

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ: ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΑΛΓΟΡΙΘΜΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΩΝ ΚΑΙ ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ

**ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ
ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ**

ΔΙΔΑΣΚΩΝ: Χρήστος Μπούρας, καθηγητής

ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ: Παναγιώτα Κατσικούλη, Α.Μ. 827 [katsikouli@ceid.upatras.gr]

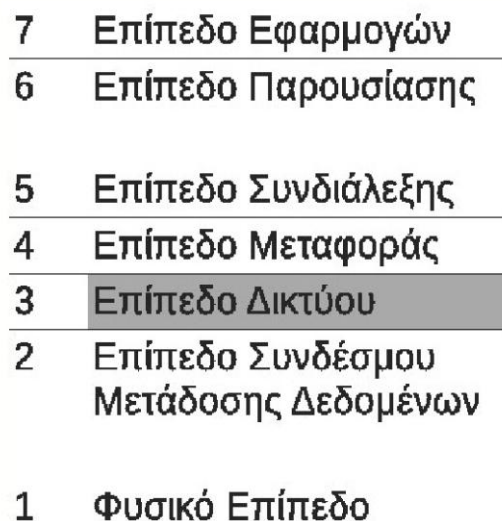
Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	3
1.1 Τί είναι η δρομολόγηση, πού και γιατί χρησιμοποιείται.....	3
1.2 Τί είναι και πώς χρησιμοποιούνται οι αλγόριθμοι δρομολόγησης.....	4
2. Δρομολογητές (Routers)	5
3. Αλγόριθμοι Δρομολόγησης.....	7
3.1 Γενικά Χαρακτηριστικά Αλγορίθμων Δρομολόγησης	7
3.2 Μετρικές.....	8
3.3 Κατηγοριοποίηση Αλγορίθμων Δρομολόγησης	9
3.3.1 Στατικοί και Δυναμικοί Αλγόριθμοι Δρομολόγησης	10
3.3.2 Γενικοί και Αποκεντριοποιημένοι Αλγόριθμοι Δρομολόγησης.....	10
3.3.3 Ιεραρχική Δρομολόγηση	11
3.4 Αλγόριθμοι κατάστασης συνδέσμων (Link state Algorithms).....	11
3.4.1 Αλγόριθμος Δρομολόγησης του Dijkstra	12
3.4.2 Παράδειγμα Αλγορίθμου Dijkstra	13
3.4.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα.....	14
3.5 Αλγόριθμοι Διανύσματος-Απόστασης (Distance Vector algorithm).....	14
3.5.2 Παράδειγμα αλγορίθμου Bellman-Ford	15
3.5.3 Μέτρηση στο άπειρο	17
3.6 Σύγκριση αλγορίθμων Link-State και Distance Vector.....	19
4.1 Interior Gateway Routing (distance-vector).....	23
4.1.1 Routing Information Protocol.....	23
4.1.2 Interior Gateway Routing Protocol.....	26
4.2 Interior Gateway Routing (link-state)	28
4.2.1 Αλγόριθμος Shortest Path First.....	28
4.2.2 Open Shortest Path First.....	29
4.2.3 Intermediate System - Intermediate System.....	31
4.3 Exterior Gateway Routing.....	32
4.3.1 Border Gateway Routing.....	32
4.4 Πρωτόκολλο PNNI.....	35
4.5 Internet Group Management Protocol.....	37
4.6 Common Gateway Protocol	39
4.6 Gateway – Gateway Protocol.....	39
5. Ειδικά Θέματα Δρομολόγησης	40
5.1 Δρομολόγηση καυτής πατάτας (Hot-potato routing)	40
5.2 Δρομολόγηση πλημμύρας (Flooding routing).....	41
5.3 Δρομολόγηση πολλαπλών μονοπατιών (Multipath routing).....	43
5.4 Δρομολόγηση ευρείας εκπομπής (Broadcasting Routing)	43
5.5 Δρομολόγηση σε κινητούς (φορητούς) υπολογιστές	44
5.6 Δρομολόγηση με βάση τη ροή δεδομένων (Flow-based routing).....	45
5.7 Δρομολόγηση κρεμμυδιού (Onion routing)	46
5.8 Ασαφής Δρομολόγηση (Fuzzy routing)	47
6. Βιβλιογραφία.....	48

1. Εισαγωγή

1.1 Τί είναι η δρομολόγηση, πού και γιατί χρησιμοποιείται

Η δρομολόγηση, γενικά, αφορά στη διαδικασία κατά την οποία αντικείμενα δρομολογούνται από κάποια πηγή προέλευσης (αποστολέα) σε κάποια πηγή προορισμού (παραλήπτη) και υλοποιείται σε δίκτυα διαφόρων ειδών (τηλεφωνικό δίκτυο, διαδίκτυο, δίκτυο επικοινωνιών, δίκτυο μεταφορών). Εκτός της διαδικασίας σε δίκτυα επικοινωνιών, αναφέρεται συχνά και στη χρονοδρομολόγηση διεργασιών για τον έλεγχο της CPU (Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας) σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή.



Σχήμα 1: Η διαστρωμάτωση σε επίπεδα ενός δικτύου επικοινωνιών - Σε σκούρο φόντο φαίνεται το επίπεδο δικτύου όπου υλοποιείται η δρομολόγηση

Η δρομολόγηση στα δίκτυα επικοινωνιών και στα δίκτυα πληροφοριών (διαδίκτυο) είναι η διαδικασία κατά την οποία πακέτα δρομολογούνται από τη μηχανή προέλευσης (αποστολέα) στη μηχανή προορισμού (παραλήπτη). Η διαδικασία αυτή υλοποιείται στο τρίτο επίπεδο (επίπεδο δικτύου) βάσει της ιεραρχικής οργάνωσης των δικτύων σε στοίβα επιπέδων (Σχήμα 1). Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διαδικασία της δρομολόγησης, γίνεται η επιλογή των μονοπατιών σε ένα δίκτυο για τη διαμοίραση της κίνησής του. Στα περισσότερα υποδίκτυα απαιτούνται περισσότερα από ένα άλματα για να φτάσει κάποιο πακέτο στον προορισμό του. Αυτά τα άλματα περιλαμβάνουν ενδιάμεσους κόμβους, τις γνωστές δικτυακές συσκευές routers, gateways, bridges, firewalls, switches. Συνήθως η δρομολόγηση υλοποιείται με τη βοήθεια πινάκων δρομολόγησης που διατηρούν αρχείο διαδρομών για κάθε προορισμό. Η βασική αρχή της δρομολόγησης με χρήση πινάκων δρομολόγησης είναι απλή. Κάθε κόμβος του δικτύου διατηρεί έναν πίνακα με εγγραφές (αποστάσεις) για κάθε άλλο κόμβο. Κάνοντας χρήση των εγγραφών αυτών, μπορεί να αποφασιστεί από ποιά εξερχόμενη πύλη (ακμή) θα πρέπει να σταλεί κάποιο μήνυμα.

Συχνά η δρομολόγηση συγγέεται με την έννοια της γεφύρωσης. Ωστόσο, οι δύο έννοιες διαφέρουν στο ότι, στη δρομολόγηση, οι δομές διευθύνσεων υπονοούν το πόσο κοντά είναι μια παρόμοια διεύθυνση μέσα στο δίκτυο κι έτσι, με τη χρήση των πινάκων δρομολόγησης, μπορεί να αποφασιστεί η διαδρομή προς ένα σύνολο διευθύνσεων. Η δρομολόγηση, ως εκ τούτου, υπερέχει της γεφύρωσης, και έχει γίνει ο βασικός τρόπος εύρεσης της συντομότερης/καλύτερης διαδρομής στο Διαδίκτυο.

Γραφικά, η αναπαράσταση ενός δικτύου και των μονοπατιών δρομολογίων μπορεί να γίνει με τη βοήθεια κατευθυνόμενων και μη γράφων όπου οι κόμβοι αναπαριστούν τους σταθμούς του δικτύου (υπολογιστές, δικτυακές συσκευές, συστήματα ελεγχόμενα από έναν πάροχο υπηρεσιών Διαδικτύου, ιστοσελίδες κ.ά) και οι ακμές τη ροή του δρομολογίου (φυσικοί σύνδεσμοι, ομότιμες σχέσεις, υπερσύνδεσμοι κ.ά).

Η διαδικασία της δρομολόγησης επιτελείται σε κάθε κόμβο-δρομολογητή του δικτύου. Ο δρομολογητής είναι η συσκευή εκείνη που παραλαμβάνει και προωθεί τα πακέτα στα διάφορα υποδίκτυα.

1.2 Τί είναι και πώς χρησιμοποιούνται οι αλγόριθμοι δρομολόγησης

Συνήθως, κατά τη μεταγωγή αντικειμένων από μια μηχανή προέλευσης σε μια μηχανή προορισμού, εμφανίζονται διάφορα προβλήματα. Τα πιο συχνά από αυτά είναι η συσσώρευση πακέτων σε κάποιον ενδιάμεσο κόμβο και η αδράνεια σε κάποιον άλλο, το κυκλοφοριακό αδιέξοδο σε κάποιες ακμές του δικτύου κ.ά. Σε αυτά τα προβλήματα προστίθεται και η ανάγκη, δοσμένης μιας τοπολογίας δικτύου με κόμβους, ακμές και ζεύγη αποστολέων-παραληπτών, να οριστεί το πιο φθηνό ή/και το πιο σύντομο δρομολόγιο μεταξύ των αποστολέων και των παραληπτών.

Για την επίλυση αυτού του είδους των προβλημάτων που εμφανίζονται κατά τη δρομολόγηση πακέτων σε ένα δίκτυο, χρησιμοποιούμε αλγορίθμους δρομολόγησης που επιστρέφουν, ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε προβλήματος, δρομολόγια που επιλύουν, κατά τον καλύτερο τρόπο, το πρόβλημα.

Οι αλγόριθμοι δρομολόγησης (routing algorithms) ανήκουν στο τμήμα του λογισμικού στο επίπεδο δικτύου. Σε κάθε κόμβο του δικτύου υπάρχει ένας δρομολογητής ο οποίος, δεχόμενος κάποιο εισερχόμενο πακέτο, αποφασίζει σε ποια εξερχόμενη ακμή του θα το προωθήσει. Υπάρχουν δύο τρόποι δρομολόγησης συναρτήσει του αν το υποδίκτυο χρησιμοποιεί στο εσωτερικό του αυτοδύναμα πακέτα ή εικονικά κυκλώματα. Στην πρώτη περίπτωση, για κάθε πακέτο που φτάνει σε κάθε δρομολογητή, δημιουργείται μια αποκλειστική απόφαση προώθησής του. Στην περίπτωση των εικονικών κυκλωμάτων καθορίζεται το δρομολόγιο βάσει του κυκλώματος και έχει ισχύ για όλη τη συνδιάλεξη. Η διαδικασία αυτή είναι αρμοδιότητα των αλγορίθμων δρομολόγησης και είναι γνωστή ως προώθηση. Η δρομολόγηση αυτή καθ' αυτή αφορά στη δημιουργία και συμπλήρωση των πινάκων δρομολόγησης από τους οποίους ενημερώνονται οι δρομολογητές κατά τη φάση της προώθησης.

2. Δρομολογητές (Routers)

Ο δρομολογητής είναι η συσκευή εκείνη που παραλαμβάνει και προωθεί τα πακέτα στα διάφορα υποδίκτυα. Μπορεί να συνδέεται με έναν ή και περισσότερους συνδέσμους που συνδέουν κόμβους-δρομολογητές του ίδιου δικτύου αλλά και κόμβους-δρομολογητές διαφορετικών δικτύων.

Στα τοπικά δίκτυα (δίκτυα μικρής εμβέλειας), για τη σύνδεση των υπολογιστών στο δίκτυο και μεταξύ τους, υπάρχουν κάποιες πολύ σημαντικές δικτυακές συσκευές (κάρτες δικτύου, hubs, switches) που λειτουργούν στο Επίπεδο 2 (επίπεδο συνδέσμου μετάδοσης δεδομένων) (Σχήμα 1). Για να μπορούν οι χρήστες αυτού του δικτύου να συνδέονται με το Διαδίκτυο ή με απομακρυσμένες συσκευές, απαιτείται η συσκευή “δρομολογητής” (router).

Οι δρομολογητές μεταφέρουν δεδομένα μεταξύ πολλαπλών δικτύων και λειτουργούν στο Επίπεδο 3 (επίπεδο δικτύου) (Σχήμα 1). Η λειτουργία των δρομολογητών στο 3ο επίπεδο σημαίνει πως, ένας δρομολογητής πρέπει να μπορεί να κατανοήσει τα πακέτα δεδομένων για να μπορεί να τα δρομολογήσει στον προορισμό τους.

Οι δρομολογητές είναι βελτιστοποιημένοι υπολογιστές με σκοπό τη διαχείριση πακέτων που πρέπει να μεταφερθούν μεταξύ δικτύων. Υποχρέωσή τους είναι η αποστολή των πακέτων από την πηγή τους (αποστολέα) στον προορισμό τους (παραλήπτη) με το γρηγορότερο δυνατό τρόπο. Μια σημαντική παρατήρηση που πρέπει να τονιστεί είναι πως, ο γρηγορότερος τρόπος δεν ταυτίζεται πάντα με το συντομότερο μονοπάτι που μπορεί να ακολουθήσει ένα πακέτο, αν και αυτή είναι γενικώς η επιθυμία μας.

Σε ένα δίκτυο, τα πακέτα με προορισμό στο ίδιο δίκτυο μεταφέρονται άμεσα από τη μηχανή προέλευσης στην πηγή προορισμού χωρίς ενδιάμεσους σταθμούς. Ωστόσο, αν η δευθύνση του προορισμού ενός πακέτου είναι εκτός του δικτύου του, η μηχανή προέλευσης στέλνει το πακέτο στο δρομολογητή που είναι γνωστός (για τη μηχανή προέλευσης) ως η default πύλη του δικτύου, και δεν ασχολείται περαιτέρω με το πακέτο. Όταν ο δρομολογητής αυτός λάβει πακέτο που προορίζεται για κάποιον παραλήπτη εκτός του δικτύου, αναζητά έναν δρομολογητή στο δίκτυο του προορισμού για να προωθήσει το πακέτο. Όταν το βρει, θα προωθήσει το πακέτο στον επόμενο σταθμό (δρομολογητή).

Θα μπορούσαμε να φανταστούμε αυτή τη διαδικασία δρομολόγησης που ακολουθούν οι δρομολογητές σαν τη διαδικασία που ακολουθούν τα ταχυδρομεία για την αποστολή των γραμμάτων μας λαμβάνοντας υπόψιν τον προορισμό της επιστολής. Ένα γράμμα με αποστολέα στην Πάτρα και παραλήπτη στο Λονδίνο θα πρέπει να διέλθει μέσα από πολλούς ενδιάμεσους σταθμούς (ταχυδρομεία), όπου το κάθε ένα προωθεί κάθε φορά το γράμμα σε κάποιο ταχυδρομείο πύλη (δρομολογητές πύλες) σε κάθε δίκτυο. Αντίθετα, ένα γράμμα με αποστολέα και παραλήπτη στην Πάτρα θα μπορούσε να δωθεί άμεσα (ο ίδιος ο αποστολέας να το δώσει στον ίδιο τον παραλήπτη), ωστόσο το κόστος θα αυξανόταν σημαντικά αλλά το γράμμα θα ακολουθούσε (λογικά) τη συντομότερη διαδρομή.

Με την ίδια λογική, οι δρομολογητές προωθούν τα πακέτα που φτάνουν σε αυτούς ανάλογα με τους διαθέσιμους δρομολογητές μεταξύ των δικτύων και προσπαθούν να αποφασίσουν (με τη βοήθεια αλγορίθμων δρομολόγησης) τη συντομότερη δυνατή διαδρομή κάθε φορά.

Πώς καταφέρνει ένας δρομολογητής να το πετύχει αυτό; Στο σημείο αυτό γίνεται χρήση των πινάκων δρομολόγησης που αναφέραμε προηγουμένως. Σε κάθε δρομολογητή υπάρχει αυτό το σύνολο δεδομένων που περιλαμβάνει (I) όλα τα πιθανά δρομολόγια που γνωρίζει ο δρομολογητής και (II)

προτεραιότητες για τις προς χρήση συνδέσεις (αφορούν σε κανόνες για τη διαχείριση κίνησης και φυσιολογικής ροής κίνησης). Οι πίνακες δρομολόγησης είναι δυναμικοί, δηλαδή, ανανεώνονται με τη βοήθεια των αλγορίθμων δρομολόγησης (Ενότητα 3) και των πρωτοκόλλων δρομολόγησης (Ενότητα 4). Οι δρομολογητές συμβουλεύονται τους πίνακες για να αποφασίσουν αν υπάρχει δρομολόγιο προς ένα συγκεκριμένο προορισμό.

Οι πίνακες δρομολόγησης μπορεί να είναι μικροί και απλοί (πίνακες μερικών γραμμών κώδικα για μικρούς δρομολογητές και μικρά δίκτυα) αλλά μπορεί να είναι και τεράστιου μεγέθους και πολυπλοκότητας (για δρομολογητές που διαχειρίζονται την κίνηση στο Διαδίκτυο). Αυτό έρχεται σε συμφωνία με τους πολλούς διαθέσιμους τύπους δρομολογητών ανάλογα με τις ανάγκες και την εφαρμογή τους. Υπάρχουν οι δρομολογητές που χρησιμοποιούνται καθημερινά σε σπίτια και επιχειρήσεις μικρής εμβέλειας, οι οποίοι ανταλλάσσουν απλώς δεδομένα μεταξύ των υπολογιστών και της καλωδίωσης ή DSL modem που παρέχει το Internet (ISP). Υπάρχουν και πιο εξελιγμένοι δρομολογητές για μεγαλύτερης κλίμακας εφαρμογές και απαιτήσεις.

Η απλή δουλειά ενός δρομολογητή, έχει ένα κόστος. Όταν ένας δρομολογητής προωθεί ένα πακέτο από έναν κόμβο του δικτύου σε έναν άλλο, προσπαθεί να το κάνει με το λιγότερο δυνατό κόστος. Το κόστος αυτό αφορά σε άλματα. Με κάθε προώθηση ενός πακέτου μεταξύ δύο δρομολογητών, ένας μετρητής αλμάτων στο πακέτο αυξάνει κατά ένα. Αν αυτός ο μετρητής φτάσει σε κάποιο προκαθορισμένο ανώτατο όριο πριν φτάσει στον προορισμό του, το πακέτο μπορεί να απορριφθεί ως μη παραδομένο. Το ανώτατο όριο ορίζεται από τα πρωτόκολλα δρομολόγησης και ποικίλει σε κάθε περίπτωση.

Ωστόσο, για τους δρομολογητές, το κόστος δεν αποτελεί μια απόλυτη παράμετρο, διότι, σε κάποιες περιπτώσεις, δεν είναι τόσο περισσότερο “ακριβό” να επιλέξει τη μεγαλύτερη διαδρομή μεταξύ αποστολέα και προορισμού (όπως στο Διαδίκτυο). Αυτό συμβαίνει για μια σειρά από λόγους, όπως:

- ▲ Τα δεδομένα κινούνται με την ταχύτητα του φωτός (ή πολύ κοντά σε αυτή την ταχύτητα), έτσι, κάποια επιπλέον απόσταση δεν κάνει διαφορά.
- ▲ Το Διαδίκτυο έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι πλεονάζων. Αν ο πρώτος δρομολογητής καταρρεύσει, επιλέγεται ο δεύτερος, ο τρίτος κ.ο.κ.

Ο σχεδιασμός του Διαδικτύου είναι σταθερός γιατί επαναδρομολογεί πακέτα συνεχώς λόγω διαφόρων γεγονότων (φυσικές καταστροφές, πτώσεις τάσεις κτλ.)

Όσον αφορά στην ασφάλεια, οι δρομολογητές αποτελούν τις συσκευές εκείνες που μπορούν να προστατεύσουν ένα δίκτυο. Τα δίκτυα με πολύ κίνηση είναι πιθανοί στόχοι εισβολέων, χάκερς, ιών κτλ. Στη σύγχρονη εποχή, οι δρομολογητές διαθέτουν μια σειρά από χαρακτηριστικά, όπως ενσωματωμένους firewalls, ανιχνευτές εισβολέων, πιστοποίηση, κρυπτογράφηση κ.ά που έχουν ως σκοπό την προστασία του δικτύου από κακόβουλα στοιχεία.

3. Αλγόριθμοι Δρομολόγησης

3.1 Γενικά Χαρακτηριστικά Αλγορίθμων Δρομολόγησης

Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί, και κάθε χρόνο προστίθενται, αρκετοί αλγόριθμοι δρομολόγησης που προσπαθούν, ο καθένας από αυτούς, να βελτιώσει κάποιο πρόβλημα. Όσο διαφορετικοί κι αν είναι οι υπάρχοντες αλγόριθμοι, είναι επιθυμητό να χαρακτηρίζονται όλοι από μια σειρά από ιδιότητες. Οι ιδιότητες αυτές επιθυμούμε να ισχύουν στους αλγορίθμους δρομολόγησης είτε αυτοί εφαρμόζονται σε υποδίκτυο με αυτόνομα πακέτα είτε σε υποδίκτυο με εικονικά κυκλώματα.

Επιγραμματικά, οι ιδιότητες αυτές είναι οι εξής :

- ορθότητα (correctness)
- απλότητα (simplicity)
- βέλτιστη απόδοση (optimal efficiency)
- ανθεκτικότητα (robustness)
- σταθερότητα (stability)
- δικαιοσύνη (fairness)

Οι ιδιότητες της ορθότητας, της απλότητας και της απόδοσης είναι προφανείς. Γενικά, κάθε αλγόριθμος που δημιουργείται απαιτείται να είναι απλός στη διατύπωσή του και σαφής ώστε να μην επιτρέπει θολά σημεία που θα μπορούσαν να μεταφραστούν με μη ντετερμινιστικό τρόπο. Επιπλέον, θέλουμε ο αλγόριθμός μας να δουλεύει, δηλαδή να φέρει ως αποτέλεσμα τη λύση για την οποία τον σχεδιάσαμε. Τέλος, θέλουμε να είναι και αποδοτικός. Στον ευρύτερο χώρο των αλγορίθμων η αποδοτικότητα ορίζεται ως εξής:

Θεώρημα 3.1: Ένας αλγόριθμος είναι αποδοτικός αν έχει πολυωνυμικό χρόνο εκτέλεσης

Αν και υπάρχουν αρκετοί ορισμοί για την αποδοτικότητα ενός αλγορίθμου, ο προτεινόμενος φέρει το χαρακτηριστικό της απολυτότητας. Βάσει αυτού, προβλήματα για τα οποία δεν υπάρχει γνωστός αλγόριθμος πολυωνυμικού χρόνου τείνουν να είναι πολύ δύσκολα στην πράξη.

Η ιδιότητα της ανθεκτικότητας αφορά στην ικανότητα του αλγορίθμου να αντιμετωπίζει ενδεχόμενες αποτυχίες στο υλικό και στο λογισμικό (κατάρρευση δρομολογητών, servers, γραμμών, αλλαγή της τοπολογίας του δικτύου) χωρίς να απαιτείται, σε κάθε αποτυχία, ο τερματισμός όλων των εργασιών στους servers και η επανεκκίνηση του δικτύου (re-boost).

Η σταθερότητα είναι η ιδιότητα εκείνη που εγγυάται πως ένας αλγόριθμος δρομολόγησης θα φτάσει σε κατάσταση ισορροπίας (και θα παραμείνει εκεί) σε ένα λογικό χρονικό πλαίσιο. Το λογικό χρονικό πλαίσιο απαιτείται διότι πολλοί αλγόριθμοι λειτουργούν για πολύ μεγάλο διάστημα χωρίς να φτάσουν ποτέ σε κατάσταση ισορροπίας.

Η δικαιοσύνη είναι η ανάγκη της ικανοποίησης όλων των αιτήσεων που φτάνουν σε κάποιο δρομολογητή ελαχιστοποιώντας τη μέση καθυστέρηση ανά πακέτο. Αυτή η ιδιότητα είναι συνήθως σε αντικρουόμενη κατάσταση σε σχέση με την ιδιότητα της βέλτιστης απόδοσης, όπου είναι επιθυμητή η μεγιστοποίηση της συνολικής διαικπεραιωτικής ικανότητας. Ως μέση λύση, στα περισσότερα δίκτυα, επιλέγεται η μείωση του πλήθους των ενδιάμεσων αλμάτων για κάθε πακέτο έτσι ώστε να μειωθεί η καθυστέρηση και η ποσότητα του εύρους ζώνης που καταναλώνεται.

Αν και δεν πρόκειται για χαρακτηριστικό, αξίζει να γίνει αναφορά σε μια γενική δήλωση που αφορά στα βέλτιστα δρομολόγια και είναι γνωστή ως η αρχή της βέλτιστης κατάστασης. Στη γενική περίπτωση, η αρχή αυτή λέει πως, ανεξαρτήτως της αρχικής κατάστασης, οι αποφάσεις που μένουν να ληφθούν πρέπει να είναι βέλτιστες λαμβάνοντας υπ' όψιν την κατάσταση που ακολούθησε από την πρώτη απόφαση που ελήφθη. Στο πρόβλημα των βέλτιστων δρομολογίων, η παραπάνω δήλωση ορίζει πως, αν ένας κόμβος-δρομολογητής, έστω A, βρίσκεται στη βέλτιστη διαδρομή από έναν κόμβο-δρομολογητή B προς έναν κόμβο-δρομολογητή C, τότε, η βέλτιστη διαδρομή από τον A στον C θα βρίσκεται πάνω στο ίδιο δρομολόγιο. Ως εκ τούτου, το σύνολο των βέλτιστων δρομολογίων από όλους τους πιθανούς κόμβους-αποστολείς προς ένα συγκεκριμένο κόμβο προορισμό, σχηματίζει έναν άκυκλο γράφο (δένδρο) με ρίζα τον κόμβο-προορισμό. Το δένδρο αυτό συναντάται με την ονομασία δένδρο απαγωγής.

3.2 Μετρικές

Εκτός των επιθυμητών ιδιοτήτων (χαρακτηριστικών) που αναζητούμε στους αλγόριθμους που σχεδιάζουμε για τη διαδικασία της δρομολόγησης πακέτων σε δίκτυα, υπάρχουν κάποιες μετρικές βάσει των οποίων ο κάθε αλγόριθμος δρομολόγησης υπολογίζει το βέλτιστο μονοπάτι για την πορεία που θα πρέπει να ακολουθήσει το εκάστοτε πακέτο ή όλα τα πακέτα σε μια συνδιάλεξη. Συγκεκριμένα, κάποια μετρική αποτελεί χαρακτηριστικό του πρωτοκόλλου δρομολόγησης και η τιμή της χρησιμοποιείται για την απόφαση του καλύτερου μονοπατιού. Οι μετρικές που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι η μέτρηση της χρήσης των συνδέσμων, το πλήθος των ενδιάμεσων αλμάτων, η ταχύτητα του μονοπατιού, το μήκος του, η απώλεια πακέτων, η καθυστέρηση, η αξιοπιστία του μονοπατιού, το εύρος του μονοπατιού, ο ρυθμός διεκπαιρευτικής ικανότητας, το μέγεθος της ουράς και το κόστος. Αυτές οι μετρικές, στον αλγόριθμο δρομολόγησης που χρησιμοποιούνται, θεωρούνται, με μια αφηρημένη έννοια, ως κόστος. Ωστόσο, αυτή η έννοια του κόστους διαφέρει από τη μετρική “κόστος“ που αφορά στο κόστος της επικοινωνίας.

Από τις παραπάνω μετρικές, οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες είναι οι εξής :

- **το μήκος του μονοπατιού** (path's length), αφορά στο συνολικό μήκος του μονοπατιού που διασχίζει ένα πακέτο από την πηγή προέλευσής του έως τη μηχανή προορισμού. Μερικοί αλγόριθμοι δρομολόγησης ταυτίζουν τη μετρική αυτή με τη μετρική που βασίζεται στο πλήθος των ενδιάμεσων αλμάτων.
- **η απώλεια πακέτων** (packet loss), πιο συχνά αναφερόμενη ως ποσοστό απώλειας πακέτων (Packet Loss Ratio). Αυτή η μετρική αποτελεί σημαντική παράμετρο καθώς, ένα υψηλό ποσοστό απώλειας μειώνει την ποιότητα της επικοινωνίας σε αναξιόπιστα δίκτυα (ειδικά σε εφαρμογές πολυμέσων και συνδιαλέξεων πραγματικού χρόνου (π.χ. VoIP) ενώ στα αξιόπιστα, αυξάνει τις αναμεταδόσεις, καθυστερεί την επικοινωνία, μειώνει το διαθέσιμο εύρος κ.ά.
- **η καθυστέρηση** (delay), αφορά στο χρόνο που απαιτείται για ένα πακέτο που στέλνεται από κάποια πηγή να φτάσει στον προορισμό του. Σε αυτό το χρόνο εμπεριέχονται και άλλοι χρόνοι, όπως, ο χρόνος που απαιτείται για την κωδικοποίηση της μετάδοσης του πακέτου, ο χρόνος μετάδοσής του, ο χρόνος που απαιτείται για τα δεδομένα να διασχίσουν το μονοπάτι, και ο χρόνος λήψης και αποκωδικοποίησης των δεδομένων. Στις πραγματικές εφαρμογές, η καθυστέρηση περιέχει και επιπρόσθετο χρονικό κόστος που αφορά στην κίνηση που συναντά το πακέτο στη διαδρομή του.

- **το μέγεθος της ουράς** (queue length), που αφορά στον αποθηκευτικό χώρο όπου εισερχόμενα πακέτα παραμένουν μέχρι να προωθηθούν σε κάποιο εξερχόμενο σύνδεσμο. Αν η ουρά είναι γεμάτη, τότε πακέτα που φτάνουν δεν μπορούν να αποθηκευτούν και χάνονται (packet loss). Αν η ουρά είναι άδεια τότε ο δρομολογητής μπορεί να ικανοποιήσει μεγαλύτερα ποσά κίνησης (throughput).

- **το εύρος του μονοπατιού** (path bandwidth), που αφορά στο μέγεθος των δεδομένων που μπορούν να διέλθουν από ένα σημείο του μονοπατιού σε ένα άλλο σε μια δεδομένη χρονική περίοδο. Με άλλα λόγια, το εύρος μετράει τα διαθέσιμα ή καταναλισκόμενα αποθέματα δεδομένων και εκφράζεται σε bits/second ή πολλαπλάσια. Στους αλγορίθμους δρομολόγησης το εύρος χρησιμοποιείται για να αποφασίσουν ποιός τύπος σύνδεσης είναι προτιμότερος (π.χ. GigabitEthernet, FastEthernet). Μια σημαντική παρατήρηση είναι πως, οι εντολές για το εύρος δεν επηρεάζουν τη χωρητικότητα του φυσικού μέσου.

- **το κόστος** (cost), όπου εδώ αναφέρεται ως το επικοινωνιακό κόστος και αφορά στο χρηματικό κόστος της χρήσης των συνδέσεων του δικτύου. Η μετρική αυτή είναι αρκετά σημαντική στις περιπτώσεις που στο δίκτυο εμπλέκονται ιδιωτικά υποδίκτυα με επαυξημένη ή επιπλέον χρέωση χρήσης των συνδέσεών τους ή σε περιπτώσεις χρονοχρέωσης.

Οι μετρικές δρομολόγησης μπορεί να υπολογίζονται αθροιστικά, κατ' ελάχιστον ή πολλαπλασιαστικά. Στις περισσότερες περιπτώσεις ισχύει ο αθροιστικός υπολογισμός, όπου, το συνολικό κόστος της διαδρομής¹ είναι το άθροισμα των κοστών κάθε ενός συνδέσμου σε όλο το μονοπάτι.

Στον κατ' ελάχιστον υπολογισμό (concave) το συνολικό κόστος του μονοπατιού είναι το ελάχιστο από τα κόστη του κάθε συνδέσμου του μονοπατιού, ενώ στον πολλαπλασιαστικό, το συνολικό κόστος είναι το γινόμενο των κοστών κάθε συνδέσμου του μονοπατιού.

3.3 Κατηγοριοποίηση Αλγορίθμων Δρομολόγησης

Οι αλγόριθμοι δρομολόγησης, για ευκολία μελέτης τους, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε διάφορες ομάδες βάσει κάποιων διακριτικών χαρακτηριστικών τους. Η βασική ομαδοποίηση χωρίζει το σύνολο των αλγορίθμων δρομολόγησης σε δύο ομάδες, τους προσαρμοστικούς και τους μη προσαρμοστικούς αλγορίθμους (adaptive και non-adaptive). Οι προσαρμοστικοί αλγόριθμοι δρομολόγησης συχνά συναντούνται και ως δυναμικοί αλγόριθμοι ενώ οι μη προσαρμοστικοί ως στατικοί (dynamic και static). Μια δεύτερη βασική κατηγοριοποίηση χωρίζει τους αλγορίθμους σε γενικούς και σε αποκεντρωποιημένους (global και decentralized). Μια ενδιαφέρουσα κατηγοριοποίηση αφορά σε αλγορίθμους κατάστασης συνδέσμων και σε αλγορίθμους διανύσματος απόστασης.

Στις επόμενες υποενότητες αναφέρουμε τα διακριτικά χαρακτηριστικά σε κάθε μία περίπτωση κατηγοριοποίησης.

¹Ως κόστος, στην προκειμένη χρήση του, εννοούμε το κόστος της μετρικής που χρησιμοποιείται από τον αλγόριθμο δρομολόγησης

3.3.1 Στατικοί και Δυναμικοί Αλγόριθμοι Δρομολόγησης

Η κατηγοριοποίηση των αλγορίθμων δρομολόγησης σε στατικούς (μη προσαρμοστικούς) και σε δυναμικούς (προσαρμοστικούς) βασίζεται στην αλλαγή του δρομολογίου για ένα δεδομένο δίκτυο. Στους στατικούς αλγορίθμους, οι αποφάσεις δρομολόγησης δε βασίζονται στην τρέχουσα τοπολογία ή στην τρέχουσα κίνηση του δικτύου. Με άλλα λόγια, δε λαμβάνουν υπόψιν κάποια από τις μετρικές που αναφέρθηκαν προηγούμενα. Αυτό που συμβαίνει είναι ο σχεδιασμός ενός δρομολογίου εξ' αρχής και η εφαρμογή του στους δρομολογητές κατά την εκκίνηση του δικτύου. Συνήθως, ένα συγκεκριμένο δρομολόγιο ορίζεται για κάποιο αρκετά μεγάλο διάστημα και για ένα συγκεκριμένο δίκτυο και για αυτό η στατική δρομολόγηση θεωρείται ως η αργή αλλαγή δρομολογίων σε κάποιο δίκτυο.

Στους δυναμικούς αλγορίθμους, η αλλαγή του δρομολογίου συμβαίνει με γρήγορους ρυθμούς, συνήθως περιοδικά, λαμβάνοντας υπόψιν το κόστος αλλαγής των συνδέσμων και τις αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου και στην κίνησή του. Στην πιο ακραία περίπτωση, το δρομολόγιο αλλάζει για κάθε πακέτο που παράγεται από την πηγή προέλευσης.

Οι αλγόριθμοι δυναμικής δρομολόγησης κατηγοριοποιούνται περαιτέρω βάσει του αν λαμβάνουν τις πληροφορίες τους μόνο από τους γειτονικούς δρομολογητές ή από όλους τους δρομολογητές του δικτύου, αν λαμβάνουν απόφαση για νέα δρομολόγια σε περιοδική βάση ή μόνο αν αλλάζει η τοπολογία ή η κίνηση του δικτύου περισσότερο από ένα ανώτερο κατώφλι που έχει θέσει ο σχεδιαστής, ή, δοθέντων των κοστών κάθε συνδέσμου του δικτύου, οι δρομολογητές μπορούν να ορίζουν διαφορετικό (βέλτιστο) δρομολόγιο για κάθε ζεύγος κόμβων αποστολέων-παραληπτών.

3.3.2 Γενικοί και Αποκεντριοποιημένοι Αλγόριθμοι Δρομολόγησης

Η δεύτερη βασική κατηγοριοποίηση που γίνεται στους αλγορίθμους δρομολόγησης χωρίζει τους αλγορίθμους σε γενικούς αλγορίθμους, που βασίζονται στην κατάσταση των συνδέσμων του δικτύου και σε αποκεντριοποιημένους, που υλοποιούν δρομολόγηση με διανύσματα απόστασης.

Στους γενικούς αλγορίθμους, όλοι οι δρομολογητές γνωρίζουν την πλήρη τοπολογία του δικτύου και μαζεύουν πληροφορίες για τα κόστη των συνδέσεων. Σε αυτή την κατηγορία ανήκει ο διάσημος αλγόριθμος δρομολόγησης του Dijkstra που αναφέρουμε και αναλύουμε παρακάτω.

Στους αποκεντριοποιημένους αλγορίθμους, οι δρομολογητές έχουν γνώση των δρομολογητών με τους οποίους βρίσκονται σε φυσική γειτνίαση² και μαζεύουν πληροφορίες για τα κόστη των συνδέσεων των γειτόνων τους. Επιπλέον, στους αποκεντριοποιημένους αλγορίθμους δρομολόγησης υλοποιούνται επαναληπτικοί υπολογισμοί και ανταλλαγή πληροφοριών με τους γείτονες. Σε αυτή την κατηγορία ανήκει ο διάσημος καταναμημένος αλγόριθμος των Bellman-Ford ο οποίος αναλύεται παρακάτω.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονίσουμε πως το επιθυμητό είναι οι αλγόριθμοι δρομολόγησης που εφαρμόζουμε στην πράξη στα δίκτυά μας να είναι δυναμικοί και αποκεντριοποιημένοι.

²Υπάρχει μεταξύ τους άμεσος σύνδεσμος

3.3.3 Ιεραρχική Δρομολόγηση

Η μέχρι στιγμής κατηγοριοποίηση των αλγορίθμων δρομολόγησης σε στατικούς ή δυναμικούς και γενικούς ή αποκεντριοποιημένους αντιμετωπίζει τα δίκτυα με εξιδανικευμένο τρόπο. Θεωρεί πως όλοι οι δρομολογητές του δικτύου είναι πανομοιότυποι και πως το δίκτυο είναι επίπεδο. Αυτό θα μπορούσε να εφαρμοστεί στην πράξη σε μικρού εύρους δίκτυα. Ωστόσο, στη σημερινή εποχή και καθώς τα δίκτυα μεγαλώνουν σε μέγεθος, το πλήθος των δρομολογητών αυξάνει εκθετικά. Η εκθετική αύξηση των δρομολογητών επιφέρει μια σημαντική επίπτωση. Δεδομένου ότι οι αλγόριθμοι δρομολογητών διατηρούν πίνακες με εγγραφές για τα μονοπάτια μεταξύ κάθε ζεύγους δρομολογητών του δικτύου, είναι αντιληπτό το μέγεθος του πίνακα στα σημερινά δίκτυα. Εκτός, όμως, της απαίτησης για τεράστια μνήμη, για τον ίδιο λόγο απαιτείται πολλαπλάσιος χρόνος επεξεργασίας για τη σάρωση του πίνακα, περισσότερο εύρος και τελικά, επέρχεται τέλμα στο δίκτυο.

Για τους παραπάνω λόγους απαιτείται η διάρθρωση του δικτύου ιεραρχικά. Από την άποψη πως και το Διαδίκτυο αποτελεί ένα δίκτυο υποδικτύων, οι δρομολογητές του ιεραρχικού δικτύου διαιρούνται σε περιφέρειες. Οι περιφέρειες είναι αυτόνομα συστήματα όπου, κάθε δρομολογητής που υπάρχει σε μια περιφέρεια γνωρίζει μόνο λεπτομέρειες για δρομολόγηση μέσα στην περιφέρειά του. Έτσι, διαφορετικές περιφέρειες του ίδιου δικτύου χρησιμοποιούν διαφορετικούς αλγορίθμους δρομολόγησης. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της ιεραρχικής δρομολόγησης είναι το κέρδος σε χώρο. Το πιο σημαντικό μειονέκτημα είναι πως, τελικά, υπάρχει κόστος και σε αυτή την περίπτωση αλλά με τη μορφή διαδρομών επαυξημένου μήκους.

3.4 Αλγόριθμοι κατάστασης συνδέσμων (Link state Algorithms)

Οι αλγόριθμοι κατάστασης συνδέσμων βασίζονται όλοι σε 5 βασικά σημεία. Λόγω της ευκολίας τους αλλά και των πλεονεκτημάτων τους έχουν προταθεί αρκετές παραλλαγές τους. Σε κάθε περίπτωση, για κάθε δρομολογητή ορίζονται οι εξής υποχρεώσεις :

- ο εντοπισμός των γειτονικών κόμβων-δρομολογητών με αποστολή ενός ειδικού πακέτου χαιρετισμού σε κάθε γραμμή από άκρη-σε-άκρη
- η μέτρηση της απόστασης από τον καθένα γείτονα κόμβο με αποστολή ενός ειδικού πακέτου αντήχησης μέσω του συνδέσμου, το οποίο ο προορισμός θα πρέπει να επιστρέψει άμεσα. Αφού μετρηθεί ο χρόνος της διαδρομής θα υπολογιστεί μια εκτίμηση της καθυστέρησης και άρα της απόστασης των δύο δρομολογητών
- η κατασκευή πακέτων που να εμπεριέχει όλη αυτή τη γνώση (ταυτότητα αποστολέα, αριθμός ακολουθίας, ηλικία πακέτου, λίστα γειτόνων, για κάθε γείτονα δίνεται η καθυστέρηση προς αυτόν)
- η αποστολή του πακέτου σε όλους τους δρομολογητές με χρήση του αλγορίθμου της πλημμύρας (αναφέρεται σε επόμενη ενότητα)
- η εύρεση της συντομότερης διαδρομής προς όλους τους δρομολογητές με τοπική χρήση του αλγορίθμου του Dijkstra, που περιγράφεται στη συνέχεια

3.4.1 Αλγόριθμος Δρομολόγησης του Dijkstra

Ο άπληστος αλγόριθμος δρομολόγησης του Dijkstra είναι αντιπροσωπευτικός της κατηγορίας των γενικών αλγορίθμων που αποφασίζουν το βέλτιστο δρομολόγιο βρίσκοντας τη συντομότερη διαδρομή μεταξύ δύο δρομολογητών. Αναπαριστώντας το δίκτυο ως γράφο όπου οι κόμβοι αντιπροσωπεύουν τους δρομολογητές και οι ακμές τους συνδέσμους, το μήκος της διαδρομής μπορεί να αφορά σε :

- πλήθος των αλμάτων μεταξύ κόμβων
- γεωγραφική απόσταση σε χιλιόμετρα

Αν σε κάθε ακμή του γράφου αντιστοιχιστούν βάρη που αναπαριστούν τη μέση καθυστέρηση αναμονής και μετάδοσης του συνδέσμου, τότε, η συντομότερη διαδρομή θα σημαίνει ταυτόχρονα την ταχύτερη διαδρομή.

Στον αλγόριθμο του Dijkstra η τοπολογία του δικτύου αλλά και τα κόστη των ακμών είναι γνωστά σε όλους τους κόμβους-δρομολογητές. Η γνώση του δικτύου επιτυγχάνεται με μετάδοση της κατάστασης των συνδέσμων σε όλους τους κόμβους αλλά και δίνοντας αρχικά σε όλους την ίδια πληροφορία.

Η βασική ιδέα του αλγορίθμου του Dijkstra είναι η σήμανση των κόμβων του δικτύου ως μόνιμους ή προσωρινούς. Αρχικά, όλοι οι κόμβοι είναι μαρκαρισμένοι ως προσωρινοί και κάθε ακμή έχει ως βάρος την απόσταση μεταξύ των κόμβων που συνδέει. Κάθε κόμβος, εκτός από το χαρακτηρισμό του ως μόνιμος ή προσωρινός χαρακτηρίζεται και από μια εγγραφή (ετικέτα) που παρουσιάζει την απόστασή του από τον κόμβο προέλευσης και την καλύτερη γνωστή (ως την τρέχουσα χρονική στιγμή) διαδρομή. Στην εκκίνηση του δικτύου αυτές οι ετικέτες περιέχουν την τιμή 'άπειρο'. Κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου οι ετικέτες διαμορφώνονται δυναμικά εμπεριέχοντας τις τρέχουσες καλύτερες διαδρομές. Όταν κάποια ετικέτα περιέχει τη συντομότερη διαδρομή τότε ο κόμβος μαρκάρεται ως μόνιμος και δεν αλλάζει στο μέλλον. Επί της ουσίας, ο αλγόριθμος υπολογίζει για κάθε κόμβο μονοπάτια ελαχίστου κόστους προς κάθε άλλο κόμβο του γράφου (δικτύου) και επιστρέφει πίνακα με περιεχόμενα αυτές τις διαδρομές για κάθε κόμβο. Πρόκειται, δηλαδή, για έναν επαναληπτικό αλγόριθμο ο οποίος, μετά από k επαναλήψεις, θα έχει επιστρέψει τα μονοπάτια ελαχίστου κόστους για k προορισμούς.

Έστω ότι ισχύει ο παρακάτω συμβολισμός :

- $c(x,y)$: το κόστος του συνδέσμου μεταξύ των κόμβων x και y , όπου ο κόμβος x θεωρείται ο κόμβος προέλευσης και ο κόμβος y ο κόμβος προορισμός. Αν οι κόμβοι x , y δε συνδέονται με ακμή (φυσικό σύνδεσμο) τότε η τιμή του c θα είναι το άπειρο
- $D(v)$: η τρέχουσα τιμή του κόστους του μονοπατιού από τον κόμβο προέλευσης μέχρι τον κόμβο v
- $p(v)$: ο κόμβος-πατέρας του κόμβου v στο μονοπάτι από τον κόμβο προέλευσης ως τον κόμβο v
- N' : το σύνολο των κόμβων των οποίων το μονοπάτι ελαχίστου κόστους είναι ρητά γνωστό

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο αλγόριθμος του Dijkstra:

Αλγόριθμος 3.4.1 Dijkstra's Algorithm

1. Αρχικοποίηση :

2. $N = \{u\}$

3. για όλους τους κόμβους v

4. αν ο κόμβος v είναι άμεσα γειτονικός (ενώνεται με ακμή-φυσικό σύνδεσμο) με τον κόμβο u

5. τότε $D(v) = c(u, v)$

6. αλλιώς $D(v) = \infty$

7.

8. Επανάλαβε τις παρακάτω εντολές :

9. βρες κόμβο $w \in N : D(w) = \min$

10. πρόσθεσε τον κόμβο w στο σύνολο N

11. ανανέωσε τις τιμές $D(v)$ για όλους τους κόμβους v που είναι άμεσα γειτονικοί (ενώνονται με ακμή - φυσικό σύνδεσμο) με τον κόμβο w και δεν ανήκουν στο σύνολο N

12. $D(v) = \min\{D(v), D(w) + c(w, v)\}$

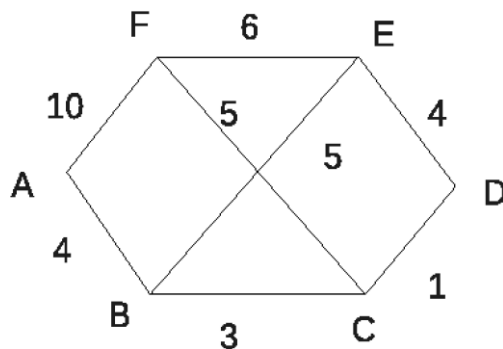
13. /* το νέο κόστος του κόμβου v είναι είτε παλιό κόστος του ή το κόστος του τρέχοντος γνωστού μονοπατιού ελαχίστου κόστους του κόμβου w επαυξημένο με το κόστος της ακμής από τον κόμβο w στον κόμβο v */

14. έως ότου όλοι οι κόμβοι του γράφου (δικτύου) να ανήκουν στο σύνολο N

Συνήθως, η υλοποίηση του αλγορίθμου του Dijkstra, σε ένα παράδειγμα εφαρμοσμένο σε μη κατευθυνόμενο γράφο, γίνεται με επαναληπτικές διατρήξεις του γράφου, μαρκάρισμα των κόμβων και προσθήκη πληροφοριών κοστών σε κάποιον πίνακα. Υπό άλλο πρίσμα, μπορεί να θεωρηθεί πως για κάθε κόμβο δημιουργείται και διαφορετικό δέντρο (spanning tree) με ρίζα τον κόμβο.

3.4.2 Παράδειγμα Αλγορίθμου Dijkstra

Στο παρακάτω απλό παράδειγμα αποσαφηνίζεται ο υπολογισμός της συντομότερης διαδρομής μεταξύ δύο κόμβων με εφαρμογή του αλγορίθμου του Dijkstra. Έστω το δίκτυο που αναπαρίσταται από το γράφο του Σχήματος 2. Οι κόμβοι αντιστοιχούν σε δρομολογητές, οι ακμές σε φυσικούς συνδέσμους μεταξύ δρομολογητών και τα βάρη των ακμών στην απόσταση μεταξύ δύο δρομολογητών. Αναζητούμε τη συντομότερη διαδρομή από τον κόμβο A στον κόμβο D.



Σχήμα 2: Γράφος που αναπαριστά ένα μικρό δίκτυο. Αναζητούμε τη συντομότερη διαδρομή μεταξύ των κόμβων A και D.

Αρχικά, όλοι οι κόμβοι έχουν στις ετικέτες τους αποθηκευμένη τη τιμή ∞ (άπειρο). Μαρκάρεται ο κόμβος A ως μόνιμος και ελέγχονται όλοι οι κόμβοι που είναι σε άμεση σύνδεση μαζί του, στο συγκεκριμένο παράδειγμα οι κόμβοι B και F. Τώρα, ο κόμβος B αποθηκεύει στην ετικέτα του την τιμή 4 και, αντίστοιχα, ο κόμβος F την τιμή 10. Και οι δύο κόμβοι αποθηκεύουν επιπλέον τον κόμβο προέλευσης, δηλαδή τον A. Από τους κόμβους που έχουν διατρεχτεί (B και F) επιλέγεται ως τρέχων κόμβος αυτός με τη μικρότερη τιμή στην ετικέτα του, δηλαδή ο B. Επαναλαμβάνουμε τον έλεγχο για τους κόμβους που είναι σε άμεση επαφή με τον B. Ο κόμβος C αποθηκεύει την τιμή 7 και ο κόμβος E την τιμή 9. Από τους 3 κόμβους που έχουν διατρεχτεί και δεν έχουν μαρκιαστεί ως μόνιμοι κόμβοι επιλέγεται πάλι ο κόμβος με τη μικρότερη τιμή στην ετικέτα του. Τελικά, αποδεικνύεται πως η συντομότερη διαδρομή από τον κόμβο A στον κόμβο D είναι δια μέσου των κόμβων B και C.

3.4.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Έχει ιδιαίτερη σημασία, στο σημείο αυτό, να αναλύσουμε την πολυπλοκότητα του αλγορίθμου καθώς και τα μειονεκτημά του. Για ένα γράφο (δίκτυο) αποτελούμενο από n κόμβους, κάθε επανάληψη απαιτεί τον έλεγχο όλων των κόμβων w που δεν ανήκουν στο σύνολο N . Από εδώ προκύπτουν $n(n + 1)/2$ συγκρίσεις. Επομένως, ο αλγόριθμος απαιτεί χρόνο $O(n^2)$. Ωστόσο, στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί βελτιώσεις που φέρουν χρόνο εκτέλεσης $O(n \log n)$.

Ως πλεονέκτημα του αλγορίθμου θεωρείται, αρχικά, η απλότητά του αλλά και η βεβαιότητα πως, τελικά, θα επιστρέψει το συντομότερο μονοπάτι. Το κύριο μειονέκτημά του είναι πως, εξ' αιτίας της άπληστης αναζήτησης που υλοποιεί καταναλώνει σημαντικό χρόνο και χώρο σε, τελικά, άσκοπες διατρήξεις. Ένα επιπλέον μειονέκτημά του είναι η αδυναμία του να διαχειριστεί ακμές με αρνητικά βάρη με αποτέλεσμα να φτάνει σε άκυκλους γράφους που σχεδόν πάντα δεν επιστρέφουν το συντομότερο μονοπάτι.

3.5 Αλγόριθμοι Διανύσματος-Απόστασης (Distance Vector algorithm)

Πριν από τους αλγορίθμους κατάστασης συνδέσμων είχαν χρησιμοποιηθεί οι αλγόριθμοι διανύσματος-απόστασης. Και αυτή η κατηγορία αλγορίθμων ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία των δυναμικών αλγορίθμων.

3.5.1 Αλγόριθμος Δρομολόγησης των Bellman-Ford

Ο αλγόριθμος των Bellman-Ford (γνωστός και ως αλγόριθμος Ford-Fulkerson) είναι αντιπροσωπευτικός της κατηγορίας των δυναμικών αλγορίθμων που βασίζονται σε διάνυσμα-απόσταση. Σε αυτή την κατηγορία, κάθε δρομολογητής του δικτύου διατηρεί έναν πίνακα με μία εγγραφή για κάθε άλλο κόμβο του δικτύου. Η εγγραφή αυτή περιέχει την καλύτερη γνωστή απόσταση προς κάθε προορισμό και τη διαδρομή προς αυτόν. Η ενημέρωση των πινάκων πραγματοποιείται με ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ γειτόνων του δικτύου. Η συντομότερη διαδρομή (καλύτερη γνωστή διαδρομή) μπορεί να βασίζεται:

- στο πλήθος των ενδιάμεσων αλμάτων
- στη χρονική καθυστέρηση
- στο συνολικό πλήθος των πακέτων που βρίσκονται στις ουρές κατά μήκος της διαδρομής

Έστω ότι ισχύει ο συμβολισμός :

- $D_x(y)$: η εκτίμηση ελάχιστου κόστους από τον κόμβο x στον κόμβο y
- $c(x, v)$: το κόστος κάθε κόμβου v από τον κόμβο x
- $D_x = [D_x(y) : y \in N]$: το διάνυσμα απόστασης του κόμβου x
- $D_v = [D_v(y) : y \in N]$: το διάνυσμα κάθε γείτονα v του κόμβου x για τον οποίο ο x διατηρεί το διάνυσμα αποστάσεων του

Η βασική ιδέα είναι πως, με προκαθορισμένη περιοδικότητα, κάθε κόμβος του δικτύου στέλνει σε όλους τους γείτονές του το διάνυσμα αποστάσεων του. Όταν ο κόμβος x λαμβάνει το διάνυσμα αποστάσεων με τις εκτιμήσεις από τους γείτονές του, ανανεώνει το δικό του διάνυσμα αποστάσεων χρησιμοποιώντας την εξίσωση των Bellman-Ford:

$$D_x(y) \leftarrow \min_v c(x,v) + D_v(y), \forall y \in N$$

Στο σημείο αυτό πρέπει να παρατηρήσουμε πως, στον υπολογισμό της ανανέωσης του πίνακα αποστάσεων για κάθε κόμβο του δικτύου δε συμμετέχει ο παλιός πίνακας αποστάσεων. Η ανανέωση των διανυσμάτων αποστάσεων των κόμβων του δικτύου μπορεί να γίνει είτε με προκαθορισμένη περιοδικότητα, όπως προαναφέρθηκε, είτε καταναμημένα. Στην πρώτη περίπτωση, κάθε επανάληψη και ανανέωση των πινάκων προκαλείται από αλλαγή στα κόστη των συνδέσμων του δικτύου ή από μήνυμα ανανέωσης των διανυσμάτων απόστασης που λαμβάνει ο κόμβος από τους γείτονές του. Στην καταναμημένη περίπτωση, κάθε κόμβος στέλνει ενημερωτικό μήνυμα ανανέωσης των διανυσμάτων αποστάσεων μόνο όταν αλλάζει το δικό του διάνυσμα αποστάσεων. Έπειτα, οι γείτονες ενημερώνουν τους δικούς τους γείτονες αν είναι απαραίτητο.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο αλγόριθμος των Bellman-Ford:

Αλγόριθμος 3.5.1 Bellman-Ford Algorithm

1. Αρχικοποίηση διανυσμάτων αποστάσεων :

2. Για κάθε κόμβο v

3. αν ο κόμβος v είναι πηγή

4. $c(v, v) = 0$

5. αλλιώς, αν ο κόμβος είναι προορισμός

6. $c(x, v) = \infty$

7. στους προγόνους του v θέσε την τιμή null

8. **Επανάλαβε τις παρακάτω εντολές** (υπολογισμός-ανανέωση διανυσμάτων) :

9. Για $k = 1$ έως $k = |V| - 1$:

10. Για κάθε ακμή (x, v) στο γράφο (όπου x είναι ο κόμβος-πηγή και v ο κόμβος-προορισμός)

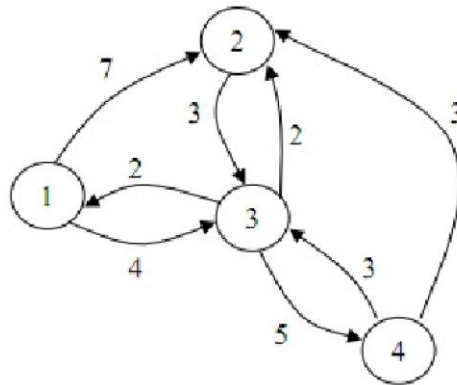
11. αν $c(x, x) + D_x(v) < c(x, v)$

12. $c(x, v) = c(x, x) + D_x(v)$

13. θέσε ως πρόγονο του v τον κόμβο x

3.5.2 Παράδειγμα αλγορίθμου Bellman-Ford

Στο παρακάτω απλό παράδειγμα αποσαφηνίζεται ο υπολογισμός της συντομότερης διαδρομής μεταξύ δύο κόμβων με εφαρμογή του αλγορίθμου των Bellman-Ford. Έστω το δίκτυο που αναπαρίσταται από το γράφο του Σχήματος 3. Οι κόμβοι αντιστοιχούν σε δρομολογητές, οι ακμές σε φυσικούς συνδέσμους μεταξύ δρομολογητών και τα βάρη των ακμών στην απόσταση μεταξύ δύο δρομολογητών. Αναζητούμε τις συντομότερες διαδρομές από τον κόμβο '1' σε οποιονδήποτε από τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου.



Σχήμα 3: Γράφος που αναπαριστά ένα μικρό δίκτυο. Αναζητούμε τις συντομότερες διαδρομές από τον κόμβο '1' προς οποιονδήποτε άλλο κόμβο του δικτύου.

Αρχικά, θα πρέπει να δημιουργήσουμε τον πίνακα αποστάσεων για κάθε ζεύγος κόμβων του γράφου. Ο πίνακας αυτός, κατά την αρχικοποίηση του αλγορίθμου, φαίνεται στο Σχήμα 4. Με 0 τιμοδοτούμε την απόσταση του κάθε κόμβου από τον εαυτό του και με ∞ την απόσταση μεταξύ κόμβων που δε συνδέονται με ακμή. Για τα ζεύγη κόμβων που συνδέονται με φυσικό τρόπο, αναφέρουμε τις αποστάσεις που αναγράφονται στις ακμές του γράφου.

		ΠΡΟΣ			
		ΚΟΜΒΟ	1	2	3
ΑΠΟ	1	0	7	4	∞
	2	∞	0	3	∞
	3	2	2	0	5
	4	∞	3	3	0

Σχήμα 4: Αρχικοποιημένος πίνακας αποστάσεων.

Αναζητώντας τις συντομότερες διαδρομές από τον κόμβο '1' προς τους υπόλοιπους κόμβους του γράφου, θα ανανεώνουμε επαναληπτικά τον πίνακα αποστάσεων. Με D_i θα συμβολίσουμε την απόσταση από τον κόμβο '1' προς τον i -οστό κόμβο του δικτύου. Με D_{ij} θα συμβολίσουμε την

απόσταση από τον κόμβο i στον κόμβο j .

Αρχικά, για $k = 1$ τα D_i ταυτίζονται με τις τιμές που έχει ο αρχικοποιημένος πίνακας αποστάσεων.

Συγκεκριμένα :

$$\bullet k = 1; D_1 = 0, D_2 = 7, D_3 = 4, D_4 = \infty$$

Στη δεύτερη επανάληψη, $k = 2$, σε κάθε περίπτωση D_i θα επιλέγεται η μικρότερη τιμή μεταξύ της τρέχουσας D_i και των αθροισμάτων των υπόλοιπων δυνατών δρομολογίων διαμέσου των γειτόνων και χρησιμοποιώντας τις δικές τους πληροφορίες. Για κάθε μία περίπτωση έχουμε :

$$\begin{aligned} \bullet D_1 &= 0 \\ \bullet D_2 &= \min\{D_2, D_{32}, D_{42}\} = \min\{7, 6, \infty\} = 6 \\ \bullet D_3 &= \min\{D_3, D_{23}, D_{43}\} = \min\{4, 10, \infty\} = 4 \\ \bullet D_4 &= \min\{D_4, D_{24}, D_{34}\} = \min\{\infty, \infty, 9\} = 9 \end{aligned}$$

Στην τρίτη (και τελευταία για το συγκεκριμένο παράδειγμα επανάληψη), $k = 3$, επαναλαμβάνουμε τα ανωτέρω.

Έτσι έχουμε :

$$\begin{aligned} \bullet D_1 &= 0 \\ \bullet D_2 &= \min\{D_2, D_{32}, D_{42}\} = \min\{6, 6, 12\} = 6 \\ \bullet D_3 &= \min\{D_3, D_{23}, D_{43}\} = \min\{4, 9, 12\} = 4 \\ \bullet D_4 &= \min\{D_4, D_{24}, D_{34}\} = \min\{9, \infty, 9\} = 9 \end{aligned}$$

Οι τιμές που προκύπτουν από την τελευταία επανάληψη αποτελούν και τις συντομότερες αποστάσεις μεταξύ του κόμβου i και των υπολοίπων κόμβων του δικτύου.

3.5.3 Μέτρηση στο άπειρο

Ο αλγόριθμος δρομολόγησης των Bellman-Ford έχει ένα σημαντικό πλεονέκτημα και ένα σημαντικό μειονέκτημα. Το πλεονέκτημά του είναι η γρήγορη αντίδρασή του στα καλά νέα. Το μειονέκτημά του είναι η αργή αντίδρασή του στα άσχημα νέα. Στη βιβλιογραφία, το πρόβλημα αυτό απαντάται ως το count-to-infinity πρόβλημα. Όταν τα κόστη των ακμών του δικτύου αλλάζουν, οι κόμβοι του δικτύου ανιχνεύουν αυτή την αλλαγή και τη χρησιμοποιούν κατά την ανανέωση και τον επαναυπολογισμό του διάνυσματος αποστάσεων. Αν το διάνυσμα αποστάσεων του κάθε κόμβου αλλάξει μετά από την αλλαγή στα κόστη των ακμών, τότε ενημερώνονται οι γείτονες. Βάσει αυτού θα απαντήσουμε το 'πόσο γρήγορα διαδίδονται τα καλά νέα' και το 'πόσο αργά διαδίδονται τα άσχημα νέα'.

Έστω ότι τη χρονική στιγμή t_0 ο κόμβος x ανιχνεύει αλλαγή κόστους ακμής, ανανεώνει το διάνυσμα αποστάσεων του και ενημερώνει τους γείτονές του. Την επόμενη χρονική στιγμή, t_1 , ο κόμβος y λαμβάνει την ενημέρωση από τον κόμβο x και ανανεώνει με τη σειρά του το δικό του διάνυσμα. Πραγματοποιεί υπολογισμούς νέων ελαχίστων κοστών προς τον κόμβο x και διαδίδει το νέο του διάνυσμα στους γείτονές του. Τη χρονική στιγμή t_2 , ο κόμβος x θα λάβει το ανανεωμένο διάνυσμα του y και θα ανανεώσει εκ νέου το διάνυσμά του. Είναι σαφές πως τα καλά νέα διαδίδονται με

ταχύτητα ενός άλματος ανά ανταλλαγή. Σε δίκτυο με διαδρομή μέγιστου μήκους $|N|$ αλμάτων, απαιτούνται μόνο N ανταλλαγές για να ενημερωθεί όλο το δίκτυο.

Το πρόβλημα της ‘μέτρησης στο άπειρο’ αφορά στην αργή διάδοση των άσχημων νέων ή, με άλλα λόγια, στην αργή σύγκλιση των αλγορίθμων δρομολόγησης που βασίζονται στη μέθοδο διανύσματος-απόστασης, κάτω από μερικές συνθήκες. Εμφανίζεται όταν κάποιος δρομολογητής ή κάποιος σύνδεσμος προς κάποιον δρομολογητή καταρρεύσει. Λόγω του ότι οι πληροφορίες ανταλλάσσονται τοπικά, η ενημέρωση για την κατάρρευση κάποιου δρομολογητή ή κάποιου συνδέσμου προς κάποιον μη γειτονικό του δρομολογητή στο δίκτυο θα αργήσει να φτάσει. Συνήθως, για αρκετή ώρα η ενημέρωση που λαμβάνουν οι μη γειτονικοί προς το πρόβλημα κόμβοι-δρομολογητές είναι παρωχημένη.

Έχουν προταθεί αρκετές λύσεις για το πρόβλημα της ‘μέτρησης στο άπειρο’, μεταξύ των οποίων :

- Να οριστεί άνω όριο ‘απείρου’ έτσι ώστε η αποτυχημένη ενημέρωση να μη διαρκεί για πολύ ώρα.
- Η τεχνική του split horizon.

Θα περιγράψουμε την τεχνική του ‘split horizon’ με ένα παράδειγμα. Έστω 3 κόμβοι, A, B, C και υπάρχουν δύο ακμές, μία μεταξύ A-B και μία μεταξύ B-C . Η τεχνική του ‘split horizon’ απαγορεύει από τον κόμβο A να διαδώσει στον κόμβο B το δρομολόγιο του για τον κόμβο C , το οποίο περνάει αναγκαστικά από τον B. Αυτό συμβαίνει γιατί, αν ο σύνδεσμος μεταξύ B – C καταρρεύσει και ο B είχε λάβει το δρομολόγιο από τον A, τότε θα χρησιμοποιούσε αυτό το δρομολόγιο δια μέσου του A. Επειδή, όμως, δεν υπάρχει ακμή μεταξύ του A και του C , ο A θα έστελνε ξανά στον B κ.ο.κ.

Με την τεχνική αυτή, έπειτα από μερικούς γύρους ενημερώσεων, οι δρομολογητές γνωρίζουν την κατάρρευση. Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί πως, η τεχνική αυτή δεν αποτρέπει τη δημιουργία βρόχων δρομολόγησης σε όλες τις πιθανές τοπολογίες.

Ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα του αλγορίθμου είναι πως δε λαμβάνει υπ’ όψιν του το εύρος ζώνης των γραμμών κατά την επιλογή των δρομολογίων. Ο συνδυασμός των δύο αυτών βασικών μειονεκτημάτων του αλγορίθμου συνετέλεσαν καθοριστικά για τον εκτοπισμό του και την αντικατάστασή του από τους αλγορίθμους κατάστασης συνδέσμων.

Έχει σημασία, στο σημείο αυτό, να αναλύσουμε την πολυπλοκότητα του αλγορίθμου. Για ένα γράφο (δίκτυο) αποτελούμενο από n κόμβους, και k ακμές, η πολυπλοκότητα χειρότερης περίπτωσης είναι $O(n|k|)$ και εξαρτάται από τον έλεγχο που γίνεται για το τρέχον κόστος στη γραμμή 11 του αλγορίθμου που παρατέθηκε παραπάνω.

3.6 Σύγκριση αλγορίθμων Link-State και Distance Vector

Και οι δύο κατηγορίες δυναμικών αλγορίθμων δρομολόγησης που μελετήθηκαν προηγουμένως, αλγόριθμοι κατάστασης συνδέσμων και αλγόριθμοι διανύσματος απόστασης έχουν κάποια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Επαναλαμβάνουμε πως, τα μειονεκτήματα των αλγορίθμων διανύσματος απόστασης αποτέλεσαν την αιτία για την αποφυγή της χρήσης τους και την εκτεταμένη επιλογή, αντιπαραθετικά, των αλγορίθμων κατάστασης συνδέσμων.

Εκτός των βασικών πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων που αναφέραμε σε κάθε περίπτωση, στο σημείο αυτό θα παρουσιάσουμε συγκριτικά μερικά χαρακτηριστικά αυτών των δύο υποκατηγοριών αλγορίθμων.

Όσον αφορά στην ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των δρομολογητών του δικτύου, οι δύο κατηγορίες διαφέρουν σημαντικά διότι, η μεν κατηγορία αλγορίθμων διανύσματος απόστασης επιτρέπει την αποστολή μηνυμάτων πληροφοριών ΜΟΝΟ στους γειτονικούς δρομολογητές κάθε κόμβου του δικτύου ενώ οι αλγόριθμοι κατάστασης συνδέσμων στέλνουν $O(|V||E|)$ μηνύματα πληροφοριών για δίκτυο μεγέθους $|V|$ κόμβων και $|E|$ ακμών. Αν και η διαφορά είναι σημαντική και υπέρ των αλγορίθμων διανύσματος απόστασης, δεν αποτελεί πλεονέκτημα της συγκεκριμένης κατηγορίας δεδομένου ότι προκαλεί το πρόβλημα της μέτρησης στο άπειρο (count-to-infinity problem) που περιγράψαμε στην προηγούμενη παράγραφο.

Η διαφορά στην ταχύτητα σύγκλισης, επιπλέον, στην περίπτωση των αλγορίθμων δρομολόγησης κατάστασης συνδέσμων μπορεί να δημιουργήσει ταλαντώσεις, ενώ, στην περίπτωση των αλγορίθμων διανύσματος απόστασης, η ποικιλία στο χρόνο σύγκλισης μπορεί να δημιουργήσει βρόχους δρομολόγησης που θα επιφέρουν το γνωστό πρόβλημα της μέτρησης στο άπειρο.

Τέλος, αναφορικά με την ανθεκτικότητα του αλγορίθμου σε περιπτώσεις κατάρρευσης κάποιου δρομολογητή, οι αλγόριθμοι κατάστασης συνδέσμων μπορεί να μεταδώσουν λαθεμένο κόστος μόνο ενός συνδέσμου (του προσκείμενου στον δρομολογητή που εμφάνισε το πρόβλημα) ωστόσο, το σφάλμα ενδεχομένως να μη φτάσει μακριά δεδομένου ότι ο κάθε δρομολογητής υπολογίζει μόνο το δικό του πίνακα αποστάσεων. Αντίθετα, στην περίπτωση των αλγορίθμων διανύσματος απόστασης, κάποιος δρομολογητής μπορεί να μεταδώσει λάθος κόστος ολόκληρου μονοπατιού που περιλαμβάνει τον αποτυχημένο δρομολογητή. Επιπλέον, ο πίνακας αποστάσεων κάθε δρομολογητή, στην τρέχουσα περίπτωση, χρησιμοποιείται από τους άλλους κόμβους, με αποτέλεσμα να διαδοθεί λάθος σε όλο το δίκτυο και όχι μόνο τοπικά.

Ο Πίνακας 1 συγκεντρώνει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των αλγορίθμων δρομολόγησης κατάστασης συνδέσμων και διανύσματος απόστασης.

	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
Αλγόριθμοι Δρομολόγησης Κατάστασης Συνδέσμων	Απλός αλγόριθμος	Υλοποιεί άπληστη αναζήτηση και καταναλώνει χρόνο και χώρο σε αχρειαστες διατρήξεις
	Σε περιπτώσεις μη αρνητικών κοστών ακμών, θα επιστρέψει σίγουρα το συντομότερο δρομολόγιο	Σε περιπτώσεις αρνητικών κοστών ακμών καταλήγει σε άκυκλο γράφημα και σχεδόν πάντα δεν επιστρέφει σύντομο δρομολόγιο
	Κάθε κόμβος του δικτύου μεταδίδει μηνύματα πληροφοριών σε όλους τους κόμβους του δικτύου	Μπορεί να προκληθούν ταλαντώσεις λόγω του χρόνου σύγκλισης
	Σε περίπτωση αποτυχίας ενός δρομολογητή (ή συνδέσμου που συνδέει δύο δρομολογητές) θα μεταδώσει λαθεμένο κόστος μόνο για ένα σύνδεσμο	
	Ο κάθε δρομολογητής υπολογίζει μόνο το δικό του πίνακα αποστάσεων	
Αλγόριθμοι Δρομολόγησης Διανυσμάτων Απόστασης	Γρήγορη αντίδραση στα 'καλά νέα'	Αργή αντίδραση στα 'άσχημα νέα' → το πρόβλημα της μέτρησης στο Άπειρο
		Δε λαμβάνει υπ' όψιν του το εύρος ζώνης των γραμμών κατά την επιλογή των δρομολογίων
		Επιτρέπει την αποστολή μηνυμάτων πληροφοριών ΜΟΝΟ σε γειτονικούς δρομολογητές
		Λόγω της ποικιλίας στους χρόνους σύγκλισης μπορεί να προκληθούν βρόγχοι δρομολόγησης με αποτέλεσμα το πρόβλημα της μέτρησης στο άπειρο
		Σε περίπτωση αποτυχίας ενός δρομολογητή (ή συνδέσμου που συνδέει δύο δρομολογητές) θα μεταδώσει λαθεμένο κόστος για ολόκληρα μονοπάτια που περιέχουν το σφάλμα
	Το σφάλμα μπορεί να φτάσει σε ολόκληρο το δίκτυο, δεδομένου ότι ο πίνακας αποστάσεων κάθε δρομολογητή χρησιμοποιείται από όλους τους δρομολογητές.	

Πίνακας 1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των αλγορίθμων δρομολόγησης κατάστασης συνδέσμων και διανύσματος απόστασης.

4. Πρωτόκολλα Δρομολόγησης

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης ορίζουν τον τρόπο επικοινωνίας μεταξύ δρομολογητών, διαδίδοντας πληροφορίες που τους επιτρέπουν να επιλέγουν δρομολόγια μεταξύ κόμβων του δικτύου. Η επιλογή του δρομολογίου πραγματοποιείται από τους αλγορίθμους δρομολόγησης που μελετήσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Κάθε δρομολογητής διατηρεί πρότερη γνώση για τα γειτονικά του δίκτυα. Το πρωτόκολλο δρομολόγησης διαμοιράζει τη γνώση αυτή αρχικά στους άμεσους γείτονες του δρομολογητή και στη συνέχεια στο υπόλοιπο δίκτυο. Με τον τρόπο αυτό, οι δρομολογητές επεκτείνουν τις γνώσεις τους αναφορικά με την τοπολογία του δικτύου.

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης χαρακτηρίζονται από μια σειρά γενικές ιδιότητες, όπως :

- τον τρόπο με τον οποίο είτε επιχειρούν το μη σχηματισμό βρόχων δρομολογίων είτε επιχειρούν την καταστροφή των βρόχων(αν έχουν δημιουργηθεί)
- τον τρόπο με τον οποίο επιλέγουν δρομολόγια χρησιμοποιώντας πληροφορία που διατηρούν αναφορικά με τα κόστη των αλμάτων
- το χρόνο σύγκλισης
- την κλιμακοσιμότητά τους

Εκτός των πρωτοκόλλων δρομολόγησης (routing protocols) στη βιβλιογραφία συναντούμε συχνά και τον όρο δρομολογούμενα πρωτόκολλα (routed protocols) (TCP/IP protocol suites).

Είναι γνωστό πως τα πακέτα που παράγει ένας υπολογιστής αποτελούνται από πρωτόκολλα (δρομολογούμενα). Τα πρωτόκολλα αυτά, με τη σειρά τους, πρέπει να δρομολογηθούν για να φτάσουν στον προορισμό τους. Το πώς τα πακέτα τελικά φτάνουν τον προορισμό τους (το δρομολόγιο που ακολουθούν) ορίζεται από τους αλγορίθμους και τα πρωτόκολλα δρομολόγησης.

Θα επιμείνουμε για λίγο ακόμα στη διάκριση μεταξύ των δύο κατηγοριών πρωτοκόλλων. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης (ROUTING PROTOCOLS) είναι το λογισμικό που επιτρέπει στους δρομολογητές τη δυναμική μετάδοση και γνώση των δρομολογίων, αλλά και να αποφασίσουν (με τη βοήθεια των αλγορίθμων δρομολόγησης) τα διαθέσιμα και τα πιο αποδοτικά δρομολόγια προς ένα προορισμό.

Τα δρομολογούμενα πρωτόκολλα (ROUTED PROTOCOLS) δεν είναι τίποτα περισσότερο από δεδομένα που μεταφέρονται στο δίκτυο.

Έχοντας τονίσει τη διάκριση αυτή, μπορούμε να προχωρήσουμε στην κατηγοριοποίηση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης σε δύο κύριες κατηγορίες :

- IGP: Interior Gateway Protocols
- EGP: Exterior Gateway Protocols

Όπως μαρτυρούν και τα ονόματά τους, τα πρωτόκολλα που ανήκουν στην πρώτη κατηγορία αφορούν σε εσωτερική εφαρμογή τους και τα πρωτόκολλα της δεύτερης σε εξωτερική. Γενικά, τα πρωτόκολλα IGP χρησιμοποιούνται σε εσωτερικά δίκτυα ενώ τα EGP στο Διαδίκτυο.

Πιο συγκεκριμένα, τα πρωτόκολλα εσωτερικής πύλης (IGP) αφορούν στη δρομολόγηση μέσα σε ένα αυτόνομο σύστημα (σε ένα domain) (εσωτερική δρομολόγηση). Τα πρωτόκολλα που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία αναζητούν τρόπους για τη μετάβαση ενός πακέτου μεταξύ δρομολογητών ενός δικτύου. Αυτά τα πρωτόκολλα δρομολόγησης είναι δυναμικά και διατηρούν αρχείο των μονοπατιών που έχουν χρησιμοποιήσει για τη μεταφορά δεδομένων από ένα τελικό σύστημα σε ένα άλλο μέσα στο ίδιο δίκτυο ή σε ένα σύνολο δικτύων που αποτελούν ένα αυτόνομο σύστημα.

Για τη μεταφορά δεδομένων έξω από ένα τοπικό δίκτυο (όπως στο Διαδίκτυο) χρησιμοποιούνται τα πρωτόκολλα εξωτερικής πύλης (εξωτερική δρομολόγηση). Τα πρωτόκολλα που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία διαχειρίζονται τη δρομολόγηση εκτός του αυτόνομου συστήματος και επιτρέπουν τις μεταβάσεις από ένα τοπικό δίκτυο στο δίκτυο παροχέα του Internet και σε οποιοδήποτε άλλο δίκτυο. Για παράδειγμα, το πρωτόκολλο BGP χρησιμοποιείται από τις εταιρείες που διαθέτουν περισσότερους του ενός παρόχους Internet για να μπορούν να έχουν πλεονασμό και ισορροπία φόρτου των δεδομένων τους που μεταφέρονται από και προς το Διαδίκτυο.

Τα βασικότερα πρωτόκολλα δρομολόγησης, κατηγοριοποιημένα σε IGP και EGP, φαίνονται στον Πίνακα 2.

Στις επόμενες ενότητες θα μελετήσουμε τα πρωτόκολλα δρομολόγησης SPF, OSPF και IS-IS (ως αντιπροσωπευτικά της κατηγορίας Interior Gateway protocols με βάση την κατάσταση συνδέσμων), τα πρωτόκολλα RIP και IGRP (ως αντιπροσωπευτικά της κατηγορίας Interior Gateway Protocols με βάση διανύσματα απόστασης) και το πρωτόκολλο BGP (ως αντιπροσωπευτικό των Exterior Gateway Protocols). Επιπλέον θα μελετήσουμε το πρωτόκολλο PNNI της ATM, το πρωτόκολλο Διαχείρισης Ομάδας Internet (IGMP) και τα GGP και CGP πρωτόκολλα.

Interior Gateway Protocols	Exterior Gateway Protocols
IGRP: Interior Gateway Routing Protocol	EGP: Exterior Gateway Protocol
EIGRP: Enhanced Interior Gateway Routing Protocol	BGP: Border Gateway Protocol
OSPF: Open Shortest Path First	
RIP (και RIP II): Routing Information Protocol	
IS-IS: Intermediate System – Intermediate System	

Πίνακας 2: Πρωτόκολλα Δρομολόγησης

4.1 Interior Gateway Routing (distance-vector)

4.1.1 Routing Information Protocol

Το πρωτόκολλο RIP είναι από τα πιο ευρέως διαδεδομένα πρωτόκολλα IGP με βάση τη μέθοδο διανύσματος απόστασης. Σχεδιάστηκε αρχικά στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια στο Berkeley για να παρέχει συνεπείς πληροφορίες δρομολόγησης και προσπελασιμότητας μεταξύ κόμβων στα τοπικά δίκτυα. Παρέχει τη δυνατότητα εκπομπής φυσικών δικτύων για την γρήγορη ανταλλαγή πληροφοριών δρομολόγησης.

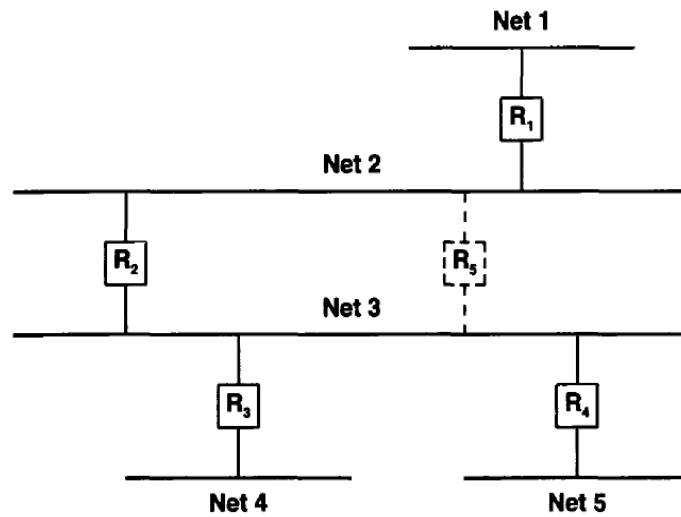
Το Πρωτόκολλο Πληροφοριών Δρομολόγησης υλοποιεί άμεσα τη δρομολόγηση διανύσματος-απόστασης για τοπικά δίκτυα. Οι κόμβοι του δικτύου χωρίζονται σε ενεργούς και παθητικούς. Οι ενεργοί κοινοποιούν τις διαδρομές τους στους υπόλοιπους. Οι παθητικοί δεν κάνουν κοινοποιήσεις αλλά δέχονται RIP μηνύματα τα οποία τα χρησιμοποιούν για ενημέρωση του πίνακα δρομολόγησης τους. Από τα στοιχεία-κόμβους του δικτύου, οι δρομολογητές εκτελούν το πρωτόκολλο σε ενεργητική κατάσταση ενώ οι υπολογιστές υπηρεσίας σε παθητική.

Οι δρομολογητές εκπέμπουν περιοδικά ένα μήνυμα ενημέρωσης δρομολόγησης (κάθε 30 δευτερόλεπτα). Το μήνυμα αυτό περιλαμβάνει πληροφορίες από την τρέχουσα βάση δεδομένων του δρομολογητή και περιέχει ένα σύνολο ζευγών, όπου κάθε ζεύγος αποτελείται από μια δικτυακή διεύθυνση IP και μια ακέραια απόσταση από το δίκτυο (δίκτυο προορισμού, σχετική απόσταση). Οι αποστάσεις υπολογίζονται από ένα μετρικό σύστημα καταμέτρησης αλμάτων. Σύμφωνα με το σύστημα αυτό, ο δρομολογητής απέχει ένα άλμα από το άμεσα συνδεδεμένο δίκτυο, δύο άλματα από δίκτυο που προσπελαύνεται μέσω έτερου δρομολογητή κ.ο.κ. Τελικά, το πλήθος των αλμάτων κατά μήκος της διαδρομής που συνδέει μια προέλευση με έναν προορισμό αναφέρεται στον αριθμό των δρομολογητών που συναντά στην πορεία του κάποιου πακέτο. Η χρήση της μεθόδου αυτής δε φέρνει πάντα τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα. Έστω μια διαδρομή με 3 άλματα η οποία διασταυρώνεται με τρία δίκτυα Ethernet. Αυτή η διαδρομή μπορεί να είναι πολύ πιο γρήγορη από μια διαδρομή με 2 άλματα που διασταυρώνεται με δορυφορικές συνδέσεις. Πολλές από τις RIP υλοποιήσεις επιτρέπουν στους διαχειριστές να διευθετούν με τεχνητό τρόπο μεγάλες μετρήσεις αλμάτων κατά την κοινοποίηση συνδέσεων προς αργά δίκτυα. Αυτό γίνεται για να αντισταθμίζονται οι διαφορετικές τεχνολογίες.

Το Πρωτόκολλο Πληροφοριών Δρομολόγησης προβλέπει μερικούς κανόνες για βελτίωση της απόδοσης και της αξιοπιστίας εφαρμόζοντας τη μέθοδο της υστέρησης, μη αντικαθιστώντας ένα δρομολόγιο με κάποιο άλλο ίδιου κόστους. Έστω το παρακάτω δίκτυο (Σχήμα 5).

Αν οι δρομολογητές R2 και R5 κοινοποιήσουν και οι δύο το Net1 με κόστος 2, οι δρομολογητές R3 και R4 θα εγκαταστήσουν ένα νέο δρομολόγιο που θα περνά από το δρομολογητή που έστειλε πρώτος την κοινοποίηση.

Σε περίπτωση κατάρρευσης κάποιου στοιχείου του δικτύου, το πρωτόκολλο ορίζει πως όλοι οι δέκτες του μηνύματος που κοινοποιεί το στοιχείο που κατέρρευσε θα πρέπει να καθορίζουν χρόνους αναμονής για τα δρομολόγια που μαθαίνουν. Αφού εγκαταστήσει ένα δρομολόγιο στον πίνακά του κάποιος δρομολογητής, ενεργοποιεί ένα χρονόμετρο που θα ανανεώνεται σε κάθε λήψη μηνύματος που κοινοποιεί το συγκεκριμένο δρομολόγιο. Αν περάσουν 3 λεπτά (180 δευτερόλεπτα) χωρίς ανανέωση της κοινοποίησης του δρομολογίου, το δρομολόγιο ακυρώνεται.

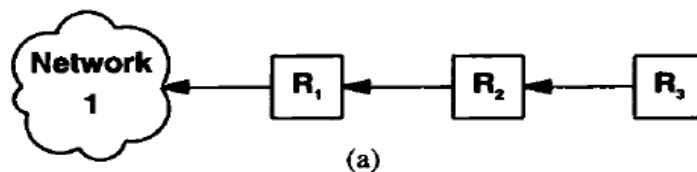


Σχήμα 5: Αναπαράσταση ενός δικτύου με υποδίκτυα

Όλα τα στοιχεία του δικτύου που υλοποιούν το πρωτόκολλο ακούνε όλα τα μηνύματα και ενημερώνουν τους πίνακές τους σύμφωνα με τον αλγόριθμο Bellman-Ford που μελετήσαμε νωρίτερα. Ο αλγόριθμος Bellman-Ford δημιουργεί 3 προβλήματα στο πρωτόκολλο :

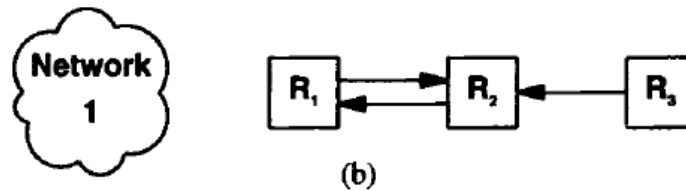
- ο αλγόριθμος δεν εντοπίζει ρητά τους όποιους βρόχους δρομολόγησης κι έτσι το πρωτόκολλο θα πρέπει είτε να θεωρεί δεδομένη την αξιοπιστία των στοιχείων που συμμετέχουν είτε να λάβει κατάλληλα μέτρα
- το πρωτόκολλο πρέπει να χρησιμοποιεί χαμηλή τιμή για τη μέγιστη δυνατή απόσταση για αποφυγή ασταθειών, είτε τμηματοποιώντας το διαδίκτυο είτε χρησιμοποιώντας κάποιο εναλλακτικό πρωτόκολλο. Το πρωτόκολλο RIP ορίζει ως μέγιστη δυνατή απόσταση (άπειρο) το 16 (σε άλματα)
- ο αλγόριθμος, όπως αναφέραμε και στην αντίστοιχη ενότητα, μπορεί να προκαλέσει προβλήματα αργής σύγκλισης ή μέτρησης στο άπειρο

Το πρόβλημα της αργής σύγκλισης ή μέτρησης στο άπειρο προκαλεί και ασυνέπειες στους πίνακες δρομολόγησης λόγω των αργών ρυθμών διάδοσης των μηνυμάτων ενημέρωσης. Έστω το δίκτυο του παρακάτω σχήματος(Σχήμα 6).



Σχήμα 6: Ο δρομολογητής R1 είναι σε άμεση σύνδεση με το Δίκτυο 1

Ο δρομολογητής R1 συνδέεται άμεσα με το δίκτυο. Αυτό σημαίνει πως στον πίνακά του υπάρχει καταχώρηση με το δρομολόγιο απόστασης 1. Το δρομολόγιο αυτό συμπεριλαμβάνεται στις περιοδικές του μεταδόσεις. Επομένως, ο δρομολογητής R2 έχει μάθει το δρομολόγιο από τον R1, το έχει καταχωρίσει με τη σειρά του στο δικό του πίνακα και το κοινοποιεί με απόσταση 2. Ομοίως για το δρομολογητή 3, που έχει μάθει για το δρομολόγιο από τον R2 και το κοινοποιεί με απόσταση 3. Έστω τώρα ότι συμβαίνει μια κατάρρευση της σύνδεσης του δρομολογητή R1 με το δίκτυο. Ο δρομολογητής R1 θα ενημερώσει την απόσταση στον πίνακα του σε άπειρο (16). Στην επόμενη μετάδοση, ο δρομολογητής θα αναφέρει το δρομολόγιο με το μεγαλύτερο κόστος. Έστω όμως, ότι ο δρομολογητής R2 κοινοποιεί τα δρομολογία του αμέσως μετά τη διακοπή της σύνδεσης του R1. Ο R1 θα λάβει το μήνυμα του R2, θα δει ότι πρόκειται για δρομολόγιο με χαμηλότερο κόστος προς το δίκτυο και θα υπολογίσει πως πλέον χρειάζονται 3 άλματα για το δίκτυο 1. Στη συνέχεια εγκαθιδρύει καινούριο δρομολόγιο που περνάει από τον R2. Στο σημείο αυτό, αν ο R2 ή ο R3 λάβουν πακέτο με προορισμό το δίκτυο, το πακέτο θα δρομολογείται μέσα σε ένα βρόχο, όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα, μέχρι να λήξει ο χρόνος ζωής του.



Σχήμα 7: Δημιουργία βρόχου μεταξύ των δρομολογητών έπειτα από κατάρρευση της σύνδεσης του δρομολογητή R1 με το δίκτυο

Έχουν προταθεί μια σειρά από ενδιαφέρουσες τεχνικές για την επίλυση του προβλήματος της αργής σύγκλισης (και της μέτρησης στο άπειρο) που προκαλεί ο αλγόριθμος δρομολόγησης Bellman-Ford. Ήδη, στο αντίστοιχο κεφάλαιο, αναφέραμε την τεχνική του split horizon (όπου ο δρομολογητής δε διαδίδει τις πληροφορίες κάποιου δρομολογίου στην ίδια διασύνδεση από όπου προήλθε το δρομολόγιο). Στο προηγούμενο παράδειγμα, η τεχνική αυτή θα απαγορεύει από τον δρομολογητή R2 να κοινοποιήσει το δρομολόγιο προς το δίκτυο στον δρομολογητή R1. Έτσι, ο R1, εφόσον έχει χάσει τη σύνδεση με το δίκτυο, θα πρέπει να πάψει να κοινοποιεί το δρομολόγιο.

Επιπλέον, έχουμε ήδη αναπτύξει το φαινόμενο της γρήγορης εξάπλωσης των καλών νέων και της αργής εξάπλωσης των άσχημων νέων, που αποτελεί μια διαφορετική οπτική αντιμετώπισης του προβλήματος.

Μια διαφορετική τεχνική χρησιμοποιεί τη μέθοδο διατήρησης κλειστού (hold down) που αναγκάζει το δρομολογητή να αγνοήσει για κάποιο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα πληροφορίες σχετικές με κάποιο δίκτυο αν έχει ωριότερα λάβει μήνυμα που αναγγέλλει τη μη προσβασιμότητά του. Ο σκοπός της τεχνικής είναι η δημιουργία μιας περιόδου αναμονής αρκετή έτσι ώστε όλες οι μηχανές να προλάβουν να μάθουν τα άσχημα νέα.

Τέλος, χρησιμοποιείται και η τεχνική poison reverse, όπου ο δρομολογητής που κοινοποιεί τη σύνδεση που κατέρρευσε διατηρεί την καταχώριση για αρκετές περιόδους ενημέρωσης και συμπεριλαμβάνει στις μεταδόσεις το 'άπειρο' κόστος. Η τεχνική συνδυάζεται με τις πυροδοτούμενες ενημερώσεις που αναγκάζουν ένα δρομολογητή να στείλει κατευθείαν μήνυμα μόλις λάβει τα άσχημα νέα.

Παρόλο που οι παραπάνω τεχνικές λύνουν ορισμένα προβλήματα, δημιουργούν άλλα. Ωστόσο, πολλοί είναι αυτοί που εξακολουθούν να χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο σε δίκτυα ευρείας περιοχής.

Η μορφή των μηνυμάτων RIP για την έκδοση 1 του πρωτοκόλλου είναι η εξής:

0	8	16	24	31
ΕΝΤΟΛΗ	ΕΚΔΟΣΗ (1)	ΠΡΕΠΕΙ ΝΑ ΕΙΝΑΙ ΜΗΔΕΝ (Α)		
ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑ ΔΙΚΤΥΟΥ 1		ΠΡΕΠΕΙ ΝΑ ΕΙΝΑΙ ΜΗΔΕΝ (Β)		
ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ IP ΔΙΚΤΥΟΥ 1				
ΠΡΕΠΕΙ ΝΑ ΕΙΝΑΙ ΜΗΔΕΝ (Γ)				
ΠΡΕΠΕΙ ΝΑ ΕΙΝΑΙ ΜΗΔΕΝ (Δ)				
ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΔΙΚΤΥΟ 1				
(όπως για το δίκτυο 1 συνεχίζεται για τα υπόλοιπα δίκτυα)				

Οι δυνατές εντολές είναι 11 και αφορούν σε:

- ▲ Αίτηση για τμηματικές ή πλήρεις πληροφορίες
- ▲ Απάντηση που περιλαμβάνει ζεύγη δικτύου-απόστασης από τον πίνακα του αποστολέα
- ▲ Ενεργοποίηση κατάστασης παρακολούθησης
- ▲ Απενεργοποίηση κατάστασης παρακολούθησης
- ▲ Δέσμευση για εσωτερική χρήση από τη Sun Microsystems
- ▲ Αίτηση ενημέρωσης
- ▲ Απάντηση σε ενημέρωση
- ▲ Επιβεβαίωση ενημέρωσης

Η έκδοση 2 του πρωτοκόλλου περιλαμβάνει στη μορφή του μηνύματος επιπλέον πληροφορίες που αφορούν σε ένα συγκεκριμένο επόμενο άλμα και σε μία σαφή μάσκα υποδικτύου. Οι πληροφορίες αυτές καταλαμβάνουν μερικές από τις οκτάδες που περιείχαν μηδενικά στην έκδοση 1. Πιο συγκεκριμένα, η οκτάδα Β περιέχει πλέον μια ετικέτα δρομολογίου για το τρέχον δίκτυο (για το δίκτυο 1, 2 κτλ). Η οκτάδα Γ, η πρώτη οκτάδα μηδενικών για τις πληροφορίες καθενός δικτύου, πλέον περιλαμβάνει τη μάσκα υποδικτύου για το τρέχον δίκτυο (δίκτυο 1,2 κτλ), ενώ η οκτάδα Δ, πλέον περιλαμβάνει το επόμενο άλμα για το κάθε δίκτυο (δίκτυο 1,2 κτλ).

4.1.2 Interior Gateway Routing Protocol

Το πρωτόκολλο IGRP είναι πρωτόκολλο διανύσματος-απόστασης σχεδιασμένο από τη Cisco.

Το IGRP είναι ιδιόκτητο πρωτόκολλο που σχεδιάστηκε εν μέρει για να υπερνικήσει τους περιορισμούς του πρωτοκόλλου RIP (μέγιστη μέτρηση άλματος και μόνο μία μετρική) κατά την εφαρμογή σε μεγάλα δίκτυα. Το παρόν πρωτόκολλο υποστηρίζει πολλαπλές μετρικές για κάθε δρομολογητή (εύρος ζώνης, καθυστέρηση, φορτίο, αξιοπιστία). Οι μετρικές αυτές χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό δημιουργώντας μία μετρική για τη σύγκριση δύο δρομολογίων.

Το πρωτόκολλο θεωρείται πρωτόκολλο δρομολόγησης με κλάσεις. Δε διαθέτει πεδίο για subnet mask, για αυτό ο δρομολογητής θεωρεί πως όλες οι διευθύνσεις της ίδιας κλάσης (Α,Β, C) έχουν το

ίδιο subnet mask με το subnet mask που έχει ρυθμιστεί για τις εν λόγω διασυνδέσεις.

Συγκρινόμενο με το πρωτόκολλο RIP επαναλαμβάνουμε πως υπάρχει διαφορά υπεροχής υπέρ του IGRP όσον αφορά σε περιορισμούς που βάζει το πρώτο σε σχέση με το μέγιστο άλμα και τις μετρικές. Συγκεκριμένα, το RIP έχει μέγιστη μέτρηση άλματος το 16 ενώ το IGRP το 255. Επιπλέον, το RIP έχει μόνο μία μετρική ενώ το IGRP υποστηρίζει μια σειρά από μετρικές, όπως αναφέρθηκε. Επιπλέον, στο πρωτόκολλο IGRP οι ανανεώσεις δρομολογίων γίνονται κάθε 90 δευτερόλεπτα.

Δεδομένου ότι το πρωτόκολλο IGRP είναι πρωτόκολλο που υποστηρίζει κλάσεις, μπορεί να συγκριθεί με τα πρωτόκολλα που δεν τις υποστηρίζουν. Τα πρωτόκολλα αυτά χρησιμοποιούν subnet masks μεταβλητού μήκους. Έτσι, τα πρωτόκολλα που στηρίζουν κλάσεις, όπως το IGRP έχασαν τη δημοφιλία τους διότι σπαταλούσαν χώρο στις διευθύνσεις IP.

Το Ενισχυμένο IGRP είναι η ενισχυμένη έκδοση του IGRP πρωτοκόλλου. Χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο DUAL (Diffusing Update Algorithm). Ο αλγόριθμος αυτός εγγυάται λειτουργία χωρίς βρόχους σε κάθε χρονική στιγμή κατά τον υπολογισμό ενός δρομολογίου και επιτρέπει σε όλους τους δρομολογητές που περιπλέκονται σε μια αλλαγή τοπολογίας να συγχρονιστούν την ίδια στιγμή. Οι δρομολογητές που δεν επηρεάζονται από τις αλλαγές δε συμμετέχουν στους υπολογισμούς. Ο χρόνος σύγκλισης με εφαρμογή του αλγορίθμου αυτού είναι ο καλύτερος σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο πρωτόκολλο δρομολόγησης.

Το Ενισχυμένο Πρωτόκολλο είναι ένα υβριδικό πρωτόκολλο συνδυάζοντας χαρακτηριστικά ενός πρωτοκόλλου διανύσματος απόστασης και ενός πρωτοκόλλου κατάστασης συνδέσμου και υπερέχει της προηγούμενης έκδοσής του (IGRP) και αναφορικά με τα χαρακτηριστικά σύγκλισης και τη λειτουργική αποδοτικότητα.

Επιπλέον, αν και η αρχική υλοποίηση του IGRP λειτουργούσε σε IP δίκτυα, το Ενισχυμένο πρωτόκολλο επεκτείνει το IGRP έτσι ώστε να είναι ανεξάρτητο του πρωτοκόλλου στο επίπεδο δικτύου.

Το Ενισχυμένο πρωτόκολλο διαθέτει τα παρακάτω χαρακτηριστικά :

- Γρήγορη σύγκλιση
- Μερική ανανέωση (το πρωτόκολλο στέλνει επιμέρους αυξητικές ανανεώσεις όταν αλλάζει η κατάσταση ενός προορισμού, αντί να στέλνει όλες τις πληροφορίες που περιλαμβάνει ο πίνακας δρομολόγησης επιφέροντας μείωση του εύρους ζώνης που απαιτούν τα πακέτα του πρωτοκόλλου)
- Λιγότερη χρήση της ΚΜΕ σε σχέση με το IGRP (δεν γίνεται επεξεργασία σε πλήρη πακέτα αλλά σε επιμέρους)
- Μηχανισμός εντοπισμού γειτόνων
- Subnet masks μεταβλητού μήκους
- Αυθαίρετη περίληψη δρομολογίου στην IP
- Κλιμακοσιμότητα

Επιπλέον, το Ενισχυμένο Πρωτόκολλο αποτελείται από τέσσερα βασικά στοιχεία:

- Ανακάλυψη γειτόνων (εντοπίζει δυναμικά τους άλλους δρομολογητές που τρέχουν IGRP/EIGRP και ανακαλύπτει την κατάστασή τους, σχηματίζει δυναμικές γειτονικές σχέσεις)
- Αξιόπιστο πρωτόκολλο μεταφορών (υπεύθυνο για την εγγυημένη και ταξινομημένη διανομή των πακέτων στους γείτονες)
- DUAL πεπερασμένη μηχανή καταστάσεων (εμπεριέχει τη διαδικασία απόφασης για όλους τους υπολογισμούς δρομολογίων)
- Modules που εξαρτώνται από το πρωτόκολλο (υπεύθυνα για εργασίες που είναι συγκεκριμένες για το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται στο επίπεδο δικτύου)

4.2 Interior Gateway Routing (link-state)

4.2.1 Αλγόριθμος Shortest Path First

Όπως έχουμε αναφέρει στο προηγούμενο κεφάλαιο, υπάρχουν αλγόριθμοι δρομολόγησης που βασίζονται στη μέθοδο δρομολόγησης διανύσματος απόστασης και αλγόριθμοι δρομολόγησης που βασίζονται στη μέθοδο δρομολόγησης κατάστασης συνδέσμων. Δεδομένων των προβλημάτων που αντιμετωπίζουν οι αλγόριθμοι διανύσματος απόστασης, και τα οποία μελετήσαμε στην αντίστοιχη παράγραφο, (κλιμακοσιμότητα, αργή ανταπόκριση σε αλλαγές κ.ά), οι αλγόριθμοι κατάστασης συνδέσμων έχουν προταθεί ως εναλλακτικοί.

Οι αλγόριθμοι κατάστασης συνδέσμων ονομάζονται και αλγόριθμοι Συντομότερης Διαδρομής Πρώτα (Shortest Path First – SPF). Ο SPF αλγόριθμος απαιτεί κάθε δρομολογητή του δικτύου στο οποίο εφαρμόζεται να έχει γνώση της πλήρους τοπολογίας του δικτύου. Αυτό σημαίνει, πως, για παράδειγμα, ο κάθε δρομολογητής διαθέτει ένα χάρτη με όλους τους υπόλοιπους δρομολογητές του δικτύου και τα δίκτυα με τα οποία είναι συνδεδεμένοι. Επαναλαμβάνουμε πως, σύνδεσμος μεταξύ δύο κόμβων δρομολογητών υπάρχει αν οι κόμβοι δρομολογητές συνδέονται με φυσικό τρόπο.

Οι δρομολογητές που συμμετέχουν στον αλγόριθμο SPF εκτελούν τις παρακάτω δύο εργασίες:

- ♣ Ελέγχουν την κατάσταση των γειτονικών τους δρομολογητών
- ♣ Διαδίδουν περιοδικά την κατάσταση των συνδέσμων στους υπόλοιπους δρομολογητές

Η πρώτη εργασία γίνεται με ανταλλαγή σύντομων μηνυμάτων (περιοδική ανταλλαγή) μεταξύ γειτόνων για να εξετάσουν την προσπελασιμότητά τους. Αν κάποιος γείτονας απαντήσει σε ένα τέτοιο μήνυμα σημαίνει πως ο σύνδεσμος είναι ενεργός. Διαφορετικά, ο σύνδεσμος είναι ανενεργός.

Η ενημέρωση των καταστάσεων των συνδέσμων γίνεται με αποστολή μηνυμάτων από κάθε δρομολογητή (επίσης περιοδικά). Τα μηνύματα κατάστασης δεν προσδιορίζουν μονοπάτια, παρά μόνον επιβεβαιώνουν τη δυνατότητα ή όχι επικοινωνίας μεταξύ ζευγών δρομολογητών. Το πρωτόκολλο που υλοποιείται έχει την ευθύνη να παραδώσει αντίγραφο κάθε μηνύματος που περιέχει την κατάσταση συνδέσμου σε όλους τους σχετικούς δρομολογητές.

Κάθε φορά που ένα μήνυμα κατάστασης συνδέσμου φτάνει σε ένα δρομολογητή, αυτός

χρησιμοποιεί τις πληροφορίες, ενημερώνει το χάρτη διαδικτύου που διαθέτει (πίνακα) ενεργοποιώντας ή απενεργοποιώντας συνδέσεις. Με κάθε αλλαγή της κατάστασης ενός συνδέσμου υπολογίζονται ξανά τα δρομολόγια με χρήση του αλγορίθμου του Dijkstra που έχουμε ήδη μελετήσει σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Στα πλεονεκτήματα του αλγορίθμου συγκαταλέγονται, ο υπολογισμός των δρομολογίων σε κάθε δρομολογητή ανεξάρτητα από τους υπόλοιπους δρομολογητές χρησιμοποιώντας τα αρχικά δεδομένα κατάστασης, η ευκολία στην επίλυση των προβλημάτων, λόγω της διάδοσης των μηνυμάτων χωρίς να υποστούν αλλαγές, και η σύγκλιση του αλγορίθμου. Τέλος, ένα σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί το μικρό μέγεθος των μηνυμάτων μιας και αφορούν μόνο σε γειτονικούς δρομολογητές. Οι αλγόριθμοι Συντομότερης Διαδρομής Πρώτα κλιμακώνονται καλύτερα από τους αλγορίθμους διανύσματος απόστασης.

4.2.2 Open Shortest Path First

Το πρωτόκολλο OSPF σχεδιάστηκε από μία ερευνητική ομάδα της IETF (Internet Engineering Task Force) για την προώθηση της τεχνολογίας κατάστασης συνδέσμων λόγω της αποδεδειγμένης υπεροχής της έναντι της τεχνολογίας διανυσμάτων απόστασης. Αυτό το εσωτερικό πρωτόκολλο πύλης δικτύου, χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο του Dijkstra και υλοποιεί μια σειρά από σημαντικά χαρακτηριστικά (όπως τη δρομολόγηση τύπου υπηρεσίας, την εξισορρόπηση φορτίου, την πιστοποίηση ανταλλαγών κ.ά.) τα οποία αναλύουμε στη συνέχεια.

Το πρωτόκολλο OSPF επεκτείνει τον αλγόριθμο κατάστασης συνδέσμων SPF που αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο. Το επεκταμένο πρωτόκολλο, όπως ορίζει και το όνομά του, έχει προδιαγραφή διαθέσιμη στη δημοσιευμένη βιβλιογραφία, το οποίο ενθάρρυνε πολλούς κατασκευαστές να το στηρίξουν με αποτέλεσμα να αποκτήσει δημοφιλία και να χρησιμοποιείται αντί πρωτοκόλλων αποκλειστικής εκμετάλλευσης. Η ουσιαστική διαφορά του με τον αλγόριθμο SPF είναι η ελαχιστοποίηση των μεταδόσεων που πραγματοποιεί μέσα από μια περίπλοκη τοπολογία. Το πρωτόκολλο δίνει τη δυνατότητα σε κάθε δίκτυο πολλαπλής πρόσβασης να έχει ένα συγκεκριμένο δρομολογητή που θα στέλνει μηνύματα κατάστασης συνδέσμου εκ μέρους όλων των συνδεδεμένων με το δίκτυο δρομολογητών. Τα μηνύματα που στέλνει ο 'αντιπρόσωπος' αναφέρουν την κατάσταση όλων των ακμών μεταξύ δικτύου και δρομολογητών του. Μια ακόμα σημαντική εξέλιξη του ανοιχτού πρωτοκόλλου είναι η αξιοποίηση των δυνατοτήτων εκπομπής υλικού για την παράδοση των μηνυμάτων κατάστασης συνδέσμων.

Το Ανοιχτό SPF πρωτόκολλο υποστηρίζει δρομολόγηση τύπου υπηρεσίας. Αυτό σημαίνει πως, οι διαχειριστές εγκαθιστούν πολλαπλά δρομολόγια προς κάποιον προορισμό, ένα δρομολόγιο για κάθε προτεραιότητα ή/και τύπο υπηρεσίας. Για την επιλογή του δρομολογίου γίνεται χρήση και της διεύθυνσης προορισμού και του πεδίου τύπου υπηρεσίας της IP κεφαλίδας. Το ανοιχτό πρωτόκολλο συγκαταλέγεται στα πρώτα πρωτόκολλα που υποστηρίζουν αυτή τη δυνατότητα.

Επιπλέον, το πρωτόκολλο παρέχει τη δυνατότητα, αν ένας διαχειριστής ορίσει πολλά δρομολόγια ίσου κόστους προς έναν προορισμό, να καταναίμει με ίσο τρόπο την κίνηση σε όλους τους δρομολογητές (εξισορρόπηση φορτίου). Και αυτό το χαρακτηριστικό αποτελεί πρωτοποριακό πλεονέκτημα του πρωτοκόλλου. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα του πρωτοκόλλου, για την εύκολη ανάπτυξη και διαχείριση των δικτύων σε κάθε τοποθεσία, είναι πως η κάθε μία (τοποθεσία) μπορεί να διαχωρίσει τα δίκτυά της και τους δρομολογητές της σε περιοχές. Οι περιοχές χαρακτηρίζονται με αυτονομία αναφορικά με τη γνώση της τοπολογίας τους. Με τον τρόπο αυτό παρέχεται η δυνατότητα συνεργασίας πάνω στο πρωτόκολλο για πολλές περιοχές μιας συγκεκριμένης τοποθεσίας διατηρώντας,

ταυτόχρονα, το δικαίωμά τους να αλλάζουν την τοπολογία των εσωτερικών τους δικτύων.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του πρωτοκόλλου είναι η δυνατότητα πιστοποίησης όλων των ανταλλαγών μεταξύ δρομολογητών. Υποστηρίζονται πολλά μοντέλα πιστοποίησης και επιπλέον, παρέχεται η δυνατότητα να επιλέγεται διαφορετικό μοντέλο σε κάθε περιοχή. Ο σκοπός της πιστοποίησης είναι η εγγύηση της μετάδοσης των πληροφοριών από έμπιστους δρομολογητές. Έστω ότι χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο RIP1 χωρίς πιστοποίηση. Αν κάποιος θελήσει να μεταδώσει μηνύματα RIP από κάποιον υπολογιστή για κοινοποίηση δρομολογίων χαμηλού κόστους, τα υπόλοιπα στοιχεία που εκτελούν το ίδιο πρωτόκολλο θα ανανεώσουν τα δρομολόγιά τους και θα στέλνουν αυτοδύναμα πακέτα προς τον υπολογιστή που μετέδωσε τα μηνύματα.

Επιπλέον, το πρωτόκολλο υποστηρίζει είδη δρομολογίων, όπως τα δρομολόγια για συγκεκριμένους υπολογιστές και υποδίκτυα, που είναι απαραίτητα σε μεγάλα υποδίκτυα. Το πρωτόκολλο υποστηρίζει και τη δυνατότητα περιγραφής εικονικής τοπολογίας δικτύων για μεγαλύτερη ευελιξία. Ένας εικονικός σύνδεσμος μπορεί να διευθετηθεί μεταξύ δύο δρομολογητών ακόμα κι αν η φυσική σύνδεσή τους απαιτεί μεσολάβηση ενός ενδιάμεσου δικτύου.

Τέλος, παρέχεται η δυνατότητα στους δρομολογητές να πραγματοποιούν ανταλλαγή πληροφοριών δρομολόγησης προερχόμενες από εξωτερικές τοποθεσίες. Η μορφή των μηνυμάτων που προέρχονται από εξωτερικές πηγές και των αντίστοιχων μηνυμάτων εσωτερικών δρομολογητών διαφέρουν με σαφή τρόπο οπότε δεν τίθεται κανένα ζήτημα προέλευσης ή αξιοπιστίας.

Η σταθερή επικεφαλίδα των μηνυμάτων OSPF αποτελείται από 24 οκτάδες και έχει την εξής μορφή:

0	8	16	24	31
ΕΚΔΟΣΗ(1)	ΤΥΠΟΣ	ΜΗΚΟΣ ΜΗΝΥΜΑΤΟΣ		
ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ IP ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΤΗ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ				
ID ΠΕΡΙΟΧΗΣ				
ΑΘΡΟΙΣΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ		ΤΥΠΟΣ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ		
ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ (οκτάδες 0-3)				
ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ (οκτάδες 4-7)				

Στο πεδίο ΕΚΔΟΣΗ προσδιορίζεται η έκδοση του πρωτοκόλλου ενώ στο πεδίο ΤΥΠΟΣ ο τύπος του μηνύματος. Υπάρχουν 5 διαφορετικοί τύποι μηνυμάτων για το OSPF πρωτόκολλο. Σε κάθε έναν τύπο αντιστοιχεί ένας αριθμός (από το 1 έως το 5) που τοποθετείται στο αντίστοιχο πεδίο. Οι τύποι είναι οι εξής:

- ♣ Hello (για έλεγχο προσπελασιμότητας)
- ♣ Περιγραφή βάσης δεδομένων (τοπολογία)
- ♣ Αίτηση κατάστασης συνδέσμου
- ♣ Ενημέρωση κατάστασης συνδέσμου
- ♣ Επιβεβαίωση κατάστασης συνδέσμου

Κάθε τύπος από αυτούς τους πέντε έχει τη δική του κεφαλίδα με ειδικά πεδία για κάθε περίπτωση.

4.2.3 Intermediate System - Intermediate System

Ένα ομοίως δημοφιλές πρωτόκολλο είναι το πρωτόκολλο IS-IS που σχεδιάστηκε από την Digital Equipment Corporation και χρησιμοποιείται εκτενώς από τους παρόχους υπηρεσιών. Το πρωτόκολλο επιτρέπει γρήγορη σύγκλιση με μεγάλη κλιμακοσιμότητα. Επιπλέον, είναι ένα ιδιαίτερος ευέλικτο πρωτόκολλο με επεκτάσεις για διάφορες απαιτήσεις.

Το πρωτόκολλο, ως πρωτόκολλο που βασίζεται στη μέθοδο κατάστασης συνδέσμου, εκτός της γρήγορης σύγκλισης είναι ελάχιστα ευαίσθητο στους βρόχους δρομολόγησης. Στα κυριότερα χαρακτηριστικά του συγκαταλέγονται :

- η υποστήριξη ιεραρχικής δρομολόγησης
- η γρήγορη μετάδοση νέας πληροφορίας (flooding)
- η γρήγορη σύγκλιση
- η υψηλή κλιμακοσιμότητα
- το ευέλικτο ρολόι
- η δυνατότητα δρομολόγησης πολλαπλών περιοχών
- η δυνατότητα εφαρμογής διαρροής στη διαδρομή
- η δυνατότητα εφαρμογής bit υπερφόρτωσης

Το πρωτόκολλο IS-IS λειτουργεί 'πλημμυρίζοντας' την πληροφορία κατάστασης συνδέσμου στο δίκτυο. Κάθε δρομολογητής χτίζει, ανεξάρτητα από τους υπόλοιπους, μια βάση δεδομένων (πίνακα) όπου αποθηκεύει την τοπολογία του δικτύου, αθροίζοντας την πληροφορία του δικτύου. Όμοια με το προηγούμενο πρωτόκολλο κατάστασης συνδέσμων, το IS-IS χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο του Dijkstra για τον υπολογισμό του καλύτερου μονοπατιού.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι ομοιότητες και, κυρίως, οι διαφορές μεταξύ των δύο IGP πρωτοκόλλων κατάστασης συνδέσμου.

OSPF	IS-IS
Πρωτόκολλα κατάστασης συνδέσμου	
Χρησιμοποιούν τον αλγόριθμο του Dijkstra για τον υπολογισμό του καλύτερου (συντομότερου) μονοπατιού	
Υποστηρίζουν subnet masks μεταβλητού μήκους	
Χρησιμοποιούν multicast για τον εντοπισμό των γειτονικών δρομολογητών	
Υποστηρίζουν πιστοποίηση	
Δρομολογεί IP	Δεν χρησιμοποιεί IP για τη μεταφορά πληροφοριών δρομολόγησης
Σχεδιάστηκε για IPv4 και ξαναγράφηκε για να υποστηρίξει IPv6	Ουδέτερο οπότε μπορεί να υποστηρίξει οποιοδήποτε τύπο διευθύνσεων
Διαφέρουν στις μεθόδους αξιόπιστης πλημμύρας της τοπολογίας και αλλαγής πληροφοριών τοπολογίας στο δίκτυο	
Υποστηρίζει περισσότερα χαρακτηριστικά και extensions	Πιο λιτό δίδοντας τη δυνατότητα κλιμάκωσης για υποστήριξη μεγάλων δικτύων
Δοθέντος του ίδιου συνόλου πόρων, το IS-IS υποστηρίζει περισσότερους δρομολογητές σε συγκεκριμένη περιοχή	

Πίνακας 3: Σύγκριση πρωτοκόλλων OSPF και IS-IS

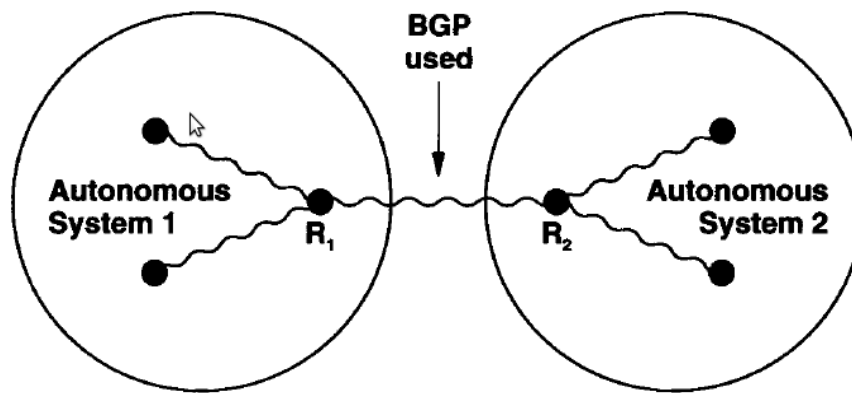
4.3 Exterior Gateway Routing

4.3.1 Border Gateway Routing

Τα πρωτόκολλα Εξωτερικής Πύλης Δικτύου χρησιμοποιούνται για τη μεταβίβαση πληροφοριών δρομολόγησης μεταξύ δύο αυτόνομων συστημάτων. Το μόνο πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται στα TCP/IP δίκτυα αυτή τη στιγμή, σε αυτή την κατηγορία είναι το Πρωτόκολλο Συνοριακής Πύλης Δικτύου (BGP).

Όταν δύο αυτόνομα συστήματα συμφωνήσουν στην ανταλλαγή πληροφοριών δρομολόγησης, το καθένα ορίζει ένα δρομολογητή αντιπρόσωπο που το πρωτόκολλο θα μιλά εκ μέρος του. Οι δύο αυτοί δρομολογητές των δύο συστημάτων ονομάζονται ομότιμοι. Ο δρομολογητής αντιπρόσωπος επιλέγει να επικοινωνήσει με ομότιμη μηχανή που θα βρίσκεται κοντά στα σύνορα του αυτόνομου συστήματος, για μείωση της απόστασης. Η μηχανή αυτή ονομάζεται συνοριακή πύλη ή συνοριακός δρομολογητής και φαίνεται στο επόμενο σχήμα.

Το κύριο χαρακτηριστικό του πρωτοκόλλου είναι πως δεν πρόκειται για γνήσιο πρωτόκολλο διανύσματος - απόστασης ούτε για πρωτόκολλο κατάστασης συνδέσμου. Παρακάτω αναφέρουμε τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου :



Σχήμα 8: Εφαρμογή BGP πρωτοκόλλου μεταξύ αυτόνομων συστημάτων. Οι δρομολογητές R1 και R2 αποτελούν τις ομότιμες μηχανές κάθε συστήματος

- **Επικοινωνία μεταξύ αυτόνομων συστημάτων** : ως πρωτόκολλο EGP ο ρόλος του είναι να επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ αυτόνομων συστημάτων
- **Συντονισμός μεταξύ πολλαπλών ομιλητών BGP**: το πρωτόκολλο παίζει το ρόλο του συντονιστή για τους δρομολογητές ενός δικτύου όπου ο καθένας επικοινωνεί με κάποιον ομότιμο σε κάποιο αυτόνομο σύστημα, έτσι ώστε να είναι εξασφαλισμένη η συνέπεια στη μετάδοση των δεδομένων
- **Διάδοση πληροφοριών προσπελασιμότητας** : κοινοποίηση και ενημέρωση για προσπελάσιμους προορισμούς
- **Υπόδειγμα επόμενου άλματος** : παρέχει πληροφορίες επόμενου άλματος (με όμοιο τρόπο που η ίδια λειτουργία υλοποιείται στα πρωτόκολλα διανύσματος απόστασης)
- **Υποστήριξη πολιτικής** : ένας δρομολογητής που εκτελεί το πρωτόκολλο έχει τη δυνατότητα να διευθετηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να διακρίνει τις ομάδες των προορισμών που είναι προσπελάσιμοι από τους υπολογιστές που ανήκουν στο αυτόνομο σύστημά του από τις ομάδες προορισμών που κοινοποιούνται στα άλλα συστήματα
- **Αξιόπιστη μεταφορά** : προϋποθέτει αξιόπιστη μεταφορά, χρησιμοποιεί το TCP για όλες τις ανάγκες επικοινωνίας
- **Πληροφορίες διαδρομής** : οι κοινοποιήσεις περιλαμβάνουν πληροφορίες διαδρομής που δίνουν τη δυνατότητα σε έναν παραλήπτη να ενημερώνεται για τα αυτόνομα συστήματα που βρίσκονται κατά μήκος της διαδρομής προς τον προορισμό
- **Αυξητικές ενημερώσεις** : οι πλήρεις πληροφορίες ανταλλάσσονται μία φορά και τα μηνύματα που ακολουθούν μεταφέρουν αυξητικές αλλαγές
- **Υποστήριξη αταξικής διευθυνσιοδότησης** : το πρωτόκολλο δεν απαιτεί από τις διευθύνσεις να είναι αυτοπροσδιοριζόμενες αλλά παρέχει τη δυνατότητα αποστολής μάσκας μαζί με κάθε διεύθυνση

- **Συνάθροιση διαδρομών** : δίνει τη δυνατότητα στον αποστολέα να συγκεντρώνει πληροφορίες δρομολόγησης και στέλνει μία αντιπροσωπευτική καταχώριση για πολλούς προορισμούς, έτσι διατηρεί το εύρος ζώνης του δικτύου

- **Πιστοποίηση ταυτότητας μηνυμάτων** : στον παραλήπτη

Οι ομότιμοι δρομολογητές επιτελούν τρεις βασικές λειτουργίες :

- Συγκέντρωση και πιστοποίηση των αρχικών ομότιμων δρομολογητών : ενεργοποίηση σύνδεσης TCP και ανταλλαγή μηνυμάτων που εγγυούνται τη συμφωνία και των δύο συστημάτων για επικοινωνία

- Κάθε πλευρά στέλνει θετικές/αρνητικές πληροφορίες προσπελασιμότητας : ο αποστολέας μπορεί να κοινοποιήσει τους προσπελάσιμους προορισμούς δίνοντας ένα επόμενο άλμα για κάθε έναν από αυτούς, ή μπορεί να δηλώσει πως κάποιοι προηγούμενα προσπελάσιμοι προορισμοί πλέον δεν προσπελούνται. Αυτό είναι και το βασικότερο σημείο του πρωτοκόλλου

- Παροχή συνεχών επαληθεύσεων της σωστής λειτουργίας μεταξύ ομότιμων δρομολογητών και δικτυακών συνδέσεων

Για αυτές τις τρεις λειτουργίες ορίζονται τέσσερις τύποι μηνυμάτων, η OPEN που εκκινεί την επικοινωνία, η UPDATE που κοινοποιεί ή αποσύρει διαδρομές, η NOTIFICATION που απαντάει σε εσφαλμένο μήνυμα και η KEEPALIVE που ελέγχει ενεργά τη συνδεσιμότητα των ομότιμων μηχανών.

Η σταθερή επικεφαλίδα με την οποία ξεκινάει κάθε μήνυμα BGP είναι της μορφής:

0	16	24	31
ΣΗΜΕΙΩΤΗΣ ΣΗΜΕΙΩΤΗΣ ΣΗΜΕΙΩΤΗΣ ΣΗΜΕΙΩΤΗΣ			
ΜΗΚΟΣ		ΤΥΠΟΣ	

Οι τέσσερις σειρές του ΣΗΜΕΙΩΤΗ περιέχουν μια τιμή που χρησιμοποιείται και από τις δύο πλευρές επικοινωνίας για να ορίσουν την αρχή του μηνύματος. Στο πεδίο ΜΗΚΟΣ ορίζεται το συνολικό μήκος του μηνύματος και στο πεδίο ΤΥΠΟΣ, περιέχεται μία από τις τέσσερις τιμές για τις τέσσερις λειτουργίες που αναφέραμε προηγουμένως.

Το βασικότερο πρόβλημα των Πρωτοκόλλων εξωτερικής πύλης είναι ότι δε μεταφέρουν ούτε ερμηνεύουν μετρήσεις αποστάσεων, ακόμα κι αν αυτές είναι διαθέσιμες. Τα πρωτόκολλα αυτά, όπως το BGP δεν μπορούν να μεταδώσουν ή να συγκρίνουν το κόστος δύο διαδρομών, εκτός αν προέρχονται από το ίδιο αυτόνομο σύστημα. Το πρωτόκολλο μπορεί μόνο να προσδιορίσει την ύπαρξη του δρομολογίου προς κάποιον προορισμό αλλά όχι να υπολογίσει το συντομότερο δρομολόγιο προς αυτόν. Έτσι, τα πρωτόκολλα EGP συνήθως καλούνται πρωτόκολλα προσπελασιμότητας και όχι δρομολόγησης.

Υπό αυτή την έννοια, κάθε δίκτυο που χρησιμοποιεί αυτό το πρωτόκολλο για να παρέχει εξωτερικές πληροφορίες δρομολόγησης θα πρέπει είτε να βασίζεται στις πολιτικές είτε να θεωρεί όλες τις διαδρομές ισότιμες. Αυτός είναι ο περιορισμός που θέτουν τα πρωτόκολλα EGP και έχουν ως αποτέλεσμα μερικές επιπτώσεις :

- Κάθε στιγμή, όλη η κίνηση που δρομολογείται από έναν υπολογιστή σε ένα σύστημα προς το δίκτυο ενός άλλου συστήματος θα διασχίσει μία συγκεκριμένη διαδρομή ενώ, κατά πάσα πιθανότητα, υπάρχουν κι άλλες φυσικές συνδέσεις
- Αν δύο συστήματα συνδέονται μεταξύ τους με πολλούς δρομολογητές θα έπρεπε η κίνηση να διανέμεται εξίσου. Αυτή η δυνατότητα δίνεται από το πρωτόκολλο BGP (διανομή φόρτου ανάλογα με τα δίκτυα) όμως δεν υποστηρίζεται ευρύτερος καταμερισμός φόρτου
- Το πρωτόκολλο είναι ανεπαρκές για βέλτιστη δρομολόγηση σε αρχιτεκτονική με δύο ή περισσότερα δίκτυα ευρείας περιοχής που συνδέονται μεταξύ τους σε πολλά σημεία
- Το πρωτόκολλο δεν εγγυάται από μόνο του καθολική συνέπεια

4.4 Πρωτόκολλο PNNI

Το PNNI (private network – to – network interface ή private network – to -node interface, όπου ο κόμβος αναφέρεται σε έναν ATM switch) είναι ένα ιεραρχικό, δυναμικό πρωτόκολλο δρομολόγησης κατάστασης συνδέσμων για μεγάλα δίκτυα τεχνολογίας ATM και εφαρμόζεται μεταξύ δύο ATM switches του ίδιου δικτύου ή μεταξύ διαφορετικών, αυτόνομων ATM δικτύων.

Το πρωτόκολλο βρίσκει αυτόματα μονοπάτια στο δίκτυο χρησιμοποιώντας τεχνικές ανακάλυψης γειτόνων και στη συνέχεια βοηθάει στο να στηθούν SVCs (switched virtual circuits) μεταξύ τερματικών συστημάτων. Υπό την έννοια αυτή, το PNNI έχει διπλή υπόσταση, είναι και πρωτόκολλο δρομολόγησης και πρωτόκολλο σηματοδότησης.

Η φύση της σηματοδότησης αφορά στο στήσιμο εικονικών κυκλωμάτων (χρησιμοποιεί μηνύματα σηματοδότησης για να εγκαθιδρύσει επικοινωνία μεταξύ πολλαπλών δικτύων) ενώ οι λειτουργίες δρομολόγησης παρέχουν μηχανισμό δρομολόγησης των ATM κελιών μεταξύ switches ή αυτόνομων ATM δικτύων.

Το PNNI σχεδιάστηκε χρησιμοποιώντας ιδέες από το πρωτόκολλο δρομολόγησης κατάστασης συνδέσμων OSPF που μελετήσαμε νωρίτερα. Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του είναι η ικανότητα να υποστηρίζει την ενσωμάτωση switches ATM διαφόρων κατασκευαστών. Το πρωτόκολλο παρέχει ένα standard πρωτόκολλο σηματοδότησης έτσι ώστε ο ATM εξοπλισμός διαφόρων κατασκευαστών να μπορεί να ανταλλάσει πληροφορίες τοπολογίας δικτύου.

Η δομή της κεφαλίδας του μηνύματος του PNNI πρωτοκόλλου είναι της μορφής:

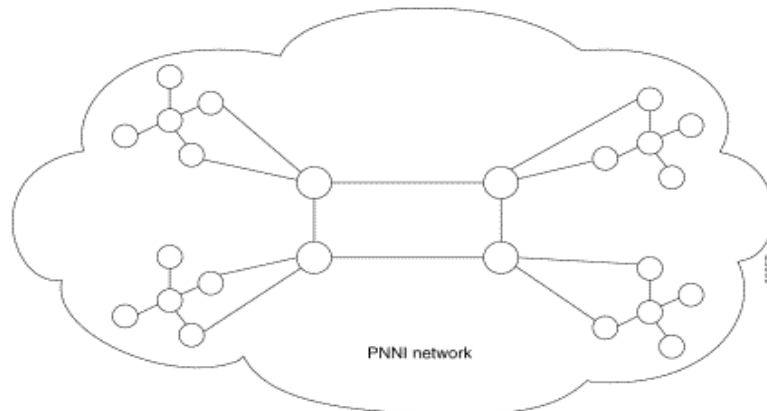
2 bytes	2 bytes	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte
Τύπος πακέτου	Μήκος πακέτου	Έκδοση πρωτοκόλλου	Νεώτερη έκδοση που υποστηρίζεται	Παλαιότερη έκδοση που υποστηρίζεται	Διατηρημένο

Το πρωτόκολλο PNNI υποστηρίζει 4 διαφορετικούς τύπους πακέτων:

- ▲ Hello (για αναγνώριση γειτονικών κόμβων στο ίδιο peer group)
- ▲ PTSP (PNNI Topology State Packet – προωθεί πληροφορίες τοπολογίας μεταξύ των ομάδων)
- ▲ PTSE (PNNI Topology State Element (Request – Ack) – μεταφέρει παραμέτρους τοπολογίας, όπως ενεργούς συνδέσμους, διαθέσιμο εύρος κτλ)
- ▲ Σύνοψη Βάσης Δεδομένων (χρησιμοποιείται κατά την αρχική ανταλλαγή βάσης δεδομένων με τοπολογικές πληροφορίες μεταξύ δύο γειτονικών peers)

Η έκδοση του πρωτοκόλλου δεν αφορά στην έκδοση του πρωτοκόλλου που χρησιμοποιείται αλλά στην έκδοση βάσει της οποίας δημιουργήθηκε το τρέχον πακέτο. Τα πεδία που αφορούν στην νεώτερη και στην παλαιότερη έκδοση που υποστηρίζεται περιέχονται για να μπορούν οι κόμβοι να διαπραγματεύονται την πιο πρόσφατη έκδοση του πρωτοκόλλου που μπορεί να γίνει κατανοητή και από τους δύο κόμβους που ανταλλάσσουν ένα πακέτο συγκεκριμένου τύπου.

Κατά το σχεδιασμό ενός PNNI δικτύου μπορούμε να επιλέξουμε από μια σειρά τοπολογίες δικτύου. Θα αναφέρουμε δύο από αυτές, την τοπολογία Single Peer Group και την Ιεραρχική τοπολογία ενός PNNI δικτύου (Σχήμα 9).

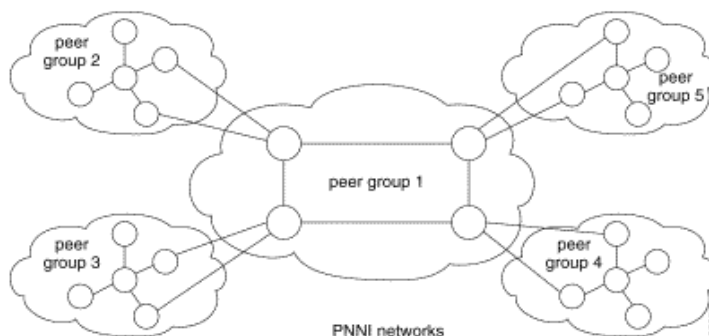


Σχήμα 9: Single peer group topology

Η τοπολογία single peer group αποτελεί ένα δίκτυο PNNI όπου όλοι οι κόμβοι του μοιράζονται πληροφορίες με όλους τους κόμβους. Κάθε κόμβος έχει δημιουργηθεί σε ένα δίκτυο single peer group, οπότε μαθαίνει όλες τις πληροφορίες για τους υπόλοιπους κόμβους όπως και αυτοί για τον νέο κόμβο. Όλοι οι κόμβοι έχουν την ικανότητα να αποφασίζουν διαδρομές προς όλους τους υπόλοιπους κόμβους μέσα σε ένα single peer group.

Η τοπολογία αυτής της μορφής είναι η πιο εύκολη από άποψη σχεδιασμού και στησίματος διότι δεν απαιτείται η ρύθμιση συνδέσεων με άλλα peer groups ή άλλους τύπους δικτύων. Το μέγεθος της τοπολογίας περιορίζεται εν μέρει από το μέγεθος της βάσης δεδομένων PNNI και από τους πόρους επεξεργασίας που απαιτούνται για τη διατήρησή της. Αν το μέγεθος του δικτύου αυξηθεί σε επίπεδα μεγαλύτερα των ικανοτήτων του, μπορεί να συνδεθεί σε άλλα δίκτυα και να σχηματιστεί μία από τις υπόλοιπες δυνατές τοπολογίες. Αναφέρουμε την Ιεραρχική.

Ένα Ιεραρχικό δίκτυο PNNI διασυνδέει πολλαπλά PNNI peer groups προς σχηματισμό ενός μεγαλύτερου δικτύου (Σχήμα 10). Η διαφορά μεταξύ της ιεραρχικής τοπολογίας και της τοπολογίας single peer group αφορά στην ομαδοποίηση των κόμβων, όπως φαίνεται και από τις δύο εικόνες. Στην ιεραρχική τοπολογία, η ομαδοποίηση των κόμβων δημιουργεί μικρότερες βάσεις δεδομένων στους κόμβους κάθε ομάδας και έτσι μειώνονται οι απαιτήσεις επεξεργασίας.



Σχήμα 10: Ιεραρχικό PNNI δίκτυο

4.5 Internet Group Management Protocol

Το πρωτόκολλο IGMP (Internet Group Management Protocol) είναι ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας που χρησιμοποιείται από δρομολογητές και υπολογιστές υπηρεσίας σε IP δίκτυα για εγκαθίδρυση συνδρομών πολυδιανομής σε ομάδες. Το πρωτόκολλο αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι του IP και πρότυπο για TCP/IP μιας και απαιτείται για όλα τα μηχανήματα (δρομολογητές, υπολογιστές υπηρεσίας) που συμμετέχουν στο επίπεδο 2 (επίπεδο συνδέσμου μετάδοσης δεδομένων).

Για να μπορεί ένας server να συμμετέχει σε μια πολυδιανομή IP ενός τοπικού δικτύου πρέπει να διαθέτει το κατάλληλο λογισμικό που θα του επιτρέπει την ανταλλαγή αυτοδύναμων πακέτων πολυδιανομής. Για να συμμετέχει σε πολυδιανομή πολλών δικτύων θα πρέπει να ενημερώσει τους τοπικούς δρομολογητές πολυδιανομής για αυτή του την πρόθεση. Οι δρομολογητές αυτοί επικοινωνούν με άλλους δρομολογητές πολυδιανομής, μεταβιβάζουν πληροφορίες που αφορούν στους συμμετέχοντες και δημιουργούν δρομολόγια. Για να μπορεί ένας δρομολογητής πολυδιανομής να μεταβιβάσει τις πληροφορίες συμμετοχής θα πρέπει να προσδιορίσει τους servers του τοπικού δικτύου που έχουν αποφασίσει να συμμετάσχουν στην ομάδα πολυδιανομής χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο IGMP.

Το πρωτόκολλο έχει δύο φάσεις:

▲ **Φάση 1:** όταν ένας νέος υπολογιστής συμμετέχει σε μια ομάδα πολυδιανομής στέλνει ένα μήνυμα IGMP στη διεύθυνση της ομάδας όπου θέλει να συμμετάσχει. Οι τοπικοί δρομολογητές που θα λάβουν το μήνυμα, θα ορίσουν την απαραίτητη δρομολόγηση διαδίδοντας της πληροφορίες για τη συμμετοχή του νέου υπολογιστή στους υπόλοιπους δρομολογητές του δικτύου.

▲ **Φάση 2:** η συμμετοχή είναι δυναμική, για αυτό, γίνονται περιοδικοί έλεγχοι από τους δρομολογητές για να διαπιστωθεί ποιοί υπολογιστές παραμένουν μέλη σε κάθε ομάδα και ποιοί όχι. Αν δεν αναφερθεί συμμετοχή σε κάποια ομάδα από κανέναν υπολογιστή υπηρεσίας για μεγάλο διάστημα, τότε σταματά η κοινοποίηση των πληροφοριών για την ομάδα στους

υπόλοιπους δρομολογητές.

Το πρωτόκολλο, λόγω του ότι περιλαμβάνει πολλούς δρομολογητές και υπολογιστές υπηρεσίας, έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να αποφεύγει τη δημιουργία κυκλοφορίας ελέγχου από όλους τους συμμετέχοντες. Αυτό μπορεί να συμβεί με έναν από τους ακόλουθους πέντε τρόπους:

▲ Τα μηνύματα IGMP ενθυλακώνονται σε αυτοδύναμα πακέτα IP. Τα αυτοδύναμα πακέτα που μεταφέρουν μηνύματα IGMP μεταδίδονται με χρήση πολυδιανομής υλικού. Έτσι, οι υπολογιστές που δε συμμετέχουν σε πολυδιανομή IP δε λαμβάνουν ποτέ αυτά τα μηνύματα.

▲ Κατά το rolling για να προσδιοριστεί η συμμετοχή σε ομάδες, στέλνεται μόνο ένα ερώτημα για πληροφορίες για όλες τις ομάδες με προεπιλεγμένη ταχύτητα 125 δευτερόλεπτα.

▲ Οι υπολογιστές υπηρεσίας δεν απαντούν ταυτόχρονα στα ερωτήματα IGMP κάποιου δρομολογητή. Όταν φτάσει κάποιο ερώτημα, ο υπολογιστής επιλέγει μια τυχαία καθυστέρηση στο διάστημα [0,N] για να περιμένει να στείλει την απάντηση.

▲ Κάθε υπολογιστής υπηρεσίας ακούει απαντήσεις από άλλους υπολογιστές και εμποδίζει την άσκοπη κυκλοφορία απαντήσεων.

Κάθε υπολογιστής υπηρεσίας μπορεί να είναι είτε ΜΕΛΟΣ μιας ομάδας, είτε ΚΑΘΥΣΤΕΡΩΝ ΜΕΛΟΣ είτε ΟΧΙ ΜΕΛΟΣ της. Για να μπορεί να θυμάται το πρωτόκολλο σε τί κατάσταση βρίσκεται ο κάθε υπολογιστής σε κάθε ομάδα, κάθε υπολογιστής διατηρεί πίνακα όπου το πρωτόκολλο καταχωρεί πληροφορίες συμμετοχής σε κάποια ομάδα. Στην κατάσταση “καθυστερών μέλος” βρίσκεται ένας υπολογιστής όταν συμμετέχει για πρώτη φορά στην ομάδα ή όταν φτάνει ένα ερώτημα συμμετοχής από κάποιον δρομολογητή. Αν το ερώτημα του δρομολογητή απαντηθεί από κάποιον υπολογιστή μιας ομάδας πριν τη λήξη του προκαθορισμένου χρόνου, ο υπολογιστής μεταβαίνει στην κατάσταση “μέλος”. Αν δεν απαντηθεί ή δεν απαντηθεί εντός του προκαθορισμένου χρόνου, ο υπολογιστής μεταβαίνει στην κατάσταση “όχι μέλος”.

Η μορφή των μηνυμάτων IGMP είναι της μορφής :

0	8	16	31
ΤΥΠΟΣ	ΧΡΟΝΟΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ	
ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΟΜΑΔΑΣ (ΜΗΔΕΝ ΣΕ ΕΡΩΤΗΜΑ)			

Το πεδίο ΤΥΠΟΣ αφορά στον τύπο του μηνύματος και μπορεί να είναι:

- ▲ ένα γενικό ερώτημα συμμετοχής
- ▲ ένα ερώτημα συμμετοχής σε συγκεκριμένη ομάδα
- ▲ αναφορά συμμετοχής
- ▲ αποχώρηση από ομάδα
- ▲ αναφορά συμμετοχής (για την έκδοση 1 του πρωτοκόλλου)

Το πεδίο ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΟΜΑΔΑΣ χρησιμοποιείται σε όλους τους τύπους μηνυμάτων εκτός από το “γενικό ερώτημα συμμετοχής” όπου μένει μηδέν. Το πεδίο ΧΡΟΝΟΣ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ καθορίζει το μέγιστο διάστημα για τυχαία καθυστέρηση που θα υπολογίσουν τα μέλη της ομάδας ενώ το πεδίο ΑΘΡΟΙΣΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ περιέχει το άθροισμα ελέγχου για το μήνυμα.

4.6 Common Gateway Protocol

Για να μπορεί κάποιος πελάτης να έχει πρόσβαση σε μια απομακρυσμένη υπηρεσία πρέπει να γνωρίζει δύο πολύ σημαντικές πληροφορίες:

- ▲ πρέπει να είναι σε θέση να επικοινωνεί με τον server που φιλοξενεί την υπηρεσία
- ▲ πρέπει να μπορεί να ζητήσει τη σωστή υπηρεσία

Αυτό, γενικώς, επιτυγχάνεται μέσω ενός συνδυασμού διεύθυνσης IP και ενός αριθμού θύρας (port number). Η διεύθυνση IP προσδιορίζει το πού βρίσκεται ο server και η θύρα προσδιορίζει την υπηρεσία.

Το πρωτόκολλο κοινής πύλης (Common Gateway protocol) είναι ένα εξεζητημένο δυαδικό πρωτόκολλο που σχεδιάστηκε για αποδοτικό tunneling μίας ή περισσότερων ροών TCP. Πρόκειται κυρίως για ένα πρωτόκολλο σήραγγας (tunneling protocol) ικανό να μεταφέρει δεδομένα εφαρμογών σε ένα απομακρυσμένο δίκτυο.

Το πρωτόκολλο CGP είναι ένα δυαδικό πρωτόκολλο επιπέδων με τις δικές του ικανότητες αξιοπιστίας, συμπίεσης, κρυπτογράφησης και επανασύνδεσης. Όταν η αξιοπιστία της συνδιάλεξης έχει ενεργοποιηθεί, ο πελάτης της θύρας προωθεί σε σήραγγα την κίνησή του μέσα στο πρωτόκολλο και στέλνει την κίνηση στη θύρα 2598 (τη θύρα για την αξιοπιστία συνεδριών).

4.6 Gateway – Gateway Protocol

Το πρωτόκολλο Από Πύλη Σε Πύλη (Gateway-Gateway protocol) είναι ένα παρωχημένο πρωτόκολλο που χρησιμοποιούσαν οι αρχικοί δρομολογητές πυρήνα για την ανταλλαγή πληροφοριών δρομολόγησης. Χειριζόταν μόνο ταξικές διαδρομές, δεν αποτελεί πλέον κομμάτι του TCP/IP, αλλά είναι ένα σαφές παράδειγμα δρομολόγησης με τη λογική διανύσματος απόστασης και αναφέρεται κυρίως για ιστορικούς λόγους.

Το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο ελαχίστων αλμάτων ο οποίος μετράει την απόσταση σε άλματα δρομολογητών. Επαναλαμβάνουμε πως ένας δρομολογητής απέχει μηδέν άλματα από τα δίκτυα που συνδέεται άμεσα, ένα άλμα όταν μεταξύ αυτού και ενός δικτύου μεσολαβεί ένας άλλος δρομολογητής κ.ο.κ.

Το αρχικό σύστημα πυρήνα επέτρεπε την προσθήκη νέων δρομολογητών χωρίς καμία τροποποίηση. Σε ένα δίκτυο, δρομολογητές ανταλλάσσουν μεταξύ τους πληροφορίες. Κάθε νέος δρομολογητής που προστίθεται στο σύστημα, λάμβανε γειτονικούς δρομολογητές με τους οποίους επικοινωνούσε. Ο νέος δρομολογητής έπρεπε να ενημερώσει τους γείτονές του σχετικά με τα δίκτυα όπου είχε πρόσβαση και εκείνοι έπρεπε να ανανεώσουν τους πίνακες δρομολόγησης τους και να διαδώσουν τις νέες πληροφορίες.

Οι πληροφορίες που αντάλασσαν οι δρομολογητές περιελάμβαναν ένα ζεύγος διεύθυνσης IP και απόστασης σε άλματα.

Κάθε μήνυμα GGP είχε σταθερή μορφή κεφαλίδας που αναγνώριζε τον τύπο του μηνύματος και τη μορφή των υπόλοιπων πεδίων. Λόγω του ότι στο συγκεκριμένο πρωτόκολλο συμμετείχαν αποκλειστικά δρομολογητές πυρήνα και λόγω του ότι αυτοί οι δρομολογητές ελέγχονταν από μια

κεντρική αρχή, οι υπόλοιποι δρομολογητές δεν μπορούσαν να συμμετέχουν στην ανταλλαγή πληροφοριών.

Το πρωτόκολλο GGP εγκαινίασε την τεχνική χρήσης συντελεστών απόστασης την οποία χρησιμοποιούν πολύ συχνά τα πρωτόκολλα δρομολόγησης για να μειώσουν το μέγεθος του μηνύματος. Η τεχνική αυτή αποφεύγει την αποστολή αντιγράφων με την ίδια τιμή απόστασης. Η λίστα των ζευγών (δειύθυνση IP, άλματα) ταξινομείται ανάλογα με την απόσταση και κάθε τιμή απόστασης αναπαρίσταται μόνο μία φορά. Έπειτα ακολουθούν τα δίκτυα που είναι προσπελάσιμα σε αυτή την απόσταση.

5. Ειδικά Θέματα Δρομολόγησης

5.1 Δρομολόγηση καυτής πατάτας (Hot-potato routing)

Στην παράγραφο αυτή αναφέρουμε τη μέθοδο στατικής δρομολόγησης με εκτροπή, ευρύτερα γνωστή ως deflection routing ή δρομολόγηση της καυτής πατάτας (hot-potato routing). Το σημαντικό στοιχείο της μεθόδου είναι πως οι κόμβοι-δρομολογητές του δικτύου δε διατηρούν μνήμη για την αποθήκευση των καθυστερημένων πακέτων. Αυτό σημαίνει πως, κάθε πακέτο, καθώς κινείται από κόμβο σε κόμβο με σκοπό να φτάσει τον κόμβο-προορισμό του, όταν φτάσει σε κάποιον κόμβο είτε θα απορροφηθεί από αυτόν (αν πρόκειται για τον κόμβο-προορισμό του) είτε θα προχωρήσει αναγκαστικά, την επόμενη χρονική στιγμή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, μερικές φορές, πακέτα να εκτοπίζονται από το αρχικό τους δρομολόγιο και να απομακρύνονται από το μονοπάτι που θα κατέληγε στον προορισμό τους.

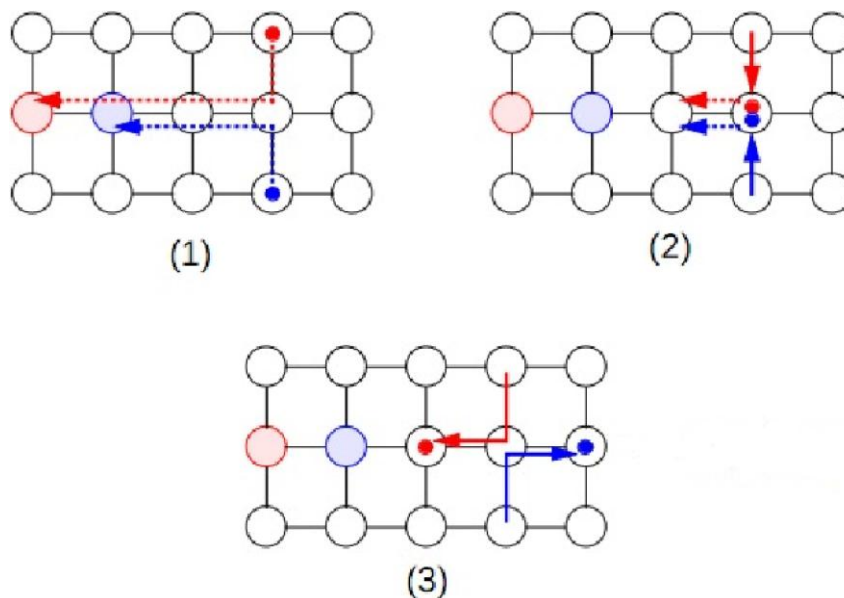
Για να γίνει το παραπάνω πιο σαφές, έστω ένα δίκτυο αναπαριστώμενο σε μορφή πλέγματος 2x2 και έστω ότι σε ένα κόμβο φτάνουν κάποια χρονική στιγμή 2 διαφορετικά πακέτα από 2 διαφορετικές εισερχόμενες ακμές. Έστω ότι και τα 2 πακέτα επιθυμούν να χρησιμοποιήσουν ως εξερχόμενη την ίδια ακμή, διότι ο προορισμός τους βρίσκεται προς την ίδια κατεύθυνση. Μόνο ένα από αυτά τα 2 πακέτα θα καταφέρει να προωθηθεί στην επιθυμητή του ακμή. Επειδή, όμως, μόνο ένα πακέτο μπορεί να προωθηθεί κάθε φορά σε μια ακμή και, επιπλέον, κανένα πακέτο δεν μπορεί να παραμείνει σε έναν κόμβο περισσότερο από μια χρονική στιγμή, το άλλο πακέτο θα προωθηθεί σε άλλη, ανεπιθύμητη, ακμή, με πιθανή έκβαση να απομακρυνθεί από το μονοπάτι της διαδρομής του. Στο Σχήμα 11 φαίνεται ένα τέτοιο στιγμιότυπο όπου, τελικά, το δεύτερο πακέτο εκτοπίζεται από το αρχικό του δρομολόγιο.

Αντιπαραθετικά με τη δρομολόγηση καυτής πατάτας έχει προταθεί και η δρομολόγηση κρύας πατάτας (cold-potato), όπου, τα πακέτα μπορούν να διατηρηθούν στη μνήμη του δικτύου εξαντλώντας όλα τα χρονικά περιθώρια. Σε αντίθεση με τη δρομολόγηση καυτής πατάτας, η δρομολόγηση κρύας πατάτας εμφανίζει καλή Ποιότητα Υπηρεσίας από άκρο-σε-άκρο για τους πελάτες των παρόχων. Ωστόσο, η δρομολόγηση καυτής πατάτας είναι καλύτερη για ISP's ενώ η δρομολόγηση κρύας πατάτας για ιδιωτικά δίκτυα.

Οι αλγόριθμοι καυτής πατάτας βρίσκουν εφαρμογή σε οπτικά δίκτυα δεδομένου ότι το φως είναι δύσκολο να αποθηκευτεί αλλά και σε μη οπτικά δίκτυα διότι απαιτεί απλό hardware. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για πολύ γρήγορα δίκτυα. Σκοπός των αλγορίθμων αυτών είναι ο προσδιορισμός κίνησης των πακέτων και ο προσδιορισμός επίλυσης των συγκρούσεων.

Έχουν προταθεί αλγόριθμοι που επιλύουν το πρόβλημα του εκτοπισμού με διαφορετικό τρόπο ο

καθένας. Υπάρχουν αλγόριθμοι που βασίζονται στη δομική δρομολόγηση (structured routing) όπου η καλή συμπεριφορά του αλγορίθμου προκύπτει από το ότι τα πακέτα στέλνονται εξ' αρχής σε προκαθορισμένα μονοπάτια. Αν και αυτού του τύπου οι αλγόριθμοι είναι ασυμπτωτικά βέλτιστοι, έχουν κάποια μειονεκτήματα. Τα πακέτα που βρίσκονται αρχικά κοντά στον προορισμό τους, συνήθως απομακρύνονται από αυτόν. Επιπλέον, ακόμα και με λίγα πακέτα στο δίκτυο, λόγω της μη ευαισθησίας του αλγορίθμου στο συνολικό φορτίο του δικτύου, δημιουργούνται μεγάλες, άχρηστες, διαδρομές.



Σχήμα 11: Στιγμιότυπο σύγκρουσης και εκτροπής σε δίκτυο όπου γίνεται εφαρμογή αλγορίθμου καυτής πατάτας.

Αντίθετα από τους δομικούς αλγόριθμους, υπάρχουν οι άπληστοι αλγόριθμοι που προωθούν τα πακέτα στην ακμή που βρίσκεται στην κατεύθυνση του προορισμού τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα πακέτα να φτάνουν στον προορισμό τους έχοντας ακολουθήσει τη συντομότερη διαδρομή. Φέρνοντας σε αντιπαράθεση τους δομικούς και τους άπληστους αλγόριθμους, παρατηρούμε πως οι άπληστοι αλγόριθμοι είναι πλέον απλοί και λιγότερο απαιτητικοί σε πολυπλοκότητα και υλικό σε σχέση με τους δομικούς αλγόριθμους, οι οποίοι συνήθως σχεδιάζονται σε φάσεις. Επιπλέον, στους δομικούς αλγόριθμους, ο κάθε δρομολογητής μπορεί να επιτελεί διαφορετική λειτουργία με επαυξημένη πολυπλοκότητα σε σχέση με τους υπόλοιπους δρομολογητές του δικτύου, κάτι που δε συμβαίνει με τους όμοιους δρομολογητές των άπληστων αλγορίθμων.

Δυστυχώς, ωστόσο, αν και οι προσομοιώσεις των άπληστων αλγορίθμων καυτής πατάτας υπερέρχουν σε σχέση με τους αντίστοιχους δομικούς, η ανάλυση των άπληστων είναι πιο δύσκολη μιας και δεν υπάρχει όριο στο πλήθος των ακμών που μπορεί να διασχίσει ένα πακέτο μέχρι να φτάσει στον προορισμό του.

5.2 Δρομολόγηση πλημμύρας (Flooding routing)

Στην στατική δρομολόγηση συναντούμε και τον αλγόριθμο της πλημμύρας. Εδώ, κάθε πακέτο που φτάνει σε κάποιον κόμβο προωθείται σε όλες τις εξερχόμενες ακμές του κόμβου, εκτός από την

ακμή από όπου προήλθε. Αντιλαμβανόμαστε, λοιπόν, πως κάθε κόμβος επιτελεί λειτουργίες και πομπού και δέκτη. Στη γενική περίπτωση, η λογική της πλημμύρας δημιουργεί άπειρο πλήθος αντιγράφων των πακέτων που διακινούνται στο δίκτυο, πλήθος που αυξάνει εκθετικά συναρτήσει του πλήθους των κόμβων που αποτελούν το δίκτυο και της πολυπλοκότητας της συνδεσμολογίας του. Στις πραγματικές εφαρμογές των αλγορίθμων πλημμύρας οι αλγόριθμοι είναι πιο πολύπλοκοι προσπαθώντας να λάβουν μέτρα για την αποφυγή άχρηστων αντιγράφων και ατέρμωνων βρόχων. Παρακάτω αναφέρουμε παραλλαγές αλγορίθμων πλημμύρας με διαφορετικά μέτρα για την ανακοπή της διαδικασίας αντιγραφής των πακέτων.

Σε κάποια παραλλαγή, χρησιμοποιείται ως μέτρο ένας μετρητής αλμάτων ο οποίος περιέχεται στην επικεφαλίδα του κάθε πακέτου. Αυτός ο μετρητής μειώνεται γραμμικά σε κάθε άλμα και το πακέτο απορρίπτεται όταν ο μετρητής του γίνει μηδέν. Στην ιδανική περίπτωση, ως αρχική τιμή του μετρητή θα πρέπει να είναι το μήκος της διαδρομής από την πηγή προέλευσής του έως τον προορισμό του. Στη χειρότερη περίπτωση, ο μετρητής αρχικοποιείται με την πλήρη διάμετρο του δικτύου.

Σε μια δεύτερη παραλλαγή, γίνεται παρακολούθηση και καταγραφή των πακέτων που έχουν αντιγραφεί έτσι ώστε να μην σταλούν ξανά. Αυτή η τεχνική υλοποιείται με χρήση ενός αριθμού ακολουθίας τον οποίο, ο δρομολογητής προέλευσης, τοποθετεί σε κάθε πακέτο που λαμβάνει. Κάθε δρομολογητής διατηρεί μια λίστα για κάθε δρομολογητή προέλευσης η οποία λίστα δείχνει τους αριθμούς που έχουν εμφανιστεί ήδη από την τρέχουσα προέλευση. Τα εισερχόμενα πακέτα που δεν υπάρχουν στη λίστα, αντιγράφονται εκ νέου. Για να μη υπάρχει διόγκωση της λίστας, κάθε φορά που φτάνει ένα πακέτο ελέγχεται αν είναι αντίγραφο. Ο έλεγχος πραγματοποιείται με έναν μετρητή για κάθε λίστα που δείχνει πως έχουν εμφανιστεί όλοι οι αριθμοί μέχρι τον k . Αν το πακέτο που φτάνει είναι αντίγραφο απορρίπτεται. Η λίστα πριν τον μετρητή k δεν είναι απαραίτητη και μπορεί να διαγράφεται.

Σε μια τρίτη παραλλαγή, την επιλεκτική πλημμύρα (selective flooding) οι δρομολογητές προωθούν κάθε εισερχόμενο πακέτο μόνο στις εξερχόμενες ακμές που κατευθύνονται, κατά προσέγγιση, προς τον προορισμό του πακέτου.

Ο αλγόριθμος της πλημμύρας, αν και μη αποδοτικός, χρησιμοποιείται σε μια σειρά από εφαρμογές. Μεγαλύτερη, ωστόσο, πρακτική χρήση, έχει η παραλλαγή της επιλεκτικής πλημμύρας. Οι αλγόριθμοι πλημμύρας χρησιμοποιούνται σε συστήματα διαμοίρασης αρχείων peer-to-peer, για την επίλυση μαθηματικών προβλημάτων και προβλημάτων στον κλάδο της θεωρίας παιγνίων. Επιπλέον, χρησιμοποιείται σε ασύρματα δίκτυα για τη δυνατότητα όλοι οι σταθμοί σε μια εμβέλεια να μπορούν να λαμβάνουν από κάποιον άλλο σταθμό του δικτύου. Οι αλγόριθμοι πλημμύρας βρίσκουν εφαρμογή σε κατανεμημένες βάσεις δεδομένων για την ταυτόχρονη ενημέρωση όλων των βάσεων, αλλά και ως μέτρο σύγκρισης για τους υπόλοιπους αλγορίθμους δρομολόγησης διότι επιλέγουν πάντα τη συντομότερη διαδρομή. Σε σχέση και με τις τεχνικές που ήδη έχουμε μελετήσει, οι αλγόριθμοι πλημμύρας έχουν τη χαμηλότερη καθυστέρηση.

Στα πλεονεκτήματα των αλγορίθμων δρομολόγησης, εκτός του ότι βρίσκει πάντα τη συντομότερη διαδρομή σε σχέση με τους υπόλοιπους αλγορίθμους δρομολόγησης και εμφανίζει τη χαμηλότερη καθυστέρηση, συγκαταλέγονται και η απλότητα των αλγορίθμων και η εξασφάλιση πως κάθε πακέτο θα φτάσει στον προορισμό του.

Στα μειονεκτήματά τους, έχουμε την προφανή μη αποδοτικότητα και την υπερχρήση των συνδέσμων και του συνολικού εύρους του δικτύου. Επιπλέον, κάποιος κόμβος μπορεί να λάβει ένα πακέτο περισσότερες από μία φορές λόγω των πολλών αντιγράφων αλλά και ένα πακέτο μπορεί να

βρεθεί σε κατάσταση ατέρμονου βρόγχου.

5.3 Δρομολόγηση πολλαπλών μονοπατιών (Multipath routing)

Μια διαφορετική λογική στους στατικούς αλγορίθμους δρομολόγησης είναι η δρομολόγηση πολλαπλών μονοπατιών προς έναν προορισμό. Η συγκεκριμένη κατηγορία αλγορίθμων δε χρησιμοποιείται ακόμα εκτενώς στην πράξη, ωστόσο έχει ένα ενδιαφέρον να την περιγράψουμε. Ο αλγόριθμος αναζητά και καταγράφει όλα τα εναλλακτικά μονοπάτια από έναν κόμβο προέλευσης προς έναν κόμβο προορισμού και επιστρέφει ένα με τυχαίο τρόπο. Σε πιο πρόσφατες παραλλαγές δυναμικής δρομολόγησης, το μονοπάτι επιλέγεται συναρτήσει του σχετικού φορτίου των διαφόρων μονοπατιών.

Στα πλεονεκτήματα της τεχνικής αυτής συγκαταλέγονται η αξιοπιστία, δεδομένου ότι ακόμα και να προκληθεί κατάρρευση σε ένα στοιχείο ενός μονοπατιού, υπάρχουν εναλλακτικά μονοπάτια προς κάποιον προορισμό. Τα διαφορετικά μονοπάτια που εντοπίζει ο αλγόριθμος μπορεί να έχουν κοινές ακμές (ή κοινούς κόμβους) αλλά και όχι. Η ανθεκτικότητα στα σφάλματα προκύπτει κυρίως σε περιπτώσεις που στη διάθεσή μας έχουμε ξένα μεταξύ τους μονοπάτια και ως προς τους δρομολογητές και ως προς τους συνδέσμους. Εκτός της ανθεκτικότητας στις αποτυχίες, η δρομολόγηση πολλαπλών μονοπατιών επιφέρει καλύτερο εύρος κι επαυξημένη ασφάλεια.

5.4 Δρομολόγηση ευρείας εκπομπής (Broadcasting Routing)

Η δρομολόγηση που περιγράφεται σε αυτή την υποενότητα αφορά στην ταυτόχρονη αποστολή ενός πακέτου σε κάθε κόμβο-προορισμό. Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί μια σειρά από διαφορετικές μέθοδοι υλοποίησης αυτού του τύπου δρομολόγησης.

Η πιο απλή μέθοδος είναι αυτή κατά την οποία ο κόμβος-αποστολέας στέλνει ένα διαφορετικό πακέτο (ίδιου περιεχομένου) σε κάθε κόμβο-προορισμό. Το μόνο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η απλότητά της και οι μηδενικές απαιτήσεις της από το δίκτυο. Στα μειονεκτήματα συγκαταλέγονται η σπατάλη εύρους ζώνης και οι τεράστιες απαιτήσεις σε μνήμη.

Άλλος τρόπος υλοποίησης της ευρείας μετάδοσης είναι με εφαρμογή της μεθόδου της πλημμύρας, αλλά και πάλι με μεγάλο κόστος αναφορικά με το εύρος ζώνης.

Ένας εναλλακτικός τρόπος είναι η δρομολόγηση πολλαπλών προορισμών. Κάθε πακέτο περιέχει μια λίστα με όλους τους επιθυμητούς προορισμούς. Όταν το πακέτο φτάσει σε κάποιον κόμβο-δρομολογητή, ο δρομολογητής ελέγχει τους προορισμούς του πακέτου και καθορίζει τις εξωτερικές συνδέσεις που χρειάζονται. Στη συνέχεια, ο κόμβος-δρομολογητής παράγει αντίγραφα του πακέτου και τα στέλνει σε κάθε μία από τις προκαθορισμένες εξόδους με διαφορετικό κόμβο-προορισμό το καθένα. Αν φανταστούμε τη διαδικασία αυτή σαν προώθηση πακέτων σε δένδρο όπου σε κάθε κόμβο γίνεται η ανωτέρω διαδικασία, αντιλαμβανόμαστε πως, κάποια στιγμή το κάθε πακέτο θα περιλαμβάνει στην περιγραφή του μόνο έναν κόμβο-προορισμό.

Μια άλλη μέθοδος χρησιμοποιεί τα δένδρα απαγωγής ή τα spanning trees. Η λογική της μεθόδου είναι πως, αν κάθε κόμβος-δρομολογητής του δικτύου γνωρίζει ποιές συνδέσεις ανήκουν στο δένδρο (απαγωγής ή σκελετού), μπορεί να αντιγράψει τα πακέτα που λαμβάνει για κάθε γραμμή του δένδρου, εκτός της εισερχόμενης. Με τη μέθοδο αυτή γίνεται άριστη χρήση του εύρους ζώνης του δικτύου.

Τέλος, η ευρεία δρομολόγηση μπορεί να υλοποιηθεί με την προώθηση αντίστροφης διαδρομής. Η ιδέα της μεθόδου είναι η εξής: Όταν ένα πακέτο φτάσει σε κάποιον κόμβο -δρομολογητή, ο δρομολογητής ελέγχει αν το πακέτο έφτασε από τη γραμμή που χρησιμοποιείται για αποστολή πακέτων προς τον κόμβο-αποστολέα του πακέτου. Αν ναι, τότε η πιθανότητα το πακέτο να έχει ακολουθήσει τη συντομότερη διαδρομή, είναι μεγάλη και τα αντίγραφα του πακέτου προωθούνται σε όλες τις εξωτερικές ακμές, εκτός της εισερχομένης. Αν όχι, τότε η πιθανότητα το πακέτο να είναι απλά ένα αντίγραφο είναι μεγάλη και το πακέτο απορρίπτεται.

5.5 Δρομολόγηση σε κινητούς (φορητούς) υπολογιστές

Ένα ενδιαφέρον ζήτημα αφορά στο πώς δρομολογούνται τα πακέτα δεδομένων στους φορητούς υπολογιστές μας. Σε αυτή την περίπτωση το πρόβλημα δεν αφορά στην εύρεση του συντομότερου μονοπατιού, αλλά στην εύρεση του φορητού υπολογιστή !

Όλοι οι υπολογιστές διαθέτουν μια μόνιμη οικεία θέση και μια μόνιμη οικεία διεύθυνση. Η δρομολόγηση πακέτων σε φορητούς υπολογιστές αφορά στη δυνατότητα αποστολής αυτών των πακέτων με αποδοτικό τρόπο στον προορισμό τους χρησιμοποιώντας τις οικείες διευθύνσεις όπου κι αν βρίσκονται οι υπολογιστές.

Για να είναι εφικτή η αποδοτική αποστολή των πακέτων σε φορητούς υπολογιστές όπου κι αν βρίσκονται, ο κόσμος διαιρείται χωρικά σε τμήματα (LANs ή κυψέλες). Σε κάθε τμήμα υπάρχει τουλάχιστον ένας ξένος πράκτορας και ένας οικείος πράκτορας. Οι ξένοι πράκτορες είναι διεργασίες που παρακολουθούν τους φορητούς υπολογιστές που επισκέπτονται την περιοχή τους ενώ ο οικείος πράκτορας παρακολουθεί τους φορητούς υπολογιστές των οποίων η οικεία θέση βρίσκεται στην περιοχή τους.

Όταν ένας φορητός υπολογιστής εισέρχεται σε ένα από αυτά τα τμήματα θα πρέπει να εγγραφεί σε έναν από τους ξένους πράκτορες του τμήματος. Η εγγραφή έχει ως εξής :

- Κάθε πράκτορας ενός τμήματος, εκπέμπει ένα πακέτο, περιοδικά, το οποίο ανακοινώνει την ύπαρξή του και τη διεύθυνσή του. Αν, κατά την άφιξή του, ο φορητός υπολογιστής δε λάβει ένα τέτοιο πακέτο μπορεί να πάρει την πρωτοβουλία και να 'ρωτήσει' για ξένους πράκτορες στο τμήμα.
- Ο φορητός υπολογιστής δίνει στον ξένο πράκτορα την οικεία διεύθυνσή του, την τρέχουσα διεύθυνσή του στο επίπεδο συνδέσμου μετάδοσης δεδομένων και πληροφορίες ασφάλειας
- Ο ξένος πράκτορας επικοινωνεί με τον οικείο πράκτορα του τμήματος που ανήκει η οικεία διεύθυνση του φορητού υπολογιστή για να τον ενημερώσει πως ένας από τους φορητούς υπολογιστές του βρίσκεται στο τμήμα του
- Ο οικείος πράκτορας ελέγχει την πληροφορία και αν είναι έγκυρη λέει στον ξένο πράκτορα να προχωρήσει στην εγγραφή
- Ο ξένος πράκτορας εγγράφει το φορητό υπολογιστή

Τι συμβαίνει κατά την αποστολή ενός πακέτου σε ένα φορητό υπολογιστή ;

- Το πακέτο, αρχικά, δρομολογείται στο τμήμα που ανήκει η μόνιμη οικεία θέση του φορητού υπολογιστή
- Ο οικείος πράκτορας αυτού του τμήματος, εφόσον ο υπολογιστής έχει μετακινηθεί και δε βρίσκεται στο οικείο τμήμα του, εμποδίζει το πακέτο να παραληφθεί και αναζητά τη νέα θέση του υπολογιστή.
- Ο οικείος πράκτορας βρίσκει τη διεύθυνση του ξένου πράκτορα στον οποίο έχει εγγραφεί ο φορητός υπολογιστής
- Ο οικείος πράκτορας ετοιμάζει ένα εξωτερικό πακέτο και στο πεδίο ωφέλιμου φορτίου αυτού του πακέτου ενθυλακώνει το αρχικό πακέτο
- Ο οικείος πράκτορας στέλνει το πακέτο στον ξένο πράκτορα στον οποίο είναι εγγεγραμμένος ο φορητός υπολογιστής, με τη διαδικασία της διοχέτευσης σε σήραγγα (tunneling)
- Ο ξένος πράκτορας λαμβάνει το πακέτο, απομονώνει το αρχικό πακέτο και το στέλνει στο φορητό υπολογιστή για τον οποίο προορίζεται
- Παράλληλα με αυτές τις κινήσεις, ο οικείος πράκτορας ενημερώνει τον αποστολέα του αρχικού πακέτου για το πού πρέπει να στέλνει τα επόμενα πακέτα που προορίζονται για αυτόν τον υπολογιστή, στο μέλλον

Έχουν προταθεί μια σειρά από μέθοδοι για τη δρομολόγηση πακέτων σε φορητούς υπολογιστές οι οποίες διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Τα σημεία στα οποία διαφοροποιούνται αναφέρονται συνοπτικά στη συνέχεια :

- Πρέπει να καθοριστεί πόσο τμήμα του πρωτοκόλλου θα εκτελείται από τους δρομολογητές, πόσο από τους υπολογιστές υπηρεσίας και από ποιο πεδίο των τελευταίων
- Σε μερικές μεθόδους, οι δρομολογητές κατά μήκος της διαδρομής καταγράφουν τις αντιστοιχισμένες διευθύνσεις για να τις χρησιμοποιούν χωρίς να χρειάζεται το πακέτο να φτάσει στην οικεία θέση
- Σε μερικές μεθόδους, κάθε φορητός υπολογιστής-επισκέπτης λαμβάνει μια μοναδική νέα διεύθυνση. Σε άλλες μεθόδους, η νέα διεύθυνση αναφέρεται σε πράκτορα που διαχειρίζεται την κίνηση για όλους τους επισκέπτες ενός τμήματος
- Πρέπει να καθοριστεί ο τρόπος με τον οποίο τα πακέτα που έχουν ως διεύθυνση κάποιον προορισμό μπορούν να παραδίδονται σε κάποιον άλλο
- Θέματα ασφάλειας

5.6 Δρομολόγηση με βάση τη ροή δεδομένων (Flow-based routing)

Μια άλλη λογική στατικής δρομολόγησης αφορά στη δρομολόγηση με βάση τη ροή των δεδομένων.

Μερικές φορές, η μέση ροή δεδομένων μεταξύ ενός ζεύγους κόμβων σε ένα δίκτυο (αποστολέα και παραλήπτη) είναι σταθερή και προβλέψιμη. Ως εκ τούτου είναι εύκολο να υπολογιστεί η μέση

καθυστερήσει όλου του δικτύου.

Οι αλγόριθμοι που εφαρμόζουν τη λογική δρομολόγησης βάσει ροής δεδομένων λαμβάνουν υπόψη την τοπολογία του δικτύου και το φορτίο των συνδέσεων. Οι απαιτήσεις της μεθόδους είναι:

- ▲ να είναι γνωστή η τοπολογία του δικτύου σε όλο το δίκτυο
- ▲ να υπάρχει ενημερωμένος πίνακας κίνησης
- ▲ να υπάρχει ενημερωμένος πίνακας χωριτικής ικανότητας συνδέσεων
- ▲ να υπάρχει ένας αλγόριθμος δρομολόγησης

Ο στόχος της δρομολόγησης βάσει ροών δεδομένων είναι η εύρεση ενός αλγορίθμου που θα παράγει τη μικρότερη μέση καθυστέρηση για το δίκτυο.

Αυτό που προκύπτει ως συμπέρασμα από αυτή τη λογική δρομολόγησης είναι πως, μερικές φορές, είναι καλύτερο να επιλέγεις ένα μακρύτερο μονοπάτι παρά ένα συντομότερο για τη δρομολόγηση της κίνησης, αν το συντομότερο μονοπάτι έχει μεγάλο φορτίο.

5.7 Δρομολόγηση κρεμμυδιού (Onion routing)

Η δρομολόγηση κρεμμυδιού αφορά στην ανώνυμη επικοινωνία σε ένα δίκτυο. Η λογική αυτής της δρομολόγησης είναι πως η πληροφορία δρομολόγησης κωδικοποιείται σε ένα σύνολο κρυπτογραφημένων επιπέδων (κρεμμύδι).

Οι στόχοι της δρομολόγησης κρεμμυδιού είναι:

- ▲ Η προστασία της πληροφορίας αναφορικά με τον αποστολέα και τον παραλήπτη του πακέτου, και
- ▲ Η προστασία του περιεχομένου του πακέτου

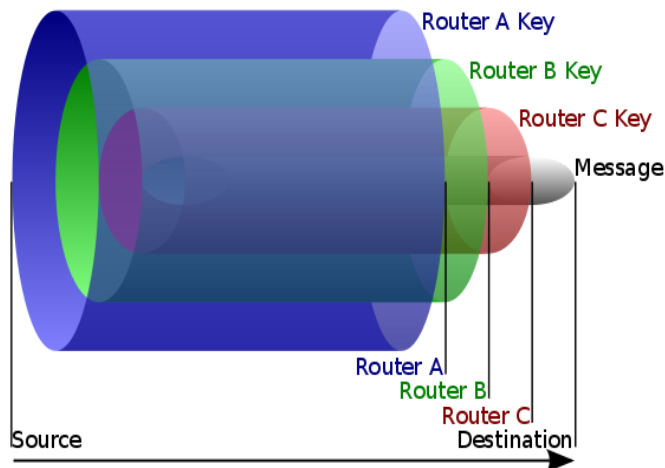
Για να επιτευχθούν οι στόχοι αυτοί, τα μηνύματα που φεύγουν από έναν αποστολέα και μπαίνουν στη διαδικασία αναζήτησης δρομολογίου για να φτάσουν στον προορισμό τους, ταξιδεύουν μέσα από μια ακολουθία proxies (onion routers) οι οποίοι έχουν ως σκοπό να επαναδρομολογήσουν τα μηνύματα προς ένα απρόβλεπτο μονοπάτι. Κάθε δρομολογητής που λαμβάνει ένα πακέτο, βγάζει ένα επίπεδο κρυπτογράφησης για να αποκαλύψει τις οδηγίες δρομολόγησης (ποιός είναι ο αποστολέας και ποιός ο παραλήπτης του μηνύματος) και έπειτα στέλνει το μήνυμα στον επόμενο δρομολογητή έχοντας υλοποιήσει κρυπτογράφηση ο ίδιος.

Το βασικότερο πλεονέκτημα της δρομολόγησης κρεμμυδιού είναι πως η εμπιστοσύνη μεταξύ δρομολογητών δεν είναι απαραίτητη. Κάθε δρομολογητής σε ένα δίκτυο δρομολόγησης κρεμμυδιού, λαμβάνει μηνύματα, τα επανακρυπτογραφεί και τα προωθεί σε έναν άλλο δρομολογητή του δικτύου. Αν υπάρξει κάποιος εισβολέας με δυνατότητα να παρακολουθεί κάθε δρομολογητή-κρεμμύδι του δικτύου, μπορεί να καταφέρει να ανιχνεύσει το μονοπάτι του μηνύματος μέσα στο δίκτυο. Όμως, ένας εισβολέας με λιγότερες ικανότητες θα δυσκολευτεί πολύ να ανιχνεύσει το μονοπάτι.

Αυτή η παρατήρηση μαρτυρά ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της δρομολόγησης κρεμμυδιού. Οι δρομολογητές-κρεμμύδια δεν παρέχουν άριστη ανωνυμία αποστολέα-παραλήπτη απέναντι σε οποιονδήποτε εισβολέα. Ωστόσο, αυτό που παρέχει σε έναν ισχυρό βαθμό είναι η υπόνοια πως ο εισβολέας δεν μπορεί εύκολα να καθορίσει και τον αποστολέα και τον παραλήπτη του μηνύματος.

Τυπικά, αυτό που παρέχει η δρομολόγηση κρεμμυδιού είναι μια συνέχεια στην οποία, ο βαθμός ιδιωτικότητας είναι εν γένει μια συνάρτηση του πλήθους των δρομολογητών του δικτύου προς το πλήθος των εχθρικών δρομολογητών.

Στο Σχήμα 12 φαίνεται ένα “κρεμμύδι” βάσει της ομώνυμης δρομολόγησης.



Σχήμα 12: Παράδειγμα κρυπτογραφημένου μηνύματος με τη δρομολόγηση κρεμμυδιού

5.8 Ασαφής Δρομολόγηση (Fuzzy routing)

Η ασαφής (fuzzy) δρομολόγηση αφορά, επί της ουσίας, στην εφαρμογή της ασαφούς λογικής στους αλγορίθμους και τα πρωτόκολλα δρομολόγησης. Συνήθως χρησιμοποιείται στη δρομολόγηση ασύρματων ad-hoc δικτύων και στα δίκτυα που υποστηρίζουν πολλαπλές κλάσεις Ποιότητας Υπηρεσίας.

Ο όρος *ασαφής λογική* χρησιμοποιείται για να διαχωρίσει την παραδοσιακή λογική όπου, σε ένα δυαδικό σύστημα τιμών (0,1) κάποια μεταβλητή μπορεί να λάβει μόνο μία εκ των δύο τιμών, από την προσεγγιστική λογική της ασάφειας, όπου, στο ίδιο σύνολο τιμών, κάποια μεταβλητή μπορεί να λάβει οποιοδήποτε πραγματικό αριθμό. Έτσι, η ασαφής λογική εισάγει την έννοια του “μερικώς αληθής” και “μερικώς ψευδής”.

Στον τομέα της δρομολόγησης, έχουν προταθεί μια σειρά από ασαφείς αλγορίθμους δρομολόγησης για ασύρματα ad-hoc δίκτυα. Η δρομολόγηση στα δίκτυα αυτά αντιμετωπίζει μια σειρά από προβλήματα που αφορούν στην κινητικότητα των κόμβων-δρομολογητών, στο περιορισμένο εύρος ζώνης και μερικές φορές στην περιορισμένη ενέργεια του δικτύου. Ένας καλός αλγόριθμος για τέτοια δίκτυα θα πρέπει να ισορροπεί την Ποιότητα Υπηρεσίας με την κατανάλωση εύρους ζώνης του δικτύου και πόρων του υπολογιστή.

Ένας απλός αλγόριθμος που βασίζεται στην ασαφή λογική και έχει προταθεί από τους Gasim Alandjani και Eric E. Johnson , αναζητά και βρίσκει ένα μέγιστο σύνολο ξένων μονοπατιών από έναν κόμβο-αποστολέα προς έναν κόμβο-προορισμό και έπειτα εφαρμόζει έναν ελεγκτή ασαφούς λογικής για να αποφασίσει πώς να χρησιμοποιήσει τα μονοπάτια αυτά για να διαχειριστεί την κίνηση του δικτύου.

Ο ελεγκτής ασαφούς λογικής ορίζει κανόνες, ανάλογα με την γενικότερη περιγραφή του αλγορίθμου στον οποίο εφαρμόζεται, για να αποφασίσει σχετικά με την προώθηση των πακέτων που φτάνουν στον κόμβο-δρομολογητή όπου βρίσκεται. Τα πακέτα αυτά, μπορεί να προωθηθούν σε κανένα, ένα, πολλά ή σε όλα τα μονοπάτια του δικτύου. Οι κανόνες που ορίζει ο ελεγκτής, συνήθως εξαρτώνται από την προτεραιότητα των μηνυμάτων (πακέτων) και από τη συμφόρηση του δικτύου. Η είσοδος του ελεγκτή είναι η προτεραιότητα του πακέτου και η κατάσταση του δικτύου. Η έξοδος του είναι η απόφαση για το δρομολόγιο ή τα δρομολόγια που θα πρέπει να ακολουθηθούν.

6. Βιβλιογραφία

Βιβλία :

1. Douglas E. Comer. Διαδίκτυα με TCP/IP { Τόμος 1: Αρχές, Πρωτόκολλα και Αρχιτεκτονικές, 4η Αμερικάνικη Έκδοση, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2008.
2. Jose Duato, Sudhakar Yalmanchili and Lionel Ni. Interconnection Networks an Engineering Approach, 1st Edition, 1997.
3. Jon Kleinberg and Eva Tardos. Σχεδιασμός Αλγορίθμων, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2008.
4. Andrew S. Tanenbaum. Δίκτυα Υπολογιστών, 4η Αμερικάνικη Έκδοση, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2003.

Εργασίες - Δημοσιεύσεις :

1. Peter Bartalos. Complexity Analysis of Routing Algorithms in Computer Networks
2. M.T.Goodrich. Efficient and Secure Network Routing Algorithms. Provisional Patent Filing , USA. January 2001.
3. Paul Spirakis and Vassilis Triantafillou. Pure Greedy Hot-potato routing in the 2-D mesh with random destinations. Paraller Processing Letters, World Scientific Publishing Company.
4. Merin Puthuparampil. Report: Dijkstra's Algorithm.
5. R.Baumann, S.Heimlichr, M. Strasser and A.Weibel. A survey on routing metrics. TIK Report 262, 2007.
6. Costas Busch. Greedy Hot-Potato Routing. Brown University
7. Gasim Alandjani and Eric E. Johnson . Fuzzy Routing in Ad Hoc Networks . IEEE 2003

8. Jay Tomlin. Secure Gateway 3.0 for Presentation Server. Technical Report

Links:

1. http://www.csi.ucd.ie/Staff/jmurphy/networks/csd8_7-routing.pdf
2. http://nptel.iitm.ac.in/courses/IIT-MADRAS/Computer_Networks/pdf/Lecture32_RoutingAlgorithmsDV.pdf
3. <http://users.ece.gatech.edu/jic/routing-algorithm.pdf>
4. http://www.howtonetwork.net/public/Routing_Protocol_Metrics.cfm
5. <http://www.cs.rpi.edu/musser/gp/algorithm-concepts/bellman-ford-screen.pdf>
6. 5gym-zograf.att.sch.gr
7. <http://www.cc.gatech.edu/traynor/cs3251/sp11/slides/lecture14-routing.pdf>
8. www.cs.cmu.edu/~aditya
9. www.cisco.com
10. <http://www.javvin.com/protocolPNNI.html>
11. <http://www.linktionary.com/p/pnni.html>