



Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
Σχολή Θετικών Επιστημών
Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

Διδακτορική Διατριβή

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ
ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ
ΣΕ IP ΔΙΚΤΥΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Σαράντης Πασκαλής

ΑΘΗΝΑ
Ιανουάριος 2004

Επιβλέπων: Καθηγητής Λάζαρος Μεράκος, ΕΚΠΑ

Τριμελής Επιτροπή: Καθηγητής Λ. Μεράκος, ΕΚΠΑ
Καθηγητής Ι. Σταυρακάκης, ΕΚΠΑ
Επ. Καθηγητής Γ. Στεφάνου, ΕΚΠΑ

Επταμελής Επιτροπή: Καθηγητής Λ. Μεράκος, ΕΚΠΑ
Καθηγητής Ι. Σταυρακάκης, ΕΚΠΑ
Καθηγητής Μ. Θεολόγου, ΕΜΠ
Αν. Καθηγητής Η. Μανωλάκος, ΕΚΠΑ
Αν. Καθηγητής Δ. Μαρτάκος, ΕΚΠΑ
Επ. Καθηγητής Γ. Στεφάνου, ΕΚΠΑ
Επ. Καθηγητής Ε. Χατζηευθυμιάδης, ΕΚΠΑ

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	v
Κατάλογος Σχημάτων	vii
Πρόλογος - Ευχαριστίες	x
1 Εισαγωγή	1
2 Κινητικότητα	5
2.1 Δρομολόγηση IP	6
2.1.1 Αλληλεπίδραση Κινητικότητας-Δρομολόγησης	7
2.1.2 Απαιτήσεις Κινητικότητας	8
2.2 Mobile IP	9
2.2.1 Ανακάλυψη Διεύθυνσης Μέριμνας	11
2.2.2 Εγγραφή Διεύθυνσης Μέριμνας	11
2.2.3 Ενθυλάκωση προς τη Διεύθυνση Μέριμνας	13
2.3 Προβλήματα Mobile IP και Λύσεις	15
2.3.1 Υποβέλτιστη Δρομολόγηση	15
2.3.2 Τοπολογικά Εσφαλμένη Αποστολή Πακέτων	16
2.4 Mobile IPv6	17
2.4.1 IPv6	17
2.4.2 Λειτουργία Mobile IPv6	18
2.4.3 Διαφορές-Βελτιώσεις ως προς Mobile IPv4	20
2.5 Μικρο-Κινητικότητα	20
2.5.1 Μικρο-Κινητικότητα με Χρήση Κλασικής IP Δρομολόγησης	21
2.5.2 Μικρο-Κινητικότητα με Χρήση Εξειδικευμένων Μηχανισμών Δρομολόγησης .	26
2.6 Εναλλακτικά Σχήματα Διαχείρισης Κινητικότητας	33
2.6.1 Διαχείριση Κινητικότητας σε Ανώτερα Επίπεδα	33

2.6.2	Εναλλακτικές Αρχιτεκτονικές Κινητικότητας	34
2.7	Αποτίμηση Κατάστασης Κινητικότητας	35
3	Ποιότητα Υπηρεσίας	37
3.1	Παροχή Υπηρεσίας στο Internet	38
3.1.1	Αδυναμίες του Πρωτοκόλλου IP	39
3.2	Απαιτήσεις Υποδομής Ποιότητας Υπηρεσίας	40
3.2.1	Επεξεργασία Πακέτων στους Δρομολογητές	42
3.2.2	Σηματοδοσία Ποιότητας Υπηρεσίας	44
3.3	Αρχιτεκτονική Ολοκληρωμένων Υπηρεσιών	45
3.3.1	Δομικά Συστατικά IntServ	46
3.3.2	Υπηρεσίες IntServ	48
3.4	RSVP	50
3.4.1	Ροές δεδομένων	52
3.4.2	Μοντέλο Δέσμευσης	53
3.4.3	Ανταλλαγή Μηνυμάτων	54
3.4.4	Παράδειγμα Λειτουργίας	56
3.4.5	Προσωρινή Κατάσταση (soft state)	57
3.4.6	Αποτίμηση RSVP	58
3.5	Αρχιτεκτονική Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών	59
3.6	Βελτίωση και Επέκταση Μηχανισμών Ποιότητας Υπηρεσίας	62
3.6.1	Διαλειτουργικότητα IntServ και DiffServ	62
3.6.2	Ομαδοποίηση Δεσμεύσεων RSVP	64
3.7	Αποτίμηση Παροχής Ποιότητας Υπηρεσίας στο Internet	65
4	Κινητικότητα και Ποιότητα Υπηρεσίας	67
4.1	Αλληλεπίδραση Σηματοδοσίας	68
4.1.1	Συνδυασμένη Λειτουργία Mobile IP και RSVP	71
4.1.2	RSVP και Ενθυλάκωση	74
4.1.3	Προβλήματα Διαλειτουργικότητας	76
4.2	Πρότερη Ερευνητική Εργασία	77
4.2.1	Αναγνώριση Ροών	78
4.2.2	Προδραστική Δέσμευση Πόρων	79
4.2.3	Μεταφορά Κατάστασης Περιβάλλοντος	82
4.2.4	Επέκταση Διαδρομής	83

4.2.5	RSVP και Εναλλακτικά Σχήματα Διαχείρισης Κινητικότητας	83
4.3	Αποτίμηση Τρέχουσας Κατάστασης	84
5	RSVP Mobility Proxy	87
5.1	Πλαίσιο Λειτουργίας	88
5.2	Ανάλυση Λειτουργίας	89
5.2.1	Βασική Λειτουργικότητα	89
5.2.2	Λειτουργικότητα Κινητικότητας	92
5.3	Στρατηγικές Εφαρμογής RSVP-MP	95
5.3.1	Εφαρμογή RSVP-MP σε Ιεραρχικά Δίκτυα	95
5.3.2	Υποστήριξη Πολλαπλών RSVP-MP στο Ίδιο Ιεραρχικό Επίπεδο	98
6	Ανάλυση Αποδοτικότητας	101
6.1	Χρόνος Επανεγκατάστασης Δεσμεύσεων	101
6.2	Αξιοποίηση Δικτύου	103
6.2.1	Απλή Τοπολογία Δικτύου Πρόσβασης	104
6.2.2	Σύνθετη Ιεραρχική Τοπολογία Δικτύου Πρόσβασης	114
6.3	Αξιολόγηση RSVP-MP	127
7	Επίλογος - Συμπεράσματα	129
	Βιβλιογραφία	131

Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Δομή IP διεύθυνσης	7
2.2	Τοπολογία λειτουργίας Mobile IP	10
2.3	Ανακάλυψη διεύθυνσης μέριμνας και εγγραφή της	11
2.4	Ελάχιστη ενθυλάκωση	13
2.5	Ενθυλάκωση IP σε IP	14
2.6	Ενθυλάκωση UDP	14
2.7	Τριγωνική δρομολόγηση	15
2.8	Βελτιστοποίηση δρομολόγησης	16
2.9	Αντίστροφη ενθυλάκωση	17
2.10	Βασική λειτουργία Mobile IPv6	19
2.11	Τοπικές εγγραφές (regional registrations)	22
2.12	Ιεραρχία ξένων πρακτόρων και μεταπομπές	24
2.13	Ιεραρχία αναπληρωτών πρακτόρων στην αρχιτεκτονική THEMA	25
2.14	Λειτουργία αναπληρωτή πράκτορα στην αρχιτεκτονική THEMA	26
2.15	Cellular IP	28
2.16	HAWAII, σχήμα διαχείρισης MSF	30
3.1	Λειτουργικές οντότητες δρομολογητή	42
3.2	Λειτουργικές οντότητες δρομολογητή που υποστηρίζει ποιότητα υπηρεσίας	43
3.3	Λειτουργικές οντότητες δρομολογητή αρχιτεκτονικής ολοκληρωμένων υπηρεσιών	46
3.4	Παράδειγμα λειτουργίας RSVP	56
3.5	Λειτουργία αρχιτεκτονικής DiffServ	60
3.6	Διαλειτουργικότητα IntServ και DiffServ	63
4.1	Μεταπομπές επιπέδου ζεύξης και επιπέδου δικτύου	68
4.2	Βασική τοπολογία δικτύου πρόσβασης	70
4.3	Σηματοδοσία RSVP για την εγκαθίδρυση δεσμεύσεων από-άκρη-σε-άκρη	71

4.4	Συνδυασμένη λειτουργία RSVP και Mobile IPv4	72
4.5	Ανταλλαγή RSVP μηνυμάτων μετά από μία μεταπομπή	73
4.6	Σηματοδοσία RSVP για την εγκαθίδρυση δεσμεύσεων διαμέσου τούνελ	76
4.7	Προδραστική δέσμευση πόρων με ενεργές και παθητικές δεσμεύσεις	80
5.1	Δίκτυο πρόσβασης με εγκατεστημένο RSVP-MP	90
5.2	Σηματοδοσία για εγκατάσταση δέσμευσης πόρων μέσω του RSVP-MP	93
5.3	Σηματοδοσία RSVP μέσω του RSVP-MP μετά από μεταπομπή	94
5.4	Τοπολογία ιεραρχικού δικτύου πρόσβασης με RSVP-MP	96
5.5	Σηματοδοσία για εγκατάσταση δέσμευσης πόρων σε ιεραρχικό δίκτυο RSVP-MP	97
5.6	Δίκτυο πρόσβασης με πολλαπλά RSVP-MP στα σύνορα	99
5.7	Δεσμεύσεις σε ένα δίκτυο πρόσβασης με πολλαπλά RSVP-MP στα σύνορα μετά από μεταπομπή	100
6.1	Τοπολογία δικτύου πρόσβασης	105
6.2	Ανάλυση προσφερόμενης κίνησης σε μία κυψέλη	107
6.3	Πιθανότητα απόρριψης σε σχέση με το ρυθμό άφιξης νέας κίνησης λ	110
6.4	Πιθανότητα απόρριψης σε σχέση με την κινητικότητα	111
6.5	Αξιοποίηση εξωτερικής γραμμής σε σχέση με τον ρυθμό αφίξεων λ	112
6.6	Αξιοποίηση εσωτερικών γραμμών σε σχέση με τον ρυθμό αφίξεων λ	112
6.7	Αξιοποίηση εξωτερικής γραμμής σε σχέση με την κινητικότητα	113
6.8	Αξιοποίηση εσωτερικών γραμμών σε σχέση με την κινητικότητα	114
6.9	Ιεραρχικό δίκτυο πρόσβασης με L επίπεδα και N_i πλάτος βαθμίδας	115
6.10	Σχηματική παράσταση διάσπασης κίνησης ζεύξης	116
6.11	Συνολική πιθανότητα απόρριψης σε σχέση με το ρυθμό άφιξης νέας κίνησης λ	123
6.12	Συνολική πιθανότητα απόρριψης σε σχέση με την κινητικότητα	124
6.13	Πιθανότητες απόρριψης στα ενδιάμεσα στάδια επίπεδα του συστήματος RSVP σε σχέση με την κινητικότητα	125
6.14	Αρρυθμία και peakedness της προσφερόμενης κίνησης στο σύστημα RSVP	126
6.15	Συνολικές πιθανότητες απόρριψης για διαφορετικές διαρρυθμίσεις του δικτύου πρόσβασης	127

Πρόλογος - Ευχαριστίες

*Σα βγεις στον πηγαιμό για την Ιθάκη,
να εύχεσαι νάναι μακρύς ο δρόμος,
γεμάτος περιπέτειες, γεμάτος γνώσεις.
Κ. Π. Καβάφης*

Η εργασία αυτή αποτελεί την παρουσίαση της ερευνητικής μου εργασίας που πραγματοποιήθηκε τα τέσσερα τελευταία χρόνια στα θέματα της αλληλεπίδρασης της κινητικότητας και ποιότητας υπηρεσίας σε IP δίκτυα. Η όλη διαδικασία άνοιξε για εμένα νέους ορίζοντες σε ότι αφορά τη μάθηση και τη συνεργασία. Στο διάστημα αυτό, διάβασα, άκουσα, κατάλαβα, και έμαθα πολλά από πολλούς ανθρώπους στους οποίους θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου.

Στον Καθηγητή μου Λάζαρο Μεράκο οφείλω την αρχική εισαγωγή μου σε ερευνητικό περιβάλλον, και το διαρκώς αυξανόμενο ενδιαφέρον μου για τη βαθύτερη κατανόηση των πραγμάτων. Η καθοδήγηση και η υποστήριξη του τόσο σε επιστημονικό όσο και σε ανθρώπινο επίπεδο ήταν ανεκτίμητη. Η κριτική του ικανότητα, η συγκροτημένη του σκέψη, αλλά κυρίως η ευγένεια και το ήθος του αποτέλεσαν για εμένα πηγή μάθησης και παραδειγματισμού.

Η σύντροφος μου Δήμητρα, με την αγάπη και τη φροντίδα της σε ξένοιαστους και δύσκολους καιρούς, ήταν η κινητήρια δύναμη πίσω από την προσπάθειά μου. Η δεύτερη ιδιότητα της, της συναδέλφου, της επέτρεψε να βοηθήσει ακόμη περισσότερο με σημαντικές παρατηρήσεις, διορθώσεις, και σχολιασμό σε όλα τα στάδια της εκπόνησης του διδακτορικού. Χωρίς την αμέριστη συμπαράσταση της, δεν θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Επειδή τίποτα δεν μπορεί να χτίσει κανείς μόνος του, θα ήθελα να αναφερθώ στους φίλους και συνεργάτες με τους οποίους συζητούσαμε, σχολιάζαμε, διορθώναμε και τελειοποιούσαμε τις όποιες ιδέες μας. Ο Αλέξανδρος Καλόξυλος διακατέχεται από ενθουσιώδη ορμή, την οποία μοιράζεται με όσους βρίσκονται δίπλα του. Με τις εμπνεύσεις και τις υποδείξεις του προωθούσε την κατάσταση, όταν αυτή σκάλωνε. Η «δημιουργική» πίεση που ασκούσε έφερε τελικά τα αποτελέσματα της. Ο Βαγγέλης Ζέρβας προσέφερε τις πολύτιμες γνώσεις και συμβουλές του σε ιδιαίτερα κρίσιμες φάσεις της προσπάθειάς μου, δίνοντας μου ώθηση για τα επόμενα στάδια. Ο Στάθης Χατζηευθυμιάδης αποτέλεσε υπόδειγμα επιμονής και έμπνευση για τη συνέχιση της προσπάθειάς μου. Τους ευχαριστώ

θερμά.

Όντας μέλος μιας μεγαλύτερης ερευνητικής ομάδας, του Εργαστηρίου Δικτύων Επικοινωνιών είχα την ευκαιρία να ανταλλάξω απόψεις και φιλικές συζητήσεις περί παντός επιστητού, επιστημονικού ή μη, με τους συναδέλφους μου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω για όλα αυτά τους Δημήτρη Σκυριανόγλου, Νίκο Πασσά, Μίλτο Κυριακάκο, Γιώργο Νικολαΐδη, Τάσο Ιωαννίδη, Γιάννη και Νίκο Πρίγγουρη, Σταμάτη Παπαγιάννη, Γιώργο Λαμπρόπουλο, και όλους τους άλλους της ομάδας του εργαστηρίου.

Θα πρέπει ακόμη να ευχαριστήσω τους γονείς μου Παναγιώτη και Νίκη και τον αδελφό μου Στρατή για την υποστήριξη και συμπαράσταση τους σε κάθε σημείο της προσπάθειας μου και για την οικογενειακή γαλήνη που μου προσέφεραν. Θα ήθελα, ακόμη, να ευχαριστήσω το Ίδρυμα Α. Γ. Λεβέντη για την οικονομική ενίσχυση που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, ευχαριστώ όλους αυτούς που βοήθησαν με οποιονδήποτε τρόπο και δεν αναφέρονται ονομαστικά.

Το κείμενο στοιχειοθετήθηκε σε $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$, και χρησιμοποιήθηκε η γραμματοσειρά Κερκίς.

Αθήνα

Ιανουάριος 2004

Σαράντης Πασκαλής

paskalis@di.uoa.gr

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Τα δίκτυα επικοινωνιών γνωρίζουν τεράστια ανάπτυξη τις τελευταίες δεκαετίες. Η λειτουργία τους αποτελεί ζωτική ανάγκη του σύγχρονου κόσμου, και ο βαθμός εξάρτησης της κοινωνίας από αυτά είναι διαρκώς αυξανόμενος. Οι τελευταίες δικτυακές τεχνολογίες επικοινωνίας που εισέβαλαν δυναμικά στην καθημερινή ζωή είναι το Internet με την πληθώρα των εφαρμογών του και οι κινητές επικοινωνίες.

Η τεχνολογία Internet έχει εισχωρήσει σε κάθε μορφή δικτυακής υποδομής. Ο όγκος των διακινούμενων δεδομένων προβλέπεται ότι θα συνεχίσει να αυξάνει με εκρηκτικούς ρυθμούς—σε αντίθεση με τον όγκο των τηλεφωνικών κλήσεων (φωνής) ο οποίος αυξάνει με πολύ βραδύτερους ρυθμούς. Ως αποτέλεσμα της τάσης αυτής, το πρωτόκολλο Internet (IP), που είναι το κυρίαρχο πρωτόκολλο μεταφοράς δεδομένων, τείνει να αποτελέσει τη βάση για οποιαδήποτε μορφή δικτυακής επικοινωνίας. Ήδη, πολλοί τηλεπικοινωνιακοί οργανισμοί αντικαθιστούν ή συμπληρώνουν την υποδομή για τα τηλεφωνικά δίκτυα κορμού τους με IP δίκτυα.

Στα πλαίσια αυτής της τεχνολογικής μεταβολής, και με βάση τη μεγάλη διείσδυση των κινητών επικοινωνιών παγκοσμίως, προκύπτει η επιτακτική ανάγκη υποστήριξης κινητικότητας για το πρωτόκολλο IP. Η κινητικότητα στα IP δίκτυα υποστηρίζεται από το πρωτόκολλο Mobile IP και τις επεκτάσεις/τροποποιήσεις του. Ο βασικός μηχανισμός του πρωτοκόλλου ορίζει δύο διευθύνσεις για κινητά IP τερματικά, την οικεία (σταθερή) που αντιστοιχεί στη διεύθυνση που έχει το κινητό στο οικείο δίκτυο, και τη διεύθυνση μέριμνας (μεταβαλλόμενη) που ανταποκρίνεται τοπολογικά στην εκάστοτε θέση του κινητού. Η οικεία διεύθυνση εξασφαλίζει τη δυνατότητα επικοινωνίας με το κινητό τερματικό σε σταθερό σημείο αναφοράς, ενώ η διεύθυνση μέριμνας επιτρέπει τη δρομολόγηση των πακέτων δεδομένων στην τρέχουσα θέση του κινητού.

Οι εφαρμογές που αναπτύχθηκαν στο Internet, λόγω της εξάπλωσης του, καλύπτουν ένα ευρύτατο φάσμα. Επόμενο είναι να έχουν και διαφορετικές απαιτήσεις, όσον αφορά στην εξυπηρέτηση.

Οι διαδραστικές (interactive) εφαρμογές έχουν κατά κανόνα απαιτήσεις μικρής καθυστέρησης και εγγυημένου ρυθμού μετάδοσης, ενώ οι εφαρμογές μεταφοράς αρχείων απαιτούν πρωταρχικά αξιοπιστία. Χρειάζεται, επομένως, ένας τρόπος διαφοροποίησης της συμπεριφοράς των στοιχείων του δικτύου έναντι των διαφορετικών κλάσεων κίνησης, ώστε να παρέχεται η αναγκαία ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service, QoS). Οι μηχανισμοί που αναπτύχθηκαν για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας συνίστανται στη λειτουργικότητα διαφοροποίησης επεξεργασίας πακέτων στους δρομολογητές και στην ανταλλαγή σηματοδοσίας ανάμεσα τους για τη ρύθμιση της λειτουργικότητας αυτής. Το βασικό πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται για τη σηματοδοσία ποιότητας υπηρεσίας είναι το RSVP. Το RSVP χρησιμοποιείται κυρίως για την από-άκρη-σε-άκρη (end-to-end) δέσμευση πόρων στους ενδιάμεσους δρομολογητές για ροή πακέτων με βάση τον προορισμό τους (IP διεύθυνση).

Η συνύπαρξη των μηχανισμών κινητικότητας και ποιότητας υπηρεσίας στο Internet είναι αναποτελεσματική. Αυτό έχει συμβεί γιατί η ανάπτυξη των μηχανισμών ελέγχου κινητικότητας και υποστήριξης ποιότητας υπηρεσίας έγινε χωρίς πρόβλεψη διασυνεργασίας. Με τη λειτουργία και των δύο μηχανισμών, οι όποιες εγκατεστημένες δεσμεύσεις πόρων προς ένα κινητό τερματικό θα αφορούν στη διεύθυνση μέριμνας που έχει στην τρέχουσα θέση του. Αν το κινητό τερματικό μετακινηθεί, και η διεύθυνση μέριμνας του αλλάξει, οι εγκατεστημένες δεσμεύσεις ποιότητας υπηρεσίας δεν θα αντιστοιχούν πια στα νέα χαρακτηριστικά των ροών (διεύθυνση προορισμού) που κατευθύνονται στο κινητό. Δημιουργούνται, δηλαδή, δύο ειδών προβλήματα: (α) οι ροές προς το κινητό δεν θα απολαμβάνουν πια εγγυημένη ποιότητα υπηρεσίας και (β) οι πόροι που είχαν δεσμευθεί δεν θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν από άλλες ροές μέχρι τη λήξη των δεσμεύσεων, οδηγώντας σε υπο-αξιοποίηση του δικτύου.

Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων αναπτύχθηκε μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον. Προτάθηκε πλήθος προσεγγίσεων και λύσεων που αντιμετωπίζουν το συγκεκριμένο πρόβλημα, εισάγουν όμως άλλες προϋποθέσεις. Για παράδειγμα προτάθηκε η ριζική τροποποίηση του πρωτοκόλλου RSVP, ώστε να αναγνωρίζει τις ροές προς κάποιον κινητό κόμβο, ακόμη και όταν αλλάζει τη διεύθυνση μέριμνας του, το οποίο προϋποθέτει αντικατάσταση της λειτουργικότητας RSVP σε όλους τους δρομολογητές. Στην ενδιαφέρουσα αυτή περιοχή εστιάζεται και η παρούσα εργασία.

Η πρόταση που παρουσιάζεται προσεγγίζει το πρόβλημα από διαφορετική οπτική γωνία, επιχειρώντας την επίλυση του χωρίς βαθιές αλλαγές στα χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα. Αξιοποιώντας την ιεραρχική τοπολογία των δικτύων πρόσβασης, επιχειρείται ο περιορισμός των παρενεργειών της κινητικότητας στο εσωτερικό τους. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, προτείνεται μία λύση που μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα χωρίς επιπλέον αλλαγές στην υπάρχουσα λειτουργία των πρωτοκόλλων, των τερματικών ή των δρομολογητών. Απαιτείται μόνο η εισαγωγή της απαραίτητης

λειτουργικότητας στο άκρο του δικτύου πρόσβασης, μεταφράζοντας κατάλληλα τα μηνύματα RSVP από και προς το δίκτυο κορμού. Η αποδοτικότητα αυτής της πρότασης αναλύεται με τη χρήση δύο εργαλείων: των θεωρητικών μοντέλων και της προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ποσοτικοποιούν τις δυνατότητες βελτίωσης που παρέχει η προτεινόμενη λύση.

Η εργασία είναι δομημένη ως εξής:

Το Κεφάλαιο 2 αναλύει την υπάρχουσα κατάσταση στο χώρο της υποστήριξης κινητικότητας σε IP δίκτυα. Παρουσιάζεται το πρωτόκολλο Mobile IP, οι βασικές λειτουργικές μονάδες και ο τρόπος λειτουργίας του. Περιγράφεται η υποστήριξη κινητικότητας για τα δίκτυα IPv6 μέσω του Mobile IPv6 και αναδεικνύονται οι σημαντικότερες διαφορές του από το Mobile IPv4. Αναφέρονται τα σχήματα βελτιστοποίησης της τοπικής διαχείρισης κινητικότητας εντός του δικτύου πρόσβασης, δηλαδή της μικρο-κινητικότητας (micro-mobility). Η διαχείριση αυτή πραγματοποιείται είτε με τη λογική διατήρησης της κλασικής δρομολόγησης στο Internet είτε με αλλαγή των μηχανισμών δρομολόγησης. Τέλος, παρουσιάζονται και οι υπόλοιπες εναλλακτικές λύσεις διαχείρισης κινητικότητας.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφονται οι μηχανισμοί και οι λειτουργίες που χρησιμοποιούνται για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας στο Internet. Ξεκινώντας από την αρχική κατάσταση μεταφοράς δεδομένων με βάση την αρχή της «καλύτερης προσπάθειας» (best effort) και αφού περιγράφονται οι λόγοι για τους οποίους η πολιτική αυτή είναι κυρίαρχη, παρατίθενται τα προβλήματα που προκαλούνται στις σύγχρονες εφαρμογές και οι αιτίες για τις οποίες δεν καλύπτονται οι ανάγκες τους. Στη συνέχεια αναλύονται οι απαιτούμενοι μηχανισμοί στην υποδομή των δρομολογητών, οι οποίοι διακρίνονται στη διαφοροποιημένη επεξεργασία των πακέτων, και στην ανταλλαγή σηματοδοσίας ανάμεσα στους τελικούς χρήστες. Περιγράφεται η αρχιτεκτονική ολοκληρωμένων υπηρεσιών (IntServ), οι υπηρεσίες που παρέχει (Εγγυημένης Υπηρεσίας και Ελεγχόμενου Φορτίου) και το πρωτόκολλο σηματοδοσίας RSVP που χρησιμοποιείται. Ακολουθεί η προσέγγιση της αρχιτεκτονικής διαφοροποιημένων υπηρεσιών (DiffServ), καθώς και η απαραίτητη διαλειτουργικότητα μεταξύ των δύο αρχιτεκτονικών για την εκμετάλλευση των δυνατών σημείων κάθε μίας στις καταλληλότερες συνθήκες.

Το Κεφάλαιο 4 είναι αφιερωμένο στην αλληλεπίδραση των μηχανισμών υποστήριξης κινητικότητας και ποιότητας υπηρεσίας. Συγκεκριμένα, αναλύεται η συνδυασμένη λειτουργία RSVP και Mobile IP, τόσο για την αρχική εγκατάσταση σύνδεσης, όσο και για μεταφορά της σύνδεσης σε νέα θέση λόγω κινητικότητας, και αναλύονται τα προβλήματα που προκύπτουν. Στη συνέχεια παρατίθεται η πρότερη ερευνητική εργασία σχετικά με το θέμα αυτό. Περιγράφονται οι προτάσεις, τα προβλήματα και οι προοπτικές στο θέμα της ανεξαρτητοποίησης της ταυτότητας των ροών από τα φυσικά χαρακτηριστικά τους. Για την πλήρη κάλυψη του θέματος, αναφέρονται οι μηχανισμοί

παροχής προτεραιότητας στις μετακινούμενες συνδέσεις έναντι των νέων, το πλαίσιο μεταφοράς κατάστασης περιβάλλοντος (context transfer) σε γειτονικούς δρομολογητές, η λύση της επέκτασης της υπάρχουσας δέσμευσης προς το νέο δρομολογητή, αλλά και λύσεις διαλειτουργικότητας του RSVP με εναλλακτικές αρχιτεκτονικές διαχείρισης κινητικότητας.

Στο Κεφάλαιο 5 αναλύεται η πρόταση εισαγωγής της οντότητας του RSVP Mobility Proxy (RSVP-MP) (Πληρεξούσιου Διαχειριστή Κινητικότητας RSVP), δηλαδή της κατάλληλης λειτουργικότητας σε ένα μοναδικό δρομολογητή ενός ιεραρχικού δικτύου πρόσβασης. Αναλύεται το σκεπτικό της συγκεκριμένης πρότασης, οι συνθήκες υποδομής στις οποίες μπορεί να εφαρμοστεί και τα αναμενόμενα οφέλη. Ακολουθεί η περιγραφή της βασικής λειτουργικότητας του RSVP-MP, οι κανόνες επεξεργασίας των μηνύματων RSVP που εφαρμόζει, και η διατήρηση της αντίστοιχης κατάστασης RSVP στο εσωτερικό του, με πλήρη περιγραφή ενός παραδείγματος μεταπομπής στο δίκτυο πρόσβασης. Προτείνονται ακόμη πιθανές στρατηγικές εφαρμογής της τεχνολογίας RSVP-MP σε δίκτυα πρόσβασης.

Η ανάλυση της αποδοτικότητας του προτεινόμενου σχήματος παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 6. Περιγράφεται η βελτίωση της ταχύτητας επανεγκατάστασης των δεσμεύσεων μετά από μία μεταπομπή. Για την εκτίμηση της πιθανότητας απόρριψης των αιτήσεων από τον τοπικό έλεγχο αποδοχής (admission control) χρησιμοποιούνται ως εργαλεία θεωρητικά μοντέλα και προσομοίωση. Τα αποτελέσματα τους αναδεικνύουν την σαφή βελτίωση της αποδοτικότητας του δικτύου πρόσβασης, ειδικά σε συνθήκες υψηλού φόρτου και κινητικότητας. Ακόμη, αναλύεται η κατανομή των πόρων του δικτύου και επισημαίνεται η αύξηση της αξιοποίησης τους.

Τέλος, το Κεφάλαιο 7 ανακεφαλαιώνει την πραγματοποιηθείσα εργασία. Παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν, και δίνονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα στον τομέα της αλληλεπίδρασης κινητικότητας και ποιότητας υπηρεσίας στο Internet.

Κεφάλαιο 2

Κινητικότητα

Η διαχείριση της κινητικότητας των κόμβων στο Internet είναι ένα θέμα που αντιμετωπίστηκε ερευνητικά την προηγούμενη δεκαετία. Αναπτύχθηκαν πρωτόκολλα σηματοδοσίας τόσο για τη γενική περίπτωση περιαγωγής σε επισκεπτόμενα IP δίκτυα, όσο και για ειδικότερες περιπτώσεις μεταπομπής (handoff) σε γειτονικά IP υποδίκτυα, που ελέγχονται από την ίδια διαχειριστική αρχή. Οι λύσεις που δόθηκαν χρησιμοποιούν ανταλλαγή σηματοδοσίας για τον έλεγχο της δρομολόγησης πακέτων από και προς τον κινητό IP κόμβο. Ο έλεγχος αυτός επιτυγχάνεται είτε με κατάλληλη διαμόρφωση των IP πακέτων είτε με την αλλαγή του μηχανισμού δρομολόγησης. Τα σημαντικότερα πρωτόκολλα είναι το Mobile IP για IPv4 δίκτυα και το Mobile IPv6 για IPv6 δίκτυα.

Στην ενότητα αυτή αναφέρεται επιγραμματικά ο τρόπος λειτουργίας της δρομολόγησης στα δίκτυα Internet, το πρόβλημα που δημιουργείται από την αλλαγή θέσης ενός κόμβου και οι απαιτήσεις που πρέπει να πληροί ένα πρωτόκολλο υποστήριξης κινητικότητας. Παρουσιάζεται η προδιαγραφή του πρωτοκόλλου Mobile IP, οι βασικές λειτουργικές μονάδες και ο τρόπος λειτουργίας του. Στη συνέχεια αναλύονται τα προβλήματα της λειτουργίας του και αναφέρονται οι προτεινόμενοι τρόποι αντιμετώπισης τους. Ακολουθεί η περιγραφή της υποστήριξης κινητικότητας για το πρωτόκολλο IPv6, μαζί με μια σύντομη παρουσίαση του IPv6. Περιγράφεται το Mobile IPv6 και αναδεικνύονται οι σημαντικότερες διαφορές του από το Mobile IPv4. Οι επόμενες παράγραφοι αναφέρονται σε σχήματα βελτιστοποίησης της τοπικής διαχείρισης κινητικότητας σε γειτονικές περιοχές, δηλαδή της μικρο-κινητικότητας (micro-mobility) είτε με τη λογική διατήρησης της κλασικής δρομολόγησης στο Internet είτε με αλλαγή των μηχανισμών δρομολόγησης. Οι υπόλοιπες εναλλακτικές λύσεις διαχείρισης κινητικότητας αναφέρονται στη συνέχεια και περιλαμβάνουν λιγότερο δημοφιλείς προσεγγίσεις, όπως διαχείριση κινητικότητας σε ανώτερα επίπεδα (μεταφοράς ή εφαρμογής) ή κινητικότητα μέσω multicast. Τέλος επιχειρείται η αποτίμηση της κατάστασης σε ό,τι αφορά τα πρωτόκολλα σηματοδοσίας και τη διαχείριση κινητικότητας.

2.1 Δρομολόγηση IP

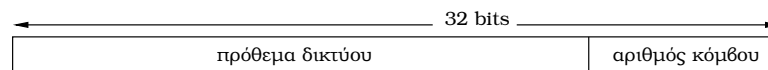
Το διαδίκτυο Internet είναι οικοδομημένο με βάση την ομάδα πρωτοκόλλων Internet, και κυρίως το πρωτόκολλο Internet (IP) [102]. Οι προδιαγραφές του Internet εκδίδονται σε μορφή RFC (Request for Comments) από τον οργανισμό IETF (Internet Engineering Task Force) [48]. Η βασική αρχή του δικτύου είναι η μεταγωγή πακέτων (packet switching), σε αντίθεση με το τηλεφωνικό δίκτυο που βασίζεται σε μεταγωγή κυκλώματος (circuit-switching). Το πρωτόκολλο Internet δρομολογεί τα πακέτα από την πηγή στον προορισμό τους με τη βοήθεια ενδιάμεσων δρομολογητών (routers). Για κάθε πακέτο δεδομένων, κάθε ενδιάμεσος δρομολογητής επιλέγει το επόμενο βήμα (hop) του πακέτου με βάση την εγγραφή στον πίνακα δρομολόγησης του που ταιριάζει καλύτερα στη διεύθυνση προορισμού. Επιπλέον πληροφορίες για τη δρομολόγηση σε IP δίκτυα μπορούν να βρεθούν σε εισαγωγικά βιβλία δικτύων υπολογιστών [146, 67].

Ο ρόλος των πρωτοκόλλων δρομολόγησης είναι να επιτρέπουν στους δρομολογητές να ανταλλάσσουν πληροφορίες σχετικά με τα δίκτυα, τα οποία διασυνδέουν. Με βάση τις πληροφορίες αυτές οι δρομολογητές διαμορφώνουν τους πίνακες δρομολόγησης τους. Για την ανταλλαγή των πληροφοριών αυτών χρησιμοποιούνται πρωτόκολλα για τη δρομολόγηση στο εσωτερικό δικτύων (π.χ. OSPF [80]) ή και μεταξύ δικτύων (π.χ. BGP [108]). Καθώς η πληροφορία δρομολόγησης διαχέεται στο Internet, τελικά κάθε δρομολογητής θα γνωρίζει αρκετά για τη σωστή δρομολόγηση των πακέτων προς τον τελικό του προορισμό. Οι κόμβοι που δεν είναι δρομολογητές, συνήθως στέλνουν όλα τα πακέτα τους προς έναν προκαθορισμένο δρομολογητή.

Οι δρομολογητές δέχονται τα πακέτα δεδομένων από εισερχόμενες διεπαφές (interfaces) και τα μεταβιβάζουν στις κατάλληλες εξερχόμενες διεπαφές με βάση τον εσωτερικό πίνακα δρομολόγησης. Πρέπει να αποφασίζουν για κάθε πακέτο τον τρόπο προώθησης, δηλαδή να επιλέγουν την κατάλληλη εξερχόμενη διεπαφή για το συγκεκριμένο πακέτο, ώστε να σχηματιστεί το συνολικό μονοπάτι (route). Οι περισσότεροι δρομολογητές έχουν γνώση για ένα πολύ περιορισμένο αριθμό δρομολογήσεων στο Internet, προωθώντας τα υπόλοιπα πακέτα σε κάποιον άλλο προκαθορισμένο δρομολογητή για περαιτέρω επεξεργασία. Με τον τρόπο αυτό, τα πακέτα προχωράνε είτε μέχρι να φτάσουν στο σωστό δίκτυο είτε να φτάσουν σε εθνικούς ή διεθνείς δρομολογητές στο δίκτυο ραχοκοκαλιάς (backbone) οι οποίοι έχουν πλήρη, αν και ομαδοποιημένη πληροφορία, για όλα τα μονοπάτια στο Internet. Οι πιθανές δρομολογήσεις καταγράφονται στους πίνακες δρομολόγησης. Είναι προφανές ότι υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον στη εύρεση τρόπων μείωσης του αριθμού κανόνων δρομολογήσης που αποθηκεύονται σε κάθε δρομολογητή.

Η κατανομή και η διαχείριση των διευθύνσεων δικτύου IP ενέχουν την υπόθεση ύπαρξης στενής σχέσης μεταξύ της IP διεύθυνσης ενός υπολογιστή και της φυσικής τοποθεσίας στην οποία

βρίσκεται. Η υπόθεση αυτή προκύπτει από το γεγονός ότι το δίκτυο μπορεί να μοντελοποιηθεί με τη διασύνδεση από ένα ή περισσότερα καλώδια (π.χ. Ethernet με τυχόν hubs) και επομένως μπορεί να αντιστοιχηθεί σε μια τοποθεσία. Το δίκτυο διευθυνσιοδοτείται με ένα μοναδικό IP πρόθεμα [124] και σε όλους τους υπολογιστές που ανήκουν στο συγκεκριμένο δίκτυο έχει ανατεθεί IP διεύθυνση με το συγκεκριμένο πρόθεμα. Η ύπαρξη κοινού δικτυακού προθέματος σε οποιουδήποτε δύο υπολογιστές σημαίνει μεταξύ άλλων ότι μπορούν να επικοινωνήσουν χωρίς τη μεσολάβηση κάποιου δρομολογητή. Οι υπολογιστές που δεν ανήκουν στο συγκεκριμένο δίκτυο θα έχουν διαφορετικό δικτυακό πρόθεμα, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση του δικτύου στο οποίο είναι προσαρτημένοι.



Σχήμα 2.1: Δομή IP διεύθυνσης

Οι IP διευθύνσεις μπορούν να χωριστούν σε δύο τμήματα (Σχήμα 2.1):

- Το πρόθεμα δρομολόγησης καθορίζει το δίκτυο στο οποίο ανήκει η διεύθυνση.
- Ο αριθμός κόμβου, ο οποίος βρίσκεται στα λιγότερο σημαντικά bits της IP διεύθυνσης καθορίζει τη μοναδικότητα της IP διεύθυνσης του κόμβου.

Ουσιαστικά όλες οι IP διευθύνσεις διαιρούνται σε πρόθεμα δικτύου και αριθμό κόμβου. Οι αιτίες για τη διαίρεση είναι λόγοι επεκτασιμότητας, καθώς με επίπεδη διευθυνσιοδότηση κάθε κόμβος θα έπρεπε να είχε δική του εγγραφή σε κάθε δρομολογητή. Στην πραγματικότητα, οι εγγραφές στους πίνακες των δρομολογητών αναφέρονται σε σύνολα κόμβων (δίκτυα κόμβων) και όχι σε μεμονωμένους κόμβους. Συνεπώς, οι δρομολογητές χρησιμοποιούν τοπολογική διευθυνσιοδότηση και υποθέτουν ότι οι κόμβοι ανήκουν στο υποδίκτυο που ορίζεται από το πρόθεμα δικτύου της διεύθυνσης τους, και η IP διεύθυνση καθορίζει το σημείο προσάρτησης ενός κινητού κόμβου.

2.1.1 Αλληλεπίδραση Κινητικότητας-Δρομολόγησης

Το πρόβλημα της αλληλεπίδρασης της κινητικότητας με τη δρομολόγηση έγκειται στο γεγονός ότι όταν οι κινητοί κόμβοι μετακινούνται μεταξύ IP δικτύων δεν μπορούν να επικοινωνήσουν με την ίδια IP διεύθυνση. Το πρόθεμα δικτύου που χρησιμοποιείται είναι διαφορετικό κάθε φορά. Το πρωτόκολλο IP δε σχεδιάστηκε για υποστήριξη κινητών κόμβων, οι οποίοι αλλάζουν θέσεις, ενώ έχουν ανοιχτές ενεργές συνδέσεις. Εάν ένας κινητός κόμβος επιθυμεί να αλλάξει το σημείο προσάρτησης του στο δίκτυο, χωρίς να χάσει την ικανότητα επικοινωνίας, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας από τους εξής μηχανισμούς:

- Ο κόμβος πρέπει να αλλάζει την IP διεύθυνση του κάθε φορά που αλλάζει το σημείο προσάρτησης, έτσι ώστε η νέα IP διεύθυνση να ανήκει τοπολογικά στο νέο υποδίκτυο ή
- Οι πληροφορίες δρομολόγησης προς τον συγκεκριμένο κόμβο πρέπει να διαδοθούν σε όλο το μηχανισμό δρομολόγησης του, έτσι ώστε τα πακέτα που προορίζονται για τον κόμβο αυτό να μη δρομολογούνται τοπολογικά στο αντίστοιχο υποδίκτυο Internet.

Καμμία από τις δύο αυτές εναλλακτικές λύσεις δεν είναι ικανοποιητική. Η πρώτη καθιστά αδύνατη τη διατήρηση των συνδέσεων επιπέδου μεταφοράς (κατά κανόνα TCP) όταν ο κόμβος αλλάζει τοποθεσία. Η δεύτερη έχει σοβαρά προβλήματα κλιμάκωσης, ειδικά με την αλματώδη αύξηση των κινούμενων υπολογιστικών συσκευών. Συνεπώς, χρειαζόταν μια πιο ριζοσπαστική λύση, η εγγενής υποστήριξη κινητών κόμβων στο επίπεδο δικτύου, δηλαδή στο IP.

2.1.2 Απαιτήσεις Κινητικότητας

Με βάση την παραδοχή ότι δεν υπήρχε καμμία προφανής λύση για το πρόβλημα της κινητικότητας στο Internet, καταγράφηκαν οι απαιτήσεις που θα έπρεπε να ικανοποιεί οποιοδήποτε νέο πρωτόκολλο θα υλοποιούσε υποστήριξη κινητικότητας [101]. Οι απαιτήσεις αυτές αφορούν τόσο στις λειτουργίες που θα πρέπει να υποστηρίζει ο κινητός κόμβος, όσο και στην επίδραση που θα έχει στην υπάρχουσα υποδομή του Internet.

- Ένας κινητός κόμβος πρέπει να μπορεί να επικοινωνεί με άλλους κόμβους αφού αλλάξει το σημείο προσάρτησης στο επίπεδο ζεύξης (link layer), αλλά χωρίς να αλλάξει η διεύθυνση του στο επίπεδο δικτύου (network layer), δηλαδή η IP διεύθυνση.
- Ο κινητός κόμβος πρέπει να μπορεί να επικοινωνεί με άλλους κόμβους οι οποίοι δεν υποστηρίζουν κατ' ανάγκη λειτουργίες αναγνώρισης και συνεργασίας με πρωτόκολλα κινητικότητας. Δεν πρέπει να απαιτούνται αλλαγές σε κόμβους ή δρομολογητές που δεν συμμετέχουν στον μηχανισμό κινητικότητας.
- Όλα τα μηνύματα που χρησιμοποιούνται για σηματοδότηση κινητικότητας πρέπει να πιστοποιούνται για λόγους ασφάλειας.
- Ο αριθμός και το μέγεθος των μηνυμάτων ελέγχου και σηματοδότησης πρέπει να διατηρείται σε πολύ χαμηλά επίπεδα, αφού η σύνδεση ενός κινητού κόμβου με το Internet θα είναι κατά κανόνα ασύρματη, δηλαδή χαμηλής χωρητικότητας και με υψηλότερη πιθανότητα λάθους στην επικοινωνία σε σχέση με τα παραδοσιακά ενσύρματα δίκτυα.

- Θα πρέπει να αποφεύγεται η άσκοπη κατανάλωση ενέργειας (ανταλλαγή πολλών μηνυμάτων) εξαιτίας της τροφοδοσίας του κινητού κόμβου από μπαταρία.

Η πράξη του κινητού κόμβου να αλλάζει σημείο προσάρτησης ονομάζεται *μεταπομπή (handoff)*.

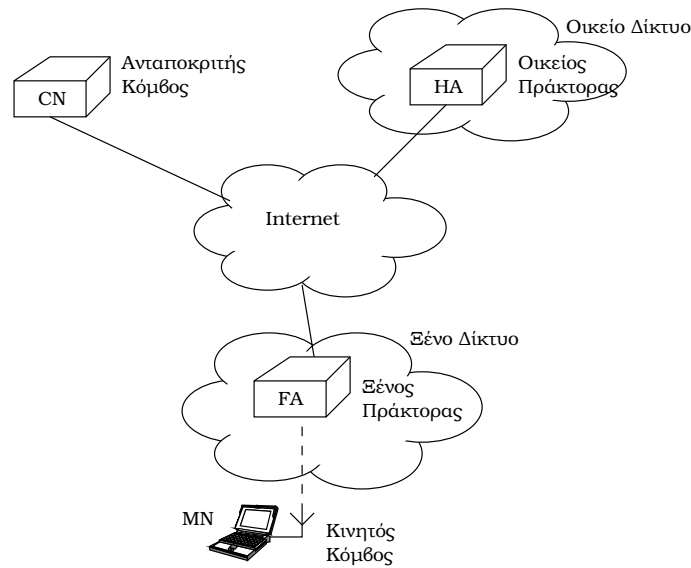
2.2 Mobile IP

Η πρώτη προδιαγραφή πρωτοκόλλου υποστήριξης κινητικότητας από την IETF ήταν το *Mobile IP* με τη μορφή του RFC 2002 [100] το 1996. Η τρέχουσα προδιαγραφή καθορίζεται από το RFC 3344 [101]. Το Mobile IP (ή Mobile IPv4 ή MIP ή MIPv4) έχει σχεδιαστεί ως προσθήκη στο πρωτόκολλο IP. Επιλύει το θέμα της κινητικότητας με τη χρήση από τον κινητό κόμβο δύο IP διευθύνσεων. Η μία διεύθυνση, η *Οικεία Διεύθυνση (Home Address)* είναι σταθερή και αναλλοίωτη, ανεξάρτητα από το σημείο προσάρτησης του κινητού στο δίκτυο. Αντιστοιχεί στην IP διεύθυνση που έχει ο κινητός κόμβος στο Οικείο Δίκτυο του (Home Network), όπου και ανήκει διαχειριστικά. Χρησιμοποιείται ως διεύθυνση αναφοράς από τα ανώτερα στρώματα, π.χ. για την αναγνώριση TCP συνδέσεων. Η άλλη διεύθυνση, η *Διεύθυνση Μέριμνας (Care of Address)*, μεταβάλλεται σε κάθε σημείο προσάρτησης και μπορεί να θεωρηθεί ως η τοπολογικά σωστή διεύθυνση του κόμβου· περιέχει το σωστό πρόθεμα δικτύου, αποδίδεται από τους εκάστοτε πράκτορες κινητικότητας στα επισκεπτόμενα Ξένα Δίκτυα (Foreign Networks) και προσδιορίζει το σημείο προσάρτησης του κόμβου ως προς την υπάρχουσα δικτυακή τοπολογία.

Η τοπολογία του δικτύου και οι λειτουργικές οντότητες του Mobile IP απεικονίζονται στο Σχήμα 2.2. Βασικές οντότητες της λειτουργίας του πρωτοκόλλου είναι ο *Κινητός Κόμβος (Mobile Node, MN)*, ο *Οικείος Πράκτορας (Home Agent, HA)* στο οικείο δίκτυο, ο *Ξένος Πράκτορας (Foreign Agent, FA)* στο επισκεπτόμενο ή ξένο δίκτυο και ο *Ανταποκριτής Κόμβος (Correspondent Node, CN)*, ο οποίος είναι οποιοσδήποτε κόμβος στο Internet που θέλει να επικοινωνήσει με τον κινητό κόμβο. Η λειτουργία του πρωτοκόλλου Mobile IP περιγράφεται αναλυτικά στις παρακάτω παραγράφους.

Το Mobile IP μπορεί να χρησιμοποιήσει δύο τύπους διευθύνσεων μέριμνας: τη διεύθυνση μέριμνας ξένου πράκτορα, όπου η διεύθυνση μέριμνας είναι η IP διεύθυνση του ξένου πράκτορα ή μία «συστεγασμένη» (co-located) διεύθυνση μέριμνας που είναι μία IP διεύθυνση που ανατέθηκε στον κινητό κόμβο στο επισκεπτόμενο δίκτυο, και την οποία έχει συσχετίσει με μία δικτυακή διεπαφή. Ο συνήθης τρόπος λειτουργίας χρησιμοποιεί τη διεύθυνση μέριμνας ξένου πράκτορα, κυρίως λόγω της έλλειψης IP διευθύνσεων.

Το Mobile IP απαιτεί την ύπαρξη ενός εξειδικευμένου κόμβου στο οικείο δίκτυο του κινητού κόμβου και συγκεκριμένα του οικείου πράκτορα. Ο οικείος πράκτορας είναι ένας δρομολογητής επιφορτισμένος με λειτουργίες υποστήριξης κινητικότητας. Όταν ο κινητός κόμβος βρίσκεται



Σχήμα 2.2: Τοπολογία λειτουργίας Mobile IP

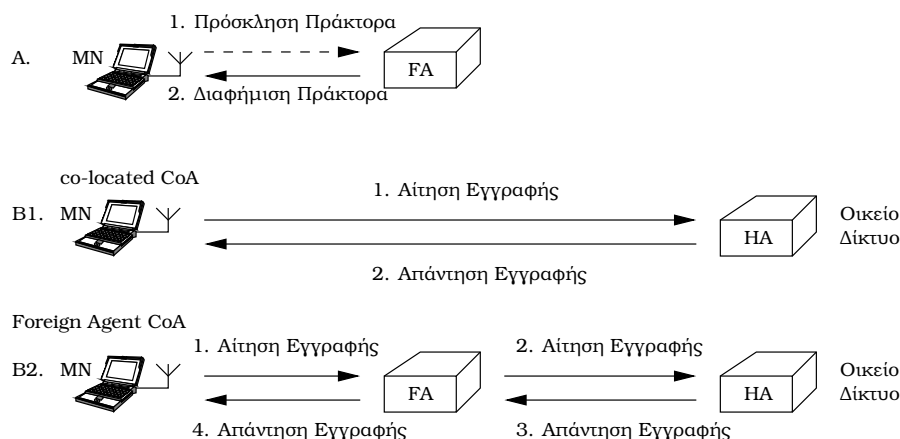
προσαρτημένος στο οικείο δίκτυο του, χρησιμοποιεί την οικεία του διεύθυνση και η δρομολόγηση των πακέτων που κατευθύνονται προς αυτόν πραγματοποιείται φυσιολογικά. Όταν ο κινητός κόμβος βρίσκεται προσαρτημένος σε κάποιο απομακρυσμένο (ξένο) δίκτυο, ο οικείος πράκτορας αναχαιτίζει όλα τα πακέτα που προορίζονται για την οικεία διεύθυνση του κινητού κόμβου και φροντίζει να παραδοθούν στο τρέχον σημείο προσάρτησης του κινητού κόμβου.

Όταν ο κινητός κόμβος μετακινηθεί, του ανατίθεται μία νέα IP διεύθυνση (η διεύθυνση μέριμνας) την οποία πληροφορεί στον οικείο πράκτορα του. Η διεύθυνση μέριμνας είναι συνήθως η IP διεύθυνση του ξένου πράκτορα. Ο οικείος πράκτορας παραδίδει τα πακέτα που προορίζονται για τον κινητό κόμβο στη διεύθυνση μέριμνας του. Η διαδικασία προώθησης των πακέτων από τον οικείο πράκτορα στον κινητό κόμβο προϋποθέτει ότι τα πακέτα θα μεταβληθούν με τέτοιο τρόπο ώστε η διεύθυνση προορισμού του πακέτου να είναι η διεύθυνση μέριμνας του κινητού κόμβου. Η τεχνική που χρησιμοποιείται είναι η *ενθυλάκωση (encapsulation ή tunneling)*. Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, ο οικείος πράκτορας κατασκευάζει και προσθέτει στο πακέτο μία IP επικεφαλίδα που περιέχει τη διεύθυνση μέριμνας ως διεύθυνση προορισμού. Η νέα αυτή επικεφαλίδα παρέχει όλη την πληροφορία δρομολόγησης που απαιτείται για να προωθηθεί το πακέτο στο τρέχον σημείο προσάρτησης του κινητού κόμβου. Όταν το πακέτο φθάσει στη διεύθυνση μέριμνας, πραγματοποιείται η αντίστροφη διαδικασία και το πρωτότυπο πακέτο αποθυλακώνεται (συνήθως από τον ξένο πράκτορα), επανεμφανίζεται η οικεία διεύθυνση ως διεύθυνση προορισμού, και προωθείται στον κινητό κόμβο. Στη συνέχεια, το πακέτο φθάνει στον κινητό κόμβο με την ίδια μορφή που είχε στο οικείο δίκτυο και τα επίπεδα μεταφοράς (TCP) δεν αντιλαμβάνονται καμμία διαφορά λόγω μετακίνησης.

Αναλυτικότερη παρουσίαση του Mobile IP και των μηχανισμών του μπορεί να βρεθεί στα [96, 123].

2.2.1 Ανακάλυψη Διεύθυνσης Μέριμνας

Η απόκτηση της διεύθυνσης μέριμνας στο Mobile IP βασίζεται στην υπάρχουσα προδιαγραφή για Διαφημίσεις Δρομολογητών (Router Advertisements) [31]. Προδιαγράφονται, δηλαδή, επιπλέον πεδία στις διαφημίσεις δρομολογητών τα οποία χειρίζονται τις λειτουργίες κινητικότητας. Οι επαυξημένες αυτές διαφημίσεις δρομολογητών όταν προέρχονται από τον οικείο ή τον ξένο πράκτορα ονομάζονται Διαφημίσεις Πρακτόρων (Agent Advertisements). Οι πράκτορες συνήθως διαφημίζουν την ύπαρξη τους σε τακτά διαστήματα. Αν κάποιος κινητός κόμβος χρειάζεται να συσχετιστεί με μία διεύθυνση μέριμνας και δεν επιθυμεί να περιμένει την περιοδική διαφήμιση, μπορεί προαιρετικά να αποστείλει μια Πρόσκληση Πράκτορα (Agent Solicitation) η οποία θα απαντηθεί με ένα μήνυμα διαφήμισης πράκτορα από οποιονδήποτε οικείο ή ξένο πράκτορα την παραλάβει. Οι διαδικασίες αυτές αναπαρίσταται στο βήμα Α του Σχήματος 2.3.



Σχήμα 2.3: Ανακάλυψη διεύθυνσης μέριμνας και εγγραφή της

Με τις διαφημίσεις πρακτόρων ο κινητός κόμβος μπορεί να ανιχνεύσει τους πράκτορες κινητικότητας, να πληροφορηθεί για μία ή παραπάνω διευθύνσεις μέριμνας, για τις επιμέρους λειτουργίες που είναι διαθέσιμες (εναλλακτικές τεχνικές ενθυλάκωσης), να αναγνωρίσει το πρόθεμα του δικτύου στο οποίο είναι προσαρτημένος και να δει αν βρίσκεται στο οικείο δίκτυο ή σε κάποιο ξένο.

2.2.2 Εγγραφή Διεύθυνσης Μέριμνας

Η διεύθυνση μέριμνας μπορεί να είναι είτε η IP διεύθυνση μιας εξωτερικής διεπαφής του ξένου πράκτορα είτε μια συστεγασμένη (colocated) IP διεύθυνση η οποία να αντιστοιχεί στον ίδιο

τον κινητό κόμβο.

Όταν ένας κινητός κόμβος αποκτήσει διεύθυνση μέριμνας, πρέπει να την κοινοποιήσει στον οικείο του πράκτορα. Στην περίπτωση που ο κινητός κόμβος χρησιμοποιεί συστεγασμένη διεύθυνση μέριμνας, στέλνει την αίτηση εγγραφής απευθείας στον οικείο πράκτορα, ο οποίος και απαντά στον κινητό κόμβο, όπως φαίνεται στο βήμα B1 του Σχήματος 2.3.

Στην περίπτωση που ο κινητός χρησιμοποιεί ως διεύθυνση μέριμνας μία διεύθυνση του ξένου πράκτορα, η διαδικασία εγγραφής περιλαμβάνει και επεξεργασία στον ξένο πράκτορα. Ο κινητός κόμβος στέλνει μία Αίτηση Εγγραφής (Registration Request) που περιέχει τη διεύθυνση μέριμνας στον ξένο πράκτορα. Ο ξένος πράκτορας την επεξεργάζεται και την προωθεί στον οικείο πράκτορα του κινητού κόμβου. Ο οικείος πράκτορας παραλαμβάνει την αίτηση, την εξετάζει ως προς την εγκυρότητα και την πιστοποίηση της, και αν εγκρίνει την αίτηση, ενημερώνει τον πίνακα δρομολόγησης του, και στέλνει μία Απάντηση Εγγραφής (Registration Reply) στον ξένο πράκτορα. Ο ξένος πράκτορας επεξεργάζεται την απάντηση και την προωθεί στον κινητό κόμβο. Σχηματικά η διαδικασία των μηνυμάτων παρουσιάζεται στο βήμα B2 του Σχήματος 2.3.

Οι αιτήσεις εγγραφής περιέχουν συγκεκριμένες παραμέτρους που χαρακτηρίζουν την ενθυλάκωση μέσω της οποίας ο οικείος πράκτορας θα παραδώσει τα πακέτα στη διεύθυνση μέριμνας. Αν ο οικείος πράκτορας αποδεχθεί την αίτηση εγγραφής, συσχετίζει την οικεία διεύθυνση του κινητού με τη διεύθυνση μέριμνας και διατηρεί τη συσχέτιση αυτή μέχρι τη λήξη του χρόνου εγγραφής. Η τριάδα που περιέχει την οικεία διεύθυνση, τη διεύθυνση μέριμνας και το χρόνο διάρκειας της εγγραφής ονομάζεται *δεσμός (binding)* για τον κινητό κόμβο.

Μια αίτηση εγγραφής μπορεί να θεωρηθεί αίτηση ανανέωσης του δεσμού που έχει αποσταλεί από τον κινητό κόμβο. Μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως μία απομακρυσμένη αίτηση ανακατεύθυνσης, αφού έχει αποσταλεί έξω από το οικείο δίκτυο στον οικείο πράκτορα και μεταβάλλει τον πίνακα δρομολόγησης του οικείου πράκτορα. Η ανάγκη για πιστοποίηση του απομακρυσμένου μηνύματος φαίνεται ξεκάθαρα σ' αυτήν την περίπτωση. Ο οικείος πράκτορας πρέπει να είναι σίγουρος ότι το συγκεκριμένο μήνυμα έχει αποστολέα τον κινητό κόμβο και όχι κάποιο κακόβουλο κόμβο που παριστάνει τον κινητό κόμβο. Κάθε κινητός κόμβος και οικείος πράκτορας πρέπει να μοιράζονται μια σχέση ασφάλειας και να μπορούν να δημιουργούν ψηφιακές υπογραφές για τις αιτήσεις εγγραφής μέσω του αλγορίθμου MD5 [110] για κλειδιά μήκους 128 bits. Επιπλέον κάθε αίτηση εγγραφής πρέπει να είναι διαφορετική από τις άλλες για προστασία από επιθέσεις επανάληψης (replay attacks). Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ένα πεδίο ταυτότητας, μοναδικό για κάθε αίτηση.

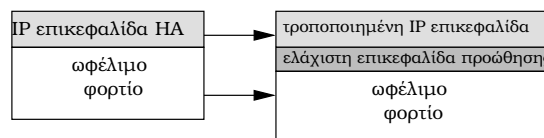
Το πεδίο ταυτότητας χρησιμοποιείται και από τον ξένο πράκτορα για τη συσχέτιση αιτήσεων εγγραφής με τις αντίστοιχες απαντήσεις εγγραφής, ώστε η απάντηση στη συνέχεια να προωθηθεί

στον σωστό κινητό κόμβο. Οι ξένοι πράκτορες είναι ως επί το πλείστον παθητικοί κόμβοι στη διαδικασία εγγραφής, αναμεταδίδοντας αιτήσεις εγγραφής και απαντήσεις σε αυτές μεταξύ του οικείου πράκτορα και του κινητού κόμβου. Ο ξένος πράκτορας ακόμη αποθυλακώνει τα πακέτα από τον οικείο πράκτορα και τα προωθεί στον κινητό κόμβο.

Το πρωτόκολλο Mobile IP έχει έναν επιπλέον μηχανισμό που χρησιμοποιείται όταν ο κινητός κόμβος δεν μπορεί να έρθει σε επαφή με τον οικείο πράκτορα του. Σε αυτή την περίπτωση, ο κινητός κόμβος μπορεί να προσπαθήσει να εγγραφεί με κάποιον άγνωστό του οικείο πράκτορα στο οικείο δίκτυο. Η μέθοδος αυτή της αυτόματης ανακάλυψης οικείου πράκτορα λειτουργεί με τη χρήση μιας IP διεύθυνσης broadcast αντί της IP διεύθυνσης του οικείου πράκτορα ως διεύθυνση προορισμού της αίτησης εγγραφής. Όταν το πακέτο broadcast φτάσει στο οικείο δίκτυο, άλλοι οικείοι πράκτορες θα στείλουν μια αρνητική απάντηση στον κινητό κόμβο. Όμως η αρνητική τους απάντηση θα περιέχει την IP διεύθυνση τους, την οποία μπορεί να χρησιμοποιήσει ο κινητός σε μια νέα απόπειρα εγγραφής.

2.2.3 Ενθυλάκωση προς τη Διεύθυνση Μέριμας

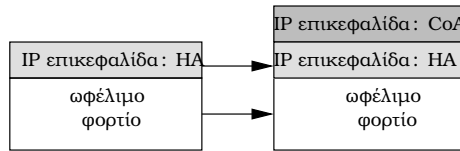
Υπάρχουν διάφορες μορφές ενθυλάκωσης πακέτων, ανάλογα με το λόγο χρήσης τους (ασφάλεια, κινητικότητα, δέσμευση πόρων, συνδεσιμότητα πίσω από firewall). Οι μορφές ενθυλάκωσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για κινητικότητα είναι η *Ελάχιστη Ενθυλάκωση (Minimal Encapsulation)* [95], η Ενθυλάκωση IP σε IP [94], αλλά και Ενθυλάκωση UDP (UDP encapsulation) [18].



Σχήμα 2.4: Ελάχιστη ενθυλάκωση

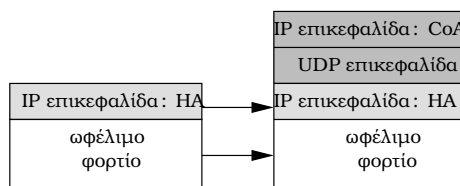
Η μορφή ενθυλάκωσης με τη μικρότερη μεγέθυνση πακέτου είναι η Ελάχιστη Ενθυλάκωση, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4. Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, στην προϋπάρχουσα IP επικεφαλίδα αλλάζουν (α) ο αριθμός πρωτοκόλλου του πακέτου, (β) η διεύθυνση πηγής και προορισμού αν διαφέρουν από τις αρχικές, (γ) το μέγεθος του πακέτου, και (δ) το άθροισμα ελέγχου του πακέτου (checksum). Επιπλέον, προστίθεται μία επιπλέον ελάχιστη επικεφαλίδα προώθησης (minimal forwarding header), η οποία περιέχει την απολύτως απαραίτητη πληροφορία για την ανακατασκευή του πακέτου (αρχικές διευθύνσεις πηγής και προορισμού, κτλ.). Στο Σχήμα 2.4 η διεύθυνση προορισμού στο αρχικό πακέτο είναι η οικεία διεύθυνση του κινητού κόμβου (Home

Address, HA). Μετά την ελάχιστη ενθυλάκωση, διεύθυνση προορισμού είναι η διεύθυνση μέριμνας (Care of Address, CoA) και η ελάχιστη επικεφαλίδα προώθησης περιέχει πληροφορίες για τη σωστή ανακατασκευή του αρχικού πακέτου.



Σχήμα 2.5: Ενθυλάκωση IP σε IP

Η πλέον διαδεδομένη μορφή ενθυλάκωσης είναι η *Ενθυλάκωση IP σε IP* [94]. Στην αφετηρία του τούνελ (εκεί όπου ενθυλακώνεται το πακέτο), προστίθεται μία νέα IP επικεφαλίδα, η επικεφαλίδα ενθυλάκωσης (Σχήμα 2.5). Η νέα επικεφαλίδα ενθυλάκωσης φέρει ως διεύθυνση πηγής την αφετηρία του τούνελ και ως διεύθυνση προορισμού το τέλος του τούνελ. Στην περίπτωση του Mobile IP, η διεύθυνση πηγής είναι η διεύθυνση του οικείου πράκτορα, ενώ η διεύθυνση προορισμού είναι η διεύθυνση μέριμνας του κινητού κόμβου. Με τη μέθοδο αυτή, διατηρείται ανέπαφη η αρχική IP επικεφαλίδα ως τμήμα του μέρους δεδομένων του πακέτου. Επομένως, για να ανακτήσει το πρωτότυπο πακέτο ο ξένος πράκτορας, απλώς απομακρύνει την επικεφαλίδα τούνελ και παραδίδει το πακέτο στον κινητό κόμβο. Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζονται οι διευσθύνσεις προορισμού ενός πακέτου για τον κινητό κόμβο πριν και μετά την ενθυλάκωση. Αρχικά η διεύθυνση προορισμού είναι η οικεία διεύθυνση HA και στη συνέχεια η επιπλέον επικεφαλίδα έχει διεύθυνση προορισμού τη διεύθυνση μέριμνας CoA.



Σχήμα 2.6: Ενθυλάκωση UDP

Οι ενθυλακώσεις που έχουν αναφερθεί δεν καλύπτουν την περίπτωση της ανάγκης χρήσης πληροφορίας από ανώτερα στρώματα για τη δρομολόγηση. Συγκεκριμένα σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιείται και ο αριθμός θύρας (port number) του πρωτοκόλλου μεταφοράς (TCP, UDP). Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η Ενθυλάκωση UDP (Σχήμα 2.6). Είναι παρόμοια με την Ενθυλάκωση IP σε IP, μόνο που επιπλέον προστίθεται και μια UDP επικεφαλίδα για να υπάρχει επιπλέον πληροφορία για το είδος της ροής των πακέτων.

Σε κάθε περίπτωση, μετά την έξοδο των πακέτων από το τούνελ στο σημείο αποθυλάκωσης (στον

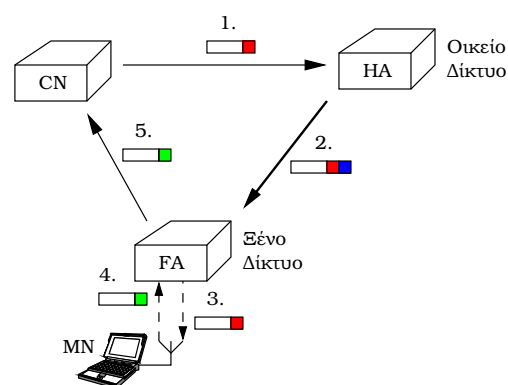
Ξένο Πράκτορα κατά κανόνα), προωθούνται με βάση την Οικεία Διεύθυνση του κινητού κόμβου. Ο Ξένος Πράκτορας τα προωθεί στην κατάλληλη διεπαφή ώστε να φτάσουν στο φυσικό σημείο προσάρτησης του κινητού κόμβου στο επισκεπτόμενο δίκτυο.

2.3 Προβλήματα Mobile IP και Λύσεις

Το πρωτόκολλο Mobile IP λύνει εν μέρει το πρόβλημα της κινητικότητας μιας τερματικής συσκευής στο Internet, αλλά εισάγει με τη σειρά του μια σειρά από υποβέλτιστες συνθήκες και ασυμβατότητες. Τα προβλήματα αυτά σχετίζονται με την υποβέλτιστη διαδρομή που ακολουθείται για την προώθηση των πακέτων στον κινητό κόμβο και με τη χρησιμοποιούμενη διεύθυνση πηγής στα πακέτα που στέλνει ο κινητός κόμβος όταν βρίσκεται σε ξένο δίκτυο. Τα θέματα αυτά παρουσιάζονται αναλυτικότερα στις επόμενες παραγράφους.

2.3.1 Υποβέλτιστη Δρομολόγηση

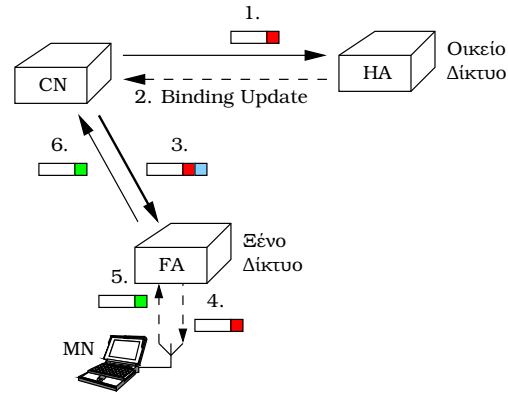
Όταν ένας κινητός κόμβος βρίσκεται σε κάποιο ξένο δίκτυο, λαμβάνει τα πακέτα που προορίζονται για την οικεία του διεύθυνση από ένα ανταποκριτή κόμβο, πάντα μέσω του οικείου πράκτορα. Η δρομολόγηση που ακολουθούν τα πακέτα προς τον κινητό κόμβο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.7, περιλαμβάνει πάντα τον οικείο πράκτορα. Ο κινητός κόμβος συνήθως απαντά χρησιμοποιώντας ως διεύθυνση προορισμού τη διεύθυνση πηγής του εισερχόμενου πακέτου, δηλαδή τη διεύθυνση του ανταποκριτή κόμβου.



Σχήμα 2.7: Τριγωνική δρομολόγηση

Αν και η δρομολόγηση από τον κινητό προς τον ανταποκριτή κόμβο είναι βέλτιστη, δεν μπορεί να ειπωθεί το ίδιο για την αντίθετη κατεύθυνση. Εκεί όλα τα πακέτα πρέπει να προωθηθούν μέσω του οικείου πράκτορα, και συγκεκριμένα μέσω της διαδρομής: ανταποκριτής κόμβος → οικείος πράκτορας → ξένος πράκτορας → κινητός κόμβος. Η πορεία που ακολουθούν τα πακέτα, για

μία πλήρη διαδρομή μετ' επιστροφής έχει τριγωνικό σχήμα και γι' αυτό ονομάζεται τριγωνική δρομολόγηση (triangular routing) 2.7.



Σχήμα 2.8: Βελτιστοποίηση δρομολόγησης

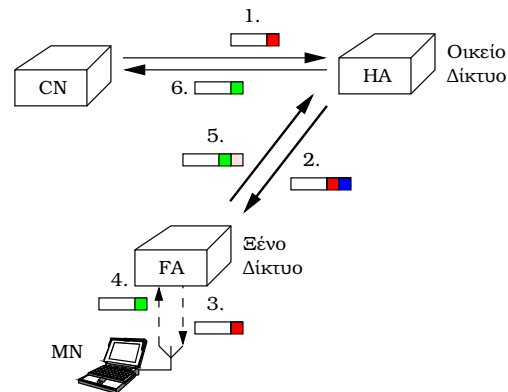
Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος έχει προταθεί η τεχνική της *Βελτιστοποίησης Δρομολόγησης (Route Optimization)* [98]. Η τεχνική αυτή προϋποθέτει αναβάθμιση του λειτουργικού συστήματος και του ανταποκριτή κόμβου, ώστε να αναγνωρίζει την κινητικότητα του συνομιλούντα κόμβου. Μετά την αναβάθμιση, ο ανταποκριτής κόμβος θα μπορεί να λαμβάνει και να επεξεργάζεται μηνύματα Mobile IP, δηλαδή τις εγγραφές διευθύνσεων μέριμνας, και να ενθυλακώνει ο ίδιος τα πακέτα προς τη διεύθυνση μέριμνας του κινητού κόμβου, παρακάμπτοντας τον οικείο πράκτορα. Όπως φαίνεται και αναλυτικά στο Σχήμα 2.8 η λειτουργία της βελτιστοποίησης δρομολόγησης έγκειται στο να δρομολογούνται ενθυλακωμένα τα πακέτα απευθείας στον ξένο πράκτορα από τον ανταποκριτή κόμβο.

2.3.2 Τοπολογικά Εσφαλμένη Αποστολή Πακέτων

Ο κινητός κόμβος αποστέλλει στον ανταποκριτή κόμβο πακέτα με πηγαία διεύθυνση την οικεία του διεύθυνση. Η τεχνική αυτή, παρ' ότι αποτελεσματική για τη δρομολόγηση, μπορεί να είναι ασύμβατη με την τοπολογία του δικτύου. Συγκεκριμένα, η πηγαία διεύθυνση των πακέτων που προέρχονται από τον κινητό κόμβο δεν έχει το πρόθεμα του ξένου δικτύου στο οποίο είναι προσαρτημένος. Αυτό δημιουργεί προβλήματα, τόσο στην αναγνώριση και επισκευή λαθών στο πρωτόκολλο IP, αλλά και σε πρωτόκολλα υψηλότερου επιπέδου, όσο και προβλήματα ασφαλείας.

Με αφορμή τις διαρκώς αυξανόμενες επιθέσεις άρνησης υπηρεσίας (Denial of Service), έχει εκδοθεί προδιαγραφή σύστασης από την IETF [33], για το «φιλτράρισμα εισόδου» (ingress filtering). Πρόκειται για τον έλεγχο και απόρριψη πακέτων από το εσωτερικό ενός δικτύου (προς τα έξω) αν αυτά δεν έχουν πηγαία διεύθυνση συμβατή με τις διευθύνσεις που αντιστοιχούν στο δίκτυο. Με τον τρόπο αυτό αποτυγχάνουν οι απόπειρες εξαπάτησης (spoofing) και οι κακόβουλοι κόμβοι μπορούν

να εντοπίζονται αποτελεσματικότερα.



Σχήμα 2.9: Αντίστροφη ενθυλάκωση

Η τεχνική αυτή έχει αρχίσει να εφαρμόζεται ολοένα και από περισσότερα δίκτυα με αποτέλεσμα να μην μπορεί να λειτουργεί καθόλου το Mobile IP στα δίκτυα αυτά. Η λύση που προδιαγράφηκε βασίζεται στην αρχή της σωστής τοπολογίας και χρησιμοποιεί την τεχνική της ενθυλάκωσης, αλλά προς την αντίστροφη κατεύθυνση [78]. Ο τρόπος λειτουργίας είναι ο εξής: τα πακέτα που προορίζονται για τον ανταποκριτή κόμβο ενθυλακώνονται στη διεύθυνση μέριμνας με προορισμό του τούνελ τον οικείο πράκτορα. Η διεύθυνση μέριμνας (ο ξένος πράκτορας ή ο κινητός κόμβος) ανήκει τοπολογικά στο ξένο δίκτυο, επομένως δεν δημιουργείται πρόβλημα τοπολογικής ορθότητας. Ο οικείος πράκτορας αποθυλακώνει τα πακέτα και τα προωθεί στον εκάστοτε ανταποκριτή κόμβο με πηγαία διεύθυνση την οικεία διεύθυνση πάντα του κινητού κόμβου, αλλά προερχόμενα από τοπολογικά σωστή τοποθεσία. Η λειτουργία του μηχανισμού αντίστροφης ενθυλάκωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.9.

Η προτεινόμενη λύση, αν και αντιμετωπίζει το πρόβλημα της τοπολογικής ορθότητας, έχει το μειονέκτημα της διπλής τριγωνικής δρομολόγησης. Παρόλα αυτά, έχει το πλεονέκτημα ότι απαιτεί αλλαγές μόνο στα στοιχεία του δικτύου που εμπλέκονται με την κινητικότητα (δηλαδή κινητό κόμβο, οικείο και ξένο πράκτορα), καθιστώντας την εφαρμογή της πολύ απλούστερη από την προσέγγιση της βελτιστοποίησης δρομολόγησης, που απαιτεί αλλαγές σε όλους τους κόμβους στο Internet (ολοι οι κόμβοι είναι δυνητικά ανταποκριτές κόμβοι).

2.4 Mobile IPv6

2.4.1 IPv6

Με την επερχόμενη έκδοση 6 του πρωτοκόλλου Internet, το επονομαζόμενο και IPv6 [30], έχει γίνει προσπάθεια να εξαλειφθούν τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζονται στο

Internet με την ευρέως διαδεδομένη έκδοση 4 (IPv4). Οι κυριότερες αλλαγές που σχεδιάζονται στο IPv6 είναι οι εξής:

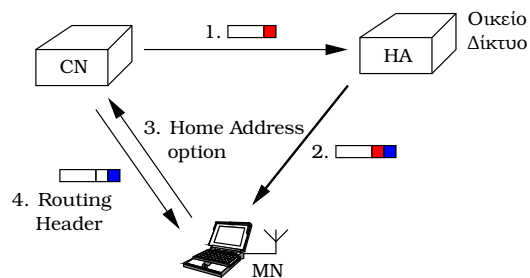
- *Εκτεταμένες δυνατότητες διευθυνσιοδότησης* [46]. Το IPv6 αυξάνει το μέγεθος της IP διεύθυνσης από 32 bits σε 128 bits, και μπορεί να υποστηρίξει ένα πολύ μεγαλύτερο αριθμό κόμβων (2^{128} αντί για 2^{32}), περισσότερα επίπεδα ιεραρχίας διευθυνσιοδότησης και απλούστερη ρύθμιση των διευθύνσεων (αυτόματη ή μη). Καθορίζεται ακόμη ένας νέος τύπος διεύθυνσης, το anycast [83] που χρησιμοποιείται για την αποστολή πακέτων σε οποιονδήποτε από μία ομάδα κόμβων.
- *Απλοποίηση της μορφής της επικεφαλίδας*. Μερικά πεδία της IPv4 επικεφαλίδας καταργούνται ή μετατρέπονται σε προαιρετικά για να μειωθεί το κόστος επεξεργασίας κατά τη διάρκεια της δρομολόγησης.
- *Βελτιωμένη υποστήριξη για επεκτάσεις και επιλογές*. Οι αλλαγές στην επικεφαλίδα επιτρέπουν πιο αποτελεσματική δρομολόγηση, λιγότερο αυστηρά όρια στο μέγεθος των πεδίων και μεγαλύτερη ευελιξία για την εισαγωγή νέων επιλογών στο μέλλον.
- *Δυνατότητα αναγνώρισης ροής* [58]. Προστίθεται ένα νέο πεδίο στην επικεφαλίδα IPv6, η ετικέτα ροής (flow label), που επιτρέπει τον εύκολο διαχωρισμό των πακέτων που ανήκουν σε μία συγκεκριμένη σύνδεση.
- *Αυξημένη ασφάλεια* [64]. Καθίσταται υποχρεωτική η υποστήριξη επεκτάσεων για την υποστήριξη της πιστοποίησης (authentication), ακεραιότητας των δεδομένων (data integrity) και απορρήτου των δεδομένων μέσω κρυπτογράφησης (encryption).
- *Υποστήριξη κινητών κόμβων* [57]. Υποστηρίζεται η κινητικότητα των κόμβων με τη χρήση βασικών λειτουργιών Mobile IPv6 εγγενώς σε όλους τους IPv6 κόμβους.

2.4.2 Λειτουργία Mobile IPv6

Οι βασικές αρχές λειτουργίας του Mobile IPv6 [57] είναι βασισμένες στη λειτουργία του Mobile IPv4. Ωστόσο, έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές βελτιώσεις και έχουν απαλοιφθεί σημαντικά προβλήματα εξαιτίας της χρήσης του IPv6. Για παράδειγμα καταργήθηκε η λειτουργικότητα του ξένου πράκτορα λόγω υπερεπάρκειας διευθύνσεων στο IPv6. Οι υπόλοιπες βασικές λειτουργίες παραμένουν ίδιες. Ο κινητός κόμβος ζητά και παίρνει μία IP διεύθυνση στο επισκεπτόμενο δίκτυο, την οποία χρησιμοποιεί ως διεύθυνση μέριμνας. Ο οικείος πράκτορας γνωρίζει πάντα την τρέχουσα αντιστοιχία οικείας διεύθυνσης—διεύθυνσης μέριμνας των κινητών κόμβων που ελέγχει.

Οι κόμβοι IPv6 έχουν κατά κανόνα ενσωματωμένη την υποστήριξη κινητικότητας, επομένως η βελτιστοποίηση δρομολόγησης είναι κανόνας. Η διαδικασία εγγραφής είναι επίσης απλοποιημένη και ενοποιημένη με τη διαδικασία βελτιστοποίησης δρομολόγησης που υλοποιείται σε όλους τους IPv6 κόμβους.

Μετά την αρχική διαδικασία εγγραφής, όταν κάποιος ανταποκριτής κόμβος θέλει να επικοινωνήσει με τον κινητό κόμβο, θα στείλει ένα πακέτο που προορίζεται στην οικεία διεύθυνση του κινητού κόμβου, όπως φαίνεται και στο βήμα 1 του Σχήματος 2.10. Ο οικείος πράκτορας θα το αναχαιτίσει και θα το ενθυλακώσει προς τη διεύθυνση μέριμνας του κινητού κόμβου. Η διεύθυνση μέριμνας αντιστοιχεί όμως στον ίδιο τον κινητό κόμβο και όχι στον ξένο πράκτορα.



Σχήμα 2.10: Βασική λειτουργία Mobile IPv6

Ο κινητός κόμβος, αντιλαμβανόμενος ότι το πακέτο ήρθε ενθυλακωμένο στέλνει στον ανταποκριτή κόμβο ένα πακέτο που περιέχει την τρέχουσα διεύθυνση μέριμνας (Binding Update). Ο ανταποκριτής κόμβος (με λειτουργικότητα που υποστηρίζει κινητικότητα) ενημερώνει την εσωτερική του βάση αντιστοίχισης οικείων διευθύνσεων—διευθύνσεων μέριμνας (Binding Cache) και από εκεί και πέρα στέλνει τα πακέτα που προορίζονται για τον κινητό κόμβο απευθείας στη διεύθυνση μέριμνας του.

Για την απευθείας αποστολή των πακέτων ανάμεσα στον κινητό και στον ανταποκριτή κόμβο χρησιμοποιούνται μηχανισμοί του IPv6 που χρησιμοποιούν νέα πεδία (επιλογές) στην IP επικεφαλίδα. Όταν στέλνει ο κινητός κόμβος από επισκεπτόμενο δίκτυο, τοποθετεί ως πηγαία διεύθυνση στα πακέτα τη διεύθυνση μέριμνας, και προσθέτει το πεδίο Home Address Option, ώστε να μπορεί ο ανταποκριτής κόμβος να τα συσχετίσει με την οικεία διεύθυνση του. Το πεδίο αυτό δεν επηρεάζει τη δρομολόγηση στους ενδιάμεσους δρομολογητές. Αντίστοιχα, ο ανταποκριτής κόμβος χρησιμοποιεί ένα πεδίο Routing Header, όπου τοποθετεί την οικεία διεύθυνση του κινητού κόμβου. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η ενθυλάκωση και στις δύο κατευθύνσεις.

2.4.3 Διαφορές–Βελτιώσεις ως προς Mobile IPv4

Ο σχεδιασμός του Mobile IPv6 επηρεάστηκε τόσο από την εμπειρία της ανάπτυξης του Mobile IPv4, όσο και από τις εκτεταμένες δυνατότητες που παρέχονται από το IPv6. Το Mobile IPv6 έχει πολλά κοινά σημεία με το Mobile IPv4, αλλά είναι ενσωματωμένο στο IPv6 και διαθέτει πολλές βελτιώσεις. Οι κυριότερες διαφορές μεταξύ του Mobile IPv4 και του Mobile IPv6 είναι οι εξής:

- Δεν υφίσταται πλέον ανάγκη για την ύπαρξη ξένων πρακτόρων στα επισκεπτόμενα δίκτυα.
- Το Mobile IPv6 υποστηρίζει εγγενώς τη βελτιστοποίηση δρομολόγησης (βλέπε 2.3.1). Η βελτιστοποίηση δρομολόγησης μπορεί να λειτουργεί με ασφάλεια στο Mobile IPv6, ακόμη και χωρίς προεγκατεστημένες συσχετίσεις ασφάλειας.
- Υποστηρίζεται η συνύπαρξη με firewalls που πραγματοποιούν «φιλτράρισμα εισόδου» (ingress filtering)(βλέπε 2.3.2), αφού χρησιμοποιείται η διεύθυνση μέριμνας ως πηγαία διεύθυνση επικοινωνίας από τους κινητούς κόμβους στα επισκεπτόμενα δίκτυα.
- Όλα σχεδόν τα πακέτα που φτάνουν σε έναν κινητό κόμβο, που είναι απομακρυσμένος από το οικείο δίκτυο του, έχουν διεύθυνση προορισμού τη διεύθυνση μέριμνας και το επιπλέον πεδίο routing header για τη μεταφορά πληροφορίας του Mobile IP. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται ο πλεονασμός έναντι της τεχνικής της ενθυλάκωσης.
- Ο μηχανισμός δυναμικής ανίχνευσης οικείου πράκτορα στο Mobile IPv6 επιστρέφει μία μοναδική απάντηση στον κινητό κόμβο. Η προσέγγιση broadcast που χρησιμοποιείται στο IPv4 επιστρέφει ξεχωριστές απαντήσεις από κάθε οικείο πράκτορα.

2.5 Μικρο-Κινητικότητα

Το πρωτόκολλο Mobile IP (τόσο για IPv4 όσο και για IPv6) έχει σχεδιαστεί με κύριο άξονα την περιαγωγή σε απομακρυσμένα δίκτυα και λιγότερο τη συνεχή κινητικότητα του κινητού κόμβου ανάμεσα σε δίκτυα. Για παράδειγμα, κάθε φορά που ένας κινητός κόμβος αλλάζει διεύθυνση μέριμνας, ενημερώνει τον οικείο του πράκτορα. Η προσέγγιση αυτή δεν είναι ικανοποιητική σε περιβάλλοντα με μεγάλη κινητικότητα [19] ή όταν το επισκεπτόμενο δίκτυο βρίσκεται μακριά από το οικείο δίκτυο, λόγω της αυξημένης σηματοδοσίας που απαιτείται. Η σηματοδοσία μεταξύ οικείου πράκτορα και κινητού κόμβου είναι απαραίτητη ακόμη και αν δεν υφίσταται ενεργή επικοινωνία του κινητού κόμβου με άλλους κατά την κίνηση. Αν ο αριθμός των κινητών κόμβων που εξυπηρετεί ο οικείος πράκτορας είναι μεγάλος, το κόστος της σηματοδοσίας μπορεί να αυξηθεί σημαντικά [21].

Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκαν σχήματα και μηχανισμοί που επικεντρώνονται στην αποτελεσματική διαχείριση της κινητικότητας των κινητών κόμβων μεταξύ γειτονικών υποδικτύων, τα οποία κατά κανόνα ελέγχονται από την ίδια διαχειριστική αρχή. Στόχος τους ήταν κυρίως η ελαχιστοποίηση της από-άκρη-σε-άκρη σηματοδοσίας και η επιτάχυνση της διαδικασίας της μεταπομπής. Αναπτύχθηκαν δύο μεγάλες κατηγορίες μηχανισμών τοπικού ελέγχου κινητικότητας, η οποία αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως μικρο-κινητικότητα (*micro-mobility*), γιατί υποστηρίζουν την κινητικότητα σε περιορισμένη γεωγραφική περιοχή. Στη μία ομάδα χρησιμοποιείται η δρομολόγηση που βασίζεται στους κλασικούς μηχανισμούς δρομολόγησης με βάση το πρόθεμα (*prefix based routing*) του IP, με χρήση διαδοχικών σταδίων ενθυλάκωσης ως τον τελικό προορισμό. Η ίδια τεχνική χρησιμοποιείται και στις προδιαγραφές των πρωτοκόλλων κινητικότητας *Mobile IPv4* και *Mobile IPv6*. Στην άλλη ομάδα μηχανισμών, η δρομολόγηση γίνεται με βάση τη διεύθυνση κάθε μεμονωμένου κόμβου (*host based routing*), και χρησιμοποιούνται ειδικοί μηχανισμοί δρομολόγησης στο εσωτερικό των δικτύων πρόσβασης.

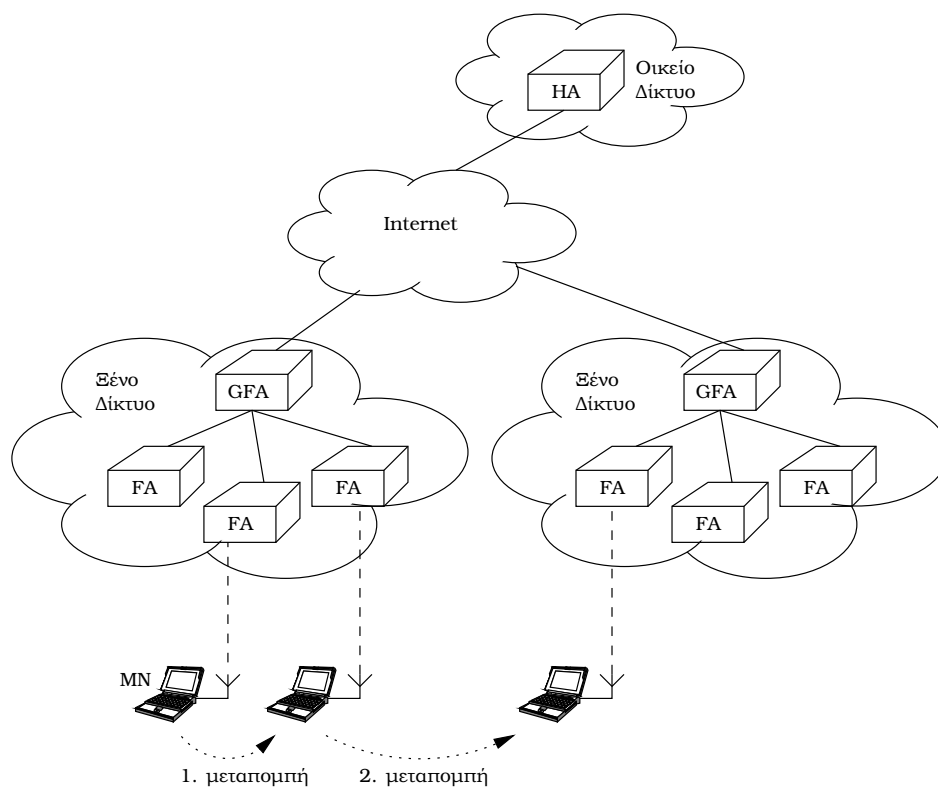
Στην κατηγορία μηχανισμών υποστήριξης μικρο-κινητικότητας αναπτύχθηκαν πολλοί αλγόριθμοι που προσπαθούσαν να βελτιστοποιήσουν τη διαδικασία της μεταπομπής. Στις επόμενες παραγράφους, επιχειρείται να περιγραφεί η βασική λειτουργικότητα των κυριότερων προτάσεων, ώστε να διαφανούν οι στόχοι και οι κατευθύνσεις τους. Αναλυτικότερες συγκριτικές παρουσιάσεις υπάρχουν στα [20, 106, 107]

2.5.1 Μικρο-Κινητικότητα με Χρήση Κλασικής IP Δρομολόγησης

Οι μηχανισμοί που αναπτύχθηκαν σε ιεραρχικές τοπολογίες δικτύων πρόσβασης επεκτείνουν ουσιαστικά τη βασική ιδέα του ελέγχου της δρομολόγησης ώστε να δημιουργηθεί μία ιεραρχία διευθύνσεων μέριμνας για κάθε κινητό κόμβο. Ο στόχος είναι η αλλαγή διεύθυνσης μέριμνας στα χαμηλότερα επίπεδα, να μην επηρεάζει τη διεύθυνση μέριμνας στα υψηλότερα επίπεδα της ιεραρχίας. Για να επιτευχθεί αυτό επεκτείνεται ο μηχανισμός της ενθυλάκωσης και τα πακέτα μεταδίδονται ενθυλακωμένα όχι μόνο μεταξύ του οικείου και του ξένου πράκτορα, αλλά και μεταξύ ξένων πρακτόρων του ίδιου δικτύου πρόσβασης. Παρόμοιες τεχνικές ιεραρχικής διαχείρισης κινητικότητας αναπτύχθηκαν και για δίκτυα *IPv6*. Οι τεχνικές αυτές, λόγω της υποστήριξης ιεραρχικών τοπολογιών ονομάζονται και ιεραρχικές αρχιτεκτονικές διαχείρισης κινητικότητας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κυριότερες προτάσεις ιεραρχικής διαχείρισης κινητικότητας.

Τοπικές Εγγραφές (Regional Registrations)

Προκειμένου να μετριαστεί η επίδραση της καθυστέρησης της σηματοδότησης μεταξύ οικείου και επισκεπτόμενου δικτύου, προτάθηκε η εισαγωγή ιεραρχικών σχημάτων στο πρωτόκολλο κινητικότητας. Συγκεκριμένα προτείνεται η υλοποίηση Τοπικών Εγγραφών (Regional Registrations) στο Mobile IP [41], ώστε να μειωθεί ο αριθμός των μηνυμάτων σηματοδότησης προς το οικείο δίκτυο, αλλά και για να μειωθεί η καθυστέρηση σηματοδότησης όταν ο κινητός κόμβος κινείται από ένα υποδίκτυο σε ένα άλλο. Το μοντέλο λειτουργίας του μηχανισμού Regional Registrations φαίνεται στο Σχήμα 2.11, όπου και διακρίνεται η νέα οντότητα που εισάγεται, ο Gateway Foreign Agent (GFA) (Ξένος Πράκτορας-Πύλη).



Σχήμα 2.11: Τοπικές εγγραφές (regional registrations)

Όταν ένας κινητός κόμβος προσαρτηθεί σε ένα ξένο δίκτυο, ξεκινά τη διαδικασία εγγραφής στο οικείο του δίκτυο με τον οικείο του πράκτορα. Κατά τη διάρκεια αυτής της εγγραφής, ο οικείος πράκτορας εγγράφει μία γενική διεύθυνση μέριμνας του κινητού κόμβου, η οποία είναι ουσιαστικά η IP διεύθυνση του GFA. Όταν ο κινητός κόμβος αλλάζει υποδίκτυο (και ξένο πράκτορα) μέσα στο ίδιο ξένο δίκτυο, πραγματοποιεί μια τοπική εγγραφή στον GFA για να τον ενημερώσει για τη νέα τοπική διεύθυνση μέριμνας του κινητού (η οποία αντιστοιχεί στον νέο ξένο πράκτορα).

Η διαφορά στη λειτουργία σχετικά με το πρωτόκολλο Mobile IP είναι η προσθήκη ενός ακόμη

τιμήματος ενθυλάκωσης στη διαδρομή των πακέτων προς τον κινητό κόμβο. Συγκεκριμένα, τα πακέτα ενθυλακώνονται στον οικείο πράκτορα και απευθύνονται στη διεύθυνση του GFA. Εκεί, αποθυλακώνονται και ο GFA ελέγχει τον πίνακα με τους κινητούς κόμβους που εξυπηρετεί, και επαν-ενθυλακώνει τα πακέτα προς τον κατάλληλο ξένο πράκτορα που εξυπηρετεί άμεσα τον κινητό κόμβο. Ο τελικός ξένος πράκτορας αποθυλακώνει τα πακέτα και τα προωθεί στον κινητό κόμβο.

Ιεραρχική Κινητικότητα σε Mobile IPv6

Σε αντιστοιχία με τα ιεραρχικά δίκτυα σε περιβάλλον IPv4, προτείνεται η λύση του ιεραρχικού Mobile IPv6 (Hierarchical Mobile IPv6 ή HMIPv6) [122]. Αφού στο Mobile IPv6 έχει εκλείψει η ανάγκη της λειτουργικότητας του ξένου πράκτορα, εισάγεται ένας νέος Mobile IPv6 κόμβος, το Mobility Anchor Point (MAP). Το MAP παρέχει ουσιαστικά τη λειτουργία ενός τοπικού οικείου πράκτορα, και σε αντίθεση με τους ξένους πράκτορες στο IPv4, δεν είναι απαραίτητο σε κάθε υποδίκτυο.

Όπως και στο Mobile IPv6, η λύση της ιεραρχικής διαχείρισης κινητικότητας είναι ανεξάρτητη από την υποκείμενη τεχνολογία πρόσβασης, επιτρέποντας κινητικότητα μεταξύ διαφορετικών τύπων δικτύων πρόσβασης. Επιπλέον, μπορεί να επιτευχθεί ομαλή μετάβαση από ιεραρχικά δίκτυα Mobile IPv4, επαναχρησιμοποιώντας την ομοιότητα στην αρχιτεκτονική, με χρήση διπλής IPv4 και IPv6 λειτουργικότητας.

Ένας κινητός κόμβος που εισέρχεται σε ένα υποδίκτυο που ελέγχεται από ένα MAP, θα λάβει διαφημίσεις δρομολογητών που περιέχουν πληροφορίες για ένα ή περισσότερα τοπικά MAP. Ο κινητός κόμβος μπορεί να συσχετίσει την τρέχουσα τοποθεσία του, η οποία ονομάζεται τοπική διεύθυνση μέριμνας (Local CoA, LCoA), με μία διεύθυνση στο υποδίκτυο του MAP, την «καθολική» διεύθυνση μέριμνας (Regional CoA, RCoA). Ενεργώντας ως τοπικός οικείος πράκτορας, το MAP θα αναχαιτίσει όλα τα πακέτα που προορίζονται για την RCoA, και θα τα ενθυλακώσει προς την τρέχουσα IP διεύθυνση του κινητού (την LCoA).

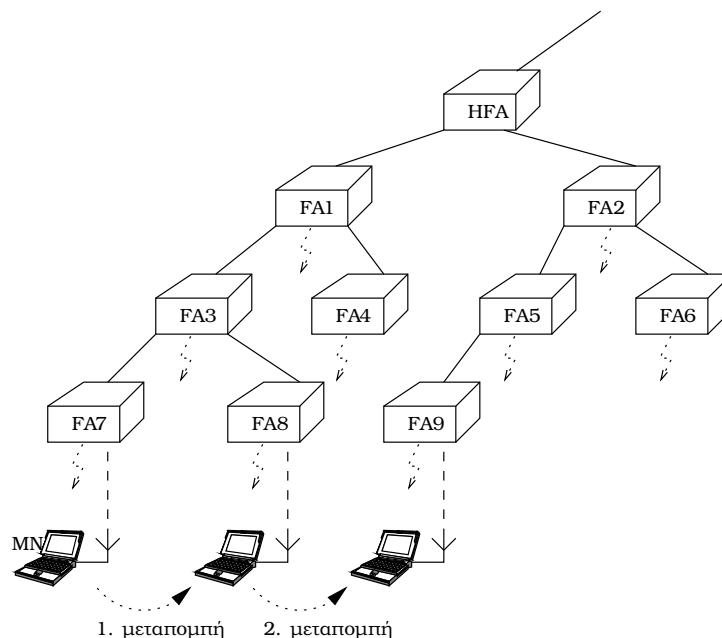
Αν ο κινητός κόμβος αλλάξει την τοπική IP διεύθυνση του LCoA του στο εσωτερικό ενός υποδικτύου που ελέγχεται από ένα MAP, απαιτείται μόνο να εγγράψει τη νέα αυτή διεύθυνση στο MAP. Συνεπώς, η μόνη διεύθυνση που μεταδίδεται στους ανταποκριτές κόμβους και στον οικείο πράκτορα του κινητού είναι η RCoA. Η RCoA δεν αλλάζει όσο ο κινητός κόμβος κινείται στο εσωτερικό του υποδικτύου, με συνέπεια η κίνηση του να αποκρύπτεται από τους επικοινωνούντες ανταποκριτές κόμβους. Τα όρια ενός υποδικτύου που ελέγχει το MAP ορίζονται από τους δρομολογητές πρόσβασης που διαφημίζουν την πληροφορία του MAP στους προσαρτημένους κινητούς κόμβους.

Η πρόταση του HMIPv6 είναι μία επέκταση στο πρωτόκολλο Mobile IPv6. Ένας κινητός κόμβος με λειτουργικότητα HMIPv6 θα πρέπει να επιλέγει να χρησιμοποιεί το MAP, αν διατίθεται σε

επισκεπτόμενο δίκτυο. Παρόλα αυτά, αν σε μερικές περιπτώσεις είναι επιθυμητή η χρήση του απλής υλοποίησης Mobile IPv6, αυτή είναι δυνατή, παρακάμπτοντας απλώς την επικοινωνία για εγγραφή στο MAP.

Άλλα Σχήματα Με Χρήση Κλασικής IP Δρομολόγησης

Η ιεραρχία στη δομή των δικτύων και την τοπολογία των πρακτόρων κινητικότητας μπορεί να έχει περισσότερα από ένα επίπεδα. Στο έργο Dynamics [36] αναπτύχθηκε μία ιεραρχία Ξένων Πρακτόρων με περισσότερα επίπεδα ιεραρχίας. Συγκεκριμένα, στο επισκεπτόμενο δίκτυο, διακρίνεται στην κορυφή της ιεραρχίας ο Υψηλότερος Ξένος Πράκτορας (Higher Foreign Agent (HFA)), ο οποίος αναλαμβάνει το ρόλο του GFA. Σε κατώτερα επίπεδα υπάρχουν οι Ενδιάμεσοι Ξένοι Πράκτορες (Intermediate Foreign Agents (IFA)) και οι Χαμηλότεροι Ξένοι Πράκτορες (Lower Foreign Agents (LFA)). Το λογισμικό που εκτελείται στους διαφορετικούς Πράκτορες είναι το ίδιο, αλλά η συμπεριφορά τους είναι διαφορετική ανάλογα με τα μηνύματα που δέχονται. Αναλυτικά η τοπολογία φαίνεται στο Σχήμα 2.12. Η σηματοδότηση για τη μετακίνηση ενός κινητού κόμβου θα διανύσει την ελάχιστη δυνατή απόσταση και μέχρι τον Πράκτορα εκείνο που είναι κοινός στο μονοπάτι της ροής των δεδομένων (πριν και μετά τη μετακίνηση). Ο Πράκτορας αυτός μπορεί να ονομαστεί και Ξένος Πράκτορας Μεταγωγής (Switching Foreign Agent (SFA)).

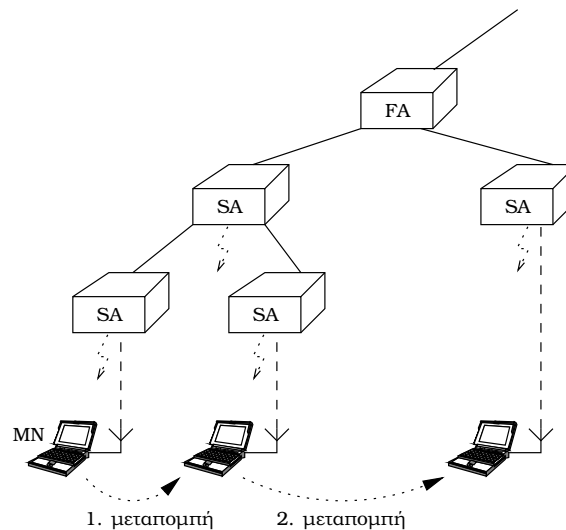


Σχήμα 2.12: Ιεραρχία ξένων πρακτόρων και μεταπομπές

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.12, η σηματοδότηση για τη μετακίνηση του κινητού κόμβου από το FA7 στο FA8 θα μεταδοθεί μέχρι το FA3, ενώ για τη δεύτερη μεταπομπή (handoff) από το FA8 στο

FA9, η σηματοδότηση θα φθάσει μέχρι την κορυφή της ιεραρχίας στο HFA.

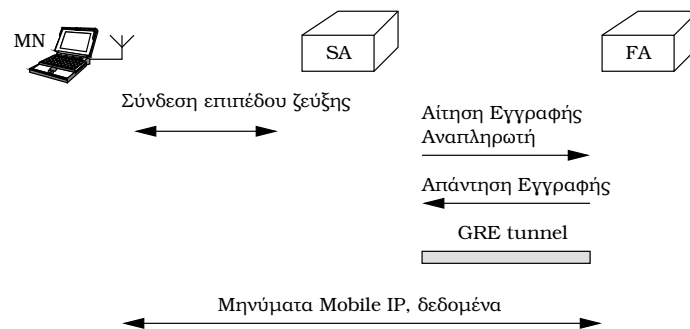
Πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με βάση αυτή την αρχιτεκτονική [36] έδειξαν ότι το Mobile IP μπορεί να επεκταθεί σε συχνότερες τοπικές ενημερώσεις τοποθεσίας. Η δυνατότητα των ξένων πρακτόρων να απαντούν τοπικά σε αιτήσεις εγγραφών βοηθά στη μείωση της διακοπής της επικοινωνίας. Ακόμη, η ιεραρχική υλοποίηση ελαττώνει τη σηματοδότηση που ανταλλάσσεται μεταξύ του οικείου πράκτορα και του επισκεπτόμενου δικτύου. Μία άλλη σημαντική παρατήρηση ήταν η δυνατότητα εισαγωγής περισσότερων επιπέδων ιεραρχίας χωρίς σημαντικό κόστος επεξεργασίας ή χρόνου. Με τον τρόπο αυτό, μπορούν να καλυφθούν μεγάλα δίκτυα από ιεραρχίες πρακτόρων κινητικότητας και ιεραρχική διαχείριση.



Σχήμα 2.13: Ιεραρχία αναπληρωτών πρακτόρων στην αρχιτεκτονική THEMA

Μία άλλη προσέγγιση που προτάθηκε είναι αυτή με το όνομα THEMA (Transparent Hierarchical Mobility Agents) [76], δηλαδή Διαφανείς Ιεραρχικοί Πράκτορες Κινητικότητας. Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή, ανεξαρτητοποιείται το επίπεδο ζεύξης (link layer) από τη λειτουργικότητα των πρακτόρων κινητικότητας. Εισάγεται μια νέα οντότητα ο Αναπληρωτής Πράκτορας (Surrogate Agent), ο οποίος τοποθετείται μεταξύ του κινητού κόμβου και του Ξένου Πράκτορα στο επισκεπτόμενο δίκτυο και μεταξύ του κινητού κόμβου και του Οικείου Πράκτορα στο οικείο δίκτυο. Μπορεί να υπάρξει μια ιεραρχία από Αναπληρωτές Πράκτορες στο δίκτυο πρόσβασης μεταξύ Ξένου Πράκτορα και κινητού κόμβου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13. Αντίστοιχη ιεραρχία μπορεί να δημιουργηθεί και στο οικείο δίκτυο μεταξύ του κινητού κόμβου και του Οικείου Πράκτορα.

Ο Αναπληρωτής Πράκτορας ανιχνεύει Αιτήσεις Εγγραφής από κινητούς κόμβους και τις αναχαιτίζει. Δημιουργεί ένα τούνελ προς τον Ξένο Πράκτορα χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες επιπέδου ζεύξης που έχει και προωθεί τα πακέτα που αναχαιτίσε μέσω του τούνελ αυτού. Οι Απαντήσεις



Σχήμα 2.14: Λειτουργία αναπληρωτή πράκτορα στην αρχιτεκτονική THEMA

Εγγραφής επιστρέφουν μέσω του ίδιου τούνελ και παραδίδονται στον κινητό κόμβο. Αναλυτικά η λειτουργία του παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.14.

Με τον τρόπο αυτό δεν απαιτείται η εισαγωγή νέων μηνυμάτων ή παραμέτρων στο Mobile IP. Ακόμη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε δίκτυο πρόσβασης (όχι μόνο IP) με τη χρήση των GRE τούνελ [32]. Ουσιαστικά παρέχεται η ψευδαίσθηση της άμεσης επαφής σε επίπεδο ζεύξης με τον εκάστοτε πράκτορα κινητικότητας.

Η αρχιτεκτονική αυτή προτάθηκε για εφαρμογή σε συστήματα κινητών επικοινωνιών τρίτης γενιάς, όπου η σύνδεση μεταξύ των δρομολογητών και των κινητών κόμβων γίνεται χρησιμοποιώντας διαφορετικές τεχνολογίες, εν μέρει ασύμβατες μεταξύ τους. Πρόκειται ουσιαστικά για μια προσπάθεια ενοποίησης της διαχείρισης των διαφορετικών τεχνολογιών.

Μία άλλη τεχνική που χρησιμοποιήθηκε είναι η εισαγωγή ταμιευτήρων (buffers) στους σταθμούς βάσης, στους οποίους αποθηκεύονται τα «μεταφερόμενα» (in transit) δεδομένα προς τους κινητούς κόμβους. Τα δεδομένα αυτά μεταφέρονται στο νέο σταθμό βάσης με διάφορες τεχνικές (multicast, εγκατάσταση τούνελ μεταξύ των σταθμών βάσης πριν, κατά τη διάρκεια ή μετά τη μεταπομπή). Έχουν υποβληθεί πολλές προτάσεις με βάση αυτές τις τεχνικές, με παρεμφερή ονόματα (fast, smooth, seamless, low latency, improved handoff κ.α.) [99, 65, 6]. Η περιοχή αυτή έχει δεχτεί και συνεχίζει να δέχεται πληθώρα ερευνητικών προτάσεων με αντικείμενο την αξιόπιστη και γρήγορη μεταφορά των μεταφερόμενων δεδομένων στη νέα τοποθεσία, τόσο σε δίκτυα IPv4 όσο και σε δίκτυα IPv6.

2.5.2 Μικρο-Κινητικότητα με Χρήση Εξειδικευμένων Μηχανισμών Δρομολόγησης

Σε περιβάλλοντα, όπου οι κινητοί κόμβοι αλλάζουν το σημείο προσάρτησης τους στο δίκτυο πολύ γρήγορα, έχουν προταθεί πρωτόκολλα διαχείρισης κινητικότητας που είναι καταλληλότερα προσαρμοσμένα. Η κατηγορία αυτή στοχεύει στη διαχείριση κινητικότητας σε μικρότερη γεω-

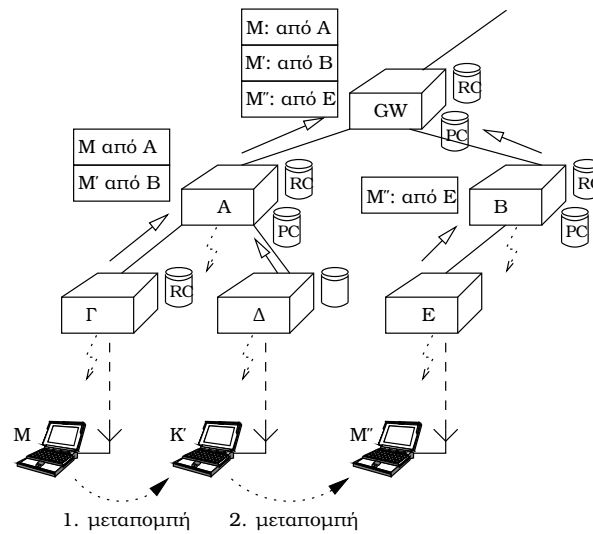
γραφική περιοχή και με διαφορετικές απαιτήσεις σε χρόνο απόκρισης μετά από μια μεταπομπή (handoff). Το χαρακτηριστικό τους είναι ότι χρησιμοποιούν εξειδικευμένους μηχανισμούς δρομολόγησης για κάθε κινητό κόμβο που προσαρτάται στο δίκτυο πρόσβασης. Μία επιπλέον λειτουργία που προσφέρουν τα γνωστότερα από αυτά τα πρωτόκολλα είναι η λειτουργία paging που επιτρέπει μεγαλύτερη επεκτασιμότητα και εξοικονόμηση ενέργειας. Τα γνωστότερα από αυτά είναι το Cellular IP [145] και το HAWAII [105]. Υπάρχουν, ακόμη και υβριδικές λύσεις όπως για παράδειγμα το EMA (Edge Mobility Architecture) [87], όπου γίνεται χρήση του εξειδικευμένου μηχανισμού δρομολόγησης μόνο σε περίπτωση ενεργής κίνησης του κινητού κόμβου σε γειτονικό υποδίκτυο και των παραδοσιακών μηχανισμών δρομολόγησης σε στατικές συνθήκες.

Τα πρωτόκολλα αυτά λειτουργούν συμπληρωματικά με το Mobile IP, δηλαδή διαχειρίζονται την κινητικότητα μέσα στο πεδίο δικαιοδοσίας τους. Για οποιαδήποτε μετακίνηση του κινητού κόμβου έξω από το πεδίο αυτό χρησιμοποιείται Mobile IP κανονικά. Για το λόγο αυτό, ο εξωτερικός δρομολογητής κάθε σχήματος έχει τη λειτουργικότητα του ξένου πράκτορα Mobile IP.

Cellular IP

Οι βασικές οντότητες του πρωτοκόλλου Cellular IP [145] παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.15. Κάθε κόμβος στο εσωτερικό δίκτυο Cellular IP ελέγχει κάποιο γεωγραφικό χώρο. Η αναζήτηση των κινητών κόμβων και η δρομολόγηση των πακέτων πραγματοποιείται με τη βοήθεια πινάκων κατανεμημένων στους Cellular IP κόμβους. Συγκεκριμένα, ο πίνακας δρομολόγησης (Routing Cache, RC) βρίσκεται σε όλους τους κόμβους ενός δικτύου Cellular IP και παρέχει ακριβείς πληροφορίες για την τοποθεσία ενός κινητού κόμβου. Ο πίνακας αυτός ενημερώνεται από τα πακέτα δεδομένων που δέχεται ή στέλνει ο κινητός κόμβος ή τη σηματοδοσία κινητικότητας του Cellular IP (μηνύματα routing update). Έχει μικρή διάρκεια ζωής και ουσιαστικά συγκρατεί πληροφορία για κινητούς κόμβους με ενεργές συνδέσεις. Ο πίνακας αναζήτησης (Paging Cache, PC) περιέχει όλους τους κινητούς κόμβους είτε έχουν είτε όχι ενεργές συνδέσεις. Η ενημέρωση των πινάκων αυτών (με τα μηνύματα paging update του Cellular IP) γίνεται με πολύ βραδύτερους ρυθμούς (1-2 τάξεις μεγέθους) και καθώς είναι πολύ μεγαλύτεροι, μπορεί να λείπουν από τους περισσότερους εσωτερικούς κόμβους του δικτύου. Ο εξωτερικός κόμβος Cellular IP (Gateway, GW) είναι ταυτόχρονα ξένος πράκτορας για το Mobile IP και κόμβος με λειτουργικότητα Cellular IP.

Το πρωτόκολλο Cellular IP λειτουργεί ως εξής (Σχήμα 2.15): Έστω ο κινητός κόμβος M, ο οποίος έχει προσαρτηθεί στον κόμβο Γ. Ο πίνακας αναζήτησης στον κόμβο Γ ενημερώνεται ώστε να έχει την πληροφορία ότι ο κινητός κόμβος επικοινωνήσε μέσω της ασύρματης διεπαφής. Στον κόμβο Α ο πίνακας αναζήτησης περιέχει τον αμέσως προηγούμενο κόμβο, δηλαδή τον Γ. Ομοίως



Σχήμα 2.15: Cellular IP

και στον κόμβο GW, όπου ο πίνακας αναζήτησης για τον M δείχνει στον A. Όταν πραγματοποιηθεί μεταπομπή και ο M συνδεθεί με τον Δ, θα ενημερωθεί ο κόμβος A και θα αλλάξει τον πίνακα αναζήτησης για τον M ώστε να δείχνει τον Δ. Ο κόμβος GW θα συνεχίσει να δείχνει τον A ως επόμενο κόμβο για πακέτα που έχουν προορισμό τον M. Στη δεύτερη μεταπομπή του M, ενημερώνεται ο κόμβος E για την προσάρτηση του E, ο κόμβος B, που δείχνει τον E και ο κόμβος GW που ενημερώνει την εγγραφή ώστε να δείχνει προς τον B. Οι εγγραφές στους κόμβους A, Γ, Δ θα διαγραφούν μετά την πάροδο του χρόνου διατήρησής τους.

Με τον τρόπο αυτό, κάθε κόμβος Cellular IP στο εσωτερικό δίκτυο έχει πληροφορία για την κατεύθυνση αποστολής πακέτων για τους κινητούς κόμβους που βρίσκεται κάτω από την ιεραρχία του. Επομένως, ο εξωτερικός κόμβος GW θα πρέπει να έχει εγγραφές δρομολόγησης για κάθε κινητό κόμβο που είναι προσαρμοσμένος στο δίκτυο Cellular IP. Οι πίνακες δρομολόγησης ανα-νεώνονται με πακέτα δεδομένων από τον κινητό κόμβο προς κάποιον εξωτερικό προορισμό ή με απευθείας ερώτηση από τον εξωτερικό κόμβο Cellular IP (GW), διάχυση της ερώτησης στο δίκτυο και απάντηση του κινητού με ενημέρωση δρομολόγησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι όλα τα πακέτα δεδομένων του κινητού κόμβου δρομολογούνται μέσω του κόμβου GW, ώστε να πραγματοποιείται η ενημέρωση των πινάκων δρομολόγησης στο εσωτερικό του δικτύου.

Το Cellular IP ήταν ένα από τα πρώτα πρωτόκολλα διαχείρισης μικρο-κινητικότητας, το οποίο έθιξε και το θέμα paging, προβάλλοντας την εξοικονόμηση ενέργειας από τη μειωμένη αποστολή μηνυμάτων σε πρωτόκολλα διαχείρισης κινητικότητας.

HAWAII

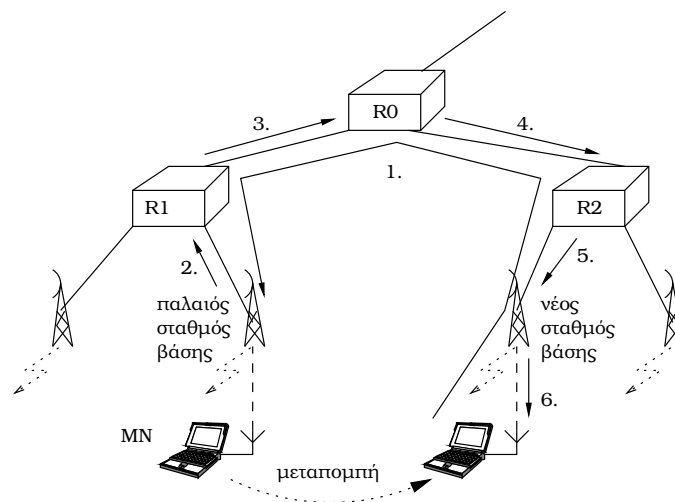
Το πρωτόκολλο HAWAII (Handoff-Aware Wireless Internet Infrastructure) [105] εισάγει και αυτό ένα ξεχωριστό πρωτόκολλο δρομολόγησης για τη διαχείριση της κινητικότητας στο εσωτερικό δίκτυο. Το HAWAII όπως και το Cellular IP επαφίεται στο Mobile IP για τη διαχείριση της κινητικότητας έξω από το εσωτερικό δίκτυο. Κάθε κινητός κόμβος που προσαρτάται σε ένα δίκτυο HAWAII αποκτά μια ξεχωριστή Διεύθυνση Μέριμνας, την οποία και διατηρεί καθ' όλη τη διάρκεια της παραμονής του στο Δίκτυο. Οι κόμβοι στο δίκτυο HAWAII διατηρούν πληροφορία δρομολόγησης για τη διαχείριση κινητικότητας με τη μορφή ξεχωριστών εγγραφών για κάθε κινητό κόμβο στους πίνακες δρομολόγησης. Οι δρομολογητές HAWAII μπορούν να θεωρηθούν ως ενισχυμένοι IP δρομολογητές, με επιπλέον λειτουργικότητα απαραίτητη για τον εξειδικευμένο μηχανισμό δρομολόγησης.

Η διαχείριση τοποθεσίας (Location Management) χρησιμοποιεί ειδική σηματοδότηση που αποστέλλεται από τους κινητούς κόμβους. Το πρωτόκολλο HAWAII περιέχει 3 τύπους μηνυμάτων για την εγκατάσταση δρομολόγησης: ενεργοποίηση (power up), ενημέρωση (update) και ανανέωση (refresh). Αρχικά ένας κινητός κόμβος στέλνει ένα μήνυμα ενεργοποίησης. Το μήνυμα αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εγκαθίδρυση δρομολογήσεων για τον συγκεκριμένο κινητό κόμβο στον ριζικό δρομολογητή (root router) του δικτύου HAWAII και σε κάθε ενδιάμεσο δρομολογητή που μεσολαβεί μέχρι τον κινητό κόμβο.

Όταν ο κινητός κόμβος κινείται μέσα στο δίκτυο, το πρωτόκολλο ενημέρωσης τοποθεσίας χρησιμοποιεί μηνύματα ενημέρωσης για την εγκατάσταση και την ενημέρωση των εγγραφών δρομολόγησης για τον κινητό κόμβο σε ορισμένους κόμβους μέσα στο δίκτυο, ώστε να διατηρεί ο κινητός κόμβος τη συνδεσιμότητά του. Η κατάσταση τοποθεσίας για τους κινητούς κόμβους που διατηρείται στους δρομολογητές είναι «προσωρινή» (soft state). Η διατήρηση προσωρινής κατάστασης αυξάνει την ευρωστία του πρωτοκόλλου σε κατάσταση αστοχίας δρομολογητών ή συνδέσεων.

Ο κινητός κόμβος στέλνει ακόμη, με μικρή συχνότητα μηνύματα ανανέωσης στο σταθμό βάσης, στον οποίο είναι προσαρτημένος για τη διατήρηση των εγγραφών δρομολογήσεων. Οι σταθμοί βάσης και οι ενδιάμεσοι δρομολογητές στέλνουν με τη σειρά τους συγκεντρωτικά μηνύματα ανανέωσης προς τον ανώτερο τους ιεραρχικά δρομολογητή μέχρι το ριζικό δρομολογητή του δικτύου.

Το πρωτόκολλο HAWAII προσδιορίζει 4 εναλλακτικούς τρόπους εγκατάστασης διαδρομής για τον έλεγχο της μεταπομπής μεταξύ διαφορετικών σημείων προσάρτησης. Τα σχήματα αυτά μπορούν να ενταχθούν σε δύο γενικότερες κατηγορίες: στη μία κατηγορία, τα πακέτα προωθούνται από τον παλιό σταθμό βάσης στον νέο, ενώ στην άλλη τα πακέτα εκτρέπονται στον δρομολογητή διασταύρωσης των δύο μονοπατιών (cross over router).



Σχήμα 2.16: HAWAII, σχήμα διαχείρισης MSF

Σχήματα προώθησης από τον παλιό σταθμό βάσης στον νέο είναι τα MSF, Multiple Stream Forwarding (Προώθηση Πολλαπλών Ροών) και SSF, Single Stream Forwarding (Προώθηση Μοναδικής Ροής). Στο MSF, η λειτουργία του οποίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.16, ο κινητός κόμβος αποστέλλει μήνυμα ενημέρωσης τοποθεσίας στον παλιό σταθμό βάσης. Εκείνος ενημερώνει τον πίνακα δρομολόγησης του και προωθεί το μήνυμα ενημέρωσης στον επόμενο δρομολογητή κ.ο.κ. μέχρι τον κινητό κόμβο. Συνεπώς αποφεύγεται η απώλεια πακέτων δεδομένων, αλλά εισάγονται για μικρή χρονική διάρκεια βρόχοι δρομολόγησης, και επομένως μία πιθανότητα παράδοσης πακέτων στον κινητό κόμβο εκτός σειράς. Μία εναλλακτική προσέγγιση είναι το SSF, όπου η δρομολόγηση των πακέτων κατά τη διάρκεια της σηματοδότησης παίρνει υπ' όψη και την εισερχόμενη διεπαφή των πακέτων για να καθορίσει την έξοδο. Με τον τρόπο αυτό, ελαχιστοποιούνται οι απώλειες πακέτων και καθορίζεται μια μοναδική ροή πακέτων που αποφεύγει την παράδοση εκτός σειράς, με αντίτιμο την πολυπλοκότερη υλοποίηση.

Η άλλη κατηγορία περιλαμβάνει τα σχήματα μη-προώθησης, όπου το μήνυμα ενημέρωσης τοποθεσίας κατά τη διαδρομή του στον παλιό σταθμό βάσης ενημερώνει τους ενδιαμέσους δρομολογητές, ενώ η εκτροπή των πακέτων δεδομένων πραγματοποιείται από τον δρομολογητή διασταύρωσης. Με την τεχνική αυτή δεν απαιτείται προώθηση των πακέτων από τον παλιό σταθμό βάσης. Το σχήμα UNF, Unicast Non-Forwarding, είναι βελτιστοποιημένο για δίκτυα όπου ο κινητός κόμβος μπορεί να είναι συνδεδεμένος ταυτόχρονα με δύο ή περισσότερους σταθμούς βάσης, οπότε ο παλιός σταθμός βάσης μπορεί να του αποστείλει ότι πακέτα δεδομένων έχουν δρομολογηθεί εκεί. Αντίθετα, στο σχήμα MNF, Multicast Non-Forwarding, ο παλιός σταθμός βάσης μεταδίδει με multicast πακέτα για κινητό κόμβο που έχει προσαρτηθεί αλλού, τα οποία και προωθεί τελικά ο δρομολογητής διασταύρωσης.

Οι εναλλακτικοί τρόποι καθιστούν δυνατή την επιλογή προτεραιότητας μεταξύ απώλειας πακέτων, μείωσης χρόνου μεταπομπής και διατήρησης της σειράς των πακέτων. Για τον εντοπισμό ανενεργών κινητών κόμβων χρησιμοποιείται IP multicast.

Edge Mobility Architecture

Το σχήμα Edge Mobility Architecture, EMA (Αρχιτεκτονική Κινητικότητας στα Άκρα) [87] είναι μια υβριδική πρόταση ανάμεσα στα δίκτυα με υποδομή (δηλαδή με σταθμούς βάσης και δρομολογητές πρόσβασης) και στα δίκτυα ad hoc (δηλαδή στα δίκτυα που αυτοδιοργανώνονται). Η προσέγγιση που ακολουθείται αφορά στη διασταύρωση της δρομολόγησης με βάση το πρόθεμα διεύθυνσης (prefix based routing), και της δρομολόγησης με εγγραφή για κάθε κόμβο (host based routing) που χρησιμοποιούν τα Cellular IP, HAWAII. Κάθε κινητός κόμβος αποκτά μία IP διεύθυνση, η οποία είναι τοπολογικά σωστή όταν προσαρτάται σε ένα EMA δίκτυο. Αν ο κόμβος έχει ενεργές συνδέσεις όταν κινείται, ενεργοποιείται ένα ειδικό πρωτόκολλο δρομολόγησης κινητικότητας (Mobility Enhanced Routing, MER) με στοιχεία δρομολόγησης από αντίστοιχα πρωτόκολλα ad hoc δικτύων, το οποίο εισάγει ειδικές εγγραφές για τον κινητό κόμβο στους πίνακες δρομολόγησης των εσωτερικών κόμβων του δικτύου EMA.

Η αρχιτεκτονική EMA βασίζεται στα εξής κυρίως συστατικά :

- Χρήση του πρωτοκόλλου Mobile IP εκτός των συνόρων του για κινητικότητα εκτός δικτύου EMA.
- Λειτουργία ενός πρωτοκόλλου δρομολόγησης για το εσωτερικό δίκτυο, το οποίο να παρέχει την κλιμακώσιμη δρομολόγηση με βάση το πρόθεμα δικτύου, αλλά και εξειδικευμένη δρομολόγηση για μεμονωμένους κόμβους για την υποστήριξη της μετακίνησης των κινητών κόμβων σε τοπολογικά διαφορετικές περιοχές.
- Λειτουργία και χρήση συνδέσεων για ανταλλαγή πληροφοριών δρομολόγησης και μηνυμάτων ανάμεσα σε δρομολογητές πρόσβασης για την υποστήριξη της μεταπομπής των κινητών κόμβων, αλλά και τη διαχείριση της δρομολόγησης του κινητού και της συσχετισμένης IP διεύθυνσης.
- Λειτουργία ενός προσωρινού τούνελ για την επαναπροώθηση πακέτων σε κατάσταση διαμετακόμισης από τον παλαιό σταθμό βάσης προς τον νέο καθώς το σύστημα δρομολόγησης συγκλίνει.
- Ικανότητα εισαγωγής μιας εγγραφής δρομολόγησης για συγκεκριμένο κόμβο (host route).

- Επιστροφής της ανατεθείσας IP διεύθυνσης στον αντίστοιχο δρομολογητή πρόσβασης με τη λήξη της συνεδρίας σε ένα διαφορετικό δρομολογητή πρόσβασης.

Οι καταστάσεις ενός κινητού κόμβου στο πρωτόκολλο EMA διακρίνονται ανάλογα με την κατάσταση των συνδέσεων του. Ο κόμβος μπορεί να είναι:

- Ενεργός (Active). Ο κόμβος δέχεται και στέλνει IP πακέτα και οι διεπαφές στα επίπεδα 3 (IP) και 2 είναι ενεργές.
- Σε εγρήγορη (Hot Standby). Ο κόμβος δεν δέχεται και δεν στέλνει προσωρινά IP πακέτα και για το λόγο αυτό η ραδιο-διεπαφή είναι ανενεργή ώστε να μην καταλαμβάνει το φάσμα. Η διεπαφή στο επίπεδο 3 είναι ενεργή και το δίκτυο έχει τις εγγραφές για τον κινητό ενεργές.
- Σε ζεστή αναμονή (Warm Standby). Ο κόμβος δεν δέχεται και δεν στέλνει πακέτα, έχει ανενεργές τις διεπαφές 2 και 3, και το δίκτυο μπορεί να διαγράψει τις εγγραφές δρομολόγησης στο εσωτερικό του. Ο κινητός κόμβος μπορεί να διατηρήσει την IP διεύθυνση του και να τη χρησιμοποιήσει αν επανενεργοποιηθεί μετά από κατάλληλη επαναπροετοιμασία του δικτύου.
- Σε κρύα αναμονή (Cold Standby). Ο κινητός κόμβος δεν διατηρεί την IP διεύθυνση που του έχει αποδοθεί και μπορεί να εντοπιστεί μόνο με την Οικεία Διεύθυνση του και μετά από διαδικασία εντοπισμού (paging).
- Ανενεργός (Off). Ο κινητός κόμβος είναι απενεργοποιημένος και δεν μπορεί να εντοπιστεί.

Χρησιμοποιώντας τους κατάλληλους χρονομετρητές, η αρχιτεκτονική EMA μπορεί να παρέχει στους κινητούς κόμβους διατήρηση της IP διεύθυνσης τους και γρήγορη και αποτελεσματική μεταπομπή, ενώ παράλληλα μειώνει το φορτίο στο εσωτερικό δίκτυο με την απενεργοποίηση των διευθύνσεων σε κινητούς κόμβους χωρίς ενεργές συνδέσεις.

Όταν ο κινητός κόμβος μετακινείται στο δίκτυο EMA, αλλάζουν οι εγγραφές στους πίνακες δρομολόγησης προκειμένου να δείχνουν στη νέα θέση του κινητού. Το δίκτυο EMA προσπαθεί να δημιουργήσει υποδομή για επικοινωνία του παλαιού με τον νέο σταθμό βάσης κατά τη διάρκεια της μεταπομπής ώστε να μη διακόπτεται η συνδεσιμότητα του κινητού κόμβου. Η επικοινωνία αυτή μπορεί είτε να εκκινείται από τον παλιό σταθμό βάσης, όταν ο νέος σταθμός βάσης είναι γνωστός εκ των προτέρων είτε από τον νέο σταθμό σε διαφορετική περίπτωση. Σε κάθε περίπτωση, σχηματίζεται μία δίοδος επικοινωνίας ανάμεσα στους σταθμούς βάσης για τη συνέχιση της απρόσκοπτης επικοινωνίας του κινητού κόμβου.

2.6 Εναλλακτικά Σχήματα Διαχείρισης Κινητικότητας

Οι περιγραφείσες προσεγγίσεις αφορούν τη διαχείριση κινητικότητας σε επίπεδο δικτύου, που είναι και η προφανέστερη προσέγγιση, αφού αφορά άμεσα στη λειτουργία της δρομολόγησης. Αυτή η προσέγγιση θεωρείται και σήμερα η προτιμητέα από την κοινότητα του Internet. Παρόλα αυτά έχουν προταθεί και εναλλακτικά σχήματα διαχείρισης κινητικότητας, τα οποία είτε εκμεταλλεύονται δυνατότητες πρωτοκόλλων ανωτέρου επιπέδου είτε επεκτείνουν τη λειτουργικότητα ξεχωριστών λειτουργιών, όπως είναι το multicast ή η διαχείριση τοποθεσίας (location management).

2.6.1 Διαχείριση Κινητικότητας σε Ανώτερα Επίπεδα

Η διαχείριση της κινητικότητας σε ανώτερα επίπεδα έχει προταθεί από πολλούς ερευνητές, χρησιμοποιώντας διαφορετικά πρωτόκολλα. Η διαχείριση της κινητικότητας σύμφωνα με την αρχή της από-άκρη-σε-άκρη επικοινωνίας απλοποιεί την απαιτούμενη υποδομή υποστήριξης κινητικότητας, σύμφωνα με τους σχεδιαστές των πρωτοκόλλων. Για το λόγο αυτό έχουν προταθεί σχήματα διαχείρισης κινητικότητας τόσο στο επίπεδο μεταφοράς όσο και στο επίπεδο εφαρμογής.

Ένα παράδειγμα διαχείρισης κινητικότητας μέσω επέκτασης του TCP προτείνεται στο [121]. Η προσθήκη επιπλέον πεδίων στην TCP επικεφαλίδα, που ονομάζονται TCP Migrate Options (Επιλογές Μετανάστευσης TCP) επιτρέπει σε ένα κινούμενο κόμβο να αλλάζει το σημείο προσάρτησης του, και συνεπώς την IP διεύθυνση του, και να επικοινωνεί μόνο με τον ανταποκριτή κόμβο στο επίπεδο TCP για να συνεχίσει την ενεργή επικοινωνία. Η πρόταση αυτή αποτέλεσε τη βάση για επεκτάσεις, όπως για παράδειγμα υποστήριξη ταυτόχρονης μεταπομπής και των δύο κινητών κόμβων [137], αλλά και υποστήριξη εναλλακτικών IP διευθύνσεων σε περίπτωση αποτυχίας επανασύνδεσης [120].

Παρομοίως, το Mobile SCTP [109] επεκτείνει το πρωτόκολλο μεταφοράς SCTP (Stream Control Transport Protocol) [126]. Το SCTP υποστηρίζει πολλαπλές IP διευθύνσεις για κάθε άκρο της επικοινωνίας εγγενώς (multihoming). Χρησιμοποιώντας την επέκταση του SCTP που επιτρέπει δυναμική προσθαφαίρεση διευθύνσεων στην ομάδα διευθύνσεων που ορίζει το άκρο της επικοινωνίας [125], είναι απλό να οριστεί η διαχείριση της κινητικότητας στο SCTP.

Υπάρχουν όμως και πρωτόκολλα διαχείρισης κινητικότητας επιπέδου εφαρμογής. Η πιο γνωστή προσέγγιση χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο SIP (Session Initiation Protocol) [111], για την παροχή υπηρεσίας κινητικότητας στους χρήστες [113]. Η υποδομή του SIP, και συγκεκριμένα οι διακομιστές Registrar και Redirect Server ανακτούν τη λειτουργικότητα του οικείου πράκτορα, δηλαδή αποθηκεύουν τις συσχετίσεις της οικείας και της απομακρυσμένης διεύθυνσης, ώστε τα μηνύματα που απευθύνονται στην οικεία διεύθυνση να προωθούνται στην απομακρυσμένη διεύθυνση. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι διευθύνσεις δεν είναι οι γνωστές IP διευθύνσεις, αλλά SIP

διευθύνσεις, της μορφής `alice@example.com`.

Η διαχείριση κινητικότητας με βάση το SIP γνώρισε μεγάλη ερευνητική προσοχή και αναπτύχθηκαν διάφορες προτάσεις και επεκτάσεις του βασικού μοντέλου, ιδιαίτερα για τοπική διαχείριση κινητικότητας. Αναπτύχθηκαν σχήματα μικροκινητικότητας που επεκτείνουν τη διαχείριση κινητικότητας με SIP μηνύματα σε ιεραρχικά δίκτυα πρόσβασης, όπως το HMSIP (Hierarchical Mobile SIP) [143, 144], κινητικότητα με SIP σε δίκτυα IPv6 [82], κ.α.

Ο κοινός παράγοντας στα προαναφερθέντα σχήματα είναι ότι αφορούν συγκεκριμένα πρωτόκολλα και εφαρμογές, π.χ. TCP εφαρμογές για το TCP Migrate ή εφαρμογές πραγματικού χρόνου RTP για τη βασιζόμενη στο SIP κινητικότητα, και εκ των πραγμάτων δεν μπορούν να καλύψουν το πλήρες φάσμα των εφαρμογών στο Internet. Μερικοί μηχανισμοί υποστηρίζουν αξιόπιστη μεταφορά, άλλοι κίνηση πραγματικού χρόνου, αλλά όχι και τα δύο είδη κίνησης. Αν η αρχιτεκτονική διαχείρισης κινητικότητας δεν υποστηρίζει το ελάχιστο κοινό παρονομαστή απευθείας (το πρωτόκολλο IP δηλαδή), είναι δεδομένο ότι θα αποκλείονται κάποιοι τύποι εφαρμογών και οι αντίστοιχες ομάδες χρηστών από τις υπηρεσίες τους.

2.6.2 Εναλλακτικές Αρχιτεκτονικές Κινητικότητας

Οι αρχιτεκτονικές διαχείρισης κινητικότητας που έχουν προταθεί περιλαμβάνουν και άλλες πιο «εξωτικές» προσεγγίσεις. Η πιο συχνή αναφορά είναι η εκμετάλλευση του multicast είτε ως γενική λύση υποστήριξης κινητικότητας [81] είτε ως τοπική λύση για γειτονικά δίκτυα [8, 44]. Η τεχνική έγκειται στο να αποδίδεται στον κινητό κόμβο μία διεύθυνση ομάδας multicast και οι διάφορες unicast διευθύνσεις τις οποίες αποκτά κατά τη προσάρτηση του σε διάφορες τοποθεσίες να αποτελούν μέλη της ομάδας, τα οποία έρχονται και φεύγουν δυναμικά. Τα πακέτα που προορίζονται για τον κινητό κόμβο έχουν προορισμό τη διεύθυνση multicast και παραδίδονται σε όλες τις unicast διευθύνσεις οι οποίες είναι μέλη της multicast ομάδας.

Μία άλλη εναλλακτική προσέγγιση είναι η ενισχυμένη χρήση της διαχείρισης κινητικότητας για την αποθήκευση της τρέχουσας IP διεύθυνσης του κινητού κόμβου [55, 59]. Η λύση αυτή προϋποθέτει συνεχή επικοινωνία όλων των κόμβων του δικτύου με την αντίστοιχη βάση ονοματοδοσίας του συστήματος για την παρακολούθηση της τρέχουσας τοποθεσίας του χρήστη, και προσομοιάζει τη λειτουργία του συστήματος GSM [79] και των καταχωρητών τοποθεσίας HLR, VLR (Home Location Register, Visitor Location Register).

Άλλες μορφές διαχείρισης κινητικότητας που έχουν προταθεί στηρίζονται σε NATs (Network Address Translators) [118] και παρεμφερείς τεχνικές που αλλάζουν τη διεύθυνση προορισμού στα πακέτα χωρίς να εφαρμόσουν τεχνικές ενθυλάκωσης.

Οι προσεγγίσεις που περιγράφηκαν σε αυτή την παράγραφο είτε απαιτούν τεράστιες αλλαγές

στην υπάρχουσα υποδομή του Internet είτε χρησιμοποιούν μη αποδεκτές γενικότερα πρακτικές (π.χ. NAT). Οι βασικές προτάσεις διαχείρισης κινητικότητας παραμένουν οι στηριζόμενες στο επίπεδο δικτύου και σεβόμενες την αρχή από-άκρη-σε-άκρη, με την έννοια ότι το δίκτυο παραμένει όσο απλούστερο γίνεται με τη μεγαλύτερη αύξηση της απαιτούμενης λειτουργικότητας στα άκρα.

2.7 Αποτίμηση Κατάστασης Κινητικότητας

Οι υλοποιήσεις Mobile IP που είναι διαθέσιμες βρίσκονται σε σταθερή κατάσταση και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για καθημερινή χρήση. Υπάρχουν υλοποιήσεις για όλο το φάσμα των σύγχρονων λειτουργικών συστημάτων και με διάφορες μορφές υποστήριξης. Συγκεκριμένα υπάρχουν υλοποιήσεις για λειτουργικά συστήματα Windows ως ανεξάρτητο πρωτόκολλο, αλλά και με τη μορφή πρόσθετης λειτουργίας σε οδηγούς καρτών ασύρματου δικτύου 802.11b. Οι υλοποιήσεις για συστήματα Linux, και άλλα συστήματα Unix ακολουθούν την τακτική ανεξάρτητης υλοποίησης πρωτοκόλλων.

Το Mobile IP είναι ένα σχετικά νέο πρωτόκολλο, το οποίο απαιτεί τη συνεργασία και την εναρμόνιση όλων των φορέων από τους οποίους θα πραγματοποιηθεί η περιαγωγή (οικείο δίκτυο, ξένο δίκτυο, κινητός κόμβος). Η σημαντικότερη δυσκολία μέχρι τώρα για την εξάπλωση του Mobile IP είναι η αδυναμία ανεύρεσης επιχειρηματικού μοντέλου για τη χρέωση της υπηρεσίας παροχής πρόσβασης. Η αδυναμία μοντελοποίησης της επιχειρηματικής πρακτικής είναι ένα γενικότερο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι πάροχοι πρόσβασης με τη ραγδαία επέκταση του Internet και το οποίο πρέπει να αντιμετωπιστεί συνολικά.

Μερικά άλλα θέματα που εμποδίζουν την εξάπλωση του Mobile IP είναι: η πιστοποίηση του χρήστη (ή κινητού κόμβου) [39], η ασφαλής μεταφορά των δεδομένων του μέσα από το ασύρματο κανάλι, το οποίο παρέχει πολύ μεγαλύτερες δυνατότητες υποκλοπής, η ασφάλεια του επισκεπτόμενου δικτύου από κακόβουλους κινητούς κόμβους [97], αλλά και η έλλειψη IP διευθύνσεων για ξεχωριστή διεύθυνση μέριμνας για κάθε κινητό κόμβο, καθώς και θέματα σχετικά με τη διάβαση των firewalls [77] και τη συνεργασία με τα VPNs (Virtual Private Networks) [142]. Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα είναι η διάδοση των Μεταφραστών Διευθύνσεων Δικτύου (Network Address Translators, NATs), που παρέχουν διευθύνσεις τοπικού μόνο χαρακτήρα και οι οποίες δεν είναι δρομολογήσιμες στο Internet [70]. Για τα περισσότερα από τα επιμέρους θέματα έχουν προταθεί διάφορες λύσεις ή παρακάμψεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

Η διάδοση του Mobile IP προβλέπεται να αυξηθεί κατά πολύ με την αύξηση των ασυρμάτων δικτύων. Το Mobile IP έχει ακόμη προδιαγραφεί για χρήση στα κινητά δίκτυα 2^{1/2} και 3ης γενιάς GPRS (Generalized Packet Radio Service) και UMTS (Universal Mobile Telecommunication

System). Συγκεκριμένα στο GPRS θα χρησιμοποιείται για την ομαλή περιαγωγή κινητού που πραγματοποιεί μεταπομπή μεταξύ σταθμών βάσης που ελέγχονται από διαφορετικό SGSN. Σε μελλοντικές εκδόσεις του UMTS προδιαγράφεται η χρήση IPv6 και συνεπώς η υποστήριξη Mobile IPv6.

Η ραγδαία εξάπλωση των ασυρμάτων δικτύων, καθώς και η ολοένα μεγαλύτερη προσφορά χαρακτηριστικών των δικτύων αυτών σε εύρος ζώνης, ασφάλεια και ποιότητα υπηρεσίας χρειάζονται ένα παγκόσμιο πρωτόκολλο για τη διαχείριση των κινούμενων κόμβων. Ήδη οι κατασκευαστές καρτών και σταθμών βάσης 802.11b συσκευάζουν με το λογισμικό υποστήριξης και λειτουργικότητα Mobile IP.

Το πρωτόκολλο Mobile IP έχει σχεδιαστεί με βάση την από- άκρη-σε-άκρη (end-to-end) προσέγγιση [112] που είναι κυρίαρχη στην αρχιτεκτονική του Internet. Για το λόγο αυτό είναι ευέλικτο και ευπροσάρμοστο σε αλλαγές, αλλά και επεκτάσιμο. Οι τεχνολογίες που αναδεικνύονται στο Internet είναι αυτές που είναι πιο χρήσιμες και ωφέλιμες για τους χρήστες. Το Mobile IP είναι ωφέλιμο για τους κινούμενους χρήστες και απομένει να συγκεκριμενοποιηθούν τα επιχειρηματικά μοντέλα για την εφαρμογή του.

Κεφάλαιο 3

Ποιότητα Υπηρεσίας (Quality of Service)

Η παροχή ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service, QoS) σε δίκτυα μεταγωγής πακέτων, και συγκεκριμένα στο Internet, είναι ένα πολυπρόσωπο όσο και ασαφές θέμα που απασχόλησε και συνεχίζει να απασχολεί την ερευνητική κοινότητα. Τα ανθρώπινα αισθητήρια όργανα έχουν διαφορετικά όρια ανοχής στη διαταραχή της ομαλότητας της ροής, αλλά και της καθυστέρησης. Ο άνθρωπος επίσης έχει διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας από διαφορετικές εφαρμογές. Λόγου χάρη μπορεί να περιμένει μερικά δευτερόλεπτα για να «κατεβάσει» ένα αρχείο από μια ιστοσελίδα, αλλά η αντίστοιχη καθυστέρηση σε μία τηλεδιάσκεψη κρίνεται ως απαράδεκτη. Η ποιότητα υπηρεσίας με μετρήσιμα χαρακτηριστικά περιλαμβάνει πολλούς παράγοντες, όπως η διαθεσιμότητα και η αξιοπιστία του δικτύου σε μακρύ χρονικό διάστημα, η άποψη του χρήστη για την ποιότητα του δικτύου, η ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων που παρέχει, η απώλεια πακέτων και πολλά άλλα. Η βασική ιδέα της εγγυημένης παροχής ποιότητας υπηρεσίας είναι η απόδοση προτεραιότητας σε ορισμένες ροές πακέτων έναντι των υπολοίπων.

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται αρχικά η παροχή υπηρεσίας μεταφοράς δεδομένων στο Internet σύμφωνα με τον αρχικό σχεδιασμό του. Εξηγούνται οι λόγοι που επελέγη η πολιτική της «καλύτερης προσπάθειας» (best effort) και τα προβλήματα που προκαλεί στην εισαγωγή εφαρμογών πραγματικού χρόνου, και παρατίθενται οι αιτίες για τις οποίες η πολιτική αυτή δεν καλύπτει τις ανάγκες των σύγχρονων εφαρμογών. Στη συνέχεια αναλύονται οι απαιτήσεις σε υποδομή που ανακύπτουν κατά τη διαδικασία εισαγωγής μηχανισμών ποιότητας υπηρεσίας, οι οποίες διακρίνονται στις απαιτήσεις για την τοπική επεξεργασία των πακέτων στους δρομολογητές και στις απαιτήσεις ανταλλαγής σηματοδοσίας ανάμεσα στους τελικούς χρήστες. Ακολουθεί η παρουσίαση της αρχιτεκτονικής ολοκληρωμένων υπηρεσιών (IntServ) και των υπηρεσιών που προσφέρει (Εγγυημένης

Υπηρεσίας και Ελεγχόμενου Φορτίου). Περιγράφεται αναλυτικά το πρωτόκολλο σηματοδοσίας RSVP, με ανάλυση του μοντέλου δέσμευσης πόρων, οι μηχανισμοί ανταλλαγής σηματοδοσίας και εγκατάστασης κατάστασης που υλοποιεί, αλλά και οι λόγοι της παροδικής υποβάθμισης του. Στην προσπάθεια για πλήρη απαλοιφή της πολυπλοκότητας της αρχιτεκτονικής IntServ, προτάθηκε η αρχιτεκτονική διαφοροποιημένων υπηρεσιών (DiffServ), η οποία και περιγράφεται στη συνέχεια. Τέλος, αναλύεται η απαραίτητη διαλειτουργικότητα μεταξύ των δύο αρχιτεκτονικών, με σκοπό την εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων των δύο αρχιτεκτονικών στις καταλληλότερες συνθήκες. Η ενότητα κλείνει με μια αποτίμηση της σημερινής κατάστασης παροχής ποιότητας υπηρεσίας στο Internet.

3.1 Παροχή Υπηρεσίας στο Internet

Ο αρχικός σχεδιασμός του Internet, πριν από αρκετές δεκαετίες, είχε στόχο την υλοποίηση ενός δικτύου με κύριο χαρακτηριστικό την ευρωστία. Συγκεκριμένα, δεδομένης της διεύθυνσης προορισμού ενός πακέτου, το δίκτυο προσπαθεί να βρει μία διαδρομή, ένα μονοπάτι μέσω των διαθέσιμων συνδέσεων για να μπορέσει το πακέτο να παραδοθεί στον τελικό του προορισμό. Ο συνολικός χρόνος που θα απαιτηθεί για τη μεταφορά του πακέτου, η καθυστέρηση δηλαδή, δεν λαμβάνεται υπόψη από τα στοιχεία του δικτύου. Στη χειρότερη περίπτωση, όπου δεν υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι στη διαδρομή για τη μεταφορά του πακέτου, το πακέτο απορρίπτεται (μια ακραία περίπτωση καθυστέρησης). Ο αποστολέας του πακέτου δεν ενημερώνεται από το δίκτυο για την επιτυχή ή μη παράδοση του πακέτου. Αν απαιτείται αξιόπιστη μεταφορά πακέτων, τα δύο ακραία σημεία της επικοινωνίας πρέπει να υλοποιήσουν και να εφαρμόσουν επιπλέον μηχανισμούς επιβεβαίωσης παράδοσης, όπως για παράδειγμα αυτούς που ορίζονται στο πρωτόκολλο TCP (Transmission Control Protocol) [104].

Υπάρχουν όμως και διάφορες περιπτώσεις όπου απαιτούνται διαφορετικές ιδιότητες στη μεταφορά δεδομένων. Επιπλέον της απαίτησης για αξιόπιστη μετάδοση, η γρήγορη ολοκλήρωση της σύνδεσης, μεταφοράς και τερματισμού των ροών δεδομένων είναι σημαντική για πολλές κατηγορίες εφαρμογών. Για παράδειγμα η πλοήγηση στο web (World Wide Web) δεν μπορεί να επιφέρει καθυστερήσεις μεγαλύτερες από μερικά δευτερόλεπτα. Ακόμη πιο αυστηρές είναι οι απαιτήσεις σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου όπως π.χ. τηλεφωνία ή τηλεδιάσκεψη πάνω από Internet, όπου τα χρονικά περιθώρια στενεύουν σε κλάσματα του δευτερολέπτου, αφού υπόκεινται στους περιορισμούς που επιβάλλει η ανθρώπινη διαδραστικότητα.

Μία άλλη επιθυμητή ιδιότητα από το δίκτυο είναι η διατήρηση της σειράς των πακέτων στον προορισμό τους, αλλά και η διατήρηση της χρονικής απόστασης μεταξύ των πακέτων. Η διατήρηση

της σειράς των πακέτων σηματοδοτεί πιθανή απώλεια πακέτων σε περίπτωση που δεν ακολουθείται. Με τον τρόπο αυτό, το πρωτόκολλο TCP προβαίνει γρήγορα σε αίτηση επαναποστολής των χαμένων πακέτων και ορισμένες εφαρμογές πραγματικού χρόνου προχωρούν στην αναπαραγωγή του ήχου ή της εικόνας χρησιμοποιώντας τα ειλημμένα πακέτα μόνο. Η διατήρηση της χρονικής απόστασης μεταξύ των πακέτων είναι ένας σημαντικός παράγοντας στις εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπου τα πακέτα σε μία ροή ήχου ή video μπορεί να έχουν αποσταλεί σε κανονικές χρονικές αποστάσεις μεταξύ τους και να καταφθάνουν στον προορισμό τους σε ριπές όλα μαζί. Το φαινόμενο αυτό (διακύμανση καθυστέρησης ή jitter) διαταράσσει τις ιδιότητες μιας ροής και επιφέρει σημαντικά θέματα χρονισμού σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου.

Για την καταπολέμηση της διακύμανσης καθυστέρησης οι εφαρμογές πραγματικού χρόνου συνήθως υλοποιούν ένα μηχανισμό προσωρινής αποθήκευσης των εισερχομένων πακέτων (playout buffer), ώστε να επανεισάγουν την αρχική χρονική διάταξη στη ροή των πακέτων. Το πρόβλημα που προκύπτει από τη λύση αυτή είναι η περαιτέρω αύξηση της καθυστέρησης για την αναμετάδοση της πληροφορίας. Για το λόγο αυτό αναζητείται ισορροπία στο μέγεθος του playout buffer. Το μεγάλο μέγεθος προσφέρει μεγάλη ανοχή στη διακύμανση καθυστέρησης από το δίκτυο, ενώ το μικρό μέγεθος ευνοεί τη διαδραστικότητα της εφαρμογής. Σε πολλές περιπτώσεις η απόρριψη καθυστερημένων πακέτων είναι προτιμητέα στη γενικότερη απόδοση της εφαρμογής.

Ο σχεδιασμός του Internet δίνει βαρύτητα στο πού κατευθύνονται τα πακέτα και όχι στο πότε ή στο πώς. Η φιλοσοφία του σχεδιασμού είναι να εξωθείται η πολυπλοκότητα στα άκρα, ώστε να απλοποιείται το εσωτερικό του δικτύου όσο το δυνατό περισσότερο και είναι γνωστή ως αρχή από-άκρη-σε-άκρη (ενδ-το-ενδ πρινσιπλε) [112]. Οι σημερινές εφαρμογές, όμως, εισάγουν νέες απαιτήσεις που απαιτούν επανασχεδίαση και προσαρμογή των υπαρχόντων τεχνολογιών. Η σημαντικότερη πρόκληση των σχεδιαστών των υπηρεσιών παροχής ποιότητας υπηρεσίας ήταν και είναι να εισάγουν τη λιγότερη δυνατή πολυπλοκότητα στο εσωτερικό του δικτύου, η οποία να καλύπτει τις νέες απαιτήσεις.

3.1.1 Αδυναμίες του Πρωτοκόλλου IP

Η ποιότητα υπηρεσίας στο Internet δεν είναι εύκολο να καταγραφεί σε ένα σύντομο και περιεκτικό ορισμό, αφού εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Οι κυριότερες αδυναμίες που αντιμετωπίζουν τα IP δίκτυα όσον αφορά στην παροχή ποιότητας υπηρεσίας οφείλονται κυρίως στην έλλειψη ελέγχου της επιμέρους συμπεριφοράς των ενδιάμεσων δρομολογητών και στην έλλειψη κατάλληλου συντονισμού των δρομολογητών, ώστε να παρέχουν προτεραιότητα σε συγκεκριμένες ροές ή κατηγορίες δεδομένων. Αναλυτικότερα, τα κυριότερα προβλήματα που παρουσιάζει το δίκτυο μοντέλου «καλύτερης προσπάθειας» (best effort) είναι τα εξής:

- Μη προβλέψιμη χρονική απόκριση σε συνθήκες συμφόρησης από τους δρομολογητές.
- Αδυναμία παροχής προτεραιότητας σε διαφορετικές κλάσεις κίνησης.
- Αδυναμία αίτησης λήψης και μεταβολής υπάρχουσας ποιότητας υπηρεσίας από το δίκτυο.
- Περιορισμένοι μηχανισμοί για την επίβλεψη των πόρων του δικτύου και την κατανομή τους.

Με βάση τις παραπάνω ενδείξεις, οι προσπάθειες της έρευνας στο χώρο της ποιότητας υπηρεσίας στο Internet εστιάστηκαν κατ' αρχήν σε θέματα που αφορούσαν στη λειτουργικότητα των δρομολογητών. Η κρίσιμη λειτουργικότητα που πρέπει να κατέχουν οι δρομολογητές στη διαδρομή των πακέτων αφορά στον τρόπο που οι δρομολογητές αντιμετωπίζουν πακέτα διαφορετικών κλάσεων κίνησης, ιδίως σε περιόδους συμφόρησης, και στον τρόπο που οι δρομολογητές εκμεταλλεύονται τα φυσικά χαρακτηριστικά των υποκείμενων ζεύξεων. Με βάση τη λειτουργικότητα αυτή, μπορεί να ελεγχθεί η συνολική καθυστέρηση της ροής δεδομένων, η διακύμανση της καθυστέρησης, αλλά και η απόρριψη των πακέτων.

Η εξασφάλιση προτεραιότητας σε διαφορετικές κλάσεις κίνησης από τους δρομολογητές του δικτύου είναι μία μόνο από τις παραμέτρους που πρέπει να ελεγχθεί. Άλλες σημαντικές λειτουργίες είναι η πιστοποίηση της γνησιότητας (authentication) των αιτήσεων για τη διάθεση ορισμένων πόρων, η παρακολούθηση και καταγραφή της χρήσης των πόρων για λόγους ασφάλειας και χρέωσης (accounting), καθώς και η σηματοδότηση (signaling) ποιότητας υπηρεσίας. Η σηματοδότηση αναφέρεται στην εγκατάσταση μηχανισμών κατηγοριοποίησης πακέτων και κανόνων εξυπηρέτησης κατά μήκος της διαδρομής μιας ροής δεδομένων. Η σηματοδότηση αποτελεί το «νευρικό σύστημα» της παροχής ποιότητας υπηρεσίας του δικτύου, με την έννοια ότι μεταδίδει μηνύματα και εγκαθιστά μηχανισμούς κατάστασης κατά μήκος του δικτύου. Η αλληλεπίδραση της σηματοδότησης παροχής ποιότητας υπηρεσίας με την υποστήριξη κινητικότητας σε επίπεδο IP είναι το βασικό πρόβλημα που αντιμετωπίζει η ερευνητική κοινότητα στην υλοποίηση υποδομών εγγυημένης υποστήριξης υπηρεσίας σε επικοινωνίες κινητών.

3.2 Απαιτήσεις Υποδομής Ποιότητας Υπηρεσίας

Η έρευνα τα τελευταία χρόνια στράφηκε προς την ανάπτυξη νέων αρχιτεκτονικών και μοντέλων υπηρεσιών για την καλύτερη εξυπηρέτηση των απαιτήσεων των νέων εφαρμογών. Μολονότι προέκυψαν προτάσεις με βασικές διαφορές, υπάρχει συναίνεση ότι κάθε νέα αρχιτεκτονική, ικανή να εξυπηρετήσει ποικιλία ποιότητας υπηρεσιών μπορεί να διαιρεθεί στα εξής διακριτά τμήματα [2]:

1. Δέσμευση Πόρων (Resource Reservation). Προκειμένου το δίκτυο να δώσει σε μια συγκεκριμένη ροή μια ποσοτικά προσδιορισμένη ποιότητα υπηρεσίας, όπως ένα όριο στην καθυστέρηση, είναι συνήθως αναγκαίο για το δίκτυο να φυλάξει ορισμένους πόρους (εύρος ζώνης, buffers).
2. Έλεγχος Αποδοχής (Admission Control). Επειδή οι πόροι ενός δικτύου είναι πεπερασμένοι, δεν μπορεί να ικανοποιεί όλες τις αιτήσεις δέσμευσης πόρων. Για να διατηρηθεί το φορτίο του δικτύου σε ένα επίπεδο, όπου μπορούν να ικανοποιηθούν όλες οι εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας, η αρχιτεκτονική του δικτύου πρέπει να περιέχει έναν μηχανισμό ελέγχου αποδοχής. Ο μηχανισμός αυτός καθορίζει ποιες αιτήσεις θα ικανοποιηθούν και ποιες θα απορριφθούν διατηρώντας έτσι το φορτίο του δικτύου σε ανεκτό επίπεδο.
3. Χρονοδρομολόγηση πακέτων (Packet Scheduling). Μετά από κάθε μετάδοση πακέτου, ένας διακόπτης στο δίκτυο πρέπει να αποφασίσει ποιο πακέτο θα μεταδώσει στη συνέχεια. Την εργασία αυτή την αναλαμβάνει ο αλγόριθμος χρονοδρομολόγησης πακέτων, που βρίσκεται στο κέντρο κάθε αρχιτεκτονικής δικτύου, αφού καθορίζει ποιες ποιότητες υπηρεσίας θα μπορεί το δίκτυο να παρέχει.
4. Προδιαγραφή ροής (Flow specification). Το δίκτυο και οι διάφορες ροές δεδομένων χρειάζονται μια κοινή γλώσσα επικοινωνίας, ώστε η πηγή να ενημερώνει το δίκτυο για τα χαρακτηριστικά της ροής και το δίκτυο να καθορίζει την ποιότητα υπηρεσίας για αυτή τη ροή.

Οι πρώτες τρεις λειτουργίες αφορούν την επεξεργασία πακέτων στους επιμέρους δρομολογητές. Η τέταρτη λειτουργία αφορά την περιγραφή των χαρακτηριστικών της ροής για την οποία πρόκειται να ισχύσει η ποιότητα της υπηρεσίας και αφορά το περιεχόμενο της σηματοδοσίας ανάμεσα στους ενδιαφερόμενους κόμβους.

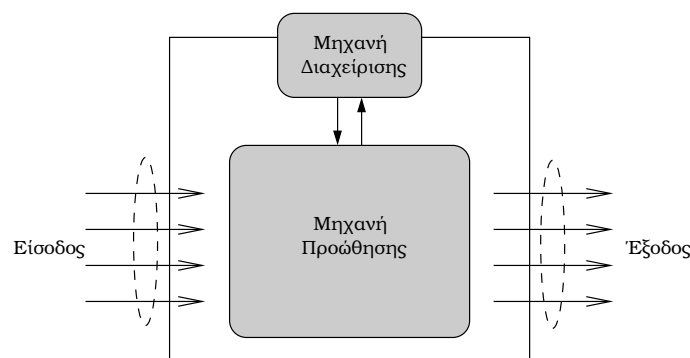
Στην παραπάνω ανάλυση των απαιτούμενων χαρακτηριστικών πρέπει φυσικά να προστεθεί η ικανότητα δρομολόγησης στο δίκτυο, δηλαδή το δίκτυο πρέπει να μπορεί να αποφασίζει τον τρόπο που θα μεταφέρει πακέτα από την πηγή στον προορισμό (ή σε περίπτωση multicast στους προορισμούς). Η ικανότητα του δικτύου αυτή θεωρείται δεδομένη και ανεξάρτητη από την παροχή ποιότητας υπηρεσίας. Δεν επηρεάζεται δηλαδή ο μηχανισμός δρομολόγησης από τυχόν λειτουργία μηχανισμών παροχής ποιότητας υπηρεσίας.

Στις παρακάτω παραγράφους περιγράφονται αναλυτικά οι λειτουργίες των μηχανισμών ποιότητας υπηρεσίας, τόσο εσωτερικά στους δρομολογητές, όσο και ανάμεσα τους με την ανταλλαγή μηνυμάτων σηματοδοσίας.

3.2.1 Επεξεργασία Πακέτων στους Δρομολογητές

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της παροχής ποιότητας υπηρεσίας είναι η υποστήριξη της κατάλληλης λειτουργικότητας στους ενδιάμεσους δρομολογητές, ώστε συγκεκριμένες κλάσεις κίνησης να μπορούν να λαμβάνουν μεταχείριση προτεραιότητας και να διασφαλίζονται τα επιθυμητά όρια ποιότητας υπηρεσίας. Η λειτουργία κάθε δρομολογητή είναι η προώθηση πακέτων προς το επόμενο τους βήμα (hop). Για την εκτέλεση του έργου αυτού, τα βασικά λειτουργικά τμήματα των δρομολογητών είναι τα εξής (Σχήμα 3.1):

- Πολλαπλές διεπαφές εισόδου/εξόδου
- Μηχανισμός προώθησης
- Μηχανισμός διαχείρισης



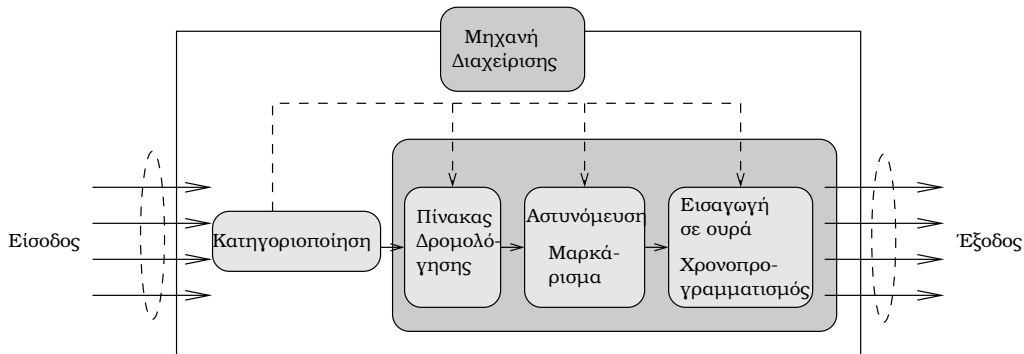
Σχήμα 3.1: Λειτουργικές οντότητες δρομολογητή

Οι διεπαφές εισόδου δέχονται πακέτα από άλλους δρομολογητές και ο μηχανισμός προώθησης (με βάση τη διεύθυνση προορισμού) τα περνάει στις κατάλληλες διεπαφές εξόδου. Η συμπεριφορά του μηχανισμού προώθησης ελέγχεται από τον μηχανισμό διαχείρισης.

Το Σχήμα 3.1 είναι μια αρκετά αφαιρετική μοντελοποίηση ενός δρομολογητή. Οι αρχικοί δρομολογητές είχαν έναν επεξεργαστή για την υλοποίηση των μηχανισμών προώθησης και διαχείρισης. Εξελικτικά, η αρχιτεκτονική κατευθύνθηκε σε πιο καταναμεμημένα σχήματα, όπου το υλικό (hardware) και το συνοδευόν λογισμικό στις κάρτες διεπαφών υλοποιούν πολλές από τις λειτουργίες του μηχανισμού προώθησης. Το μοντέλο αυτό πάντως περιγράφει πολύ καλά τη βασική λειτουργία ενός δρομολογητή, η οποία είναι η προώθηση των πακέτων στη σωστή διεπαφή εξόδου.

Η ολοένα και σημαντικότερη έννοια της ποιότητας υπηρεσίας στο Internet καθιστά αναγκαίο τον ανασχεδιασμό του μηχανισμού προώθησης, ώστε να αντιμετωπίζει αποτελεσματικότερα το «πότε» στέλνονται τα πακέτα από τις διεπαφές εξόδου στον προορισμό τους. Το Σχήμα 3.2 παρουσιάζει

τις βασικές λειτουργικές οντότητες που υπάρχουν σε κάθε δρομολογητή που υποστηρίζει παροχή ποιότητας υπηρεσίας. Γενικά, κάθε πακέτο περνάει από τρεις κύριες επεξεργασίες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2:



Σχήμα 3.2: Λειτουργικές οντότητες δρομολογητή που υποστηρίζει ποιότητα υπηρεσίας

1. Κατηγοριοποίηση (classification) του πακέτου και αναζήτηση (lookup) της διεπαφής εξόδου στον πίνακα δρομολόγησης. Εδώ εγκαθίσταται η κατάσταση περιβάλλοντος (context) για τη μεταχείριση του πακέτου από τις υπόλοιπες οντότητες του δρομολογητή. Ουσιαστικά καθορίζεται η κλάση στην οποία ανήκει το πακέτο.
2. Αστυνόμευση (policing) και μαρκάρισμα (marking). Με την αστυνόμευση των πακέτων ελέγχεται αν η ροή των πακέτων υπακούει στα χαρακτηριστικά που είχαν προ-συμφωνηθεί με τον πάροχο του δικτύου (είτε δυναμικά με σηματοδοσία είτε με στατική ρύθμιση του δρομολογητή). Στη συνέχεια, και ανάλογα με το αποτέλεσμα των σταδίων κατηγοριοποίησης και αστυνόμευσης, κάθε πακέτο μαρκάρεται σύμφωνα με τις εσωτερικές διαδικασίες του δρομολογητή ή του δικτύου το οποίο εποπτεύει.
3. Εισαγωγή σε ουρά εξόδου (queuing) και χρονοπρογραμματισμός (scheduling). Προκειμένου να μεταδοθούν τα πακέτα στο φυσικό μέσο από τη εξερχόμενη διεπαφή εισάγονται στην αντίστοιχη ουρά της κλάσης τους και από εκεί και πέρα ο χρονοπρογραμματιστής καθορίζει από ποια ουρά θα μεταδοθεί το επόμενο πακέτο. Το Σχήμα 3.2 περιέχει μόνο ένα στάδιο τοποθέτησης σε ουρά/χρονοπρογραμματισμού. Αυτό συμβαίνει γιατί κατά κανόνα η στενωπός στα δίκτυα είναι οι σύνδεσμοι μεταξύ των δρομολογητών. Σε πραγματικές υλοποιήσεις όμως, για να αποφευχθεί η συμφόρηση στο εσωτερικό του δρομολογητή (π.χ. στο μηχανισμό μεταγωγής πακέτων) εισάγονται και αλλού τεχνικές ουρών και χρονοπρογραμματισμού.

3.2.2 Σηματοδοσία Ποιότητας Υπηρεσίας

Στην Παράγραφο 3.2.1 περιγράφηκαν οι μηχανισμοί που είναι υπεύθυνοι για τη διαφοροποιημένη μεταχείριση των πακέτων. Χρησιμοποιώντας την υποδομή αυτή, οι ροές πακέτων με προτεραιότητα απολαμβάνουν σε κάθε βήμα (από δρομολογητή σε δρομολογητή) καλύτερη μεταχείριση από τα υπόλοιπα πακέτα καλύτερης προσπάθειας (best effort). Αν σε κάθε βήμα οι δρομολογητές είναι ρυθμισμένοι για παροχή προτεραιότητας στις συγκεκριμένες ροές, οι ροές από-άκρη-σε-άκρη απολαμβάνουν εγγυημένα στατιστικά στοιχεία μέτρησης ποιότητας υπηρεσίας, όπως μέγιστη καθυστέρηση, μέγιστο ποσοστό απώλειας πακέτων, άφιξη πακέτων στη σωστή σειρά και άλλα.

Ο τρόπος με τον οποίο επικοινωνούν οι τελικοί προορισμοί μεταξύ τους για τη διαπραγμάτευση των ρυθμίσεων ποιότητας υπηρεσίας, αλλά και η εγκαθίδρυση και διατήρηση κατάστασης ποιότητας υπηρεσίας στους ενδιάμεσους δρομολογητές αποτελεί το αντικείμενο της σηματοδοσίας ποιότητας υπηρεσίας. Η σηματοδοσία στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα είναι μια έννοια αρκετά γνωστή και παγκοσμίως αναγνωρισμένη. Τα πρωτόκολλα SS#7 [49] για τη σηματοδοσία σε παραδοσιακά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, Q.931 [50] για δίκτυα ISDN, Q.2931 [51], UNI [3] και PNNI [4] για δίκτυα ATM είναι μερικά μόνο παραδείγματα σηματοδοσίας σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα.

Η διαφορά της αρχιτεκτονικής Internet από τα παραδοσιακά δίκτυα έγκειται στον τρόπο λειτουργίας που διαθέτουν τα εσωτερικά στοιχεία του δικτύου (δρομολογητές, διακόπτες, μεταγωγείς, κτλ.). Ενώ τα παραδοσιακά δίκτυα διαθέτουν μεταγωγείς που καταχωρούν κατάσταση μεταγωγής για κάθε σύνδεση που τους διατρέχει, οι δρομολογητές στο Internet δρομολογούν τα πακέτα στην κατάλληλη εξερχόμενη διεπαφή μόνο βάσει της διεύθυνσης προορισμού τους. Στην απλούστερη μορφή τους, οι δρομολογητές δεν κρατούν στοιχεία για μεταγόμενες ροές και δεν αντιμετωπίζουν τα πακέτα των ροών διαφοροποιημένα. Για να συμβεί κάτι τέτοιο απαιτείται η εγκατάσταση κατάστασης ποιότητας υπηρεσίας (QoS state), όπου θα κρατούνται τα χαρακτηριστικά αναγνώρισης της ροής (π.χ. διευθύνσεις προέλευσης και προορισμού), αλλά και τα χαρακτηριστικά ποιότητας υπηρεσίας που έχουν δεσμευθεί (μέσο χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης, μέγιστο στιγμιαίο εύρος ζώνης, ζητούμενη καθυστέρηση κ.α.).

Η χαρακτηριστική μέθοδος διατήρησης της κατάστασης στα ενδιάμεσα στοιχεία του δικτύου που εφαρμόζεται στα δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος είναι αυτή της «εμμένουσας κατάστασης» (hard state). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η κατάσταση που εγκαθιδρύεται στους ενδιάμεσους μεταγωγείς θα υπάρχει και θα λειτουργεί μέχρι τη ρητή κατάργηση της (συνήθως από ένα μήνυμα κατάργησης). Η μέθοδος αυτή προϋποθέτει συνεχή έλεγχο στη λειτουργία των μεταγωγέων, των συνδέσεων μεταξύ τους, αλλά και τη σωστή λειτουργία των τερματικών συσκευών. Η αστοχί-

α/κατάρρευση οποιουδήποτε εξαρτήματος μπορεί να προκαλέσει την επ' αόριστον παραμονή της κατάστασης στα ενδιάμεσα στοιχεία του δικτύου, και επομένως τη σπατάλη πόρων. Τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος διαθέτουν πλεονάζοντες μηχανισμούς ευρωστίας ώστε να μπορούν να αντιμετωπίζουν τέτοιες καταστάσεις, και αφού αυτή η μέθοδος της εμμένουσας κατάστασης είναι η αποτελεσματικότερη, χρησιμοποιείται ευρέως σε αυτά.

Η μέθοδος διατήρησης της κατάστασης σηματοδοσίας που προτιμάται στο Internet είναι η μέθοδος «προσωρινής κατάστασης» (soft state). Η κατάσταση που καταχωρείται σε κάποιον δρομολογητή με τη μέθοδο αυτή έχει περιορισμένο χρόνο ζωής. Η ανανέωση της διάρκειας παραμονής της κατάστασης στη μνήμη των ενδιάμεσων δρομολογητών πραγματοποιείται με μηνύματα ανανέωσης (refresh), τα οποία ανανεώνουν τη διάρκεια ζωής της κατάστασης για κάποιο χρονικό διάστημα. Αν για οποιοδήποτε λόγο, αποτύχει/καταρρεύσει κάποιο στοιχείο του δικτύου (δρομολογητής, ζεύξη, τερματική συσκευή κτλ.), το μήνυμα ενημέρωσης-ανανέωσης με την αντίστοιχη προσωρινή κατάσταση δεν θα διαβιβαστεί στους δρομολογητές, η οποία μετά το πέρας της διάρκειας παραμονής της θα εκπνεύσει. Με τον τρόπο αυτό δεν απαιτείται αυστηρή παρακολούθηση της λειτουργίας του δικτύου με εξωτερικά μέσα, και η ευρωστία της σηματοδοσίας υπάρχει μέσα στο ίδιο το πρωτόκολλο.

Το μειονέκτημα της λύσης αυτής είναι, προφανώς, η μεγαλύτερη χρήση των πόρων του δικτύου για τα μηνύματα ανανέωσης. Σε ένα κατάλληλα ρυθμισμένο δίκτυο και με τις κατάλληλες προσθήκες στα πρωτόκολλα σηματοδοσίας προσωρινής κατάστασης (όπως είναι η υποστήριξη ρητής κατάργησης κατάστασης καθώς και αξιόπιστης μεταφοράς των μηνυμάτων εγκατάστασης και κατάργησης της κατάστασης) η διαφορά απόδοσης είναι ανεπαίσθητη. Σχετικές έρευνες συγκριτικής απόδοσης των πρωτοκόλλων εμμένουσας και προσωρινής κατάστασης έχουν δημοσιευτεί στο [56].

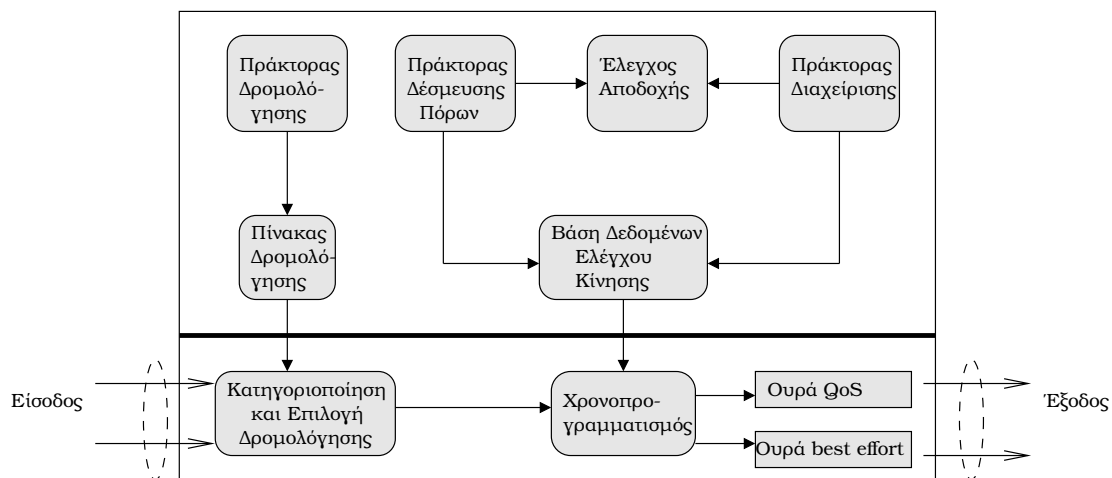
3.3 Αρχιτεκτονική Ολοκληρωμένων Υπηρεσιών

Η αρχιτεκτονική ολοκληρωμένων υπηρεσιών (Integrated Services Architecture, IntServ) [26, 16], ήταν η πρώτη προσπάθεια της ερευνητικής κοινότητας για τη δημιουργία και καθιέρωση μίας ενιαίας και ολοκληρωμένης λύσης για την υποστήριξη πολλαπλών κλάσεων διακίνησης δεδομένων στο Internet. Παρέχει το πλαίσιο ανάπτυξης πρωτοκόλλων σηματοδοσίας και υποστήριξης ποιότητας υπηρεσίας από άκρη σε άκρη. Η κύρια συνεισφορά της αρχιτεκτονικής IntServ είναι η υπόδειξη της κατάλληλης λειτουργικότητας που απαιτείται στους ενδιάμεσους δρομολογητές (διαφοροποίηση ροών πακέτων), καθώς και της σηματοδοσίας που απαιτείται για την αίτηση παροχής ποιότητας υπηρεσίας. Συγκεκριμένα, τέθηκε ξεκάθαρα η ανάγκη ύπαρξης μηχανισμών δέσμευσης πόρων και η ανάγκη της λειτουργίας ελέγχου αποδοχής (admission control) στους ενδιάμεσους

δρομολογητές. Η επιπλέον πολυπλοκότητα δικαιολογείται από το γεγονός ότι είναι ο μοναδικός τρόπος να παρασχεθεί εγγυημένη ποιότητα υπηρεσίας από το δίκτυο.

3.3.1 Δομικά Συστατικά IntServ

Η βασική δομή του δρομολογητή υποστήριξης ποιότητας υπηρεσίας αναλύεται στο Σχήμα 3.3. Η δομή αυτή εξυπηρετεί τη λεπτομερή διάκριση πακέτων που ανήκουν σε διαφορετικές ομάδες κίνησης και τη μεγαλύτερη δυνατή ευελιξία σε ό,τι αφορά τη διαφοροποίηση των ροών.



Σχήμα 3.3: Λειτουργικές οντότητες δρομολογητή αρχιτεκτονικής ολοκληρωμένων υπηρεσιών

Η λειτουργία του δρομολογητή που παρέχει διαφορετικές ποιότητες υπηρεσίας ονομάζεται Έλεγχος Κίνησης (Traffic Control). Η λειτουργία αυτή υλοποιείται στους δρομολογητές από τρία συστατικά στοιχεία, το χρονοπρογραμματιστή πακέτων (packet scheduler), το στάδιο κατηγοριοποίησης (classifier) και τον έλεγχο αποδοχής (admission control). Αναλυτικά οι τρεις αυτές λειτουργίες περιλαμβάνουν τα εξής:

- **Χρονοπρογραμματιστής Πακέτων (Packet Scheduler).** Η οντότητα αυτή διαχειρίζεται την προώθηση των διαφορετικών ροών πακέτων, χρησιμοποιώντας ένα σύνολο ουρών, καθώς και άλλους μηχανισμούς όπως χρονοδιακόπτες (timers). Ο χρονοπρογραμματιστής πακέτων πρέπει να υλοποιηθεί στο σημείο όπου τοποθετούνται σε ουρές τα πακέτα: συνήθως στο επίπεδο του οδηγού της διεπαφής εξόδου σε ένα λειτουργικό σύστημα και αντιστοιχεί στο πρωτόκολλο επιπέδου ζεύξης (link layer). Τα αναλυτικά στοιχεία υλοποίησης του αλγορίθμου χρονοδρομολόγησης μπορεί να αντιστοιχούν στο συγκεκριμένο μέσο εξόδου. Για παράδειγμα, ο οδηγός εξόδου θα πρέπει να χρησιμοποιήσει τους κατάλληλους ελέγχους επιπέδου ζεύξης όταν η δικτυακή τεχνολογία που χρησιμοποιείται διαθέτει εσωτερικούς μηχανισμούς δέσμευσης εύρους ζώνης.

Μία άλλη λειτουργία που μπορεί να θεωρηθεί τμήμα του χρονοπρογραμματιστή είναι ο εκτιμητής (estimator). Ο αλγόριθμος εκτίμησης χρησιμοποιείται για τη μέτρηση χαρακτηριστικών της ροής εξόδου, καθώς και για τη συλλογή και δημιουργία στατιστικών για τις ροές. Χρησιμοποιείται για τον έλεγχο (αστυνόμευση) των ροών που διαχειρίζεται ο χρονοπρογραμματιστής, αλλά και για τις αποφάσεις στον έλεγχο αποδοχής νέων ροών.

- Κατηγοριοποίηση (Classifier). Προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος του ελέγχου (και καταγραφής) κίνησης, κάθε εισερχόμενο πακέτο πρέπει να αντιστοιχηθεί σε κάποια κλάση ποιότητας υπηρεσίας. Όλα τα πακέτα στην ίδια κλάση αντιμετωπίζονται με τον ίδιο τρόπο από τον χρονοπρογραμματιστή. Η αντιστοίχιση πραγματοποιείται στο στάδιο της κατηγοριοποίησης. Η επιλογή μιας κλάσης συνήθως βασίζεται στα περιεχόμενα των επικεφαλίδων των πακέτων.

Μία κλάση μπορεί να περιλαμβάνει μια ευρεία κατηγορία ροών, π.χ. όλες τις ροές πακέτων που μεταφέρουν video ή όλες τις ροές που προέρχονται από κάποιον οργανισμό, αλλά μπορεί να περιέχει και μία μόνο ροή. Η κλάση είναι μια αφαιρετική έννοια που έχει τοπική σημασία μόνο· το ίδιο πακέτο μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε διαφορετικές κλάσεις από διαδοχικούς δρομολογητές στην πορεία του.

- Έλεγχος Αποδοχής (Admission Control). Ο έλεγχος αποδοχής υλοποιεί τον αλγόριθμο απόφασης που χρησιμοποιεί ένας δρομολογητής προκειμένου να καθορίσει αν σε μία νέα ροή μπορεί να χορηγηθεί η ζητούμενη ποιότητα υπηρεσίας, χωρίς επίπτωση σε υπάρχουσες ροές. Ο έλεγχος αποδοχής εκτελείται σε κάθε κόμβο για να ληφθεί μία τοπική απόφαση έγκρισης ή απόρριψης, όταν μία εφαρμογή αιτείται την παροχή υπηρεσίας πραγματικού χρόνου για μία διαδρομή στο Internet.

Η επιβολή της διαχειριστικής πολιτικής σε θέματα δέσμευσης πόρων είναι επίσης μία λειτουργία του ελέγχου αποδοχής. Κάποιες πολιτικές απαιτούν πιστοποίηση (authentication) των αιτούντων ποιότητας υπηρεσίας. Ακόμη ο έλεγχος αποδοχής έχει σημαντικό ρόλο στην αναφορά λογιστικών και διαχειριστικών καταστάσεων που αφορούν τη χρέωση.

Το τέταρτο και τελικό συστατικό στοιχείο του πλαισίου υλοποίησης της αρχιτεκτονικής IntServ είναι το πρωτόκολλο εγκατάστασης δεσμεύσεων. Το πρωτόκολλο αυτό χρησιμοποιείται για την εγκατάσταση και συντήρηση καταστάσεων ποιότητας υπηρεσίας που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες ροές στους ενδιάμεσους δρομολογητές και στους κόμβους στα άκρα της διαδρομής μιας ροής. Το πρωτόκολλο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της αρχιτεκτονικής IntServ για το σκοπό αυτό είναι το RSVP, (Resource ReSerVation Protocol) [18, 150], που περιγράφεται αναλυτικά στην

Παράγραφο 3.4.

Προκειμένου να καθορίσει τις απαιτήσεις της ως προς την ποιότητα υπηρεσίας, μία εφαρμογή πρέπει να καθορίσει την επιθυμητή ποιότητα υπηρεσίας χρησιμοποιώντας ένα σύνολο παραμέτρων που ονομάζεται προδιαγραφή ροής (flowspec). Η προδιαγραφή ροής μεταφέρεται με το πρωτόκολλο δέσμευσης πόρων, εισάγεται στον έλεγχο αποδοχής για την πραγματοποίηση των κατάλληλων ελέγχων, και τέλος χρησιμοποιείται για την παραμετροποίηση του μηχανισμού χρονοπρογραμματισμού πακέτων.

Στο Σχήμα 3.3 αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο ένας κλασικός IP δρομολογητής μπορεί να επεκταθεί ώστε να παρέχει ολοκληρωμένες υπηρεσίες. Ο δρομολογητής διαχωρίζεται σε δύο λειτουργικά τμήματα: τη διαδρομή προώθησης (forwarding path) κάτω από την παχιά γραμμή και τον κώδικα παρασκηνίου πάνω από τη γραμμή.

Η διαδρομή προώθησης του δρομολογητή εκτελείται για κάθε πακέτο και για το λόγο αυτό πρέπει να είναι βελτιστοποιημένη. Συνήθως υπάρχει εξειδικευμένο υλικό για την επιτάχυνση της διαδικασίας. Ο κώδικας παρασκηνίου απλώς φορτώνεται στη μνήμη του δρομολογητή και εκτελείται από έναν επεξεργαστή γενικής χρήσης. Οι λειτουργίες παρασκηνίου δημιουργούν τις κατάλληλες δομές δεδομένων που ελέγχουν τη διαδρομή προώθησης. Ο πράκτορας δρομολόγησης υλοποιεί ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης και δημιουργεί τον πίνακα δρομολόγησης. Ο πράκτορας δέσμευσης πόρων υλοποιεί το πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται για την εγκατάσταση των δεσμεύσεων. Αν ο έλεγχος αποδοχής απαντήσει θετικά σε μία νέα αίτηση, πραγματοποιούνται οι κατάλληλες ρυθμίσεις στο στάδιο της κατηγοριοποίησης και στον χρονοπρογραμματιστή. Τέλος, κάθε δρομολογητής υποστηρίζει τον αντίστοιχο πράκτορα για τη διαχείριση του. Ο πράκτορας διαχείρισης πρέπει να μπορεί να ρυθμίσει το στάδιο κατηγοριοποίησης και τον χρονοπρογραμματιστή, να εγκαταστήσει ελεγχόμενο διαμοιρασμό ζεύξης και να καθορίσει πολιτικές ελέγχου αποδοχής.

Η υλοποίηση του μοντέλου IntServ στους τελικούς κόμβους είναι όμοια, μόνο που αντί να προωθούνται τα πακέτα, θα γεννώνται και θα τερματίζουν αντίστοιχα σε κάποια εφαρμογή. Οι εφαρμογές πραγματικού χρόνου θα πρέπει να επικοινωνούν με τον πράκτορα δέσμευσης πόρων ώστε να ζητούν ποιότητα υπηρεσίας από το δίκτυο.

3.3.2 Υπηρεσίες IntServ

Οι υπηρεσίες που παρέχονται από την αρχιτεκτονική IntServ ορίζονται σε δύο επίπεδα. Αρχικά παρέχεται η επιλογή μιας γενικής κατηγορίας υπηρεσίας, η οποία αντιστοιχεί σε γενικά χαρακτηριστικά της υπηρεσίας. Στη συνέχεια, εξατομικεύεται η υπηρεσία μέσα στη γενική κατηγορία για τη συγκεκριμένη ροή με χρήση ορισμένων παραμέτρων. Το σύνολο των παραμέτρων αυτών αναφέ-

ρεται ως Καθορισμός Κίνησης (Traffic Specification, TSpec). Ο καθορισμός της κίνησης βασίζεται στην έννοια του κάδου με κουπόνια (token bucket) [89].

Οι γενικές κατηγορίες υπηρεσίας που έχουν προκαθοριστεί είναι οι

- Εγγυημένη Υπηρεσία (Guaranteed Service) [117].
- Υπηρεσία Ελεγχόμενου Φορτίου (Controlled Load Service) [149]
- Υπηρεσία Καλύτερης Προσπάθειας (Best Effort Service)

Η υπηρεσία Καλύτερης Προσπάθειας είναι η απεικόνιση της συμπεριφοράς που προϋπάρχει στο Internet. Όπως περιγράφεται και στην Παράγραφο 3.1.1, τα πακέτα αντιμετωπίζονται με τον ίδιο τρόπο και η απόρριψη τους από τους ενδιαμέσους δρομολογητές δεν έχει σχέση με την όποια προτεραιότητα τους, αλλά μόνο με την εσωτερική κατάσταση των δρομολογητών. Η εγγυημένη υπηρεσία και η υπηρεσία ελεγχόμενου φορτίου εισάγουν την έννοια της προτεραιότητας και περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους.

Εγγυημένη Υπηρεσία (Guaranteed Service)

Η εγγυημένη υπηρεσία [117] παρέχει σταθερά όρια (μαθηματικά αποδεικνυόμενα) για τις καθυστερήσεις στις ουρές των πακέτων από άκρη σε άκρη. Η υπηρεσία αυτή καθιστά εφικτή την εγγύηση τόσο της καθυστέρησης όσο και του εύρους ζώνης.

Αναλυτικά, τα κύρια χαρακτηριστικά της υπηρεσίας είναι τα εξής:

1. Η υπηρεσία παρέχει εξασφαλισμένο επίπεδο χωρητικότητας ή ρυθμού μετάδοσης δεδομένων.
2. Καθορίζεται άνω όριο στην καθυστέρηση στις ουρές διαμέσου του δικτύου. Η καθυστέρηση αυτή πρέπει να προστεθεί στις σταθερές καθυστερήσεις μετάδοσης (propagation) ή επεξεργασίας (latency) ώστε να προκύψει η συνολική καθυστέρηση στο δίκτυο.
3. Δεν υπάρχουν απώλειες πακέτων στις ουρές. Αυτό σημαίνει ότι τα πακέτα δεν απορρίπτονται λόγω υπερχειλίσης. Μπορεί να χαθούν για άλλα αίτια, όπως π.χ. βλάβες στο δίκτυο ή αλλαγές στις διαδρομές δρομολόγησης.

Η υπηρεσία αυτή είναι κατάλληλη για εφαρμογές που απαιτούν άνω όριο καθυστέρησης, και ελάχιστες απώλειες πακέτων. Παραδείγματα υπηρεσιών που απαιτούν εγγυημένη υπηρεσία είναι συνήθως οι διαδραστικές (interactive) εφαρμογές, όπου τα ανθρώπινα αισθητήρια είναι ανεκτικά σε πολύ μικρές καθυστερήσεις. Η εγγυημένη υπηρεσία είναι η πιο απαιτητική υπηρεσία που παρέχεται από την αρχιτεκτονική ολοκληρωμένων υπηρεσιών.

Υπηρεσία Ελεγχόμενου Φορτίου (Controlled Load Service)

Η υπηρεσία ελεγχόμενου φορτίου [149] παρέχει στις εξυπηρετούμενες ροές ποιότητα υπηρεσίας περίπου ίδια με αυτή που θα λάμβανε η ροή σε ένα μη-φορτωμένο δίκτυο, αλλά χρησιμοποιεί έλεγχο αποδοχής για την εξασφάλιση της ποιότητας αυτής, ακόμη και όταν το δίκτυο είναι υπερφορτωμένο.

Αναλυτικά τα κύρια χαρακτηριστικά της υπηρεσίας είναι :

1. Η υπηρεσία ελεγχόμενου φορτίου προσομοιάζει στη συμπεριφορά που είναι ορατή σε εφαρμογές καλύτερης προσπάθειας σε μη φορτωμένο δίκτυο.
2. Δεν υπάρχει καθορισμένο άνω όριο στην καθυστέρηση στις ουρές διαμέσου του δικτύου. Ωστόσο, η υπηρεσία εξασφαλίζει ότι ένα πολύ μεγάλο ποσοστό των πακέτων δεν θα αντιμετωπίσουν καθυστερήσεις που θα υπερβαίνουν κατά πολύ τις ελάχιστες καθυστερήσεις.
3. Ένα πολύ μεγάλο ποσοστό μεταδιδόμενων πακέτων θα παραδοθεί επιτυχώς, δηλαδή οι απώλειες στις ουρές θα είναι αμελητέες.

Με την εισαγωγή υπηρεσιών παροχής εγγυήσεων ποιότητας, εισήχθη και ο κίνδυνος αποκλεισμού των υπηρεσιών καλύτερης προσπάθειας. Το μεγαλύτερο τμήμα των διακινούμενων δεδομένων καλύτερης προσπάθειας χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο TCP και τον αυτοέλεγχο, δηλαδή την υποβάθμιση του ρυθμού μετάδοσης σε καταστάσεις συμφόρησης. Η υπηρεσία ελεγχόμενου φορτίου εγγυάται ωστόσο ότι το δίκτυο θα διαθέτει επαρκείς πόρους για εξυπηρέτηση των εφαρμογών καλύτερης προσπάθειας [149].

Η υπηρεσία ελεγχόμενου φορτίου είναι κατάλληλη για εφαρμογές που δεν απαιτούν εκ των προτέρων άνω όρια στις καθυστερήσεις του δικτύου, αλλά μπορούν να προσαρμοστούν σε μικρές διακυμάνσεις. Σε μια ροή, ο παραλήπτης συνήθως μετρά τη διακύμανση καθυστέρησης (jitter) και καθορίζει την καθυστέρηση αναπαραγωγής στην ελάχιστη δυνατή που εξασφαλίζει ένα ανεκτό ρυθμό απώλειας πακέτων. Για παράδειγμα, οι εφαρμογές video προσαρμόζονται απορρίπτοντας ένα πλαίσιο ή καθυστερώντας ελαφρά την έξοδο, ενώ οι εφαρμογές ήχου προσαρμόζονται ρυθμίζοντας τις περιόδους σιγής.

3.4 RSVP

Το πρωτόκολλο σηματοδότησης για την εγκατάσταση κατάστασης ποιότητας υπηρεσίας στο Internet είναι το RSVP (Resource ReSerVation Protocol) και καθορίζεται στο RFC 2205 [18]. Αν και

συχνά αναφέρεται ως το πρωτόκολλο της αρχιτεκτονικής ολοκληρωμένων υπηρεσιών, το RSVP και η αρχιτεκτονική IntServ είναι συμπληρωματικές, αλλά ανεξάρτητες τεχνολογίες.

Το RSVP δεσμεύει πόρους για μονοκατευθυντικές (simplex) ροές, δεσμεύει δηλαδή πόρους μόνο προς μία κατεύθυνση. Επομένως, το RSVP μεταχειρίζεται τον αποστολέα ως λογικά διακριτή οντότητα από τον δέκτη, παρόλο που η ίδια εφαρμογή μπορεί να συμπεριφέρεται τόσο σαν αποστολέας όσο και σαν δέκτης. Το RSVP λειτουργεί πάνω από το πρωτόκολλο IP (IPv4 ή IPv6) στο επίπεδο μεταφοράς. Παρόλα αυτά, το RSVP δεν μεταφέρει δεδομένα εφαρμογών, αλλά είναι ένα πρωτόκολλο ελέγχου του Internet όπως τα ICMP (Internet Control Message Protocol) [103], IGMP (Internet Group Message Protocol) [29] και τα διάφορα πρωτόκολλα δρομολόγησης. Όπως και οι υπόλοιπες υλοποιήσεις των πρωτοκόλλων δρομολόγησης και διαχείρισης, η διεργασία RSVP υλοποιείται στο παρασκήνιο.

Το RSVP δεν είναι πρωτόκολλο δρομολόγησης. Σχεδιάστηκε να λειτουργεί με παρόντα και μελλοντικά unicast και multicast πρωτόκολλα δρομολόγησης όπως για παράδειγμα το OSPF [80]. Η διεργασία RSVP συμβουλευεται την τοπική βάση δεδομένων δρομολόγησης για να ενημερωθεί για τις κατάλληλες εξερχόμενες διεπαφές. Στην περίπτωση multicast, ένας κόμβος στέλνει μηνύματα IGMP για να γίνει μέλος μιας multicast ομάδας και στη συνέχεια στέλνει μηνύματα RSVP για να δεσμεύσει πόρους κατά μήκος της διαδρομής προς τα μέλη αυτής της ομάδας. Το πρωτόκολλο δρομολόγησης καθορίζει την εξερχόμενη διεπαφή που προωθούνται τα πακέτα. Το RSVP ασχολείται μόνο με την ποιότητα υπηρεσίας που απολαμβάνουν τα πακέτα αυτά.

Στο RSVP, οι δέκτες μιας ροής δεδομένων είναι υπεύθυνοι για την αίτηση μιας συγκεκριμένης ποιότητας υπηρεσίας (receiver-initiated). Η επιλογή αυτή επιτρέπει την αποτελεσματική διαχείριση μεγάλων ομάδων, την υποστήριξη δυναμικής εισαγωγής και διαγραφής μελών των ομάδων, αλλά και την υποστήριξη ετερογενών απαιτήσεων των δεκτών. Η αίτηση ποιότητας υπηρεσίας από μια εφαρμογή στον δέκτη προωθείται στην τοπική διεργασία RSVP. Το RSVP στη συνέχεια μεταφέρει την αίτηση σε όλους τους κόμβους κατά μήκος της αντίστροφης διαδρομής της ροής των δεδομένων στον αποστολέα των δεδομένων. Στην περίπτωση multicast, η αίτηση δεν χρειάζεται να μεταφερθεί μακρύτερα από τον δρομολογητή όπου το μονοπάτι δεδομένων του δέκτη ενώνεται με το δένδρο διανομής multicast. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το κόστος επεξεργασίας της δέσμευσης να είναι γενικά λογαριθμικό, αντί για γραμμικό, ως προς τον αριθμό των δεκτών.

Το RSVP καλύπτει τη λειτουργία του πρωτοκόλλου ποιότητας υπηρεσίας στην αρχιτεκτονική ολοκληρωμένων υπηρεσιών (Σχήμα 3.3). Οι μηχανισμοί του πρωτοκόλλου RSVP παρέχουν έναν εύκολο τρόπο δημιουργίας και διατήρησης καταστάσεων δεσμεύσεων πόρων διαμέσου ενός πλέγματος διαδρομών. Το ίδιο το RSVP μεταχειρίζεται τις παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας και ελέγχου πολιτικής σαν αδιαφανή δεδομένα, μεταφέροντας τις στις κατάλληλες μονάδες ελέγχου

κυκλοφορίας και ελέγχου πολιτικής για μετάφραση. Η δομή και τα περιεχόμενα των παραμέτρων ποιότητας υπηρεσίας καθορίζονται στο [148]. Η αντίστοιχη δομή και τα περιεχόμενα των παραμέτρων ελέγχου πολιτικής καθορίζονται στο [45].

Συνοπτικά το RSVP έχει τις παρακάτω ιδιότητες :

- Πραγματοποιεί δεσμεύσεις πόρων τόσο για unicast όσο και για multicast εφαρμογές, προσαρμοζόμενο δυναμικά σε μεταβαλλόμενες multicast ομάδες όσο και σε αλλαγές δρομολόγησης.
- Είναι μονοκατευθυντικό, πραγματοποιεί δηλαδή δεσμεύσεις για μονοκατευθυντικές ροές δεδομένων.
- Είναι κατευθυνόμενο από το δέκτη. Ο δέκτης μιας ροής δεδομένων αρχικοποιεί και διατηρεί την δέσμευση πόρων που χρησιμοποιείται για αυτή τη ροή.
- Διατηρεί προσωρινή κατάσταση (soft state) σε δρομολογητές και κόμβους παρέχοντας υποστήριξη για δυναμικές αλλαγές σε ομάδες και αυτόματη προσαρμογή σε αλλαγές δρομολόγησης.
- Δεν είναι πρωτόκολλο δρομολόγησης, αλλά εξαρτάται από τα υπάρχοντα και τα μελλοντικά πρωτόκολλα δρομολόγησης.
- Μεταφέρει και διατηρεί παραμέτρους ελέγχου κυκλοφορίας και ελέγχου πολιτικής που είναι αδιαφανείς στο RSVP.
- Παρέχει αρκετά μοντέλα δέσμευσης πόρων ή «στυλ» (style) για να υποστηρίξει ποικιλία εφαρμογών.
- Παρέχει διαφανή λειτουργία διαμέσου δρομολογητών που δεν το υποστηρίζουν.
- Λειτουργεί τόσο σε IPv4 όσο και σε IPv6 δίκτυα.

3.4.1 Ροές δεδομένων

Το RSVP χρησιμοποιεί τον όρο συνεδρία (session) για να ορίσει μια ροή δεδομένων με ένα συγκεκριμένο προορισμό. Οι συνεδρίες είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και το πρωτόκολλο τις μεταχειρίζεται ξεχωριστά.

Μια συνεδρία RSVP ορίζεται από την τριάδα <DestAddress, ProtocolID, DestPort>. Η αντιστοιχία των πεδίων είναι η εξής: DestAddress είναι η IP διεύθυνση προορισμού των πακέτων

δεδομένων (unicast ή multicast). Το πεδίο ProtocolID αντιστοιχεί στην ταυτότητα του πρωτοκόλλου επιπέδου μεταφοράς, ενώ το πεδίο DestPort είναι η παράμετρος επιλογής που αντιστοιχεί στη γενικευμένη θύρα (port) προορισμού, δηλαδή κάποιο περαιτέρω σημείο αποπολυπλεξίας στο επίπεδο μεταφοράς ή εφαρμογής. Το DestPort μπορεί να οριστεί από το πεδίο θύρας (port) προορισμού UDP/TCP, από ένα ισοδύναμο πεδίο σε ένα άλλο επίπεδο μεταφοράς ή από κάποια πληροφορία από την εφαρμογή.

Η ροή στο RSVP ορίζεται από την πεντάδα που περιλαμβάνει την τριάδα που ορίζει τη συνεδρία και το ζεύγος <SrcAddress, SrcPort>, δηλαδή την αντίστοιχη πηγαία διεύθυνση και πηγαία θύρα.

3.4.2 Μοντέλο Δέσμευσης

Μια στοιχειώδης αίτηση δέσμευσης στο RSVP αποτελείται από μία προδιαγραφή ροής flow-spec (flow specification) μαζί με μία προδιαγραφή φίλτρου filter spec (filter specification). Η προδιαγραφή ροής flowspec καθορίζει την επιθυμητή ποιότητα υπηρεσίας. Η προδιαγραφή φίλτρου filter spec μαζί με την προδιαγραφή συνεδρίας (session) καθορίζουν το σύνολο των πακέτων δεδομένων—τη ροή—που θα λάβει την ποιότητα υπηρεσίας που καθορίστηκε με την προδιαγραφή ροής.

Το flowspec χρησιμοποιείται για να τίθενται οι παράμετροι στο χρονοδρομολογητή πακέτων του κόμβου ή τους άλλους μηχανισμούς του επιπέδου ζεύξης. Περιέχει μια κλάση ποιότητας υπηρεσίας και δύο σύνολα αριθμητικών παραμέτρων:

- (α) Μία προδιαγραφή δέσμευσης Rspec (Reserve Specification) που καθορίζει τις παραμέτρους της επιθυμητής ποιότητας υπηρεσίας και
- (β) Μία προδιαγραφή κίνησης Tspec (Traffic Specification) που περιγράφει τη ροή δεδομένων. Η δομή και τα περιεχόμενα των Tspec και Rspec καθορίζονται στο [148] και είναι γενικά αδιαφανή στο RSVP.

Το filter spec χρησιμοποιείται για να τίθενται οι παράμετροι στην κατηγοριοποίηση πακέτων. Περιέχει την IP διεύθυνση πηγής και την θύρα (port) αποστολής της ροής δεδομένων ή εναλλακτικά την ετικέτα ροής (flow label) σε δίκτυα IPv6. Τα πακέτα δεδομένων που κατευθύνονται προς κάποια συγκεκριμένη συνεδρία, αλλά δεν ταιριάζουν σε κανένα από τα filter specs για τη συνεδρία αυτή, υφίστανται μεταχείριση καλύτερης προσπάθειας.

Σε κάθε ενδιάμεσο δρομολογητή, μια αίτηση δέσμευσης προκαλεί δύο γενικές ενέργειες ως εξής:

1. Δέσμευση σε μία ζεύξη. Η διεργασία RSVP μεταβιβάζει την αίτηση στον έλεγχο αποδοχής και τον έλεγχο πολιτικής. Αν ένας από τους δύο ελέγχους αποτύχουν, η αίτηση απορρίπτεται και η διεργασία RSVP επιστρέφει ένα μήνυμα λάθους στον αποστολέα της αίτησης. Αν επιτύχουν και οι δύο, ο κόμβος ρυθμίζει την κατηγοριοποίηση πακέτων να επιλέγει τα πακέτα δεδομένων που ορίζονται από το filter spec και επικοινωνεί με το κατάλληλο επίπεδο ζεύξης για να επιτευχθεί η επιθυμητή ποιότητα υπηρεσίας που ορίζεται στο flowspec.

Οι λεπτομερείς κανόνες για την ικανοποίηση μιας αίτησης δέσμευσης RSVP εξαρτώνται από την συγκεκριμένη τεχνολογία επιπέδου ζεύξης που χρησιμοποιείται σε κάθε σύνδεση. Έχουν αναπτυχθεί προδιαγραφές για αρκετά επίπεδα ζεύξης, όπως π.χ. ATM [27], δίκτυα χαμηλών ταχυτήτων [15], αλλά και τύπου IEEE 802 όπως ethernet και token ring [37]. Η επιθυμητή ποιότητα υπηρεσίας υλοποιείται από τον χρονοδρομολογητή πακέτων, ο οποίος είναι υλοποιημένος στον οδηγό του επιπέδου ζεύξης. Αν η τεχνολογία του επιπέδου ζεύξης υλοποιεί τις δικές της ικανότητες διαχείρισης ποιότητας υπηρεσίας (π.χ. ATM), το RSVP πρέπει να διαπραγματευθεί με το επίπεδο ζεύξης για να επιτύχει την επιθυμητή ποιότητα υπηρεσίας.

2. Προώθηση της αίτησης προς την πηγή της ροής που επιθυμεί ποιότητα υπηρεσίας. Η αίτηση δέσμευσης προωθείται προς όλες τις κατάλληλες πηγές ροών που αντιστοιχούν στην προδιαγραφή ροής flowspec. Το σύνολο των κόμβων-πηγών της ροής στο οποίο προωθείται μια δεδομένη αίτηση δέσμευσης λέγεται ο «σκοπός» (scope) της αίτησης.

Η αίτηση δέσμευσης που ένας κόμβος προωθεί προς την πηγή μπορεί να διαφέρει από την αίτηση που έχει δεχτεί για δύο λόγους. Ο μηχανισμός ελέγχου κυκλοφορίας μπορεί να μεταβάλει την αίτηση κόμβο-προς-κόμβο. Ακόμη, οι δεσμεύσεις από διαφορετικά κλαδιά ενός multicast δένδρου από την ίδια πηγή πρέπει να συγχωνευθούν καθώς οι αιτήσεις προωθούνται προς τα πάνω (uplink).

3.4.3 Ανταλλαγή Μηνυμάτων

Το μοντέλο του RSVP για κάθε κόμβο δρομολογητή ακολουθεί το μοντέλο του δρομολογητή ολοκληρωμένων υπηρεσιών. Κάθε ροή δεδομένων φθάνει από το «προηγούμενο βήμα» (previous hop), δηλαδή από τον προηγούμενο κόμβο μέσω μίας ή περισσότερων αντίστοιχων εισερχόμενων διεπαφών και απομακρύνεται μέσω μίας ή περισσότερων εξερχόμενων διεπαφών. Η ίδια διεπαφή μπορεί να είναι έχει το ρόλο εισερχόμενης και εξερχόμενης για διαφορετικές ροές δεδομένων. Περισσότερα προηγούμενα ή/και επόμενα βήματα μπορεί να είναι προσβάσιμα μέσω μιας δεδομένης φυσικής διεπαφής. Για παράδειγμα ένα broadcast LAN μπορεί να διασυνδέει πολλαπλούς

κόμβους με μία φυσική διεπαφή ενός δρομολογητή.

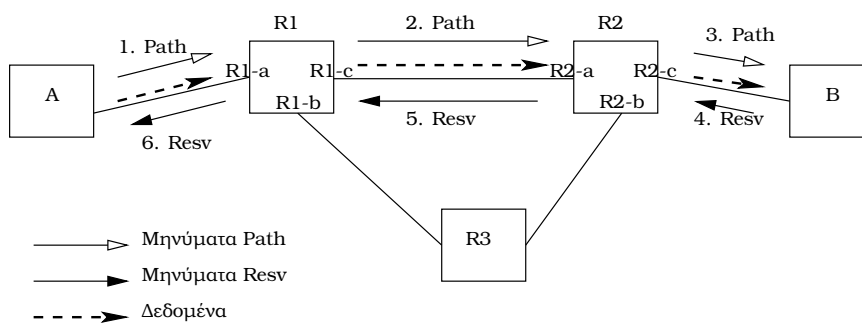
Τα θεμελιώδη μηνυμάτα στο RSVP είναι τα Path για τη «χάραξη» της διαδρομής και Resv για τη δέσμευση (reserve) πόρων κατά μήκος αυτής της διαδρομής. Συγκεκριμένα :

1. Κάθε πηγή ροής στέλνει μηνύματα αιτήσεων καταγραφής διαδρομής και χαρακτηριστικών ροής δεδομένων Path προς τους αποδέκτες της ροής κατά μήκος της διαδρομής δρομολόγησης που παρέχεται από το πρωτόκολλο δρομολόγησης. Τα μηνύματα Path εγκαθιστούν «κατάσταση διαδρομής» (path state) σε κάθε κόμβο κατά μήκος της διαδρομής. Η κατάσταση διαδρομής περιέχει την IP διεύθυνση του κόμβου του προηγούμενου βήματος, η οποία χρησιμοποιείται για τη δρομολόγηση των Resv μηνυμάτων κόμβο-προς-κόμβο στην αντίστροφη κατεύθυνση. Το μήνυμα Path περιέχει ακόμη τις εξής πληροφορίες εκτός από τη διεύθυνση του προηγούμενου άλματος :
 - Sender Template (υποχρεωτικά). Περιγράφει την μορφή των πακέτων δεδομένων που θα προέρχονται από την πηγή της ροής. Έχει τη μορφή ενός filter spec και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το διαχωρισμό των πακέτων της συγκεκριμένης ροής από άλλα πακέτα της ίδιας πηγής στην ίδια ζεύξη.
 - Sender Tspec (υποχρεωτικά). Καθορίζει τα χαρακτηριστικά κυκλοφορίας της ροής δεδομένων που θα ξεκινήσει ο αποστολέας. Χρησιμοποιείται από τον έλεγχο κυκλοφορίας για να αποτρέψει την υπερ-δέσμευση και ίσως αποτυχία του ελέγχου αποδοχής.
 - Adspec (προαιρετικά). Περιέχει πληροφορία ενημέρωσης OPWA (One Pass With Advertising) [116], που αντιπροσωπεύει την ποιότητα υπηρεσίας που μπορεί να παρέχει το δίκτυο. Η τελική μορφή του Adspec που καταλήγει στους αποδέκτες της ροής χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ή τη δυναμική προσαρμογή της κατάλληλης αίτησης δέσμευσης Resv. Προωθείται στον τοπικό έλεγχο κυκλοφορίας, από όπου επιστρέφεται ένα ανανεωμένο Adspec. Η ενημερωμένη έκδοση του προωθείται στη συνέχεια μέσα στα μηνύματα Path προς τους δέκτες.
2. Κάθε δέκτης στέλνει μηνύματα αιτήσεων δέσμευσης Resv (δέσμευση, reserve) προς την πηγή της ροής. Τα μηνύματα αυτά ακολουθούν ακριβώς την αντίστροφη διαδρομή από αυτή που χρησιμοποιούν τα πακέτα δεδομένων, χρησιμοποιώντας την κατάσταση διαδρομής που έχουν εγκαταστήσει προηγουμένως τα μηνύματα Path. Δημιουργούν και διατηρούν «κατάσταση δέσμευσης» (reservation state) σε κάθε κόμβο κατά μήκος του μονοπατιού. Τα μηνύματα Resv τελικά παραδίδονται στις πηγές των ροών, με συνέπεια να τίθενται οι κατάλληλες παραμέτροι ελέγχου κυκλοφορίας για το πρώτο βήμα.

Τα μηνύματα Path στέλνονται με τις ίδιες διευθύνσεις πηγής και προορισμού όπως και τα δεδομένα, ώστε να δρομολογούνται σωστά μέσω δικτύων που δεν υποστηρίζουν RSVP. Στην αντίθετη κατεύθυνση, τα μηνύματα Resv στέλνονται βήμα-προς-βήμα και κάθε κόμβος που υποστηρίζει RSVP προωθεί το μήνυμα RSVP στην unicast διεύθυνση του προηγούμενου βήματος.

3.4.4 Παράδειγμα Λειτουργίας

Ένα απλό παράδειγμα της λειτουργίας του RSVP παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4. Έστω μία εφαρμογή στον κόμβο A που δημιουργεί μία ροή πακέτων προς τον κόμβο B. Το πρωτόκολλο δρομολόγησης, το οποίο λειτουργεί στο δίκτυο του σχήματος, δρομολογεί τη ροή μέσω των δρομολογητών R1 και R2.



Σχήμα 3.4: Παράδειγμα λειτουργίας RSVP

Αν η ροή των πακέτων αντιστοιχεί σε εφαρμογή πραγματικού χρόνου η οποία απαιτεί ποιότητα υπηρεσίας, μπορεί η εφαρμογή να ζητήσει από τον πράκτορα RSVP που λειτουργεί στον κόμβο A να θέσει σε λειτουργία την αίτηση δέσμευσης πόρων. Η εφαρμογή παρέχει στον τοπικό πράκτορα RSVP τις ιδιότητες της ροής (απαιτούμενο εύρος ζώνης, μέγιστη καθυστέρηση, διακύμανση καθυστέρησης και ό,τι άλλο είναι σημαντικό), αλλά και τα χαρακτηριστικά αναγνώρισης της ροής (π.χ. IP διεύθυνση και θύρα προορισμού). Οι ιδιότητες της ροής χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση της προδιαγραφής ροής Tspec. Αντίστοιχα τα χαρακτηριστικά αναγνώρισης της ροής χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία της προδιαγραφής συνεδρίας (session) και του Sender Template.

Έχοντας σχηματίσει το αρχικό Path μήνυμα με διεύθυνση προορισμού την IP διεύθυνση του B ο πράκτορας RSVP στον κόμβο A συμβουλευέται τον πίνακα δρομολόγησης και το προωθεί στην κατάλληλη διεπαφή (στην προκειμένη περίπτωση προς τον δρομολογητή R1). Ο R1 λαμβάνει το μήνυμα Path από τη διεπαφή R1-a. Αναγνωρίζοντας ότι πρόκειται για μήνυμα RSVP, το προωθεί στον τοπικό του πράκτορα RSVP. Αυτός εγκαθιστά την κατάσταση διαδρομής που περιλαμβάνει τη διεύθυνση του προηγούμενου βήματος (IP διεύθυνση A) και τα υπόλοιπα πεδία της κατάστασης

διαδρομής (Sender Template, Sender Tspec, κ.α.). Με βάση το πρωτόκολλο δρομολόγησης, βρίσκει ότι για να προωθηθεί το μήνυμα στον B πρέπει να δρομολογηθεί στη διεπαφή R1-c, όπου και το προωθεί. Ο δρομολογητής R2 στη συνέχεια παραλαμβάνει το μήνυμα, το επεξεργάζεται με τη σειρά του εγκαθιστώντας κατάσταση διαδρομής με τα χαρακτηριστικά της ροής και του προηγούμενου βήματος (IP διεύθυνση της διεπαφής R1-c του R1), και το προωθεί τελικά στον B.

Ο B παραλαμβάνει το μήνυμα Path, το προωθεί στον τοπικό πράκτορα RSVP, που δημιουργεί την κατάλληλη τοπική κατάσταση διαδρομής και από εκεί στην αντίστοιχη εφαρμογή που απαντά αν επιθυμεί ή όχι να λάβει ποιότητα υπηρεσίας για τη ροή από τον κόμβο A. Αν η απάντηση της εφαρμογής είναι θετική, κατασκευάζεται το μήνυμα Resv που περιέχει την προδιαγραφή συνεδρίας, τη διεύθυνση του προηγούμενου βήματος, δεδομένα σχετιζόμενα με την πολιτική που ακολουθείται στον έλεγχο αποδοχής, αλλά και τη μορφή ποιότητας υπηρεσίας που ζητείται. Το μήνυμα αυτό τοποθετείται σε ένα IP πακέτο που έχει διεύθυνση προορισμού τη διεύθυνση της διεπαφής R2-c, και αποστέλλεται στον R2.

Στον δρομολογητή R2 ο πράκτορας RSVP παραλαμβάνει την αίτηση δέσμευσης πόρων Resv και βρίσκει ότι αντιστοιχεί στην κατάσταση διαδρομής που είχε δημιουργήσει με το προηγούμενο μήνυμα Path. Μετά από θετική απάντηση του έλεγχου αποδοχής για τη δυνατότητα υποστήριξης της αιτούμενης ποιότητας υπηρεσίας, αλλά και του έλεγχου πολιτικής για τη δυνατότητα του συγκεκριμένου χρήστη να λάβει την αιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας, δημιουργείται τοπική κατάσταση δέσμευσης πόρων. Η κατάσταση αυτή, εκτός από την πληροφορία που αποθηκεύεται, περιλαμβάνει και την κατάλληλη ρύθμιση της διεπαφής R2-c ώστε να δεσμεύσει τους αιτούμενους πόρους στη ζεύξη με τον B. Στη συνέχεια δημιουργείται άλλο μήνυμα Resv προς τη διεύθυνση R1-c κ.ο.κ μέχρι να φτάσει το τελευταίο μήνυμα Resv στον κόμβο A.

Το δίκτυο όταν έχει ολοκληρώσει αυτή τη σηματοδότηση RSVP μπορεί να εξυπηρετήσει τη ροή δεδομένων που στέλνει ο A με την ποιότητα υπηρεσίας που έχει ζητήσει ο B.

3.4.5 Προσωρινή Κατάσταση (soft state)

Το RSVP προσεγγίζει το πρόβλημα της κατάστασης δέσμευσης σε υπολογιστές και δρομολογητές υιοθετώντας την προσωρινή κατάσταση. Η προσωρινή κατάσταση στο RSVP δημιουργείται και περιοδικά ανανεώνεται από τα μηνύματα Path και Resv. Η κατάσταση διαγράφεται αν δεν καταφτάσουν μηνύματα ανανέωσης πριν τη λήξη ενός χρονικού διαστήματος. Η κατάσταση μπορεί επίσης να διαγραφεί με ρητά μηνύματα διαγραφής (PathTear, ResvTear). Στη λήξη κάθε διαστήματος ανανέωσης και μετά από κάθε αλλαγή κατάστασης, το RSVP ανιχνεύει την κατάσταση του για να στείλει ενημερωμένα Path και Resv μηνύματα σε επόμενους κόμβους.

Αν μεταβληθεί μία διαδρομή, το επόμενο μήνυμα Path θα αρχικοποιήσει την κατάσταση δια-

δρομής στη νέα διαδρομή και τα μελλοντικά μηνύματα Resv θα εγκαταστήσουν την αντίστοιχη κατάσταση δέσμευσης. Η κατάσταση RSVP στην παλαιά διαδρομή θα εκπνεύσει. Επομένως η διάκριση για το αν ένα μήνυμα αφορά νέα κατάσταση ή είναι μήνυμα ανανέωσης καθορίζεται ξεχωριστά σε κάθε κόμβο, ανάλογα με την ύπαρξη ή όχι αντίστοιχης κατάστασης στον κόμβο αυτό.

Το RSVP στέλνει τα μηνύματα του ως IP πακέτα χωρίς πρόβλεψη επιπλέον ευρωστίας. Η περιοδική μετάδοση των μηνυμάτων ανανέωσης από τους συμμετέχοντες κόμβους καλύπτει την περιστασιακή απώλεια κάποιου μηνύματος RSVP. Αν η χρονική διάρκεια εκπνοής κατάστασης τεθεί K φορές το διάστημα περιοδικής αποστολής μηνύματος ανανέωσης, τότε το RSVP ανέχεται $K-1$ διαδοχικές απώλειες RSVP πακέτων πριν διαγράψει εσφαλμένα τη συγκεκριμένη κατάσταση. Στην αρχική προδιαγραφή του RSVP [18] προτείνεται διάστημα ανανέωσης $R=30$ δευτερολέπτων και διάστημα εκπνοής κατάστασης και $K=3$ για συνολικό χρονικό διάστημα εκπνοής κατάστασης 90 δευτερόλεπτα. Για λόγους αποφυγής συγχρονισμού μεταξύ διαφορετικών περιοδικών αποστολών μηνυμάτων [34], το διάστημα μεταξύ των διαδοχικών μηνυμάτων ανανέωσης θα πρέπει να είναι ένας τυχαίος αριθμός μεταξύ των ορίων $0.5R$ και $1.5R$, όπου R το προτεινόμενο διάστημα περιοδικής ανανέωσης των 30 δευτερολέπτων. Στο [9] προτείνεται η προσθήκη μηχανισμού επιβεβαίωσης λήψης για τα μηνύματα του RSVP και μεθόδων επιτάχυνσης της εκπνοής της κατάστασης σε περίπτωση πραγματικού προβλήματος.

3.4.6 Αποτίμηση RSVP

Η αρχική προσμονή από το RSVP είχε τη μορφή πανάκειας για όλα τα προβλήματα παροχής υπηρεσίας. Όπως συχνά συμβαίνει με τις υπερβολικά τονισμένες τεχνολογίες, το RSVP και η αρχιτεκτονική IntServ δεν κατάφεραν να πραγματοποιήσουν την αναμενόμενη επανάσταση της ποιότητας υπηρεσίας. Μερικοί από τους λόγους που ευθύνονται για την αποτυχία αυτή είναι οι εξής:

- Ο σχεδιασμός του RSVP προβλέπει την έναρξη και τον τερματισμό της σηματοδοσίας στους τελικούς κόμβους, αλλά αρχικά υπήρχαν μόνο πειραματικές εκδόσεις του λογισμικού και μόνο για UNIX κόμβους. Η κατάσταση βέβαια σήμερα είναι εντελώς διαφορετική, αλλά ο χρονισμός διαθεσιμότητας των υλοποιήσεων ήταν κακός.
- Υπήρχε η αντίληψη ότι το RSVP και η αρχιτεκτονική IntServ έπρεπε να υλοποιηθούν σε κάθε δικτυακή διάταξη και σε κάθε τελικό κόμβο. Επιπλέον η λειτουργία τους θεωρήθηκε μη επεκτάσιμη, λόγω της εγκατάστασης, επεξεργασίας και διατήρησης κατάστασης για κάθε ροή που ζητούσε ποιότητα υπηρεσίας.

- Δεν είχαν αναπτυχθεί μηχανισμοί εφαρμογής πολιτικής ώστε να επιλέγονται με ασφάλεια οι ροές που είχαν δικαίωμα να αιτηθούν πρόσβαση προτεραιότητας στο δίκτυο.
- Είχε δοθεί έμφαση στην προστασία εφαρμογών πολυμέσων και όχι σε κρίσιμες μη-πολυμεσικές εφαρμογές, οι οποίες θεωρούνται πολύ σημαντικότερες από τους διαχειριστές των δικτύων.

Η ακούσια συμβολή της ομάδας προδιαγραφής του RSVP στην απαξίωση του είχε τη μορφή του RFC 2208 “RSVP Applicability Statement, Some Guidelines on Deployment” [74], το οποίο προειδοποιούσε για τους κινδύνους στη χρήση του RSVP και αποθάρρυνε πολλούς κατασκευαστές δικτυακών διατάξεων, αλλά και άλλους υποψήφιους χρήστες του.

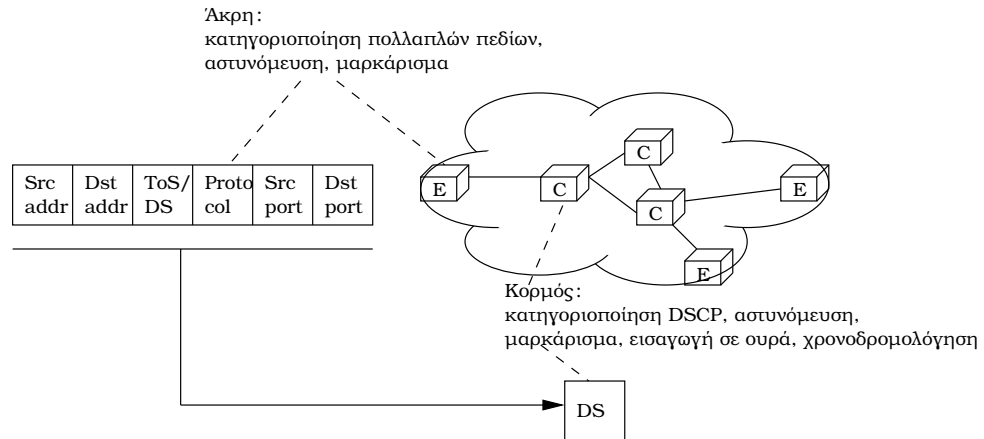
Η κατάσταση στην οποία είχε περιέλθει η δημοτικότητα του RSVP ήταν απογοητευτική. Στη συνέχεια όμως, και με υπόβαθρο την ερευνητική και μηχανική εργασία που είχε επενδυθεί στην προδιαγραφή του, αναδείχθηκαν οι ισχυρές βάσεις του και οι νέες χρήσεις του :

- Αναπτύχθηκαν μοντέλα παροχής ποιότητας υπηρεσίας στα οποία δεν είναι απαραίτητη η επεξεργασία της σηματοδοσίας ανά ροή σε κάθε ενδιαμέσο δρομολογητή, αλλά μόνο σε επιλεγμένους.
- Αναπτύχθηκαν και ωρίμασαν τα πρωτόκολλα και οι μηχανισμοί ελέγχου πολιτικής (policy control).
- Η σηματοδοσία RSVP εφαρμόζεται σε μη-πολυμεσικές εφαρμογές (π.χ. ρύθμιση firewalls).

Συμπερασματικά, το RSVP προσαρμόστηκε στις υπάρχουσες αντίξοες συνθήκες και εξελικτικά θέτει τις βάσεις για το πρότυπο πρωτόκολλο σηματοδοσίας στο Internet. Η ομάδα εργασίας NSIS (Next Steps In Signaling) [84] της IETF χρησιμοποιεί το RSVP ως βάση για το πρότυπο πρωτόκολλο σηματοδοσίας που προδιαγράφει, και που προορίζεται να χρησιμοποιηθεί για κάθε ανάγκη σηματοδοσίας.

3.5 Αρχιτεκτονική Διαφοροποιημένων Υπηρεσιών

Η αρχιτεκτονική διαφοροποιημένων υπηρεσιών (Differentiated Services, DiffServ) [14] προέκυψε ως αντίβαρο στη σχετική πολυπλοκότητα της αρχιτεκτονικής ολοκληρωμένων υπηρεσιών. Το αρχικό επιχείρημα υποστήριξης της αρχιτεκτονικής DiffServ ήταν ότι το Internet χρειαζόταν εξελικτικές βελτιώσεις στο μοντέλο καλύτερης προσπάθειας και ότι η αρχιτεκτονική IntServ επιχειρούσε να πραγματοποιήσει υπερβολικά πολλά μονομιάς. Η βασική θεώρηση ήταν ότι μία υπηρεσία λίγο καλύτερη της υπηρεσίας καλύτερης προσπάθειας είναι αρκετή.



Σχήμα 3.5: Λειτουργία αρχιτεκτονικής DiffServ

Η απλοποίηση αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.5 . Οι πολύπλοκες διαδικασίες λήψης αποφάσεων (π.χ. κατηγοριοποίηση με χρήση πολλαπλών πεδίων) και ελέγχου κίνησης υλοποιούνται μόνο στους συνοριακούς κόμβους των δικτύων. Στους εσωτερικούς δρομολογητές κορμού υλοποιούνται απλές υπηρεσίες από-σύνορο-σε-σύνορο (edge-to-edge) στηριζόμενες σε ένα περιορισμένο σύνολο συμπεριφορών ανά βήμα (per-hop-behavior). Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν χρησιμοποιείται σηματοδοσία, και ότι οι ρυθμίσεις στους δρομολογητές δεν πραγματοποιούνται με δυναμικό τρόπο.

Οι ροές που διασχίζουν το δίκτυο ομαδοποιούνται σε κλάσεις με ομοειδή χαρακτηριστικά. Η ταξινόμηση σε κλάσεις και η κατηγοριοποίηση των πακέτων πραγματοποιείται με τη χρήση του DSCP, ενός πεδίου στην IP επικεφαλίδα μεγέθους 6 bits. Με βάση το DSCP κάθε πακέτου, αναγνωρίζεται από το δίκτυο η κλάση που ανήκει το πακέτο και επιβάλλεται η κατάλληλη συμπεριφορά.

Το ουσιώδες πλεονέκτημα της αρχιτεκτονικής DiffServ είναι η επεκτασιμότητα της. Η εγγενής επεκτασιμότητα στην αρχιτεκτονική DiffServ οφείλεται στη χρήση των μηχανισμών ελέγχου κίνησης για ομαδοποιημένη κίνηση (aggregate traffic) αντί για κάθε ροή ξεχωριστά. Η αρχιτεκτονική DiffServ, εστιασμένη στα θέματα των παρόχων δικτύων κορμού (backbone), παρέχει τα εξής σημαντικά πλεονεκτήματα :

- Ταχύτεροι δρομολογητές κορμού. Περιορίζεται η πολυπλοκότητα τους στα στάδια κατηγοριοποίησης και εισαγωγής πακέτων σε ουρές, λόγω περιορισμένων σε αριθμό κλάσεων υπηρεσιών που υποστηρίζονται για τις ομαδοποιημένες ροές.
- Λιγότερη κατάσταση ποιότητας υπηρεσίας. Η σηματοδοσία, επεξεργασία και αποθήκευση της κατάστασης ελαχιστοποιείται, αφού τα χαρακτηριστικά ποιότητας υπηρεσίας σε ένα δίκτυο κορμού προσδιορίζονται με βάση γενικές συμπεριφορές.

Το μειονέκτημα της αρχιτεκτονικής DiffServ είναι ότι η ποιότητα υπηρεσίας που λαμβάνει κάθε ροή εξαρτάται από τη συμπεριφορά όλων των άλλων ροών με τις οποίες μοιράζεται την κλάση ομαδοποιημένης κίνησης.

Αναλυτικότερα, η λειτουργία της αρχιτεκτονικής DiffServ περιγράφεται ως εξής: Οι δρομολογητές κορμού στο εσωτερικό ενός DiffServ δικτύου καθορίζουν την προτεραιότητα κάθε πακέτου, και επομένως τη συμπεριφορά τους έναντι του πακέτου, βασιζόμενοι μόνο στο πεδίο DSCP (Diff-Serv Code Point) [85]. Το DSCP μεταφέρεται στην IP επικεφαλίδα και καταλαμβάνει τμήμα του πεδίου DiffServ (το παλιό Type of Service (ToS) byte). Στα σύνορα του DiffServ δικτύου πραγματοποιείται κατηγοριοποίηση με χρήση πολλαπλών πεδίων (multifield classification) και μαρκάρισμα των πακέτων στα αντίστοιχα DSCPs, ώστε η μεγάλη ποικιλία των ζητούμενων υπηρεσιών να αντιστοιχηθεί σε ένα μικρό υποσύνολο συμπεριφορών που παρέχεται από το δίκτυο κορμού. Οι δρομολογητές συνόρου μπορεί επίσης να πραγματοποιούν αστυνόμευση των ροών (policing) ή και διαμόρφωση των χαρακτηριστικών των ροών (shaping).

Η προτυποποίηση της αρχιτεκτονικής διαφοροποιημένων υπηρεσιών εστιάστηκε σε συγκεκριμένες συμπεριφορές δρομολογητή (Per Hop Behavior, PHB). Οι συμπεριφορές PHB θεωρούνται δομικά συστατικά για τη προσφορά ποιότητας υπηρεσίας μέσα σε ένα δίκτυο διαφοροποιημένων υπηρεσιών. Έχουν ήδη προδιαγραφεί δύο PHB, η Επισπευσμένη Προώθηση (Expedited Forwarding) [54] και η Εξασφαλισμένη Προώθηση (Assured Forwarding) [43], που δημιουργούν τις προϋποθέσεις για την παροχή αντίστοιχων υπηρεσιών. Έχει ακόμη οριστεί και ένα σύνολο PHB που προσομοιώνει στον παλιό ορισμό του ToS byte στην IP επικεφαλίδα [85].

Στο μοντέλο της αρχιτεκτονικής DiffServ, το δίκτυο DiffServ είναι δυνατό να ρυθμιστεί ώστε να παρέχει την κατάλληλη υπηρεσία σε κάποιον πελάτη του δικτύου. Η υπηρεσία αυτή απεικονίζεται σε ένα Service Level Agreement (SLA) (Σύμφωνο Επιπέδου Υπηρεσίας). Το SLA ορίζεται στο σημείο όπου ο πελάτης μεταδίδει την κίνηση του σε έναν δρομολογητή εισερχόμενης κίνησης δικτύου DiffServ. Το SLA θα μπορούσε για παράδειγμα να ορίζει ότι ο συγκεκριμένος πελάτης επιτρέπεται να στέλνει δεδομένα με συνολικό ρυθμό 100 Kb/sec που πρόκειται να λάβουν υπηρεσία χαμηλής καθυστέρησης. Η κίνηση που υπερβαίνει το όριο αυτό θα αντιμετωπίσει συμπεριφορά καλύτερης προσπάθειας. Ο διαχειριστής του δικτύου DiffServ θα χρησιμοποιήσει τα ανάλογα εργαλεία ρύθμισης του δικτύου του ώστε να τηρήσει το SLA, μέσω του κατάλληλου συνδυασμού των PHB των στοιχείων του δικτύου.

Η πολεμική που είχε αναπτυχθεί εναντίον της πολυπλοκότητας που εισήγαγε το RSVP προκάλεσε την απόρριψη οποιουδήποτε μέσου δυναμικής ρύθμισης του δικτύου DiffServ μέσω σηματοδότησης. Η προτιμητέα λύση ήταν η στατική ρύθμιση των στοιχείων των δικτύων DiffServ σε μια σχετικά πάνω-προς-κάτω (top-down) προσέγγιση. Με την προσέγγιση αυτή, ένα δίκτυο DiffServ

μπορεί να παρέχει ένα πλήθος χρήσιμων υπηρεσιών, αν και πρόκειται για υπηρεσίες χαμηλότερης ποιότητας, με την έννοια ότι δεν εξασφαλίζουν ποσοτικοποιήσιμες παραμέτρους υπηρεσίας από-άκρη-σε-άκρη. Η συνεισφορά του DiffServ έγκειται στην αναγνώριση ότι πολλές εφαρμογές δεν απαιτούν τις υψηλής ποιότητας εγγυήσεις που απαιτούν οι πολυμεσικές εφαρμογές, και ότι για αυτές τις εφαρμογές, η απλότητα και η επεκτασιμότητα που προσφέρεται είναι πολύ σημαντικότερη από τις απόλυτες εγγυήσεις.

Παρόλα αυτά, οι περιορισμοί που εισάγονται με την στατική ρύθμιση του δικτύου προκαλούν δυσκολίες στην ενημέρωση των κριτηρίων κατηγοριοποίησης των ροών στα σύνορα του δικτύου, αλλά και στην ουσιαστική παροχή εγγυήσεων εκτός αν το δίκτυο διαθέτει περισσότερους πόρους από ότι απαιτούνται (*overprovisioned*). Διάφορες προσεγγίσεις για σηματοδότηση σε δίκτυα DiffServ που προτάθηκαν ερευνητικά με σκοπό τη δυναμική ρύθμιση των DiffServ κόμβων [130, 119] δεν έτυχαν ιδιαίτερης αποδοχής.

3.6 Βελτίωση και Επέκταση Μηχανισμών Ποιότητας Υπηρεσίας

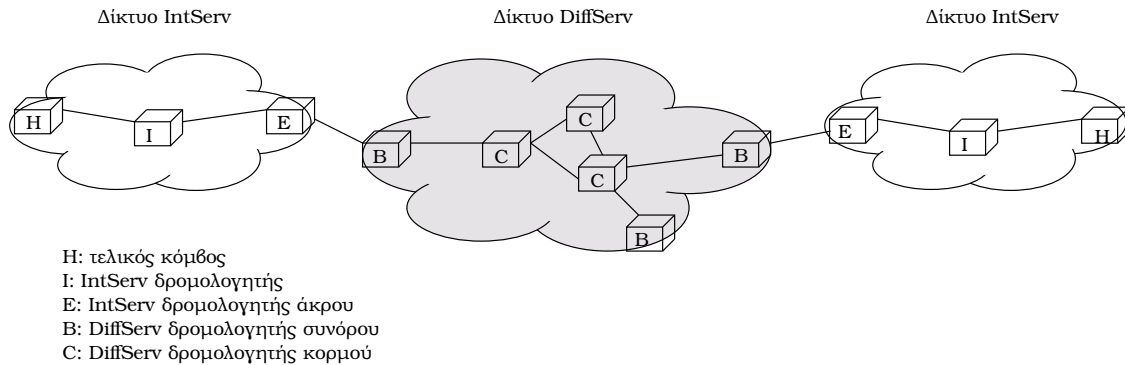
Όπως έχει τονιστεί στις προηγούμενες παραγράφους, οι αρχικές προσπάθειες προδιαγραφής των μηχανισμών παροχής ποιότητας υπηρεσίας πραγματοποίησαν ορισμένα λάθη και παραλείψεις, τόσο τακτικής όσο και τεχνικής φύσης. Οι περισσότερες από τις παραλείψεις αυτές συμπληρώθηκαν, και επιπλέον επεκτάθηκαν οι μηχανισμοί, ώστε να υποστηρίξουν διαλειτουργικότητα μεταξύ τους.

3.6.1 Διαλειτουργικότητα IntServ και DiffServ

Οι αρχιτεκτονικές IntServ και DiffServ, καθώς και το πρωτόκολλο RSVP έχουν συμπληρωματικούς ρόλους στην παροχή ποιότητας υπηρεσίας από-άκρη-σε-άκρη στο Internet [11]. Οι τεχνολογίες αυτές, χρησιμοποιούμενες μαζί, μπορούν να διευκολύνουν την παροχή εφαρμογών όπως τηλεφωνίας πάνω από IP, video on demand, αλλά και μη-πολυμεσικών κρίσιμων εφαρμογών, όπως π.χ. Enterprise Resource Planning (ERP). Η αρχιτεκτονική IntServ επιτρέπει στους κόμβους να αιτούνται ποσοτικοποιημένους πόρους ανά ροή στην από-άκρη-σε-άκρη διαδρομή και να λαμβάνουν ανάδραση (*feedback*) σχετικά με την αποδοχή των αιτήσεων τους. Η αρχιτεκτονική DiffServ επιτρέπει την επεκτασιμότητα σε μεγάλα δίκτυα κορμού.

Η IETF ανέπτυξε ένα πλαίσιο διαλειτουργικότητας IntServ και DiffServ [12], όπου η από-άκρη-σε-άκρη, ποσοτικοποιημένη ποιότητα υπηρεσίας παρέχεται με την εφαρμογή του μοντέλου IntServ από-άκρη-σε-άκρη διαμέσου ενός δικτύου το οποίο περιέχει μία ή περισσότερες περιοχές DiffServ. Τα υποδίκτυα DiffServ μπορούν, αλλά δεν υποχρεούνται, να συμμετέχουν στην από-

άκρη-σε-άκρη ανταλλαγή σηματοδοσίας για βελτιστοποίηση της ανάθεσης πόρων και υποστήριξη του έλεγχου αποδοχής.



Σχήμα 3.6: Διαλειτουργικότητα IntServ και DiffServ

Το μοντέλο του δικτύου που χρησιμοποιείται παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.6. Τα δίκτυα IntServ βρίσκονται στα άκρα, και έχουν άμεση σύνδεση με τον τελικούς κόμβους. Τα δίκτυα DiffServ καταλαμβάνουν τη θέση των δικτύων κορμού, όπου η κλιμακωσιμότητα παίζει σημαντικό ρόλο, και η επαφή τους με τα δίκτυα IntServ υποστηρίζεται από τους κανόνες διαλειτουργικότητας μεταξύ τους. Οι IntServ δρομολογητές βλέπουν τα δίκτυα DiffServ ως ιδεατές ζεύξεις (virtual links) που συνδέουν δρομολογητές ή κόμβους με δυνατότητες IntServ. Η συνολική κίνηση που εισάγεται στο δίκτυο DiffServ και που θα λάβει ποιότητα υπηρεσίας μπορεί να περιοριστεί από λειτουργίες αστυνόμευσης (policing) στο σύνορο του δικτύου. Επομένως, το δίκτυο DiffServ θα μπορεί να υποστηρίξει τις υπηρεσίες ολοκληρωμένων υπηρεσιών ως τμήμα της συνολικής διαδρομής. Με βάση το πλαίσιο διαλειτουργικότητας, ο διαχειριστής του δικτύου μπορεί να επεκτείνει το δίκτυο DiffServ σε όποιο βαθμό επιθυμεί. Στη μία οριακή περίπτωση, το δίκτυο DiffServ υλοποιείται ως τα άκρα του δικτύου, αφήνοντας μόνο τους τελικούς κόμβους με πλήρεις IntServ δυνατότητες. Στην άλλη οριακή περίπτωση, υλοποιείται η αρχιτεκτονική IntServ παντού, εξαλείφοντας τα δίκτυα DiffServ.

Στο παράδειγμα του Σχήματος 3.6, οι τελικοί κόμβοι (H) υποστηρίζουν πλήρως δυνατότητες IntServ, και χρησιμοποιούν το RSVP για τη σηματοδοσία τους. Η λειτουργικότητα των δρομολογητών E που γειτονεύουν με το δίκτυο DiffServ διαφέρει, ανάλογα με τον τρόπο υλοποίησης της διαλειτουργικότητας. Αν το δίκτυο DiffServ δεν αναγνωρίζει τη σηματοδοσία RSVP, οι δρομολογητές E λειτουργούν ως πράκτορες έλεγχου αποδοχής για το δίκτυο DiffServ. Αν το δίκτυο DiffServ αναγνωρίζει σηματοδοσία RSVP, τότε τον έλεγχο αποδοχής για το δίκτυο DiffServ πραγματοποιούν οι συνοριακοί δρομολογητές B του δικτύου DiffServ.

Για πρόσθετη ευελιξία και δυνατότητα παραμετροποίησης της αρχιτεκτονικής IntServ προδια-

γράφηκαν επιπλέον παράμετροι και τύποι υπηρεσιών για το RSVP και την αρχιτεκτονική IntServ αντίστοιχα. Το αντικείμενο DClass για το RSVP [10] χρησιμεύει για να μεταφέρει τα επιθυμητά DSCPs για χρήση στα ενδιάμεσα DiffServ δίκτυα. Ο μηδενικός τύπος υπηρεσίας (Null Service) [13] μπορεί να αντιστοιχηθεί σε συγκεκριμένες εφαρμογές, οι οποίες χρειάζονται κάποιου είδους ποιότητα υπηρεσίας, δεν μπορούν όμως να καθορίσουν με ακρίβεια τις παραμέτρους τους (π.χ. ERP). Στις εφαρμογές αυτές ο διαχειριστής του δικτύου έχει την ευχέρεια να καθορίσει τις παραμέτρους της παρεχόμενης υπηρεσίας, γεγονός που είναι ιδιαίτερα εφαρμόσιμο σε μικτά δίκτυα IntServ-DiffServ.

3.6.2 Ομαδοποίηση Δεσμεύσεων RSVP

Μία ουσιαστική παράλειψη στην προδιαγραφή του RSVP [18] είναι η έλλειψη υποστήριξης για την ομαδοποίηση ανεξάρτητων δεσμευμένων συνεδριών σε μία κοινή κλάση. Η χρήση μιας τέτοιας ομαδοποίησης προτείνεται στο αρχικό όραμα της αρχιτεκτονικής ολοκληρωμένων υπηρεσιών [26] και απαιτείται για επεκτασιμότητα.

Το πρόβλημα της ομαδοποίησης μπορεί να αντιμετωπιστεί με πολλούς τρόπους. Κάποιες φορές η σημείωση/μαρκάρισμα της δεσμευμένης κίνησης με ένα κατάλληλο DSCP είναι αρκετή. Στη γενική περίπτωση όμως, προτιμάται η εγκατάσταση μέσω κατάλληλης σηματοδοσίας μίας ή περισσότερων ομαδικών δεσμεύσεων από την είσοδο ως την έξοδο σε μία περιοχή ομαδοποίησης, όπου κάθε ομαδική δέσμευση μεταφέρει πακέτα με παρόμοια χαρακτηριστικά από ένα μεγάλο αριθμό ροών. Με τον τρόπο αυτό ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των ροών από-άκρη-σε-άκρη και ταυτόχρονα ομαδοποιείται η κατάσταση δέσμευσης. Η προτεινόμενη λύση ομαδοποιεί πολλές δεσμεύσεις από-άκρη-σε-άκρη που διασχίζουν μία περιοχή ομαδοποίησης μέσω των ίδιων δρομολογητών εισόδου και εξόδου σε μία μεγαλύτερη δέσμευση από την είσοδο ως την έξοδο [7].

Η ομαδοποίηση των δεσμεύσεων εξαρτάται από την ικανότητα της περιοχής ομαδοποίησης να αποκρύπτει τα από-άκρη-σε-άκρη RSVP μηνύματα από τους RSVP δρομολογητές στο εσωτερικό της. Για να επιτευχθεί αυτό, οι δρομολογητές εισόδου στην περιοχή ομαδοποίησης αλλάζουν τον αριθμό πρωτοκόλλου στα από-άκρη-σε-άκρη μηνύματα RSVP από RSVP (46) σε RSVP-E2E-IGNORE (134). Την αλλαγή αυτή επαναφέρουν οι δρομολογητές εξόδου. Τα μηνύματα αυτά αγνοούνται από τους εσωτερικούς δρομολογητές της περιοχής ομαδοποίησης και προωθούνται ως απλά IP πακέτα.

Οι RSVP δρομολογητές της περιοχής ομαδοποίησης συμμετέχουν σε μία εσωτερική RSVP σηματοδοσία για την εγκατάσταση ομαδοποιημένων δεσμεύσεων. Οι απαιτήσεις σε πόρους των από-άκρη-σε-άκρη ροών προστίθενται και μεταδίδονται στο εσωτερικό της περιοχής ομαδοποίησης μέσω των ομαδοποιημένων μηνυμάτων Path και Resv, και δημιουργούν μία ομαδική κατάσταση

για όλες τις συνιστώσες δεσμεύσεις στους εσωτερικούς δρομολογητές της περιοχής. Η μείωση αυτή του αριθμού καταστάσεων επιφέρει σημαντικά οφέλη, τόσο στην απαιτούμενη υπολογιστική ισχύ, όσο και στον αριθμό των μηνυμάτων σηματοδότησης που ανταλλάσσονται στο εσωτερικό της περιοχής ομαδοποίησης, η οποία βρίσκεται συνήθως σε κεντρικά δίκτυα κορμού.

3.7 Αποτίμηση Παροχής Ποιότητας Υπηρεσίας στο Internet

Η παροχή και υποστήριξη Ποιότητας Υπηρεσίας ήταν και είναι στόχος μεγάλης ερευνητικής προσπάθειας από τη δεκαετία του 1990. Σημειώθηκε αξιόλογη πρόοδος στη θεωρία, αρχιτεκτονική και σχεδιασμό πρωτοκόλλων σε δίκτυα μεταγωγής πακέτων. Αναπτύχθηκαν αλγόριθμοι χρονοδρομολόγησης για την υποστήριξη διαφοροποιημένων και δίκαιων υπηρεσιών μεταξύ ροών και ομάδων ροών, αλγόριθμοι ελέγχου αποδοχής για την ικανοποίηση των απαιτήσεων της κίνησης, μηχανισμοί ποιότητας υπηρεσίας σε διάφορα στάδια του δικτύου (MAC, δρομολόγηση, web).

Ωστόσο η χρήση των μηχανισμών εγγύησης ποιότητας δεν υποστηρίζεται από πολυπληθείς ομάδες χρηστών ή δικτύων. Οι εξελίξεις στις οπτικές επικοινωνίες προσέφεραν ζεύξεις, όπου το εύρος ζώνης δεν είναι το σημείο συμφόρησης. Όπως και με την υποστήριξη κινητικότητας, το ζητούμενο δεν είναι πλέον το αν είναι εφικτή η υποστήριξη της ποιότητας υπηρεσίας, αλλά το κατάλληλο επιχειρηματικό μοντέλο παροχής της, ώστε να έχει νόημα. Τα συμπεράσματα του NSF Workshop on Fundamental Research on Networking του 2003 [86] καταλήγουν στο ότι τα θέματα παροχής ποιότητας υπηρεσίας σε ένα δίκτυο είναι πλέον κατανοητά και τεχνολογικά εφικτά, αλλά και ότι πολλές από τις επιμέρους τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια αυτής της έρευνας έχουν βρει εφαρμογή σε καθημερινές εφαρμογές.

Ακόμη και αν το εύρος ζώνης καταστεί σχεδόν δωρεάν για κάποιες συγκεκριμένες ζεύξεις, αυτό δεν πρόκειται να συμβεί για όλες τις συνδέσεις σε οποιαδήποτε από-άκρη-σε-άκρη επικοινωνία. Οι εξελίξεις της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια δείχνουν ότι το κόστος παροχής ευρυζωνικών υπηρεσιών στα δίκτυα πρόσβασης συνεχίζει να παραμένει υψηλό (σχετικά πάντα με το αντίστοιχο κόστος σε ζεύξεις κορμού). Για παράδειγμα το εύρος ζώνης στα ασύρματα δίκτυα, αν και έχει γνωρίσει σημαντική αύξηση με την είσοδο των WLANs είναι μία με δύο τάξεις μεγέθους χαμηλότερο από αντίστοιχες ενσύρματες τεχνολογίες.

Πιθανότατα, τα μοντέλα ελέγχου αποδοχής και διαφοροποίησης των ροών των IP πακέτων θα βρουν έδαφος ανάπτυξης σε δίκτυα, όπου το εύρος ζώνης θα συνεχίσει να είναι πολύτιμος πόρος. Η ύπαρξη διαλειτουργικότητας με δίκτυα κορμού, όπου αυτή είναι αναγκαία, θα εξασφαλίζει την απαραίτητη από-άκρη-σε-άκρη ποιότητα επικοινωνίας, ακόμη για τις απαιτητικότερες εφαρμογές στα δυσκολότερα περιβάλλοντα. Για την ευέλικτη υποστήριξη διαφορετικών ειδών υπηρεσιών είναι

αναγκαία η παρουσία πλαισίου σηματοδότησης με κλιμακώσιμη διακριτική ικανότητα, ικανού να μεταφέρει απαιτήσεις τόσο από μεμονωμένες ροές όσο και από γενικές κλάσεις κίνησης.

Σε αυτή την κατεύθυνση η περαιτέρω έρευνα για τη βελτιστοποίηση των υποδομών, αλλά και των επιμέρους εφαρμογών, θα προσφέρει την αναγκαία ώθηση για τη ζητούμενη πανταχόθεν διαθέσιμη δικτυακή υποδομή (pervasive, ubiquitous computing).

Κεφάλαιο 4

Κινητικότητα και Ποιότητα Υπηρεσίας

Στα Κεφάλαια 2 και 3 αναφέρθηκαν διεξοδικά οι ερευνητικές προσπάθειες που έχουν πραγματοποιηθεί για την αποτελεσματική υποστήριξη κινητικότητας και εγγυημένης ποιότητας υπηρεσίας σε δίκτυα μεταγωγής πακέτων. Ο κύριος όγκος της ερευνητικής εργασίας στις δύο θεματικές περιοχές ήταν εστιασμένος στο συγκεκριμένο πρόβλημα είτε της κινητικότητας είτε της ποιότητας υπηρεσίας, με συνέπεια τη δημιουργία ασυμβατότητας μεταξύ των προσεγγίσεων. Το θέμα της παράλληλης υποστήριξης της σηματοδοσίας κινητικότητας και ποιότητας υπηρεσίας προέκυψε όταν οι αρχικές ερευνητικές προσεγγίσεις είχαν φτάσει στο στάδιο της δημιουργίας προδιαγραφών. Η συνέπεια της εξέλιξης αυτής είναι ότι ακόμη και σήμερα δεν υπάρχει τεχνολογικά αποδεκτή λύση για την ταυτόχρονη υποστήριξη της σηματοδοσίας ποιότητας υπηρεσίας και κινητικότητας στην κοινότητα του Internet.

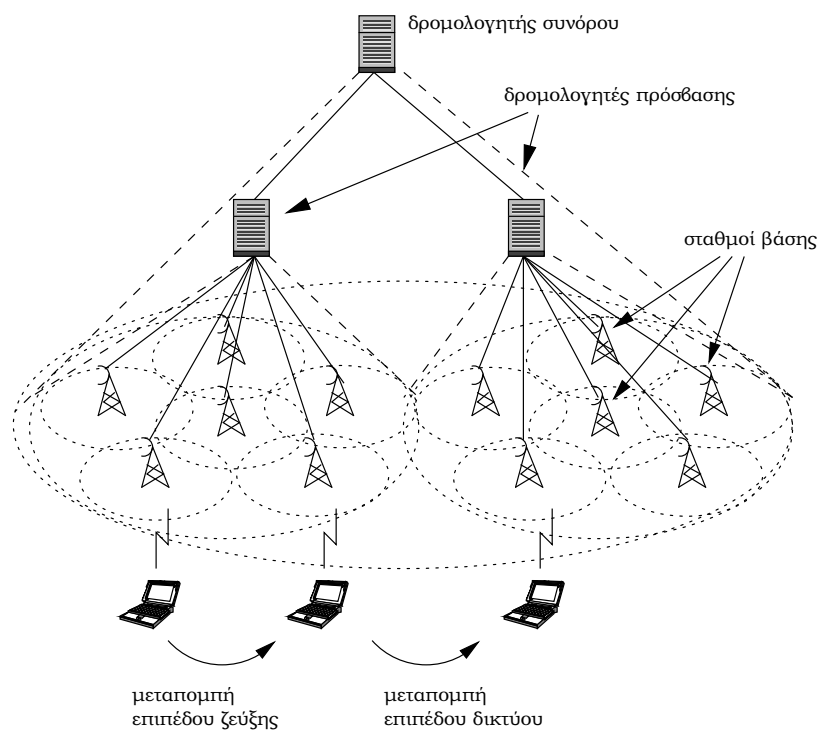
Στην ενότητα αυτή περιγράφεται αρχικά η αλληλεπίδραση των μηχανισμών υποστήριξης κινητικότητας και ποιότητας υπηρεσίας. Συγκεκριμένα αναλύονται τα προβλήματα που προκύπτουν στη λειτουργία του RSVP από τη χρησιμοποιούμενη ενθυλάκωση στο Mobile IP και οι τρόποι αντιμετώπισης τους. Περιγράφεται η συνδυασμένη λειτουργία RSVP και Mobile IP, τόσο για την αρχική εγκατάσταση σύνδεσης, όσο και για μεταφορά της σύνδεσης σε νέα θέση λόγω κινητικότητας. Αναλύονται τα προβλήματα που εμφανίζονται λόγω ασυμβατότητας των μηχανισμών. Στη συνέχεια παρατίθεται η πρότερη ερευνητική εργασία σχετική με το θέμα της ομαλής διαλειτουργικότητας κινητικότητας και ποιότητας υπηρεσίας. Περιγράφονται οι προτάσεις, τα προβλήματα και οι προοπτικές στο θέμα του διαχωρισμού της ταυτότητας των ροών από τα φυσικά χαρακτηρισικά τους. Παρατίθενται μηχανισμοί εφαρμογής προτεραιότητας για τις ήδη υπάρχουσες συνδέσεις που υφίστανται μεταπομπή έναντι των αιτήσεων για νέες συνδέσεις μέσω προδραστικών δεσμεύσεων. Στη συνέχεια περιγράφονται συνοπτικά οι υπόλοιπες προτάσεις που περιλαμβάνουν τη μεταφορά κατάστασης περιβάλλοντος σε γειτονικούς δρομολογητές πρόσβασης, την επέκταση της υπάρχου-

σας δέσμευσης στο νέο δρομολογητή πρόσβασης, αλλά και λύσεις διαλειτουργικότητας του RSVP με εναλλακτικές αρχιτεκτονικές διαχείρισης κινητικότητας.

4.1 Αλληλεπίδραση Σηματοδοσίας

Η αποδοτική και ευέλικτη ταυτόχρονη υποστήριξη κινητικότητας και ποιότητας υπηρεσίας σημαίνει ουσιαστικά την ομαλή συνύπαρξη της σηματοδοσίας των δύο υπηρεσιών. Οι μηχανισμοί τόσο της κινητικότητας, όσο και της ποιότητας υπηρεσίας υλοποιούν ένα ευρύτερο φάσμα λειτουργικότητας από τη σηματοδοσία, το οποίο όμως είναι ανεξάρτητο από την ασυμβατότητα που υπάρχει.

Όπως αναλύθηκε και στο Κεφάλαιο 3, η έννοια της ποιότητας υπηρεσίας είναι ένα γενικότερο θέμα που έχει να κάνει με χαρακτηριστικά του φυσικού υποστρώματος, του επιπέδου ζεύξης, του αλγορίθμου χρονοδρομολόγησης, και πολλών άλλων παραγόντων. Αντίστοιχα η κινητικότητα (Κεφάλαιο 2) εξαρτάται από τους μηχανισμούς διαχείρισης θέσης και δρομολόγησης που έχουν υλοποιηθεί στα δίκτυα πρόσβασης.



Σχήμα 4.1: Μεταπομπές επιπέδου ζεύξης και επιπέδου δικτύου

Αναλυτικότερα σε ότι αφορά την κινητικότητα, μπορούν να διακριθούν δύο τύποι μεταπομπών: οι μεταπομπές μεταξύ σταθμών βάσης που συνδέονται/ελέγχονται από τον ίδιο δρομολογητή πρόσβασης και μεταπομπές μεταξύ σταθμών βάσης που συνδέονται σε διαφορετικούς δρομολο-

γητές. Στην πρώτη περίπτωση, οι λειτουργίες της μεταπομπής πραγματοποιούνται αποκλειστικά στο επίπεδο ζεύξης (link layer), όπου η IP διεύθυνση του κινητού παραμένει αμετάβλητη, και δεν πραγματοποιείται ανταλλαγή σηματοδοσίας Mobile IP ή άλλων πρωτοκόλλων κινητικότητας. Αυτό συμβαίνει, διότι κατά κανόνα οι σταθμοί βάσης που παρέχουν την ασύρματη δικτυακή πρόσβαση δεν έχουν πλήρη λειτουργικότητα δρομολογητή και λειτουργούν ως γέφυρες (bridges/hubs) στο δίκτυο πρόσβασης. Η περίπτωση αυτή ονομάζεται και μεταπομπή επιπέδου 2 ή επιπέδου ζεύξης (layer 2/link layer handoff).

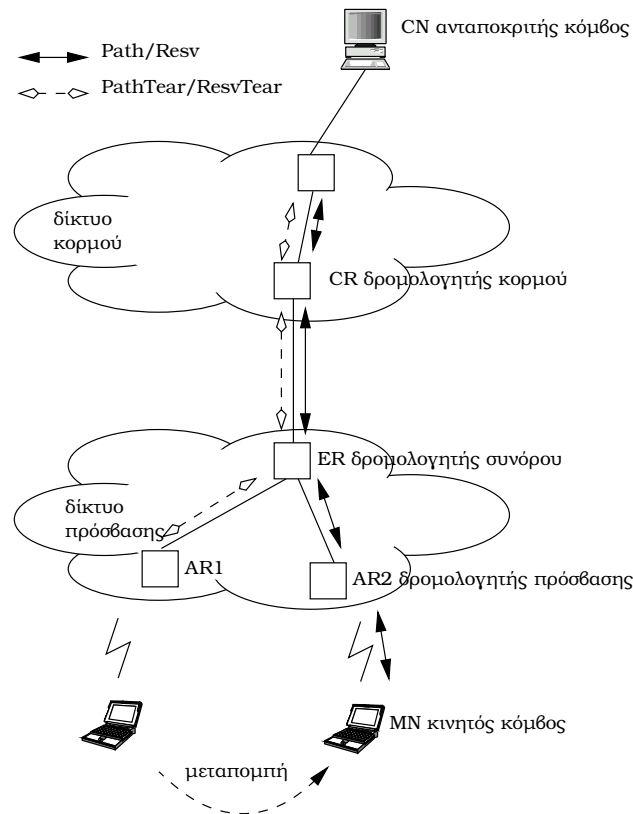
Στην περίπτωση μεταπομπής σε σταθμό βάσης που ελέγχεται από διαφορετικό δρομολογητή πρόσβασης, ανατίθεται στον κινητό κόμβο μία νέα IP διεύθυνση (διεύθυνση μέριμνας) που αντιστοιχεί στην τοπολογικά σωστή θέση του κινητού. Στη συνέχεια ανταλλάσσεται σηματοδοσία με κάποιο πρωτόκολλο διαχείρισης κινητικότητας, ώστε ο κινητός κόμβος να διατηρήσει τη συνδεσιμότητα του στο δίκτυο. Η περίπτωση αυτή, η οποία ονομάζεται μεταπομπή επιπέδου 3 ή επιπέδου δικτύου (layer 3/network layer handoff), αφορά το πεδίο του προβλήματος, το οποίο απασχολεί την ερευνητική κοινότητα για το ζήτημα της ομαλής διαλειτουργικότητας παροχής ποιότητας υπηρεσίας και κινητικότητας. Μία απλή τοπολογία ενός αντίστοιχου δικτύου πρόσβασης, και παραδείγματα μεταπομπών επιπέδου ζεύξης και επιπέδου δικτύου παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1.

Αντίστοιχα για την υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το πρωτόκολλο που έχει υλοποιηθεί στα πλαίσια της αρχιτεκτονικής ολοκληρωμένων υπηρεσιών RSVP [18]. Το RSVP έχει ειδικότερη εφαρμογή στα άκρα του Internet, δηλαδή σε δίκτυα πρόσβασης, όπου απαιτείται λεπτομερέστερος διαχωρισμός ροών,

Στο Σχήμα 4.2, διαγράφεται μία ολοκληρωμένη εικόνα των οντοτήτων της επικοινωνίας από-άκρη-σε-άκρη. Ένας κινητός κόμβος MN (mobile node) επικοινωνεί με έναν ανταποκριτή κόμβο CN (correspondent node). Ο κινητός κόμβος MN είναι συνδεδεμένος σε ένα σταθμό βάσης που ελέγχεται από τον δρομολογητή πρόσβασης AR1 (access router). Ο δρομολογητής στην άκρη του δικτύου πρόσβασης συμβολίζεται με ER (edge router) και προωθεί όλη την κίνηση από και προς το δίκτυο πρόσβασης. Οι δρομολογητές στο εξωτερικό δίκτυο προς τον ανταποκριτή κόμβο συμβολίζονται με CR (core routers).

Έστω ότι η επικοινωνία μεταξύ των άκρων είναι δικατευθυντική και πραγματικού χρόνου, οπότε και απαιτείται η εγκατάσταση δέσμευσης πόρων (π.χ. σε μία τηλεφωνική κλήση) με την έναρξη της επικοινωνίας. Το μοντέλο του RSVP επιβάλλει τη διπλή ανταλλαγή μηνυμάτων σηματοδοσίας για τις ροές δεδομένων από τον CN προς τον MN όσο και από τον MN προς τον CN. Η σηματοδοσία που απαιτείται για τη δέσμευση πόρων από-άκρη-σε-άκρη αναλύεται στο Σχήμα 4.3.

Μετά το πέρας της σηματοδοσίας, σε κάθε ενδιάμεσο δρομολογητή είναι εγκατεστημένες, μεταξύ άλλων, καταστάσεις διαδρομής (Path states) και καταστάσεις δέσμευσης (Resv) για κάθε

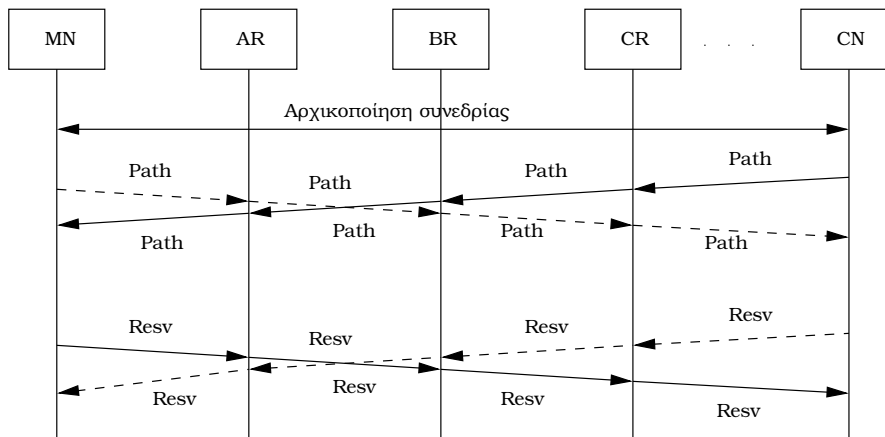


Σχήμα 4.2: Βασική τοπολογία δικτύου πρόσβασης

μονοκατευθυντική ροή.

Καθώς ο κινητός κόμβος κινείται, αλλάζει το σημείο προσάρτησης του στο δίκτυο πρόσβασης, και συγκεκριμένα συσχετίζεται με ένα σταθμό βάσης που ελέγχεται από τον δρομολογητή πρόσβασης AR2. Αλλάζει, συνεπώς, η IP διεύθυνση μέριμνας του κινητού, αλλά και η διαδρομή των δεδομένων για την επικοινωνία του με τον ανταποκριτή κόμβου. Η μεταβολή αυτή στην IP διεύθυνση του κινητού κόμβου επιφέρει δύο καιρία προβλήματα: (α) οι ροές από και προς το κινητό δεν θα απολαμβάνουν πια εγγυημένη ποιότητα υπηρεσίας και (β) οι πόροι που είχαν δεσμευθεί για τις αντίστοιχες ροές δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν από άλλη κίνηση δεδομένων μέχρι τη λήξη των δεσμεύσεων, οδηγώντας σε υπο-αξιοποίηση του δικτύου. Πρέπει επομένως άμεσα να επανεκκινηθεί η διαδικασία σηματοδότησης του RSVP ώστε να επανεγκατασταθούν δεσμεύσεις πόρων για τις ροές που απαιτούν ποιότητα υπηρεσίας, αλλά και να αποδεσμευθούν οι κατάλοιπες δεσμεύσεις που απέμειναν σχετικά με την παλαιά διεύθυνση μέριμνας.

Η αναλυτική διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί μετά την επίδραση της κινητικότητας αναλύεται στις επόμενες παραγράφους. Περιγράφονται τα προβλήματα που προκύπτουν, καθώς και τυχόν προσπάθειες επίλυσης τους.



Σχήμα 4.3: Σηματοδοσία RSVP για την εγκαθίδρυση δεσμεύσεων από-άκρη-σε-άκρη

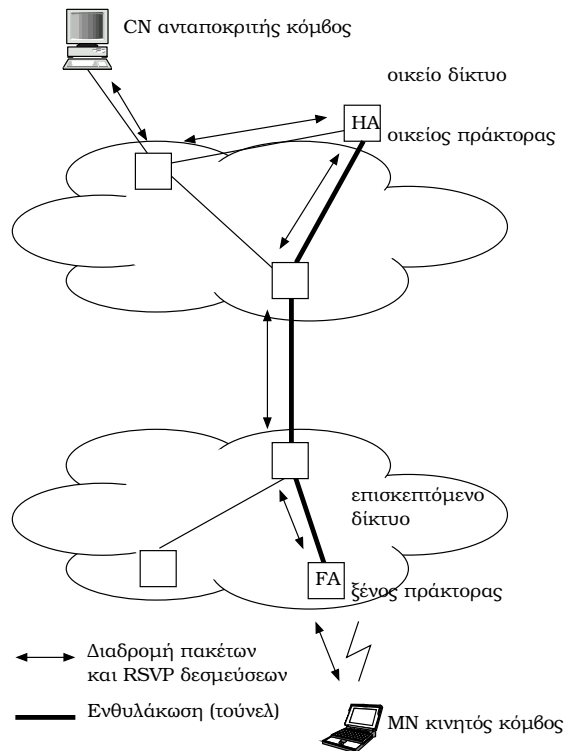
4.1.1 Συνδυασμένη Λειτουργία Mobile IP και RSVP

Η λειτουργία του RSVP είναι ανεξάρτητη του μηχανισμού δρομολόγησης. Επομένως, όταν χρησιμοποιείται Mobile IPv4, η επικοινωνία προς ένα κινητό κόμβο περιλαμβάνει πάντα τον οικείο πράκτορα, την ενθυλακωμένη διαδρομή μεταξύ οικείου και ξένου πράκτορα και τον ξένο πράκτορα. Συνεπώς, η δέσμευση των πόρων για μία ροή από έναν ανταποκριτή κόμβο προς τον κινητό κόμβο ακολουθεί τη διαδρομή ανταποκριτής κόμβος → οικείος πράκτορας (ενθυλάκωση) → ξένος πράκτορας (αποθυλάκωση) → κινητός κόμβος (Σχήμα 4.4).

Στην αντίθετη κατεύθυνση (από τον κινητό κόμβο προς τον ανταποκριτή κόμβο) έχει προδιαγραφεί να ακολουθηθεί η απευθείας διαδρομή κινητός κόμβος → ανταποκριτής κόμβος χωρίς διαμεσολάβηση των πρακτόρων κινητικότητας (Παράγραφος 2.2). Για λόγους ασφαλείας όμως, συνίσταται η χρήση της αντίστροφης ενθυλάκωσης (Παράγραφος 2.3.2) ώστε να ακολουθηθεί η αντίστροφη διαδρομή προς τον οικείο πράκτορα μέσω τούνελ από τον ξένο πράκτορα: κινητός κόμβος → ξένος πράκτορας (ενθυλάκωση) → οικείος πράκτορας (αποθυλάκωση) → ανταποκριτής κόμβος.

Η λειτουργία της Βελτιστοποίησης Δρομολόγησης (Παράγραφος 2.3.1) σε περιβάλλον IPv4, καθιστά εφικτή την απευθείας επικοινωνία του ανταποκριτή κόμβου και του ξένου πράκτορα (με χρήση τούνελ μεταξύ των δύο κόμβων). Σε περιβάλλοντα IPv6 (Παράγραφος 2.4), όπου έχει καταργηθεί η λειτουργία του ξένου πράκτορα, η επικοινωνία μεταξύ ανταποκριτή και κινητού κόμβου πραγματοποιείται απευθείας, χωρίς χρήση ενθυλάκωσης.

Το κύριο πρόβλημα που παραμένει όταν πραγματοποιείται μία μεταπομπή, και αλλάζει η θέση του κινητού, είναι ότι θα πρέπει να υπάρξει κάποια μεταβολή στις υπάρχουσες δεσμεύσεις. Αυτό οφείλεται στην αλλαγή λόγω μεταπομπής της διεύθυνσης μέριμνας του κινητού, η οποία είναι είτε



Σχήμα 4.4: Συνδυασμένη λειτουργία RSVP και Mobile IPv4

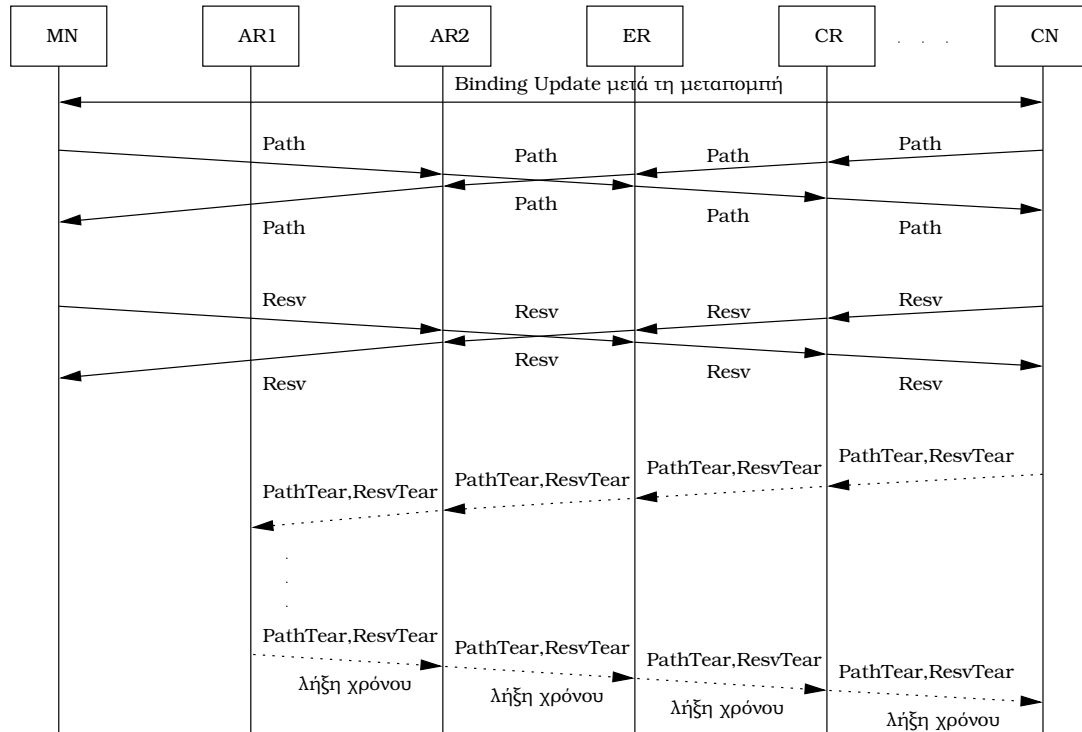
η διεύθυνση του ξένου πράκτορα (IPv4) είτε η αντιστοιχισμένη διεύθυνση μέριμνας του κινητού κόμβου (IPv6). Για χάρη της ομογενοποίησης της ορολογίας, στο κείμενο που ακολουθεί, ο όρος ανταποκριτής κόμβος θα χρησιμοποιείται για την περιγραφή του αντίστοιχου κόμβου που θα ενημερώνεται για την αλλαγή της διεύθυνσης μέριμνας. Επομένως, ο όρος αυτός θα αντικατοπτρίζει τον οικείο πράκτορα σε περιβάλλον Mobile IPv4 και τον ανταποκριτή κόμβο σε περιβάλλον Mobile IPv6 ή Mobile IPv4 με βελτιστοποίηση δρομολόγησης.

Έστω ο κινητός κόμβος MN του Σχήματος 4.2 ευρισκόμενος σε επισκεπτόμενο δίκτυο πρόσβασης, έχοντας εγκατεστημένες δεσμεύσεις RSVP από και προς τη διεύθυνση μέριμνας του με τον ανταποκριτή κόμβο CN. Όταν πραγματοποιήσει μεταπομπή επιπέδου δικτύου στην περιοχή ελέγχου του AR2, αλλάζει η διεύθυνση μέριμνας του, και πρέπει να ξεκινήσει ένας νέος γύρος ανταλλαγής σηματοδότησης RSVP μεταξύ του κινητού κόμβου και του ανταποκριτή κόμβου. Για να επιτευχθεί ο συγχρονισμός αυτός, απαιτείται επιπλέον λειτουργικότητα τόσο στον κινητό κόμβο όσο και στον ανταποκριτή κόμβο που να ενημερώνει τον πράκτορα RSVP (την εσωτερική διεργασία) για τις αλλαγές στη διευθυνσιοδότηση. Για το λόγο αυτό στο [35] υλοποιείται ένα κατάλληλο ενδιάμεσο λογισμικό (middleware) που πραγματοποιεί τη λειτουργία της ενημέρωσης και ρύθμισης της διεργασίας RSVP που εκτελείται στους τελικούς κόμβους. Στο [1] προτείνεται η προσθήκη στο RSVP λειτουργιών κινητικότητας που προσιδιάζουν στη βελτιστοποίηση δρομολόγησης. Τέλος

στο [23] προτείνεται η αναγκαία ελάχιστη λειτουργικότητα για αλληλοϋποστήριξη RSVP και Mobile IPv6.

Το πρόβλημα που δημιουργείται από την αλλαγή της διεύθυνσης μέριμνας του κινητού κόμβου συνοψίζεται στο ότι πρέπει να αποδεσμευθούν οι πόροι από-άκρη-σε-άκρη στην παλαιά διαδρομή και να δεσμευθούν εκ νέου πόροι στη από-άκρη-σε-άκρη στη νέα διαδρομή και περιγράφεται αναλυτικά ως εξής:

Το πρωτόκολλο RSVP δημιουργεί προσωρινές καταστάσεις (soft states) στους ενδιάμεσους δρομολογητές για κάθε συνεδρία (session). Το αναγνωριστικό της συνεδρίας είναι η τριάδα $\langle \text{DestAddress}, \text{DestPort}, \text{ProtocolID} \rangle$. Συνεπώς, η δέσμευση της ροής δεδομένων προς τον κινητό κόμβο καθίσταται άκυρη, αφού αλλάζει η παράμετρος DestAddress. Η δέσμευση της ροής δεδομένων από τον κινητό κόμβο επηρεάζεται και αυτή, αφού τα νέα μηνύματα Path που στέλνονται από τον κινητό κόμβο περιέχουν την νέα IP διεύθυνση αντί της παλαιάς στο πεδίο Sender Template. Τα μηνύματα αυτά θεωρείται ότι αντιστοιχούν σε νέα συνεδρία και δημιουργούν νέα κατάσταση διαδρομής (Path state) στη νέα διαδρομή [17]. Τα αντίστοιχα μηνύματα Resv εγκαθιστούν κατάσταση δέσμευσης για τη νέα συνεδρία.



Σχήμα 4.5: Ανταλλαγή RSVP μηνυμάτων μετά από μία μεταπομπή

Η ανταλλαγή των μηνυμάτων RSVP για την επανεγκατάσταση των δεσμεύσεων ποιότητας υπηρεσίας που πρέπει να πραγματοποιηθεί μετά από μία μεταπομπή παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5.

Με την υπάρχουσα λειτουργικότητα RSVP, η επικοινωνία του CN με τον MN πριν και μετά τη μεταπομπή θεωρείται ότι ανήκει σε διαφορετικές συνεδρίες, αφού αλλάζει η IP διεύθυνση του ενός άκρου (MN).

Η δέσμευση πόρων για τη συνεδρία μεταξύ της παλαιάς διεύθυνσης μέριμνας του MN και του CN θα πρέπει να διακοπεί. Ο προφανής τρόπος διακοπής είναι η χρήση της προσωρινής κατάστασης, δηλαδή να αφεθούν να λήξουν οι δεσμεύσεις πόρων στους ενδιάμεσους δρομολογητές λόγω μη ανανέωσης των προσωρινών καταστάσεων. Μία βελτίωση της λύσης αυτής είναι ο CN να αποδεσμεύσει ρητά τους πόρους που αντιστοιχούν στη ροή δεδομένων προς την παλαιά διεύθυνση μέριμνας του κινητού κόμβου. Για να το επιτύχει αυτό, ο CN χρησιμοποιεί το μήνυμα PathTear που αποδεσμεύει τους πόρους για τη συγκεκριμένη συνεδρία. Η αντίστοιχη αποστολή PathTear από την παλαιά διεύθυνση μέριμνας του MN δεν είναι εφικτή, αφού ο MN έχει ήδη μετακινηθεί και δεν χρησιμοποιεί την παλαιά διεύθυνση αυτή. Η ανάπτυξη της αντίστοιχης λειτουργικότητας στους δρομολογητές πρόσβασης (δηλαδή η αποστολή PathTear εκ μέρους των κινητών κόμβων) είναι μία λύση, αλλά κρίνεται μη πρακτική με βάση την απαιτούμενη πολυπλοκότητα, καθώς συνήθως ο παλιός δρομολογητής πρόσβασης δεν γνωρίζει καν ότι ο κινητός κόμβος που εξυπηρετούσε πραγματοποίησε μεταπομπή. Επομένως, η δέσμευση πόρων από την παλαιά διεύθυνση μέριμνας του MN προς τον CN θα πρέπει να περιμένει τη λήξη του χρονικού περιθωρίου ανανέωσης της προσωρινής κατάστασης για να διαγραφεί.

4.1.2 RSVP και Ενθυλάκωση

Ένα διαφορετικό πρόβλημα που ανακύπτει σε περιπτώσεις ταυτόχρονης χρήσης Mobile IPv4 και RSVP, προέρχεται από την πραγματοποιούμενη ενθυλάκωση (τούνελ) IP-in-IP που χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον στο Mobile IP. Συγκεκριμένα, οι ενδιάμεσοι δρομολογητές που προωθούν τα ενθυλακωμένα πακέτα, εξετάζουν μόνο την εξωτερική IP επικεφαλίδα και δεν επεξεργάζονται κατάλληλα την πληροφορία που τους αφορά. Για παράδειγμα, ο τύπος του πρωτοκόλλου σε πακέτα μηνυμάτων RSVP είναι 46, ενώ σε ενθυλακωμένα μηνύματα, ο τύπος του πρωτοκόλλου είναι 4 ή 6 (για δίκτυα IPv4 ή IPv6 αντίστοιχα). Συγκεκριμένα για τα μηνύματα RSVP δεν είναι ορατό το πεδίο Router Alert στην IP επικεφαλίδα [62, 88], που χρησιμοποιείται για να υποδεικνύει στους ενδιάμεσους δρομολογητές ότι τα συγκεκριμένα πακέτα απαιτούν ειδική επεξεργασία. Αποτέλεσμα αυτής της απόκρυψης είναι η σηματοδότηση RSVP από-άκρη-σε-άκρη να μην μπορεί να εγκαταστήσει κατάσταση ποιότητας υπηρεσίας μέσα στο τούνελ, και να μη δεσμεύονται οι αντίστοιχοι πόροι.

Ένα αντίστοιχο πρόβλημα που αφορά την κίνηση των δεδομένων, είναι ότι στις ροές δεδομένων που υφίστανται ενθυλάκωση αποκρύπτεται η επικεφαλίδα του πρωτοκόλλου μεταφοράς TCP ή

UDP η οποία βρίσκεται εσωτερικά και της δεύτερης IP επικεφαλίδας. Συνέπεια του γεγονότος αυτού είναι να μην είναι ορατές οι θύρες (ports) διεύθυνσης και προορισμού, με βάση τη φυσιολογική συμπεριφορά των δρομολογητών.

Για την επίλυση των προβλημάτων αυτών, μία επιλογή θα ήταν να προστεθεί λειτουργικότητα σε όλους τους δρομολογητές που υποστηρίζουν RSVP, ώστε να ελέγχουν για την ύπαρξη ενθυλάκωσης (ίσως και πολλαπλής) στα διερχόμενα πακέτα. Η προσέγγιση αυτή είναι προφανώς ανέφικτη, λόγω υπερβολικού κόστους αλλαγής του συνόλου της υποδομής του Internet, αλλά και εισαγωγής επιπλέον πολυπλοκότητας στο δίκτυο κορμού, σε αντίθεση με την αρχή της από-άκρη-σε-άκρη φιλοσοφίας (end-to-end) [112] του Internet.

Η προδιαγραφή λειτουργίας του RSVP διαμέσου IP ενθυλακώσεων (τούνελ) [133] ορίζει τη δημιουργία συνεδριών ποιότητας υπηρεσίας μέσα στο τούνελ, και την συσχέτιση των από-άκρη-σε-άκρη συνεδριών με τις συνεδρίες για τη διαδρομή του τούνελ. Ουσιαστικά, η όλη διαδρομή των πακέτων μέσα στο τούνελ εμφανίζεται ως μία λογική (ιδεατή) ζεύξη στην από-άκρη-σε-άκρη συνεδρία.

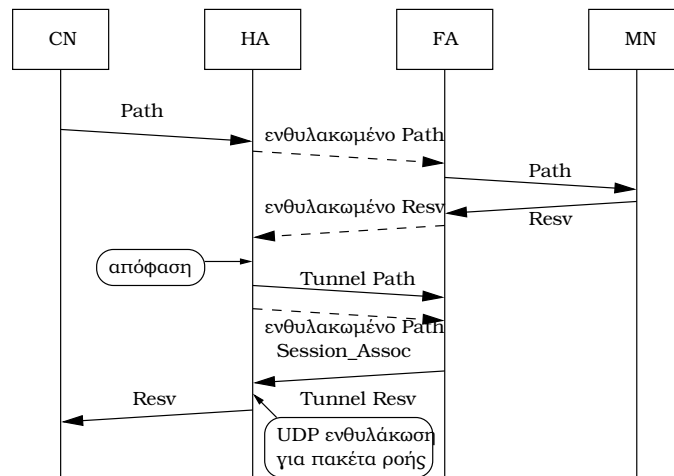
Η αντιστοίχιση της από-άκρη-σε-άκρη συνεδρίας με τη συνεδρία στο εσωτερικό του τούνελ απαιτεί κάποιου είδους σηματοδοσία μεταξύ των τελικών σημείων του τούνελ. Για το λόγο αυτό ορίστηκε ένα νέο RSVP αντικείμενο Session_Assoc που προσαρτάται στα από-άκρη-σε-άκρη Path μηνύματα, συσχετίζοντας την από-άκρη-σε-άκρη συνεδρία με μία από τις συνεδρίες στο εσωτερικό του τούνελ. Το νέο αυτό αντικείμενο διερμηνεύεται από τον δρομολογητή εξόδου του τούνελ, ο οποίος και συσχετίζει την από-άκρη-σε-άκρη συνεδρία με μία από τις συνεδρίες του τούνελ που δημιουργούνται στον δρομολογητή εισόδου.

Αναλυτικά η σηματοδοσία που πραγματοποιείται για την εγκατάσταση δέσμευσης μέσω τούνελ σε περιβάλλον Mobile IP παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6.

Ο ανταποκριτής κόμβος CN προσπαθεί να εγκαταστήσει δέσμευση πόρων για τη ροή δεδομένων προς τον κινητό κόμβο MN, μέσω του τούνελ που χρησιμοποιείται από τον οικείο πράκτορα HA προς τον ξένο πράκτορα FA, οι οποίοι αποτελούν την είσοδο και την έξοδο από το τούνελ. Ο CN στέλνει το μήνυμα Path προς την οικεία διεύθυνση του κινητού. Ο HA το αναχαιτίζει και το ενθυλακώνει προς τον FA, οποίος το αποθυλακώνει και το προωθεί στον MN. Ο MN, επιθυμώντας τη λήψη της ροής με ποιότητα υπηρεσίας απαντά με το αντίστοιχο Resv προς τον FA, ο οποίος το ενθυλακώνει και το προωθεί στον HA¹.

Όταν λάβει το μήνυμα Resv της από-άκρη-σε-άκρη ροής ο HA αποφασίζει (έλεγχος αποδοχής και πολιτικής) αν και πώς θα αντιστοιχίσει την από-άκρη-σε-άκρη συνεδρία σε κάποια συνεδρία

¹Η διαδρομή ανάμεσα στους HA και FA θεωρείται ότι διασχίζεται πάντα με ενθυλάκωση από τις από-άκρη-σε-άκρη-ροές.



Σχήμα 4.6: Σηματοδοσία RSVP για την εγκαθίδρυση δεσμεύσεων διαμέσου τούνελ

του τούνελ. Αν η απόφαση είναι θετική, ο HA είτε στέλνει ένα μήνυμα Path που αφορά το τούνελ για να δημιουργήσει νέα συνεδρία τούνελ είτε ενημερώνει την προδιαγραφή μίας ήδη υπάρχουσας. Ο HA, ακόμη πρέπει να στείλει και ένα μήνυμα Path για την από-άκρη-σε-άκρη συνεδρία, στο οποίο έχει προσθέσει το αντικείμενο Session_Assoc, όπου ορίζει την συσχετισμένη συνεδρία του τούνελ. Ο FA απαντά με το μήνυμα Resv για το τούνελ δεσμεύοντας πόρους για τη συνεδρία τούνελ. Από τον HA, το Resv προωθείται στον MN, για να ολοκληρωθεί η από-άκρη-σε-άκρη δέσμευση. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο HA πραγματοποιεί UDP ενθυλάκωση στα εισερχόμενα πακέτα, μόνο αν για αυτά υπάρχει εγκατεστημένη δέσμευση πόρων.

Οι αρχικές προσπάθειες για την ανάπτυξη της υποστήριξης ενθυλάκωσης στο RSVP, καθώς και αποτελέσματα προσομοίωσης, αναφέρονται στα [135, 134]. Η υλοποίηση της προσέγγισης αυτής σε πλατφόρμα Linux παρουσιάζεται στο [35], όπου και παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα της λειτουργίας του RSVP μέσω τούνελ. Αναλυτικότερες υλοποιήσεις υποστήριξης κινητικότητας και ποιότητας υπηρεσίας περιγράφονται στα [151, 73].

4.1.3 Προβλήματα Διαλειτουργικότητας

Συνοψίζοντας την υπάρχουσα κατάσταση, η διαλειτουργικότητα κινητικότητας και ποιότητας υπηρεσίας είναι προβληματική. Η σηματοδοσία που ακολουθείται είναι αναποτελεσματική και αργή, και δεν αποτρέπει τη σπατάλη πόρων. Αναλυτικότερα, μερικά από τα προβλήματα που ανακύπτουν από την προβληματική αλληλεπίδραση είναι τα εξής:

- *Μεγάλη καθυστέρηση για την επανεγκατάσταση των δεσμεύσεων*: Τα μηνύματα RSVP πρέπει να διασχίσουν το δίκτυο από-άκρη-σε-άκρη δύο φορές για να επανεγκαταστήσουν τις δεσμεύσεις πόρων για την ίδια συνεδρία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μεγάλη επιδείνωση της

ποιότητας των ενεργών ροών.

- *Διπλή δέσμευση πόρων για ένα μη-αμελητέο χρονικό διάστημα:* Μετά την εκτέλεση μιας μεταπομπής, υπάρχουν δεσμεύσεις δικτυακών πόρων για την ίδια συνεδρία από και προς την παλαιά και τη νέα διεύθυνση του κινητού κόμβου. Η παλαιά δέσμευση (δηλαδή η δέσμευση σε σχέση με την παλαιά διεύθυνση μέριμνας του κινητού) συνεχίζει να υπάρχει μέχρι τη λήξη της προσωρινής κατάστασης της² ή τη ρητή αποδέσμευση της παλαιάς συνεδρίας.
- *Αυξημένη πιθανότητα άρνησης νέων αιτήσεων συνεδριών:* Η σπατάλη πόρων (από τις διπλές δεσμεύσεις) σε περιβάλλοντα υψηλής κινητικότητας ή σε δίκτυα που υποστηρίζουν μεγάλο αριθμό κινητών κόμβων μπορεί να επηρεάσει την ολική αποδοτικότητα και διαθεσιμότητα του δικτύου. Σε αυτές τις συνθήκες, μία νέα αίτηση δέσμευσης πόρων θα αντιμετωπίσει μια υψηλότερη πιθανότητα απόρριψης.
- *Αυξημένο κόστος παροχής υπηρεσιών εγγυημένης ποιότητας:* Είναι λογικό να υποθέσουμε ότι ο πάροχος της υπηρεσίας ενός δικτύου πρόσβασης θα έχει ένα προκαθορισμένο Σύμφωνο Επιπέδου Υπηρεσίας (Service Level Agreement, SLA) με ένα πάροχο υπηρεσίας Internet (ISP). Η διπλή δέσμευση πόρων στη ζεύξη δικτύου πρόσβασης – δικτύου κορμού οδηγεί σε χαμηλότερη μέση αξιοποίηση των διαθέσιμων εγγυημένων πόρων για το ίδιο κόστος.
- *Αυξημένη λειτουργικότητα ανταποκριτή κόμβου:* Σε όλες τις παραπάνω υποθέσεις έχει υποτεθεί ότι ο ανταποκριτής κόμβος έχει ένα επαυξημένο τμήμα λειτουργικότητας όπου υλοποιείται η σηματοδότηση κινητικότητας και εξετάζεται η πιθανή συσχέτιση της με υπάρχουσες δεσμεύσεις πόρων³. Η λειτουργικότητα αυτή δεν υπάρχει στους υπάρχοντες υπολογιστές και στις αντίστοιχες σιότητες πρωτοκόλλων τους, και θα πρέπει να αναβαθμιστούν όλοι οι υπολογιστές με αντίστοιχη λειτουργικότητα ώστε να μπορούν να επικοινωνούν αποτελεσματικά με κινητούς κόμβους.

4.2 Πρότερη Ερευνητική Εργασία

Η αναποτελεσματικότητα στην αλληλεπίδραση των πρωτοκόλλων σηματοδότησης Mobile IP και RSVP είναι ευρέως αναγνωρισμένη και στη διεθνή ερευνητική βιβλιογραφία έχουν προταθεί πολλές μέθοδοι για την ομαλοποίηση και επίλυση των προβλημάτων. Στις επόμενες παραγράφους επιχει-

²Στην προδιαγραφή του RSVP ορίζεται χρονικό όριο εκπνοής της προσωρινής κατάστασης τα 90 δευτερόλεπτα μετά την τελευταία ανανέωση

³Σε περιβάλλον IPv4 χωρίς βελτιστοποίηση δρομολόγησης, ο κόμβος που πρέπει να συνδυάσει τις σηματοδοσίες κινητικότητας και ποιότητας υπηρεσίας είναι ο οικείος πράκτορας (Παράγραφος 4.1.1).

ρείται να δοθεί μία ανασκόπηση της υπάρχουσας ερευνητικής δραστηριότητας σε αυτόν τον τομέα. Συγκριτικές παρουσιάσεις των διάφορων προσεγγίσεων μπορούν να βρεθούν στα [61, 75, 68].

4.2.1 Αναγνώριση Ροών

Στις περιπτώσεις εγκατάστασης νέας δέσμευσης RSVP για την υποστήριξη της νέα θέσης του κινητού κόμβου σε κάποιο γειτονικό υποδίκτυο, είναι αρκετά πιθανή η επικάλυψη μεγάλου τμήματος της παλαιάς και της νέας διαδρομής ανάμεσα στον κινητό και τον ανταποκριτή κόμβο. Στο παράδειγμα του Σχήματος 4.2, και της μεταπομπής του κινητού κόμβου MN το κοινό τμήμα της παλαιάς και της νέας διαδρομής περιλαμβάνει τους δρομολογητές CR και ER. Συνεπώς, είναι επιθυμητή, αν όχι αναγκαία, η διατήρηση των δεσμεύσεων στο κοινό τμήμα της διαδρομής.

Η ταυτότητα αναγνώρισης μιας ροής πακέτων είναι η πεντάδα $\langle \text{SrcAddress}, \text{DestAddress}, \text{SrcPort}, \text{DestPort}, \text{Protocol} \rangle$, σύμφωνα με την προδιαγραφή του RSVP [18]. Η πεντάδα αυτή χρησιμοποιείται τόσο για λόγους ταυτοποίησης (αναζήτηση στις καταστάσεις δεσμεύσεων) όσο και για λόγους χρήσης (κατηγοριοποίηση και αναγνώριση πακέτων των ροών). Όπως έχει προαναφερθεί (Παράγραφος 4.1.1) η ύπαρξη των μεταβαλλόμενων IP διευθύνσεων στην ταυτότητα των καταστάσεων δημιουργεί πολλά προβλήματα.

Η προφανής λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η ανεξαρτητοποίηση της ταυτότητας της συνεδρίας από τις μεταβαλλόμενες IP διευθύνσεις. Προτείνεται, δηλαδή, η αλλαγή της σηματοδοσίας του RSVP, ώστε να μεταφέρουν τα μηνύματα του μία διαφορετική μοναδική ταυτότητα στα πεδία Session και Sender Template (πιθανά έναν τυχαίο ακέραιο αριθμό) αντί για τις IP διευθύνσεις αποστολής και προορισμού [136].

Οι κανόνες επεξεργασίας των μηνυμάτων θα πρέπει επίσης να αλλάξουν αντίστοιχα, ώστε τα πακέτα που προέρχονται από διαφορετικές IP διευθύνσεις, αλλά έχουν την ίδια ταυτότητα συνεδρίας να αντιμετωπίζονται με τον ίδιο τρόπο. Μία παρεμφερής προσέγγιση προτάθηκε από τους Shen et al. [114, 115] όπου η οικεία διεύθυνση (Home Address) αναλαμβάνει το ρόλο της μοναδικής ταυτότητας του κινητού κόμβου για τη συνεδρία.

Μία εναλλακτική τεχνική που επιτρέπει τη διατήρηση των δεσμεύσεων του RSVP για το κοινό τμήμα μεταξύ της παλαιάς και της νέας διαδρομής σε IPv6 δίκτυα παρουσιάζεται στο [66]. Οι δεσμεύσεις πόρων βασίζονται σε μοναδικά πεδία Flow Labels, χαρακτηριστικά της IPv6 επικεφαλίδας. Το πρωτόκολλο RSVP επεκτείνεται με νέα μηνύματα Resource Clear και Resource Re-Reservation, τα οποία στέλνει ο κινητός κόμβος προς τον παλαιό και το νέο δρομολογητή πρόσβασης αντίστοιχα, για να σηματοδοτήσει την κατάλληλη αποδέσμευση/δέσμευση πόρων για το παλαιό/νέο τμήμα της διαδρομής της ροής. Η προσέγγιση αυτή θεωρεί μοναδικές τις τιμές που λαμβάνει το πεδίο Flow Label, ακόμη και από διαφορετικούς κόμβους. Σύμφωνα, όμως, με τον

ορισμό του Flow Label [58], κάθε κόμβος έχει την απόλυτη ευχέρεια να ορίζει τιμές για το πεδίο αυτό, επομένως, δεν υπάρχουν εγγυήσεις για τη μοναδικότητα της.

Οι λύσεις διαχωρισμού της ταυτότητας της συνεδρίας από τα χαρακτηριστικά της ροής δεδομένων εισάγει όμως και ένα επιπλέον θέμα ασφάλειας, το πρόβλημα της «ιδιοκτησίας» της συνεδρίας [139]. Κάθε κόμβος που συμμετέχει σε σηματοδοσία ποιότητας υπηρεσίας ελέγχει για το αν τα μηνύματα που λαμβάνει αντιστοιχούν σε κάποια κατάσταση που ήδη διαθέτει ή αν πρόκειται για αίτηση νέας κατάστασης. Αν η ταυτότητα της συνεδρίας είναι ανεξάρτητη από τα φυσικά χαρακτηριστικά της ροής, τότε κάθε ενδιάμεσος κόμβος θα πρέπει να μπορεί να πιστοποιήσει την αντιστοιχία της ταυτότητας συνεδρίας με τα χαρακτηριστικά της ροής. Οι λύσεις που έχουν προταθεί για το πρόβλημα αυτό κατηγοριοποιούνται σε τοπικές (πιστοποιητικό γνησιότητας, κεντρική οντότητα πιστοποίησης, μεταφορά κατάστασης περιβάλλοντος) και γενικές (βασισμένες σε δημόσια κλειδιά, εμπιστευτικότητα ταυτότητας συνεδρίας).

Η προσέγγιση της ανεξαρτητοποίησης της ταυτότητας της συνεδρίας από τα χαρακτηριστικά της ροής απαιτεί σημαντικές τροποποιήσεις του πρωτοκόλλου RSVP, επεκτάσεις στο σύνολο των μηνυμάτων του και πλήρη επανορισμό των κανόνων του. Είναι, επομένως, σχεδόν απίθανο να αναθεωρηθεί εξελικτικά το RSVP ώστε να καταστεί συμβατό με την ανεξάρτητη ταυτότητα συνεδρίας.

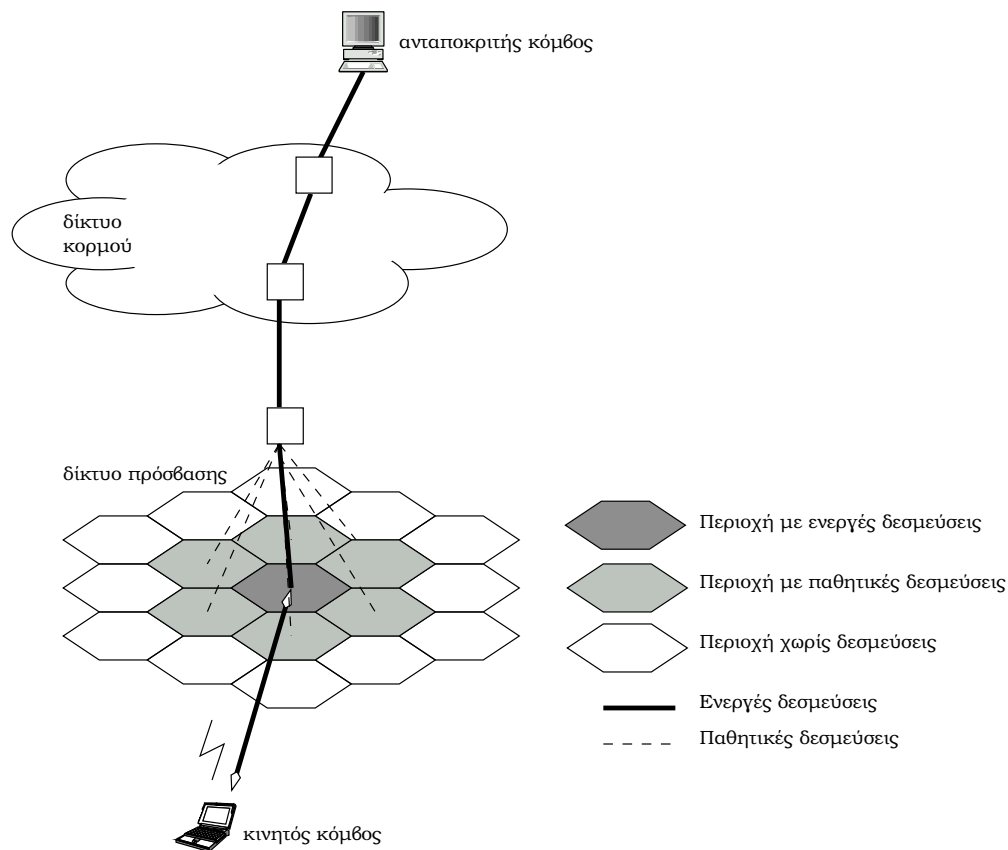
4.2.2 Προδραστική Δέσμευση Πόρων

Όταν ένας κινητός κόμβος με υπάρχουσες δεσμεύσεις πόρων πραγματοποιεί μεταπομπή σε ένα γειτονικό υποδίκτυο, θα πρέπει να «μεταφέρει» τους δεσμευμένους πόρους στη νέα τοποθεσία. Η διαδικασία της επαναδέσμευσης πόρων σε γειτονικά υποδίκτυα από την αρχή μπορεί να είναι αρκετά χρονοβόρα, και πιθανά να αποτύχει. Ο γενικός κανόνας στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών είναι να δίνεται προτεραιότητα στις υπάρχουσες συνδέσεις που πραγματοποιούν μεταπομπή έναντι των νέων αιτήσεων συνδέσεων [131, 132]. Με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται ουσιαστικά η ποιότητα που απολαμβάνουν οι ήδη ενεργές συνδέσεις έναντι αυξημένης πιθανότητας αποτυχίας των νέων αιτήσεων.

Για την επίτευξη του κανόνα αυτού προτάθηκε η χρήση αφιερωμένων πόρων αποκλειστικά για την εξυπηρέτηση των κλήσεων που προέρχονται από μεταπομπή (κανάλια-φύλακες, guard channels) [40]. Οι πόροι αυτοί μπορεί να είναι στατικά ρυθμισμένοι ή δυναμικά αναπροσαρμοζόμενοι ανάλογα με την επιθυμητή πολυπλοκότητα και δυνατότητα προσαρμογής των αλγορίθμων αποδοχής κλήσης. Συμπληρωματικά προτάθηκε και η εισαγωγή των αιτήσεων μεταπομπής σε ουρά αναμονής (handoff queueing) αντί της άμεσης απόρριψης σε περίπτωση ανεπάρκειας πόρων. Μία εκτεταμένη αναφορά σε πολιτικές διαχείρισης μεταπομπών και διαχείρισης πόρων κατά την

εκτέλεση τους βρίσκεται στο [138].

Η προδραστική (pro-active) δέσμευση πόρων χρησιμοποιώντας επεκτάσεις του RSVP είναι ουσιαστικά η εφαρμογή των προαναφερθείσων τεχνικών στον μηχανισμό παροχής εγγύησης ποιότητας υπηρεσίας στο Internet. Οι δεσμεύσεις πόρων που εξυπηρετούν ενεργές ροές δεδομένων ονομάστηκαν ενεργές δεσμεύσεις (active reservations), ενώ αντίστοιχα οι δεσμεύσεις πόρων που δεν εξυπηρετούν πραγματικές ροές δεδομένων, αλλά αντιστοιχούν σε ροές ενεργές σε γειτονικά υποδίκτυα ονομάστηκαν παθητικές δεσμεύσεις (passive reservations). Ουσιαστικά πρόκειται για δεσμεύσεις πόρων εκ των προτέρων σε γειτονικά υποδίκτυα-κυψέλες, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.7: Προδραστική δέσμευση πόρων με ενεργές και παθητικές δεσμεύσεις

Στο Σχήμα 4.7, ο κινητός κόμβος είναι προσαρτημένος στο κεντρικό υποδίκτυο-κυψέλη και έχει ενεργές δεσμεύσεις πόρων σε αυτό (σκουρόχρωμη σκίαση). Στα γειτονικά του υποδίκτυα, και ανάλογα με το ιστορικό κίνησης, κανόνες μεταπομπής ή και άλλα κριτήρια, έχουν προεγκατασταθεί παθητικές δεσμεύσεις (ανοιχτόχρωμη σκίαση), οι οποίες μπορούν να ενεργοποιηθούν άμεσα σε περίπτωση μεταπομπής του κινητού κόμβου σε αυτά. Με την τεχνική αυτή μειώνεται ο ρυθμός απόρριψης μεταπομπών υπαρχόντων συνδέσεων, ενώ αυξάνεται ο ρυθμός απόρριψης

αιτήσεων νέων συνδέσεων, με συνέπεια την ελάττωση του βαθμού αξιοποίησης των πόρων. Για την αντιμετώπιση του μειονεκτήματος αυτού, τα περισσότερα προδραστικά σχήματα επιτρέπουν τη χρήση των παθητικά δεσμευμένων πόρων από άλλες ροές προσωρινά, μέχρι όμως ο κινητός κόμβος για τον οποίο έχουν δεσμευτεί οι πόροι να τους χρειαστεί.

Στο [69] προτείνεται η έννοια της «σκιάδους συστάδας» (shadow cluster). Η σκιάδης συστάδα αποτελείται από το σύνολο των υποδικτύων (κυψελών) τα οποία ενδέχεται να επηρεαστούν από τυχόν κίνηση του κινητού κόμβου στο ενεργό υποδίκτυο. Η σκιάδης συστάδα περιλαμβάνει τις γειτονικές κυψέλες, αλλά και μη γειτονικές, που βρίσκονται όμως στην πορεία κίνησης του κινητού. Οι παθητικά δεσμευμένοι πόροι κατανέμονται αναλογικά στα υποδίκτυα της σκιάδους συστάδας σύμφωνα με πιθανοθεωρητικά μοντέλα κίνησης και με βάση την τοπολογία του δικτύου πρόσβασης.

Η εύρεση της πιθανής μελλοντικής θέσης του κινητού στάθηκε στο επίκεντρο μεγάλου ερευνητικού ενδιαφέροντος. Αρκετές προτάσεις αναπτύχθηκαν για τη δυναμική πρόβλεψη την κίνηση του κινητού κόμβου και επομένως την πρόβλεψη του υποδικτύου στο οποίο θα πραγματοποιήσει μεταπομπή. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της πορείας του κινητού μπορεί να χρησιμοποιούν γραμμική ή στατιστική πρόβλεψη [60], συλλογή και επεξεργασία ιστορικών δεδομένων [25, 5], επεξεργασία χωρικών δεδομένων εσωτερικού [71] ή εξωτερικού περιβάλλοντος (GSM, GPS)[24], μετρήσεις της έντασης του σήματος γειτονικών σταθμών βάσης [47] ή και συνδυασμό των τεχνικών αυτών.

Από τις πρώτες προτάσεις στη διεθνή ερευνητική βιβλιογραφία που προσπάθησαν να προσεγγίσουν το θέμα της αλληλεπίδρασης κινητικότητας και παροχής ποιότητας υπηρεσίας μέσω της σηματοδοσίας RSVP ήταν το MRSVP (Mobile RSVP) [127, 128, 129], όπου οι δεσμεύσεις πόρων προ-εγκαθίστανται στους γειτονικούς δρομολογητές πρόσβασης. Για να επιτευχθεί ο στόχος αυτός, εισάγονται πληρεξούσιοι πράκτορες (proxy agents) δέσμευσης πόρων που διαχειρίζονται τις παθητικές δεσμεύσεις. Η προσέγγιση του MRSVP στηρίζεται στην υπόθεση ότι υπάρχει μία προδιαγραφή κινητικότητας (mobility specification), που περιέχει την ακολουθία των υποδικτύων προς τα οποία θα κινηθεί ο κινητός κόμβος. Οι γειτονικοί δρομολογητές ενεργοποιούν τους παθητικά δεσμευμένους πόρους σε περίπτωση μεταπομπής των κινητών κόμβων στην περιοχή κάλυψής τους. Ομοίως, όταν ένας κινητός κόμβος πραγματοποιεί νέα αίτηση για παροχή δέσμευσης πόρων, σηματοδοτείται η αίτηση και στους γειτονικούς δρομολογητές για την εγκατάσταση παθητικών δεσμεύσεων πόρων γύρω από την τρέχουσα θέση του κινητού.

Μία βελτίωση στο MRSVP προτάθηκε στα [140, 141], όπου επιχειρείται μείωση των υπερβολικών δεσμεύσεων πόρων του MRSVP χρησιμοποιώντας ιεραρχικά μοντέλα διαχείρισης κινητικότητας με το HMRSVP (Hierarchical Mobile RSVP). Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, οι πόροι

σε γειτονικούς δρομολογητές δεσμεύονται μόνο αν ο κινητός κόμβος βρίσκεται στην επικαλυπτόμενη περιοχή δύο γειτονικών κυψελών. Μία εναλλακτική βελτίωση του MRSVP [28] εστιάζει στην απαλοιφή της υποχρέωσης παροχής της προδιαγραφής κινητικότητας αυτοματοποιώντας τη διαδικασία με την εισαγωγή δύο νέων πρωτοκόλλων, το Neighbor Mobility Agent Discovery Protocol, (NMADP) (Πρωτόκολλο Ανακάλυψης Γειτονικών Πρακτόρων Κινητικότητας) και το Mobile Reservation Update Protocol (MRUP) (Πρωτόκολλο Ενημέρωσης Δέσμευσης Κινητών).

Η προδραστική δέσμευση πόρων στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών αντιμετωπίζει όμως και ορισμένα εγγενή προβλήματα. Κάποια από αυτά είναι η απαίτηση της γνώσης της τοπολογικής διάταξης του δικτύου πρόσβασης, καθώς και συνήθως η πρότερη γνώση του γεγονότος της μεταπομπής. Στις περισσότερες περιπτώσεις πρότερης δέσμευσης πόρων χρειάζεται η λειτουργία των αντίστοιχων πληρεξουσίων πρακτόρων σε γειτονικά υποδίκτυα. Ακόμη, απαιτείται πλήθος σημαντικών επεκτάσεων και τροποποιήσεων στο RSVP τόσο για την υποστήριξη των παθητικών δεσμεύσεων όσο και για την απαραίτητη ενεργοποίηση-αποενεργοποίηση τους. Επιπλέον, ο σχεδιασμός των συστημάτων προδραστικής δέσμευσης πόρων είναι εξ ορισμού υποβέλτιστος ως προς τη συνολική απόδοση του δικτύου (υπερδέσμευση πόρων).

Παρόλα αυτά, η ανταλλαγή τμήματος της ολικής αποτελεσματικότητας του συστήματος για την καλύτερη υποστήριξη συγκεκριμένης ομάδας χρηστών (μεταπομπών) είναι προτιμητέα σε πολλές περιπτώσεις. Η αποτυχία αρχικής εγκατάστασης επικοινωνίας είναι σύμφωνα με τις ανθρώπινες αισθήσεις λιγότερο σημαντική από την ξαφνική διακοπή της εγκατεστημένης επικοινωνίας κατά τη διάρκεια μίας μεταπομπής.

4.2.3 Μεταφορά Κατάστασης Περιβάλλοντος

Ένα από τα κυριότερα ζητήματα της παράλληλης υποστήριξης κινητικότητας και ποιότητας υπηρεσίας, εκτός από την επαναχρησιμοποίηση των υπάρχοντων δεσμεύσεων στο κοινό τμήμα της παλαιάς και της νέας διαδρομής, είναι και η γρήγορη επανεγκατάσταση των δεσμεύσεων στο τμήμα της διαδρομής της ροής προς τη νέα θέση. Για το λόγο αυτό, αναπτύχθηκε από την IETF το πλαίσιο Μεταφοράς Κατάστασης Περιβάλλοντος (Context Transfer) [63].

Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει τη μεταφορά της εγκατεστημένης κατάστασης περιβάλλοντος (context) στο νέο δρομολογητή πρόσβασης, ώστε να επιτευχθεί ταχύτητα η επαναλειτουργία των ήδη υπάρχοντων υπηρεσιών. Η μεταφορά της κατάστασης μπορεί να εφαρμοστεί και σε διαφορετικές λειτουργίες εκτός από την ποιότητα υπηρεσίας, όπως για παράδειγμα για έλεγχο πολιτικής, συμπίεση επικεφαλίδων, AAA ή ομαλή διαλειτουργικότητα με διαφορετικά ραδιο-πρωτόκολλα επιπέδου ζεύξης. Η μεταφορά περιβάλλοντος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορους βαθμούς, από τη μεταφορά απλών ρυθμίσεων πρωτοκόλλων σηματοδοσίας ως την πλήρη μεταφορά κατάστα-

σης και την άμεση έναρξη λειτουργίας των πρωτοκόλλων και υπηρεσιών που απαιτούν την ύπαρξη κατάστασης.

Η προδιαγραφή του πρωτοκόλλου μεταφοράς κατάστασης περιβάλλοντος [52] προβλέπει την εκκίνηση της διαδικασίας μεταφοράς περιβάλλοντος τόσο από τον κινητό κόμβο όσο και από το δίκτυο (τον παλαιό ή τον νέο δρομολογητή πρόσβασης), ανάλογα με την καταλληλότητα της περίπτωσης. Ακόμη προβλέπει τη μεταφορά του περιβάλλοντος πριν από την πράξη της μεταπομπής, σε όσες περιπτώσεις αυτό είναι εφικτό, προκειμένου να υπάρξει ελάχιστη διακοπή στην παροχή υπηρεσίας στον κινητό κόμβο.

Αν και η τεχνική της μεταφοράς περιβάλλοντος δεν είναι εστιασμένη μόνο στη μεταφορά της κατάστασης RSVP, μπορεί να παίζει ένα σημαντικό ρόλο στη γενική ανύψωση του επιπέδου παροχής υπηρεσιών σε ένα δίκτυο ασύρματης πρόσβασης. Η προδιαγραφή βρίσκεται ακόμη σε προκαταρκτικό στάδιο και απομένει η πρακτική υλοποίηση και εφαρμογή της για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

4.2.4 Επέκταση Διαδρομής

Μία διαφορετική προσέγγιση στην αποτελεσματική διαχείριση των RSVP δεσμεύσεων μετά από μία μεταπομπή παρουσιάζεται στο [42]. Η προσέγγιση που προτείνεται είναι η «επέκταση» της δεσμευμένης διαδρομής. Το RSVP τροποποιείται κατάλληλα ώστε να διατηρείται η υπάρχουσα δέσμευση μέχρι τον παλαιό δρομολογητή πρόσβασης, και να δημιουργείται μία «επέκταση» της δέσμευσης από τον παλαιό στον νέο δρομολογητή. Η επέκταση αυτή έχει τοπικό χαρακτήρα και επιλύει μερικώς το πρόβλημα σε περιβάλλοντα χαμηλής κινητικότητας, αλλά με αυστηρές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας.

Ανάλογη είναι και η προσέγγιση στα [72, 73], όπου δεσμεύονται πόροι εκ των προτέρων με τη μορφή επέκτασης διαδρομής προς όλους τους γειτονικούς δρομολογητές πρόσβασης, και όχι μόνο προς την συγκεκριμένο στον οποίο πραγματοποιεί μεταπομπή ο κινητός κόμβος. Η υβριδική αυτή λύση χρησιμοποιεί τεχνικές επέκτασης διαδρομής, αλλά και προδραστικής δέσμευσης πόρων.

4.2.5 RSVP και Εναλλακτικά Σχήματα Διαχείρισης Κινητικότητας

Για να αποφευχθούν τα προβλήματα που εισάγονται με την παράλληλη χρήση της σηματοδότησης RSVP και Mobile IP (και παρεμφερών πρωτοκόλλων), μερικοί ερευνητές απέφυγαν εντελώς τη χρήση της προδιαγεγραμμένης διαχείρισης κινητικότητας Mobile IP και κατέφυγαν σε εναλλακτικές μορφές διαχείρισης κινητικότητας για την υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας για κινούμενους κόμβους.

Η χρήση της τεχνολογίας multicast για τη διαχείριση της κινητικότητας σε δίκτυα πρόσβασης χρησιμοποιείται για την άμβλυνση της ασυμβατότητας μεταξύ Mobile IP και RSVP. Μία επέκταση του RSVP βασισμένη σε multicast IP είναι και η πρόταση στο [22], καθώς η κινητικότητα ενός χρήστη μοντελοποιείται ως μεταβολή στα μέλη μιας ομάδας multicast. Το δένδρο multicast μεταβάλλεται δυναμικά κάθε φορά που ένας κινητός κόμβος περιάγεται σε μία γειτονική κυψέλη. Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση, η επιδείνωση της υπηρεσίας και οι καθυστερήσεις των πακέτων ελαχιστοποιούνται, αλλά και η επαναδρομολόγηση των ροών απαλοίφεται. Εισάγεται όμως σημαντική επεξεργασία για τη διαχείριση των ομάδων multicast και κακή διαχείριση των δικτυακών πόρων.

Μία εναλλακτική πρόταση επεκτείνει τη διαχείριση θέσης (location management) για να συμπεριλάβει και τη διαχείριση κινητικότητας. Προτείνεται η άμεση και διαρκής ενημέρωση των βάσεων δεδομένων των χωρικών δεδομένων των κινητών κόμβων (Location Registers), χωρίς να απαιτείται αλλαγή στην IP διεύθυνση του κινητού κόμβου. Η προσέγγιση αυτή προσιδιάζει στην αρχιτεκτονική των κυψελωτών δικτύων επικοινωνιών GSM, UMTS [79] και στους αντίστοιχους καταχωρητές τοποθεσίας HLR και VLR.

4.3 Αποτίμηση Τρέχουσας Κατάστασης

Η ανεξάρτητη και παράλληλη ανάπτυξη των μηχανισμών κινητικότητας και ποιότητας υπηρεσίας για το Internet επέφερε σημαντικά προβλήματα διαλειτουργικότητας, στην επίλυση των οποίων ακόμη και σήμερα αφιερώνεται μεγάλο εύρος ερευνητικής δραστηριότητας.

Ορισμένα από τα αρχικά προβλήματα επιλύθηκαν ή μπορεί να μην είναι τόσο σημαντικά στο μέλλον. Για παράδειγμα η προβληματική αλληλεπίδραση RSVP και τούνελ έχει προδιαγεγραμμένη λύση, αν και είναι πιθανό να είναι αδιάφορη στο μέλλον με την έλευση του Mobile IPv6 και την εξάλειψη της χρήσης ενθυλάκωσης (τούνελ) για την επικοινωνία με τον κινητό κόμβο. Ακόμη, έχει επιδειχθεί η ικανότητα συνδυασμένης λειτουργίας RSVP και Mobile IP, όπου ειδικό ενδιαμέσο λογισμικό ενημερώνει τη διεργασία RSVP στον κινητό κόμβο για γεγονότα κινητικότητας.

Ένα από τα προβλήματα που δεν έχει επιλυθεί ή τουλάχιστον δεν έχει γίνει ευρέως αποδεκτή καμμιά πρόταση αφορά στις δεσμεύσεις πόρων από/προς ένα κινητό κόμβο. Οι υπάρχουσες δεσμεύσεις δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν μετά την αλλαγή της διεύθυνσης του κόμβου. Οι ερευνητικές προτάσεις στη διεθνή βιβλιογραφία ποικίλουν και αντιμετωπίζουν το θέμα από διαφορετικές γωνίες. Η σημαντικότερη από αυτές προτείνει την ανεξαρτητοποίηση της ταυτότητας συνεδρίας που χρησιμοποιεί το RSVP για τις δεσμεύσεις του από την τελική IP διεύθυνση του κινητού κόμβου. Προτείνεται δηλαδή, η ύπαρξη διαφορετικών ταυτοτήτων συνεδρίας (σταθερή)

και ροής (μεταβαλλόμενη με την αλλαγή των IP διευθύνσεων). Η πρόταση αυτή, πράγματι μπορεί να αντιμετωπίσει το πρόβλημα. Προϋποθέτει όμως ριζικές αλλαγές στο RSVP, τους μηχανισμούς και τα μηνύματα του. Οι ριζικές αυτές αλλαγές θα πρέπει να διαδοθούν τόσο στις υλοποιήσεις των δρομολογητών, όσο και σε αυτές των τελικών κόμβων. Η εξέλιξη του RSVP για την υποστήριξη της τροποποίησης αυτής δεν είναι ουσιαστικά πιθανή.

Μία χαρακτηριστική ιδιότητα της κινητικότητας είναι ότι συμβαίνει ανάμεσα σε γειτονικά υποδίκτυα, τα οποία συνήθως είναι υπό τον έλεγχο της ίδιας διαχειριστικής αρχής. Οι προτάσεις προδραστικής δέσμευσης πόρων σε γειτονικά δίκτυα εκμεταλλεύονται το γεγονός αυτό (σε θεωρητική βάση) για να παρέχουν προτεραιότητα στις συνδέσεις που κινούνται. Οι ερευνητικές αυτές προσεγγίσεις αυτές είτε προτείνουν σημαντικές αλλαγές στο πρωτόκολλο RSVP είτε απλώς το αγνοούν και το αντικαθιστούν από νέα πρωτόκολλα.

Για να είναι τεχνικά και οικονομικά εφικτή μία προσέγγιση, θα πρέπει να μην απαιτεί ουσιαστικές αλλαγές στη λειτουργία του RSVP ή των μηχανισμών κινητικότητας Mobile IP. Με βάση την υπάρχουσα ερευνητική εμπειρία και τα προβλήματα που συνεχίζουν να υπάρχουν, φαίνεται ότι είναι αναγκαία η εκμετάλλευση της τοπικότητας της κινητικότητας. Αν η κινητικότητα συμβαίνει τοπικά, θα πρέπει και η σηματοδότηση λόγω κινητικότητας (τόσο Mobile IP όσο και RSVP) να περιορίζεται στην τοπική περιοχή. Ο έλεγχος της περιοχής από την ίδια διαχειριστική αρχή, όπως συμβαίνει συνήθως, διευκολύνει την ομαλή διασυνεργασία κινητικότητας και ποιότητας υπηρεσίας, όπως θα περιγραφεί στην επόμενη ενότητα.

Κεφάλαιο 5

RSVP Mobility Proxy

Η ανάλυση της αλληλεπίδρασης της σηματοδότησης κινητικότητας με τους μηχανισμούς παροχής ποιότητας υπηρεσίας στο Κεφάλαιο 4, έδειξε ότι το πρωταρχικό πρόβλημα έγκειται στην αλλαγή της ταυτότητας της συνεδρίας όταν αλλάζει κάποιο από τα τελικά άκρα της σύνδεσης. Η προφανής προσέγγιση στο θέμα αυτό είναι η χρησιμοποίηση μίας μοναδικής και σταθερής ταυτότητας για κάθε ροή δεδομένων, η οποία να είναι ανεξάρτητη από την κινητικότητα των κόμβων. Για να επιτευχθεί αυτή η στρατηγική, απαιτείται πλήρης ανασχεδιασμός του RSVP, γεγονός που την καθιστά αναποτελεσματική για άμεση εφαρμογή. Στην παρούσα εργασία προτείνεται μία απλή λύση που μπορεί να βρει άμεσα εφαρμογή χωρίς αλλαγές στην υπάρχουσα υποδομή διαχείρισης κινητικότητας και ποιότητας υπηρεσίας.

Στην ενότητα αυτή θα αναλυθεί η πρόταση της εισαγωγής της οντότητας του RSVP Mobility Proxy (RSVP-MP) (Πληρεξούσιου Διαχειριστή Κινητικότητας RSVP), δηλαδή η εισαγωγή επιπλέον λειτουργικότητας σε ένα και μόνο δρομολογητή στο σύνορο ενός ιεραρχικού δικτύου πρόσβασης, με στόχο τη βελτίωση της διασυνεργασίας RSVP και των μηχανισμών κινητικότητας. Αναλύεται το σκεπτικό της συγκεκριμένης πρότασης, οι συνθήκες υποδομής στις οποίες μπορεί να εφαρμοστεί και τα αναμενόμενα οφέλη. Στη συνέχεια περιγράφεται η βασική λειτουργικότητα του RSVP-MP, οι κανόνες επεξεργασίας των μηνύματων RSVP που εφαρμόζει και η διατήρηση της αντίστοιχης κατάστασης RSVP στο εσωτερικό του. Ακόμη, παρουσιάζεται η διαχείριση μίας μεταπομπής στο δίκτυο πρόσβασης και η λειτουργία του RSVP-MP σε συνθήκες αλλαγής τοποθεσίας ενός κινητού κόμβου. Η ενότητα κλείνει με τις πιθανές στρατηγικές εφαρμογής της τεχνολογίας RSVP-MP σε δίκτυα πρόσβασης.

5.1 Πλαίσιο Λειτουργίας

Ο κύριος στόχος της πρότασης εισαγωγής του RSVP Mobility Proxy (RSVP-MP) είναι η ελαχιστοποίηση της σηματοδοσίας και της ανάγκης επανεγκατάστασης δεσμεύσεων πόρων που απαιτεί το πρωτόκολλο παροχής ποιότητας υπηρεσίας σε περιπτώσεις κινητικότητας. Το RSVP είναι ένα παγιωμένο πρωτόκολλο, υλοποιήσεις του οποίου υπάρχουν σε όλα σχεδόν τα δικτυακά προϊόντα, επομένως ο δεύτερος στόχος που τέθηκε είναι η διατήρηση της υπάρχουσας υποδομής και των χρησιμοποιούμενων πρωτοκόλλων χωρίς αλλαγές ή προσθήκες στη λειτουργία τους.

Η βασική ιδέα του RSVP-MP είναι ο περιορισμός των αναγκαίων μεταβολών κατάστασης (επανεγκατάσταση δεσμεύσεων RSVP) μέσα στο δίκτυο πρόσβασης, δηλαδή στον χώρο όπου πραγματοποιείται η μεταπομπή, διατηρώντας αμετάβλητες τις καταστάσεις δέσμευσης στο εξωτερικό δίκτυο. Για την επίτευξη αυτού του στόχου είναι απαραίτητη η ύπαρξη υποδομής μηχανισμών μικρο-κινητικότητας στο δίκτυο πρόσβασης (Παράγραφος 2.5). Με τον τρόπο αυτό, ένας κινητός κόμβος μπορεί να λαμβάνει διαφορετικές τοπικές διευθύνσεις μέριμνας LCoAs (Local Care of Addresses) όσο κινείται και πραγματοποιεί μεταπομπές σε ένα δίκτυο πρόσβασης, αλλά θα είναι πάντα προσβάσιμος μέσω μίας «καθολικής» διεύθυνσης μέριμνας RCoA (Regional Care of Address), χαρακτηριστικής του δικτύου πρόσβασης. Ο τρόπος δρομολόγησης στο δίκτυο πρόσβασης μπορεί να στηρίζεται σε ενθυλάκωση, εξειδικευμένα πρωτόκολλα δρομολόγησης ανά κόμβο ή ακόμη και σε NAT. Η πρόταση του RSVP-MP δεν εξαρτάται από το συγκεκριμένο σχήμα της μικρο-κινητικότητας που χρησιμοποιείται, αλλά στηρίζεται στην ικανότητα του να παρέχει μία μοναδική διεύθυνση μέριμνας για χρήση εκτός του δικτύου πρόσβασης. Στη συνέχεια της ανάλυσης, θα χρησιμοποιηθούν πρωτόκολλα ιεραρχικής διαχείρισης κινητικότητας λόγω της επικράτησής τους στη «μάχη» της μικρο-κινητικότητας.

Στην υπόλοιπη ενότητα, το δίκτυο πρόσβασης θεωρείται ότι διαθέτει την κατάλληλη ιεραρχική διαχείριση κινητικότητας, και ότι παρέχει μία μοναδική καθολική διεύθυνση RCoA για χρήση εκτός δικτύου πρόσβασης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η διατήρηση της ίδιας καθολικής διεύθυνσης RCoA είναι απαραίτητη μόνο κατά τη διάρκεια ύπαρξης ενεργών συνδέσεων από/προς τον κινητό κόμβο. Είναι δυνατό, αν το υποστηρίζει η τεχνολογία διαχείρισης κινητικότητας, να ανατίθεται στον κινητό κόμβο διαφορετική RCoA, όταν δε συμμετέχει ενεργά σε συνδέσεις που απαιτούν ποιότητα υπηρεσίας [87]. Σε αυτή την περίπτωση θα εφαρμόζονται οι κανόνες που ορίζει το Mobile IP. Η λειτουργικότητα αυτή μπορεί να φανεί χρήσιμη σε περιπτώσεις σχεδιασμού και υλοποίησης της διαχείρισης κινητικότητας.

Επιπλέον, θεωρούμε ότι υπάρχει η αρμόδια αρχή διαχείρισης κινητικότητας, η οποία μπορεί να δώσει τις κατάλληλες πληροφορίες για τον κινητό κόμβο, όπως για παράδειγμα την οικεία

διεύθυνση του HA (Home Address), την τρέχουσα τοποθεσία του ή την τοπική διεύθυνση μέριμνας LCoA. Τη λειτουργικότητα αυτή την υλοποιεί το Mobility Anchor Point (MAP) σε περιβάλλον ιεραρχικού Mobile IPv6 [122] ή το Gateway Foreign Agent (GFA) στην προσέγγιση των τοπικών εγγραφών σε δίκτυα IPv4 [41].

5.2 Ανάλυση Λειτουργίας

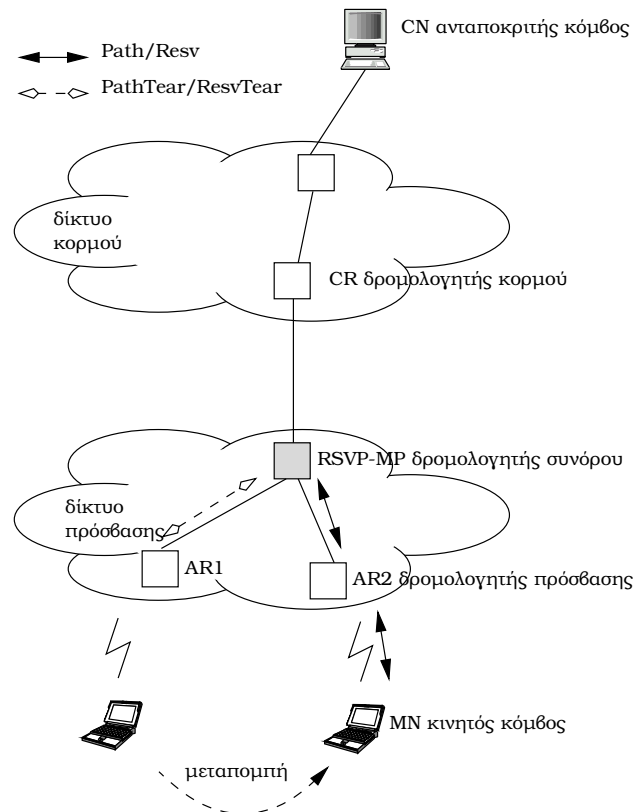
Στο υπάρχον πλαίσιο λειτουργίας της ιεραρχικής διαχείρισης κινητικότητας εισάγεται η έννοια του RSVP-MP [91, 93]. Το RSVP-MP είναι ουσιαστικά ο δρομολογητής στην άκρη του δικτύου πρόσβασης, μέσω του οποίου περνά όλη η κίνηση από και προς το δίκτυο πρόσβασης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Ο δρομολογητής αυτός διαθέτει φυσικά την προδιαγεγραμμένη λειτουργικότητα του RSVP και την αντίστοιχη ικανότητα επεξεργασίας των μηνυμάτων του και επιπλέον τις εξής ιδιότητες:

- Γνώση της αντιστοιχίας μεταξύ των καθολικών (RCoA) και των τοπικών διευθύνσεων (LCoA) των κινητών κόμβων και ενημέρωση των πληροφοριών του για κάθε μεταβολή αυτής της αντιστοιχίας. Η ενημέρωση αυτή γίνεται μέσω επικοινωνίας με την αρμόδια αρχή ελέγχου κινητικότητας του δικτύου πρόσβασης (δηλαδή την οντότητα MAP ή GFA).
- Πραγματοποίηση δυναμικής αντιστοίχισης και αντικατάστασης της καθολικής διεύθυνσης μέριμνας RCoA σε τοπική LCoA και αντίστροφα, όταν αυτό απαιτείται σε πακέτα που εισέρχονται ή εξέρχονται από το δίκτυο πρόσβασης αντίστοιχα.

5.2.1 Βασική Λειτουργικότητα

Οι δεσμεύσεις πόρων στο RSVP-MP πραγματοποιούνται με βάση τη μοναδική για κάθε κινητό κόμβο RCoA. Αναλυτικότερα, στις εσωτερικές καταστάσεις (State Blocks) του RSVP, τις οποίες υλοποιεί και το RSVP-MP, η IP διεύθυνση του κινητού κόμβου εμφανίζεται πάντα με τη μορφή της RCoA. Οι δομές αποθήκευσης κατάστασης αυτές περιλαμβάνουν τις καταστάσεις διαδρομής (Path State Block, PSB) και τις καταστάσεις δέσμευσης πόρων (Resv State Block, RSB) μεταξύ άλλων.

Η δράση των πρωτοκόλλων υποστήριξης κινητικότητας που αφορά στην αλλαγή της διεύθυνσης του κινητού κόμβου στην άκρη του δικτύου πρόσβασης περιορίζεται στην IP επικεφαλίδα, αφήνοντας τα περιεχόμενα των πακέτων ανέπαφα. Η φράση «αλλαγή διεύθυνσης» που χρησιμοποιείται συνήθως περιλαμβάνει την εφαρμογή τεχνικών ενθυλάκωσης/αποθυλάκωσης για την επίτευξη της επιθυμητής μορφής του πακέτου. Τα μηνύματα RSVP περιέχουν τις IP διευθύνσεις επικοινωνίας μέσα στις πληροφορίες που μεταφέρουν (και συγκεκριμένα στα αντικείμενα Session και Sender



Σχήμα 5.1: Δίκτυο πρόσβασης με εγκατεστημένο RSVP-MP

Template). Οι διευθύνσεις αυτές στα περιεχόμενα των μηνυμάτων RSVP πρέπει επίσης να αλλάχουν με την αντίστοιχη LCoA ή RCoA (ανάλογα με το αν το πακέτο εισέρχεται ή εξέρχεται από το δίκτυο πρόσβασης).

Το RSVP-MP επεξεργάζεται τα μηνύματα RSVP και τα μετατρέπει στην μορφή “RCoA” πριν ενημερώσει τις εσωτερικές καταστάσεις του PSB, RSB. Επιπλέον, ορισμένα βήματα στην επεξεργασία των RSVP μηνυμάτων απαιτούν και την πληροφορία αντιστοίχισης RCoA–LCoA για τη σωστή λειτουργία τους. Τα βήματα αυτά περιγράφονται στην παρακάτω ανάλυση. Οι υπόλοιπες καταστάσεις που διατηρεί το RSVP, δηλαδή τα Traffic Control State Block (TCSB), Blockade State Block (BSB) πρέπει να ακολουθήσουν παρόμοια επεξεργασία για την ομαλή λειτουργία του μηχανισμού.

Στην ανάλυση που ακολουθεί, παρουσιάζεται η αναγκαία επεξεργασία τεσσάρων βασικών τύπων μηνυμάτων στο RSVP-MP και τονίζονται οι αλλαγές στην υλοποίηση σε σχέση με την προδιαγραφή RFC 2209: RSVP Message Processing Rules [17]. Η επεξεργασία πραγματοποιείται ανάλογα με τον τύπο του μηνύματος και την εισερχόμενη διεπαφή. Οι εσωτερικές διεπαφές είναι αυτές που διασυνδέουν το RSVP-MP με το δίκτυο πρόσβασης, ενώ οι εξωτερικές διεπαφές με το εξωτερικό δίκτυο (δίκτυο κορμού, δίκτυο παρόχου Internet, κλπ) (Σχήμα 5.1). Συνεπώς, όταν καταφθάει ένα μήνυμα RSVP από το εσωτερικό του δικτύου πρόσβασης περιέχει στα περιεχόμενα

του αναφορά στην τοπική διεύθυνση μέριμνας LCoA, ενώ όταν προέρχεται από το εξωτερικό του δικτύου, το μήνυμα RSVP θα αναφέρει την RCoA.

1. Μήνυμα Path από εσωτερική διεπαφή (LCoA)

- Αλλαγή της LCoA στο αντικείμενο `Sender_Template` του μηνύματος Path με την RCoA.
- Ενημέρωση PSB. Δημιουργία νέας εγγραφής αν πρόκειται για νέα συνεδρία ή ενημέρωση χρόνου λήξης ήδη υπάρχουσας.
- Αλλαγή της LCoA στην IP επικεφαλίδα του πακέτου (διεύθυνση πηγής) με την RCoA.
- Προώθηση του μηνύματος Path στην κατάλληλη εξερχόμενη διεπαφή προς το εξωτερικό δίκτυο.

2. Μήνυμα Resv από εξωτερική διεπαφή (RCoA)

- Έλεγχος αποδοχής και έλεγχος πολιτικής για το αν είναι εφικτή η δέσμευση των πόρων που ζητείται.
- Ενημέρωση RSB. Σε περίπτωση υπάρχουσας κατάστασης δέσμευσης, πραγματοποιείται ενημέρωση του χρόνου λήξης της κατάστασης και παραλείπεται το προηγούμενο βήμα (έλεγχος αποδοχής). Σε περίπτωση νέας αίτησης δέσμευσης και επιτυχίας των ελέγχων αποδοχής και πολιτικής που πραγματοποιήθηκαν, δημιουργείται νέα εγγραφή-κατάσταση δέσμευσης.
- Αλλαγή της RCoA στο αντικείμενο `Sender_Template` του μηνύματος RSVP με την LCoA. Το αντικείμενο αυτό βρίσκεται στο αντικείμενο `Filter_Spec` του μηνύματος Resv, το οποίο περιέχεται στην προδιαγραφή ροής του μηνύματος RSVP.
- Αλλαγή της RCoA στην IP επικεφαλίδα του πακέτου (διεύθυνση προορισμού) με την LCoA.
- Προώθηση του μηνύματος Resv στην κατάλληλη εξερχόμενη διεπαφή προς το εσωτερικό δίκτυο.

3. Μήνυμα Path από εξωτερική διεπαφή (RCoA)

- Ενημέρωση PSB. Η λειτουργία `update_PSB` που υλοποιείται στους δρομολογητές RSVP περιέχει μία συνάρτηση ερώτησης δρομολόγησης, η οποία πρέπει να βελτιωθεί ώστε να επιστρέφει τη σωστή εξερχόμενη διεπαφή που δείχνει προς την LCoA στο εσωτερικό του δικτύου πρόσβασης.
- Αλλαγή της RCoA στο αντικείμενο `Session` του πακέτου Path με την LCoA.

- Αλλαγή της RCoA στην IP επικεφαλίδα του πακέτου (διεύθυνση προορισμού) με την LCoA.
- Προώθηση του μηνύματος Path στην κατάλληλη εξερχόμενη διεπαφή προς το εσωτερικό δίκτυο.

4. Μήνυμα Resv από εσωτερική διεπαφή (LCoA)

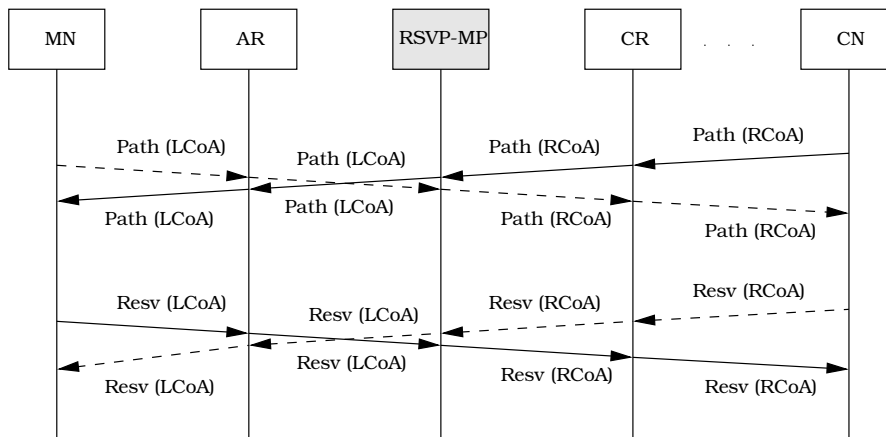
- Αλλαγή της LCoA στο αντικείμενο Session του πακέτου Resv με την RCoA.
- Έλεγχος αποδοχής και έλεγχος πολιτικής για το αν είναι εφικτή η δέσμευση των πόρων που ζητείται.
- Ενημέρωση RSB. Η διεπαφή στην οποία θα γίνει η δέσμευση πόρων θα είναι η ίδια με αυτήν από την οποία κατέφτασε το μήνυμα Resv, και η οποία δείχνει προς την LCoA. Δεν πρέπει να ερωτηθεί το πρωτόκολλο δρομολόγησης για την υπόδειξη της διεπαφής στην οποία θα γίνει η δέσμευση.
- Αλλαγή της LCoA στην IP επικεφαλίδα του πακέτου (διεύθυνση πηγής) με την RCoA.
- Προώθηση του μηνύματος Resv στην κατάλληλη εξερχόμενη διεπαφή προς το εξωτερικό δίκτυο.

Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται η ανταλλαγή των μηνυμάτων RSVP για τη δέσμευση πόρων μιας δικατευθυντικής ροής σε μια τοπολογία δικτύου με RSVP-MP. Οι καταστάσεις δέσμευσης στους δρομολογητές εκτός του δικτύου πρόσβασης περιέχουν τη σταθερή RCoA. Μόνο οι καταστάσεις δέσμευσης μέσα στο δίκτυο πρόσβασης χρησιμοποιούν την τοπική διεύθυνση μέριμνας LCoA. Με τον τρόπο αυτό έχει εγκατασταθεί η απαραίτητη υποδομή για τη διαχείριση γεγονότων κινητικότητας μέσα στο δίκτυο πρόσβασης, χωρίς την ανάγκη για διάδοση της μεταβολής της θέσης του κινητού εκτός αυτού.

5.2.2 Λειτουργικότητα Κινητικότητας

Σε περίπτωση μεταπομπής, η αρμόδια αρχή ελέγχου της κινητικότητας (MAP ή GFA) είτε ελέγχει άμεσα τη διαδικασία της μεταπομπής είτε ειδοποιείται αμέσως για τη μεταβολή αυτή. Μία αντίστοιχη τέτοια ειδοποίηση πρέπει να αποσταλεί και στο RSVP-MP, προκειμένου να ενημερωθούν και οι δικές του καταστάσεις σχετικά με τις δεσμεύσεις πόρων. Οι δύο εννοιολογικά ανεξάρτητες οντότητες, δηλαδή το RSVP-MP και το MAP, μπορεί να είναι συστεγασμένες στο δρομολογητή συνόρου του δικτύου πρόσβασης.

Όταν φτάσει η ειδοποίηση της μεταπομπής στο RSVP-MP, το RSVP-MP εξετάζει τις υπάρχουσες καταστάσεις δέσμευσης και αποφασίζει αν υπάρχει κάποια εγκατεστημένη δέσμευση πόρων



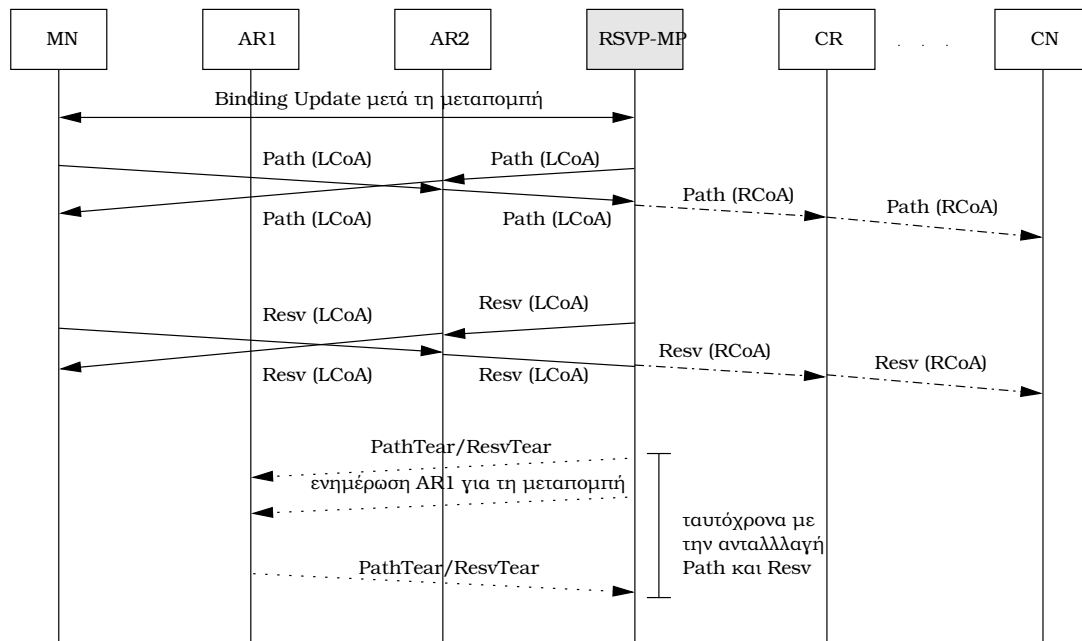
Σχήμα 5.2: Σηματοδοσία για εγκατάσταση δέσμευσης πόρων μέσω του RSVP-MP

για τον κινούμενο κόμβο. Αν όχι, τότε απλά ενημερώνει την τοπική binding cache. Αν ναι, δηλαδή αν ο κινητός κόμβος που κινήθηκε είχε εγκατεστημένη δέσμευση πόρων, το RSVP-MP θα πραγματοποιήσει μία σειρά ενεργειών προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το χρονικό διάστημα επανεγκατάστασης πλήρους ποιότητας υπηρεσίας.

Έστω το δίκτυο του Σχήματος 5.1 και η μεταπομπή του κινητού κόμβου MN από τον AR1 στο AR2. Ο δρομολογητής συνόρου του δικτύου πρόσβασης ER έχει τη λειτουργικότητα RSVP-MP. Ο κινητός κόμβος έχει λάβει νέα τοπική διεύθυνση μέριμας από τον AR2 και επιθυμεί την εγκατάσταση της δέσμευσης για τη σύνδεση του με τον ανταποκριτή κόμβο CN. Η διαδικασία της μεταπομπής γίνεται αντιληπτή από τον διαχειριστή κινητικότητας (MAP) είτε λόγω ίδιας συμμετοχής είτε μέσω ειδοποίησης από τον κινητό κόμβο με Binding Update. Μέσω του MAP, ειδοποιείται το RSVP-MP για τη μεταπομπή αυτή.

Το RSVP-MP ελέγχει τις δεσμεύσεις προς το εσωτερικό του δικτύου πρόσβασης για το αν αφορά καμία από αυτές η μεταπομπή. Αν υπάρχουν μία ή περισσότερες καταστάσεις δέσμευσης που αφορούν την ίδια RCoA με αυτή που σχετίζεται με τη μεταπομπή, το RSVP-MP δημιουργεί ένα μήνυμα Path που περιέχει την IP διεύθυνση του ανταποκριτή κόμβου, προσποιούμενο τον πράκτορα RSVP στον ανταποκριτή κόμβο. Στο μήνυμα Path αυτό ο κινητός κόμβος απαντά με το αντίστοιχο μήνυμα Resv, το οποίο όταν φτάσει στο RSVP-MP και επεξεργαστεί, ολοκληρώνει την επαναδέσμευση των πόρων για την κατεύθυνση της ροής προς τον κινητό κόμβο (downlink).

Ταυτόχρονα με την έναρξη των διαδικασιών από το RSVP-MP, ο κινητός κόμβος δημιουργεί και στέλνει ένα αντίστοιχο Path μήνυμα προς τον ανταποκριτή κόμβο CN, προκειμένου να επανεγκαταστήσει τις δεσμεύσεις για τη ροή που κατευθύνεται προς τον ανταποκριτή κόμβο (uplink). Όταν το μήνυμα φτάσει στο RSVP-MP, υφίσταται την επεξεργασία που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο και προωθείται προς τον κινητό κόμβο ως ένα απλό μήνυμα ανανέωσης κατάστασης.



Σχήμα 5.3: Σηματοδοσία RSVP μέσω του RSVP-MP μετά από μεταπομπή

Παράλληλα, όμως, το RSVP-MP απαντά στο μήνυμα αυτό, δημιουργώντας ένα νέο Resv μήνυμα προς τη νέα LCoA του κινητού κόμβου, χωρίς να περιμένει τη λήψη του αντίστοιχου Resv από τον ανταποκριτή κόμβο. Η αναλυτική ανταλλαγή της σηματοδοσίας RSVP μετά από μία μεταπομπή μέσω του RSVP-MP αναλύεται στο Σχήμα 5.3.

Στο Σχήμα 5.3 φαίνεται ότι η σηματοδοσία RSVP που έχει κάποια επίπτωση στις μεταβολές καταστάσεων δέσμευσης περιορίζεται στο εσωτερικό του δικτύου πρόσβασης. Τα μηνύματα Path και Resv που μεταδίδονται στο δίκτυο κορμού και προς τον ανταποκριτή κόμβο χρησιμεύουν απλώς ως μηνύματα ενημέρωσης-ανανέωσης κατάστασης. Δεν πραγματοποιείται καμμία μεταβολή κατάστασης RSVP σε δρομολογητές εκτός της περιοχής, η οποία ελέγχεται από το RSVP-MP.

Μία παράλληλη δραστηριότητα του RSVP-MP θα μπορούσε να είναι και η αποδέσμευση των πόρων που αφορούσαν στην επικοινωνία κινητού κόμβου-ανταποκριτή κόμβου μέσω της παλαιάς LCoA και του AR1 στο εσωτερικό του δικτύου πρόσβασης. Η ρητή διαγραφή των καταστάσεων διαδρομής και δέσμευσης των ροών προς τον κινητό κόμβο (downlink) θα πρέπει να πραγματοποιείται μέσω της αποστολής των αντίστοιχων PathTear και ResvTear μηνυμάτων από το RSVP-MP προς τον παλιό δρομολογητή πρόσβασης AR1.

Η αποδέσμευση των πόρων για την αντίθετη κατεύθυνση (uplink), καθώς και η αποδέσμευση των ασύρματων πόρων που ελέγχονται από τον δρομολογητή πρόσβασης είναι δυσκολότερη. Απαιτείται η αποστολή ειδοποίησης μέσω κάποιου είδους σηματοδοσίας προς τον δρομολογητή πρόσβασης για την πραγματοποιηθείσα μεταπομπή του κινητού κόμβου (είτε από την αρμόδια

αρχή διαχείρισης MAP ή GFA είτε από το RSVP-MP). Μόλις λάβει την κατάλληλη ειδοποίηση ο παλιός δρομολογητής πρόσβασης μπορεί να αποδεσμεύσει τους πόρους στην ασύρματη ζεύξη, και να εκκινήσει τη διαδικασία αποδέσμευσης πόρων προς τον ανταποκριτή κόμβο (uplink). Με τον τρόπο αυτό μπορεί να αποφευχθεί η αναμονή μέχρι να εκπνεύσουν οι προσωρινές καταστάσεις στο δίκτυο πρόσβασης και να διατηρηθεί η αποδοτικότητα του δικτύου σε υψηλά επίπεδα. Είναι όμως μία προσέγγιση που απαιτεί νέα λειτουργικότητα και υποστήριξη πρωτοκόλλων, γεγονός που εμποδίζει την άμεση εκμετάλλευσή της.

5.3 Στρατηγικές Εφαρμογής RSVP-MP

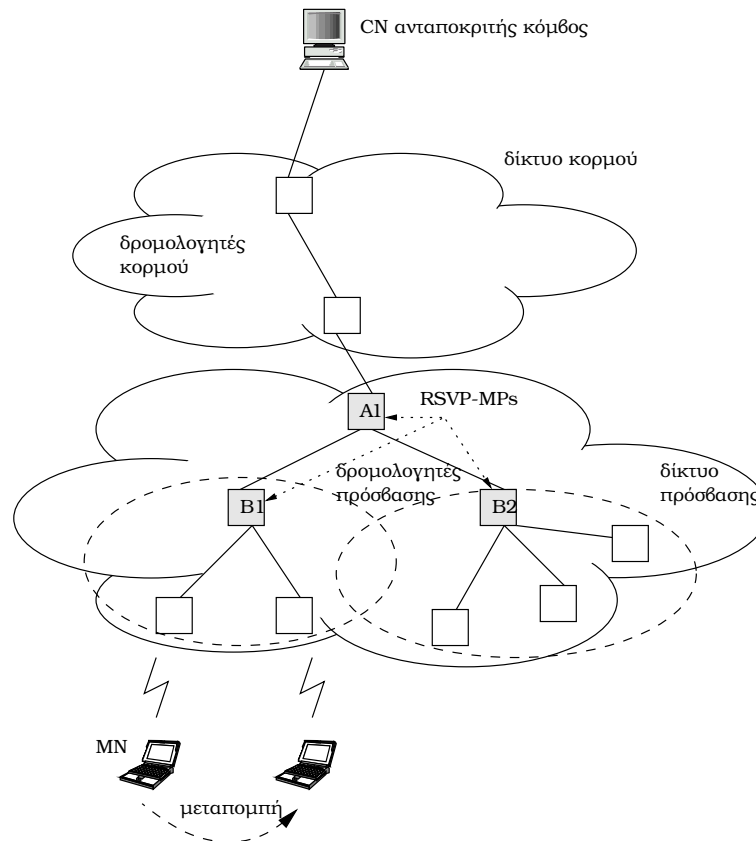
Η επιπλέον λειτουργικότητα που εισάγεται στον δρομολογητή συνόρου, ώστε να μετατραπεί σε RSVP-MP εισάγει πολυπλοκότητα και πιθανή ανελαστικότητα για επέκταση της δικτυακής υποδομής. Αναζητούνται, επομένως, τρόποι για την αποτελεσματική κατανομή της λειτουργικότητας του RSVP-MP σε ανεξάρτητους δρομολογητές με σκοπό τη διευκόλυνση πιθανών μελλοντικών δικτυακών επεκτάσεων.

Οι τρόποι εφαρμογής του RSVP-MP αφορούν δίκτυα πρόσβασης με ιεραρχική δομή, αφού στηρίζεται βασικά σε ιεραρχικούς μηχανισμούς διαχείρισης κινητικότητας. Ο προφανής και απλός τρόπος εισαγωγής του RSVP-MP είναι σε διαφορετικά επίπεδα ενός δικτύου με δενδρική δομή, και συγκεκριμένα στην κορυφή επιλεγμένων υποδένδρων. Εναλλακτικά, θα μπορούσε το δίκτυο πρόσβασης να διαθέτει πολλαπλούς RSVP-MP δρομολογητές στο ίδιο επίπεδο ιεραρχίας, π.χ. στα σύνορα του δικτύου πρόσβασης. Η τοπολογία αυτή προϋποθέτει διασύνδεση των δρομολογητών του επιπέδου αυτού και αυξημένες απαιτήσεις σηματοδοσίας μεταξύ τους.

5.3.1 Εφαρμογή RSVP-MP σε Ιεραρχικά Δίκτυα

Σε μεγάλα δίκτυα πρόσβασης, εκτός από την αποτελεσματική αξιοποίηση της ζεύξης με τον εξωτερικό πάροχο υπηρεσιών Internet, είναι απαραίτητη και η κατάλληλη εκμετάλλευση των εσωτερικών πόρων (εύρος ζώνης ζεύξεων) του δικτύου πρόσβασης.

Η υποστήριξη πολλαπλών RSVP-MP σε διαδοχικά επίπεδα ιεραρχίας είναι απλή. Η λειτουργικότητα RSVP-MP μπορεί να προστεθεί σε κάθε πράκτορα κινητικότητας (mobility agent) στην ιεραρχία του σχήματος διαχείρισης κινητικότητας που εφαρμόζεται. Η πλήρης εφαρμογή RSVP-MP σε όλους τους πράκτορες, αν και οδηγεί σε θεαματική αύξηση της αξιοποίησης και βελτίωση της επεκτασιμότητας δεν είναι πάντα απαραίτητη. Συνήθως μπορούν να επιτευχθούν τα ίδια αποτελέσματα με σταδιακή αναβάθμιση των κρίσιμων κόμβων μόνο. Ένα παράδειγμα δικτυακής τοπολογίας με ιεραρχική δομή παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.4.



Σχήμα 5.4: Τοπολογία ιεραρχικού δικτύου πρόσβασης με RSVP-MP

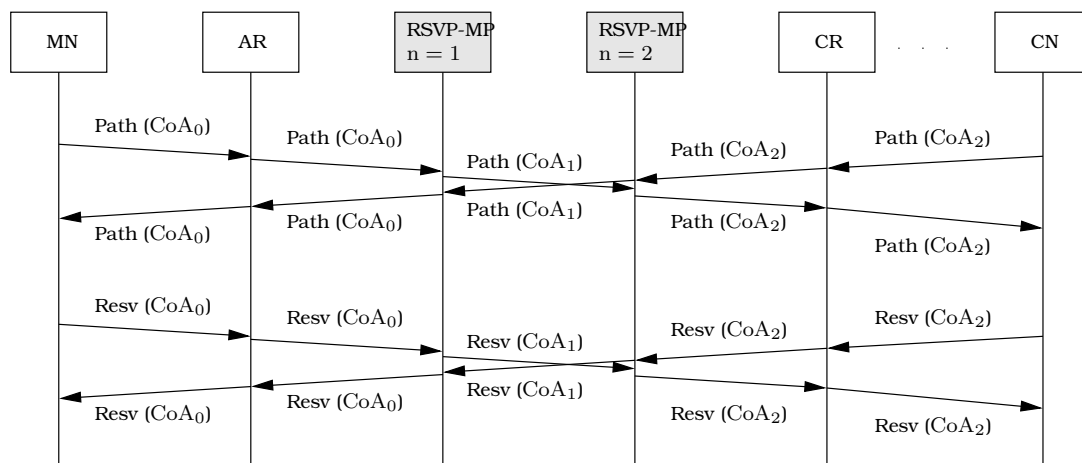
Η επιλογή των δρομολογητών στους οποίους θα τοποθετηθούν RSVP-MPs εξαρτάται από πολλούς παράγοντες: την υφιστάμενη δικτυακή υποδομή, την κινητικότητα των χρηστών, αλλά και την κίνηση που εξυπηρετεί. Ένα RSVP-MP που είναι τοποθετημένο ψηλά στην ιεραρχία του δικτύου πρόσβασης (κοντά στο σύνορο), θα εξυπηρετεί περισσότερες RSVP συνδέσεις από ένα άλλο RSVP-MP που βρίσκεται σε δρομολογητή πρόσβασης πρώτου επιπέδου, που εξυπηρετεί μόνο τις υποκείμενες κυψέλες. Η πολυπλοκότητα και ο υπολογιστικός φόρτος στους δρομολογητές αυξάνεται καθώς η τοποθέτηση των δρομολογητών πλησιάζει το σύνορο του δικτύου πρόσβασης.

Διαισθητικά, οι δρομολογητές με λειτουργικότητα RSVP-MP θα πρέπει να τοποθετούνται στο σύνορο του δικτύου πρόσβασης, και στη συνέχεια να επεκτείνονται προς τη βάση. Τα RSVP-MP που βρίσκονται στο άκρο ενός υποδικτύου αποκρύπτουν την κινητικότητα των κινητών κόμβων που εξυπηρετούν. Οι κατάλοιπες δεσμεύσεις πόρων (stale reservations), δηλαδή αυτές που αντιστοιχούν στην παλαιά LCoA του κινητού, περιορίζονται μέσα στα όρια του υποδικτύου. Όπως θα φανεί και στο Κεφάλαιο 6, οι κατάλοιπες δεσμεύσεις αυξάνονται με την κίνηση δεδομένων και την κινητικότητα. Συνεπώς, τα μικρότερα υποδίκτυα που μεταφέρουν λιγότερη κίνηση είναι λιγότερο ευάλωτα από τα μεγαλύτερα.

Λειτουργία Ιεραρχικών Δικτύων με RSVP-MP

Σε ένα ιεραρχικό δίκτυο με πολλαπλά επίπεδα, ένας κινητός κόμβος είναι συσχετισμένος με πολλές διευθύνσεις μέριμνας, μία για κάθε επίπεδο ιεραρχίας. Για παράδειγμα, ένας κινητός κόμβος θα είναι προσβάσιμος μέσω της CoA_L , τη γενική του διεύθυνση μέριμνας έξω από το δίκτυο πρόσβασης, μέσω της διεύθυνσης CoA_{L-1} μετά τον δρομολογητή συνόρου στο δίκτυο πρόσβασης και μέχρι το επόμενο ιεραρχικό επίπεδο, και ούτω καθεξής μέχρι το κατώτατο επίπεδο ιεραρχίας, στο οποίο θα χρησιμοποιείται η διεύθυνση CoA_0 . Η λειτουργικότητα αυτή είναι μέρος του πλαισίου ιεραρχικής διαχείρισης κινητικότητας που υλοποιείται στο δίκτυο πρόσβασης.

Σε ένα δίκτυο πρόσβασης με πλήρη εφαρμογή RSVP-MP σε όλους τους δρομολογητές, κάθε RSVP-MP είναι τοποθετημένο στην κορυφή των ιεραρχικών υποδένδρων, και αναλαμβάνει τον έλεγχο του υποκείμενου υποδικτύου πρόσβασης. Όταν ενσωματώνει και τη λειτουργία του πράκτορα κινητικότητας, είναι υπεύθυνο για την αναχαίτιση των πακέτων που κατευθύνονται προς την «εξωτερική» διεύθυνση του κινητού κόμβου και την ενθυλάκωση τους προς την «εσωτερική» διεύθυνση του. Επιπλέον, πραγματοποιεί και την αναγκαία επεξεργασία στη σηματοδοσία RSVP, όπως περιγράφηκε στην Παράγραφο 5.2.



Σχήμα 5.5: Σηματοδοσία για εγκατάσταση δέσμευσης πόρων σε ιεραρχικό δίκτυο RSVP-MP

Μία επίδειξη της απλότητας της ιδέας αυτής φαίνεται στο Σχήμα 5.5, όπου περιγράφεται η ανταλλαγή σηματοδοσίας RSVP για δέσμευση πόρων σε ένα δίκτυο πρόσβασης, παρόμοιο με αυτό του Σχήματος 5.4. Ο κινητός κόμβος MN είναι συνδεδεμένος με ένα δρομολογητή πρόσβασης, που δεν διαθέτει λειτουργικότητα RSVP-MP. Μία συστάδα δρομολογητών πρόσβασης ελέγχεται από ένα RSVP-MP στο ιεραρχικό επίπεδο 1, και ο δρομολογητής συνόρου του δικτύου πρόσβασης (επίσης με λειτουργικότητα RSVP-MP) βρίσκεται στο ιεραρχικό επίπεδο 2. Ο κινητός κόμβος είναι συσχετισμένος με τρεις διευθύνσεις μέριμνας. CoA_0 είναι η τοπική διεύθυνση μέριμνας με την

οποία συσχετίζεται ο κινητός κόμβος με τον δρομολογητή πρόσβασης. CoA_1 είναι η διεύθυνση μέριμνας του κινητού που γνωρίζει ο δρομολογητής στο επίπεδο 1. CoA_2 είναι η «εξωτερική» IP διεύθυνση, η IP διεύθυνση με την οποία ο κινητός κόμβος είναι προσβάσιμος από το εξωτερικό δίκτυο.

Το πλεονέκτημα της ύπαρξης ενδιάμεσων διευθύνσεων μέριμνας είναι ότι η κινητικότητα σε ένα υποδίκτυο του δικτύου πρόσβασης δεν θα επιφέρει επιπλέον επεξεργαστικό φορτίο στον δρομολογητή συνόρου, αφού διεύθυνση CoA_2 θα παραμείνει σταθερή, ενώ η CoA_1 μπορεί να αλλάξει.

Σε ένα δίκτυο πρόσβασης με μερικώς εφαρμοσμένη την τεχνολογία RSVP-MP, συνήθως θα πρέπει να βρίσκεται ένα RSVP-MP στο σύνορο του δικτύου, και κατά βούληση στα σύνορα των υποδικτύων. Το βέλτιστο επίπεδο εφαρμογής εξαρτάται από τους διαθέσιμους πόρους στη ζεύξη ανάμεσα στο δίκτυο πρόσβασης και στο δίκτυο κορμού, το βάθος και το πλάτος της ιεραρχικής τοπολογίας του δικτύου, αλλά και τη χωρητικότητα των ζεύξεων ανάμεσα στα ιεραρχικά επίπεδα. Επιπλέον πρέπει να συνυπολογιστεί και η κινητικότητα των χρηστών, που κατά κανόνα αυξάνει τις απαιτήσεις σε υποδομή.

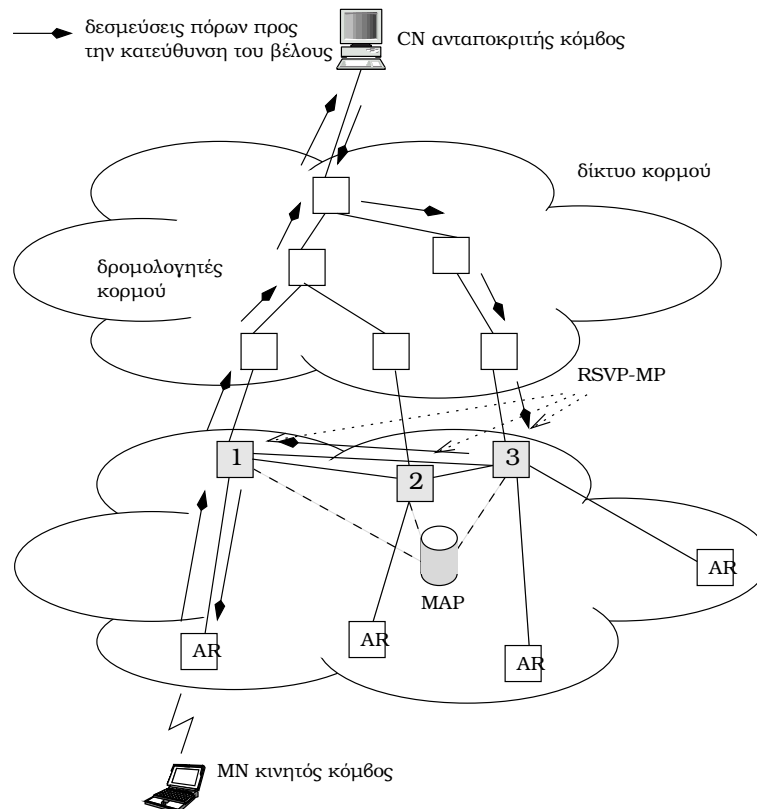
Ακριθέστερες εκτιμήσεις βρίσκονται στο Κεφάλαιο 6, όπου αποτυπώνονται μερικές τάσεις, οι οποίες βοηθούν στο σχεδιασμό του βέλτιστου δικτύου πρόσβασης, ανάλογα με τις προβλεπόμενες ανάγκες.

5.3.2 Υποστήριξη Πολλαπλών RSVP-MP στο Ίδιο Ιεραρχικό Επίπεδο

Η υποστήριξη πολλαπλών RSVP-MP στο ίδιο ιεραρχικό επίπεδο είναι δύσκολη και απαιτεί αρκετές τροποποιήσεις στους μηχανισμούς δρομολόγησης [90]. Κατ' αρχή, απαιτείται η ανεξαρτητοποίηση της αρμόδιας αρχής ελέγχου κινητικότητας (MAP) από τους δρομολογητές συνόρου (RSVP-MP). Ακόμη, επιβάλλεται ο συγχρονισμός του MAP με κάθε ένα από τα RSVP-MP για τη συνεχή ενημέρωσή τους με τις μεταβολές της δικτυακής τοπολογίας (δηλαδή για τις μεταπομπές των κινητών). Ένα παράδειγμα δικτύου πρόσβασης με τρία RSVP-MP στο σύνορο του δικτύου παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.6.

Στην περίπτωση τοποθέτησης πολλαπλών RSVP-MP στο ίδιο επίπεδο, η διαδικασία δέσμευσης πόρων για τις δύο κατευθύνσεις (uplink και downlink) μπορεί να είναι αρκετά πολύπλοκη, αφού είναι πιθανό, ως αποτέλεσμα της δυναμικής δρομολόγησης, οι ροές προς αντίθετες κατευθύνσεις να ακολουθούν διαφορετικές διαδρομές, και να διασχίζουν διαφορετικά RSVP-MP. Στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζεται η γενική περίπτωση με μία δικατευθυντική ροή δεδομένων με απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας μεταξύ κινητού και ανταποκριτή κόμβου. Η ροή δεδομένων προς τον κινητό κόμβο (downlink) διασχίζει το RSVP-MP 1, ενώ η ροή προς τον ανταποκριτή κόμβο το RSVP-MP 3.

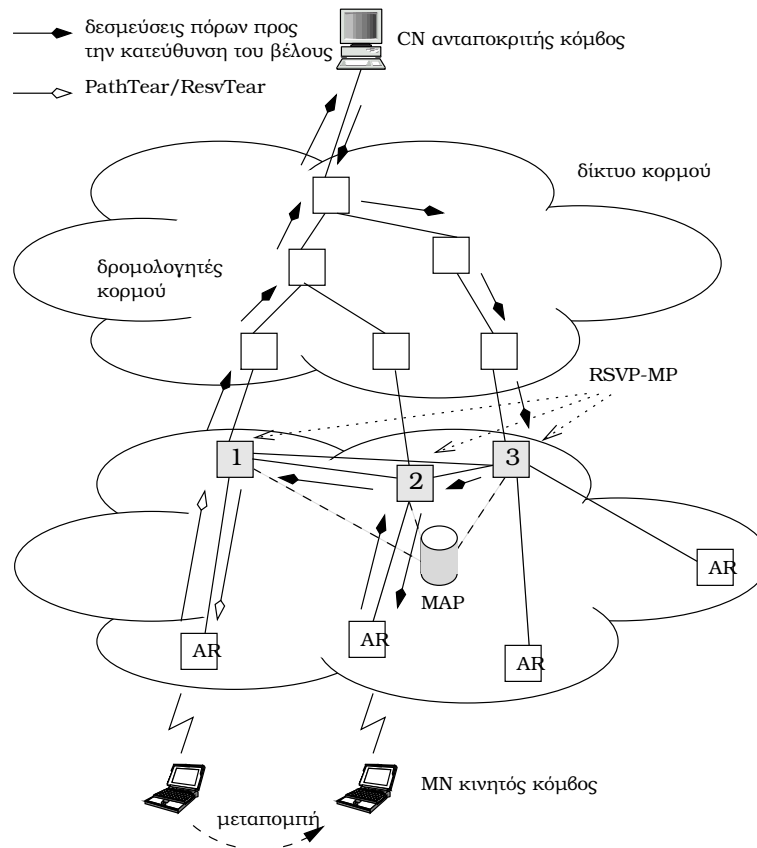
Η δυσκολία στην τοποθέτηση πολλαπλών RSVP-MP στα σύνορα του δικτύου πρόσβασης έγκει-



Σχήμα 5.6: Δίκτυο πρόσβασης με πολλαπλά RSVP-MP στα σύνορα

ται στο χειρισμό των μεταπομπών. Στο Σχήμα 5.7, ο κινητός κόμβος πραγματοποιεί μεταπομπή σε ένα δρομολογητή πρόσβασης συνδεδεμένο με το RSVP-MP 2. Στην περίπτωση αυτή, η αρχή ελέγχου κινητικότητας (MAP) θα πρέπει να ενημερώσει για τη μεταπομπή κάθε RSVP-MP που βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο. Αν κάποιο RSVP-MP εξυπηρετεί την εξερχόμενη κίνηση (uplink) του κινητού (RSVP-MP 1 στη συγκεκριμένη περίπτωση), θα μεταδώσει την πληροφορία αυτή σε όλα τα RSVP-MP του ίδιου επιπέδου, ότι είναι δηλαδή ο εξυπηρετητής των εξερχόμενων ροών του κινητού. Το μήνυμα περιέχει την ταυτότητα του RSVP-MP, την RCoA του κινητού, καθώς και τις ροές που εξυπηρετούνται. Με τον τρόπο αυτό, το RSVP-MP 2 θα ενημερωθεί για το ότι ήδη υπάρχει κάποιο άλλο RSVP-MP που χειρίζεται την εξερχόμενη κίνηση του κινητού. Προκειμένου να παραμείνουν οι καταστάσεις δέσμωσης πόρων στο δίκτυο κορμού αναλλοίωτες, το RSVP-MP 2 θα πρέπει να δρομολογήσει (μέσω ενθυλάκωσης) την εξερχόμενη κίνηση του κινητού μέσω του RSVP-MP 1.

Η διαδικασία της επανεγκατάστασης της εξερχόμενης κίνησης ξεκινάει με την αποστολή ενός Path μηνύματος από τον κινητό κόμβο, το οποίο αναχαιτίζεται στο RSVP-MP 2. Η διεύθυνση RCoA που αντιστοιχεί στην LCoA του μηνύματος συγκρίνεται με τη λίστα των διευθύνσεων που εξυπηρετούνται από όλα τα RSVP-MP, και αν βρεθεί υπάρχουσα εγγραφή, εγκαθίσταται δρομολόγηση προς το αντίστοιχο RSVP-MP (RSVP-MP 1). Μία πιθανή ευελιξία που μπορεί να παρέχει το



Σχήμα 5.7: Δεσμεύσεις σε ένα δίκτυο πρόσβασης με πολλαπλά RSVP-MP στα σύνορα μετά από μεταπομπή

σχήμα αυτό είναι η δυνατότητα αλλαγής της RCoA αν δεν υπάρχουν ενεργές συνδέσεις ποιότητας υπηρεσίας, ώστε η νέα RCoA να αντιστοιχεί στο RSVP-MP 2.

Η εισερχόμενη κίνηση στο δίκτυο (downlink) συνεχίζει να εξυπηρετείται μέσω του RSVP-MP 3, αφού δεν έχει αλλάξει η RCoA. Όταν το RSVP-MP 3 λάβει την ειδοποίηση μεταπομπής από το MAP, πρέπει να στείλει ένα μήνυμα Path προς τη νέα LCoA για την επανεγκατάσταση της δέσμευσης για την εισερχόμενη κίνηση, στο οποίο ο κινητός κόμβος απαντά με το αντίστοιχο Resv. Η σηματοδότηση και για τις δύο κατευθύνσεις της ροής δεδομένων πραγματοποιείται παράλληλα. Οι δεσμεύσεις πόρων και οι κατάλληλες δρομολογήσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.7. Προαιρετικά, μπορεί να αποδεσμευθεί ρητά και η προηγούμενη διαδρομή προς τον παλιό δρομολογητή δρομολόγησης, όπως δείχνουν τα μηνύματα PathTear/ResvTear.

Συμπερασματικά, η διαδικασία υλοποίησης περισσότερων RSVP-MP στο σύνορο του δικτύου είναι αρκετά πολύπλοκη και με πολλές ειδικές περιπτώσεις. Η δικαιολόγηση της επιπλέον πολυπλοκότητας για τη βελτίωση της επεκτασιμότητας εξαρτάται από τις ειδικότερες συνθήκες κάθε δικτύου πρόσβασης.

Κεφάλαιο 6

Ανάλυση Αποδοτικότητας

Η διαλειτουργικότητα της αρχικής προδιαγραφής RSVP με το Mobile IP προκαλεί σημαντικά προβλήματα, όπως αναλύεται στο Κεφάλαιο 4. Η εισαγωγή του RSVP-MP (Κεφάλαιο 5) στοχεύει στη βελτίωση της αναποτελεσματικότητας αυτής με τον περιορισμό τυχόν παρενεργειών της κινητικότητας στα όρια του δικτύου πρόσβασης ή του υποδικτύου πρόσβασης, που ελέγχεται από ένα RSVP-MP.

Οι βασικότερες παρενέργειες είναι η υποαξιοποίηση των πόρων των δικτύων, αλλά και η εισαγωγή χρονικών περιόδων κατά τις οποίες οι μεταπεμφθείσες συνεδρίες (οι συνεδρίες με συμμετέχοντα ένα κινητό κόμβο που πραγματοποιεί μεταπομπή) δεν απολαμβάνουν την απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας.

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η βελτίωση του χρόνου επανεγκατάστασης των δεσμεύσεων για τις ροές με ποιότητα υπηρεσίας μετά από μεταπομπή, και τονίζεται ο περιορισμός της ανταλλαγής σηματοδοσίας στο εσωτερικό του δικτύου πρόσβασης. Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά η αξιοποίηση των πόρων του δικτύου με και χωρίς τη χρήση RSVP-MP. Η ανάλυση εστιάζεται στον έλεγχο αποδοχής και στην επιδείνωση που παρουσιάζει λόγω του φόρτου των κατάλοιπων δεσμεύσεων από τις μεταπομπές. Ακόμη περιγράφεται η κατανομή των πόρων του δικτύου και η ποσοτική βελτίωση στην αξιοποίησή τους με τη χρήση του RSVP-MP. Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων αυτών χρησιμοποιούνται ένα απλό και ένα συνθετότερο μοντέλο δικτυακής τοπολογίας, τα οποία αναλύονται τόσο θεωρητικά όσο και με χρήση προσομοίωσης.

6.1 Χρόνος Επανεγκατάστασης Δεσμεύσεων

Στις περισσότερες τεχνολογίες πρόσβασης, ο κινητός κόμβος MN είναι συνδεδεμένος με ένα σταθμό βάσης κάθε χρονική στιγμή. Συνεπώς, ο MN μπορεί να εκκινήσει τη διαδικασία επανεγκατάστασης των δεσμεύσεων, μετά την ολοκλήρωση της μεταπομπής στο φυσικό επίπεδο, αλλά και

την ανταλλαγή της σηματοδοσίας κινητικότητας. Αν και ο κινητός κόμβος θα είναι προσβάσιμος (τα πακέτα θα δρομολογούνται σωστά σε αυτόν μέσω της νέας διεύθυνσης μέριμνας), οι εγκατεστημένες δεσμεύσεις πόρων για εισερχόμενες και εξερχόμενες ροές δεν θα ισχύουν πια. Για το λόγο αυτό, πρέπει να οι δεσμεύσεις αυτές να επανεγκατασταθούν το συντομότερο δυνατό, για να ελαχιστοποιηθεί το διάστημα στο οποίο τα διακινούμενα πακέτα λαμβάνουν υπηρεσία καλύτερης προσπάθειας (best effort).

Στη γενική περίπτωση, ο χρόνος που απαιτείται για την επανεγκατάσταση των δεσμεύσεων στην περίπτωση απλού RSVP είναι ανάλογος του χρόνου διαδρομής μετ' επιστροφής (round trip time) των πακέτων μεταξύ του κινητού κόμβου MN και του ανταποκριτή κόμβου CN, ενώ αντίστοιχα στην περίπτωση RSVP-MP εξαρτάται μόνο από την εσωτερική τοπολογία του δικτύου πρόσβασης. Επειδή ο χρόνος της μετ' επιστροφής διαδρομής μεταξύ δύο διαφορετικών σημείων στο Internet μπορεί να κυμαίνεται από μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου για κόμβους στο ίδιο τοπικό δίκτυο, σε αρκετά δευτερόλεπτα για κόμβους σε διαφορετικές ηπείρους ή συνδεδεμένους με αργές ζεύξεις, δεν μπορούμε να έχουμε ακριβείς μετρήσεις βελτίωσης.

Για ένα πρόχειρο υπολογισμό, ο χρόνος που απαιτείται θεωρείται συνάρτηση του αριθμού των βημάτων και της επεξεργασίας που υφίσταται το μήνυμα RSVP στους ενδιάμεσους δρομολογητές. Έστω ότι το δίκτυο πρόσβασης αποτελείται από a βήματα (επίπεδα) και ο αριθμός των διαδοχικών δρομολογητών από το σύνορο του δικτύου πρόσβασης μέχρι τον CN είναι c . Ο χρόνος επεξεργασίας ενός RSVP μηνύματος είναι p για κάθε RSVP δρομολογητή και $rp, r > 1$ για το RSVP-MP. Η καθυστέρηση για την επανεγκατάσταση των δεσμεύσεων μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

- Η σηματοδοσία στην περίπτωση του απλού RSVP παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5. Σε μία βελτιωμένη έκδοση, μπορεί να υποθεθεί ότι ο CN λαμβάνει το μήνυμα Binding Update της σηματοδοσίας κινητικότητας μαζί με το μήνυμα Path από τον MN για επανεγκατάσταση των δεσμεύσεων. Επομένως, η ολική καθυστέρηση θα αποτελείται από τον χρόνο που θα κάνει το πρώτο μήνυμα Path να φτάσει στον CN, τον χρόνο που θα κάνει το Path από τον CN στον MN, και τον χρόνο που θα κάνει το Resv από τον MN πίσω στον CN. Το Resv από τον CN προς τον MN, σε απόκριση του πρώτου Path, επιστρέφει παράλληλα με τη σηματοδοσία που εκκινεί ο CN, επομένως δεν λαμβάνεται υπόψη. Ο χρόνος αυτός είναι τα $3/2$ του χρόνου διαδρομής μετ' επιστροφή, δηλ. $t_{\text{RSVP}} = 3(a + c)p$.
- Στην περίπτωση RSVP-MP δεν απαιτείται να φτάσει η σηματοδοσία κινητικότητας στον CN, παρά μόνο μέχρι το RSVP-MP (Σχήμα 5.3). Επομένως, με τις ίδιες υποθέσεις, αν x ο αριθμός των RSVP-MP κόμβων στο εσωτερικό του δικτύου πρόσβασης, η καθυστέρηση θα είναι $t_{\text{RSVP-MP}} = 3(a - x)p + 3xrp$.

Επομένως, στην περίπτωση λειτουργίας RSVP-MP, η καθυστέρηση επανεγκατάστασης εξαρτάται μόνο από την τοπολογία του δικτύου πρόσβασης, ενώ στην περίπτωση RSVP, είναι ανάλογη της απόστασης του CN από τον MN. Η εισαγωγή του RSVP-MP αυξάνει μεν τον χρόνο επεξεργασίας των μηνυμάτων RSVP στους δρομολογητές που υλοποιούν τη λειτουργικότητα RSVP-MP, αλλά μειώνει το χρόνο διάδοσης του στο δίκτυο. Είναι μία ανταλλαγή (tradeoff), η οποία συνήθως έχει καλά αποτελέσματα σε περιπτώσεις όπου ο MN βρίσκεται μακριά από τον CN. Στη γενική περίπτωση, εκτιμάται ότι η αυξημένη πολυπλοκότητα μπορεί να δικαιολογηθεί στο άκρο του δικτύου πρόσβασης για την παροχή καλύτερων συνθηκών στους κινούμενους κόμβους που εξυπηρετούνται.

6.2 Αξιοποίηση Δικτύου

Η αναποτελεσματικότητα που υπάρχει στη διαλειτουργικότητα RSVP και Mobile IP, εκτός από χρονικές καθυστερήσεις, επιφέρει και σημαντικές σπατάλες πόρων με τη μορφή κατάλοιπων δεσμεύσεων για την ίδια συνεδρία. Η παραμονή των κατάλοιπων δεσμεύσεων πόρων για παλαιές ροές δεδομένων, δηλαδή για ροές που περιέχουν την παλαιά διεύθυνση μέριμνας του κινητού, προκαλεί σημαντική υποβάθμιση του βαθμού αξιοποίησης των υπαρχόντων πόρων.

Η ύπαρξη των κατάλοιπων δεσμεύσεων στο δίκτυο κορμού, εκτός του ότι καταναλώνει πολύτιμους πόρους χωρίς λόγο, προκαλεί επιδείνωση της παρεχόμενης υπηρεσίας στο δίκτυο πρόσβασης. Η διασύνδεση του δικτύου πρόσβασης με το δίκτυο κορμού ρυθμίζεται συνήθως με ένα Service Level Agreement, SLA (Σύμφωνο Επιπέδου Υπηρεσίας) ανάμεσα στους φορείς διαχείρισης των δικτύων πρόσβασης και κορμού. Συνήθως υπάρχει ένα προκαθορισμένο εύρος ζώνης που μπορεί να λάβει ποιότητα υπηρεσίας και η υπόλοιπη κίνηση είτε να απορρίπτεται είτε να λαμβάνει υπηρεσία καλύτερης προσπάθειας. Με βάση αυτά τα δεδομένα, οι κατάλοιπες δεσμεύσεις λόγω κινητικότητας επηρεάζουν αρνητικά τον έλεγχο αποδοχής στο σύνορο του δικτύου πρόσβασης, μειώνοντας τους διαθέσιμους πόρους.

Η εισαγωγή του RSVP-MP απαλοίζει τις κατάλοιπες δεσμεύσεις έξω από το δίκτυο πρόσβασης, αποκρύπτοντας εντελώς την κινητικότητα. Η σημαντικότητα της βελτίωσης αυτής παρουσιάζεται στις επόμενες παραγράφους, όπου παρέχονται τόσο η θεωρητική ανάλυση όσο και η αντίστοιχη προσομοίωση που εξετάζουν τις δύο περιπτώσεις. Θα παρουσιαστεί ένα απλό μοντέλο που δίνει αρκετά καλά αποτελέσματα σε απλές τοπολογίες δικτύων, και ένα συνθετότερο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πιο πολύπλοκα ιεραρχικά δίκτυα, όπου τα RSVP-MP μπορούν να τοποθετηθούν σε οποιαδήποτε βαθμίδα.

6.2.1 Απλή Τοπολογία Δικτύου Πρόσβασης

Στα δίκτυα πρόσβασης, συνήθως οι πόροι που διατίθενται στο εσωτερικό τους είναι άφθονοι, σε αντίθεση με τους πόρους που υπάρχουν εκτός των συνόρων τους, οι οποίοι θα πρέπει να χρησιμοποιούνται με περισσότερη σύνεση, δεδομένου ότι συνήθως ρυθμίζουν το κόστος πρόσβασης στο Internet. Το δικτυακό μοντέλο που παρουσιάζεται είναι εστιασμένο σε αυτές τις περιπτώσεις. Το θεωρητικό μοντέλο εκτιμά τις πιθανότητες απόρριψης αιτήσεων ποιότητας υπηρεσίας, ώστε να μπορούν να συγκριθούν οι σχετικές αποδόσεις του RSVP και RSVP-MP. Το θεωρητικό μοντέλο επιβεβαιώνεται από το αντίστοιχο μοντέλο προσομοίωσης, που συλλέγει μετρήσεις για τις ίδιες τοπολογίες δικτύων και μετράει το ποσοστό επιτυχίας ή αποτυχίας αιτήσεων παροχής ποιότητας υπηρεσίας, αλλά και ποσοτικοποιεί την αξιοποίηση του δικτύου [93, 92].

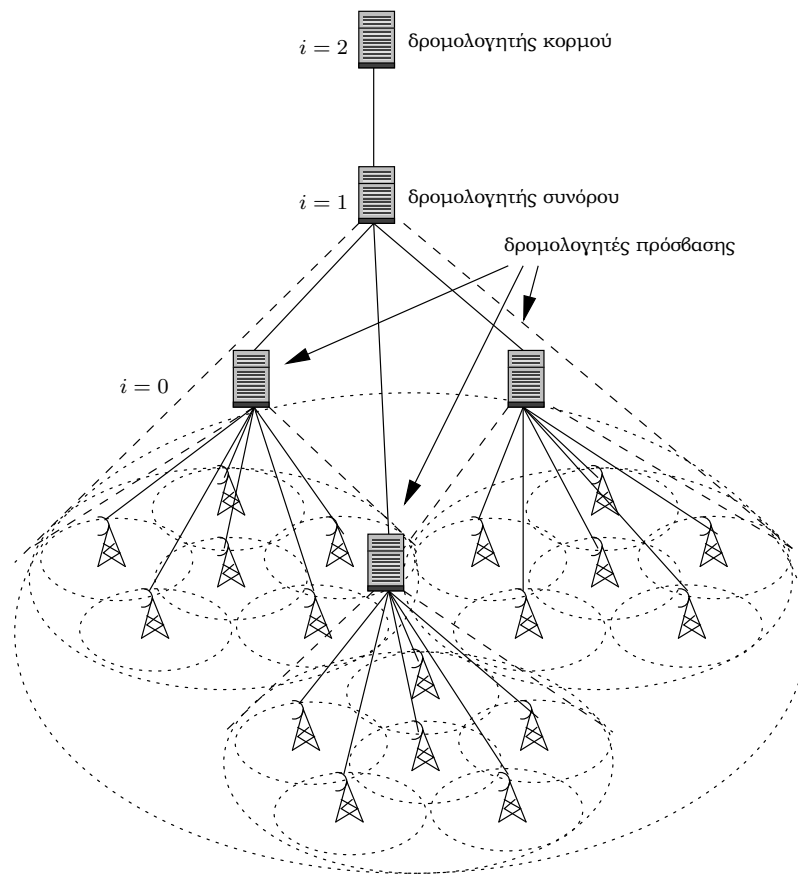
Μία συνεδρία RSVP θεωρείται ότι καταλαμβάνει ένα σταθερό πόρο (π.χ. 64 Kb/sec), το οποίο αντιστοιχεί σε ένα κανάλι στα δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος. Εφόσον η ποιότητα υπηρεσίας που παρέχεται είναι εγγυημένη και σταθερή, το δικτυακό μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί μεταγωγής κυκλώματος. Με βάση την υπόθεση αυτή, χρησιμοποιούνται στο εξής όροι όπως κλήση, κανάλι, κτλ. προκειμένου να βγουν χρήσιμα συμπεράσματα σε σχέση με τον έλεγχο αποδοχής και το βαθμό αξιοποίησης του δικτύου.

Η μελέτη επικεντρώνεται στη σύνδεση μεταξύ του δρομολογητή συνόρου πρόσβασης και του πρώτου δρομολογητή κορμού στον πάροχο Internet, εφόσον εκεί βρίσκεται η στενωπός στα δίκτυα πρόσβασης αυτής της κατηγορίας. Επιπλέον, η σύνδεση αυτή είναι συνήθως ένας ακριβός πόρος, και η βέλτιστη αξιοποίηση της αποτελεί οικονομική απαίτηση.

Θεωρητικό Μοντέλο

Στο θεωρητικό μοντέλο ανάλυσης απλών δικτύων πρόσβασης, η περιοχή κάλυψης διαιρείται σε συνεχόμενες κυψέλες/υποδίκτυα, που ελέγχονται από διαφορετικούς σταθμούς βάσης. Οι κυψέλες οργανώνονται σε συστάδες, οι οποίες ελέγχονται από τους αντίστοιχους δρομολογητές πρόσβασης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1. Το ιεραρχικό αυτό πρότυπο μπορεί να έχει πολλαπλά επίπεδα ανάμεσα στους δρομολογητές πρόσβασης και τον δρομολογητή συνόρου. Ο δρομολογητής συνόρου διοχετεύει όλη την εξερχόμενη κίνηση στο δίκτυο κορμού μέσω μία σύνδεσης με έναν δρομολογητή κορμού. Όλες οι συστάδες στο ίδιο επίπεδο θεωρούνται στατιστικά όμοιες και του ίδιου σχήματος, το οποίο για λόγους ανάλυσης θεωρείται κυκλικό με ακτίνα r_i (ο δείκτης i αντιστοιχεί στο ιεραρχικό επίπεδο της συστάδας).

Στο ιεραρχικό μοντέλο του δικτύου πρόσβασης του Σχήματος 6.1 θεωρούνται δύο επίπεδα ιεραρχίας. Οι συστάδες στο δεύτερο επίπεδο $i = 1$ αποτελούνται από N_0 συστάδες του πρώτου



Σχήμα 6.1: Τοπολογία δικτύου πρόσβασης

επιπέδου ($i = 0$). Για λόγους απλότητας και διευκόλυνσης της ανάλυσης, θεωρούνται οι παρακάτω υποθέσεις:

1. Η νέα κίνηση, δηλαδή οι νέες αιτήσεις για παροχή ποιότητας υπηρεσίας δημιουργούνται στο κατώτατο επίπεδο με διαδικασία Poisson με παράμετρο λ_0 .
2. Οι διάρκειες των κλήσεων μοντελοποιούνται ως ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές, που ακολουθούν την εκθετική κατανομή με παράμετρο μ .
3. Ο χρόνος παραμονής των κινητών κόμβων μέσα στα όρια μιας συστάδας δρομολογητών μοντελοποιείται ως τυχαία εκθετική μεταβλητή με παραμέτρους η_i ανάλογα με το ιεραρχικό επίπεδο της συστάδας [53]. Κάθε κινητός κόμβος συσχετίζεται με μία κλήση.
4. Χρησιμοποιείται το μοντέλο κινητικότητας υγρής ροής (fluid flow mobility model) για την περιγραφή των μεταπομπών ανάμεσα σε συστάδες, και συνεπώς για την εύρεση των η_i .

Με βάση την τελευταία υπόθεση, οι παράμετροι η_i για το χρόνο παραμονής στη συστάδα

δρομολογητών δίνονται στο [53].

$$\eta_i = \frac{2v}{\pi r_i} \quad (6.1)$$

όπου v η ταχύτητα του κινητού κόμβου. Η πιθανότητα μεταπομπής $P_{h,i}$ δίνεται ως εξής:

$$P_{h,i} = \frac{\eta_i}{\mu + \eta_i} \quad (6.2)$$

Η διάρκεια μίας συνεδρίας σε μια συστάδα (ελάχιστος χρόνος ανάμεσα στον χρόνο παραμονής στη συστάδα και στη διάρκεια της συνεδρίας) ακολουθεί εκθετική κατανομή με παράμετρο $\mu_i = \mu + \eta_i$.

Ο στόχος του αναλυτικού μοντέλου είναι να υπολογίσει την πιθανότητα απόρριψης στη σύνδεση μεταξύ του δικτύου πρόσβασης και κορμού, δεδομένων του ρυθμού νέων αφίξεων λ , την κινητικότητα των χρηστών και τον αριθμό των διαθέσιμων καναλιών c_i σε κάθε ενδιάμεσο δρομολογητή του επιπέδου i . Κάθε συνεδρία RSVP θεωρείται ότι καταλαμβάνει ένα κανάλι. Η πιθανότητα απόρριψης (blocking probability) στους δρομολογητές του επιπέδου i συμβολίζεται με $P_{b,i}$. Ο ρυθμός γεννήσεων μεταπομπών στο χαμηλότερο επίπεδο $\lambda_{h,0}$ ικανοποιεί τη σχέση:

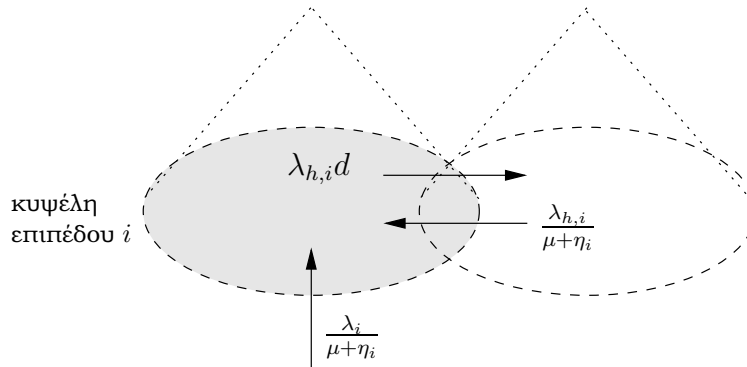
$$\lambda_{h,0} = P_{h,0} (\lambda_0 + \lambda_{h,0}) (1 - P_{b,0}) \quad (6.3)$$

όπου η πιθανότητα $P_{b,0}$ υπολογίζεται με βάση τον τύπο Erlang-B:

$$P_{b,0} = \frac{\alpha_0^{c_0}/c_0!}{\sum_{i=0}^{c_0} \alpha_0^i/i!} \quad (6.4)$$

Στην εξίσωση (6.3) ο όρος $\lambda_0 + \lambda_{h,0}$ αναπαριστάνει το συνολικό ρυθμό κίνησης λόγω νέων αφίξεων και μεταπομπών στη συστάδα δρομολογητών του χαμηλότερου επιπέδου. Πολλαπλασιάζοντας τον όρο αυτό με $(1 - P_{b,0})$, δηλαδή την πιθανότητα αποδοχής της κίνησης, εξάγεται ο «ενεργός» ρυθμός κίνησης στη συστάδα. Τέλος, πολλαπλασιάζοντας τον «ενεργό» ρυθμό με την πιθανότητα μεταπομπής $P_{h,0}$, προκύπτει ο ρυθμός μεταπομπής στη γειτονική συστάδα. Σε συνθήκες σταθερής κατάστασης, ο ρυθμός αυτός είναι ο ίδιος σε όλες τις συστάδες του ίδιου επιπέδου.

Στο Σχήμα 6.2 απεικονίζεται η συνολική προσφερόμενη κίνηση α_0 που προσφέρεται στη συστάδα του χαμηλότερου επιπέδου (κυψέλη). Το φορτίο κίνησης λόγω νέων αιτήσεων δέσμευσης είναι $\lambda_0/(\mu + \eta_0)$, ενώ η αντίστοιχη κίνηση που προκαλείται από μεταπομπές συνδέσεων από γειτονικές κυψέλες είναι $\lambda_{h,0}/(\mu + \eta_0)$. Τέλος, οι κατάλοιπες δεσμεύσεις που εμφανίζονται στην κυψέλη από μεταπομπές συνδέσεων σε γειτονικές κυψέλες θεωρείται ότι προσφέρουν κίνηση $\lambda_{h,0}d$.



Σχήμα 6.2: Ανάλυση προσφερόμενης κίνησης σε μία κυψέλη

Επομένως, η συνολική προσφερόμενη κίνηση α_0 είναι

$$\alpha_0 = \frac{\lambda_0 + \lambda_{h,0}}{\mu + \eta_0} + \lambda_{h,0}d \quad (6.5)$$

Στο επόμενο επίπεδο, οι νέες αφίξεις φθάνουν στους δρομολογητές με ρυθμό $\lambda_1 = N_0\lambda_0(1 - P_{b,0})$. Ο ρυθμός μεταπομπών μεταξύ δρομολογητών αυτού του επιπέδου είναι

$$\lambda_{h,1} = P_{h,1}(\lambda_1 + \lambda_{h,1})(1 - P_{b,1}) \quad (6.6)$$

όπου

$$P_{b,1} = \frac{\alpha_1^{c_1}/c_1!}{\sum_{i=0}^{c_1} \alpha_1^i/i!} \quad \alpha_1 = \frac{N_0\lambda_0(1 - P_{b,0})}{\mu + \eta_1} + N_0\lambda_{h,0}d \quad (6.7)$$

Όταν χρησιμοποιείται το απλό RSVP, η συνολική κίνηση που περνάει από τον δρομολογητή συνόρου πρόσβασης στον πρώτο δρομολογητή κορμού είναι

$$\alpha_{\text{RSVP}} = \frac{N_0\lambda_0(1 - P_{b,0})}{\mu + \eta_1}(1 - P_{b,1}) + N_0\lambda_{h,0}d \quad (6.8)$$

ενώ στην περίπτωση RSVP-MP, η συνολική κίνηση είναι

$$\alpha_{\text{RSVP-MP}} = \frac{N_0\lambda_0(1 - P_{b,0})}{\mu + \eta_1}(1 - P_{b,1}) \quad (6.9)$$

Αφού ο δρομολογητής συνόρου είναι μοναδικός, προκύπτει $P_{h,1} = 0$, και συνεπώς $\lambda_{h,1} = 0$ και $\eta_1 = 0$. Στην περίπτωση αυτή οι εξισώσεις (6.8) και (6.9) μπορούν να απλοποιηθούν:

$$\alpha_{\text{RSVP}} = \frac{N_0\lambda_0(1 - P_{b,0})}{\mu}(1 - P_{b,1}) + N_0\lambda_{h,0}d \quad (6.10)$$

$$\alpha_{\text{RSVP-MP}} = \frac{N_0 \lambda_0 (1 - P_{b,0})}{\mu} (1 - P_{b,1}) \quad (6.11)$$

Η πιθανότητα απόρριψης αιτήσεων μεταξύ των δρομολογητών συνόρου και κορμού είναι

$$P_{b,\text{RSVP}} = \frac{\alpha_{\text{RSVP}}^{c_1}/c_1!}{\sum_{i=0}^{c_1} \alpha_{\text{RSVP}}^i/i!} \quad (6.12)$$

$$P_{b,\text{RSVP-MP}} = \frac{\alpha_{\text{RSVP-MP}}^{c_1}/c_1!}{\sum_{i=0}^{c_1} \alpha_{\text{RSVP-MP}}^i/i!} \quad (6.13)$$

Μοντέλο Προσομοίωσης

Με βάση την τοπολογία του δικτύου πρόσβασης που παριστάνεται στο Σχήμα 6.1, και τις υποθέσεις που περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ένα πρόγραμμα προσομοίωσης. Το μοντέλο προσομοίωσης επέτρεψε τη συλλογή ακριβέστερων μετρήσεων, αλλά και επιπλέον στοιχείων πέρα από την πιθανότητα απόρριψης, όπως το ποσοστό κατάληψης των πόρων του δικτύου από ενεργές και κατάλοιπες δεσμεύσεις σε διάφορα επίπεδα.

Η προσομοίωση είναι διακριτή με βήμα 1 δευτερολέπτου. Η απόφαση για την πραγματοποίηση ή όχι μίας μεταπομπής λαμβάνεται στο τέλος μιας περιόδου δέσμευσης (ισοδύναμα με το αν λαμβανόταν στην αρχή της). Οι κινητοί κόμβοι πραγματοποιούν μεταπομπή σε τυχαίο γειτονικό δρομολογητή με πιθανότητα $P_{h,0}$. Προκειμένου να υπάρχει δίκαια μεταχείριση για όλες τις αιτήσεις, η διαδικασία αξιολόγησης των αιτήσεων πραγματοποιείται μετά την ολοκλήρωση της γέννησης των μεταπομπών με τυχαία σειρά.

Με βάση αυτούς τους περιορισμούς, η αλληλουχία του προγράμματος προσομοίωσης ακολουθεί τα εξής βήματα για κάθε χρονική στιγμή στην περίπτωση RSVP-MP:

1. Εύρεση των δεσμεύσεων που λήγουν την τρέχουσα χρονική στιγμή.
2. Απομάκρυνση των κατάλοιπων δεσμεύσεων.
3. Για κάθε δέσμευση που έληξε:
 - (α) Απόφαση για το αν έληξε η κλήση ή αν το κινητό πραγματοποίησε μεταπομπή σε άλλο υποδίκτυο με βάση την πιθανότητα μεταπομπής.
 - (β) Αν το κινητό δεν πραγματοποίησε μεταπομπή (τέλος κλήσης):
 - i. Διαγραφή δεσμεύσεων από τα χρησιμοποιημένα κανάλια.
 - (γ) Αν το κινητό πραγματοποίησε μεταπομπή:
 - i. Επιλογή του επόμενου υποδικτύου/κυψέλης τυχαία ανάμεσα στα γειτονικά υποδίκτυα.

- ii. Ανανέωση δέσμησης στα ήδη διατεθειμένα κανάλια για χρονική περίοδο d δευτερολέπτων και σήμανση της δέσμησης ως κατάλοιπης.
 - iii. Αναβολή απομάκρυνσης δέσμησης στη σύνδεση του δικτύου πρόσβασης-κορμού και επεξεργασίας αίτησης δέσμησης για το γειτονικό υποδίκτυο.
4. Επεξεργασία αιτήσεων δέσμησης για νέες αφίξεις, αλλά και αφίξεις λόγω μεταπομπής (προσπάθεια διάθεσης πόρων). Η σειρά επεξεργασίας των αιτήσεων είναι τυχαία.
5. Αν η αίτηση προήλθε από μεταπομπή :
- (α) Απομάκρυνση της δέσμησης στη σύνδεση του δικτύου πρόσβασης-κορμού.
 - (β) Προσπάθεια εξυπηρέτησης της αίτησης (διάθεσης των αντίστοιχων πόρων).
 - (γ) Αν η προσπάθεια αποτύχει :
 - i. Ανανέωση δέσμησης στη σύνδεση του δικτύου πρόσβασης κορμού για μία χρονική περίοδο d δευτερολέπτων και σήμανση της δέσμησης ως κατάλοιπης.

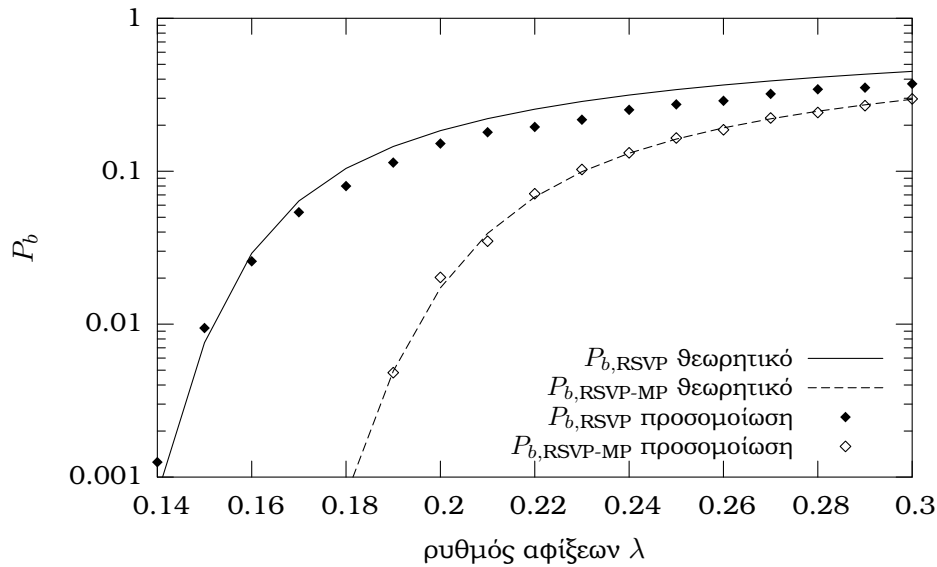
Στην περίπτωση απλού RSVP, τα βήματα 3(γ)iii και 5 παραλείπονται.

Οι μετρήσεις από την προσομοίωση περιλαμβάνουν τις εγκρίσεις και τις απορρίψεις αιτήσεων δέσμησης, καθώς και τον μέσο αριθμό πόρων (καναλιών) που είναι δεσμευμένοι (ενεργά ή λόγω κατάλοιπων συνδέσεων) στο δίκτυο. Οι ενεργές δεσμεύσεις αναπαριστούν τον αριθμό των ενεργών κινητών κόμβων στο δίκτυο κάθε χρονική στιγμή.

Ανάλυση Απόδοσης

Για τα αποτελέσματα τόσο του αναλυτικού μοντέλου, όσο και του μοντέλου προσομοίωσης, χρησιμοποιείται το απλό δίκτυο πρόσβασης του Σχήματος 6.1 και οι εξής υποθέσεις: Η συστάδα δρομολογητών του επιπέδου $i = 1$ αποτελείται από $N_0 = 10$ όμοιες κυκλικές συστάδες του επιπέδου $i = 0$ με διάμετρο η κάθε μία $r_0 = 200$ m. Οι ζεύξεις μεταξύ των δρομολογητών πρόσβασης και του δρομολογητή συνόρου μπορούν να υποστηρίξουν $c_0 = 1024$ κανάλια, ενώ η χωρητικότητα της γραμμής μεταξύ του δικτύου πρόσβασης και του δικτύου κορμού είναι $c_1 = 256$ κανάλια. Οι τιμές αυτές έχουν επιλεγεί με βάση το γεγονός ότι η συνήθης στενωπός στα δίκτυα είναι η ζεύξη προς τον πάροχο Internet, ενώ το εσωτερικό των δικτύων πρόσβασης μπορεί κατά κανόνα να υποστηρίξει ευρυζωνικές επικοινωνίες με χαμηλότερο κόστος. Με τον τρόπο αυτό δεν δημιουργείται συμφόρηση στο δίκτυο πρόσβασης, παρά μόνο στην εξωτερική γραμμή.

Ο χρόνος εξυπηρέτησης μίας κλήσης έχει μέση τιμή $1/\mu = 120$ sec και ο χρόνος εκπνοής της προσωρινής κατάστασης RSVP ίσος με $d = 90$ sec όπως προδιαγράφεται στο [18]. Ο ρυθμός νέων αφίξεων λ_0 , και η ταχύτητα των κινητών κόμβων v χρησιμεύουν ως παράμετροι.

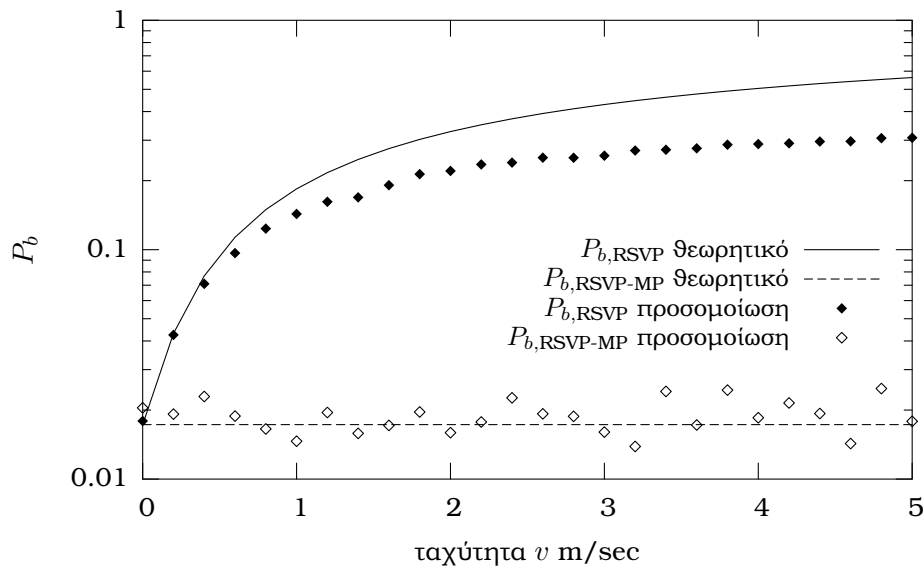


Σχήμα 6.3: Πιθανότητα απόρριψης σε σχέση με το ρυθμό άφιξης νέας κίνησης λ

Στο Σχήμα 6.3 απεικονίζεται η πιθανότητα απόρριψης στη γραμμή μεταξύ του δικτύου πρόσβασης και κορμού με κυμαινόμενους ρυθμούς αφίξεων στο χαμηλότερο επίπεδο. Η ταχύτητα των κινητών κόμβων θεωρείται σταθερή ($v = 1$ m/sec), μία τυπική τιμή για περιβάλλοντα εσωτερικών χώρων. Αναπαρίστανται οι καμπύλες που προκύπτουν τόσο για το αναλυτικό μοντέλο, όσο και αυτές που προκύπτουν από την αντίστοιχη προσομοίωση. Παρατηρείται ότι η πιθανότητα απόρριψης αυξάνει και για τις δύο περιπτώσεις με την αύξηση του εισερχόμενου φορτίου κίνησης, το οποίο και αναμενόταν. Στην περίπτωση RSVP-MP, όμως, η πιθανότητα απόρριψης είναι πολύ χαμηλότερη (τάξεις μεγέθους) για μικρούς όγκους εισερχόμενης κίνησης, σε σχέση την αντίστοιχη πιθανότητα απόρριψης στην περίπτωση RSVP.

Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάζονται και στο Σχήμα 6.4, όπου η πιθανότητα απόρριψης και για τις δύο περιπτώσεις διαγράφεται ως συνάρτηση της ταχύτητας των κινητών κόμβων (ο ρυθμός άφιξης νέων αιτήσεων είναι σταθερός $\lambda = 0.2$). Για ακίνητους χρήστες, η διαφορά ανάμεσα στις δύο προσεγγίσεις είναι μηδενική. Όσο αυξάνει η κινητικότητα, το σύστημα με απλό RSVP παρουσιάζει μία σημαντική αύξηση της πιθανότητας απόρριψης P_b , ενώ το σύστημα με RSVP-MP διατηρεί την ίδια σταθερή πιθανότητα απόρριψης που είχε και για μηδενική κινητικότητα. Η περίπτωση του RSVP-MP δεν επηρεάζεται καθόλου από την κινητικότητα των χρηστών. Για το Σχήμα 6.4 η διαφορά στην απόδοση φτάνει σε δεκαπλάσια αύξηση της πιθανότητας απόρριψης με την αύξηση της κινητικότητας. Σε μικρότερους ρυθμούς αφίξεων, η διαφορά είναι ακόμη μεγαλύτερη υπέρ της προσέγγισης RSVP-MP.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την προσομοίωση αφο-

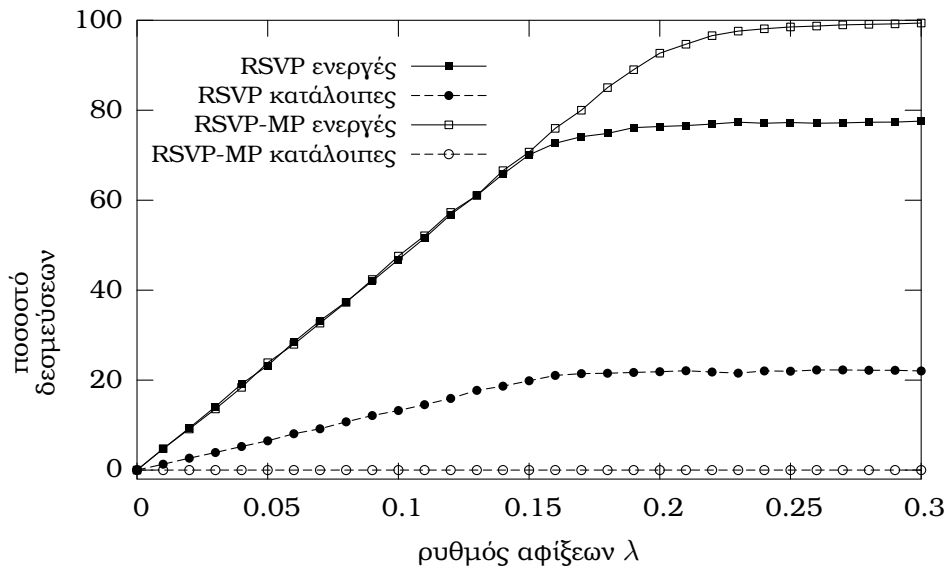


Σχήμα 6.4: Πιθανότητα απόρριψης σε σχέση με την κινητικότητα

ρούν ρυθμούς απόρριψης για νέες αιτήσεις και για τις δύο περιπτώσεις. Η πιθανότητα απόρριψης μεταπομπών είναι μηδενική στην περίπτωση RSVP-MP, λόγω υπόθεσης άφθονων πόρων στο εσωτερικό του δικτύου πρόσβασης, ενώ στην περίπτωση RSVP, η πιθανότητα απόρριψης μεταπομπής είναι ίση με την πιθανότητα απόρριψης νέας άφιξης.

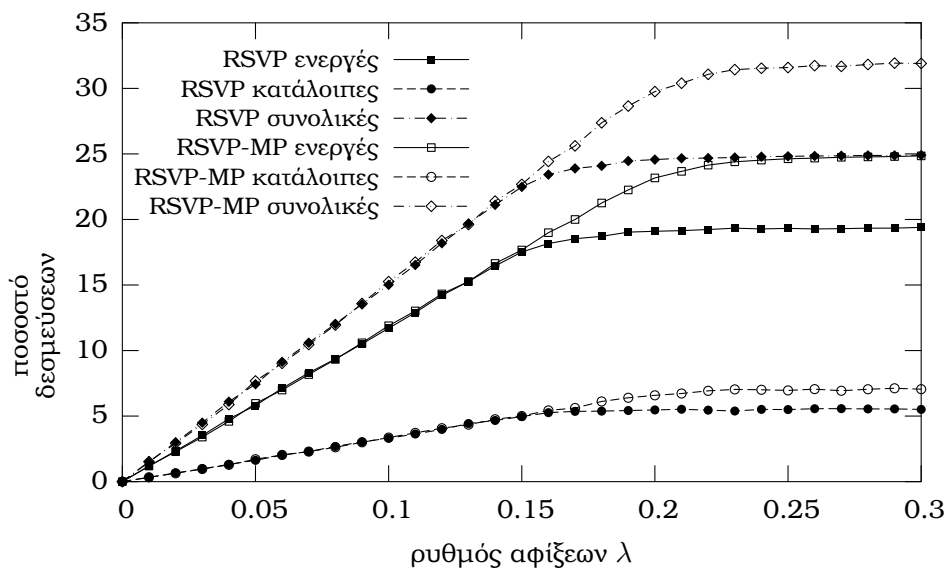
Στο Σχήμα 6.4 παρατηρείται μία ελαφρά διαφοροποίηση μεταξύ του αναλυτικού μοντέλου και της προσομοίωσης, η οποία οφείλεται στην απλουστευμένη προσέγγιση που χρησιμοποιεί το αναλυτικό μοντέλο. Συγκεκριμένα, οι κατάλοιπες δεσμεύσεις θεωρήθηκαν ανεξάρτητη κίνηση με Poisson αφίξεις που ανταγωνίζονται για τους πόρους του δικτύου, ενώ στην πραγματικότητα η κατανομή είναι πιο σύνθετη. Στο σύνθετο αναλυτικό μοντέλο που παρουσιάζεται στη συνέχεια, αναλύεται η συσχέτιση των κατάλοιπων δεσμεύσεων με τις αιτήσεις μεταπομπής.

Η κατανομή των διαθέσιμων πόρων στην εξωτερική γραμμή μεταξύ του δικτύου πρόσβασης και του δικτύου κορμού για σταθερή κινητικότητα ($v = 1$ m/sec) απεικονίζεται στο Σχήμα 6.5. Παρατηρείται ότι το RSVP-MP δεν αφήνει κατάλοιπες δεσμεύσεις στη γραμμή αυτή, ενώ στην περίπτωση RSVP περίπου το 20% των συνολικών πόρων σπαταλώνται λόγω της διατήρησης κατάλοιπων δεσμεύσεων από μετακινούμενα κινητά. Στην περίπτωση RSVP παρατηρείται ακόμη ότι ο λόγος κατάλοιπων-ενεργών δεσμεύσεων δεν φαίνεται να εξαρτάται από τον όγκο των εισερχόμενων νέων αφίξεων. Τόσο οι κατάλοιπες, όσο και οι ενεργές δεσμεύσεις αυξάνουν γραμμικά με το ρυθμό νέων αφίξεων μέχρι το άθροισμα τους να φτάσει το σύνολο της χωρητικότητας της γραμμής, όπου και τα ποσοστά τους σταθεροποιούνται. Οι κατάλοιπες δεσμεύσεις οφείλονται στις πραγματοποιούμενες μεταπομπές στο εσωτερικό του δικτύου πρόσβασης, και αφού η πιθανότητα μεταπομπής για τις



Σχήμα 6.5: Αξιοποίηση εξωτερικής γραμμής σε σχέση με τον ρυθμό αφίξεων λ

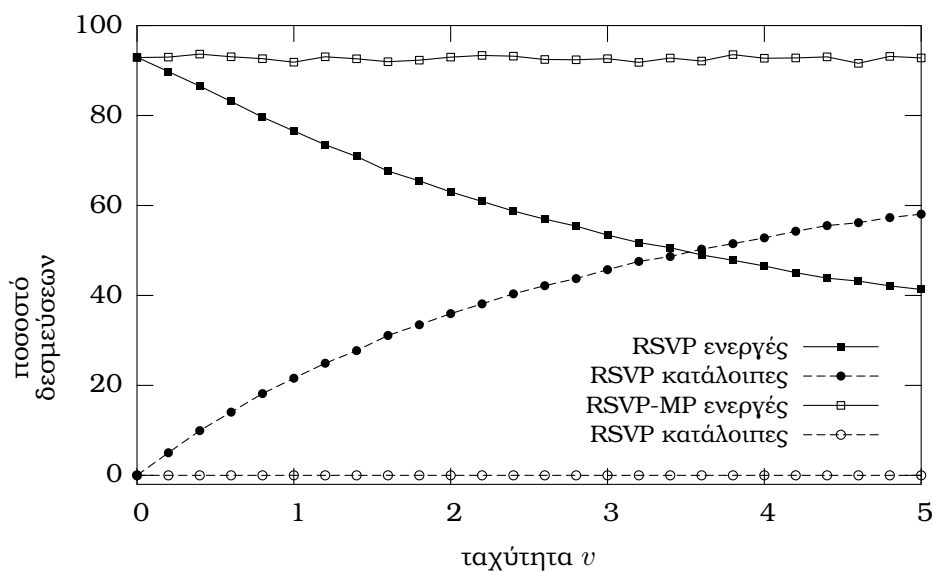
συνεδρίες παραμένει σταθερή όσο η ταχύτητα των κινητών κόμβων παραμένει σταθερή, ομοίως παραμένει σταθερός και ο λόγος των καταλοίπων-ενεργών δεσμεύσεων. Στην περίπτωση RSVP-MP, το σύνολο των διαθέσιμων πόρων διατίθεται για ενεργές δεσμεύσεις.



Σχήμα 6.6: Αξιοποίηση εσωτερικών γραμμών σε σχέση με τον ρυθμό αφίξεων λ

Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και στο Σχήμα 6.6, όπου διαγράφεται το ποσοστό διάθεσης των πόρων των εσωτερικών δρομολογητών του δικτύου πρόσβασης. Ο απόλυτος αριθμός των ενεργών δεσμεύσεων είναι ο ίδιος με αυτόν του Σχήματος 6.5, αλλά αυτή τη φορά αντιστοιχεί σε ένα μικρότερο κλάσμα των συνόλου των διαθέσιμων πόρων. Σε αυτό το γράφημα εμφανίζονται κα-

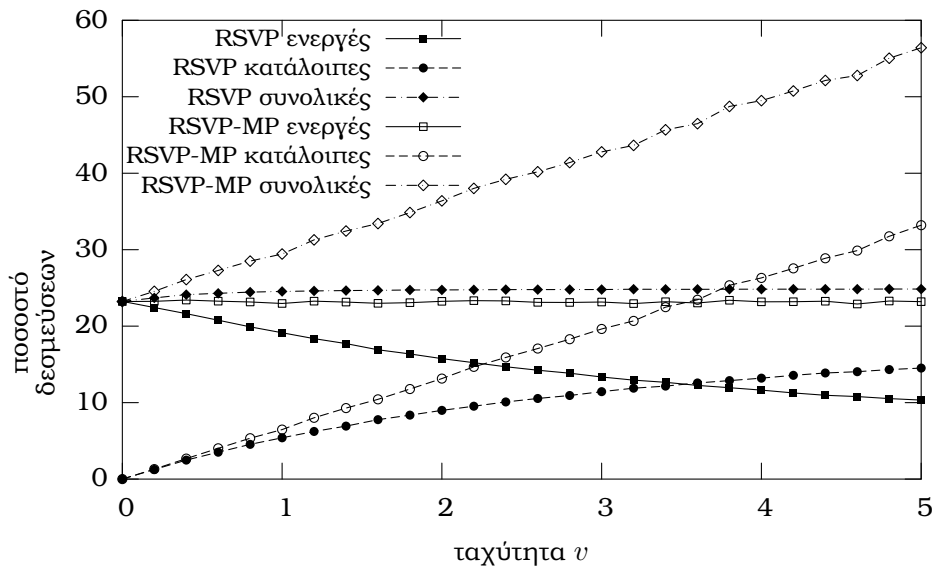
τάλοιπες δεσμεύσεις και στην περίπτωση RSVP-MP, και μάλιστα σε μεγαλύτερους αριθμούς από το RSVP για μεγάλους ρυθμούς αφίξεων. Αυτό εξηγείται ως εξής: Ο λόγος ενεργών-καταλοίπων δεσμεύσεων είναι σταθερός για σταθερή ταχύτητα των κινητών κόμβων στην περίπτωση RSVP. Το σύστημα RSVP-MP μπορεί να υποστηρίξει μεγαλύτερο αριθμό ενεργών δεσμεύσεων στην εξωτερική γραμμή, γεγονός που προκαλεί μεγαλύτερο απόλυτο αριθμό καταλοίπων δεσμεύσεων στο εσωτερικό δίκτυο, όπου η συμπεριφορά είναι παρόμοια με του RSVP.



Σχήμα 6.7: Αξιοποίηση εξωτερικής γραμμής σε σχέση με την κινητικότητα

Στο Σχήμα 6.7, το ποσοστό των δεσμεύσεων στην εξωτερική γραμμή που διασυνδέει τα δίκτυα πρόσβασης και κορμού διαγράφεται σε σχέση με την ταχύτητα των κινητών κόμβων και σταθερό ρυθμό νέων αφίξεων $\lambda = 0.2$. Ο συνολικός αριθμός των δεσμεύσεων (ενεργών και καταλοίπων) παραμένει σταθερός και στις δύο περιπτώσεις. Στην περίπτωση RSVP, το ποσοστό των καταλοίπων δεσμεύσεων αυξάνει με την αύξηση της κινητικότητας των χρηστών, ενώ παράλληλα το ποσοστό των ενεργών δεσμεύσεων μειώνεται. Στην περίπτωση RSVP-MP από την άλλη, το σύνολο των πόρων στη γραμμή διατίθεται για ενεργές δεσμεύσεις, ανεξάρτητα από την ταχύτητα των χρηστών, απαλοίφοντας την ύπαρξη καταλοίπων δεσμεύσεων.

Η αξιοποίηση των εσωτερικών γραμμών του δικτύου πρόσβασης απεικονίζεται στο Σχήμα 6.8. Η υπερ-παροχή πόρων στις εσωτερικές γραμμές είναι γνωστή από το σχεδιασμό του δικτύου, επομένως η υπο-αξιοποίηση του είναι και εδώ προφανής. Στην περίπτωση του RSVP η συνολική δέσμευση πόρων (ενεργές και κατάλοιπες δεσμεύσεις) παραμένει σταθερή και ίση με το ένα τέταρτο των συνολικών διαθέσιμων πόρων. Και στο εσωτερικό του δικτύου, οι ενεργές δεσμεύσεις μειώνονται σε βάρος των καταλοίπων με την αύξηση της κινητικότητας.



Σχήμα 6.8: Αξιοποίηση εσωτερικών γραμμών σε σχέση με την κινητικότητα

Στην περίπτωση RSVP-MP, ο αριθμός των ενεργών δεσμεύσεων παραμένει σταθερός για σταθερό ρυθμό νέων αιτήσεων και καθορίζεται από τους διαθέσιμους πόρους στην εξωτερική γραμμή. Οι κατάλοιπες δεσμεύσεις στο εσωτερικό του δικτύου πρόσβασης επιτρέπονται από το σύστημα RSVP-MP και ο αριθμός τους αυξάνει γραμμικά με την αύξηση της ταχύτητας των κινητών κόμβων. Χρησιμοποιώντας τη λειτουργικότητα RSVP-MP, η γραμμή μεταξύ του δικτύου πρόσβασης-κορμού διατηρείται πάντα κατειλημμένη με ενεργές δεσμεύσεις, ενώ η ύπαρξη των κατάλοιπων δεσμεύσεων στο εσωτερικό του δικτύου πρόσβασης μπορεί να αντιμετωπιστεί ευκολότερα μέσω υπερ-παροχής πόρων.

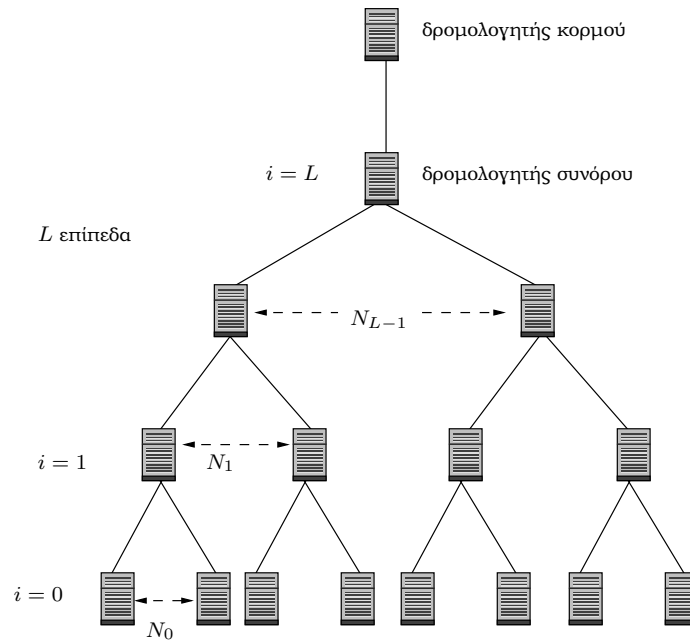
Όταν απαιτείται βέλτιστη αξιοποίηση του δικτύου πρόσβασης, είναι δυνατό να υλοποιηθεί η λειτουργικότητα RSVP-MP σε πολλαπλά επίπεδα. Για την εκτίμηση της απόδοσης των δικτύων αυτών με και χωρίς RSVP-MP, απαιτείται συνθετικότερη θεωρητική αντιμετώπιση και πιο εξελιγμένο μοντέλο προσομοίωσης, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

6.2.2 Σύνθετη Ιεραρχική Τοπολογία Δικτύου Πρόσβασης

Η βέλτιστη αξιοποίηση των πόρων των δικτύων πρόσβασης είναι ένα σημαντικό θέμα, ειδικά σε μεγάλα δίκτυα που εξυπηρετούν χιλιάδες συνδεδεμένες συσκευές. Σε τέτοια δίκτυα, δεν αρκεί η διασύνδεση του δικτύου με γραμμές μεγάλης χωρητικότητας με το Internet, αλλά χρειάζεται και η αποτελεσματική εκμετάλλευση των εσωτερικών πόρων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την εισαγωγή του RSVP-MP σε πολλαπλά επίπεδα της ιεραρχίας, όπως περιγράφεται στην Παράγραφο 5.3.1.

Τα μεγάλα δίκτυα πρόσβασης είναι δομημένα συνήθως σε ιεραρχίες, με τον ανώτατο ιεραρχικά

δρομολογητή να διασυνδέει το δίκτυο πρόσβασης με το δίκτυο κορμού. Η τοπολογία ενός τέτοιου δικτύου παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.9



Σχήμα 6.9: Ιεραρχικό δίκτυο πρόσβασης με L επίπεδα και N_i πλάτος βαθμίδας

Θεωρητικό Μοντέλο

Για το θεωρητικό μοντέλο ανάλυσης ιεραρχικών δικτύων πρόσβασης, χρησιμοποιείται ο ίδιος συμβολισμός, όπως και στο απλό θεωρητικό μοντέλο, δηλαδή

- L ο αριθμός των επιπέδων στο ιεραρχικό μοντέλο.
- N_i είναι ο αριθμός των συστάδων (clusters) επιπέδου $i - 1$ που διαμορφώνουν τη συστάδα στο επίπεδο i .
- c_i είναι ο αριθμός των διαθέσιμων καναλιών του δρομολογητή στο επίπεδο i .
- B_i είναι η πιθανότητα απόρριψης της αίτησης στο επίπεδο i .
- $P_{h,i}$ είναι η πιθανότητα μεταπομπής στο επίπεδο i ($P_{h,L} = 0$).
- r_i η ακτίνα της συστάδας του επιπέδου i (η συστάδα θεωρείται ότι έχει κυκλικό σχήμα).

Οι ίδιες υποθέσεις για τα χαρακτηριστικά της κίνησης που χρησιμοποιήθηκαν στο απλό θεωρητικό μοντέλο επαναχρησιμοποιούνται στο γενικευμένο μοντέλο, δηλαδή

- Οι νέες αιτήσεις καταφτάνουν με κατανομή Poisson με παράμετρο λ .

- Η διάρκεια των συνδέσεων ακολουθεί εκθετική κατανομή με παράμετρο μ .
- Ο χρόνος παραμονής σε μια συστάδα ακολουθεί εκθετική κατανομή με παράμετρο η_i [53].
- Χρησιμοποιείται το μοντέλο κινητικότητας υγρής ροής.
- Οι κινητοί κόμβοι κινούνται με ταχύτητα v .
- Ο χρόνος εκπνοής της προσωρινής κατάστασης RSVP είναι d .

Ακόμη ισχύουν οι σχέσεις

$$\eta_i = \frac{2v}{\pi r_i} \quad (6.14)$$

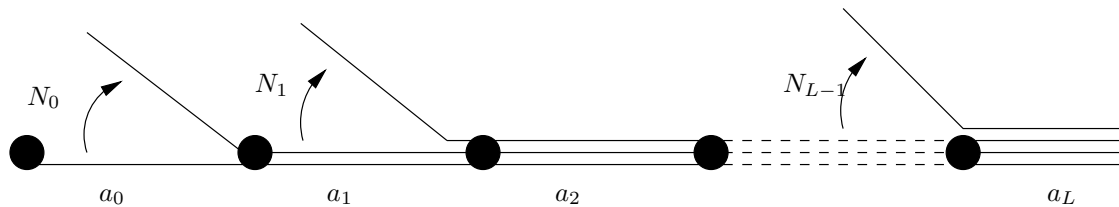
και

$$P_{h,i} = \frac{\eta_i}{\mu + \eta_i} \quad (6.15)$$

Θεωρώντας μικρές πιθανότητες απόρριψης, ο ρυθμός άφιξης αιτήσεων μεταπομπής (δηλαδή αιτήσεις εξυπηρέτησης σύνδεσης που προέρχονται από κινούμενους κινητούς κόμβους) δίνεται από τη σχέση

$$\lambda_{h,i} = P_{h,i}(\lambda_{h,i} + \lambda) \quad (6.16)$$

Για να αντιμετωπιστεί καλύτερα η συνθετότερη τοπολογία, και να έχουμε πλήρη εικόνα της παρεχόμενης κίνησης σε κάθε σύνδεση μεταξύ των δρομολογητών, ακολουθείται η μέθοδος της διάσπασης ζεύξης (link decomposition) [38]. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, υπολογίζεται η κίνηση που προσφέρεται στην κατώτατη συστάδα (κυψέλη) από οποιονδήποτε λόγο (νέες αφίξεις, μεταπομπές, κατάλοιπες δεσμεύσεις) και εξετάζεται η διαδρομή που ακολουθείται ως την έξοδο του δικτύου πρόσβασης. Ουσιαστικά αναλύεται η κίνηση σε κάθε γραμμή στα εξ ων συνετέθη, δηλαδή σε κίνηση που προέρχεται από το κατώτατο επίπεδο. Σχηματικά, η προσθετική κίνηση στις γραμμές μεταξύ των δρομολογητών παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.10.



Σχήμα 6.10: Σχηματική παράσταση διάσπασης κίνησης ζεύξης

Αρχικά εξετάζεται η υπόθεση RSVP-MP. Στην περίπτωση αυτή θεωρείται ότι τη λειτουργικότητα RSVP-MP τη διαθέτουν όλοι οι δρομολογητές του δικτύου πρόσβασης σε επίπεδο $i > 0$.

Η προσφερόμενη κίνηση στις γραμμές διασύνδεσης των δρομολογητών ανάμεσα στα επίπεδα είναι

$$\begin{aligned}
\alpha_0 &= \frac{\lambda + \lambda_{h,0}}{\mu + \eta_0} + \lambda_{h,0}d \\
\alpha_1 &= \frac{\lambda + \lambda_{h,1}}{\mu + \eta_1} + \lambda_{h,1}d + \lambda_{h,0}dB_0 \\
\alpha_2 &= \frac{\lambda + \lambda_{h,2}}{\mu + \eta_2} + \lambda_{h,2}d + \lambda_{h,1}dB_1 + \lambda_{h,0}dB_0 \\
&\vdots \\
\alpha_L &= \frac{\lambda}{\mu} + \lambda_{h,L-1}dB_{L-1} + \lambda_{h,L-2}dB_{L-2} + \dots + \lambda_{h,0}dB_0
\end{aligned} \tag{6.17}$$

Στο κατώτατο επίπεδο το συνολικό φορτίο κίνησης προκύπτει από την ανάλυση του Σχήματος 6.2 και είναι η σχέση (6.5). Η γραμμή του αμέσως ανωτέρου επιπέδου μεταφέρει την α_1 κίνηση. Ο όρος $\lambda/(\mu + \eta_1)$ αντιπροσωπεύει τις νέες αφίξεις στη γραμμή. Ο παρονομαστής του κλάσματος είναι $\mu + \eta_1$, δηλαδή η παράμετρος για την εκθετική κατανομή του ελαχίστου μεταξύ της διάρκειας κλήσης και του χρόνου παραμονής στη συστάδα αυτού του επιπέδου. Παρομοίως αναπαρίσταται και η κίνηση λόγω των μεταπεμπόμενων κλήσεων από γειτονικές συστάδες, δηλαδή $\lambda_{h,1}/(\mu + \eta_1)$. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι δεν προσμετράται η κίνηση λόγω μεταπομπών μεταξύ κυψελών της ίδιας συστάδας. Οι κατάλοιπες συνδέσεις στο επίπεδο αυτό παράγονται πάλι από τις μεταπομπές, αλλά από δύο διαφορετικές αιτίες. Οι κλήσεις από κυψέλες στη συστάδα που μεταπέμπονται σε κυψέλες γειτονικής συστάδας συνεισφέρουν κίνηση ίση με $\lambda_{h,1}d$ στο επίπεδο αυτό. Ο άλλος λόγος ύπαρξης κατάλοιπων δεσμεύσεων είναι η πιθανότητα μεταπομπής μεταξύ γειτονικών κυψελών της ίδιας συστάδας, η οποία όμως απέτυχε (λόγω έλλειψης πόρων) σε χαμηλότερο επίπεδο (δηλαδή στο επίπεδο 0). Αφού δεν έχει εισαχθεί κανένας μηχανισμός για την απελευθέρωση των πόρων μετά από τέτοιου τύπου αποτυχίες, η κίνηση που προσμετράται είναι $\lambda_{h,0}dB_0$, όπου B_0 η πιθανότητα απόρριψης στο επίπεδο 0. Οι αναλυτικές εκφράσεις της κίνησης σε κάθε γραμμή εκφράζονται με παρόμοιο τρόπο για τα υπόλοιπα επίπεδα.

Ο όρος $(\lambda + \lambda_{h,i})/(\mu + \eta_i)$ παρουσιάζεται στις σχέσεις για κάθε επίπεδο i . Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (6.15) και (6.16)

$$\frac{\lambda + \lambda_{h,i}}{\mu + \eta_i} = \frac{\lambda_{h,i}}{\frac{\eta_i}{P_{h,i}}} = \frac{\lambda_{h,i}}{\eta_i} = \frac{\lambda \frac{P_{h,i}}{1-P_{h,i}}}{\mu \frac{P_{h,i}}{1-P_{h,i}}} = \frac{\lambda}{\mu} \tag{6.18}$$

Ουσιαστικά η κίνηση που προέρχεται από ενεργές συνδέσεις δεν επηρεάζεται από την κινητικότητα όταν το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία. Ο μεγαλύτερος όγκος κίνησης (πρόσθεση του όρου $\lambda_{h,i}$ στον αριθμητή) αντισταθμίζεται από την ελάττωση της διάρκειας της σύνδεσης στην κυψέλη

(πρόσθεση του όρου η_i στον παρονομαστή). Η προσφερόμενη κίνηση στο σύστημα RSVP-MP (6.17) μπορεί συνεπώς να εκφραστεί με τη μορφή

$$\begin{aligned}
 \alpha_0 &= \frac{\lambda}{\mu} + \lambda_{h,0}d \\
 \alpha_1 &= \frac{\lambda}{\mu} + \lambda_{h,1}d + \lambda_{h,0}dB_0 \\
 \alpha_2 &= \frac{\lambda}{\mu} + \lambda_{h,2}d + \lambda_{h,1}dB_1 + \lambda_{h,0}dB_0 \\
 &\vdots \\
 \alpha_L &= \frac{\lambda}{\mu} + \lambda_{h,L-1}dB_{L-1} + \lambda_{h,L-2}dB_{L-2} + \dots + \lambda_{h,0}dB_0
 \end{aligned} \tag{6.19}$$

Στη συνέχεια θεωρείται το σύστημα RSVP, όπου σε όλα τα επίπεδα παρέχεται η λειτουργικότητα του απλού RSVP. Οι εκφράσεις της κίνησης σε αυτή την περίπτωση είναι πολυπλοκότερες. Μία σύνδεση που θα πραγματοποιήσει μεταπομπή θα αφήσει πάντοτε μία κατάλοιπη δέσμευση, η οποία θα εκτείνεται σε ολόκληρη την από-άκρη-σε-άκρη διαδρομή, και συνεπώς σε όλη τη διαδρομή στο δίκτυο πρόσβασης. Συνεπώς, η κίνηση που δημιουργείται στο κατώτατο επίπεδο είναι

$$\alpha_0 = \frac{\lambda}{\mu} + \lambda_{h,0}d \tag{6.20}$$

Το προσφερόμενο φορτίο από την κυψέλη αυτή στα ανώτερα επίπεδα δεν θα μεταβληθεί, θα είναι δηλαδή για κάθε επίπεδο

$$\alpha_i = N_0 \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot \dots \cdot N_i \left(\frac{\lambda}{\mu} + \lambda_{h,0}d \right) \tag{6.21}$$

Η κίνηση όμως που προσφέρεται στα ανώτερα επίπεδα δεν αποτελείται από αφίξεις αιτήσεων ανεξάρτητες μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, μία αίτηση μεταπομπής συνοδεύεται πάντα από το φορτίο που προκαλεί η κατάλοιπη δέσμευση που άφησε ο κινητός κόμβος στην παλαιά κυψέλη. Η συσχέτιση αυτή, ισχύει για όλα τα επίπεδα, εκτός από το κατώτατο, όπου η αίτηση μεταπομπής και η αντίστοιχη κατάλοιπη σύνδεση προσφέρονται εξ'ορισμού σε διαφορετικές κυψέλες. Συνεπώς, στα ανώτερα επίπεδα η αίτηση μεταπομπής μπορεί να μοντελοποιηθεί ως δέσμη (batch) δύο αιτήσεων που καταφθάνουν ταυτόχρονα. Η μία από αυτές απαιτεί χρόνο εξυπηρέτησης που ακολουθεί εκθετική κατανομή (ενεργή σύνδεση) ενώ η άλλη σταθερό χρόνο (κατάλοιπη σύνδεση). Προσθέτοντας και την Poisson κίνηση λόγω νέων αφίξεων, η συνολική κίνηση σε ανώτερα επίπεδα προσιδιάζει σε ένα BM/G/c σύστημα με μαρκοβιανές αφίξεις δέσμης, γενικευμένο χρόνο εξυπηρέτησης και c διαθέσιμα κανάλια. Για την επίλυση του συστήματος BM/G/c συστήματος, θεωρούμε την ουρά BM/G/∞, ώστε να εξαγάγουμε χρήσιμα στοιχεία.

Η άφιξη των δεσμών στο σύστημα είναι μεγέθους 1 και ρυθμού λ για τις νέες αφίξεις και μεγέθους 2 και ρυθμού $\lambda_h = \lambda_{h,0}$ για τις αιτήσεις μεταπομπής

$$b_i = \begin{cases} 1 & \text{με πιθανότητα } \lambda/(\lambda + \lambda_h) \\ 2 & \text{με πιθανότητα } \lambda_h/(\lambda + \lambda_h) \end{cases} \quad (6.22)$$

Οι πιθανότητες $\lambda/(\lambda + \lambda_h)$ και $\lambda_h/(\lambda + \lambda_h)$ μπορούν να εκφραστούν βάσει της (6.18)

$$\frac{\lambda_h}{\lambda + \lambda_h} = P_h \quad (6.23)$$

$$\frac{\lambda}{\lambda + \lambda_h} = 1 - P_h \quad (6.24)$$

Οι ροπές πρώτης και δεύτερης τάξης του μεγέθους δέσμης είναι

$$b = E[b_i] = 1 \cdot \frac{\lambda}{\lambda + \lambda_h} + 2 \cdot \frac{\lambda_h}{\lambda + \lambda_h} = \frac{\lambda + 2\lambda_h}{\lambda + \lambda_h} \quad (6.25)$$

$$E[b_i^2] = 1^2 \cdot \frac{\lambda}{\lambda + \lambda_h} + 2^2 \cdot \frac{\lambda_h}{\lambda + \lambda_h} = \frac{\lambda + 4\lambda_h}{\lambda + \lambda_h} \quad (6.26)$$

ή εκφρασμένες με την πιθανότητα μεταπομπής

$$b = E[b_i] = 1 + P_h \quad (6.27)$$

$$E[b_i^2] = 1 + 3P_h \quad (6.28)$$

Ο λόγος τους i , ο οποίος εκφράζει την αρρυθμία (irregularity) της διαδικασίας αφίξεων είναι

$$i = \frac{\lambda + 4\lambda_h}{\lambda + 2\lambda_h} \quad (6.29)$$

ή

$$i = \frac{1 + 3P_h}{1 + P_h} \quad (6.30)$$

Η μέση τιμή του χρόνου εξυπηρέτησης είναι αντίστοιχα

$$\mu' = \left[\frac{\lambda + \lambda_h}{\lambda + 2\lambda_h} \cdot \frac{1}{\mu + \eta_0} + \frac{\lambda_h}{\lambda + 2\lambda_h} \cdot d \right]^{-1} \quad (6.31)$$

$$\mu' = \left[\frac{1}{1 + P_h} \cdot \frac{1}{\mu + \eta_0} + \frac{P_h}{1 + P_h} \cdot d \right]^{-1} \quad (6.32)$$

Η μέση τιμή και η διασπορά της ύπαρξης στο σύστημα N συνδέσεων σε κατάσταση ισορροπίας (steady state) είναι

$$E[N] = (\lambda + \lambda_h)b \int_0^\infty G^c(u) du \quad (6.33)$$

$$V[N] = (\lambda + \lambda_h)b \int_0^\infty G^c(u) du + (\lambda + \lambda_h)E[b_i(b_i - 1)] \int_0^\infty [G^c(u)]^2 du \quad (6.34)$$

όπου η συνάρτηση $G^c(u)$ είναι συμπληρωματική της CDF (αθροιστική συνάρτηση κατανομής) του χρόνου εξυπηρέτησης. Στην περίπτωση RSVP, οι νέες αιτήσεις και οι αιτήσεις λόγω μεταπομπής έχουν διάρκεια με εκθετική κατανομή, ενώ οι κατάλοιπες δεσμεύσεις μοντελοποιούνται με σταθερό χρόνο. Επομένως η CDF του χρόνου εξυπηρέτησης είναι

$$G(u) = P\{\text{νέες ή μεταπομπές}\} \cdot \text{CDF}_{\text{exp}}(u) + P\{\text{κατάλοιπες}\} \cdot \text{CDF}_{\text{const}}(u) \quad (6.35)$$

$$= \frac{\lambda + \lambda_h}{\lambda + 2\lambda_h}(1 - e^{-(\mu+\eta_0)u}) + \frac{\lambda_h}{\lambda + 2\lambda_h}U(u - d) \quad (6.36)$$

$$= \frac{1}{1 + P_h}(1 - e^{-(\mu+\eta_0)u}) + \frac{1}{1 + P_h}U(u - d) \quad (6.37)$$

και η συμπληρωματική της

$$G^c(u) = \frac{\lambda + \lambda_h}{\lambda + 2\lambda_h}e^{-(\mu+\eta_0)u} + \frac{\lambda_h}{\lambda + 2\lambda_h}[1 - U(u - d)] \quad (6.38)$$

$$= \frac{1}{1 + P_h}e^{-(\mu+\eta_0)u} + \frac{1}{1 + P_h}[1 - U(u - d)] \quad (6.39)$$

Η συνάρτηση $U(u)$ είναι η συνάρτηση βήματος (unit step function). Αντικαθιστώντας την εξίσωση (6.38) στις σχέσεις (6.33) και (6.34) προκύπτει

$$E[N] = \frac{(\lambda + \lambda_h)b}{\mu'} \quad (6.40)$$

$$V[N] = E[N] + E[N](i - 1) \int_0^\infty [G^c(u)]^2 du \quad (6.41)$$

Το peakedness της κίνησης ορίζεται ως το λόγο της διασποράς προς τη μέση τιμή του αριθμού των συνδέσεων στο σύστημα σε κατάσταση ισορροπίας. Είναι ένα μέτρο της απόκλισης από την ιδανική Poisson περίπτωση και χρησιμοποιείται σε τέτοια μικτά περιβάλλοντα.

$$z = \frac{V[N]}{E[N]} \quad (6.42)$$

Αντικαθιστώντας τις υπολογισμένες εκφράσεις από τις σχέσεις (6.40) και (6.41), προκύπτει

$$z = 1 + (i - 1)r \quad (6.43)$$

όπου i η αρρυθμία που παρατηρείται στις δέσμες των αιτήσεων σύνδεσης και r

$$\begin{aligned}
r &= \mu' \int_0^{\infty} [G^c(u)]^2 du \\
&= \mu' \int_0^{\infty} \left(\frac{\lambda + \lambda_h}{\lambda + 2\lambda_h} e^{-(\mu+\eta_0)u} + \frac{\lambda_h}{\lambda + 2\lambda_h} [1 - U(u-d)] \right)^2 du \\
&= \mu' \int_0^{\infty} \left(\frac{\lambda + \lambda_h}{\lambda + 2\lambda_h} \right)^2 e^{-2(\mu+\eta_0)u} du + \mu' \int_0^{\infty} \left(\frac{\lambda_h}{\lambda + 2\lambda_h} [1 - U(u-d)] \right)^2 du \\
&\quad + \mu' \int_0^{\infty} 2 \frac{\lambda(\lambda + \lambda_h)}{(\lambda + 2\lambda_h)^2} (1 - e^{-(\mu+\eta_0)u}) [1 - U(u-d)] du \\
&= \mu' \left[\left(\frac{\lambda + \lambda_h}{\lambda + 2\lambda_h} \right)^2 \frac{1}{2(\mu + \eta_0)} + \left(\frac{\lambda_h}{\lambda + 2\lambda_h} \right)^2 d + 2 \frac{\lambda(\lambda + \lambda_h)}{(\lambda + 2\lambda_h)^2} \frac{1 - e^{-(\mu+\eta_0)d}}{\mu + \eta_0} \right] \quad (6.44)
\end{aligned}$$

ή

$$\mu' \left[\left(\frac{1}{1 + P_h} \right)^2 \frac{1}{2(\mu + \eta_0)} + \left(\frac{P_h}{1 + P_h} \right)^2 d + 2 \frac{2P_h}{(1 + P_h)^2} \frac{1 - e^{-(\mu+\eta_0)D_s}}{\mu + \eta_0} \right] \quad (6.45)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι τόσο η αρρυθμία των αφίξεων i όσο και το peakedness z στο εξεταζόμενο σύστημα δεν εξαρτώνται από το όγκο των νέων αιτήσεων, αλλά μόνο από την κινητικότητα των χρηστών, η οποία εκφράζεται από τις παραμέτρους παραμονής της σύνδεσης στη συστάδα η_i για κάθε επίπεδο¹.

Γνωρίζοντας το peakedness, μπορεί να εφαρμοστεί η προσέγγιση του Hayward [147]. Η πιθανότητα απόρριψης σε ένα σύστημα με φορτίο α , c κανάλια και peakedness z , μπορεί να εκφραστεί ως $B(a, c, z)$. Χρησιμοποιώντας την προσέγγιση του Hayward, εκτιμάται η πιθανότητα απόρριψης ενός ισοδύναμου συστήματος με Poisson αφίξεις, και ανάλογα τροποποιημένο φορτίο και διαθέσιμα κανάλια, δηλαδή

$$P_b = B\left(\frac{a}{z}, \frac{c}{z}, 1\right) = P_{b, \text{Erlang}}\left(\frac{a}{z}, \frac{c}{z}\right) \quad (6.46)$$

Συνεπώς, το σύστημα προσεγγίζεται από ένα ισοδύναμο σύστημα με Poisson αφίξεις, φορτίο a/z και c/z κανάλια. Έχοντας όλα τα στοιχεία, εκτιμάται η πιθανότητα απόρριψης και για τα δύο μοντέλα συστημάτων (RSVP και RSVP-MP).

Λαμβάνοντας υπόψη την ομαδοποίηση της κίνησης σε ένα δρομολογητή και το φαινόμενο «λέπυσης» που δημιουργούν οι διαδοχικές πιθανότητες απόρριψης στην μεταφερόμενη κίνηση [38], το συνολικό προσφερόμενο φορτίο στο επίπεδο i δίνεται από τη σχέση

$$\alpha_{i,t} = N_0 \cdot N_1 \cdots N_i \cdot \alpha_i \frac{\prod_{j=0}^L (1 - B_j)}{1 - B_i} \quad (6.47)$$

¹Η πιθανότητα μεταπομπής $P_{h,i}$ υπολογίζεται από τις παραμέτρους η_i σύμφωνα με την (6.15).

Η προσφερόμενη κίνηση που δίνεται από την εξίσωση (6.47) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της πιθανότητας απόρριψης B_i , σύμφωνα με τον τύπο Erlang-B.

$$B_i = E(\alpha_{i,t}, c_i) \quad i = 0, \dots, L \quad (6.48)$$

$$\text{όπου } E(\alpha_{i,t}, c_i) = \frac{\alpha_{i,t}^{c_i}/c_i!}{\sum_{j=0}^{c_i} \alpha_{i,t}^j/j!} \quad (6.49)$$

Στην περίπτωση RSVP όμως, η προσέγγιση του Hayward απαιτεί ένα μη-ακέραιο αριθμό καναλιών. Ο τύπος Erlang-B για τον υπολογισμό της πιθανότητας απόρριψης δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τη μορφή (6.49). Αντί αυτού, χρησιμοποιείται ο γενικευμένος τύπος Erlang-B.

$$B(a, c)^{-1} = a \int_0^\infty e^{-y} (1 + \frac{y}{a}) dy \quad (6.50)$$

Το σύστημα των L μη-γραμμικών εξισώσεων (6.48), γνωστό και ως Erlang map μπορεί να επιλυθεί αριθμητικά. Η λύση του, η οποία είναι και μοναδική είναι το Erlang fixed point (σταθερό σημείο Erlang).

Για την αριθμητική επίλυση του συστήματος ορίζεται η διανυσματική συνάρτηση

$$\mathbf{F}(\mathbf{B}) = \left[F_0(\mathbf{B}) \quad F_1(\mathbf{B}) \quad \dots \quad F_L(\mathbf{B}) \right]^T \quad (6.51)$$

όπου $\mathbf{B} = [B_0, B_1, \dots, B_L]^T$ και

$$F_i(\mathbf{B}) = E(\alpha_{i,t}, B_i) - B_i \quad i = 0, \dots, L \quad (6.52)$$

και αναζητούνται οι ρίζες της συνάρτησης $\mathbf{F}(\mathbf{B})$. Για την εύρεση των ριζών της, μπορεί να χρησιμοποιηθούν γνωστές μέθοδοι αριθμητικής ανάλυσης (Newton), ελαχιστοποίησης, επαναληπτικής αντικατάστασης ή όποια κρίνεται πλέον κατάλληλη. Στο θεωρητικό μοντέλο που μελετήθηκε εφαρμόστηκαν οι μέθοδοι Newton και επαναληπτικής αντικατάστασης με ίδια αποτελέσματα.

Μοντέλο Προσομοίωσης

Για να ικανοποιηθούν οι αυξημένες απαιτήσεις της τοπολογίας του δικτύου πρόσβασης του Σχήματος 6.9, επεκτάθηκε σημαντικά το μοντέλο προσομοίωσης που αντιστοιχούσε στην απλή δικτυακή τοπολογία.

Οι σημαντικότερες βελτιώσεις είναι:

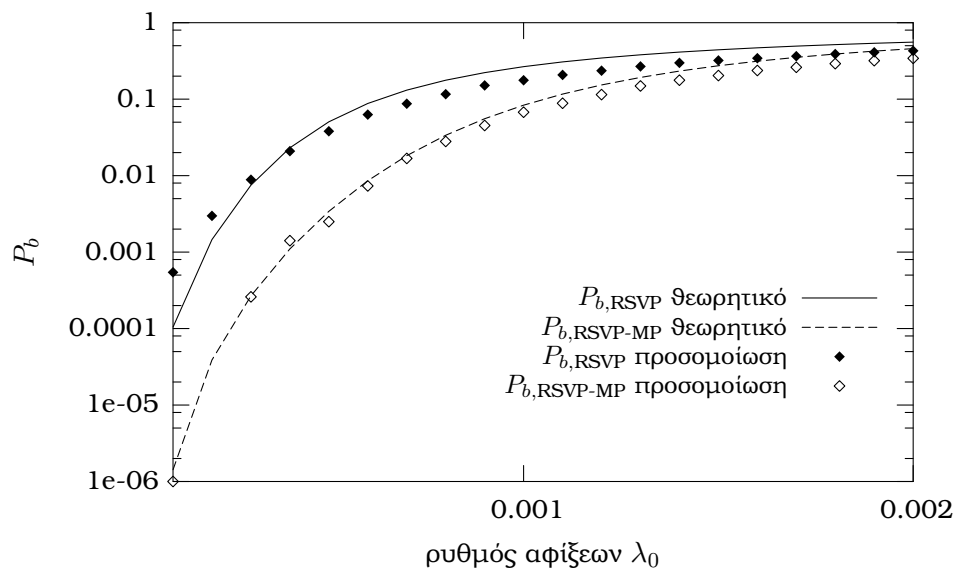
- Αντικειμενοποιήθηκε η υλοποίηση της οντότητας του δρομολογητή, ώστε να μπορεί να δέχεται και να προωθεί αιτήσεις κλήσης.

- Υλοποιήθηκε υποδομή, όπου μπορεί να αποθηκευτεί η λίστα με τις ενεργές, αλλά και κατάλοιπες συνδέσεις, χωρίς να χρειαστεί εξαντλητική αναζήτηση στα κανάλια.
- Βελτιώθηκε σημαντικά η ικανότητα λήψης στατιστικών στοιχείων.
- Δόθηκε έμφαση στην αποτελεσματικότητα του σε σχέση με τη μνήμη και την επεξεργαστική ισχύ που καταναλώνει

Ανάλυση Απόδοσης

Χρησιμοποιώντας τα συνθετότερα μοντέλα, τόσο στη θεωρία, όσο και στην προσομοίωση, επιχειρήθηκε η ανάλυση της απόδοσης ενός μεγάλου ιεραρχικού δικτύου πρόσβασης. Η βελτίωση που προσφέρει το RSVP-MP στην εξωτερική γραμμή έχει τεκμηριωθεί με βάση τα αποτελέσματα της απλής τοπολογίας πρόσβασης. Με το σύνθετο μοντέλο επιχειρείται να καταγραφεί η αλληλεπίδραση των εσωτερικών ζεύξεων στο δίκτυο πρόσβασης, και να αντληθούν τα αντίστοιχα συμπεράσματα.

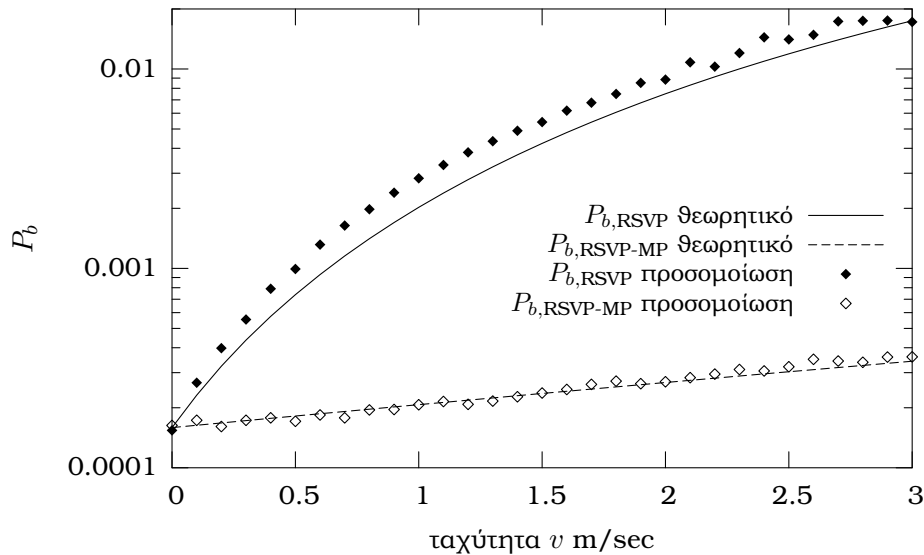
Για την ανάλυση του δικτύου αυτού, θεωρούμε ένα δίκτυο πρόσβασης με $L = 4$ επίπεδα, με πλάτος $N_i = 4$ για $i < L$. Τα κανάλια που αντιστοιχούν σε κάθε επίπεδο είναι $c_i = 5$ για $i < L$ και 10 για την εξωτερική γραμμή ($i = L$). Ο ρυθμός αφίξεων νέων αιτήσεων στο κατώτατο επίπεδο λ και η ταχύτητα των κινούμενων κόμβων v χρησιμοποιούνται ως παράμετροι στην ανάλυση.



Σχήμα 6.11: Συνολική πιθανότητα απόρριψης σε σχέση με το ρυθμό άφιξης νέας κίνησης λ

Στο Σχήμα 6.11 επιβεβαιώνεται η βελτίωση της απόδοσης του συστήματος σε ιεραρχικά δίκτυα. Διατηρώντας σταθερή την ταχύτητα των κινητών κόμβων ($v = 2$ m/sec), η συνολική πιθανότητα απόρριψης για την περίπτωση RSVP αυξάνεται ταχύτερα. Η σχετικά σταθερή διαφορά που παρου-

σιάζουν οι πιθανότητες απόρριψης οφείλεται στο ότι η αρρυθμία στις αφίξεις και το peakedness δεν μεταβάλλονται από το ρυθμό άφιξης νέων αφίξεων.



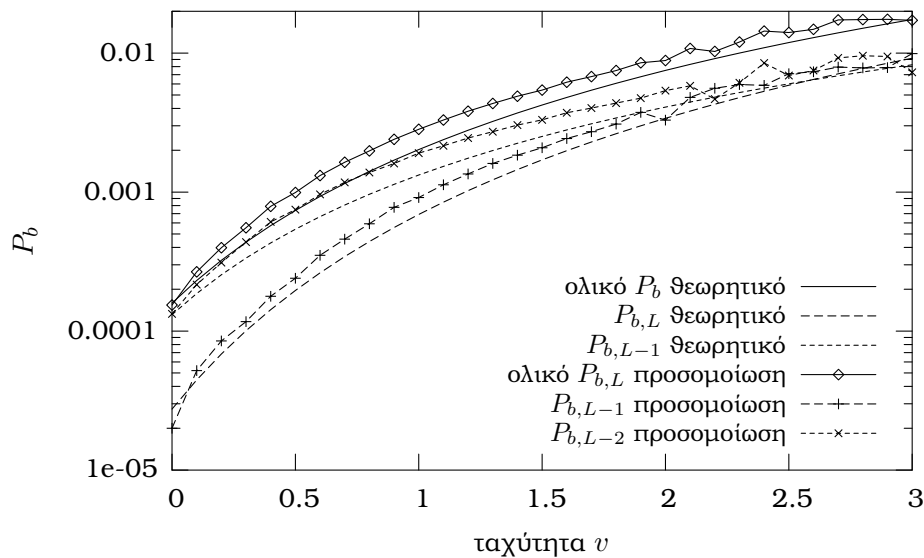
Σχήμα 6.12: Συνολική πιθανότητα απόρριψης σε σχέση με την κινητικότητα

Όμοια συμπεριφορά με το απλό μοντέλο παρατηρείται και στο Σχήμα 6.12, όπου διατηρείται σταθερός ο ρυθμός άφιξης νέων αιτήσεων ($\lambda = 3 \cdot 10^{-4}$). Το RSVP-MP δεν επηρεάζεται καθόλου από την κινητικότητα, ενώ η περίπτωση RSVP συμπεριφέρεται σαν να δέχεται διαρκώς αυξανόμενο φορτίο.

Η συγκεκριμένη τοπολογία που εξετάζεται έχει ρυθμιστεί ώστε να υπάρχει στενωπός και στο εσωτερικό του δικτύου. Το αναλυτικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε επιτρέπει την εκτίμηση των πιθανοτήτων απόρριψης για κάθε επίπεδο του δικτύου πρόσβασης, και επομένως τη γρήγορη εύρεση των πιθανών προβληματικών σημείων.

Για παράδειγμα, στο Σχήμα 6.13 παρουσιάζονται οι πιθανότητες απόρριψης στα ανώτερα επίπεδα του σχήματος RSVP. Παρατηρείται ότι με αυξανόμενη κινητικότητα, το επίπεδο κάτω από το σύνορο του δικτύου πρόσβασης (επίπεδο 2) μετατρέπεται σε κύριο παράγοντα απόρριψης αιτήσεων. Οι πλεοναστικές αιτήσεις δεν φτάνουν καν μέχρι τον δρομολογητή συνόρου, απορριπτόμενες στα χαμηλότερα επίπεδα. Η συνολική πιθανότητα απόρριψης βέβαια αυξάνει, αφού κάθε αίτηση απαιτεί θετική απάντηση από όλους τους ελέγχους αποδοχής για να προχωρήσει στη δέσμευση πόρων.

Παρατηρείται, συνεπώς, η σχεδόν πλήρης ταύτιση των αποτελεσμάτων του θεωρητικού μοντέλου με την προσομοίωση, το οποίο επιβεβαιώνει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων του θεωρητικού μοντέλου. Όπως αναφέρθηκε στη θεωρητική προσέγγιση, η πιθανότητα απόρριψης στην περίπτω-

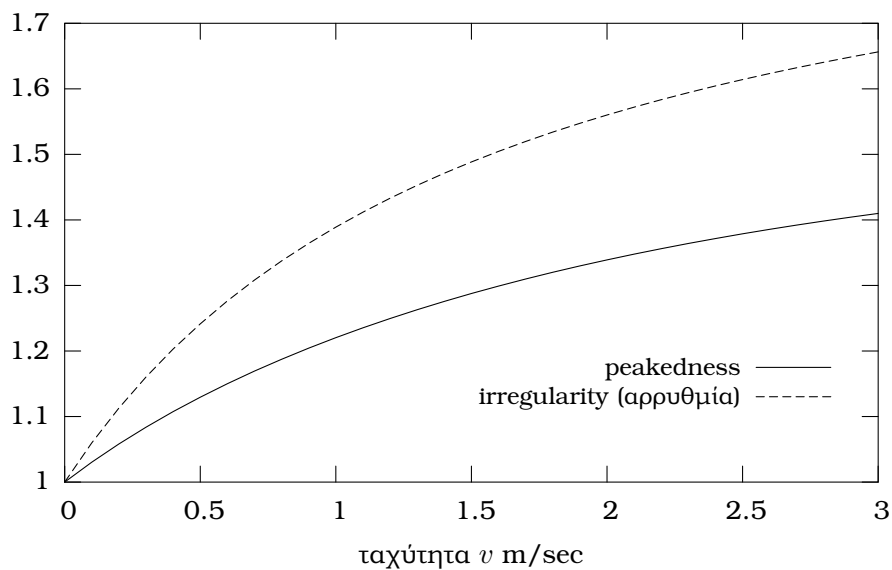


Σχήμα 6.13: Πιθανότητες απόρριψης στα ενδιάμεσα στάδια επίπεδα του συστήματος RSVP σε σχέση με την κινητικότητα

ση της πολύπλοκης διαδικασίας RSVP εκτιμάται από ένα ισοδύναμο σύστημα με τροποποιημένη προσφερόμενη κίνηση και κανάλια κατά την τιμή του peakedness. Το peakedness επηρεάζεται μόνο από την κινητικότητα και, στην περίπτωση του του εξεταζόμενου συστήματος RSVP, η μεταβολή της απεικονίζεται στο Σχήμα 6.14.

Η επιρροή του peakedness στο σύστημα επιβαρύνει ακόμη περισσότερο την ήδη βεβαρυμένη από τις κατάλοιπες συνδέσεις κατάσταση. Το σύστημα ουσιαστικά συμπεριφέρεται, σαν να διαθέτει λιγότερους πόρους (κανάλια) για να εξυπηρετήσει την προσφερόμενη κίνηση. Όσο αυξάνει η τιμή του peakedness, τόσο περισσότερους πόρους απαιτεί το ίδιο προσφερόμενο φορτίο κίνησης. Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι το peakedness δεν αφορά στην κίνηση που προσφέρεται από τις κατάλοιπες συνδέσεις, αλλά στο γεγονός της ταυτόχρονης άφιξης αίτησης μεταπομπής και κατάλοιπης σύνδεσης. Αφορά δηλαδή μόνο τη συσχέτιση που υπάρχει μεταξύ των δύο αιτιών κατάληψης πόρων στο δίκτυο. Όπως παρατηρείται, η συσχέτιση αυτή δημιουργεί επιπλέον προβλήματα, αφού συμβάλλει στην αρρυθμία και συνεπώς στην αύξηση των απαιτούμενων διαθέσιμων πόρων για την παροχή της ίδιας υπηρεσίας.

Οι παραδοχές που έχουν γίνει για το θεωρητικό μοντέλο δεν καλύπτουν πλήρως τη συμπεριφορά των κατάλοιπων δεσμεύσεων. Παρουσιάζονται σαν προσφερόμενη κίνηση, η οποία θα αντιμετωπίσει τον ίδιο έλεγχο αποδοχής, όπως και οι νέες αφίξεις ή οι αιτήσεις μεταπομπής. Αυτό δεν ισχύει, αφού οι κατάλοιπες δεσμεύσεις απλώς συνεχίζουν να δεσμεύουν πόρους, επομένως η πιθανότητα αποδοχής τους (σε όρους ελέγχου αποδοχής) είναι 1. Η παράμετρος αυτή θα έπρεπε να επηρεάζει ακόμη πιο αρνητικά τις υπόλοιπες αιτήσεις στο θεωρητικό μοντέλο, αυξάνοντας την



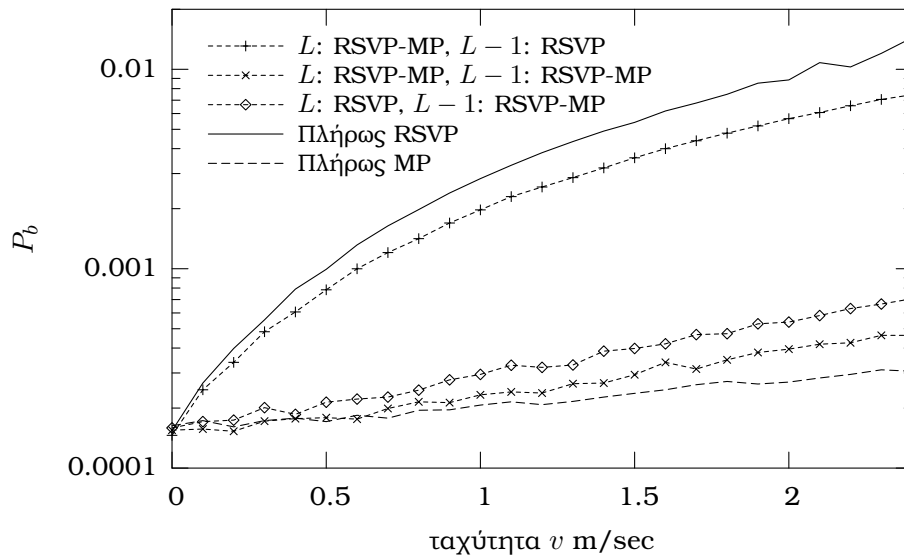
Σχήμα 6.14: Αρρυθμία και peakedness της προσφερόμενης κίνησης στο σύστημα RSVP

πιθανότητα απόρριψης. Αυτός είναι και ο λόγος της μικρής απόκλισης των θεωρητικών μοντέλων από τα μοντέλα προσομοίωσης.

Είναι προφανές ότι η βέλτιστη απόδοση του συστήματος θα συμβαίνει με την εφαρμογή της RSVP-MP τεχνολογίας σε όλους τους δρομολογητές όλων των επιπέδων του δικτύου πρόσβασης. Αυτό όμως εκτιμάται ότι θα επιφέρει επεξεργαστική επιβάρυνση και θα είναι πιθανότατα ασύμφορο οικονομικά να υλοποιηθεί. Η πιθανότερη προσέγγιση στο θέμα είναι η εφαρμογή του μόνο στον δρομολογητή συνόρου ή/και στους δρομολογητές αμέσως κάτω από αυτόν. Η ακριβής διαρρύθμιση του δικτύου θα καθορίσει την πιο αποτελεσματική τοποθέτηση.

Στην περίπτωση της δικτυακής τοπολογίας που εξετάζεται, υπάρχει πρόβλημα στην τροφοδότηση της εξωτερικής γραμμής, αφού υπερ-φορτώνεται το εσωτερικό του δικτύου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.13. Επομένως, η εισαγωγή του RSVP-MP θα πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο, ώστε να μειωθεί ο όγκος της κίνησης στις εσωτερικές γραμμές προς τον δρομολογητή συνόρου.

Στο Σχήμα 6.15 απεικονίζονται οι συνολικές πιθανότητες απόρριψης για τις διαφορετικές περιπτώσεις εφαρμογής του RSVP-MP, όπως καταγράφηκαν από την προσομοίωση. Οι καμπύλες που περικλείουν τις υπόλοιπες αντιστοιχούν στο σύστημα που διαθέτει μόνο λειτουργικότητα RSVP (ανώτερη) και στο σύστημα που διαθέτει παντού λειτουργικότητα RSVP-MP (κατώτερη). Όπως είναι αναμενόμενο, την αμέσως καλύτερη απόδοση έχει το σύστημα που διαθέτει και στα δύο ανώτερα επίπεδα λειτουργικότητα RSVP-MP. Αμέσως μετά βρίσκεται, όμως, το σύστημα που έχει λειτουργικότητα RSVP-MP στους δρομολογητές που βρίσκονται ένα επίπεδο κάτω από τον δρομολογητή συνόρου, αλλά όχι στον ίδιο τον δρομολογητή συνόρου. Για την ακρίβεια, η συμπεριφορά του συ-



Σχήμα 6.15: Συνολικές πιθανότητες απόρριψης για διαφορετικές διαρρυθμίσεις του δικτύου πρόσβασης

στήματος ακολουθεί τη γενική κατεύθυνση της RSVP-MP βελτίωσης, δηλαδή μικρή αύξηση με την κινητικότητα. Αντίθετα, το σύστημα που διαθέτει RSVP-MP μόνο στο σύνορο του, συμπεριφέρεται λίγο καλύτερα από ένα σύστημα χωρίς καθόλου RSVP-MP. Η συμπεριφορά που διαφαίνεται οφείλεται στη διαρρύθμιση του συστήματος, και την ανάγκη για ειδικότερη αντιμετώπιση στο επίπεδο $L - 1$.

Η παρατήρηση αυτή μπορεί να είναι χρήσιμη στο σχεδιασμό ενός δικτύου ή στην απόφαση για την εφαρμογή RSVP-MP. Ας σημειωθεί ότι τους δρομολογητές κατωτέρων επιπέδου διασχίζει κλάσμα της κίνησης που διασχίζει τον δρομολογητή συνόρου, επομένως η πολυπλοκότητα που επιφέρει το RSVP-MP μπορεί να υποστηριχτεί ευκολότερα.

6.3 Αξιολόγηση RSVP-MP

Η εισαγωγή της λειτουργικότητας RSVP-MP στα δίκτυα πρόσβασης προκαλεί την απόκρυψη των παρενεργειών της κινητικότητας από τις ευαίσθητες εφαρμογές ποιότητας υπηρεσίας. Με τον περιορισμό της ανταλλαγής σηματοδοσίας στα όρια του δικτύου πρόσβασης, ελαττώνεται ο χρόνος επανεγκατάστασης των απαραίτητων δεσμεύσεων, αλλά και επαναχρησιμοποιούνται οι ήδη υπάρχουσες δεσμεύσεις έξω από το δίκτυο πρόσβασης.

Η αυξημένη πολυπλοκότητα που επιφέρει η πρόταση RSVP-MP είναι το βασικό μειονέκτημα της. Παρόλα αυτά, πρέπει να συνεκτιμηθεί ότι μόνο ο δρομολογητής συνόρου στο δίκτυο πρόσβασης (ή οι δρομολογητές εκείνοι που αντιμετωπίζουν έλλειψη πόρων) θα πρέπει να αναβαθμιστούν.

Κάθε άλλο στοιχείο του δικτύου, οι επικοινωνούντες κόμβοι, οι δρομολογητές κορμού, οι εσωτερικοί δρομολογητές πρόσβασης, και κυρίως οι κινητοί κόμβοι θα πρέπει μόνο να υλοποιούν την προδιαγραφή RSVP.

Η ανάλυση αποδοτικότητας της πρότασης ποσοτικοποίησε τη βελτίωση που αναμενόταν. Επιβεβαιώθηκε ότι η κινητικότητα των χρηστών δεν επηρεάζει καθόλου τα δίκτυα που υλοποιούν το RSVP-MP. Αναλύθηκε επίσης η συμπεριφορά που επιδεικνύει το απλό RSVP και η επιπτώσεις της τόσο στο εσωτερικό του δικτύου πρόσβασης, όσο και στη διασύνδεση των δικτύων πρόσβασης και κορμού. Μειρήθηκε το ποσοστό των πόρων που καταλαμβάνονται από κατάλοιπες δεσμεύσεις, δημιουργούμενες από μεταπομπές κινητών κόμβων, και εξηγήθηκε ο τρόπος που επηρεάζει τη συνολική απόδοση του δικτύου.

Η επιβεβαίωση των θεωρητικών μοντέλων από την αντίστοιχη προσομοίωση επιτρέπει την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων, για τη συμπεριφορά που παρουσιάζει κάθε σύστημα στην προσφερόμενη κίνηση, αλλά και στην κινητικότητα των χρηστών του. Χρησιμοποιώντας το σύνθετο μοντέλο, είναι δυνατή η εξαγωγή της εκτιμώμενης απόδοσης του δικτύου για κάθε ζεύξη στο εσωτερικό του δικτύου πρόσβασης και με τον τρόπο αυτό να εστιαστεί η εφαρμογή της τεχνολογίας RSVP-MP στα σημεία που χρειάζεται.

Κεφάλαιο 7

Επίλογος - Συμπεράσματα

Η εξασφάλιση εγγυήσεων ποιότητας υπηρεσίας στο Internet είναι αναγκαία για τη δημιουργία υποδομών υποστήριξης καινοτόμων εφαρμογών. Αν και στα δίκτυα κορμού το διαθέσιμο εύρος ζώνης που προσφέρουν οι οπτικές ίνες ευνοεί την υπερ-παροχή πόρων, και επομένως την ικανοποίηση των απαιτήσεων των υπηρεσιών, η κατάσταση είναι διαφορετική στα δίκτυα πρόσβασης. Η σύνδεση των δικτύων πρόσβασης-κορμού, η οποία συνήθως αντικατοπτρίζει και το κόστος σύνδεσης στο Internet, καθώς και το ασύρματο τμήμα της διαδρομής σε δίκτυα κινητών επικοινωνιών, αντιστοιχούν στα σημεία εκείνα όπου το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι κατά κανόνα πολύτιμο.

Η μεγάλη διείσδυση των κινητών επικοινωνιών στην καθημερινή ζωή επιφέρει τη μετατόπιση των απαιτητικών εφαρμογών (τηλεδιάσκεψη, ψυχαγωγία) στην κινητή συσκευή, και επομένως την ανάγκη παροχής ποιότητας υπηρεσίας. Λόγω της αυξανόμενης επιρροής του πρωτοκόλλου Internet (IP), η δικτυακή υποδομή που εγκαθίσταται στηρίζεται στην τεχνολογία IP, επομένως οι μηχανισμοί κινητικότητας και παροχής ποιότητας υπηρεσίας θα είναι βασίζονται στους μηχανισμούς που υπάρχουν ήδη για το Internet.

Ωστόσο, η διασυνεργασία των πρωτοκόλλων που υλοποιούν την κινητικότητα και τη σηματοδότηση παροχής ποιότητας υπηρεσίας, δηλαδή του Mobile IP και του RSVP, παρουσιάζει προβλήματα. Το σημαντικότερο από αυτά αφορά στις δεσμεύσεις πόρων για ένα κινητό κόμβο, που αλλάζει διεύθυνση επικοινωνίας. Οι υπάρχουσες δεσμεύσεις περιέχουν τη διεύθυνση επικοινωνίας, με συνέπεια να καθίστανται άκυρες μετά από μία μεταπομπή και να απαιτείται επανεγκατάσταση τους από-άκρη-σε-άκρη. Οι προτάσεις επίλυσης αυτού του προβλήματος δεν είναι απλές ή/και αποτελεσματικές και συνήθως απαιτούν ριζικές μεταβολές στο RSVP και αναβάθμιση της αντίστοιχης λειτουργικότητας σχεδόν σε όλη την υποδομή του δικτύου.

Στον ερευνητικό αυτό χώρο εστιάζεται η παρούσα εργασία. Προτείνεται η εισαγωγή του RSVP-MP (RSVP Mobility Proxy) του Πληρεξούσιου Διαχειριστή Κινητικότητας RSVP στο σύνορο του

δικτύου πρόσβασης με σκοπό τη διατήρηση των δεσμεύσεων εκτός του δικτύου πρόσβασης (στο δίκτυο κορμού) μετά από μία μεταπομπή. Για το σκοπό αυτό αξιοποιούνται οι τεχνικές της μικρο-κινητικότητας και πραγματοποιείται κατάλληλη επεξεργασία στα μηνύματα RSVP που διασχίζουν το RSVP-MP. Με τον τρόπο αυτό, δεν απαιτείται καμμία αλλαγή στην προδιαγραφή και υλοποίηση του πρωτοκόλλου RSVP στους κόμβους που το χρησιμοποιούν.

Η πρόταση εισαγωγής του RSVP-MP αναλύθηκε ως προς τα αποτελέσματα της με χρήση θεωρητικών μοντέλων και εργαλείων προσομοίωσης. Περιγράφηκε η βελτίωση της ταχύτητας επανεγκατάστασης των δεσμεύσεων μετά από μία μεταπομπή. Αναπτύχθηκαν μοντέλα για απλή τοπολογία δικτύων πρόσβασης, όπου η στενωπός βρίσκεται μόνο στη σύνδεση του δικτύου πρόσβασης-κορμού και για συνθετότερες τοπολογίες με πολλαπλά ιεραρχικά επίπεδα, όπου η στενωπός μπορεί να βρίσκεται σε οποιαδήποτε γραμμή διασύνδεσης στο εσωτερικό του δικτύου πρόσβασης. Με βάση τα μοντέλα αυτά, εκτιμήθηκε η απόδοση του τοπικού ελέγχου αποδοχής (admission control) και η πιθανότητα απόρριψης αιτήσεων στο δίκτυο. Επιπλέον αναλύθηκε η κατανομή των πόρων ανάμεσα σε ενεργές δεσμεύσεις (δεσμεύσεις που εξυπηρετούν ροές δεδομένων) και κατάλοιπες δεσμεύσεις (δεσμεύσεις που απέμειναν μετά από μεταπομπή κινητού κόμβου). Τόσο το θεωρητικό μοντέλο, όσο και η προσομοίωση αποδεικνύουν την υπεροχή του RSVP-MP. Η πολυπλοκότητα που εισάγεται με τη λειτουργικότητα RSVP-MP εξισορροπείται από τη βελτίωση αποδοτικότητας που προσφέρει.

Στο μέλλον, οι απαιτήσεις για σηματοδοσία στο Internet πιθανά να είναι διαφορετικές. Ωστόσο, οι βασικές αρχές σχεδιασμού πρωτοκόλλων παραμένουν. Το σχήμα RSVP-MP στηρίζεται σε πρωτόκολλα μικρο-κινητικότητας, των οποίων η βασική ιδέα έγκειται στον περιορισμό των φαινομένων και των παρενεργειών της κινητικότητας στο δίκτυο πρόσβασης όπου και πραγματοποιείται η μεταπομπή. Το σκεπτικό αυτό θα πρέπει να αποτελέσει ένα από τα κριτήρια αξιολόγησης των μελλοντικών πρωτοκόλλων σηματοδοσίας ποιότητας υπηρεσίας.

Η προτυποποίηση κάποιας σταθερής διεπαφής ανάμεσα στα πρωτόκολλα κινητικότητας και ποιότητας υπηρεσίας θα επιτρέψει την παράλληλη και ανεξάρτητη ανάπτυξη τους, χωρίς όμως προβλήματα διαλειτουργικότητας. Η φιλοσοφία αυτή συμβαδίζει με τις αρχές της ανεξαρτησίας των δομικών συστατικών (modularity). Η μοναδική ταυτότητα μιας ροής που θα διατηρείται μετά από μεταπομπή ίσως αποτελέσει στο μέλλον την προτιμώμενη λύση. Θα πρέπει, όμως, να εξεταστούν ενδελεχώς όλες οι πλευρές της πρότασης αυτής (ασφάλεια και πιστοποίηση, επεξεργαστική επιβάρυνση, όγκος και μηνύματα σηματοδοσίας, αλληλεπίδραση με πρωτόκολλα δρομολόγησης, διαδρομή που ακολουθείται, κλπ), προκειμένου να αποτελέσει τη βάση διασυνεργασίας κινητικότητας και ποιότητας υπηρεσίας.

Bibliograf'ia

- [1] C. Andreoli, N. Blefari-Melazzi, M. Listanti, and M. Palermo. Mobility Management in IP Networks Providing Real-Time Services. In *IEEE International Conference on Universal Personal Communications (ICUPC)*, pages 774–777, Cambridge, MA, USA, September 1996.
- [2] G. Armitage. *Quality of Service in IP Networks: Foundations for a Multi-Service Internet*. MTP, 2000.
- [3] ATM Forum. ATM User-Network Interface (UNI) Specification Version 4.0, 1996.
- [4] ATM Forum. Private Network-Network Interface Specification v1.0 (PNNI), 1996.
- [5] A. Awduche and E. Agu. Mobile Extensions to RSVP. In *IEEE International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*, pages 132–136, Las Vegas, NV, USA, September 1997.
- [6] A. Nakajima B. Jabbari, G. Colombo and J. Kulkarn. Network Issues for Wireless Communications, January 1995.
- [7] F. Baker, C. Iturralde, F. Le Faucheur, and B. Davie. RFC 3175: Aggregation of RSVP for IPv4 and IPv6 Reservations, September 2001.
- [8] H. Balakrishnan, S. Seshan, and R. Katz. Improving Reliable Transport and Handover Performance in Cellular Wireless Networks. In *ACM Mobicom*, Berkeley, CA, USA, November 1995.
- [9] L. Berger, D. Gan, G. Swallow, P. Pan, F. Tommasi, and S. Molendini. RFC 2961: RSVP Refresh Overhead Reduction Extensions, April 2001.
- [10] Y. Bernet. RFC 2996: Format of the RSVP DCLASS Object, November 2000.

- [11] Y. Bernet. The Complementary Roles of RSVP and Differentiated Services in the Full-Service QoS Network. *IEEE Communications Magazine*, 38(2):154–162, February 2000.
- [12] Y. Bernet, P. Ford, R. Yavatkar, F. Baker, L. Zhang, M. Speer, R. Braden, B. Davie, J. Wroclawski, and E. Felstaine. RFC 2998: A Framework for Integrated Services Operation over Diffserv Networks, November 2000.
- [13] Y. Bernet, A. Smith, and B. Davie. RFC 2997: Specification of the Null Service Type, November 2000.
- [14] S. Blake, D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang, and W. Weiss. RFC 2475: An Architecture for Differentiated Services, December 1998.
- [15] C. Bormann. RFC 2689: Providing Integrated Services over Low-bitrate Links, September 1999.
- [16] R. Braden, D. Clark, and S. Shenker. RFC 1633: Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview, June 1994.
- [17] R. Braden and L. Zhang. RFC 2209: Resource ReSerVation Protocol (RSVP) – Version 1 Message Processing Rules, September 1997.
- [18] R. Braden, ed., L. Zhang, S. Berson, S. Herzog, and S. Jamin. RFC 2205: Resource ReSerVation Protocol (RSVP) – Version 1 Functional Specification, September 1997.
- [19] R. Caceres and V. Padmanabhan. Fast and Scalable Handoffs for Wireless Internetwork. In *ACM Mobicom*, Rye, New York, November 1996.
- [20] A. Campbell, J. Gomez, S. Kim, C-Y. Wand, Z. Turanyi, and A. Valko. Comparison of IP Micromobility Protocols. *IEEE Wireless Communications*, 9(1):72–82, February 2002.
- [21] C. Castellucia. Extending Mobile IP with Adaptive Individual Paging: A Performance Analysis. In *IEEE International Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, Antibes, France, July 2000.
- [22] W-T. Chen and L-C. Huang. RSVP Mobility Support: A Signalling Protocol for Integrated Services Internet with Mobile Hosts. In *IEEE/ACM INFOCOM*, Tel Aviv, Israel, March 2000.
- [23] G. Chiruvolu, A. Agrawal, and M. Vanderhoute. Mobility and QoS Support for IPv6-based Real-time Wireless Internet Traffic. In *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Vancouver, Canada, June 1999.

- [24] M-H. Chiu and M. Bassiouni. Predictive Schemes for Handoff Prioritization in Cellular Networks Based on Mobile Positioning. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 18(3):510–522, March 2000.
- [25] S. Choi and G. Shin. Predictive and Adaptive Bandwidth Reservation for Hand-Offs in QoS-Sensitive Cellular Networks. In *ACM SIGCOMM*, pages 155–166, Vancouver, B.C., Canada, September 1998.
- [26] D. Clark, S. Shenker, and L. Zhang. Supporting Real-Time Applications in an Integrated Services Packet Network: Architecture and Mechanism. In *ACM SIGCOMM*, pages 14–26, Baltimore, MA, USA, September 1992.
- [27] E. Crawley, L. Berger, S. Berson, F. Baker, M. Borden, and J. Krawczyk. RFC 2382: A Framework for Integrated Services and RSVP over ATM, August 1998.
- [28] S.K. Das, R. Jayaram, N.K. Kakani, and S.K. Sen. A Resource Reservation Mechanism for Mobile Nodes in the Internet. In *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) Spring*, pages 1940–1944, Houston, Texas, March 1999.
- [29] S. Deering. RFC 1112: Host Extensions for IP Multicasting, August 1989.
- [30] S. Deering and R. Hinden. RFC 2460: Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification, December 1998.
- [31] S. Deering, ed. RFC 1256: ICMP Router Discovery Messages, September 1991.
- [32] D. Farinacci, T. Li, S. Hanks, D. Meyer, and P. Traina. RFC 2784: Generic Routing Encapsulation (GRE), March 2000.
- [33] P. Ferguson and D. Senie. RFC 2827: Network Ingress Filtering: Defeating Denial of Service Attacks which employ IP Address Spoofing, May 2000.
- [34] S. Floyd and V. Jacobson. The Synchronization of Periodic Routing Messages. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2(2):122–136, April 1994.
- [35] C.C. Foo and K.C. Chua. Implementing Resource Reservations for mobile hosts in the Internet Using RSVP and Mobile IP. In *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) Spring*, pages 1323–1327, Tokyo, Japan, March 2000.
- [36] D. Forsberg, J.T. Malinen, J.K. Malinen, T. Weckstrfm, and M. Tiusanen. Distributing Mobility Agents Hierarchically under Frequent Location Updates. In *IEEE International*

- Workshop on Mobile Multimedia Communications (MoMuC)*, San Diego, California, November 1999.
- [37] A. Ghanwani, W. Pace, V. Srinivasan, A. Smith, and M. Seaman. RFC 2816: A Framework for Integrated Services Over Shared and Switched IEEE 802 LAN Technologies, May 2000.
- [38] A. Girard. *Routing and Dimensioning in Circuit-Switched Networks*. Addison-Wesley, 1990.
- [39] S. Glass, T. Hiller, S. Jacobs, and C. Perkins. RFC 2977: Mobile IP Authentication, Authorization, and Accounting Requirements, October 2000.
- [40] R. Guerin. *Queueing and Traffic in Cellular Radio*. PhD thesis, Dept. of Electrical Engineering, California Institute of Technology, Pasadena, California, 1986.
- [41] E. Gustafsson, A. Jonsson, and C. Perkins. Mobile IPv4 Regional Registration. Internet Draft, work in progress, October 2002. draft-ietf-mobileip-reg-tunnel-07.txt.
- [42] S. Hadjiefthymiades, S. Paskalis, G. Fankhauser, and L. Merakos. Mobility Management in an IP-based Wireless ATM Network. In *Proceedings of ACTS Mobile Summit*, Rhodes, Greece, June 1998.
- [43] J. Heinanen, F. Baker, W. Weiss, and J. Wroclawski. RFC 2597: Assured Forwarding PHB Group, June 1999.
- [44] A. Helmy, M. Jaseemuddin, and G. Bhaskara. Efficient Micro-Mobility Using Intra-Domain Multicast-Based Mechanisms (M&M). *ACM Computer Communication Review*, 32(5):61–72, November 2002.
- [45] S. Herzog. RFC 2750: RSVP Extensions for Policy Control, January 2000.
- [46] R. Hinden and S. Deering. RFC 2373: IP Version 6 Addressing Architecture, July 1998.
- [47] L. Hsu, R. Purnadi, and S. Wang. Maintaining Quality of Service (QoS) During Handoff in Cellular System with Movement Prediction Schemes. In *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) Fall*, pages 2153–2157, Amsterdam, The Netherlands, September 1999.
- [48] Internet Engineering Task Force. <http://www.ietf.org/>.
- [49] itu t. Recommendation Q.700: Introduction to CCITT Signalling System No. 7, 1993.

- [50] ITU-T. Recommendation Q.931: ISDN User-Network Interface Layer 3 Specification for Basic Call Control, 1993.
- [51] ITU-T. Recommendation Q.2931: Broadband Integrated Service Digital Network (B-ISDN) Digital Subscriber Signaling System no.2 (DSS2) User Network Interface Layer 3 Specification for Basic Call/Connection Control, 1994.
- [52] ed.) J. (Loughney, M. Nakhjiri, C. Perkins, and R. Koodli. Context Transfer Protocol, January 2004. draft-ietf-seamoby-ctp-06.txt.
- [53] B. Jabbari. Teletraffic Aspects of Evolving and Next Generation Wireless Communications Networks. *IEEE Personal Communications*, 3(6):4–9, December 1996.
- [54] V. Jacobson, K. Nichols, and K. Poduri. RFC 2598: An Expedited Forwarding PHB, June 1999.
- [55] R. Jain, T. Raleigh, D. Yang, L-F. Chang, C. Graff, M. Bereschinsky, and M. Patel. Enhancing Survivability of Mobile Internet Access Using Mobile IP with Location Registers. In *IEEE/ACM INFOCOM*, New York, March 1999.
- [56] P. Ji, Z. Ge, J. Kurose, and D. Towsley. A Comparison of Hard-state and Soft-state Signaling Protocols. In *ACM SIGCOMM*, pages 251–262, Karlsruhe, Germany, August 2003.
- [57] D. Johnson, C. Perkins, and J. Arkko. Mobility Support in IPv6. Internet Draft, work in progress, June 2003. draft-ietf-mobileip-ipv6-24.txt.
- [58] J.Rajahalme, A. Conta, B. Carpenter, and S. Deering. IPv6 Flow Label Specification. Internet Draft, work in progress, December 2003. draft-ietf-ipv6-flow-label-09.txt.
- [59] A. Kaloxylos, S. Hadjiefthymiades, and L. Merakos. DNS Extensions to Support Location Management in IP Networks. In *Proceedings of ACTS Mobile Summit*, Sorrento, Italy, June 1999.
- [60] V. Kapoor, G. Edwards, and R. Sankar. Handoff Criteria for Personal Communication Networks. In *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1297–1301, New Orleans, LA, USA, May 1994.
- [61] G. Karagiannis and V. Rexhepi. A Framework for QoS & Mobility in the Internet Next Generation. Technical Report TR-CTIT-00-10, Centre for Telematics and Information

- Technology (CTIT), University of Twente, Enschede, The Netherlands, June 2000. <http://www.ub.utwente.nl/webdocs/ctit/1/00000024.pdf>.
- [62] D. Katz. RFC 2113: IP Router Alert Option, February 1997.
- [63] J. Kempf, ed. RFC 3374: Problem Description: Reasons For Performing Context Transfers Between Nodes in an IP Access Network, September 2002.
- [64] S. Kent and R. Atkinson. RFC 2401: Security Architecture for the Internet Protocol, November 1998.
- [65] R. Koodli, ed. Fast Handovers for Mobile IPv6, October 2003. draft-ietf-mipshop-fast-mipv6-00.txt.
- [66] G-S. Kuo and P-C. Ko. Dynamic RSVP for Mobile IPv6 in Wireless Networks. In *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) Spring*, Tokyo, Japan, May 2000.
- [67] J. Kurose and K. Ross. *Computer Networking: A Top Down Approach Featuring the Internet*. Addison-Wesley, 2nd edition, 2000.
- [68] S-J. Leu and R-S. Chang. Integrated Services Mobile Internet. *Kluwer Mobile Networking and Applications (MONET)*, 8(6):635-642, December 2003.
- [69] D. Levine, I. Akyildiz, and M. Naghshineh. A Resource Estimation and Call Admission Algorithm for Wireless Multimedia Networks Using the Shadow Cluster Concept. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 5(1):1-12, February 1997.
- [70] H. Levkowitz and S. Vaarala. RFC 3519: Mobile IP Traversal of Network Address Translation (NAT) Devices, April 2003.
- [71] S. Lu and V. Bharghavan. Adaptive Resource Management Algorithms for Indoor Mobile Computing Environments. In *ACM SIGCOMM*, Stanford, CA, USA, August 1996.
- [72] I. Mahadevan and K. Sivalingam. An Experimental Architecture for providing QoS Guarantees in Mobile Networks Using RSVP. In *IEEE International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pages 50-54, Boston, MA, USA, September 1998.
- [73] I. Mahadevan and K. Sivalingam. Architecture and Experimental Results for Quality of Service in Mobile Networks Using RSVP and CBQ. *Kluwer Wireless Networks (WINET)*, 6(3):221-234, 2000.

- [74] A. Mankin, Ed., F. Baker, B. Braden, S. Bradner, M. O'Dell, A. Romanow, A. Weinrib, and L. Zhang. RFC 2208: Resource ReSerVation Protocol (RSVP) Version 1 Applicability Statement, Some Guidelines on Deployment, September 1997.
- [75] J. Manner, A. Lopez, A. Mihailovic, H. Velayos, E. Hepworth, and Y. Khouaja. Evaluation of Mobility and Quality of Service Interaction. *Elsevier Computer Networks*, 38(2):137-163, February 2002.
- [76] P. McCann, T. Hiller, J. Wang, A. Casati, C. Perkins, and P. Calhoun. Transparent Hierarchical Mobility Agents (THEMA). Internet Draft, work in progress, March 1999. draft-mccann-thema-00.txt.
- [77] G. Montenegro and V. Gupta. RFC 2356: Sun's SKIP Firewall Traversal for Mobile IP, June 1998.
- [78] G. Montenegro, ed. RFC 3024: Reverse Tunneling for Mobile IP, revised, January 2001.
- [79] M. Mouly and M-B. Pautet. *The GSM System for Mobile Communications*. Cell & Sys, 1992.
- [80] J. Moy. RFC 2328: OSPF Version 2, April 1998.
- [81] J. Mysore and V. Bharghavan. A New Multicasting-Based Architecture for Internet Host Mobility. In *ACM Mobicom*, pages 161-172, Budapest, Hungary, September 1997.
- [82] N. Nakajima, A. Dutta, S. Das, and H. Schulzrinne. Handoff Delay Analysis for SIP Mobility in IPv6 Testbed. In *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Anchorage, AK, USA, May 2003.
- [83] T. Narten, E. Nordmark, and W. Simpson. RFC 2461: Neighbor Discovery for IP Version 6 (IPv6), December 1998.
- [84] Next Steps In Signaling IETF Working Group. <http://www.ietf.org/html.charters/nsis-charter.html>.
- [85] K. Nichols, S. Blake, F. Baker, and D. Black. RFC 2474: Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers, December 1998.
- [86] NSF-NetWorkshop 2003. Report of the National Science Foundation Workshop on Fundamental Research in Networking, April 2003. <http://www.cs.virginia.edu/~jorg/workshop1>.

- [87] A. O'Neill, S. Corsson, and G. Tsirtsis. Routing and Handoff in the Edge Nobiity Architecture. *ACM Mobile Computing and Communications Review*, 4(4):54–66, October 2000.
- [88] C. Partridge and A. Jackson. RFC 2711: IPv6 Router Alert Option, October 1999.
- [89] G. Partridge. *Gigabit Networking*. Addison-Wesley, 1994.
- [90] S. Paskalis, A. Kaloxylos, and E. Zervas. An Efficient QoS Scheme for Mobile Hosts. In *IEEE Local Computer Networks (LCN), Workshop on Wireless Local Networks*, Tampa, FL, USA, November 2001.
- [91] S. Paskalis, A. Kaloxylos, E. Zervas, and L. Merakos. RSVP Mobility Proxy. Internet Draft, work in progress, December 2001. draft-paskalis-rsvmp-00.txt.
- [92] S. Paskalis, A. Kaloxylos, E. Zervas, and L. Merakos. Evaluating the RSVP Mobility Proxy Concept. In *IEEE PIMRC*, Lisbon, Portugal, September 2002.
- [93] S. Paskalis, A. Kaloxylos, E. Zervas, and L. Merakos. An Efficient RSVP-Mobile IP Interworking Scheme. *Journal on Special Topics in Mobile Networking and Applications (MONET)*, 8(3):197–207, June 2003.
- [94] C. Perkins. RFC 2003: IP Encapsulation within IP, October 1996.
- [95] C. Perkins. RFC 2004: Minimal Encapsulation within IP, October 1996.
- [96] C. Perkins. *Mobile IP: Design Principles and Practices*. Addison-Wesley, 1998.
- [97] C. Perkins and P. Calhoun. RFC 3012: Mobile IPv4 Challenge/Response Extensions, November 2000.
- [98] C. Perkins and D. Johnson. Route Optimization in Mobile IP. Internet Draft, work in progress, September 2001. draft-ietf-mobileip-optim-11.txt.
- [99] C. Perkins and K-Y. Wang. Optimized Smooth Handoffs in Mobile IP. In *IEEE International Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pages 340–346, Red Sea, Egypt, June 1999.
- [100] C. Perkins, ed. RFC 2002: IP Mobility Support, October 1996.
- [101] C. Perkins, ed. RFC 3344: IP Mobility Support for IPv4, August 2002.
- [102] J. Postel. RFC 791: Internet Protocol, September 1981.

- [103] J. Postel. RFC 792: Internet Control Message Protocol, September 1981.
- [104] J. Postel. RFC 793: Transmission Control Protocol, September 1981.
- [105] R. Ramjee, K. Varadhan, L. Salgarelli, S. Thuel, S-Y. Wang, and T. La Porta. HAWAII: A Domain-based Approach for Supporting Mobility in Wide-area Wireless Networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 10(3):396–410, June 2002.
- [106] P. Reinbold and O. Bonaventure. A Comparison of IP Mobility Protocols. In *IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology in the Benelux (SCVT)*, October 2001.
- [107] P. Reinbold and O. Bonaventure. IP Micromobility Protocols. *IEEE Communications Society Surveys and Tutorials*, 5, Third Quarter 2003.
- [108] Y. Rekhter and T. Li. RFC 1771: A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4), March 1995.
- [109] M. Riegel and M. Tuexen. Mobile SCTP. Internet Draft, work in progress, August 2003. draft-riegel-tuexen-mobile-sctp-02.txt.
- [110] R. Rivest. RFC 1321: The MD5 Message-Digest Algorithm, April 1992.
- [111] J. Rosenberg, H. Schulzrinne, G. Camarillo, A. Johnston, J. Peterson, R. Sparks, M. Handley, and E. Schooler. RFC 3261: SIP: Session Initiation Protocol, June 2002.
- [112] J. Saltzer, D. Reed, and D. Clark. End-To-End Arguments in System Design. *ACM Transactions on Computer Systems*, 2(4):277–288, November 1984.
- [113] H. Schulzrinne and E. Wedlund. Application-Layer Mobility Using SIP. *ACM Mobile Computing and Communications Review*, 4(3):47–57, July 2000.
- [114] C. Shen, A. Lo, H. Zeng, and M. Greis. An Interoperation Framework for using RSVP in Mobile IPv6 Networks. Internet Draft, work in progress, July 2001. draft-shen-rsvp-mobileipv6-interop-00.txt.
- [115] Q. Shen, A. Lo, W. Seah, and C-C. Ko. On Providing Flow Transparent Mobility Support for IPv6-based Wireless Real-Time Services. In *IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications (MoMuC)*, Tokyo, Japan, October 2000.
- [116] S. Shenker and L. Breslau. Two Issues in Reservation Establishment. In *ACM SIGCOMM*, Cambridge, MA, USA, August 1995.

- [117] S. Shenker, C. Partridge, and R. Guerin. RFC 2212: Specification of Guaranteed Quality of Service, September 1997.
- [118] R. Singh, Y-C. Tay, W-T. Teo, and S-W. Yeow. RAT: A Quick (And Dirty?) Push for Mobility Support. In *IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA)*, New Orleans, LA, USA, February 1999.
- [119] D. Sisalem, S. Krishnamurthy, and S. Dao. DiffRes: A Reservation Protocol for the Differentiated Service Model. Technical report, HRL Laboratories, 1999.
- [120] A. Snoeren, D. Andersen, and H. Balakrishnan. Fine-Grained Failover Using Connection Migration. In *USENIX Symposium on Internet Technologies and Systems*, pages 221–232, San Francisco, CA, USA, March 2001.
- [121] A. Snoeren and H. Balakrishnan. An End-to-End Approach to Host Mobility. In *ACM Mobicom*, pages 155–166, Boston, MA, USA, August 2000.
- [122] H. Soliman, C. Castellucia, K. El-Malki, and L. Bellier. Hierarchical MIPv6 Mobility Management (HMIPv6). Internet Draft, work in progress, June 2003. draft-ietf-mipshop-hmipv6-00.txt.
- [123] J. Solomon. *Mobile IP the Internet Unplugged*. Prentice Hall, 1997.
- [124] W. R. Stevens. *TCP/IP Illustrated, Volume 1*. Addison Wesley, 1994.
- [125] R. Stewart, M. Ramalho, Q. Xie, M. Tuexen, I. Rytina M. Belinchon, and P. Conrad. Stream Control Transmission Protocol (SCTP) Dynamic Address Reconfiguration. Internet Draft, work in progress, September 2003. draft-ietf-tsvwg-addip-sctp-08.txt.
- [126] R. R. Stewart, Q. Xie, K. Morneault, C. Sharp, H. J. Schwarzberger, T. Taylor, I. Rytina, M. Kalla, L. Zhang, and V. Paxson. RFC 2960: Stream Control Transport Protocol, October 2000.
- [127] A. Talukdar, B. Badrinath, and A. Acharya. MRSVP: A Resource Reservation Protocol for an Integrated Services Packet Network with Mobile Host. Technical Report DCS-TR-337, Rutgers University, 1997.
- [128] A. Talukdar, B. Badrinath, and A. Acharya. Integrated Services Packet Network with Mobile Hosts: Architecture and Performance. *Kluwer Wireless Networks (WINET)*, 5(2):111–124, March 1999.

- [129] A. Talukdar, B. Badrinath, and A. Acrarya. MRSVP: A Resource Reservation Protocol for an Integrated Services Network with Mobile Hosts. *Kluwer Wireless Networks (WINET)*, 7(1):5–19, January 2001.
- [130] QBone Signaling Design Team. Final report, 2001. <http://qbone.internet2.edu/bb/>.
- [131] S. Tekinay and B. Jabbari. Handover and Channel Assignment in Mobile Cellular Networks. *IEEE Communications Magazine*, 29(11):42–46, November 1991.
- [132] S. Tekinay and B. Jabbari. A Measurement-Based Prioritization Scheme for Handovers in Mobile Cellular Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 10(8):1343–1350, October 1992.
- [133] A. Terzis, J. Krawczyk, J. Wroclawski, and L. Zhang. RFC 2746: RSVP Operation over IP Tunnels, January 2000.
- [134] A. Terzis, M. Srivastava, and L. Zhang. A Simple QoS Signaling Protocol for Mobile Hosts in the Integrated Internet. In *IEEE/ACM INFOCOM*, pages 1011–1018, New York, March 1999.
- [135] A. Terzis, L. Zhang, and E. Hahne. Making Reservations for Aggregate Flows: Experiences from an RSVP Tunnels Implementation. In *IEEE/IFIP International Workshop on Quality of Service (IWQoS)*, Napa Valley, California, May 1998.
- [136] M. Thomas. Analysis of Mobile IP and RSVP Interactions. Internet Draft, work in progress, October 2002. draft-thomas-nsis-rsvp-analysis-00.txt.
- [137] S. Tilak and N. Abu-Ghazaleh. A Concurrent Migration Extension to an End-to-End Host Mobility Architecture. *ACM Mobile Computing and Communications Review*, 5(3):26–31, July 2001.
- [138] N. Tripathi, J. Reed, and H. VanLandigham. Handoff in Cellular Systems. *IEEE Personal Communications*, 5(6):26–37, December 1998.
- [139] H. Tschofenig, H. Schulzrinne, R. Hancock, A. McDonald, and X. Fu. Security Implications of the Session Identifier. Internet Draft, work in progress, June 2003. draft-tschofenig-nsis-sid-00.txt.
- [140] C-C. Tseng, G-C. Lee, and R-S. Liu. HMRSVP: A Hierarchical Mobile RSVP Protocol. In *International Workshop on Wireless Networks and Mobile Computing (WNMC2001)*, April 2001.

- [141] C-C. Tseng, G-C. Lee, R-S. Liu, and T-P. Wang. HMRSVP: A Hierarchical Mobile RSVP Protocol. *Kluwer Wireless Networks (WINET)*, 9(2):95–102, March 2003.
- [142] S. Vaarala, ed. Mobile IPv4 Traversal Across IPsec-based VPN Gateways. Internet Draft, work in progress, September 2003. draft-ietf-mobileip-vpn-problem-solution-03.txt.
- [143] D. Vali, S. Paskalis, and A. Kaloxylos. A SIP-based Method for Intra-Domain Handoffs. In *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) Fall*, Orlando, FL, USA, October 2003.
- [144] D. Vali, S. Paskalis, A. Kaloxylos, and L. Merakos. An Efficient Micromobility Solution for SIP Networks. In *IEEE GLOBECOM*, San Francisco, CA, USA, November 2003.
- [145] A. Valko. Cellular IP, A New Approach to Internet Host Mobility. *ACM Computer Communication Review*, 29(1):50–65, January 1999.
- [146] J. Walrand. *Communication Networks: A First Course*. Mc Graw-Hill, 2nd edition, 1998.
- [147] R. Wolff. *Stochastic Modeling and the Theory of Queues*. Prentice Hall, 1989.
- [148] J. Wroclawski. RFC 2210: The Use of RSVP with IETF Integrated Services, September 1997.
- [149] J. Wroclawski. RFC 2211: Specification of the Controlled-Load Network Element Service, September 1997.
- [150] L. Zhang, S. Deering, D. Estrin, S. Shenker, and D. Zappala. RSVP: a New Resource ReSerVation Protocol. *IEEE Network*, 7(5):8–18, September 1993.
- [151] X. Zhao, C. Castelluccia, and M. Baker. Flexible Network Support for Mobile Hosts. *Kluwer Mobile Networking and Applications (MONET)*, 6(2):137–149, 2001.