέλεσμα τον υπολογισμό του ελάχιστου μονοπατιού με βάση τον ελάχιστο αριθμό αλμάτων μεταξύ δρομολογητών.

Ελαχιστοποίηση οικονομικού κόστους (TOS 2): Χρησιμοποιείται αν μπορεί η χρήση του δικτύου να συνδεθεί με πραγματικό οικονομικό κόστος.

Μεγιστοποίηση αξιοπιστίας (TOS 4): Μπορεί να είναι βάση κάποιας αρχικής ρύθμισης ή να προκύπτει από το ιστορικό διακοπών στο δίκτυο ή από μετρήσεις απώλειας πακέτων.

Μεγιστοποίηση διαμεταγωγής - throughput (TOS 8): Ρυθμίζεται με βάση το εύρος ζώνης της κάθε ζεύξης. Μονάδα μέτρησης είναι η διάρκεια ενός bit σε μονάδες των 10 nsec. Έτσι για το 10BaseT Ethernet θα έχει την τιμή 10, ενώ για μια ζεύξη ταχύτητας 56Kbps θα είναι 1785.

Ελαχιστοποίηση καθυστέρησης (TOS 16): Αυτό είναι μέτρο του χρόνου μετάβασης (transit) ή της καθυστέρησης από έναν κόμβο. Ο χρόνος αυτός είναι ο χρόνος μετάδοσης συν το χρόνο αναμονής σε ουρά σε κάθε δρομολογητή. Μετριέται δυναμικά από κάθε δρομολογητή για κάθε διεπαφή του με τις ζεύξεις στις οποίες είναι συνδεδεμένος.

Οι τιμές του ToS είναι οι ίδιες με αυτές που ορίζονται για το πεδίο με το ίδιο όνομα στην κεφαλίδα του IP πακέτου. Όταν ο δρομολογητής διαφημίζει την

ύπαρξή του στέλνει πακέτα που περιέχουν μια τιμή για κάθε TOS που χρησιμοποιεί. Έτσι κάθε δρομολογητής μπορεί να κατασκευάσει μέχρι πέντε πίνακες δρομολόγησης, έναν για κάθε TOS. Σαν αποτέλεσμα θα κατασκευάσει πέντε spanning trees για το δίκτυο. Έτσι η δρομολόγηση θα διαφέρει ανάλογα με τον τύπο υπηρεσίας που ζητά κάθε datagram. Αν δεν υπάρχει απαίτηση για συγκεκριμένο τύπο υπηρεσία ακολουθείται η διαδρομή του TOS 0.

Για να γίνει ευκολότερη η διαχείριση μεγάλων δικτύων, το OSPF χρησιμοποιεί την έννοια της περιοχής (area). Κάθε διαδίκτυο ρυθμίζεται με τέτοιον τρόπο ώστε να περιέχει ένα δίκτυο κορμού (backbone) και πολλές περιοχές. Σαν περιοχή ορίζεται μια συλλογή από γειτονικά και συνεχόμενα δίκτυα και υπολογιστές μαζί με τους δρομολογητές που έχουν διεπαφές προς οποιοδήποτε από αυτά τα δίκτυα. Το δίκτυο κορμού είναι μια συλλογή από συνεχόμενα δίκτυα που δεν περιλαμβάνονται σε καμία περιοχή, τους δρομολογητές που ανήκουν σε αυτά, και εκείνους τους δρομολογητές που ανήκουν σε πολλαπλές περιοχές.

Σε κάθε περιοχή «τρέχει» μια διαφορετική κόπια του πρωτοκόλλου δρομολόγησης βάση του οποίου ανταλλάσσεται πληροφορία μόνο μεταξύ των δρομολογητών της περιοχής. Αυτή η διαδικασία δημιουργεί πίνακες δρομολόγησης οι οποίοι αντικατοπτρίζουν την τοπολογία της συγκεκριμένης περιοχής. Όταν χρειάζεται να επικοινωνήσουν δύο υπολογιστές μέσα στην ίδια περιοχή τότε η πληροφορία μεταδίδεται μόνο μεταξύ δρομολογητών της περιοχής.

Αν η πηγή και ο προορισμός της πληροφορίας βρίσκονται σε διαφορετικές περιοχές, τότε η δρομολόγηση γίνεται σε τρία στάδια. Τα πακέτα ξεκινάνε από την πηγή και ακολουθούν τη βέλτιστη διαδρομή προς τον συνοριακό δρομολογητή της περιοχής. Αυτός, επειδή ανήκει και στην περιοχή που ονομάσαμε δίκτυο κορμού, ξέρει να αποστείλει τα πακέτα μέσω της βέλτιστης διαδρομής προς τον συνοριακό δρομολογητή της περιοχής στην οποία ανήκει ο παραλήπτης. Έπειτα αυτός αναλαμβάνει να βρει τον τελικό παραλήπτη.

4.7. Path-Vector Protocols

Τα πρωτόκολλα που μελετήσαμε μέχρι τώρα είναι ακατάλληλα για να χρησιμοποιηθούν ως εξωτερικά πρωτόκολλα δρομολόγησης (exterior routing protocols). Τους λόγους θα τους καταλάβουμε αν θυμηθούμε τη λειτουργία τους.

Στα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν διάνυσμα απόστασης (distance-vector), κάθε δρομολογητής «μετράει» σύμφωνα με τις αναφορές των γειτόνων του. Επομένως ενώ γνωρίζει την απόσταση προς κάποιον προορισμό, δεν έχει καμία άλλη ενημέρωση για το είδος της διαδρομής. Σιωπηλά υποθέσαμε, και αυτό ισχύει σε τοπικά δίκτυα, ότι όλοι οι ενδιάμεσοι δρομολογητές χρησιμοποιούν την ίδια μονάδα μέτρησης του κόστους της απόστασης. Αυτό όμως δεν ισχύει σε μεγάλα δίκτυα και πολύ περισσότερο σε δίκτυα που ανήκουν σε διαφορετικούς οργανισμούς ή επιχειρήσεις. Σε άλλα η μονάδα μέτρησης κόστους είναι η καθυστέρηση στη ζεύξη, σε άλλα το οικονομικό κόστος χρήσης της κάθε γραμμής, σε άλλα το αντίστροφο του εύρους ζώνης. Από την άλλη λόγω της έλλειψης ενημέρωσης για τα δίκτυα τα οποία διασχίζει το πακέτο για να φτάσει στον προορισμό του, υπάρχει περίπτωση κάποια διαδρομή να είναι απαγορευμένη λόγω πολιτικής του δικτύου, ακόμα κι αν είναι η συντομότερη.

Στα πρωτόκολλα link-state κάθε δρομολογητής διαφημίζει την κατάσταση των συνδέσεών του και δημιουργεί μια συνολική εικόνα της τοπολογίας. Αντίστοιχα με την προηγούμενη μέθοδο γίνεται η υπόθεση ότι όλοι ακολουθούν την ίδια μονάδα μέτρησης. Από την άλλη, το πλημμύρισμα του δικτύου μπορεί να ξεφύγει από τη διαχειριστική ικανότητα οποιουδήποτε αν το δίκτυο είναι μεγάλης κλίμακας ή πολύ περισσότερο εκτείνεται σε πολλά και διαφορετικά αυτόνομα συστήματα.

Υπάρχει ένα τύπος πρωτοκόλλων δρομολόγησης τα οποία χρησιμοποιούν μια εναλλακτική λύση αντί για τη μέτρηση της απόστασης ή του κόστους της. Τα πρωτόκολλα αυτά λέγονται **path vector protocols** επειδή αυτό που μεταδίδεται μεταξύ δρομολογητών δεν είναι η απόσταση ή το κόστος της διαδρομής αλλά: α) ποια δίκτυα μπορούν να προσεγγιστούν από αυτόν το

δρομολογητή, β) τα διαδοχικά αυτόνομα συστήματα που πρέπει να διασχίσουμε για να φτάσουμε εκεί.

Ως φυσικό επακόλουθο αυτής της προσέγγισης ο δρομολογητής μπορεί να ακολουθήσει κάποια πολιτική για τη δρομολόγηση των πακέτων. Για παράδειγμα, αν θέλει να μεταδώσει κάποια εμπιστευτική πληροφορία θα αποφύγει να τη διακινήσει μέσω δικτύων που δεν εμπιστεύεται. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιήσει ως κριτήριο να διασχίσει τα λιγότερα αυτόνομα συστήματα ή αν έχει κάποια πληροφόρηση για προβλήματα σε κάποια περιοχή του δικτύου μπορεί να παρακάμψει την περιοχή.

Ένα από τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα δρομολόγησης αυτού του τύπου είναι το Border Gateway Protocol, που θα μελετήσουμε στη συνέχεια.

4.8. Border Gateway Protocol – BGP[7]

Το πρωτόκολλο αυτό σχεδιάστηκε για να επιτρέπει σε δρομολογητές που βρίσκονται σε διαφορετικά αυτόνομα συστήματα να συνεργάζονται στην ανταλλαγή πληροφοριών.

Η ανταλλαγή πληροφορίας στο BGP γίνεται με μηνύματα πάνω από TCP. Υπάρχουν τέσσερα ήδη μηνυμάτων που ανταλλάσσονται μεταξύ των δρομολογητών. Το μήνυμα **Open** χρησιμοποιείται από έναν δρομολογητή για να αιτηθεί την έναρξη μιας σχέσης από ένα άλλον. Το **Keepalive** χρησιμοποιείται είτε ως θετική απάντηση για την εγκαθίδρυση μιας σχέσης είτε μετά από αυτό για τη διατήρησή της. Κάθε φορά που συμβεί οποιοδήποτε αλλαγή στην κατάσταση του δικτύου αποστέλλεται ένα μήνυμα **Update**, ενώ όποτε παρατηρούνται σφάλματα αυτά αναφέρονται με το μήνυμα **Notification**.

Γενικά συμβαίνουν τρεις διαφορετικές διαδικασίες στο δίκτυο. Η αναζήτηση γείτονα (**neighbor acquisition**), η αναγνώριση της πρόσβασης σε γείτονα (**neighbor reachability**) και της πρόσβασης σε δίκτυο (**network reachability**).

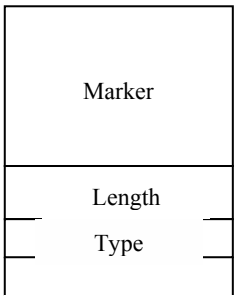
[7] RFC 1771, A Border Gateway Protocol (BGP-4), March 1995

Η αναζήτηση του γείτονα πρέπει να γίνεται μέσω μιας τυπικής διαδικασίας γιατί κάποιος δρομολογητής να μην επιθυμεί να εξυπηρετήσει την κίνηση κάποιου άλλου (π.χ. λόγω φόρτου). Έστω λοιπόν ότι δύο δρομολογητές θέλουν να ανταλλάξουν πληροφορία ή καλύτερα να συμβαίνει αυτό σε τακτική βάση. Καταρχήν το πρωτόκολλο δεν ασχολείται με το πώς βρήκε ο ένας τον άλλον ή πως αποφασίζει να ζητήσει ή να ανταλλάξει πληροφορία. Το θέμα αυτό είναι αρμοδιότητα του διαχειριστή κάθε δικτύου. Αφού λοιπόν γίνουν όλες οι διαπραγματεύσεις σε επίπεδο ανθρώπων ή επιχειρήσεων (σημειώστε ότι και οι παροχείς υπηρεσιών Internet επικοινωνούν με τέτοια πρωτόκολλα) στέλνει ένας από τους δύο δρομολογητές μια αίτηση (Open request) στον άλλον. Αν εκείνος δεν επιθυμεί τη δημιουργία μιας σχέσης δεν απαντά καθόλου στο μήνυμα. Αλλιώς αποστέλλει ένα μήνυμα Keepalive. Αφού ολοκληρωθεί η αναζήτηση του γείτονα πρέπει να επιβεβαιώνεται συχνά η ύπαρξή του και το γεγονός ότι είναι προσβάσιμος (neighbor reachability). Αυτό γίνεται με τακτική αποστολή μηνυμάτων τύπου Keepalive. Η δυνατότητα πρόσβασης σε διάφορα δίκτυα προκύπτει μετά την επεξεργασία μηνυμάτων τύπου Update που αποστέλλονται μεταξύ συνεργαζόμενων δρομολογητών. Κάθε δρομολογητής διατηρεί μια βάση δεδομένων με όλα τα υποδίκτυα που βρίσκονται πίσω από αυτόν. Επίσης περιέχεται και η επιθυμητή διαδρομή προς καθένα από αυτά. Το περιεχόμενο της βάσης ή οποιαδήποτε αλλαγή υπάρξει σε αυτήν αποστέλλεται μέσω μηνυμάτων Update.

Όλα τα μηνύματα του BGP ξεκινάνε με τις ίδιες 19 οκτάδες. Οι πρώτες 16 (**Marker**) χρησιμοποιούνται για τη διαδικασία αναγνώρισης μεταξύ δρομολογητών. Οι επόμενες δύο (**Length**) δείχνουν το μήκος του μηνύματος σε οκτάδες, ενώ η επόμενη μία (**Type**) δείχνει τον τύπο του μηνύματος (Open, Update, …).

Τα πακέτα Keepalive έχουν ακριβώς αυτή τη μορφή. Το Open περιλαμβάνει τη διεύθυνση του δρομολογητή που υποβάλει το αίτημα, σε ποιο ΑΣ ανήκει, και ένα χρονόμετρο που κρατά το χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ δύο δοαδοχικών μηνυμάτων Update ή Keepalive. Αν το χρονικό αυτό διάστημα εκπνεύσει χωρίς ανανέωση ο δρομολόγητής συμπεραίνει ότι ο απέναντι δεν επιθυμεί την

συνέχιση της συνεργασίας. Το Notification περιέχει μια σειρά σφαλμάτων που μπορεί να εμφανιστούν. Τέλος στο Update περιλαμβάνονταο πληροφορίες για διαδρομές, όπως ποια ΑΣ διασχίζεις, ποιο δρόμο προτιμά ο δρομολογητής, συνοπτική πληροφορία για τα δίκτυα με τα οποία μπορείς να συνδεθείς μέσω αυτού ή ακόμα και πληροφορίες για αναίρεση κάποιας διαδρομής, κ.α.



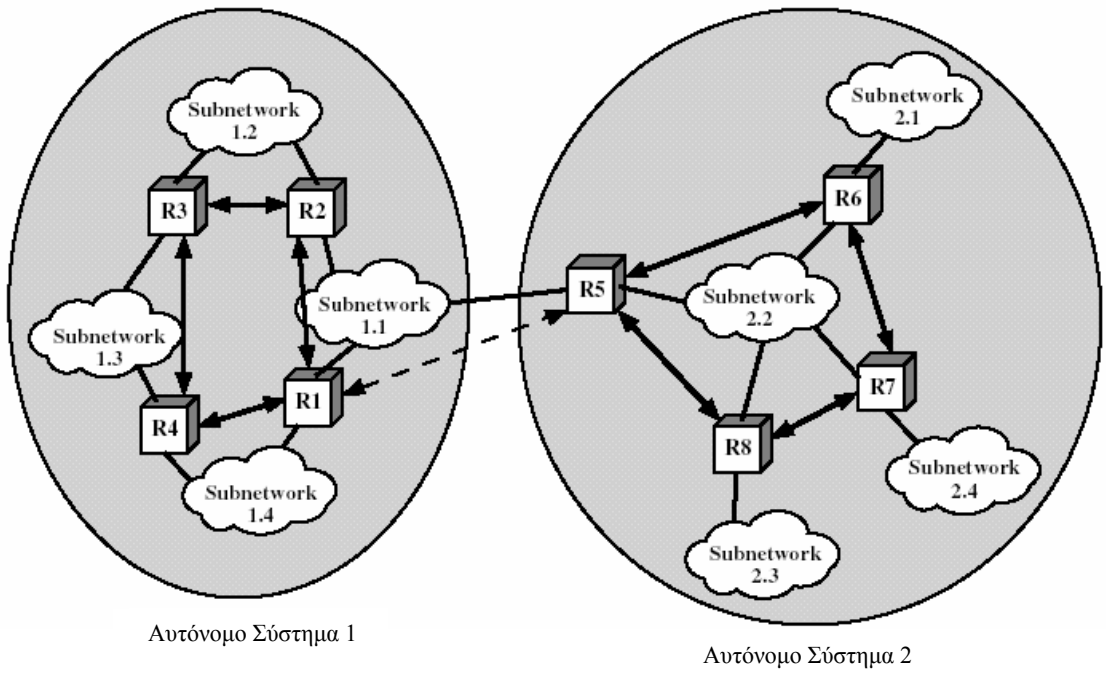
Σχήμα 4-10 *Η βασική επικεφαλίδα των πακέτων BGP*

Η ουσία της λειτουργίας του BGP είναι η ανταλλαγή πληροφορίας δρομολόγησης μεταξύ συνεργαζόμενων δρομολογητών που ανήκουν σε διαφορετικά Α.Σ. Οι δρομολογητές αυτοί είναι οι λεγόμενοι συνοριακοί δρομολογητές ενός δικτύου.

Έστω ο R1 στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4-11). Ο δρομολογητής αυτός συνδέεται με άλλους στο ΑΣ που ανήκει. Έτσι εκτός από το BGP, που χρησιμοποιεί για να επικοινωνεί με άλλα Α.Σ., χρησιμοποιεί και κάποιο εσωτερικό πρωτόκολλο δρομολόγησης. Έτσι, για παράδειγμα, με τη χρήση OSPF, ανταλλάσσει πληροφορία με τους δρομολογητές στο ΑΣ1 και κατασκευάζει την τοπολογία του ΑΣ1.

Μετά στέλνει ένα μήνυμα Update στον R5. Το μήνυμα περιλαμβάνει τα εξής πεδία:

- AS_Path: την ταυτότητα του ΑΣ1.
- Next_Hop: την IP διεύθυνση του R1.
- NLRI: Ένα πίνακα με τα υποδίκτυα του ΑΣ1. (Network Layer Reachability Information).



Σχήμα 4-11 *Διασύνδεση Αυτόνομων Συστημάτων*

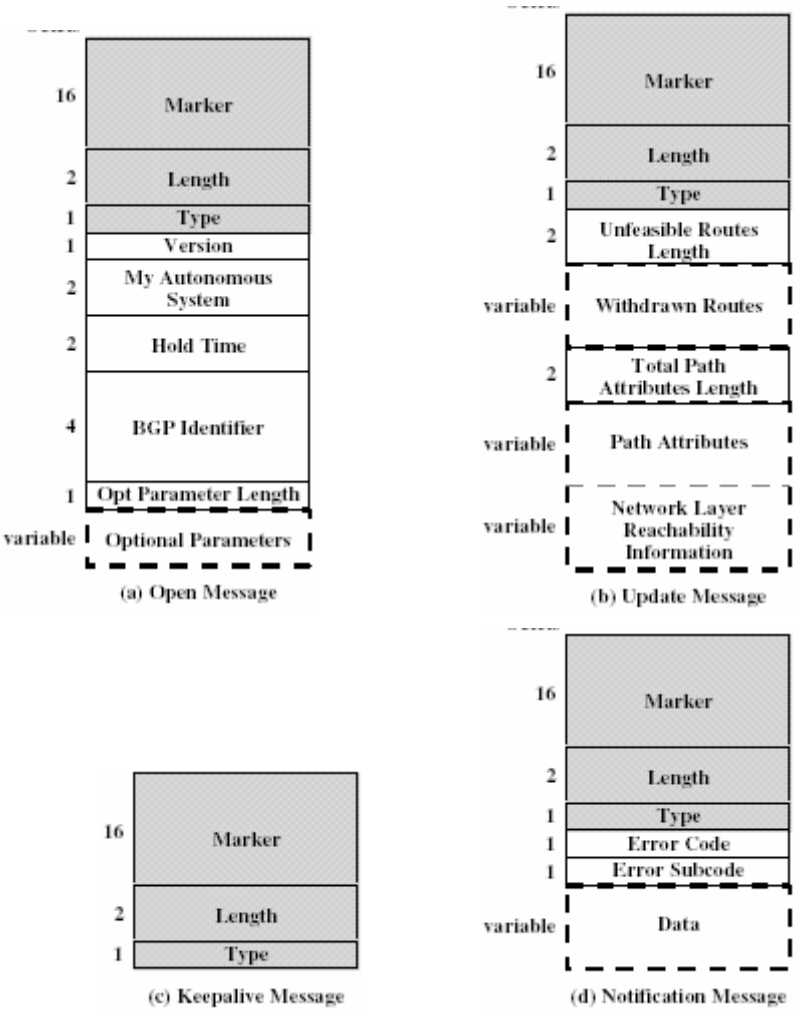
Ενημερώνει δηλαδή τον R5 για όλα τα υποδίκτυα που είναι προσεγγίσιμα μέσω του R1. Έστω ότι ο R5 συνδέεται με κάποιον R9 σε ένα ΑΣ3. Θα του στείλει ένα μήνυμα Update που θα περιέχει:

- AS_Path: τη λίστα των ΑΣ {ΑΣ2, ΑΣ1}.
- Next_Hop: την IP διεύθυνση του R5.
- NLRI: Ένα πίνακα με τα υποδίκτυα του ΑΣ1.

Τώρα ο R9 ξέρει ότι μπορεί να πάει στα υποδίκτυα που αναφέρονται στο NLRI μέσω R5 και χρειάζεται να διασχύσει τα ΑΣ2 και ΑΣ1. Αν η διαδρομή τον συμφέρει και ταιριάζει με την πολιτική του, τότε μπορεί να την εντάξει στον πίνακα δρομολόγησής του. Στην περίπτωση αυτή μπορεί να στείλει ένα νέο μήνυμα Update προς τους υπόλοιπους γείτονές του για να διαφημίσει τη διαδρομή. Το πεδίο AS_Path στο νέο μήνυμα θα είναι πλέον {ΑΣ3, ΑΣ2, ΑΣ1}.

Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται όσο χρειάζεται για να ενημερωθούν όλοι στο ευρύτερο διαδίκτυο που τους διασυνδέει. Το πεδίο AS_Path χρησιμοποιείται επίσης για να αποφευχθεί η ατέρμονη κυκλοφορία μηνυμάτων στο δίκτυο. Αν

κάποιος δρομολογητής παραλάβει ένα πακέτο Update και δει ότι το δικό του ΑΣ περιλαμβάνεται ήδη στο AS_Path, τότε δεν το προωθεί.



Σχήμα 4-12 *Οι μορφές των μηνυμάτων που ανταλλάσσονται στο BGP*

Αν υπάρχουν περισσότερα από ένα σημεία εισόδου σε ένα ΑΣ, τα οποία σημεία συνδέονται στον ίδιο δρομολογητή σε ένα εσωτερικό ΑΣ, τότε χρησιμοποιείται η ιδιότητα Multi_Exit_Disc. Η ιδιότητα αυτή περιέχει έναν αριθμό που απεικονίζει κάποια εσωτερική μονάδα μέτρησης στο ΑΣ. Έστω ότι εκτός από τον R1 και ο R2 συνδέεται με τον R5. Καθένας τους έχει κάποιο ελάχιστο μονοπάτι που ακολουθεί για προορισμούς εντός του ΑΣ1 (π.χ. για το υποδίκτυο 3). Τότε στο πεδίο NLRI εκτός από την αναφορά στα υποδίκτυα με τα οποία συνδέεται, χρησιμοποιεί την παραπάνω ιδιότητα για να στείλει το

κόστος της κάθε εσωτερικής ζεύξης. Επειδή στην περίπτωση αυτή ο R1 και ο R2 χρησιμοποιούν κοινή μονάδα μέτρησης των αποστάσεων εντός του ΑΣ1, η πληροφορία αυτή είναι συγκρίσιμη. Έτσι ο R5 μπορεί να αποφασίσει αν θα στείλει πακέτα για το υποδίκτυο 3 μέσω του R1 ή μέσω του R2.

5. Η Λειτουργία ενός δρομολογητή

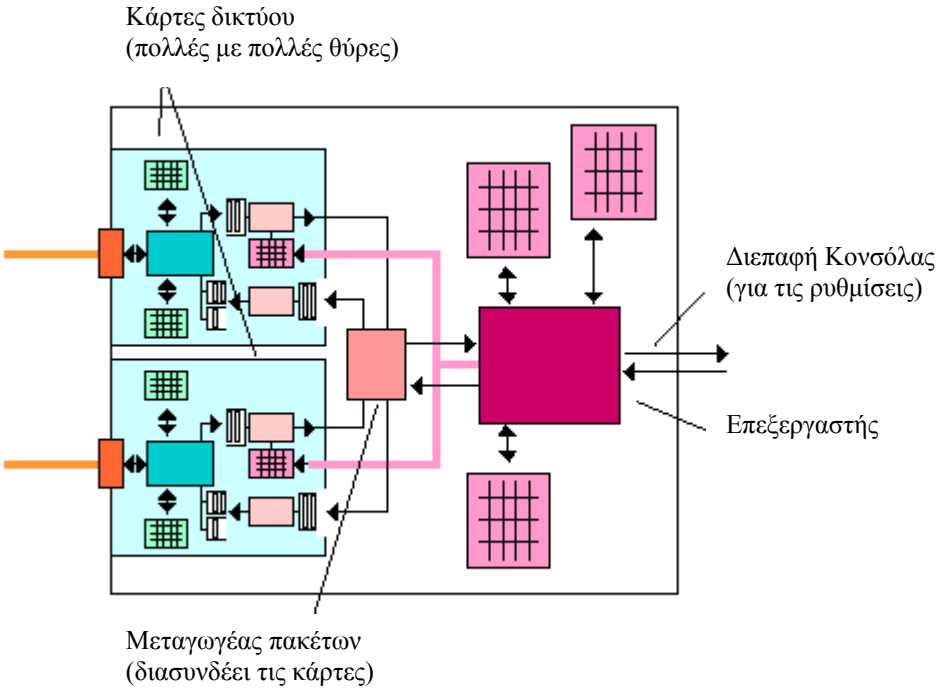
Οι σύγχρονοι δρομολογητές είναι συσκευές ιδιαίτερα πολύπλοκες και σύνθετες. Το εξωτερικό σασί είναι πολύ απλό και το μόνο που μπορεί να δει κανείς στην μπροστά όψη είναι μερικές ενδεικτικές λυχνίες λειτουργίας. Στην πίσω πλευρά, που είναι λίγο πιο σύνθετη υπάρχουν οι διεπαφές του δρομολογητή στις οποίες συνδέονται τα καλώδια από άλλες συσκευές του δικτύου.

5.1. Γενικά

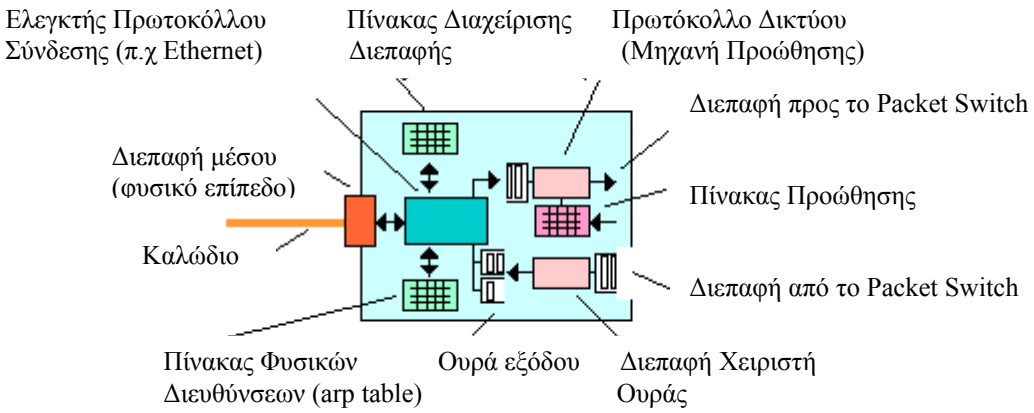
Οι περισσότεροι δρομολογητές διαθέτουν ένα σειριακό συνδετήρα όπου συνδέεται κάποιο τερματικό ή Modem που χρησιμοποιείται για τη διαχείριση της συσκευής. Η σειριακή αυτή έξοδος είναι γνωστή ως Console Port και χρησιμοποιείται για τους αρχικούς προγραμματισμούς του μηχανήματος. Επίσης ίσως να είναι η μόνη θύρα επικοινωνίας του, μέσω της οποίας θα επιτρέψει ο διαχειριστής να γίνονται αλλαγές στα φίλτρα (που χρησιμοποιούνται για να απαγορεύεται παράνομη πρόσβαση στα συνδεδεμένα δίκτυα).

Στην απλούστερη περίπτωση, η επεξεργασία των πακέτων γίνεται από έναν επεξεργαστή γενικών καθηκόντων που υλοποιεί όλους τους αλγορίθμους. Πιο πολύπλοκοι δρομολογητές, ενδέχεται να διαχωρίζουν τη λειτουργία της προώθησης (forwarding) από εκείνη της δρομολόγησης (routing) και να διαθέτουν εξειδικευμένους δρομολογητές για κάθε εργασία. Οι δρομολογητές έχουν επίσης πάνω τους μία ή περισσότερες κάρτες δικτύου. Αυτές είναι κάτι αντίστοιχο με τις κάρτες δικτύου των υπολογιστών μόνο που είναι πολύ υψηλότερων προδιαγραφών κάνοντας πολύ πιο γρήγορη επεξεργασία πακέτων. Μπορεί επίσης να διαθέτουν ενσωματωμένη μια ειδική διάταξη που λέγεται “Forwarding Engine” για την επιτάχυνση της λειτουργίας τους. Ένα άλλο

χαρακτηριστικό τους είναι βέβαια προφανές, κάθε κάρτα είναι εξειδικευμένη για συγκεκριμένο τύπο δικτύων (π.χ. 100BaseT, ATM, Frame Relay κ.ο.κ).



Σχήμα 5-1 *Μπλοκ διάγραμμα ενός δρομολογητή όπου φαίνονται οι δικτυακές διεπαφές (αριστερά) και η διεπαφή ελέγχου (δεξιά).*



Σχήμα 5-2 *Μπλοκ διάγραμμα μιας κάρτας δικτύου*

Ένας ελεγκτής πρωτοκόλλου επιπέδου σύνδεσης (link layer protocol controller) επεξεργάζεται τα πακέτα που λαμβάνει από το επίπεδο σύνδεσης (π.χ. Ethernet, HDLC, κ.α.) που χρησιμοποιείται πάνω στο καλώδιο. Αυτός ελέγχει την ακεραιότητα των λαμβανομένων frames (μέγεθος, διεύθυνση, σφάλματα). Τα έγκυρα Frames προωθούνται προς την ουρά λήψης αφού μετατραπούν σε πακέτα με την αφαίρεση της επικεφαλίδας και του πεδίου ελέγχου σφαλμάτων. Η ουρά που χρησιμοποιείται είναι συνήθως τύπου FIFO (First-In-First-Out), υλοποιημένη σαν δακτύλιος μνήμης (ring of memory buffers).

Η μνήμη αδειάζει στην είσοδο της μηχανής προώθησης (forwarding engine). Αυτή παίρνει το περιεχόμενο ενός buffer κάθε φορά και το βγάζει από τη διεπαφή του δέκτη. Το πακέτο προωθείται στην κατάλληλη διεπαφή εξόδου, ανάλογα με το βέλτιστο μονοπάτι προς τη διεύθυνση δικτύου που αντιστοιχεί στην διεύθυνση παραλήπτη η οποία προσδιορίζεται στην επικεφαλίδα του IP πακέτου.

Στη διεπαφή εξόδου, το πακέτο, μαζί με την καινούργια επικεφαλίδα και έλεγχο σφαλμάτων του επιπέδου σύνδεσης, τοποθετείται στην ουρά εκπομπής μέχρι ο επεξεργαστής επιπέδου σύνδεσης να είναι έτοιμος να το εκπέμψει. Αυτή η ουρά, όπως και η ουρά εισόδου, είναι τύπου FIFO.

Κάθε εξερχόμενο πακέτο χρειάζεται μια καινούργια επικεφαλίδα πρωτοκόλλου σύνδεσης (ενθυλάκωση) με διεύθυνση προορισμού τη διεύθυνση του επόμενου συστήματος που θα παραλάβει το πακέτο. Ο ελεγκτής του επιπέδου σύνδεσης διατηρεί και τον πίνακα με τις φυσικές διευθύνσεις που σχετίζονται με το κάθε interface. Αυτές είναι οι φυσικές (MAC – Media Access Control) διευθύνσεις των υπολογιστών ή των δρομολογητών που είναι συνδεδεμένοι στο ίδιο καλώδιο. Η εύρεσή τους γίνεται προφανώς με χρήση του πρωτοκόλλου arp (Address Resolution Protocol). Τελικά, αφού το πακέτο σταλεί, η θέση μνήμης που καταλάμβανε ελευθερώνεται (freed) και επιστρέφει στην ουρά εισόδου έτοιμη να παραλάβει το επόμενο εισερχόμενο πακέτο.

Μπορεί να σκέφτεστε ότι η δουλειά της προώθησης πακέτων είναι ιδιαίτερα εύκολη κι ότι είναι απλά μια διαδικασία αντιγραφής πακέτων από τη μια θέση

μνήμης στην άλλη. Τα πράγματα δεν είναι ακριβώς έτσι. Η διαδικασία της προώθησης απαιτεί τη λήψη σύνθετων αποφάσεων. Από την άλλη οι σύγχρονοι δρομολογητές θα κάνουν τα πάντα για μη μεταφέρουν τα δεδομένα των πακέτων από δω και από εκεί. Συνήθως κι όπου αυτό είναι δυνατό, αφήνουν τα δεδομένα του πακέτου στη θέση που γράφτηκαν αρχικά και επεξεργάζονται μόνο τη θέση μνήμης. Η μεταφορά δεδομένων από τη μια θέση μνήμης στην άλλη είναι αρκετά επίπονη εργασία και απαιτεί τη διάθεση πολλών πόρων από τη συσκευή.

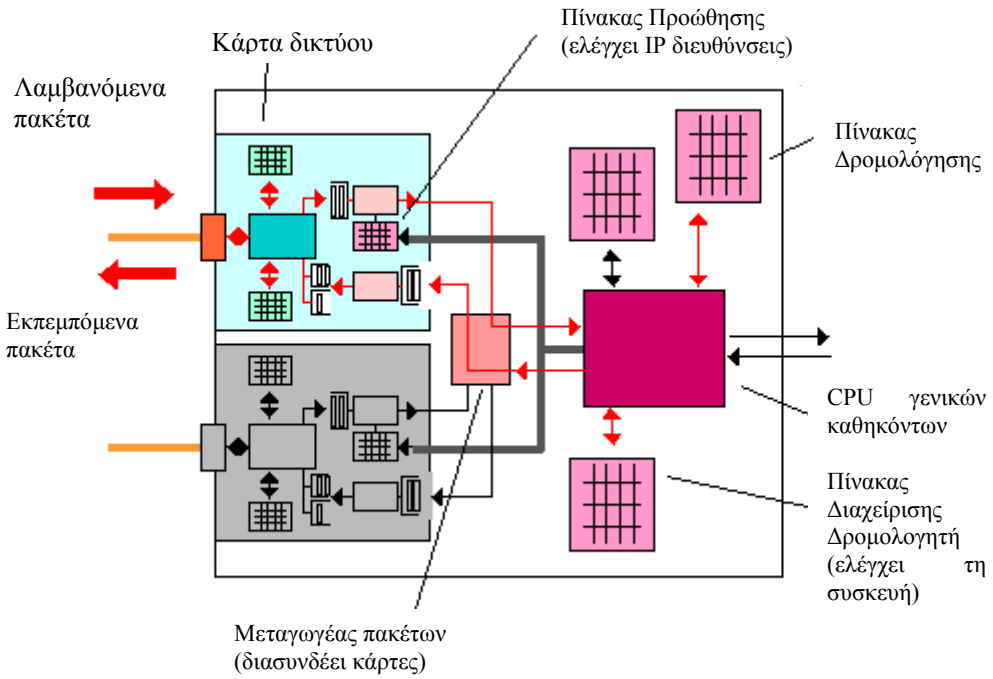
5.2. Η διαδικασία προώθησης

Ας δούμε με απλά λόγια τι συμβαίνει κατά τη διαδικασία της προώθησης. Η μηχανή προώθησης (forwarding engine) αφού ελέγξει την εγκυρότητα ενός frame, ξεκινά την επεξεργασία της πληροφορίας που βρίσκεται στο επίπεδο δικτύου (network layer). Διαβάζει την επικεφαλίδα του IP και ελέγχει διάφορα πεδία της ώστε να διαπιστώσει την αρτιότητα και εγκυρότητα του πακέτου. Έπειτα χρησιμοποιεί έναν τοπικό πίνακα δρομολόγησης, γνωστό ως FIB – Forwarding Information Base, για να αναγνωρίσει και να αποφασίσει προς πια πλευρά του δικτύου πρέπει να προωθήσει το πακέτο. Για την ακρίβεια θα αποφασίσει ποια θύρα εξόδου θα χρησιμοποιήσει.

Από τη στιγμή που θα αποφασιστεί η διεπαφή εξόδου, η μηχανή προώθησης, δίνει εντολή στον μεταγωγέα πακέτων (packet switch) να υλοποιήσει μια σύνδεση με την κατάλληλη θύρα εξόδου. Έπειτα το πακέτο προωθείται, εντός του δρομολογητή, προς τον ελεγκτή της δικτυακής διεπαφής εξόδου (κάρτα δικτύου εξόδου).

Αν και οι μεγάλοι δρομολογητές περιέχουν μια πραγματική διάταξη μεταγωγέα, οι περισσότεροι μικροί δρομολογητές δεν έχουν έναν «πραγματικό» τέτοιο κομμάτι. Σε κάποιους ο μεταγωγέας έχει τη μορφή μιας κοινής μνήμης όπου αποθηκεύονται όλα τα εισερχόμενα πακέτα. Με αυτό τον τρόπο η διαδικασία μεταγωγής περιορίζεται στη μετακίνηση ενός δείκτη (pointer) από την ουρά λήψης, και την αντιγραφή της τιμής του στην κατάλληλη ουρά εκπομπής. Σε κάποιες περιπτώσεις, ολόκληρο το πακέτο

αντιγράφεται από την μνήμη λήψης στη μνήμη εκπομπής με της χρήση ενός bus.



Σχήμα 5-3 *Η προώθηση ενός πακέτου προς τη έξοδο μέσω του packet switch.*

Η λειτουργία των δρομολογητών συνήθως ελέγχεται από έναν ή περισσότερους επεξεργαστές γενικής χρήσης, αντίστοιχους με αυτούς των προσωπικών υπολογιστών. Ο επεξεργαστής εκτελεί διάφορες εργασίες, που μπορούν να χωριστούν σε τρεις ομάδες: Στη μεταγωγή διαδικασιών (Process Switching), στην ταχεία μεταγωγή (Fast Switching) και στη δρομολόγηση (Routing). Οι πρώτες δύο διαδικασίες έχουν σχέση με την προώθηση των πακέτων. Η τελευταία εργασία, μπορεί σε κάποιους δρομολογητές να εκτελείται από ξεχωριστό επεξεργαστή.

5.3. Process Switching

Κάθε δρομολογητής εκτελεί επεξεργασία των πακέτων με την CPU που διαθέτει και με τη χρήση λογισμικού που υλοποιεί τα διάφορα πρωτόκολλα που ορίζονται στο τρίτο επίπεδο. Αυτή η επεξεργασία είναι γνωστή ως το αργό

μονοπάτι (Slow Path) γιατί είναι πολύ πιο αργή από την επεξεργασία του Fast Switching. Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται για το χειρισμό πιο σύνθετης επεξεργασίας ή ακόμη και για το φιλτράρισμα πακέτων (όπως σε firewall) για το έλεγχο της πρόσβασης από ένα δίκτυο σε ένα άλλο.Αν και πιο αργή, η CPU μπορεί να εκτελέσει ιδιαίτερα σύνθετες επεξεργασίες (για παράδειγμα, κατάτμηση των πακέτων) και για αυτό είναι πιο ευέλικτη. Ένα σημαντικό σημείο είναι ότι είναι διαδικασία που υλοποιείται με λογισμικό και για αυτό μπορεί εύκολα να αναβαθμιστεί αν χρειαστούν καινούργια χαρακτηριστικά. Στην πράξη, τα πακέτα χρησιμοποιούν αυτή την οδό επεξεργασίας σπάνια αλλά υλοποιείται σε όλους τους δρομολογητές.

Το Process Switching είναι ο πιο σύνθετος τρόπος επεξεργασίας ενός πακέτου. Γενικά, υλοποιούνται οι παρακάτω διαδικασίες:

1. Επεξεργασία λήψης από την κάρτα δικτύου.

Έλεγχος ληφθέντος πακέτου.

Εγγραφή του πακέτου στην κοινή μνήμη.

Κλήση διακοπής (interrupt) προς τη CPU του επεξεργαστή μεταγωγής (switching processor).

2. Χειρισμός διακοπής από τη CPU.

Η CPU καταγράφει τη διεύθυνση του πακέτου στη μνήμη και προγραμματίζει μια διαδικασία για να βρει που πρέπει να σταλεί το πακέτο (forwarding).

Η διακοπή επιστρέφει.

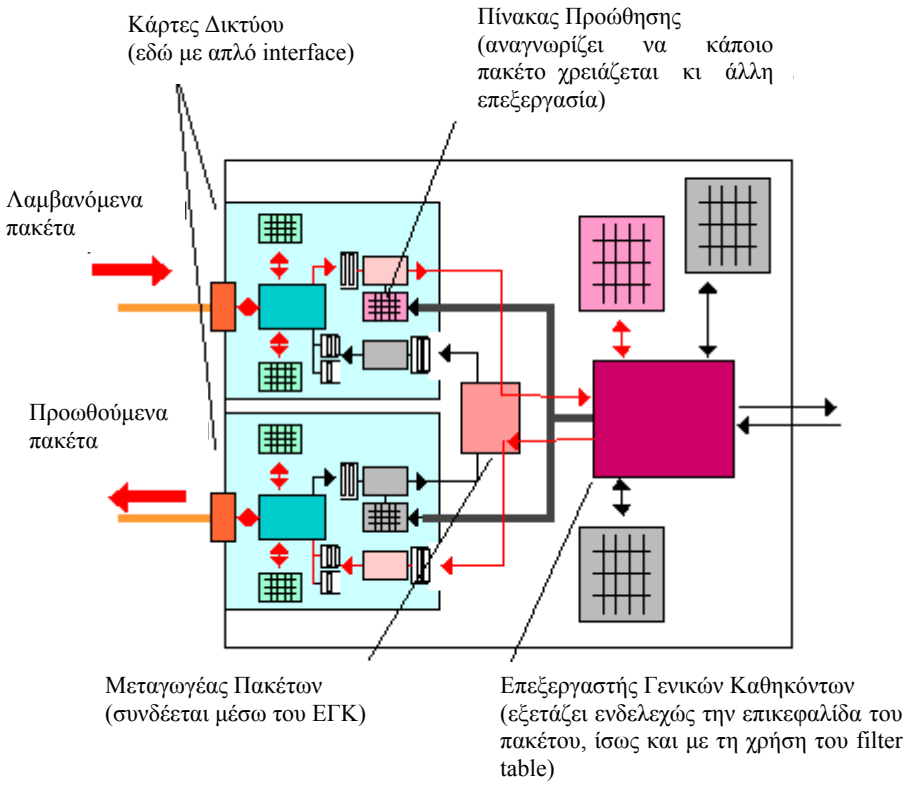
3. Γίνεται μεταγωγή από τον Επεξεργαστή Μεταγωγής.

Κάποια στιγμή αργότερα, αφού ολοκληρωθούν οι διαδικασίες των διακοπών, ο επεξεργαστής μεταγωγής ελέγχει το πακέτο.

Η CPU εξετάζει αν το πακέτο περιέχει κάποιες επιλογές (options) και αν υπάρχουν τις επεξεργάζεται.

Εξάγεται η IP διεύθυνση προορισμού.

Αν το πακέτο απευθύνεται στον ίδιο τον δρομολογητή, προωθείται προς την κατάλληλη διαδικασία (TCP, UDP, κλπ).



Σχήμα 4.4 Η επεξεργασία δρομολόγησης μέσω του επεξεργαστή.

Αν προορίζεται για κάποιον απομακρυσμένο υπολογιστή, τότε ελέγχεται ο πίνακας προώθησης ώστε να βρεθεί η IP διεύθυνση του επόμενου δρομολογητή.

Αυτό στις περισσότερες περιπτώσεις απαιτεί κάποια αναζήτηση.

Αναγνωρίζεται το αντίστοιχο Interface εξόδου.

Βρίσκεται στην arp cache, η φυσική διεύθυνση του επόμενου δρομολογητή.

Αν δεν υπάρχει αντίστοιχη εγγραφή, πρέπει να αποσταλεί μια αίτηση arp και το πακέτο περιμένει στην ουρά μέχρι να έρθει η απάντηση.

Αυτή τη στιγμή ο επεξεργαστής μεταγωγής ξέρει που να στείλει το πακέτο καθώς και την καινούργια επικεφαλίδα δευτέρου επιπέδου που πρέπει να κατασκευάσει. Πρέπει επίσης να ελέγξει το μέγεθος του πακέτου και να το συγκρίνει με το αποδεκτό μέγεθος για το δίκτυο στο οποίο θα το αποστείλει. Αν το πακέτο είναι μεγαλύτερο πρέπει να το κατακερματίσει.

Ο επεξεργαστής μεταγωγής αποθηκεύει αυτές τις τιμές στην προσωρινή μνήμη προώθησης (forwarding cache). Θα δούμε παρακάτω που χρησιμεύει αυτό.

Προστίθεται η διεύθυνση δευτέρου επιπέδου και το πακέτο συνδέεται με τη λίστα των Frames που πρόκειται να αποσταλούν από το συγκεκριμένο interface.

Ο επεξεργαστής μεταγωγής ενημερώνει τον επεξεργαστή της αντίστοιχης κάρτας ότι το πακέτο είναι σε αναμονή.

4. Επεξεργασία Εκπομπής από την Κάρτα.

Όταν η διαδικασία εκπομπής για την κάρτα έχει ολοκληρώσει την εκπομπή όλων των frames που προηγούνται, τότε αποστέλλει και αυτό που είναι σε αναμονή.

Ο επεξεργαστής της κάρτας στέλνει κάνει μια αίτηση διακοπής προς τον επεξεργαστή μεταγωγής για να τον ενημερώσει ότι το frame έχει αποσταλεί.

5. Χειρισμός διακοπής από τον Επεξεργαστή Μεταγωγής

Η θέση μνήμης που φιλοξενούσε μέχρι τώρα το πακέτο, ελευθερώνεται και ορίζεται στην περιοχή μνήμης που είναι διαθέσιμη για να υποδεχθεί νέα πακέτα.

Ο επεξεργαστής μεταγωγής ενημερώνει τον μετρητή στατιστικών που τηρείται στη βάση διαχείρισης του δρομολογητή.

Ο παραπάνω αλγόριθμος είναι αρκετά απλοποιημένος. Στην πραγματικότητα ο δρομολογητής καλείται να διαχειριστεί tunnels, ποιότητα υπηρεσιών (QOS), και διάφορες τεχνικές για να αντεπεξέλθει σε καταστάσεις υπερφόρτωσης του δικτύου.

5.4. Fast Switching

Τα πακέτα μπορεί να προωθούνται κατευθείαν από τον έναν ελεγκτή στον άλλο, με μια διαδικασία που είναι γνωστή ως Fast Switching. Αυτό συμβαίνει όταν ο πίνακας προώθησης διαπιστώσει ότι η διεύθυνση παραλήπτη είναι τέτοια που το πακέτο πρέπει να προωθηθεί προς τα έξω μέσω μιας διεπαφής που είναι στην ίδια κάρτα δικτύου με αυτή από όπου εισήλθε. Σε αυτή την περίπτωση το πακέτο μπορεί να μη χρειάζεται κάποια ιδιαίτερη IP

επεξεργασία. Αυτός ο τύπος προώθησης είναι πολύ αποδοτικός αφού επιβαρύνει ελάχιστα τον επεξεργαστή του δρομολογητή.

Σε πολλές περιπτώσεις, ο ίδιος υπολογιστής στέλνει μια σειρά πακέτων προς τον ίδιο παραλήπτη. Αν χρησιμοποιούσαμε τον προηγούμενο τρόπο προώθησης, κάθε πακέτο θα επεξεργάζονταν ξεχωριστά, όπως θα περίμενε άλλωστε κάποιος για ένα πρωτόκολλο χωρίς σύνδεση (connectionless). Η επεξεργασία όμως αυτή κοστίζει πολύ. Στην πραγματικότητα, από τη στιγμή που ο δρομολογητής έχει επεξεργαστεί το πρώτο πακέτο, ξέρει ακριβώς τι να κάνει με τα επόμενα που έχουν τον ίδιο παραλήπτη. Αυτός είναι ο λόγος που ο προηγούμενος τρόπος αποθήκευσε τα στοιχεία της απόφασης προώθησης που πήρε.

Χρησιμοποιώντας αυτή την αποθηκευμένη πληροφορία (IP διεύθυνση παραλήπτη, αριθμός θύρας, φυσική διεύθυνση, κι οτιδήποτε άλλο χρειάστηκε) μπορεί να επιταχυνθεί η διαδικασία προώθησης των πακέτων, παρακάμπτοντας πολλές αποφάσεις. Αυτό είναι γνωστό ως “Fast Path” ή Ταχεία Προώθηση Πακέτων (fast packet forwarding) και δουλεύει όπως παρακάτω:

1. Επεξεργασία λήψης από την κάρτα δικτύου

Αντίστοιχη με την προηγούμενη περίπτωση.

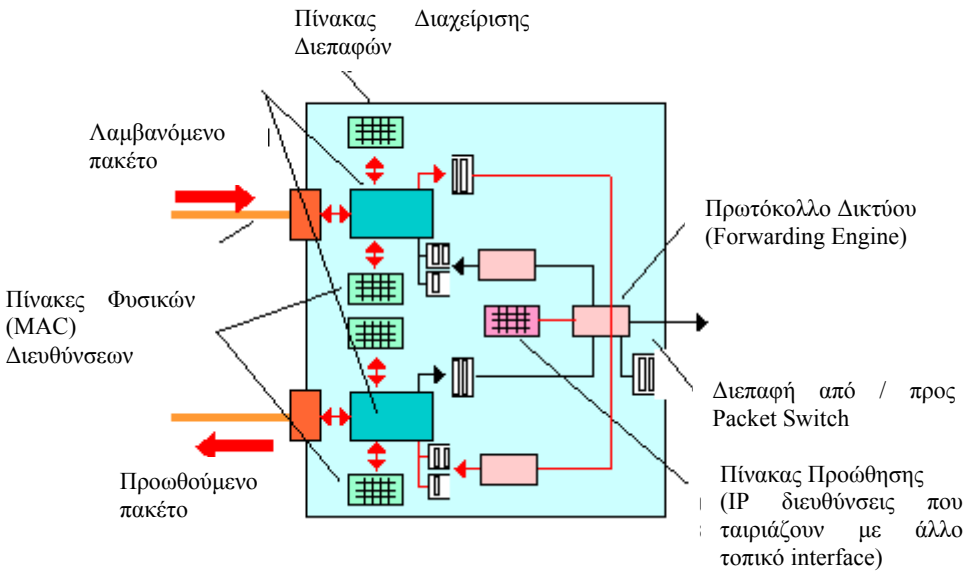
2. Χειρισμός διακοπών από τον επεξεργαστή μεταγωγής (Switching Processor)

Ο επεξεργαστής ελέγχει αν το πακέτο περιέχει κάποιες ειδικές επιλογές (options). Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται process switching.

Ο επεξεργαστής ελέγχει αν η IP διεύθυνση του παραλήπτη βρίσκεται στον πίνακα δρομολόγησης. Αν δεν είναι χρησιμοποιεί process switching.

Ελέγχει την προσωρινή μνήμη προώθησης για να δει αν υπάρχει κάποια καταχώρηση για την IP διεύθυνση προορισμού. Αν δεν υπάρχει χρησιμοποιεί process switching.

Αν απαιτείται κατακερματισμός του πακέτου ή οτιδήποτε άλλο εκτός από απλή προώθηση, χρησιμοποιεί process switching.



Σχήμα 5-4 *Fast Switching*

Ο επεξεργαστής μεταγωγής (switching processor) γνωρίζει πλέον προς τα πού να προωθήσει το πακέτο και τη μορφή της επικεφαλίδας δευτέρου επιπέδου που θα χρησιμοποιήσει. Η επικεφαλίδα προστίθεται στο πακέτο και το frame που προκύπτει συνδέεται με τη λίστα των υπολοίπων που περιμένουν για προώθηση. Αν η ουρά εξόδου είναι άδεια τότε το frame ενδέχεται να τοποθετηθεί κατευθείαν στην ουρά εξόδου της κάρτας.

Ο επεξεργαστής μεταγωγής ενημερώνει τον επεξεργαστή της κάρτας ότι το πακέτο είναι σε αναμονή.

Η διακοπή επιστρέφει.

3. Επεξεργασία εκπομπής από την κάρτα.

Ακριβώς όπως στο process switching.

4. Χειρισμός διακοπής από τον επεξεργαστή μεταγωγής.

Ακριβώς όπως στο process switching.

Αυτή η διαδικασία είναι πολύ γρηγορότερη από το process switching. Σε κάθε περίπτωση όμως, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο αν έχουν προηγηθεί πακέτα που έχουν ήδη αποσταλεί στην ίδια διεύθυνση. Έτσι, στο πρώτο πακέτο εφαρμόζεται πάντα η διαδικασία του process switching.

Στην πράξη, δεν είναι καλό να διατηρούνται κάποια χαρακτηριστικά του δικτύου σε προσωρινή μνήμη για πολύ. Αυτό γιατί η πληροφορία αυτή καθίσταται παρωχημένη πολύ σύντομα. Για παράδειγμα, αν κάποιος από τους δρομολογητές του δικτύου καταρρεύσει. Η Cisco, ένας από τους γνωστότερους κατασκευαστές δρομολογητών, συνιστά ένα μικρό ποσοστό (5%) της προσωρινής μνήμης να διαγράφεται κάθε λεπτό. Από την άλλη, κάθε φορά που είτε ο πίνακας δρομολόγησης είτε η arp cache αλλάζει, διαγράφεται ολόκληρος ο πίνακας του δρομολογητή.

Η διαδικασία του Fast switching είναι πολύ επαρκής στα σύνορα των δικτύων και σε ιδιωτικά δίκτυα. Αυτό συμβαίνει γιατί υπάρχουν σχετικά λίγες διαδρομές και λίγες διευθύνσεις προορισμού. Καθώς ο αριθμός των καταχωρήσεων, στη βάση που περιέχει τις πληροφορίες δρομολόγησης, αυξάνει γίνεται όλο και πιο σημαντική η επίδραση του καθαρισμού της. Ο ρυθμός των εκκαθαρίσεων αυξάνεται με τον αριθμό των δρομολογητών που εμπλέκονται στην επικοινωνία. Η τεχνική του fast switching δεν προσφέρει πλεονεκτήματα στο κέντρο του Internet (core).

Μερικά interfaces χρησιμοποιούν περισσότερες από μια ουρές αναμονής. Από λίγες μέχρι μερικές χιλιάδες. Συνήθως μια από όλες κρατιέται για πακέτα ελέγχου του δικτύου, όπως τα πακέτα δρομολόγησης. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ότι αυτά δεν καθυστερούν ακόμη και σε περιπτώσεις συμφόρησης. Αυτό είναι πολύ σημαντικό γιατί η αποτυχία να παραδοθούν αυτά τα πακέτα μπορεί να προκαλέσει κατάρρευση όλου του δικτύου. Αν η κάρτα χρησιμοποιεί πολλές ουρές τότε τα εξερχόμενα πακέτα τοποθετούνται σε αυτές και όχι στον δακτύλιο FIFO.

5.5. Independent Switching Processor

Μερικοί δρομολογητές διαθέτουν ένα ξεχωριστό επεξεργαστή μεταγωγής. Αυτός χρησιμοποιεί Fast Switching χρησιμοποιώντας τις καταχωρήσεις προώθησης που έχει προσωρινά αποθηκευμένες.

Μια εναλλακτική μέθοδος είναι να χρησιμοποιεί μια συμπιεσμένη μορφή της πλήρους βάσης δρομολόγησης. Στις συσκευές της Cisco αυτή είναι γνωστή ως

CEF – Cisco Express Forwarding. Συχνά είναι καλύτερο να διαχωρίζονται οι πληροφορίες που αφορούν στα δεδομένα της διεπαφής (φυσική διεύθυνση, MTU, …) από τα δεδομένα προώθησης (αν υπάρχει διαδρομή για τη διεύθυνση, ποια διεπαφή να χρησιμοποιήσω, κλπ). Με τον τρόπο αυτό, αλλαγές στα στοιχεία του επιπέδου σύνδεσης (π.χ. αλλαγή στον πίνακα arp) να μην οδηγεί σε ανακατασκευή όλης της βάσης.

Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τον επεξεργαστή να διαχειρίζεται μεγάλο αριθμό IP διευθύνσεων, ακόμη και αν υπάρχουν πολλές αλλαγές στις διαδρομές. Έτσι χρησιμοποιείται στους δρομολογητές στον πυρήνα του Διαδικτύου (core routers) και γενικά στα γρήγορα μοντέλα πολλών κατασκευαστών. Ο επεξεργαστής μεταγωγής δεν λαμβάνει μέρος στις λειτουργίες δρομολόγησης. Την πληροφορία που χρειάζεται την παίρνει από τον επεξεργαστή δρομολόγησης του δρομολογητή. Έτσι λοιπόν ο πίνακας προώθησης προετοιμάζεται από τον επεξεργαστή δρομολόγησης χωριστά για κάθε κάρτα.

Οι επεξεργαστές μεταγωγής διαφέρουν ως προς την ικανότητά τους να χειριστούν επικοινωνία multicasting, πολλαπλές ουρές, να διαχειριστούν την πρόσβαση χρηστών κ.λ.π.

5.6. Multiple Interface Switching Processors

Μερικοί δρομολογητές διαθέτουν περισσότερους από έναν επεξεργαστές μεταγωγής. Κάθε ένας συσχετίζεται με μια ομάδα καρτών και χειρίζεται όλα τα πακέτα που δέχεται αυτή η ομάδα. Πολλές φορές ο επεξεργαστής βρίσκεται σε μια κοινή πλακέτα με τις κάρτες. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να υπάρχει κι ένας κεντρικός επεξεργαστής μεταγωγής για να ελέγχει τη μεταγωγή από και προς τον επεξεργαστή δρομολόγησης. Πολλές φορές αυτοί είναι η ίδια CPU που απλά εκτελεί δύο διαφορετικές λειτουργίες. Η επικοινωνία μεταξύ των επεξεργαστών των καρτών χρειάζεται την παρέμβαση του κύριου μεταγωγέα και για αυτό το λόγω δεν είναι βελτιστοποιημένη σε σύγκριση με την επικοινωνία μεταξύ διεπαφών που συνδέονται σε ένα κοινό επεξεργαστή μεταγωγής. Έτσι οι σχεδιαστές των δικτύων μπορούν να βελτιώσουν τις επιδόσεις του συστήματος, αν συνδέσουν δίκτυα που μεταφέρουν παρόμοια

κίνηση σε διαφορετικές διεπαφές που ελέγχονται όμως από τον ίδιο επεξεργαστή. Η Cisco ονομάζει αυτή τη διαδικασία dCEF (distributed CEF).

5.6.1. The Route Processor

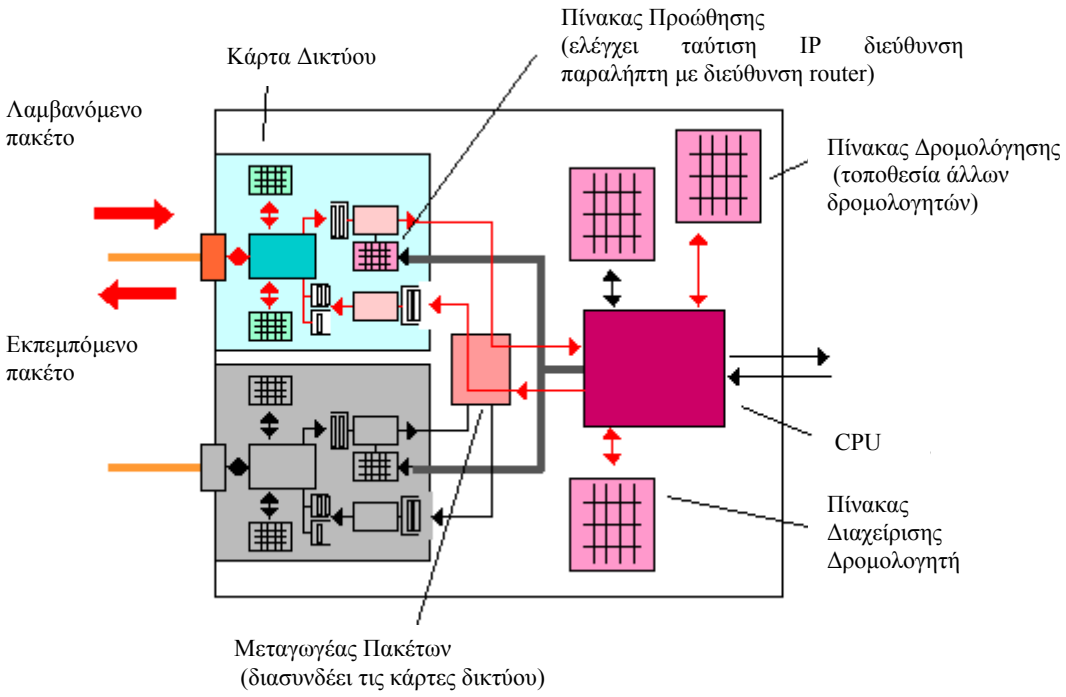
Ο επεξεργαστής δρομολόγησης είναι υπεύθυνος για τη ρύθμιση κάθε κάρτας δικτύου και του πίνακα προώθησης. Επίσης συλλέγει πληροφορίες διαχείρισης, από κάθε διεπαφή, και κατασκευάζει τον Πίνακα Διαχείρισης του Δρομολογητή (**Router Management Table**). Σε αυτόν αποθηκεύονται όλες οι ρυθμίσεις της συσκευής και όλα τα δεδομένα που αφορούν στη λειτουργία και τις επιδόσεις των καρτών. Ο επεξεργαστής είναι επίσης άμεσα συνδεδεμένος με τον μεταγωγέα πακέτων που επιτρέπει τη σύνδεση του διαχειριστή από ένα απομακρυσμένο σύστημα του δικτύου με σκοπό την επέμβαση και αλλαγή των ρυθμίσεων του συστήματος. Επειδή αυτή η διαδικασία ανοίγει ένα πιθανό παράθυρο στην ασφάλεια του συστήματος ενεργοποιείται μόνο με την παρέμβαση του διαχειριστή του συστήματος. Οι μεγάλοι δρομολογητές ενδέχεται να διαθέτουν και δεύτερο επεξεργαστή, ως υποστήριξη, σε περίπτωση αστοχίας του κύριου.

Ο επεξεργαστής δρομολόγησης επίσης επεξεργάζεται όλα τα πακέτα που απευθύνονται στον ίδιο τον δρομολογητή. Ένας δρομολογητής μπορεί τόσο να αποστέλλει όσο και να δέχεται πακέτα που απευθύνονται σε αυτόν. Αυτά μπορεί να είναι πακέτα ICMP για τον έλεγχο της λειτουργίας του ίδιου και των συνδεδεμένων δικτύων, ή πακέτα που μεταφέρουν πληροφορίες δρομολόγησης από ή προς γειτονικούς δρομολογητές.

5.6.2. Συμπεριφορά σε πακέτα που απευθύνονται στον ίδιο

Όταν ένας δρομολογητής αποκρίνεται σε πακέτα που απευθύνονται στον ίδιο, συμπεριφέρεται σαν οποιοδήποτε τελικό σύστημα (End System) κι όχι σαν ενδιάμεσο σύστημα (intermediate system) όπως είναι η πραγματική λειτουργία του. Ο κεντρικός επεξεργαστής του δρομολογητή αποκρίνεται σε κάθε ICMP μήνυμα που λαμβάνει και μπορεί να δημιουργήσει και ICMP μηνύματα

σφάλματος (όπως ότι έλαβε ένα πακέτο που δεν μπορεί να δρομολογήσει επειδή είναι άγνωστη η διεύθυνση).



Σχήμα 5-5 *Χειρισμός πακέτων που απευθύνονται στον ίδιο*

Ο επεξεργαστής πρώτα κάνει τους απαραίτητους ελέγχους στην επικεφαλίδα του πακέτου και μετά αποφασίζει αν θα το απορρίψει, θα το προωθήσει ή απλά θα το καταγράψει. Ο κεντρικός επεξεργαστής είναι επίσης υπεύθυνος για τη ρύθμιση των Πινάκων Προώθησης (Forwarding Table) που χρησιμοποιούνται κατά τη διαδικασία της μεταγωγής. Ο δρομολογητής υπολογίζει τους πίνακες προώθησης επεξεργαζόμενος δύο τοπικούς πίνακες: τον Πίνακα Δρομολόγησης (Routing Table) και τον Πίνακα Φίλτρων (Filter Table).

Ο Πίνακας Δρομολόγησης περιέχει διευθύνσεις στο διαδίκτυο με την αντίστοιχη θέση τους σε αυτό. Ένας δρομολογητής που είναι συνδεδεμένος στο Internet πρέπει να είναι σε θέση να καταλάβει ποια διεπαφή του θα χρησιμοποιήσει για να αποκτήσει πρόσβαση σε κάθε άλλο συνδεδεμένο σύστημα. Γενικά, οι δρομολογητές που βρίσκονται κοντά στο κέντρο του Διαδικτύου έχουν πολύ μεγάλους πίνακες δρομολόγησης, ενώ εκείνοι που είναι στα άκρα έχουν μικρότερους.

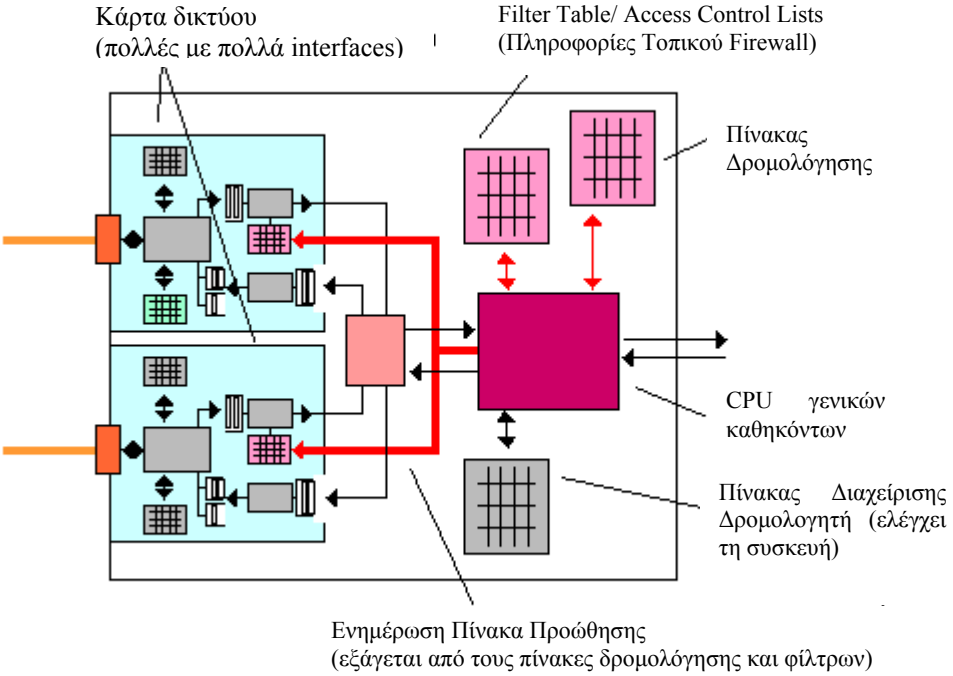
Ο Πίνακας Δρομολόγησης κατασκευάζεται με βάση την πληροφορία που δίνει ο διαχειριστής του συστήματος την ώρα που προγραμματίζει τον δρομολογητή. Υπάρχει βέβαια η δυνατότητα, ο Πίνακας Δρομολόγησης να κατασκευάζεται αυτόματα με τη χρήση κάποιου πρωτοκόλλου δρομολόγησης σαν αυτά που έχουμε ήδη συζητήσει. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης επιτρέπουν στους δρομολογητές να ανταλλάσσουν πληροφορίες σχετικά με τα περιεχόμενα των πινάκων δρομολόγησής τους. Η ανταλλαγή πληροφοριών μπορεί να γίνεται είτε περιοδικά είτε κάθε φορά που υπάρχει κάποιος λόγος (π.χ. αλλαγή σε κάποιο σημείο του δικτύου). Με τον τρόπο αυτό και με την πάροδο ενός σύντομου χρονικού διαστήματος, ο δρομολογητής αποκτά πλήρη εικόνα όλων των τρόπων με τους οποίους μπορεί να έχει πρόσβαση σε κάθε σημείο του δικτύου.

Ο Πίνακας Φίλτρων, συνήθως προγραμματίζεται χειροκίνητα και περιέχει μια λίστα διευθύνσεων και άλλων λεπτομερειών της επικεφαλίδας του πακέτου, που αν ταιριάζουν με εκείνα ενός λαμβανόμενου πακέτου θα υποχρεώσουν τη συσκευή να το ελέγξει καλύτερα και πιθανόν να το απορρίψει. Αυτό συμβαίνει για να μην προωθεί ο δρομολογητής πακέτα που δεν έχουν το δικαίωμα να κυκλοφορούν στο δίκτυο μας. Λειτουργεί λοιπόν με αυτόν τον τρόπο ως firewall. Ο πίνακας αυτός λέγεται επίσης και Λίστα Ελέγχου Πρόσβασης (Access Control List - ACL). Υπάρχουν εφαρμογές στις οποίες μπορεί να γίνει ιδιαίτερα περίπλοκος.

Καθώς ο δρομολογητής ανακαλύπτει αλλαγές στους πίνακες δρομολόγησης και φίλτρων μπορεί είτε να καταστήσει τη μνήμη άκυρη και να αναγκάσει την δημιουργία καινούργιας μνήμης προώθησης ή να φτιάξει μια καινούργια βάση με πληροφορίες προώθησης για κάθε κάρτα δικτύου.

Αυτό εξασφαλίζει την ανανέωση των καταχωρήσεων των επεξεργαστών μεταγωγής. Η λειτουργία της βάσης πληροφοριών προώθησης είναι βελτιστοποιημένη για ταχύτητα, αφού ο δρομολογητής πρέπει να τη συμβουλεύεται για κάθε εισερχόμενο πακέτο. Αντίθετα οι πίνακες δρομολόγησης είναι βελτιστοποιημένοι για εύκολη ανανέωση. Αυτό συμβαίνει γιατί καθώς ο δρομολογητής λαμβάνει πακέτα από το πρωτόκολλο

δρομολόγησης μπορεί να απαιτούνται πολλές αλλαγές στον πίνακα δρομολόγησης.



Σχήμα 5-6 *Ενημέρωση καρτών και πινάκων*

Οι κάρτες δικτύου πρέπει να ενημερώνονται για κάθε νέα πληροφορία προώθησης που αντανακλά αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου. Αυτή η πληροφορία βασίζεται σε αυτή που βρίσκεται στον πίνακα φίλτρων και σε αυτή που συλλέγεται από το δίκτυο και αποθηκεύεται στη βάση πληροφοριών δρομολόγησης.

6. Multicasting

6.1. Οι ανάγκες των σύγχρονων δικτύων

Οι παραδοσιακές εφαρμογές δεδομένων, όπως η μεταφορά αρχείων, το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο και τα συστήματα πελάτη – εξυπηρετητή, επιβαρύνουν καθημερινά τα δίκτυα με έναν συνεχώς αυξανόμενο όγκο δεδομένων. Οι κύριοι λόγοι που συμβαίνει αυτό είναι ότι όλο και περισσότεροι χρήστες και υπολογιστές εργάζονται δικτυακά και μάλιστα με αυξανόμενους χρόνους σύνδεσης με το δίκτυο. Εκτός όμως από τις παραδοσιακές εφαρμογές, νέες υπηρεσίες εμφανίζονται. Κυρίαρχο χαρακτηριστικό τους είναι η χρήση εικόνας και φωνής. Οι εφαρμογές πολυμέσων επιβαρύνουν σημαντικά τα δίκτυα από άποψη διακινούμενου όγκου δεδομένων. Έχουν όμως κι ένα επιπλέον χαρακτηριστικό που θέτει καινούργιες απαιτήσεις στις επιδόσεις των δικτύων. Πολλές από αυτές τις εφαρμογές έχουν ειδικές απαιτήσεις ως προς την ταχύτητα, την προτεραιότητα εξυπηρέτησης και τους μικρούς χρόνους καθυστέρησης που απαιτούν. Μια από τις λύσεις που έχουν προταθεί και λειτουργούν για την εξυπηρέτηση των ειδικών αυτών απαιτήσεων είναι τα δίκτυα ολοκληρωμένων υπηρεσιών, όπως το ATM. Η εξάπλωση όμως της τεχνολογίας αυτής είναι σχετικά αργή και έτσι ένα μεγάλο βάρος της εξυπηρέτησης των πολυμεσικών εφαρμογών πέφτει στους ώμους της αρχιτεκτονικής TCP/IP. Τα κύρια θέματα που πρέπει να διευθετηθούν είναι η χωρητικότητα (capacity) των δικτύων και η εκρηκτική φύση (burstiness) της μετάδοσης δεδομένων. Το δεύτερο χαρακτηριστικό της μετάδοσης δεδομένων έρχεται σε αντίθεση με τις απαιτήσεις μετάδοσης φωνής και video. Σε αυτά η ροή της μετάδοσης πρέπει να γίνεται ομαλά, με σταθερό ρυθμό, ενώ απαγορευτική είναι και η μετάδοση των πακέτων με διαφορετική σειρά. Υπό την απουσία μιας υποδομής βασισμένης αποκλειστικά σε δίκτυα ευρείας ζώνης που να υποστηρίζουν ολοκληρωμένες υπηρεσίες (B-ISDN, ATM),

προωθήθηκαν άλλες λύσεις που λειτουργούν συμπληρωματικά μεταξύ τους. Τέτοιες είναι:

Η αυξανόμενη χωρητικότητα των δικτύων. Μεγάλες προσπάθειες γίνονται σήμερα, αρκετά επιτυχημένα, για να αυξηθεί το εύρος ζώνης τόσο στα δίκτυα κορμού που αποτελούν το Internet, όσο και στα ιδιωτικά δίκτυα μεγάλων οργανισμών ή ακόμη και χωρών. Επίσης αυξάνεται συνεχώς η ικανότητα διαμεταγωγής των δρομολογητών, οι οποίοι χρησιμοποιούν έξυπνες τεχνικές δρομολόγησης και ελέγχου της ροής των δεδομένων. Δυστυχώς η αύξηση της ταχύτητας έχει δύο περιορισμούς. Ο πρώτος είναι οικονομικός. Τα δίκτυα μεγάλων ταχυτήτων απαιτούν πολλαπλάσια έξοδα λειτουργίας ή ενοικίασης των γραμμών. Από την άλλη η φύση της κίνησης στα δίκτυα ακολουθεί πολλές φορές κατανομές fractal (self-similar traffic) που κάνουν αδύνατη την εξυπηρέτηση των κορυφών επιβάρυνσης του δικτύου.

Χρειάζεται ένα πρωτόκολλο που να είναι ικανό να ρυθμίζει τη μεταφορά των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Ένα από τα πρωτόκολλα που σχεδιάστηκαν για αυτό το σκοπό είναι το Real-Time Transport Protocol[8].

Οι εφαρμογές πολυμέσων (όπως για παράδειγμα η μετάδοση του προγράμματος ενός τηλεοπτικού σταθμού στο δίκτυο) απαιτούν μοιραία ένα τρόπο μετάδοσης που να είναι multicast.

Τέλος οι χρήστες πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να κρατούν κάποια χωρητικότητα του δικτύου και να ελέγχουν τις προτεραιότητες που έχουν διάφορες εφαρμογές στη χρήση της. Ένα από τα πρωτόκολλα που ασχολούνται με αυτό το θέμα είναι το RSVP – Resource Reservation Protocol.

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με το θέμα του multicasting. Τι είναι, ποια προβλήματα συνδέονται με αυτό και ποια είναι τα πρωτόκολλα που το υποστηρίζουν.

[8] RFC 1889, RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications, January 1996.

6.2. Multicasting

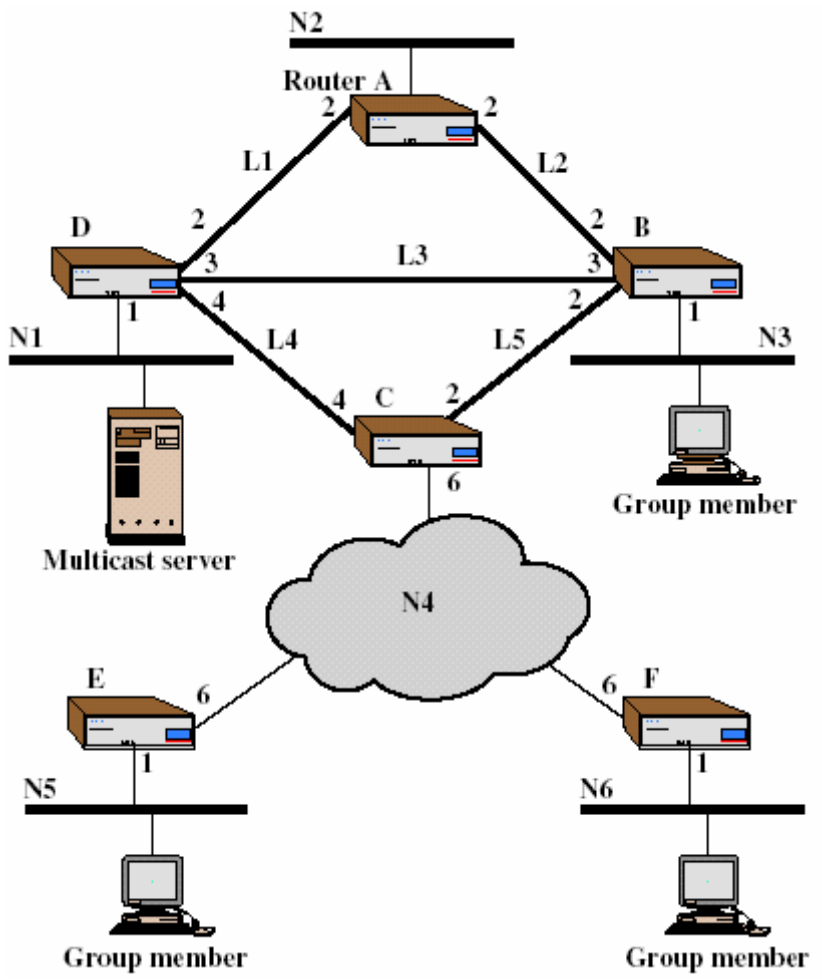
Μια τυπική διαδικασία επικοινωνίας δύο υπολογιστών στο διαδίκτυο, απαιτεί τη χρήση των IP διευθύνσεων τους. Η διεύθυνση IP χρησιμοποιείται, συνήθως, για να ορίσει έναν υπολογιστή με μοναδικό τρόπο μέσα σε ένα δίκτυο. Το είδος αυτό της επικοινωνίας, ένας προς έναν, ονομάζεται **unicasting**. Ο πιο οικείος τέτοιος τρόπος επικοινωνίας είναι η αποστολή ενός γράμματος με το ταχυδρομείο. Ένας άλλος οικείος τρόπος επικοινωνίας είναι η μετάδοση ενός μηνύματος προς όλους τους χρήστες ενός δικτύου. Η μετάδοση αυτή, η οποία συμβαίνει για παράδειγμα στα τοπικά δίκτυα τύπου Ethernet, ονομάζεται **broadcasting**. Πρέπει να είστε ιδιαίτερα εξοικειωμένοι με αυτή τη μέθοδο αφού είναι ο τρόπος μετάδοσης που χρησιμοποιούν οι τηλεοπτικοί και ραδιοφωνικοί σταθμοί. Τέλος η πράξη της αποστολής ενός μηνύματος από μια πηγή προς τα μέλη μιας ομάδας αναφέρεται σαν **multicasting**. Μπορούμε να πούμε ότι το multicasting αποτελεί μια γενίκευση των δύο προηγούμενων μεθόδων. Έτσι μια unicast επικοινωνία μπορούμε να τη θεωρήσουμε ως ένα multicast group με ένα μέλος, και μια broadcast επικοινωνία με ένα multicast group που περιέχει σα μέλη όλους τους υπολογιστές ενός δικτύου. Παρόλα αυτά, οι μηχανισμοί που βρίσκονται πίσω από κάθε είδους επικοινωνία είναι πολύ διαφορετικοί. Το multicasting βρίσκει μια σειρά εφαρμογών που περιλαμβάνουν:

- την μετάδοση πολυμέσων (η λήψη ενός ραδιοφωνικού σταθμού στο διαδίκτυο),
- την τηλεδιάσκεψη (επικοινωνία μιας κλειστής ομάδας χρηστών μέσω των υπολογιστών τους),
- τις βάσεις δεδομένων (η ταυτόχρονη ανανέωση όλων των αντιγράφων ενός αρχείου ή μιας βάσης δεδομένων),
- τα κατανεμημένα υπολογιστικά συστήματα (τα αποτελέσματα των υπολογισμών στέλνονται σε όλους τους ενδιαφερόμενους), και

- τις ομάδες εργασίας που συνεργάζονται σε πραγματικό χρόνο (αρχεία, γραφικά και μηνύματα ανταλλάσσονται μεταξύ των ενεργών μελών μιας ομάδας εργασίας σε πραγματικό χρόνο).

Η διαδικασία του multicasting είναι εύκολη όταν πρόκειται για τοπικά δίκτυα εκπομπής (όπως είναι τα δίκτυα τύπου Ethernet). Από τη στιγμή που κάθε σταθμός λαμβάνει όλα τα πακέτα, είναι εύκολο να συγκρίνει τη διεύθυνση του με αυτή που αναφέρεται στο πακέτο ως διεύθυνση παραλήπτη και να κρατήσει αυτά που απευθύνονται σε αυτόν. Κατ' επέκταση αυτής της λειτουργίας μπορεί να λαμβάνει τα μηνύματα που απευθύνονται σε μια ομάδα multicast στην οποία συμμετέχει. Σε όλα τα πρωτόκολλα της σειράς IEEE 802.x υπάρχει πρόβλεψη για διευθύνσεις multicast που βρίσκονται στο επίπεδο MAC.

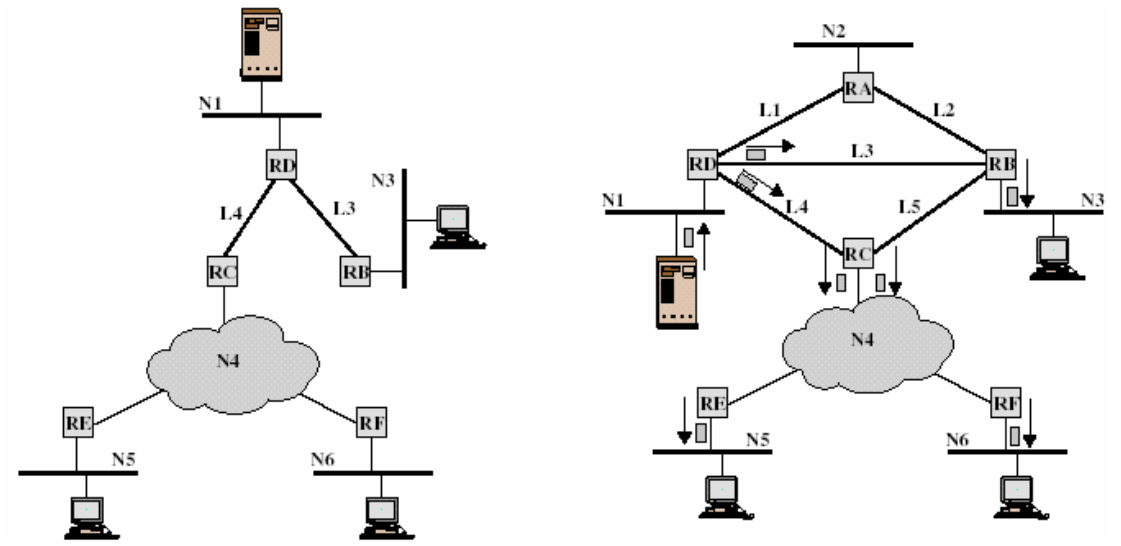
Στο περιβάλλον ενός διαδικτύου το multicasting είναι πιο δύσκολο. Το πρόβλημα ξεκινάει από το γεγονός ότι οι δρομολογητές σε ένα διαδίκτυο συνδέονται μεταξύ τους με κάποιου είδους τηλεπικοινωνιακή ζεύξη. Πολλές φορές συνδέονται μέσω κάποιου μεγάλου δικτύου ευρείας περιοχής. Σε ένα τέτοιο δίκτυο, όπως αυτό του σχήματος 4-1, ο εξυπηρετητής της υπηρεσίας multicast μπορεί να μη γνωρίζει σε ποια δίκτυα ανήκουν οι σταθμοί που ενδιαφέρονται να είναι «συνδρομητές» της υπηρεσίας. Ο απλούστερος τρόπος για να είναι σίγουρος ότι όλα τα μέλη της ομάδας multicast θα παραλάβουν ένα αντίγραφο κάθε πακέτου που εκπέμπει, είναι να εκπέμψει από ένα πακέτο για κάθε επιμέρους δίκτυο που αποτελεί το διαδίκτυό του. Αυτή η διαδικασία δεν διαφέρει σε τίποτα από ένα δίκτυο εκπομπής, **broadcast**. Κάθε τέτοιο πακέτο θα ακολουθήσει την ελάχιστη διαδρομή προς κάθε δίκτυο. Προφανώς σε διαδίκτυα μεγάλου μεγέθους η διαδικασία αυτή θα δημιουργεί μεγάλο τηλεπικοινωνιακό φόρτο.



Σχήμα 6-1 *Ένα παράδειγμα διαδικτύου*

Έστω τώρα ότι η πηγή γνωρίζει την τοποθεσία κάθε σταθμού που είναι μέλος της ομάδας. Αρκεί τώρα να στείλει ένα αντίγραφο του πακέτου προς κάθε δίκτυο που περιέχει ένα τουλάχιστον μέλος. Η τακτική αυτή είναι γνωστή ως **multiple unicast**. Ακόμη και με αυτή τη μέθοδο τα πακέτα είναι περισσότερα από όσα χρειάζονται. Για παράδειγμα, θα πρέπει να αποσταλούν δύο ίδια πακέτα πάνω από τη ζεύξη L4, ένα για το δίκτυο N5 κι ένα για το δίκτυο N6.

Τόσο η μέθοδος broadcast όσο και η μέθοδος multiple unicast δεν είναι αποδοτικές διότι δημιουργούν περιττά αντίγραφα ενός πακέτου. Σε μια πραγματική multicast επικοινωνία, συμβαίνουν τα ακόλουθα βήματα:



Σχήμα 6-2 *Ένα παράδειγμα εκπομπής multicast.*

Καθορίζεται η διαδρομή ελάχιστου μονοπατιού από την πηγή προς κάθε δίκτυο που περιέχει μέλος του multicast group. Το αποτέλεσμα είναι ένα spanning tree του δικτύου. Για την ακρίβεια δεν είναι ένα πλήρες δέντρο του, αλλά αποτελείται από εκείνα μόνο τα δίκτυα που περιέχουν μέλη της ομάδας.

Η πηγή εκπέμπει ένα μόνο πακέτο προς το spanning tree.

Το πακέτο αναπαράγεται από τους δρομολογητές, μόνο προς κλάδους του συγκεκριμένου δέντρου.

Στο σχήμα 4-2 φαίνεται ένα spanning tree του δικτύου του σχήματος 4-1, ενώ στο σχήμα 4-2β φαίνεται η μετάδοση ενός πακέτου προς τους κατάλληλους κλάδους του δικτύου.

6.3. Απαιτήσεις για multicasting

Στη συνηθισμένη μετάδοση datagrams στο διαδίκτυο, οι δρομολογητές πρέπει να αναμεταδίδουν κάθε πακέτο που τους έρχεται προς τη σωστή κατεύθυνση. Η μετάδοση αυτή γίνεται ακολουθώντας τη βέλτιστη διαδρομή προς τον παραλήπτη. Στην περίπτωση της multicast μετάδοσης κάποιος δρομολογητής ενδέχεται να παραλάβει ένα datagram και να χρειάζεται να αναμεταδώσει

περισσότερα. Τέτοια είναι η περίπτωση του δρομολογητή C στο δίκτυο του σχήματος 4-2. Αυτός παραλαμβάνει ένα πακέτο από τη ζεύξη L4 και πρέπει να μεταδώσει δύο αντίγραφά του ένα προς το δίκτυο N5 κι ένα προς το δίκτυο N6. Το παράδειγμα αυτό αναδεικνύει μια μόνο πλευρά των θεμάτων που προκύπτουν όταν ενδιαφερόμαστε να χρησιμοποιήσουμε μετάδοση multicast. Παρακάτω αναφέρονται μερικά ακόμη.

Αρχικά πρέπει να υπάρχει κάποια σύμβαση βάση της οποίας να αναγνωρίζονται οι σταθμοί που αποτελούν μέλη μιας ομάδας multicast. Στο Internet χρησιμοποιούνται, για το σκοπό αυτό, οι διευθύνσεις κλάσης D. Στο IPv4 είναι διευθύνσεις μεγέθους 32-bit που ξεκινάνε με τα ψηφία 1110. Στο IPv6 είναι διευθύνσεις μεγέθους 128-bit που ξεκινάνε με 11111111, ακολουθούμενα από ένα 4-bit flag, κι ένα 4-bit scope. Και στις δύο περιπτώσεις τα bits που περισσεύουν χρησιμοποιούνται ως διευθύνσεις αναγνώρισης των ομάδων multicast.

Κάθε κόμβος (δρομολογητής ή η πηγή) πρέπει να μπορεί να μεταφράζει την IP multicast διεύθυνση στον κατάλογο των δικτύων που αποτελούν την ομάδα. Αυτό είναι απαραίτητο για να υπολογίζει την ελάχιστη διαδρομή προς κάθε δίκτυο μέλος.

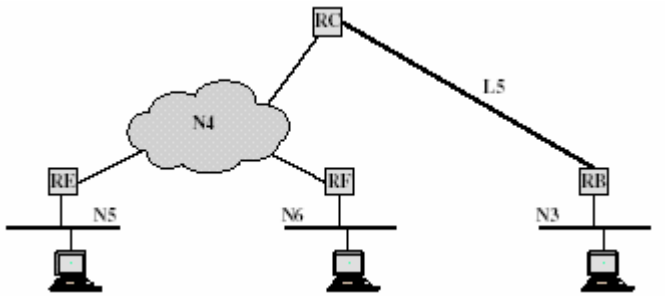
Πρέπει να υπάρχει μια διαδικασία για να γίνεται αντιστοίχηση μεταξύ της IP multicast διεύθυνσης και της multicast διεύθυνσης κάθε τοπικού δικτύου. Για παράδειγμα, στα δίκτυα τύπου Ethernet οι MAC διευθύνσεις έχουν μέγεθος 48-bit. Όταν το bit χαμηλότερης τάξης, στην οκτάδα υψηλότερης τάξης είναι 1, η διεύθυνση είναι μια MAC multicast διεύθυνση. Για παράδειγμα, η διεύθυνση $01.5E.00.00.00.00_{16}$, είναι μια MAC multicast διεύθυνση, ενώ η $00.5E.00.00.00.00_{16}$, είναι μια unicast. Επομένως οι μισές Ethernet διευθύνσεις είναι unicast και οι άλλες μισές multicast. Πρέπει λοιπόν να υπάρχει μια διαδικασία μέσω της οποίας να μεταφράζεται κάθε φορά η 32-bit IP διεύθυνση σε 48-bit MAC διεύθυνση.

Υπάρχει η περίπτωση μια ομάδα multicast να έχει μόνιμα μέλη. Το συνηθέστερο όμως είναι ένας υπολογιστής να εγγράφεται και να διαγράφεται

από μέλος μιας multicast ομάδας όποτε θέλει. Επομένως η διαδικασία πρέπει να είναι δυναμική.

Οι δρομολογητές χρειάζονται δύο ειδών πληροφορία. Πρώτον, πρέπει να είναι σε θέση να μαθαίνουν σε ποια δίκτυα υπάρχουν μέλη ενός multicast γκρουπ. Δεύτερον, πρέπει να μπορούν να κατασκευάζουν το δέντρο ελάχιστης διαδρομής για κάθε τέτοιο δίκτυο. Επομένως απαιτείται η χρήση ενός κατάλληλου πρωτοκόλλου δρομολόγησης. Ένα τέτοιο πρωτόκολλο χρειάζεται και τον κατάλληλο αλγόριθμο δρομολόγησης.

Τέλος, κάθε δρομολογητής πρέπει να μπορεί να υπολογίσει το ελάχιστο μονοπάτι με βάση την πηγή και τον προορισμό της πληροφορίας. Για να εξηγήσουμε αυτή την παρατήρηση, θεωρείστε πάλι το δίκτυο του σχήματος 4-2. Ο δρομολογητής D στέλνει προς τον C ένα πακέτο το οποίο εφόσον απευθύνεται στα μέλη του multicast group, απευθύνεται στα δίκτυα N5, N6 και N3. Όταν ο C παραλάβει το πακέτο, θα στείλει από ένα αντίγραφο στα δίκτυα N5 και N6 αλλά αν κάποιος άλλος περιορισμός δεν ισχύει θα στείλει κι ένα αντίγραφο προς το N3, δηλαδή προς τον B. Ο B όμως έχει παραλάβει ήδη ένα αντίγραφο κατευθείαν από τον D. Αυτό προφανώς δεν ήταν στα σχέδια του εξυπηρετητή στο N1 όταν έστειλε το multicast πακέτο.



Σχήμα 6-3 *Το spanning tree του δικτύου ως προς τον δρομολογητή C*

Προς αποφυγή τέτοιων προβλημάτων, όταν ένας δρομολογητής λαμβάνει ένα multicast πακέτο με πηγή από το δίκτυο N1, υπολογίζει το spanning tree με ρίζα το δίκτυο-πηγή και ανάλογα δρομολογεί τα πακέτα.

6.4. IP Multicasting

Μπορούμε να συνοψίσουμε τα χαρακτηριστικά του IP multicasting στα ακόλουθα σημεία:

Η διεύθυνση της ομάδας. Κάθε multicast group είναι μια μοναδική διεύθυνση κλάσης D. Μερικές από αυτές τις διευθύνσεις είναι μόνιμα ορισμένες είτε χρησιμοποιούνται είτε όχι. Άλλες είναι προσωρινές και είναι διαθέσιμες για ιδιωτική χρήση.

Ο αριθμός των ομάδων. Το IP παρέχει 2^{28} ταυτόχρονα multicast groups. Ο αριθμός αυτών που χρησιμοποιούνται περιορίζεται από τη χωρητικότητα των πινάκων δρομολόγησης των δρομολογητών.

Δυναμική συμμετοχή σε ομάδες. Ένας υπολογιστής μπορεί να μπει ή να βγεί από ένα Multicast group όποτε θέλει. Μπορεί επίσης να συμμετέχει σε όσες τέτοιες ομάδες θέλει.

Η χρήση του υλικού. Αν το hardware του δικτύου στο οποίο μεταδίδονται τα πακέτα το επιτρέπει, τότε το IP χρησιμοποιεί τις hardware multicast διευθύνσεις (όπως στο Ethernet). Αν το υλικό δεν μπορεί να υποστηρίζει τέτοια διαδικασία τότε χρησιμοποιείται broadcast ή unicast μετάδοση.

Η διαδικτυακή προώθηση πακέτων. Επειδή τα μέλη ενός multicast group μπορεί να είναι συνδεδεμένα σε διαφορετικά φυσικά δίκτυα, απαιτείται η χρήση εξειδικευμένων multicast δρομολογητών. Συνήθως αυτή η δυνατότητα προστίθεται σε συνηθισμένους δρομολογητές.

Παράδοση πακέτων. Η multicast διαδικασία του IP χρησιμοποιεί τις ίδιες διαδικασίες καλύτερης προσπάθειας (best-effort) που χρησιμοποιεί γενικά για την παράδοση των πακέτων στον χρήστη. Έτσι τα multicast πακέτα έχουν τις ίδιες πιθανότητες να χαθούν, να καθυστερήσουν, να αντιγραφούν ή να παραδοθούν εκτός σειράς.

Μετάδοση και συνδρομή. Ένας οποιοσδήποτε υπολογιστής μπορεί να στείλει πακέτα σε οποιοδήποτε Multicast group. Η συνδρομή σε ένα group χρησιμοποιείται μόνο για να ελεγχθεί η παράδοση πακέτων σε έναν υπολογιστή που συμμετέχει στην ομάδα.

6.5. Internet Group Management Protocol (IGMP)[9]

Το πρωτόκολλο IGMP (Internet Group Management Protocol) χρησιμοποιείται σε τοπικά δίκτυα, τόσο από τους δρομολογητές όσο και από τους σταθμούς, για την ανταλλαγή πληροφοριών συμμετοχής σε ομάδες multicast. Το πρωτόκολλο επωφελείται από τη φύση της μετάδοσης στα τοπικά δίκτυα. Χρησιμοποιεί για τα μηνύματά του IP πακέτα. Η μορφή των μηνυμάτων του IGMP είναι αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 6-3.

0	4	8	16 … 31
Version	**Type**	**Unused**	**Checksum**
Group address (Class D IPv4)			

Σχήμα 6-4 *Η μορφή του μηνύματος IGMP*

Version: Η έκδοση του πρωτοκόλλου, ίσο με 1.

Type: Υπάρχουν δύο τύποι. Ο 1 είναι ερώτημα που στέλνεται από τον multicast εξυπηρετητή. Ο τύπος 0 είναι αναφορά που στέλνεται από σταθμό.

Checksum: Είναι ένας κώδικας διάγνωσης σφαλμάτων. Υπολογίζεται ως ένα 16-bit συμπλήρωμα ως προς 1 των 4 16-bit λέξεων που αποτελούν το μήνυμα. Ο αλγόριθμος υπολογισμού είναι ο ίδιος που χρησιμοποιείται και στην επικεφαλίδα του IPv4.

Group Address: Στα μηνύματα ερώτησης είναι μηδέν. Στα μηνύματα αναφοράς είναι μια έγκυρη multicast διεύθυνση.

6.5.1. Πώς λειτουργεί όμως το IGMP;

Ο σκοπός του πρωτοκόλλου είναι να επιτρέπει κάθε σταθμό που το επιθυμεί να δηλώνεται ως μέλος ενός multicast group. Η δήλωση αυτή πρέπει να γίνεται τόσο προς τα υπόλοιπα μέλη της ομάδας, όσο και στους δρομολογητές του

[9] RFC 1112, Host Extensions for IP multicasting, August 1989.

δικτύου. Για να συνδεθεί με μια ομάδα, ένας υπολογιστής στέλνει ένα μήνυμα αναφοράς θέτοντας στο πεδίο Group_Address τη διεύθυνση της ομάδας στην οποία θέλει να εγγραφεί. Το μήνυμα αυτό αποστέλλεται μέσα σε ένα IP datagram, στο οποίο η διεύθυνση του παραλήπτη είναι πάλι η multicast διεύθυνση της ομάδας. Το μήνυμα αυτό λαμβάνεται από όλα τα μέλη της ομάδας, ώστε όλοι μαθαίνουν για την εγγραφή και την ύπαρξη του νέου μέλους. Από την άλλη, οι δρομολογητές του δικτύου πρέπει να ακούν όλες τις multicast διευθύνσεις με σκοπό να ακούν όλες τις αναφορές των σταθμών.

Κάθε δρομολογητής πρέπει κάθε στιγμή να διαθέτει μια έγκυρη κατάσταση όλων των ενεργών multicast διευθύνσεων. Για να το πετύχει αυτό, εκπέμπει περιοδικά ένα μήνυμα ερωτήματος προς όλους τους σταθμούς (all-hosts multicast address). Κάθε σταθμός που θέλει να παραμείνει μέλος μιας ή περισσοτέρων ομάδων πρέπει να διαβάσει μηνύματα που απευθύνονται στη διεύθυνση εκπομπής. Όταν κάποιος ενδιαφερόμενος λάβει ένα τέτοιο ερώτημα απαντά με ένα μήνυμα αναφοράς για κάθε ομάδα στην οποία θέλει να παραμείνει μέλος.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι οι δρομολογητές δεν χρειάζεται να γνωρίζουν την ταυτότητα κάθε σταθμού που είναι μέλος σε multicast ομάδα. Αντί για αυτό αρκείται να γνωρίζει ότι υπάρχει τουλάχιστον ένα ενεργό μέλος σε κάποια ομάδα. Για το λόγο αυτό κάθε σταθμός που λαμβάνει ένα μήνυμα ερωτήματος ενεργοποιεί ένα εσωτερικό χρονόμετρο με τυχαία καθυστέρηση. Αν πριν από τη λήξη αυτού του τυχαίου χρονικού διαστήματος, λάβει την αναφορά οποιοδήποτε άλλου, από την ίδια ομάδα, ακυρώνει τη δική του αναφορά και ξαναξεκινά το εσωτερικό του χρονόμετρο από την αρχή. Αν ο χρόνος λήξει και δεν έχει λάβει την αναφορά κανενός άλλου τότε αντιδρά ανάλογα με την επιθυμία του. Αν θέλει να συνεχίσει να δέχεται την υπηρεσία στέλνει ένα δικό του μήνυμα αναφοράς. Αν δεν το στείλει σημαίνει ότι δεν επιθυμεί συνέχιση της σύνδεσής του. Με τον τρόπο αυτό αρκεί ένα μόνο μέλος από κάθε ομάδα για να στέλνει τις αναφορές προς τον multicast δρομολογητή.

7. Digital Subscriber Line

7.1. Εισαγωγή

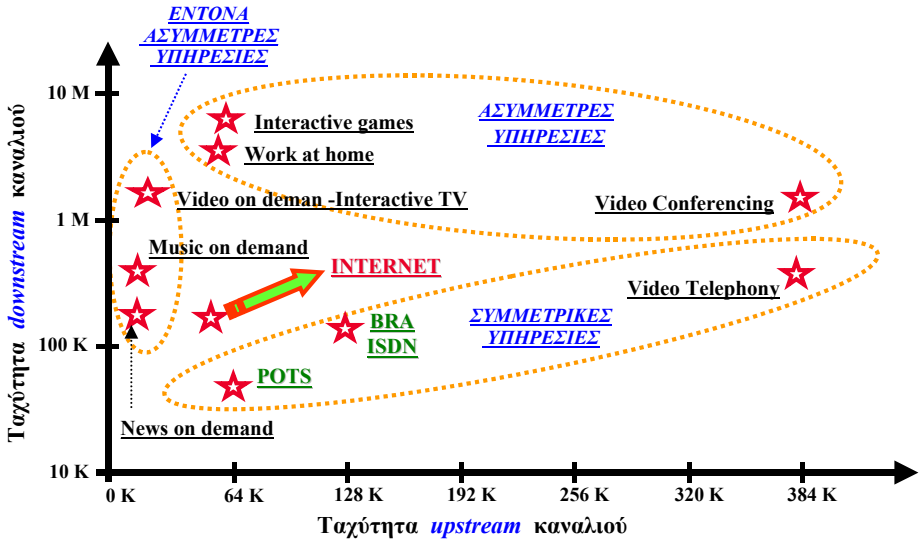
Η τεχνολογία Digital Subscriber Line (DSL) είναι μια τεχνολογία modem που χρησιμοποιεί τα υπάρχοντα τηλεφωνικά καλώδια για να παρέχει υψηλής ταχύτητας σύνδεση δεδομένων στους συνδρομητές της. Ο όρος *xDSL* καλύπτει έναν αριθμό παρόμοιων αλλά ανταγωνιστικών μορφών DSL. Μερικές από αυτές είναι οι ADSL, SDSL, HDSL, HDSL-2, G.SHDL, IDSL, και VDSL. Η τεχνολογία αυτή κατάφερε να τραβήξει την προσοχή τόσο των κατασκευαστών όσο και των παροχέων. Ο λόγος είναι ότι μπορεί να προσφέρει υψηλές ταχύτητες δεδομένων σε ικανοποιητικές αποστάσεις και με ελάχιστες τροποποιήσεις στην υπάρχουσα υποδομή των τηλεφωνικών εταιρειών.

Οι υπηρεσίες xDSL μπορεί να προσφέρονται πάνω από αφιερωμένες δημόσιες τηλεφωνικές γραμμές που συνδέουν τον χρήστη απευθείας με τις εγκαταστάσεις του παροχέα της υπηρεσίας. Μπορούν επίσης να λειτουργήσουν με αφιερωμένες γραμμές εντός των ιδιωτικών εγκαταστάσεων μιας εταιρείας. Οι περισσότερες εγκαταστάσεις DSL είναι είτε ADSL που αφορούν οικιακούς χρήστες είτε HDSL που αφορούν σε υλοποιήσεις T1 ή E1 ζεύξεων μεταξύ κοντινών παραρτημάτων εταιρειών και οργανισμών. Δεδομένου ότι η αγορά του ADSL είναι πολλά υποσχόμενη και αναπτύσσεται γοργά θα ασχοληθούμε κυρίως με το ADSL.

7.2. Τι είναι το ADSL

Το ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line – Ασύμμετρη Ψηφιακή Συνδρομητική Γραμμή) είναι μια τεχνολογία με την οποία αναβαθμίζεται το Δίκτυο Πρόσβασης κατά τον τρόπο ώστε να υποστηρίζει τη μετάδοση υψηλών ταχυτήτων, της τάξεως των μερικών Mbps.

Ο όρος Ασύμμετρη δεν αναφέρεται, όπως ίσως υπονοείται από τον τίτλο, στο μέσο διάδοσής του που είναι το γνωστό συμμετρικό ζευγάρι του δικτύου χαλκού, αλλά στις διαφορετικές ταχύτητες που χρησιμοποιούνται κατά τις 2 κατευθύνσεις της επικοινωνίας, δηλαδή από την περιοχή του Κέντρου προς το Συνδρομητή (downstream – συρρευματικά) και από το Συνδρομητή προς το Κέντρο (upstream-αντιρρευματικά). Αυτή η ασυμμετρία, σε συνδυασμό με τη συνεχή σύνδεση της υπηρεσίας, που δεν χρειάζεται κλήση για να υλοποιηθεί, κάνει το ADSL ιδανικό για σύνδεση στο Διαδίκτυο, για πρόσβαση σε τοπικά δίκτυα από απόσταση (remote LAN access) και για υπηρεσίες video-on-demand. Οι χρήστες όλων αυτών των εφαρμογών συνήθως «κατεβάζουν» πολύ περισσότερη πληροφορία από αυτή που στέλνουν. Γενικά, από την πλευρά της ταχύτητας, έχει τη δυνατότητα να εξασφαλίσει πρόσβαση υψηλών ταχυτήτων στο Internet που είναι μέχρι και 250 φορές ταχύτερη από modem 28,8 Kbps, 100 φορές ταχύτερη από modem 56 Kbps ή 50 φορές ταχύτερη από σύνδεση ISDN/128 Kbps.



Σχήμα 6.1 Ταχύτητες ορισμένων υπηρεσιών

Ένα από τα σημαντικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας είναι ότι αφήνει ανεπηρέαστη την υπάρχουσα στη γραμμή τηλεφωνική Σύνδεση POTS ή ISDN, η οποία λειτουργεί ανεξάρτητα και παράλληλα με το ADSL και οδηγείται μέσω ειδικών διατάξεων στο οικείο Τηλεφωνικό Κέντρο. Δίνει έτσι τη δυνατότητα για ταυτόχρονη μετάδοση φωνής, δεδομένων, εικόνας, κειμένου, video. Παρακάμπτει τα υφιστάμενα Κέντρα του Δημόσιου Τηλεφωνικού Δικτύου Μεταγωγής, χρησιμοποιώντας για τη μεταφορά του σήματος του το Δίκτυο Κορμού του ATM. Μπορεί, επίσης, να λειτουργήσει και κατά τρόπο συμμετρικό για μικρότερες, όμως, ταχύτητες (384 ή 500 Kbps).

7.3. Δυνατότητες του ADSL

Ένα κύκλωμα ADSL αποτελείται από ένα ADSL modem στο κάθε άκρο του συνεστραμμένου ζεύγους μιας τηλεφωνικής γραμμής. Δημιουργεί πάνω σε αυτή τη γραμμή τρία κανάλια. Ένα υψηλής ταχύτητας συρρευματικό κανάλι, ένα μέσης ταχύτητας αμφίδρομο κανάλι και ένα κανάλι για την βασική τηλεφωνική υπηρεσία. Το κανάλι που χρησιμοποιείται για τηλεφωνία, διαχωρίζεται από το ψηφιακό modem με τη χρήση κατάλληλων φίλτρων. Με τον τρόπο αυτό παρέχεται αδιάκοπτη τηλεφωνική υπηρεσία ακόμη και σε περίπτωση βλάβης του ADSL. Το κανάλι υψηλής ταχύτητας κυμαίνεται από 1,5 έως 9 Mbps και το μέσης ταχύτητας από 16 έως 640Kbps. Κάθε κανάλι επιδέχεται επιπλέον πολυπλεξία ώστε να σχηματιστούν πολλαπλά κανάλια χαμηλής ταχύτητας.

Οι ρυθμοί του ADSL είναι συμβατοί τόσο με τα Αμερικάνικα (T1-1.544 Mbps) όσο και με τα Ευρωπαϊκά (E1-2.048 Mbps) συστήματα ιεραρχίας. Μπορεί να παραγγελθεί με διάφορες ταχύτητες και δυνατότητες. Τα ADSL modems χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο ATM (Asynchronous Transfer Mode) με διαφορετικές ταχύτητες, σε συνεργασία με πρωτόκολλο IP.

Η ταχύτητα του συρρευματικού καναλιού εξαρτάται από πολλού παράγοντες όπως το μήκος του καλωδίου, η διατομή του, η παρουσία ή όχι φίλτρων στη

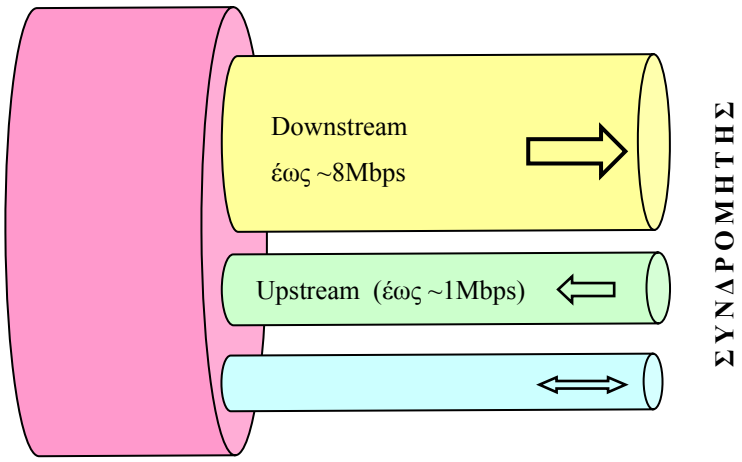
γραμμή. Η εξασθένηση στη γραμμή αυξάνεται με την απόσταση και τη συχνότητα, ενώ ελαττώνεται με την αύξηση της διαμέτρου του καλωδίου.

Σύμφωνα και με τον παρακάτω πίνακα οι τηλεπικοινωνιακές εταιρείες μπορούν να καλύψουν με τον τρόπο αυτό πάνω από το 50% των πελατών τους. Για τους πελάτες που βρίσκονται σε μακρινότερες αποστάσεις υπάρχει η δυνατότητα να εξυπηρετηθούν από ένα ψηφιακό φορέα βασισμένο σε οπτικές ίνες (fiber-based digital loop carrier - DLC). Τον Ιανουάριο του 2003, η ITU κυκλοφόρησε το κείμενο TD-RE-ADSL2-WP1, γνωστό ως Reach Extend ADSL2. Σκοπός της τεχνολογίας αυτής είναι η αύξηση της απόστασης κάλυψης στα ~7Km (20.000 πόδια). Αυτό ισοδυναμεί με αύξηση της κάλυψης κατά 20% και κατά συνέπεια με αύξηση του εν δυνάμει αγοραστικού κοινού.

Μια από τις σημαντικότερες εφαρμογές για το ADSL είναι το ψηφιακό video. Ως εφαρμογή πραγματικού χρόνου δεν μπορεί να χρησιμοποιεί τις τεχνικές διόρθωσης σφαλμάτων που απαντώνται στο επίπεδο σύνδεσης ή στο επίπεδο δικτύου στις επικοινωνίες δεδομένων. Για το λόγο αυτό τα ADSL modems χρησιμοποιούν τεχνικές forward error correction που μειώνουν δραματικά τα σφάλματα που προκαλούνται από κρουστικό θόρυβο. Η διόρθωση σφαλμάτων ανά σύμβολο μειώνει και τα σφάλματα που δημιουργεί ο συνεχής θόρυβος που επάγεται στη γραμμή.

Πίνακας 7-1: *Οι ταχύτητες και η εμβέλεια του ADSL*

Ταχύτητα (Mbps)	Wire Gauge (AWG)	Διαστάσεις καλωδίου (mm)	Απόσταση (km)
1.5 με 2	24	0.5	5.5
1.5 με 2	26	0.4	4.6
6.1	24	0.5	3.7
8	26	0.4	2.7



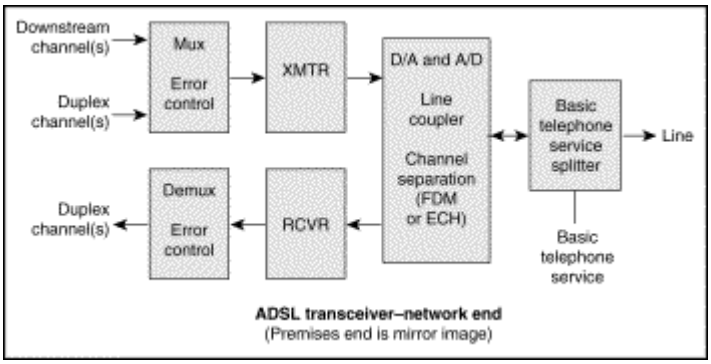
Σχήμα 7-2 *Απεικόνιση μιας ADSL σύνδεσης*

Η τεχνολογία ADSL αναμένεται να παίξει σημαντικό ρόλο τα επόμενα χρόνια καθώς όλο και περισσότερες τηλεφωνικές εταιρείες θα μπαίνουν σε νέες αγορές προσφέροντας υπηρεσίες video και πολυμέσων. Οι νέες υποδομές, που θα μπορούν να παρέχουν άμεσα ευρυζωνικές υπηρεσίες, θα κάνουν πολλά χρόνια για να φτάσουν στο μέσο οικιακό χρήστη. Φέρνοντας το Internet, ταινίες, μουσική και τα εταιρικά δίκτυα μέσα σε κάθε νοικοκυριό ή μικρή εταιρεία, το ADSL θα κάνει αυτές τις αγορές όχι μόνο υπαρκτές αλλά και κερδοφόρες τόσο για τις τηλεφωνικές εταιρείες όσο και για τους προμηθευτές των εφαρμογών.

Μία ADSL σύνδεση μπορεί να απεικονιστεί σχηματικά με τη μορφή ενός κυλίνδρου που περικλείει 3 άλλους μικρότερους, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Ο εξωτερικός, μεγάλος κύλινδρος, αντιπροσωπεύει το ζευγάρι των χάλκινων αγωγών που συνδέει το Κέντρο με το Συνδρομητή. Οι 2 πρώτοι περιεχόμενοι κύλινδροι αντιστοιχούν στις διαφορετικών ταχυτήτων συρρευματικές και αντιρρευματικές κινήσεις του ADSL, ενώ ο τρίτος στη συμμετρική διπλοκατευθυντική κίνηση των POTS ή BRA/ISDN Συνδέσεων που λειτουργούν στη χρησιμοποιούμενη γραμμή. Οι ρυθμοί που αναγράφονται είναι μικτοί, αφού μέρος των μεταβιβαζόμενων bit χρησιμοποιείται για το χρονισμό και για τη διόρθωση των σφαλμάτων με τη χρήση ενός κατάλληλου κώδικα.

7.4. Η τεχνολογία ADSL

Το ADSL βασίζεται σε σύγχρονη ψηφιακή επεξεργασία σήματος και ευφυείς αλγορίθμους που καταφέρνουν να συμπιέσουν τόση πληροφορία σε μια απλή τηλεφωνική γραμμή. Επίσης, πολλές καινοτομίες έγιναν στους μετασχηματιστές, τα αναλογικά φίλτρα και στους μετατροπείς A/D. Οι τηλεφωνικές γραμμές μπορούν να προκαλέσουν σε σήματα συχνότητας 1MHz εξασθένηση της τάξης των 90dB. Αυτό υποχρεώνει τα αναλογικά κομμάτια των δεκτών των ADSL modem να εργάζονται πολύ σκληρά για να επιτύχουν διαχωρισμό του σήματος και των καναλιών από το θόρυβο της γραμμής.

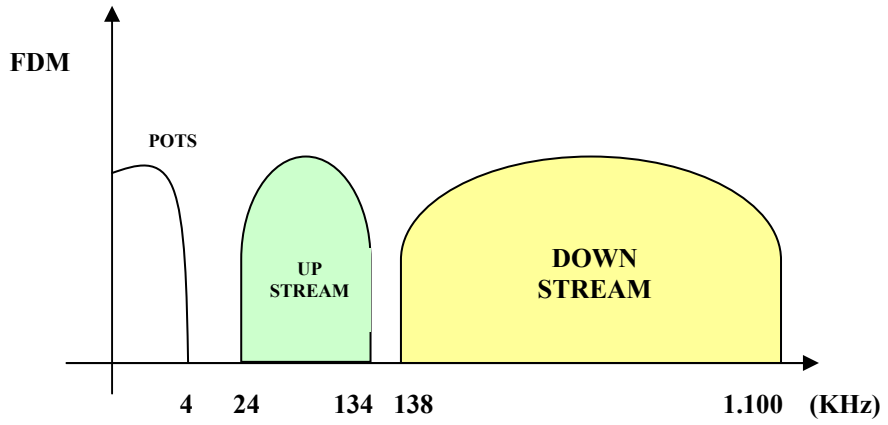


Σχήμα 7-3 Μπλοκ διάγραμμα του ADSL transceiver.

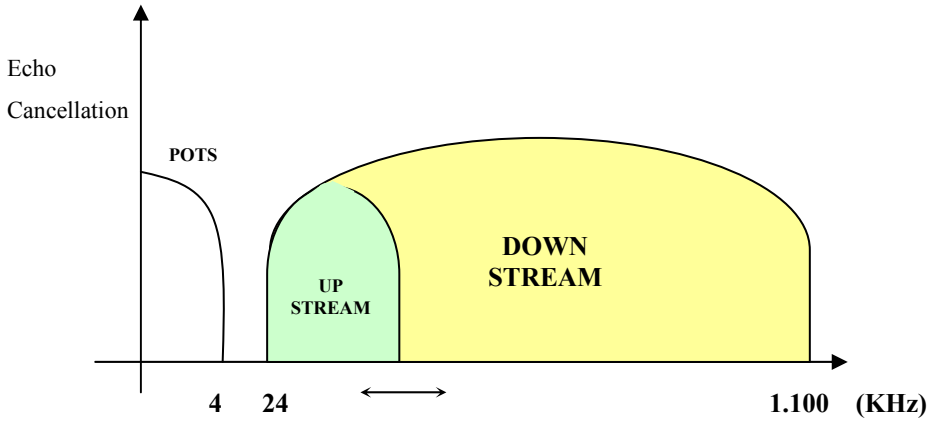
Τα ADSL modem χρησιμοποιούν δύο τρόπους για να διαιρέσουν το διαθέσιμο εύρος ζώνης μιας τηλεφωνικής γραμμής σε πολλά κανάλια. Οι τρόποι αυτοί είναι η πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας (frequency-division multiplexing - FDM) και η μέθοδος με ακύρωση της ηχούς (echo cancellation).

Συγκεκριμένα, αν χρησιμοποιείται η τεχνική Πολυπλεξίας με Διαίρεση Συχνότητας (FDM - Frequency Division Multiplexing) τα πρώτα 4 KHz του φάσματος, που αντιπροσωπεύουν λιγότερο από το 1% του συνολικού, κρατούνται για τη μετάδοση του απλού τηλεφωνικού σήματος. Το υπόλοιπο μέρος διαχωρίζεται σε 2 ανεξάρτητα τμήματα, ένα για τη μετάδοση του συρρευματικού (downstream) και ένα για τη μετάδοση του αντιρρευματικού (upstream) σήματος. Μεταξύ των 3 τμημάτων αφήνεται αχρησιμοποίητη περιοχή για το σαφή διαχωρισμό τους και τον αποκλεισμό παρεμβολών. Η

μέθοδος αυτή, αν και δεν εκμεταλλεύεται πλήρως το διαθέσιμο φάσμα, εμφανίζει πλεονεκτήματα που σχετίζονται με την αποφυγή του πολύ σοβαρού προβλήματος της παραδιαφωνίας (NEXT), καθώς και με την αποτροπή ανάπτυξης ενδοδιαφωνίας μεταξύ πομπού και δέκτη του ιδίου συνδρομητή.



Σχήμα 7-4 *Ο διαχωρισμός του φάσματος με FDM*

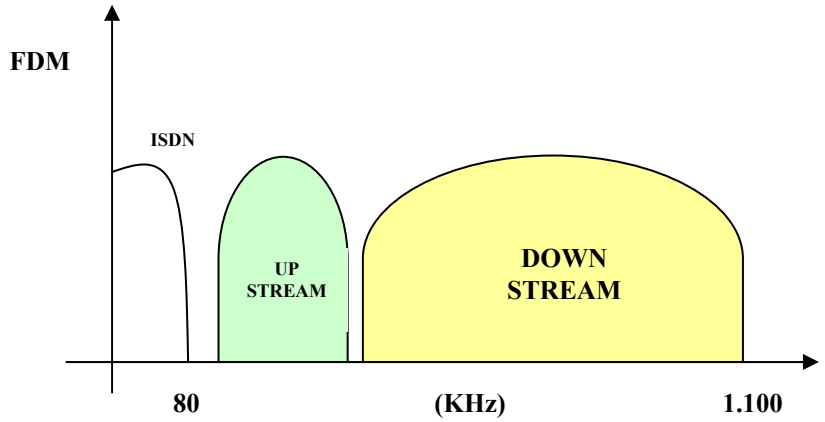


Σχήμα 7-5 *Ο διαχωρισμός του φάσματος με echo cancellation*

Η περιοχή των 4 KHz κρατιέται για το σήμα της απλής τηλεφωνίας (POTS) και κατά τη δεύτερη μέθοδο εκπομπής, αυτήν με τη χρήση Ακύρωσης Ηχούς (Echo Cancellation) που είναι γνωστή και ως ADSL option category 2. Την ίδια μέθοδο χρησιμοποιούν τόσο το BRA/ISDN όσο και το HDSL για τη μεταβίβαση του σήματος στο Δίκτυο Πρόσβασης των Συνδρομητών τους.

Όπως φαίνεται στο δεύτερο σχήμα το συρρευματικό περικλείει την περιοχή του αντιρρευματικού φάσματος. Η διαμόρφωση αυτή έχει υιοθετηθεί λόγω του ενδιαφέροντος που παρουσιάζουν οι σχετικά χαμηλές συχνότητες από τις οποίες αποτελείται η κοινή αυτή περιοχή, επειδή μπορούν να μεταφέρουν μεγάλο όγκο πληροφορίας, αφού υφίστανται μειωμένη απόσβεση κατά τη διάδοσή τους στη γραμμή. Επομένως, η επαναχρησιμοποίησή τους μπορεί να αυξήσει τη συνολική ταχύτητα του Συστήματος ADSL. Εξάλλου όλη η λογική της τεχνολογίας ADSL είναι ότι ο χρήστης ενδιαφέρεται κυρίως για την ταχύτητα με την οποία λαμβάνει και όχι για εκείνη με την οποία στέλνει. Μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι, πέρα από τον επηρεασμό του σήματος λόγω της παραδιαφωνίας και της ενδοδιαφωνίας, το σχετικά υψηλό κόστος των διατάξεων ακύρωσης ηχούς που απαιτούνται.

Στο ακόλουθο σχήμα απεικονίζεται ο διαχωρισμός του φάσματος κατά τη μετάδοση ADSL σήματος με τη μέθοδο FDM, σε υφιστάμενη BRA/ISDN Γραμμή. Είναι χαρακτηριστική η πολύ ευρύτερη περιοχή που κρατιέται για τη μετάδοση του ISDN σήματος, η οποία φτάνει τα 80 KHz.



Σχήμα 7-6 *Ο διαχωρισμός φάσματος για υπέρθεση σε ISDN*

7.5. Η αρχιτεκτονική του ADSL

Η συνδεσμολογία λειτουργίας του ADSL απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα. Οι μονάδες από τις οποίες συγκροτείται είναι οι ακόλουθες:

7.5.1. DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer)

Υλοποιεί τις βαθμίδες ATU-C και AN του Μοντέλου Αναφοράς

Εκτελεί λειτουργίες πολλαπλού modem και φέρει ένα πλήθος από πόρτες ADSL σε κάθε κάρτα του, που ανάλογα με το είδος τους, μπορούν να εξυπηρετήσουν Συνδέσεις ADSL πάνω σε POTS είτε ISDN γραμμές.

Παρέχει τη δυνατότητα υποστήριξης του πρωτοκόλλου V 5.1 στη διεπαφή του με το Τηλεφωνικό Κέντρο, ώστε να διασυνδέονται μέσω σήματος 2 Mbps οι τηλεφωνικές γραμμές στο Δημόσιο Τηλεφωνικό Δίκτυο Μεταγωγής (PSTN) και να αποφεύγεται, κατ΄ αυτόν τον τρόπο, η ανάπτυξή τους κατά ζεύγη σε οριολωρίδες και η κατασκευή επιπρόσθετων μικτονομήσεων.

Πολυπλέκει και διασυνδέει τα ADSL σήματα με το Δίκτυο Κορμού (ATM), επιτηρεί τις λειτουργίες, εκδηλώνει τους συναγερμούς και υποστηρίζει τη διαχείριση του Συστήματος.

Έχουν τη δυνατότητα να εγκατασταθούν σε μονάδες εκτός των κτιρίων του Τηλεπικοινωνιακού Παροχέα (σε ONU ή DLC).

Μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους με διεπαφές E3, ATM, nxE1 και τεχνική IMA (Inverse Multiplexing ATM).

Σύμφωνα με τις διεθνείς προδιαγραφές πρέπει να υπάρχει διαλειτουργικότητα DSLAM και modem (ATU-R) διαφορετικών κατασκευαστών.

7.5.2. SPLITTER: (Διαχωριστής)

Παθητική διάταξη, χωρίς ανάγκη τροφοδοσίας.

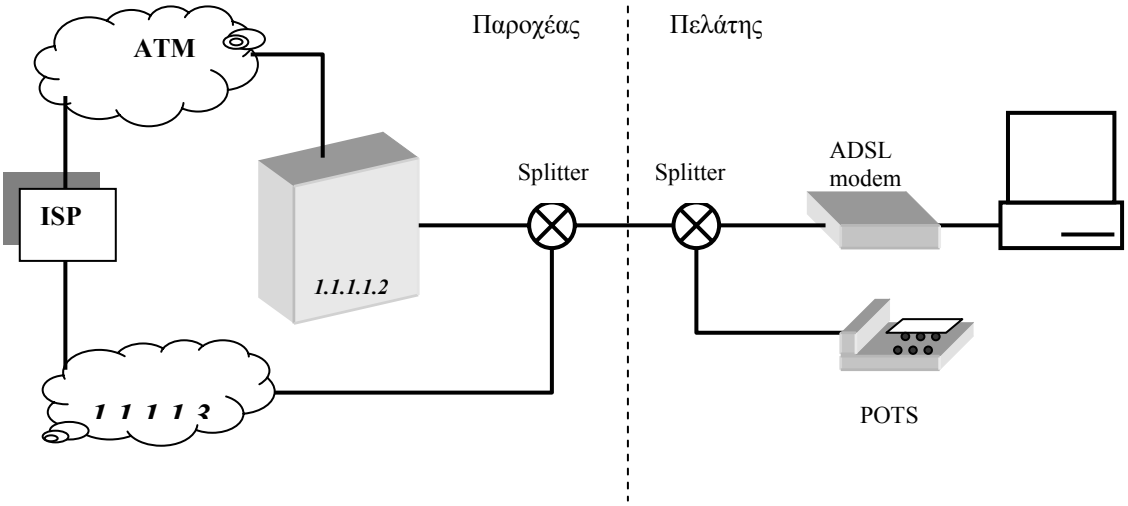
Τερματίζει σε συγκεκριμένη αντίσταση τη γραμμή.

Διαχωρίζει το φάσμα του ADSL από εκείνο του POTS ή του BRA-ISDN.

Απομονώνει την ADSL γραμμή από την εσωτερική καλωδίωση του σπιτιού.

Μπορεί να είναι ενσωματωμένος σε άλλες διατάξεις και δε χρησιμοποιείται στην περίπτωση του UDSL (Splitterless ADSL), κατά την οποία τοποθετούνται χαμηλοπερατά φίλτρα πριν τις τηλεφωνικές συσκευές, αντί για Splitter.

Επιτρέπει τη λειτουργία της τηλεφωνικής γραμμής σε περίπτωση διακοπής της τοπικής τροφοδοσίας του modem (life line).



Σχήμα 7-7 Η συνδεσμολογία του ADSL

7.5.3. DSL modem

Συνδέεται προς τη μεριά του Δικτύου με το Διαχωριστή (Splitter) μέσω δισύρματης γραμμής (RJ-11) και προς τη μεριά του Χρήστη με διεπαφή Ethernet (πχ 10 Base T) ή USB ή ATM F-25. Ο συνδυασμός και το πλήθος των προηγούμενων διεπαφών είναι χαρακτηριστικός για τις διάφορες μορφές των modem. Τα απλά modem έχουν μόνο μία διεπαφή USB που συνδέεται στην αντίστοιχη ενός PC, μέσω της οποίας και τροφοδοτείται. Η εγκατάσταση modem αυτού του είδους είναι απλή και μπορεί να γίνει εύκολα από το Συνδρομητή.

Άλλη κατηγορία modem είναι εξοπλισμένη με διεπαφές Ethernet που συνδέονται με κάρτες δικτύου των PC και με διεπαφές ATM F-25 για διασύνδεση ATM τερματικών (π.χ. PC που διαθέτουν κάρτα ATM). Υπάρχουν ADSL modem-router που εκτός των διεπαφών που αναφέραμε πιο πάνω έχουν και δυνατότητα να εκτελούν λειτουργίες δρομολόγησης. Η υπέρθεση του ADSL πάνω σε ISDN γραμμή απαιτεί τη χρήση ειδικού τύπου modem.

7.6. Σηματοδοσία και διαμόρφωση

Το ADSL χρησιμοποιεί δύο τρόπους διαμόρφωσης των σημάτων του χρησιμοποιώντας δύο κωδικοποιήσεις γραμμής. Την DMT (Discrete Multi-Tone) και την CAP (Carrierless Amplitude/phase modulation).

Και οι δύο χρησιμοποιούν διάφορες μορφές της Διαμόρφωσης Πλάτους με Ορθογωνισμό φάσης (QAM – Quadrature Amplitude Modulation). Όταν χρησιμοποιείται η διαμόρφωση QAM, που είναι ένας συνδυασμός της Διαφορικά Κωδικοποιημένης Διαμόρφωσης Φάσης (DPSK - Differential Phase Shift Keying) και της Διαμόρφωσης Πλάτους (ASK - Amplitude Shift Keying), τα εκπεμπόμενα BAUD (το καθένα από τα οποία μεταφέρει έναν αριθμό bit - quad bit) μπορούν να διαφέρουν μεταξύ τους κατά πλάτος, ή φάση, ή πλάτος και φάση. Η ποικιλία αυτών των δυνατών τιμών λαμβάνεται από ειδικά διαγράμματα (constellation diagrams) των οποίων η μορφή εξαρτάται από το πλήθος των bit που μεταφέρει το κάθε BAUD.

7.6.1. CAP (Carrierless Amplitude and Phase modulation)

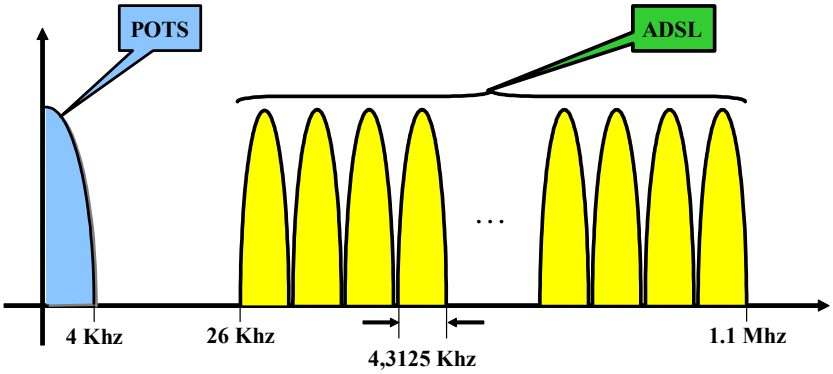
Η Διαμόρφωση Πλάτους και Φάσης άνευ Φέρουσας είναι ένα σύστημα διαμόρφωσης που αναπτύχθηκε από την AT&T. Η φάση και το πλάτος ενός ζεύγους ίσης συχνότητας σημάτων μεταβάλλονται για να δημιουργήσουν ένα πλήθος (4 έως 1024) διακριτών καταστάσεων γραμμής, που ονομάζονται “σύμβολα”. Το κάθε σύμβολο αντιπροσωπεύει έναν αριθμό bit. Κατά την εκπομπή μεταδίδονται μόνον οι πλευρικές ζώνες του σήματος, ενώ ο φορέας καταστέλλεται για να επανασυσταθεί στο δέκτη. Η CAP είναι εύκολα κατανοητή τεχνολογία λόγω και της ομοιότητάς της με την QAM. Επιπλέον είναι και σχετικά οικονομικά υλοποιήσιμη. Παρόλα αυτά πολλοί υποστηρίζουν ότι είναι δύσκολη η κλιμάκωσή της σε συστήματα υψηλών ταχυτήτων επειδή είναι τεχνική διαμόρφωσης ενός μόνο φέροντος και για αυτό ευάλωτη σε παρεμβολές στενής ζώνης (narrowband interference). Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται σε ADSL με ρυθμούς μέχρι 2Mbps. Για μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης χρησιμοποιείται η τεχνική DMT.

7.6.2. DMT (Discrete MultiTone)

Η Διαμόρφωση Διακριτών Πολλαπλών Τόνων είναι ένας τύπος διαμόρφωσης ο οποίος χρησιμοποιεί πολλαπλούς φορείς που ονομάζονται: τόνοι, υποφέρουσες, υπο-κανάλια (tones, sub-carriers, sub-channels). Ορίζεται ως πρότυπο στο κείμενο T1.413 της επιτροπής T1E1.4 του ANSI. Ολόκληρο το φάσμα (κανάλι) διαιρείται σε 256 επί μέρους φέρουσες, των οποίων το πλήθος είναι αποτέλεσμα ενός συνδυασμού αποδεκτής περιπλοκότητας του Συστήματος και βέλτιστης απόδοσης του. Κάθε υπο-κανάλι έχει εύρος 4KHz κι έτσι το συνολικό εύρος ζώνης είναι 1,024GHz. Κάθε φέρουσα διαμορφώνεται με QAM 64 όταν το αντίστοιχο κανάλι είναι καθαρό, μέχρι QPSK. Όταν κάθε υπο-ζώνη μπορεί να υποστηρίξει QAM-64, τότε η ταχύτητα μπορεί να φτάσει τα 6,1 GHz. Στο κανάλι επιστροφής υπάρχουν 32 υπο-ζώνες με δυνατότητα μέχρι 1,5Mbps.

Οι επιμέρους φέρουσες παράγονται με τη χρήση μιας μορφής μετασχηματισμού Fourier (FFT - Fast Fourier Transform) και εντός του φάσματός τους τα χαρακτηριστικά της γραμμής είναι σχεδόν γραμμικά, με αποτέλεσμα να μην υφίστανται οι μεταδιδόμενοι παλμοί υπολογίσιμη διασπορά και να μην απαιτείται, επομένως, εξισορρόπησή τους (equalization) στο δέκτη. Η ύπαρξη των πολλών αυτών φερουσών έχει το πρόσθετο πλεονέκτημα ότι ένας κρουστικός θόρυβος θα διαχυθεί στο μεγάλο πλήθος τους και έτσι θα περιοριστούν οι πιθανότητες πρόκλησης σφάλματος.

Τα προς μεταβίβαση δεδομένα συλλέγονται, μετατρέπονται και επιμερίζονται στις διάφορες υποφέρουσες για μεταφορά. Συγκεκριμένα, τα bit του κάθε καναλιού ομαδοποιούνται ανά ορισμένο πλήθος και αντιστοιχούνται σε καθορισμένους αριθμούς - σύμβολα. Τα σύμβολα αυτά επιμερίζονται στις υποφέρουσες του καναλιού και μεταδίδονται με το να τις διαμορφώνουν κατά πλάτος ή φάση ή πλάτος και φάση.



Σχήμα 7-8 *Η τεχνική μετάδοσης DMT*

Στο δέκτη ανακτώνται από τις επί μέρους φέρουσες τα αρχικά σύμβολα και από αυτά, με βάση τις καθορισμένες αντιστοιχίες, ανακτώνται οι ομάδες των bit που συνενώνονται και δημιουργούν το συρρευματικό ή το αντιρρευματικό κανάλι.

Κάθε μια από τις φέρουσες του καναλιού διαμορφώνεται, σύμφωνα με τα προηγούμενα, από τα διαδοχικά σύμβολα που της αποδίδονται, λειτουργώντας ως ένα QAM σύστημα διαμόρφωσης. Μπορεί, επομένως, θα θεωρηθεί η DMT ένα σύνολο συστημάτων QAM που λειτουργούν παράλληλα.

Ο κρουστικός θόρυβος δημιουργεί προβλήματα στη γραμμή και χειροτερεύει την τιμή του Ρυθμού Σφαλμάτων (BER – Bit Error Rate). Για την αντιμετώπιση του, επιστρατεύονται κατάλληλοι κώδικες γραμμής. Αυτός που χρησιμοποιείται στο ADSL είναι ένα είδος FEC – Forward Error Correction κατά τον οποίο ο δέκτης διορθώνει τα λάθη κάνοντας χρήση επιπρόσθετων bit πληροφορίας που εισάγει ο κώδικας στο σήμα του πομπού, χωρίς να απαιτείται διαδικασία επανεκπομπής μέρους του σήματος. Ένας ευρέως χρησιμοποιούμενος στα Συστήματα ADSL κώδικας αυτής της κατηγορίας είναι ο “Reed Solomon”(RS-FEC).

Περαιτέρω βελτίωση του BER μπορεί να γίνει με παρεμβολή (interleaving) των “λέξεων” που προκύπτουν μετά την εφαρμογή του κώδικα RS-FEC στο

προς εκπομπή σήμα. Η βελτίωση, όμως, αυτή εισάγει επί πλέον καθυστέρηση στη μεταβίβαση του σήματος. Έτσι, η τεχνική της παρεμβολής χρησιμοποιείται μόνον, όταν πρόκειται να μεταβιβαστούν σήματα εφαρμογών που δεν είναι ευαίσθητες στις χρονικές καθυστερήσεις, όπως η διακίνηση δεδομένων και η κατ' απαίτηση λήψη video, ενώ δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές ευαίσθητες στις καθυστερήσεις αυτές, όπως είναι η μεταβίβαση φωνής και η λήψη εικόνας video πραγματικού χρόνου. Με τη παρεμβολή τα κατά-ριπές λάθη του καναλιού (burst channel errors) διαχέονται στο χρόνο και αντιμετωπίζονται ως τυχαία, ενώ η διαδικασία της αποπαρεμβολής γίνεται σε ειδικές διατάξεις του αντίστοιχου δέκτη.

Η προστασία έναντι σφαλμάτων γίνεται στο ADSL ανεξάρτητα από τη λειτουργία διαδικασιών αυτοπροστασίας για σφάλματα εκπομπής που μπορεί να διαθέτουν κάποιες υπηρεσίες ή εφαρμογές.

Κατά την έναρξη της λειτουργίας των ADSL συστημάτων, ανιχνεύονται τα χαρακτηριστικά της γραμμής, βάσει αυτών διαπιστώνονται οι δυνατότητες μεταφοράς δεδομένων των επί μέρους φερουσών και αποφασίζεται το είδος της διαμόρφωσης QAM που είναι κατάλληλο για κάθε μία από αυτές.

Κατά τη φάση της κανονικής λειτουργίας, επιμερίζονται τα προς μεταβίβαση bit στις υποφέρουσες, σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προηγούμενη φάση της αρχικοποίησης. Εφ΄ όσον διαπιστωθεί μεταβολή των χαρακτηριστικών της γραμμής (ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, ανακλάσεις κ.λ.π.), τροποποιείται αυτόματα ο επιμερισμός των bit στις φέρουσες (bit swapping). Σε κάποιες περιστάσεις έντονων παρεμβολών ή θορύβων μπορεί ακόμα και να τεθούν εκτός λειτουργίας συγκεκριμένες φέρουσες που επηρεάζονται έντονα από αυτές. Για την αντιμετώπιση τέτοιων καταστάσεων γίνεται διαρκής ανταλλαγή σημάτων ελέγχου μεταξύ πομπού και δέκτη. Με την παύση του θορύβου ή των παρεμβολών γίνεται επανεκπομπή της φέρουσας και αναδιανομή των προς μεταφορά bit.

Μετρήσεις στην Bellcore, στην British Telecom και αλλού έδειξαν υπεροχή της διαμόρφωσης DMT. Έτσι αποτελεί τη βάση του προτύπου στο κείμενο T1.413 της επιτροπής T1E1.4 του ANSI (DMT/ANSI Standard T1.413). Το

ETSI (European Telecommunications Standards Institute) έχει συμβάλλει στο πρότυπο με την προσθήκη σε αυτό ενός παραρτήματος. Τόσο το ATM Forum όσο και το Digital Audio-Visual Council (DAVIC) έχουν αναγνωρίσει το ADSL ως το πρωτόκολλο μετάδοσης σε φυσικό επίπεδο για καλώδια συνεστραμμένων ζευγών.

Το DMT υπερέχει επειδή:

- Η ταχύτητα μετάδοσής του μπορεί να ρυθμιστεί κατά μικρά βήματα, των μερικών εκατοντάδων Kbps
- Έχει καλλίτερη ανοχή στην παρεμβολή ραδιοσυχνοτήτων (RFI).
- Κάνει σχεδόν βέλτιστη χρήση της χωρητικότητας της γραμμής.
- Ρυθμίζει ευέλικτο τρόπο την ισχύ της κάθε επί μέρους φέρουσας.
- Έχει καλλίτερη ανοχή στον κρουστικό θόρυβο.
- Απαιτεί ελάχιστη ισοστάθμιση (equalization).
- Το CAP υπερέχει στο ότι χρησιμοποιεί έναν λιγότερο περίπλοκο κώδικα FEC και είναι ελαφρώς γρηγορότερο κατά τη διαδικασία έναρξης λειτουργίας.
- Και οι δύο τεχνικές μετάδοσης έχουν τον ίδιο βαθμό πολυπλοκότητας, όπως αυτός εκφράζεται σε MIPS – Mega Instruction Per Second (Εκατομμύρια Εντολές Ανά Δευτερόλεπτο).

7.7. Άλλες τεχνολογίες DSL

Υπάρχουν αρκετές ακόμη τεχνολογίες DSL. Κάθε μια μπορεί να καλύπτει κάποια ειδική ανάγκη.

7.7.1. HDSL

Κατασκευάστηκε αρχικά από τη Bellcore. Το όνομά του σημαίνει High bit-rate DSL (HDSL) και η τεχνολογία αυτή με ταχύτητες T1/E1 έχει τυποποιηθεί τόσο από το ANSI όσο και από το ETSI. Το πρότυπο ANSI καλύπτει μετάδοση T1 πάνω από 2 ζεύγη χαλκού. Σε κάθε ζεύγος έχουμε ταχύτητα 784Kbps. Το Ευρωπαϊκό πρότυπο προδιαγράφει ταχύτητα E1. Αυτή επιτυγχάνεται είτε με

δύο ζεύγη, το καθένα με ταχύτητα 1.168Kbps είτε με τρία ζεύγη, το καθένα στα 784Kbps.

Το HDSL έγινε πολύ δημοφιλές γιατί είναι πολύ πιο εύκολος τρόπος για παροχή υπηρεσιών T1 ή E1 πάνω από συνεστραμμένα καλώδια χαλκού. Χρησιμοποιεί λιγότερο εύρος ζώνης και δεν απαιτεί επαναλήπτες σε αντίθεση με τα συστήματα που χρησιμοποιούν την τεχνική AMI (Alternative Mark Inversion). Χρησιμοποιεί διαμόρφωση 2B1Q και προσαρμοζόμενη ισοστάθμιση γραμμής (adaptive line equalization).

Με τη χρήση HDSL μπορεί ο παροχέας να εγκαταστήσει μια γραμμή T1 ή E1 σε λιγότερο από μια ημέρα και με κόστος μικρότερο από 1.000 €. Η εγκατάσταση με τον παλιό τρόπο κοστίζει και καθυστερεί περισσότερο διότι απαιτεί και την εγκατάσταση επαναληπτών πάνω στη γραμμή.

Τα HDSL χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε εγκαταστάσεις κινητής τηλεφωνίας. Η κίνηση από το σταθμό βάσης οδηγείται προς τα κεντρικά γραφεία μέσω HDSL στο 50% των εγκαταστάσεων. Ακόμη και στην Ελλάδα οι περισσότερες νέες εγκαταστάσεις γραμμών E1 δίνονται πλέον με HDSL. Επίσης είναι ιδανική λύση για τη ζεύξη ιδιωτικών εγκαταστάσεων δικτύων που απέχουν μεταξύ τους μέχρι 5Km.

Ως μειονεκτήματα του HDSL θα μπορούσε κανείς να αναφέρει ότι δεν προβλέπει περιοχή για απευθείας σύνδεση τηλεφωνικής γραμμής. Αν και το ίδιο προσφέρεται για τη ζεύξη μεταξύ τηλεφωνικών κέντρων ή δικτύων δεν παρέχει από μόνο του τη δυνατότητα τηλεφώνου όπως το ADSL. Επίσης όπως πρέπει να έγινε ήδη κατανοητό, οι ταχύτητες που προσφέρει είναι μικρότερες από του ADSL. Αυτό συμβαίνει διότι λόγω της ασυμμετρίας του δεύτερου τα φαινόμενα παραδιαφωνίας περιορίζονται στο ένα άκρο της γραμμής ενώ στο HDSL εμφανίζονται και στα δύο.

7.7.2. SDSL

Το Symmetric Digital Subscriber Line (SDSL) είναι μια έκδοση του HDSL με προσαρμοζόμενη ταχύτητα που όπως και το HDSL είναι συμμετρικό. Επιτρέπει δηλαδή ίδια ταχύτητα τόσο από τον παροχέα προς τον πελάτη όσο

και από το πελάτη προς τον παροχέα. Υποστηρίζει μόνο δεδομένα και δεν μπορεί να παρέχει αναλογική τηλεφωνία. Χρησιμοποιεί κωδικοποίηση γραμμής 2B1Q και η μέγιστη ταχύτητα προς κάθε κατεύθυνση μπορεί να είναι 1,54Mbps. Η ταχύτητα αυτή μπορεί επίσης να ρυθμιστεί σε διάφορες κλίμακες μέχρι το μέγιστο.

Όπως και με το HDSL, η συμμετρία του και η δυνατότητα να είναι συνεχώς σε σύνδεση χωρίς να χρειάζεται η υλοποίηση κλήσης, το κάνει ιδιαίτερα ελκυστικό σε μικρές και μεσαίου μεγέθους εταιρείες που ενδιαφέρονται να συνδέσουν τα υποκαταστήματά τους. Είναι λοιπόν ένας οικονομικός αντικαταστάτης των μισθωμένων γραμμών και των υπηρεσιών Frame Relay. Λόγω της συμμετρίας του είναι ιδανικό για εφαρμογές τηλεκπαίδευσης, μεταφοράς αρχείων, φιλοξενίας ιστοσελίδων κλπ.

7.7.3. HDSL-2

Το HDSL-2 είναι ένα αναδυόμενο πρότυπο και μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική για το HDSL. Σκοπός του είναι η παροχή ταχυτήτων T1 και E1 πάνω από ένα κι όχι δύο ζεύγη. Με τον τρόπο αυτό απευθύνεται σε ένα ευρύτερο κοινό. Βέβαια η τεχνολογία αυτή απαιτεί μικρότερες αποστάσεις, μέχρι 3,5Km, καλύτερη ποιότητα γραμμών και πιο πολύπλοκη διαμόρφωση

Όπως είπαμε τα SDSL χρησιμοποιούν κωδικοποίηση 2B1Q. Αυτή χρησιμοποιούν και οι υπηρεσίες ISDN. Έχει παρατηρηθεί ότι αν SDSL με ταχύτητες μεγαλύτερες από 768Kbps λειτουργούν στο ίδιο πολύζευγο καλώδιο με άλλες υπηρεσίες, τότε δημιουργούνται παρεμβολές. Το κύριο πλεονέκτημα του HDSL-2, που κατασκευάστηκε για να εξυπηρετήσει ως πρότυπο με το οποίο θα μπορούν να συνεργάζονται διάφοροι κατασκευαστές, είναι ότι σχεδιάστηκε για να μην παρεμβάλει άλλες υπηρεσίες. Ως μειονέκτημά του αναφέρουμε ότι δεν μπορεί να κλιμακωθεί η προσφερόμενη ταχύτητα.

7.7.4. G.SHDSL

Το G.SHDSL είναι μια έκδοση του HDSL-2 που προσφέρει συμμετρικές κλιμακούμενες ταχύτητες. Το HDSL-2 προσφέρει μόνο ταχύτητες στα

1,5Mbps. Η ITU εξέδωσε το Multirate HDSL-2 ως τμήμα του τεύχους 2 του προτύπου που είναι γνωστό ως G.SHDSL.Το G.SHDSL χτίζεται πάνω στα πλεονεκτήματα του HDSL-2 προσφέροντας συμμετρικές ταχύτητες μέχρι 2,3Mbps.

7.7.5. ISDN Digital Subscriber Line

Το ISDN digital subscriber line (IDSL) είναι μια διασταύρωση μεταξύ ISDN και xDSL. Σαν το ISDN χρησιμοποιεί ένα ζευγάρι χαλκού (μέχρι 8,5Km) για να μεταφέρει ταχύτητες μέχρι 128Kbps (512Kbps με συμπίεση). Επίσης χρησιμοποιεί κωδικοποίηση γραμμής 2B1Q για να επιτύχει διάφανη συνεργασία με το U-interface του ISDN. Τέλος, ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει την υπάρχουσα υποδομή του.

Η μεγάλη διαφορά βρίσκεται στην πλευρά των εγκαταστάσεων του φορέα. Αντίθετα με το ISDN, το IDSL δεν συνδέεται σε τηλεφωνικό κέντρο αλλά σε ένα ειδικό εξοπλισμό δεδομένων που το τερματίζει σε δρομολογητή ή κάποιο switch. Αυτό είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό για την αντιμετώπιση του προβλήματος που έχουν οι τηλεπικοινωνιακοί οργανισμοί οι τηλεφωνικές γραμμές να χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για χρήση δεδομένων.

Ο περιορισμός του IDSL είναι ότι ο χρήστης δεν έχει πλέον πρόσβαση στη σηματοδοσία ή της υπηρεσίες φωνής του ISDN. Όμως για του παροχείς υπηρεσιών Internet είναι ένας εύκολος και φτηνός τρόπος να παρέχουν υψηλής ταχύτητας πρόσβαση στο Internet, έχοντας σαν αρχικό στόχο την εγκατεστημένη βάση ISDN συνδέσεων.

7.7.6. VDSL

Το Very-High-Data-Rate Digital Subscriber Line (VDSL) λειτουργεί σε πολύ μεγάλες ταχύτητες δεδομένων, που η τιμή τους εξαρτάται από το μήκος των γραμμών. Η μέγιστη ταχύτητα λήψης υπολογίζεται στα 51-55Mbps για μήκος γραμμών στα 300m. Σε αποστάσεις μέχρι 1.500m θα επιτυγχάνονται ταχύτητες μέχρι και 13Mbps. Η ταχύτητα εκπομπής θα κυμαίνεται από 1,6 έως 2,3Mbps. Η δομή του θα είναι περίπου όπως του ADSL και θα επιτρέπει την ταυτόχρονη

λειτουργία αναλογικής ή ISDN τηλεφωνίας. Για την ώρα τα δύο κανάλια δεδομένων είναι επίσης χωρισμένα κατά συχνότητα. Καθώς οι απαιτήσεις για ταχύτητες αυξάνονται, θα εμφανιστεί η ανάγκη για χρήση τεχνικών καταστολής ηχούς.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ADSL Forum (http://www.adsl.com/)
2. Anderson D. R., Sweeney D. J., Williams T. A. *An Introduction to Management Sciences: quantitive approaches to decision making.* 8th ed., West Publishing Company, 1997.
3. Bertsekas D. and R. Gallagher. *Data Networks, Distributed Bellman-Ford*, pp. 297- 333. Prentice Hall, Inc., 1987.
4. Black Uyless. *IP Routing Protocols: RIP, OSPF, BGP, PNNI and Cisco Routing Protocols*. Prentice Hall, 2000
5. Chartland G., *Introductory Graph Theory*. New York, Dover, 1977.
6. Cisco DSL Depot. . (http://www.cisco.com/warp/public/779/servpro/promotions/dsldepot/)
7. Stallings W. *Data and Computer Communications*. Sixth Ed., Prentice Hall, 2000.
8. Stallings W. *High-Speed Networks: TCP/IP and ATM Design Principles*. Prentice Hall, 1998.
9. Taub H, Schilling D. *Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα.* μετάφραση: Γ. Τσίρης – Σ. Κουκουρλής, 2η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 1986.
10. Thomas M. *OSPF Network Design Solutions*. Cisco Press, Macmillan Technical Publishing, 1998.
11. RFC 1058, Routing Information Protocol, June 1988.
12. RFC 1112, Host Extensions for IP multicasting, August 1989.
13. RFC 1583, OSPF version 2, March 1994
14. RFC 1771, A Border Gateway Protocol (BGP-4), March 1995
15. RFC 1812, Requirements for IP Version 4 Routers, June 1995.
16. RFC 1889, RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications, January 1996.